REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Energie renouvelable
Spécialité : Energie renouvelable en mécanique

L'EFFET DU GRADIENT DE VENT ET DE LA TOUR SUR LA PUISSANCE PRODUITE PAR UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

Présenté par :

MAKHLOUFI ISHAK

CHABOUTI NOUR EDINE

Proposé et Dirigé par :

Dr. HENINI NOUR EDINE

Promotion 2019

ملخص :

تقدم المذكرة تحليلًا لعزم الدوران الديناميكي الهوائي الناتج عن توربينات الرياح ثلاثية الشفرات، بما في ذلك تأثيرات قوى قص الرياح وتظليل البرج.

تم إجراء دراسة حول نظام الهواء الديناميكي لتوربينات الرياح. تم تطوير تحليل لتذبذبات عزم الدوران في التوربينات الريحية ذات الشفرة الثلاث للمحاكاة.

الكلمات المفتاحية – قوى قص الرياح ، تظليل البرج ، ذبذبات عزم الدوران ، التوربينات الريحية ذات الشفرة الثلاثة.

Résumé :

Le mémoire présente une analyse du couple aérodynamique généré d’une éolienne à trois pales, y compris les effets de cisaillement du vent et l’ombrage de la tour.

Une étude de système aérodynamique de la turbine éolienne a été effectuée. Une Analyse des oscillations de couple dans l'éolienne à trois pales Pour la simulation a été développée.

Mots clés — cisaillement du vent, ombrage de la tour, Oscillations de couple, éolienne à trois pales.

Abstract :

The thesis presents an analysis of the aerodynamic torque generated from a three-bladed wind turbine, including the effects of wind shear and shading of the tower.

An aerodynamic system study of the wind turbine was carried out. An analysis of torque oscillations in the three-bladed wind turbine For the simulation was developed.

Key words - wind shear, tower shading, torque oscillations, three blade wind turbine.

REMERCIMENT

Ce mémoire n'aurait été possible l'aide de dieu que nous Patience durant toutes ces années d'études et que grâce a lui ce travail a pu être réalisé

Nous tenons à remercier très vivement Monsieur henini nouredinne, Professeur à l'université de médea, de nous avoir proposé le sujet, et de son aide précieux qu'elle a toujours bien voulu nous apporter

et Pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail, pour sa disponibilité ainsi de nous avoir fait bénéficier de ses compétences

Nous adressons notre vif remerciement aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidés de prés ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICACES

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos parents.

Nos frères et soeurs.

Nos proches

Tout Nos amis (e).

SOMMAIRE

ملخص …….……..... I
Remerciements……...II
Dédicaces…….. III
Liste des figures…….….IV
Tableau des symboles ……...VI
Introduction générale…….....1
Chapitre I:
Généralité sur l'énergie éolienne
I.1. Introduction 4
I.2. Historique.....4
I.3. L'éolienne dans le monde : 5
I.3.1.Potentiel du vent en Algérie 6
I.4. Constitution d'une éolienne.....7
I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne 8
I.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne 9
I.6.1. Les avantages.....10
I.6.2.Les inconvénients 11
I.7. Les différents types d'éoliennes 11
I.7.1. Les éoliennes à axe vertical.....11
I.7.2. Les Eoliennes à axe horizontale.....12
I.7.2.1.Eolienne a vitesse constante (FIX).....13
I.7.2.2.Eoliennes a vitesse variable.....14
I.8.les éoliennes à axe horizontal en ≪ amont ≫ ou en ≪ aval ≫.....14
I.9. Catégories des éoliennes à axe horizontal.....15
I.10. Régulation mécanique de la puissance.....15
I.11. Performance des éoliennes 16
I.12.Répartition des pressions.....16
I.13. Aspects Economiques de l'Eolienne.....17

SOMMAIRE

I.14. Conclusion.....18

Chapitre II:

Etude aérodynamique de la turbine d'éolienne

II.1 Introduction :.....20

II .2 Le vent et ses caractéristiques :.....20

II .2.1 Le vent :.....20

II.2.2 Caractéristiques du vent.....21

II.3. Puissance d'une éolienne :.....22

II.3.1 La puissance maximale récupérable :.....22

II.3.2 Puissance utilisable :.....24

II.3.3 La puissance utile d'une éolienne :.....24

II.4 Configuration des pales :.....25

II .5 Les charges de vents agissant sur le rotor :.....26

II.5.1 Interaction Pale/Vent :.....28

II.5.2Théorie des ailes :.....28

II.5.3 Vitesse Induite :.....32

II.5.4 Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement:.....33

II.6. Profil de Torsion :.....34

II.7. Conclusion :.....36

Chapitre III

Analyse des oscillations de couple dans l'éolienne à trois pales

III .1 INTRODUCTION:.....38

III.2. SYSTÈME DE CONVERSION DU VENT:.....38

III .3. TRANSFORMATION D'ENERGIE CINETIQUE DU.....39

III .3.1.Effet de cisaillement du vent:.....39

III.3.2. Présence de la tour:.....41

III.3.3. vitesse équivalente du vent:.....45

III.4. OSCILLATIONS DE COUPLE.....46

SOMMAIRE

III.5. CONCLUSION:.....47

Conclusion générale……...……48

Bibliographique…….…….49

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Page

Figure(I.1): Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010……..6
Figure (I.2): L'énergie éolienne mondiale (MW)……6
Figure(I.3):Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé
à 10 m d'altitude du sol……..7
Figure(I.4) : Constitution d'une éolienne à axe horizontale……....8
Figure (I.5): Conversion de l'énergie cinétique du vent……..9
Figure (I.6) : Eolienne à axe vertical de type Savonious……...12
Figure(I.7) : Eolienne à axe vertical de type Darrieus……...…12
Figure (I.8) : les différentes éoliennes à axe horizontales…….....13
Figure (I.9) : Les éoliennes Offshore……..…...13
Figure (I.10) : Les éolienne On shore……13
Figure (I.11): Fonctionnement des éoliennes en amont (*a*) et en aval (*b***)**…….….15
Figure. (I.12): les forces de suppression –dépression exercée sur une pale……..….17

Chapitre II:

Figure (II.1): Séquence de vent mesuré sur un site et sa distribution…….22
Figure (II.2): Courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction
Des vitesses du vent……....23
Figure. (II.3): Représentation schématique des pertes successive de puissance éolienne…..….25
Figure (II .4): Définition de l'angle azimutal…….….25
Figure (II.5): Tube de courant du vent……....26
Figure (II 6): Evolution du coefficient de puissance……..….27
Figure(II.7): Section d'une pâle d'éolienne……....…28
Figure (II -8): Forces agissant sur une aile……...…28
Figure (II.9): Force agissant sur une pale d'éolienne…….....29
Figure(II.10): Forces axiale et tangentielle dans le repère générale……..…..30
Figure (II .11): Forces axiale et tangentielle dans le référentiel de la pale……...……31
Figure (II.12): Triangle des vitesses……..…..32
Figure (II.13): Schéma d'écoulement…….…..…33
Figure (II.14): correction du coefficient de portance…….....…33
Figure (II.15): Vitesse induite…….…...…..34

Figure. (II.16): Evolution de l'angle de torsion la langue de pale……...….35
Figure.(II.17): variation de la vitesse relative V_{rel} , la Vitesse tangentielle V_1 et la Vitesse du vent incident V_0 par rayon de la pale……..……35
Figure :(II.18) charger la répartition le longe de la lame …….....36

Chapitre III:

Figure. (III.1) : Schéma simplifié d'une éolienne horizontale à trois pales……..….38
Figure. (III.2): Distribution de la vitesse du vent vs du relief et de l'altitude…….....39
Figure (III.3): variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude par rapport au sol…...….40
Figure (III.4): variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor avec Prise en compte de l'effet de cisaillement du vent……..…...41
Figure. (III.5): Perturbation de la tour en fonction de la distance entre la pale et le centre de la tour…….....42
Figure.(III.6): variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor avec Prise en compte de l'effet d'ombre de la tour (modèle 1) avec une distance différente entre la tour et les pales…….43
Figure. (III.7): variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor Avec prise en compte de l'effet ombre de la tour (modèle avec r, thêta) avec différents Distance entre la tour et les pales…….…....44
Figure. (III.8): variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor Avec prise en compte de l'effet d'ombre de la tour (modèle 2) avec différents r……...…...45
Figure. (III.9): vitesse du vent équivalente en raison de l'ombre de la tour, du cisaillement Du vent et combinaison du cisaillement du vent et de l'ombre de la tour…….46
Figure. (III.10): Couple aérodynamique normalisé dû à l'ombre de la tour, du vent Cisaillement, et combinaison de cisaillement du vent et de l'ombre de tour…….47

TABLEAU DES SYMBOLES

Symbole	Dénomination	Unit
S	Section / Surface balayée par le rotor éolien	[m^2]
B	Nombre de pale	[-]
C_L	Coefficient de portance	[-]
C_D	Coefficient de trainée	[-]
C_{DI}	Coefficient de trainée induit	[-]
C_P	Coefficient de puissance	[-]
F_A	Force Axial	[N]
F_T	Force Tangentielle	[N]
FAblade	Force Axiale dans le repère de la pale	[N]
FTblade	Force Tangentielle dans le repère de la pale	[N]
F	Correction liée aux pertes d'extrémité	[-]
F_L	Force de portance	[N]
F_D	Force de trainée	[N]
R	Longueur de la pale	[m]
Vax	Vitesse résultante axiale de l'écoulement	[m/s]

V_{tan}	Vitesse résultante tangente de l'écoulement	[m/s]
$V_{ax\infty}$	Vitesse résultante axiale de l'écoulement à l'aval de l'écoulement	[m/s]
$V_{tan\infty}$	Vitesse résultante tangentielle de l'écoulement à l'aval de l'écoulement	[m/s]
V_1	Vitesse tangentielle	[m/s]
V_{rel}	Vitesse relative	[m/s]
V_0	Vitesse du vent incident	[m/s]
V_{bas}	Vitesse de référence.	[m/s]
V	Vitesse moyenne de l'écoulement	[m/s]
a_x	Facteur d'induction axial	[-]
a_t	Facteur d'induction tangentielle	[-]
σ	Contrainte	[MPa]
i	Angle de torsion	[Rad]
γ	Angle d'attaque	[Rad]
γ_{opt}	Angle d'attaque optimale	[Rad]
Ω	Vitesse angulaire	[rad/s]
ρ	Densité de l'air	[Rad]

TABLEAU DES SYMBOLES

θ	Angle azimutal de la pale	[Rad]
δ	Contrainte	[MPa]
Ø	Angle V_{rel} et V_1	[Rad]
p	puissance	[W]
r_P	Abscisse dans le repère de la pale	[m]
Z	l'altitude au-dessus du sol	[m]
α	le coefficient empirique caractéristique du lieu.	[-]
c	Corde	[m]
r	distance radiale de l'axe du rotor	[m]
Ws (r,θ)	la perturbation vue dans vitesse du vent due au cisaillement du vent	[N.m]
Vt (y, x)	la perturbation observée dans la vitesse du vent due à l'ombrage de la tour	[N.m]
V0	la vitesse spatiale moyenne du vent	[m/s]
ɑ	le rayon de la tour	[m]
Y	la distance latérale de la pale à la tour	[m]
X	la distance entre l'origine de la lame et la tour médiane.	[m]
PU	La puissance utilisable	[W]

V_{eq}	vitesse du vent équivalente	[m/s]
ρ_v	Masse volumique de l'air	[kg/m3]
T_{aero}	couple aérodynamique	[N.m]
H	La hauteur	[m]
VH	la vitesse du vent à la hauteur du moyeu H	[m/s]
$P_{Récupérable}$	la puissance récupérable	[W]
Ec	Energie cinétique	[joules]
m	Masse du volume d'air	[kg]
$P_{théorique}$	Puissance théorique	[W]
η	Le rendement d'une éolienne	[-]
Pn	La puissance nominale	[W]
V_n	la vitesse nominale	[m/s]
dr	Epaisseur d'une anneau de rayon r	[m]

Introduction générale

Les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie éolienne qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement. Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale. Il y a Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal). Et aussi différents configurations d'un système éolienne (à vitesse fixe et a vitesse variable).

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales d'une éolienne, multiplicateur de vitesse…ect).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (générateur électrique piloté par une électronique de commande et de puissance...ect)**. [1]**

La puissance produite par des éoliennes varie de l'une à l'autre en fonction de leurs caractéristiques et d'autres facteurs les affectant comme les effets de cisaillement du vent et l'ombrage de la tour.

Le but de ce mémoire est l'étude de l'effet de gradient du vent et de la tour sur la puissance produite par une éolienne à axe horizontale, notre travaille présente une analyse du couple aérodynamique généré d'un éolienne à trois pales.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques généralités sur l'énergie éolienne, l'histoire, les éoliennes dans le monde, la composition des éoliennes, un bref aperçu des différents types d'éoliennes et le principe de fonctionnement à la fin de ce chapitre. aspects économiques des éoliennes.

Le deuxième chapitre on présentera l'étude aérodynamique de la turbine éolienne dans ce chapitre on étude l'aérodynamique de la turbine d'éolienne par le vent et ses caractéristiques puissance d'une éolienne. les charges du vent agissant sur le rotor et finale le chapitre par profil de torsion.

Le dernier chapitre est consacré pour l'analyse des oscillations de couple dans l'éolienne à trois pales. On présentera une système de conversion du vent et transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par l'effet de cisaillement du vent et de la tour et la vitesse équivalente du vent.

Enfin en conclusion le module (matlab / Simulation.) nous a permis de simuler des oscillations de couple dans l'éolienne à trois pales où on prouve l'apport des effets de cisaillement du vent et l'ombrage de la tour sur le couple aérodynamique et quand on obtient un couple maximum.

Chapitre I:

Généralite sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable issue du vent, et les éoliennes sont une machine qui utilise la force motrice du vent. Cette puissance peut être utilisée de manière mécanique (pompage d'éoliennes) ou électrique (éolienne).

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (éoliennes à axe vertical ou à axe horizontal) et présentent des caractéristiques. Principe de fonctionnement. et des déférent Catégories.

I.2. Historique

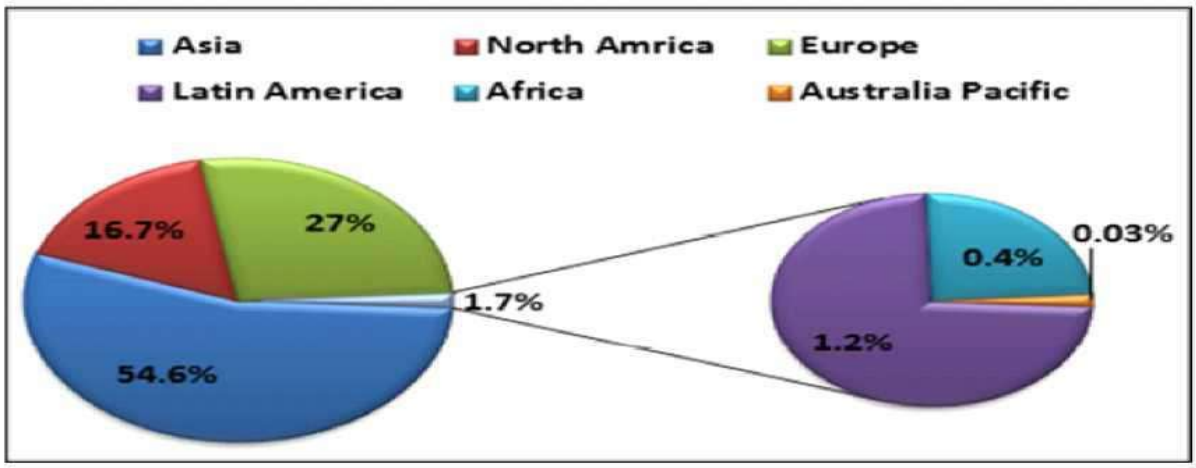
Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moudre des grains depuis le 7ème siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. A partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12ème et le 19ème siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19ème siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moudre des grains mais aussi pour le pompage d'eau. L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées **[4].** Par ailleurs, la construction d'éoliennes multi-pales
Ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante
Alors, sous le non de moulin américain. Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent

de plus en plus délaissée et son avenir très compromis **[5].** Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années, la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW et le reste des pays européen 3873 MW. La puissance installée : en Amérique du nord est de 6677 MW, en Amérique du sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au Moyen Orient 150 MW **[4].** Avec certains projets d'énergie éolienne développés (au large des côtes), de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix aussi concurrentiel que celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon).

I.3. L'éolienne dans le monde :

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à l'effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence des politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies, car les éoliennes n'émettent pas le dioxyde de carbone**. [26]** Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

Les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de L'amélioration des puissances, performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes, Le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.



Figure(I.1): Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010 **[4].**

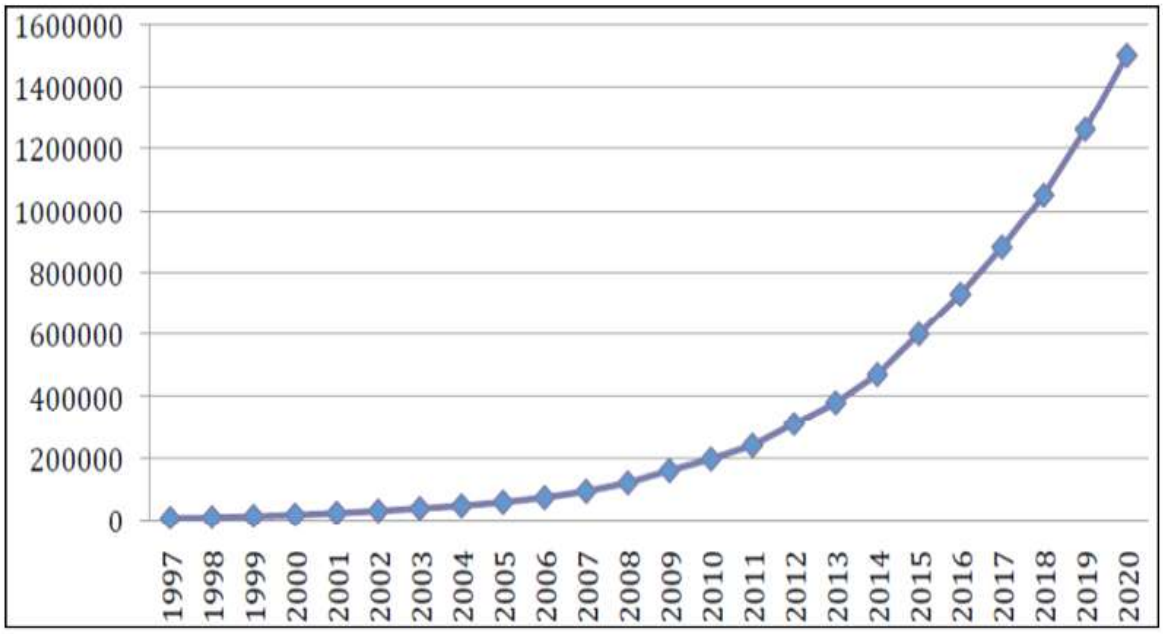


Figure (I. 2): L'énergie éolienne mondiale (MW) **[4].**

I.3.1.Potentiel du vent en Algérie

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.2 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/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 microclimats, à savoir autour d'Oran, 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- Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s).

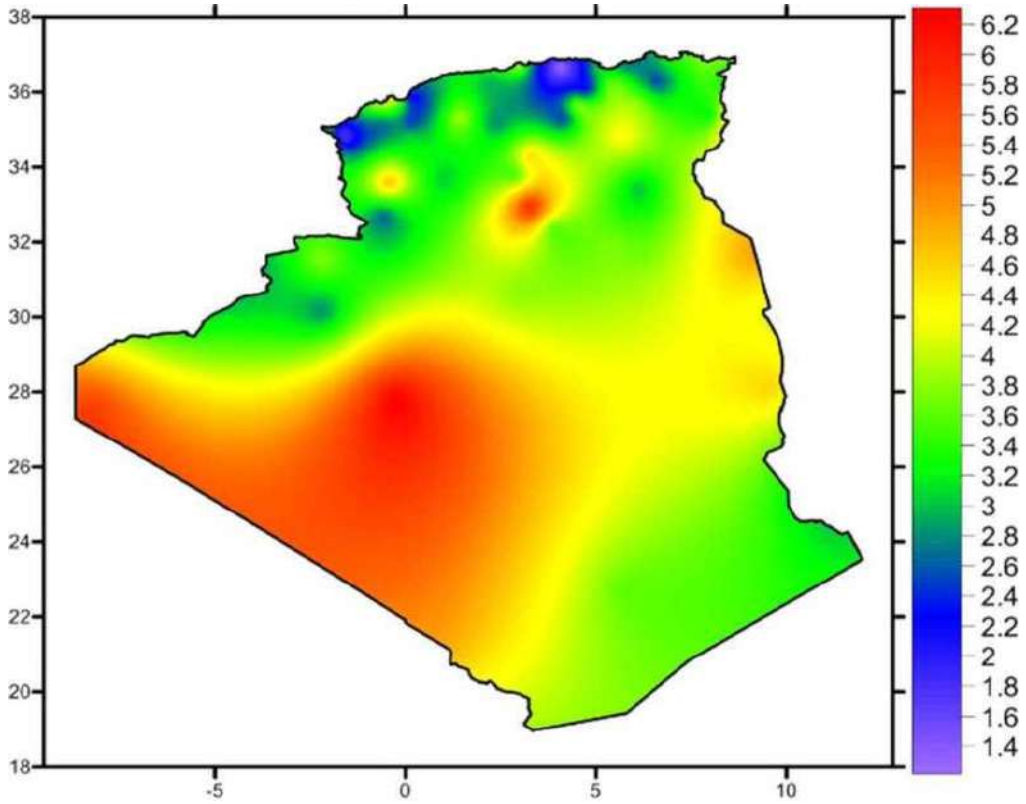


Figure. (I.3): Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m D'altitude du sol [27].

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses du vent variantes de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.2 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tindouf et Oran. **[27]**

I.4. Constitution d'une éolienne

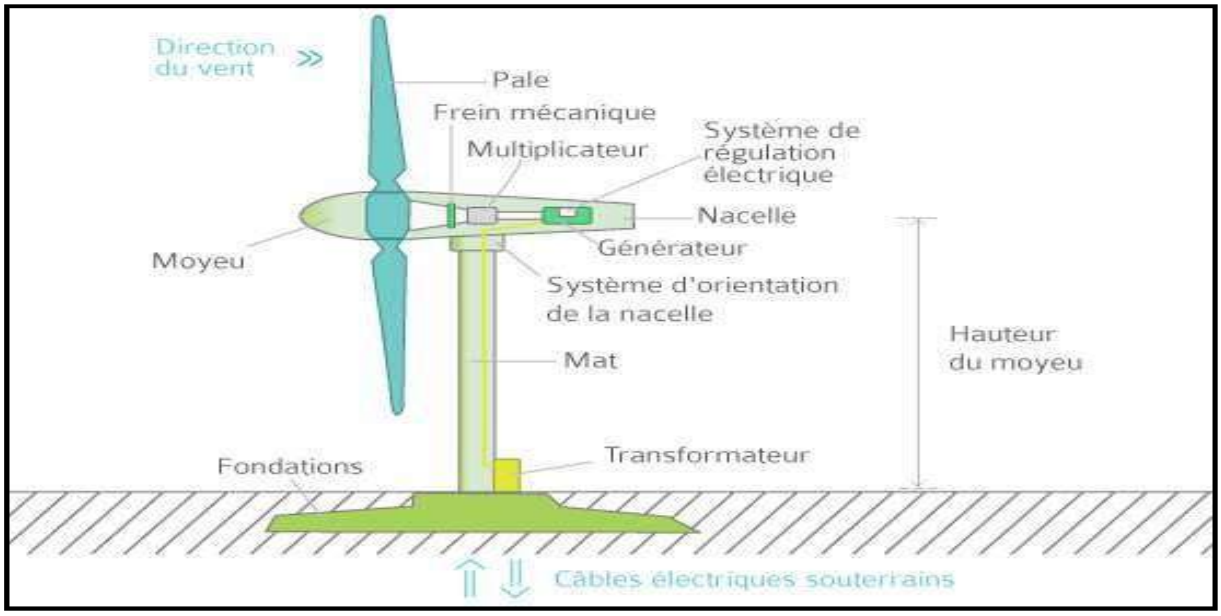
Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée des composants suivant :

- **le mât** : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons…Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle Et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor **[6].**

- **Le rotor** : composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor **[6].**
- **La nacelle :** montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine.

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne **[6].**



Figure(I.4) : Constitution d'une éolienne à axe horizontale **[6].**

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée en puissance électrique par une génératrice **[2].**

D'une manière générale**,** un tel système de conversion est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice électrique, généralement triphasée**,** et d'un circuit d'électronique de puissance. Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome **[13].**

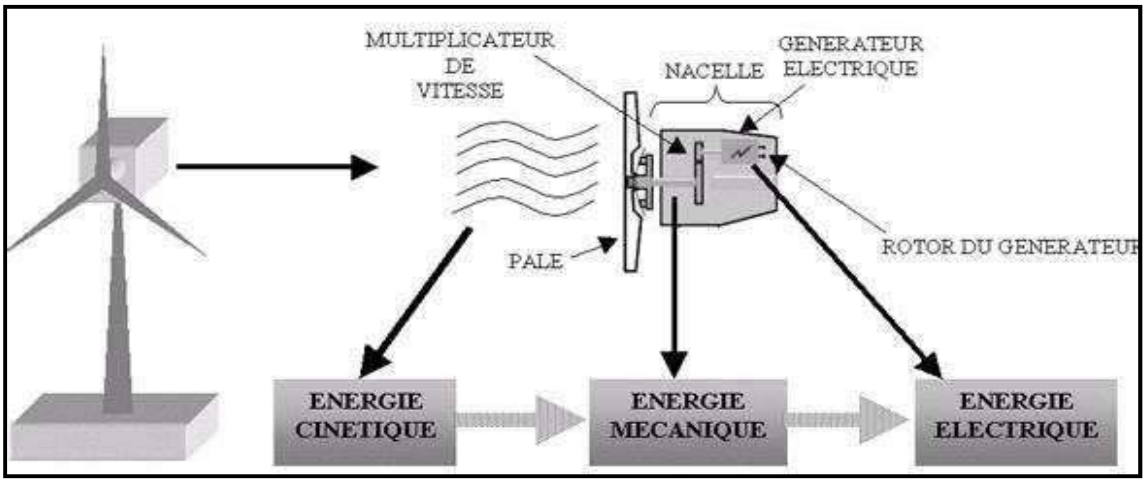


Figure (I.5): Conversion de l'énergie cinétique du vent **[13].**

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient 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 de vents plus modérés et Plus réguliers. 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 à 1,5 MW, mais Les éoliennes de la Nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs **[14].**

I.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.6.1. Les avantages

• L'énergie éolienne est une énergie propre, fiable, économique, écologique, gratuite et inépuisable.

• on ne peut pas envisager de remplacer totalement les ressources traditionnelles d'énergie.

• L'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO2, etc. ….

• Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne des émissions de CO2 rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.

• Parmi toutes les sources de la production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.

• L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent être facilement arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

• Les parcs éoliens se démontent très facilement et ils ne laissent pas de trace.

• C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

• La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable aux nombreuses d'autres technologies de production d'énergie conventionnelles.

• C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables, le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.

• Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant. **[35]**

I.6.2.Les inconvénients

• L'impact visuel : Cela reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les études réalisées montrent une réelle acceptation par les populations voisines ou visitant d'un site éolien.

• Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils.

• Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel.

• La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas donc toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

• Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien **[35].**

I.7. Les différents types d'éoliennes

I.7.1. Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de **Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur **[7].**



Figure (I.6) : Eolienne à axe vertical de type Savonious **[7].**

➢ Le rotor de **Darius**, du nom de l'ingénieur français Georges Darius qui breveta sa conception en 1931, est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Il se présente sous deux formes principales, Figure I.7, qui fonctionne selon le principe de la différence des forces de portance produites par les efforts aérodynamiques agissant sur les aubes. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer qu'à vitesse du vent assez grande. Lorsqu'elle démarre sa vitesse de rotation peut être importante puisque la vitesse du vent apparent s'ajoute à la vitesse de bout de pale pour des configurations déterminées **[8].**





Figure I.7 : Eolienne à axe vertical de type Darrieus **[8].**

I.7.2. Les Eoliennes à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes Constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales **[9]**. Figure I.8 Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamique ment à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit

toujours être orienté face au vent **[10]** Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la

Même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol **[11].**



Bipale. Tripale. Multi-pale.

Figure (I.8) : les différentes éoliennes à axe horizontales **[11].**

On distingue aussi :

- Les éoliennes terrestres dites **On shore** installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites **Off shore** installées au large des côtes.



Figure (I.9) : Les éoliennes Offshore **[11].**



Figure (I.10) : Les éolienne On shore **[11].**

I.7.2.1.Eolienne a vitesse constante (FIX)

Sont souvent munies d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du Synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance **[11].**

A) Avantage :

-Système électrique simple

-Grand fiabilité

-Non nécessité de systèmes électrique de commande

-Moins cher

B) Inconvénients :

-Une puissance extraite non optimale Ce type d'éoliennes n'offre Quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.

-L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur Asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice Asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter La puissance réactive appelée à ce réseau **[3].**

I.7.2.2.Eoliennes a vitesse variable

Sont souvent moins coûteuse car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) **[11].**

A) Avantage :

-Une meilleure extraction de l'énergie du vent **[12]**

-Augmentation du rendement énergétique

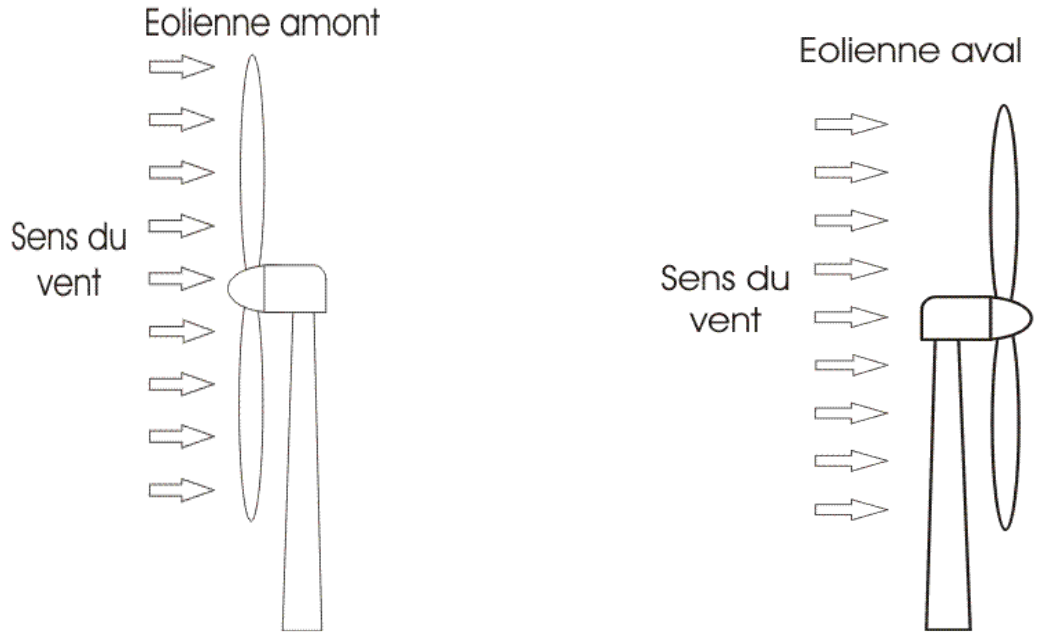
-Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance

-Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres Parties mécaniques.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient **[3].**

I.8.les éoliennes à axe horizontal en ≪ amont ≫ ou en ≪ aval ≫

Les éoliennes à axe horizontal peuvent fonctionner en ≪ amont ≫ ou en ≪ aval ≫Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement. Ils s'ensuivent qu'elles doivent être rigides pour pouvoir résister auvent. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes (Fig. I.11).



(a) (*b*).

Fig. (I.11): Fonctionnement des éoliennes en amont (*a*) et en aval (*b*) **[32].**

I.9. Catégories des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal se divisent en deux catégories: industrielles et domestiques **[32]** Les éoliennes industrielles produisent plus d'énergie et donc elles sont les plus chères. Elles sont réservées à des applications de forte puissance. Leur mat possède une hauteur de 50 à 120 m et un diamètre de 4 à 6 m. Ceci nécessite des fondations très puissantes pour soutenir l'ensemble. La hauteur totale d'une éolienne industrielle est de 25 a 180 m. Sa puissance varie entre 100 kW et 5 MW. A noter que les éoliennes qui produisent une puissance comprise entre 15 kW et 60 kW sont dites éoliennes semi-commerciales. Leur mat est compris entre 12 et 30 m. Concernant les éoliennes domestiques, celles-ci sont encore appelées petites éoliennes dont la puissance est comprise entre 100 W et 20 kW. Leur mat ne dépasse pas 12 m. Vu leur taille relativement petite, elles peuvent et réinstallées dans les zones urbaines. En plus la nuisance sonore est quasi nulle.

I.10. Régulation mécanique de la puissance

Les stratégies de commande aérodynamiques permettent d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de Vent) **[17]**. Trois systèmes de régulation existent :

- La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à Faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané Et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le

système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque Variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un Angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout Moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.

- Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "**stall control**", Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont Conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage Est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. Ce type de régulation est Utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces Mobiles et de système de régulation dans le rotor.
- Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de La régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production D'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "**Active stall**". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances **[3].**

I.11. Performance des éoliennes

La performance d'une éolienne concerne l'estimation à long terme de la production d'énergie.

Attendue sur un site donné. Les principaux facteurs qui influent sur la puissance produite par une éolienne sont (a) la force du vent qui prévaut sur le site et de sa disponibilité à la turbine(b) l'efficacité aérodynamique du rotor dans la conversion de la puissance disponible dans lèvent. Par conséquent, l'évaluation de la performance d'une éolienne est plutôt un processus complexe. La vitesse et la direction du vent à un endroit varient considérablement le temps et l'espace. Ainsi, la distribution de la force du vent a aussi une influence significative sur la performance de l'éolienne. En outre, le caractère opérationnel de la machine doit correspondre aux vitesses du vent dominant de garantir le maximum de l'exploitation de l'énergie disponible

I.12.Répartition des pressions

La fonction d'une aile, dans le cadre d'applications aéronautiques, est de générer une Portance, c'est à dire une force verticale permettant d'équilibrer la pesanteur de l'avion. Cette Force est due à la différence de pression qui s'établit entre les deux côtés de l'aile.

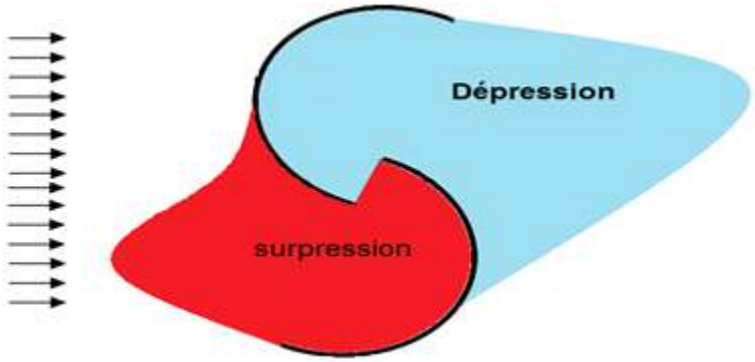


Figure. (I.12): les forces de suppression –dépression exercée sur un pale **[34].**

Nous pouvons observer deux particularités remarquables :

1- la diminution de pression sur l'extrados en valeur absolue, par contre l'augmentation de Pression sur l'intrados.

2- les pressions ne sont pas distribuées également : la diminution de pression sur l'extrados et L'augmentation de pression sur l'intrados sont plus importantes à l'avant de la pale **[34].**

I.13. Aspects Economiques de l'Eolienne

Vu les effets négatifs des carburants conventionnels sur l'environnement et leur disponibilité limitée ainsi que les questions de sûreté se sont associées à l'utilisation de l'énergie nucléaire, Les énergies renouvelables ne doivent pas être regardées d'un point de vue économique seulement. Cependant, ceci ne signifie nullement l'utilisation des sources d'énergies renouvelables "à tout prix». En effet, les prix de exorbitants de l'énergie ne sont pas acceptables pour l'industrie ou à l'économie en général. La profitabilité pour l'entreprise industrielle et pour l'économie nationale sont des aspects déterminants dans l'adoption d'une stratégie énergétique. Concernant l'énergie éolienne, deux aspects sont à prendre en considération. D'une part, il y' a l'application directe (individuelle) de l'énergie éolienne par le consommateur où le prix à la consommation reviens moins chère en comparaison aux autres formes dégénération de l'énergie électrique fournies par les distributeurs traditionnels de la puissance. Ceci est d'autant plus vrai si l'emplacement est approprié pour justifier l'investissement dans l'installation du système éolien. D'autre part, il y'a la génération et la distribution de l'énergie électrique par les grandes compagnies (SONELGAZ par exemple). Dans ce cas, beaucoup de paramètres et de contraintes économiques influencent les coûts de production de l'électricité. Ce sont ces contraintes économiques 'dures' qui ne permettent pas encore une utilisation profitable de l'énergie éolienne à grande échelle. Cependant, le potentiel de développement des turbines à vent indique que les chances pour la production d'électricité à partir des ressources éolienne pour devenir concurrentielles avec les centrales

conventionnelles sont tout à fait bonnes.

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques généralité sur l'énergie éolienne, l'histoire, les éoliennes dans le monde, le potentiel éolien de l'Algérie, la composition des éoliennes, un bref aperçu des différents types d'éoliennes et le principe de fonctionnement, et catégories d'éoliennes à axe horizontal, régulation mécanique de la puissance , À la fin de ce chapitre l'aspect économiques des éoliennes.

Chapitre II:

Etude aérodynamique de la turbine d'éolienne

II.1 Introduction

L'aérodynamique est l'étude des phénomènes induits par l'écoulement de l'air autour d'un solide. La forme des pales est étudiée pour que les éoliennes fournissent toujours plus d'électricité par vent faible et continuent de tourner pour des vents de plus en plus forts. Elles font l'objet de calculs aérodynamiques complexes afin de diminuer les turbulences et les phénomènes acoustiques créés par le choc du vent.

II .2 Le vent et ses caractéristiques

II .2.1 Le vent

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents. Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne sera environ huit fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents.

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent en effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre10 et 20 km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la « débrayer » (pales en drapeau) pour en limiter l'usure, la vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne de même l'axe de rotation de l'éolienne doit rester la majeure partie du temps parallèle à la direction du vent.

Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal (alizés par exemple).

Certains sites proches de grands obstacles sont ainsi à proscrire car le vent y est trop turbulent (arbres, bâtiments, escarpements complexes, etc.).

De manière empirique, on trouve les sites propices à l'installation d'éoliennes en observant les arbres et la végétation les sites sont intéressants s'ils sont constamment courbés par les vents. Les implantations industrielles utilisent des cartes de la vitesse des vents des atlas éoliens (là où ils existent) ou des données accumulées par une station météorologique proche.

Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne.

II.2.2 Caractéristiques du vent

L'exploitation efficace de l'énergie du vent est une tâche difficile, comme pour toutes les sources d'énergie, la problématique du rendement d'exploitation est toujours mise en jeu même si cette question s'avère spécifique dans le cas des énergies renouvelables dont le gisement est « gratuit » et durable contrairement aux sources d'énergie fossile.

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement c'est pourquoi, le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température et la hauteur de captage.

Les caractéristiques du vent déterminent non seulement la quantité d'énergie qui s'applique à la turbine mais également les contraintes de fonctionnement (turbulences, valeurs extrémales,…) qui jouent aussi sur la durée de vie. En réalité, le vent est mesuré par un anémomètre complété par une girouette qui génère les grandeurs fondamentales que sont la vitesse et la direction on utilise très souvent des distributions statistiques, telle que la distribution de Wei Bull, générées à partir de campagnes de mesures à long terme qui permettent d'offrir une vision cohérente de l'efficacité du gisement pour les études sur les aérogénérateurs. Une caractéristique importante de la ressource de vent est sa variabilité ou intermittence le vent est en effet fortement variable, tant géographiquement que temporellement en outre, cette variabilité est amplifiée par la relation cubique qui existe entre vent et puissance générée par la turbine éolienne la représentation dynamique du gisement est ainsi une problématique à part entière. Pour cela, à partir des distributions statistiques corrélées à une modélisation stochastique de la turbulence, il est possible de générer une séquence temporelle de la vitesse du vent, par exemple par inversion de la distribution. Dans la figure (II.1) nous présentons l'exemple d'une séquence de vent réelle, extraite par une méthode de classification de la vitesse du vent. **[15]** cette extraction est basée sur des donnés mesurées durant plusieurs mois sur le site en Guadeloupe.

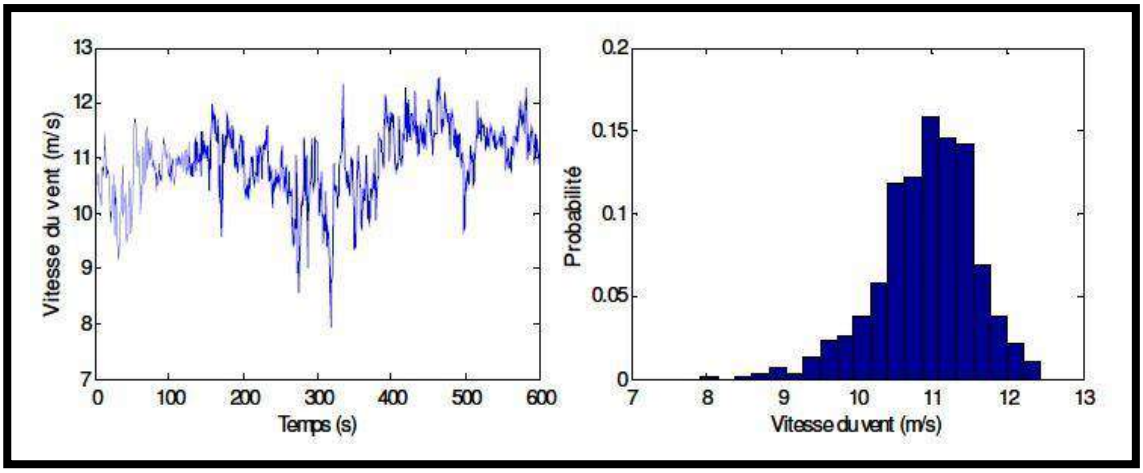


Fig (II. 1): Séquence de vent mesuré sur un site et sa distribution.

II.3. Puissance d'une éolienne

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air ρ_v : (masse de l'air par unité de volume) est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse **[16], [18].**

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

V: Vitesse instantanée du vent (m/s)

Puissance théorique du vent (disponible) contenue dans un cylindre de section S

$$P_{théorique} = \frac{1}{2} \rho_v S V^3 \quad (2)$$

ρ_v: Masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1.23 kg/m3 à 15 °C et à pression atmosphérique 1.0132 bar)

Nous voyons donc que la puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse et au carré de l'aire balayée par le rotor. Cependant il y a des limites nous allons les présenter.

II.3.1 La puissance maximale récupérable

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59.3% la limite de Betz **[16]**

$$p_{récupérable} = \frac{16}{27} P_{théorique} \quad (3)$$

Pour commencer à produire de l'énergie, une éolienne exige une vitesse de vent minimale, dite vitesse de démarrage. Pour la plupart des éoliennes modernes, cette vitesse de vent est de 3 m/s**.** Quand le vent augmente, la production augmente avec le cube de la vitesse du vent.

Pour une certaine vitesse de vent (dite vitesse nominale), la puissance qui arrive sur la génératrice est égale à la puissance maximale de cette génératrice. Il faut donc limiter la puissance pour éviter que la génératrice ne soit détruite, quand le vent est trop violent (tempête), l'éolienne doit être arrêtée : c'est la vitesse d'arrêt. Pour les vitesses de vent comprises entre la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt, la production est constante, égale à la puissance de la génératrice. La puissance est régulière au niveau du rotor. Alors Chaque éolienne admet trois paramètres techniques donnés par le constructeur qui sont les vitesses essentielles pour son exploitation (Figure II.2) :

- **La vitesse de démarrage *VD*** : la vitesse ou l'éolienne commence à produire l'énergie
- **La vitesse moyenne nominale *Vn* :** la vitesse ou l'éolienne produite une énergie maximale
- **La vitesse seuil V_M** : vitesse ou l'éolienne s'arrête.

La courbe montre que la puissance énergétique récupérable par une éolienne varie très rapidement avec la vitesse du vent. En effet, une éolienne ne délivre sa puissance nominale que dans un intervalle de vitesses du vent restreint.

• Pour les vitesses du vent autour de V_D, les pales démarrent leur rotation

• Au voisinage de *Vn*, la puissance délivrée augmente très rapidement. C'est la fourchette de croissance exponentielle de la puissance.

• Entre *Vn* et V_M, la rotation des pales est freinée par inclinaison des pales au niveau du moyeu. Cela permet à la machine d'éviter les trop fortes contraintes mécaniques dues aux très grandes vitesses. Dans cette fourchette de vitesses, l'énergie délivrée est alors constante.

• Au-delà de V_M, l'éolienne est arrêtée. C'est la vitesse de coupure.

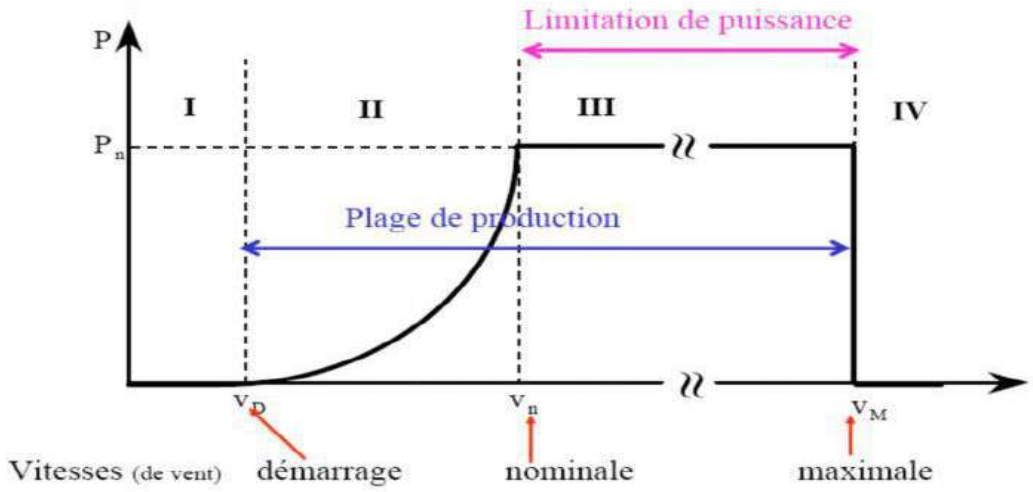


Fig. (II.2) : Courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction des vitesses du vent [32]

$$P_n = \frac{1}{2}\rho_v \, SV_n^3 \quad (4)$$

II.3.2 Puissance utilisable

Puissance utilisable prévue d'éolienne, et cela détermine la vitesse nominale de chaque appareil, et le rendement fourni par l'usine des éoliennes. Le but de tout cela est de localiser les meilleurs endroits, afin de créer un gisement d'éoliennes adaptés, et le développement de l'éolienne adapté à ce gisement, pour le profit maximum.

Le rendement d'une éolienne est :

$$\eta = \frac{P_n}{P_{théorique}} \quad (5)$$

La puissance nominale Pn sera :

$$P_n = \frac{1}{2}\rho_v \, SV_n^3 \quad (6)$$

Partant de l'équation (5) la vitesse nominale est :

$$V_n = \sqrt[3]{\eta}.V \quad (7)$$

PU : La puissance utilisable par une éolienne

$$P_U \begin{cases} 0 & V < V_D \\ \frac{1}{2}\rho_v \, SV^3 & V_D \leq V < V_n \\ \frac{1}{2}\rho SV_n^3 & \mathrm{Vn} \leq \mathrm{V} < VM \\ 0 & \mathrm{V} \geq \mathrm{VM} \end{cases}$$

Pour un rendement égal à 0.5 la vitesse nominale est Vn=0.79. V Dans ce cas la puissance utilisable est :

$$P_{utilisable} = \frac{1}{2}\rho_v SV_n^3 \quad (8)$$

II.3.3 La puissance utile d'une éolienne

La puissance utile d'une éolienne égale au produit du coefficient de puissance de l'éolienne *(η)* par la puissance récupérable par la même éolienne en fonctionnement entre sa vitesse de départ et sa vitesse de coupure.

$$P_{Utile} = \eta P_{Récupérable} \quad (9)$$

On distingue trois paramètres principaux de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité.

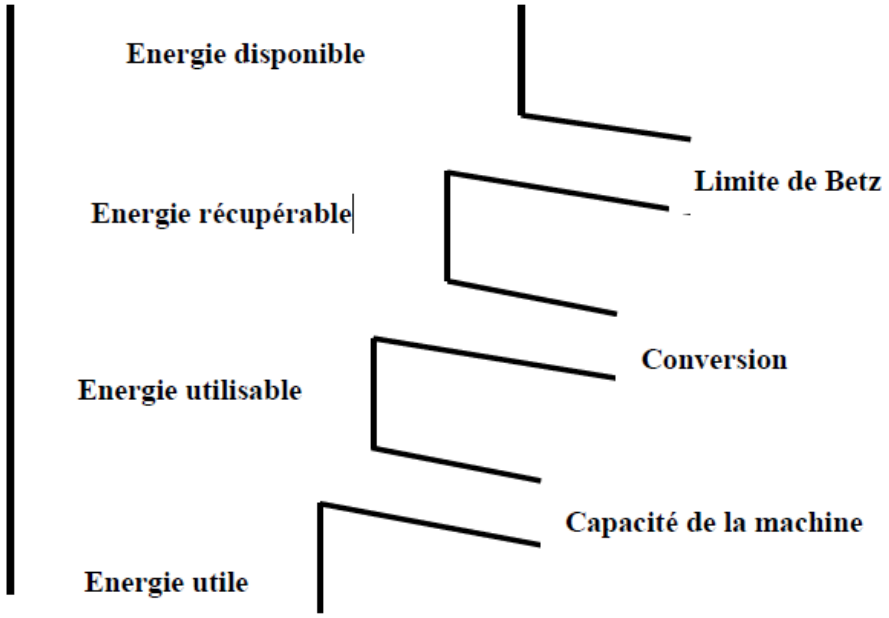


Fig. (II.3) : Représentation schématique des pertes successive de puissance éolienne

II.4 Configuration des pales

L'étude portera sur une éolienne tripale. On définit l'angle azimutal θ_i de la pale i comme étant l'angle entre l'axe principal de la pale avec l'axe horizontal passant par l'axe du rotor.

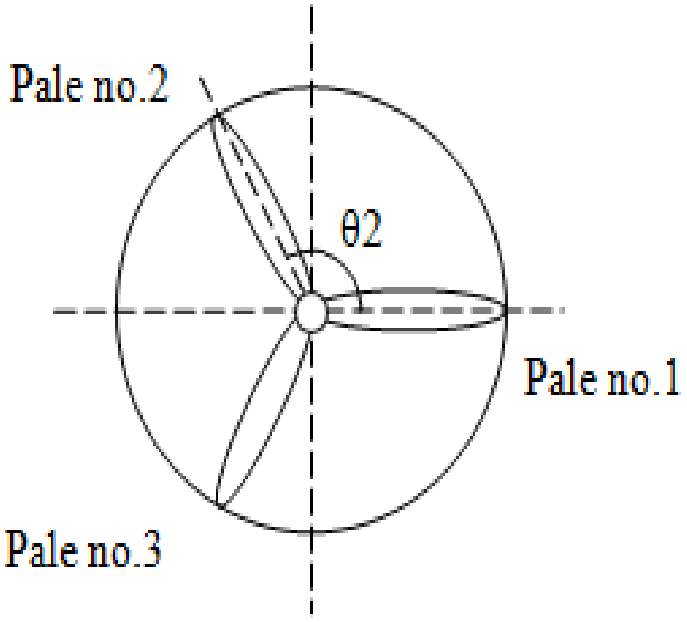


Fig (II .4): Définition de l'angle azimutal

II .5 Les charges de vents agissant sur le rotor

Le but des éoliennes est de transformer l'énergie contenue dans le vent en mouvement de rotation du rotor afin de produire de l'énergie. Avant tout, de manière à avoir une bonne description des charges de vents agissant sur le rotor, il est important de bien cerner les concepts fondamentaux de la Mécanique des fluides à la base de la rotation des pales. L'énergie dans un fluide est contenue sous quatre formes différentes: potentielle, thermodynamique, cinétique et thermique

A pression constante, seule l'énergie cinétique est extraite du vent. En supposant une vitesse constante le long de la ligne de courant lors du passage à Travers les pales du rotor (principe de conservation de la masse), l'énergie est alors extraite par une baisse de pression à travers le rotor. L'air situé juste à l'arrière du rotor possède une pression inférieure à la pression atmosphérique. La surpression au devant du rotor dévie une part de l'air incident autour de la turbine

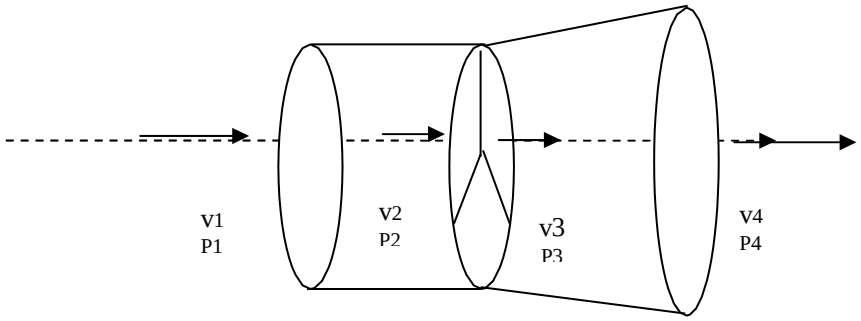


Fig (II.5) : Tube de courant du vent

P2>P1=P4>P3

V1>V2=V3

P1=P4=Patm

Partant du Principe qu'une partie de l'air incident est déviée autour du rotor, ceci implique que toute l'énergie contenue dans le vent incident ne pourra être extraite.

Albert BETZ fut le premier à déterminer la limite théorique d'efficacité d'une éolienne. Cette limite est connue sous le nom de Limite de BETZ.

Toujours suivant le principe de conservation de la masse, l'apparition d'une surpression en amont du rotor entraine une réduction de vitesse du vent incident. On peut alors définir le facteur axial d'induction a_x comme étant la proportion de la réduction de vitesse entre le vent incident est le vent passant à travers le rotor. Il est défini comme suit:

$$a_x = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \qquad (10)$$

Utilisant le principe de conservation de la masse et le théorème de Bernoulli, les relations suivantes peuvent être déduites:

$$V_2 = V_1(1 - a_x)$$

$$i.e \qquad V_2 = \frac{1}{2}(V_4 + V_1) \tag{11}$$

$$V_4 = V_1(1 - 2a_x)$$

Introduisons maintenant le coefficient de puissance *Cp*. Il représente le rapport entre l'énergie extraite et l'énergie totale contenue dans le vent. BETZ développa une expression de *Cp* en fonction du facteur axiale d'induction a_x :

$$C_P = 4a_x(1 - a_x)^2 \tag{12}$$

Le facteur optimal d'induction est 1/3.

Il permet d'atteindre un coefficient de puissance maximale de 16/27 (=0,59)

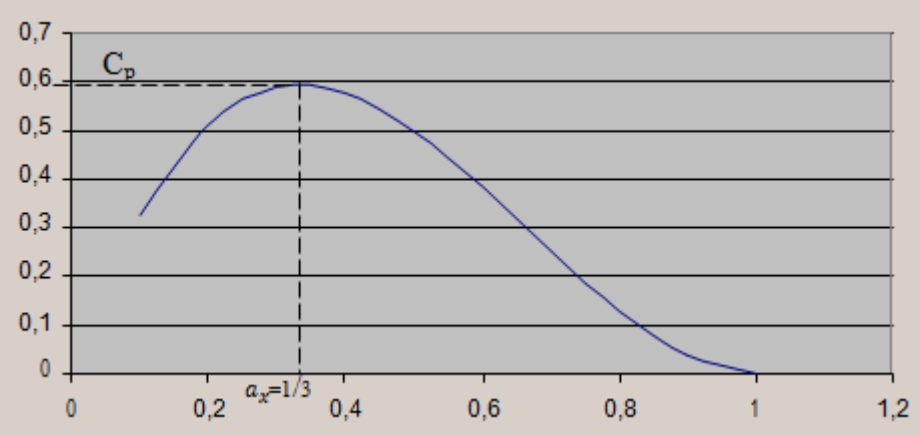


Fig (II.6): Evolution du coefficient de puissance

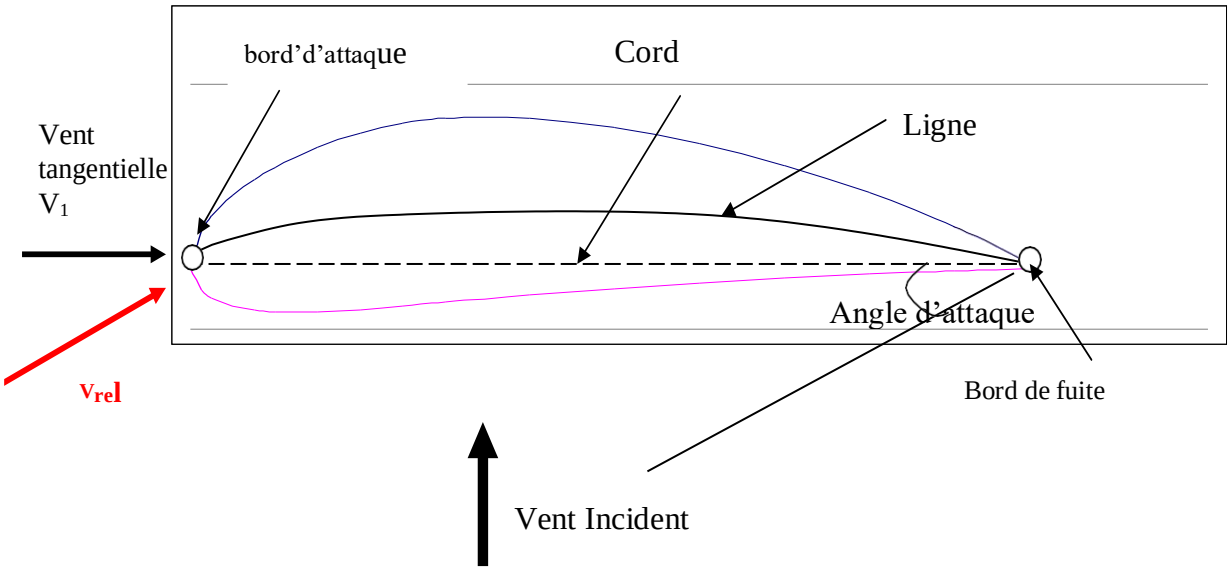
Un vent opérant à des poussées supérieures (a_x faible) implique qu'une plus grande quantité d'air est déviée et donc une baisse de l'énergie totale potentiellement exploitable. En revanche, lorsque le coefficient *a* augmente, la vitesse du vent passant à Travers le rotor diminue et donc l'énergie exploitable fonction de la vitesse au cube aussi.

Cette étude aérodynamique sommaire pose les bases d'importants concepts que l'on doit garder en mémoire.

Elle ne prend cependant pas en compte d'autres facteurs tout aussi importants comme par exemple la forme de la pale de l'éolienne, la rotation du sillon, les choix techniques portant sur la boîte de vitesse, sur l'arbre de transmission.

II.5.1 Interaction Pale/Vent

Terminologie



Fig(II.7) : Section d'une pâle d'éolienne

II.5.2Théorie des ailes

Quand un corps est plongé dans un fluide et possède un mouvement relatif par rapport au fluide dans lequel il est plongé, la traînée F_D est définie comme la composante de la force résultante, parallèle au mouvement relatif. La composante normale F_L au mouvement relatif agissant sur le corps immergé est appelée portance.

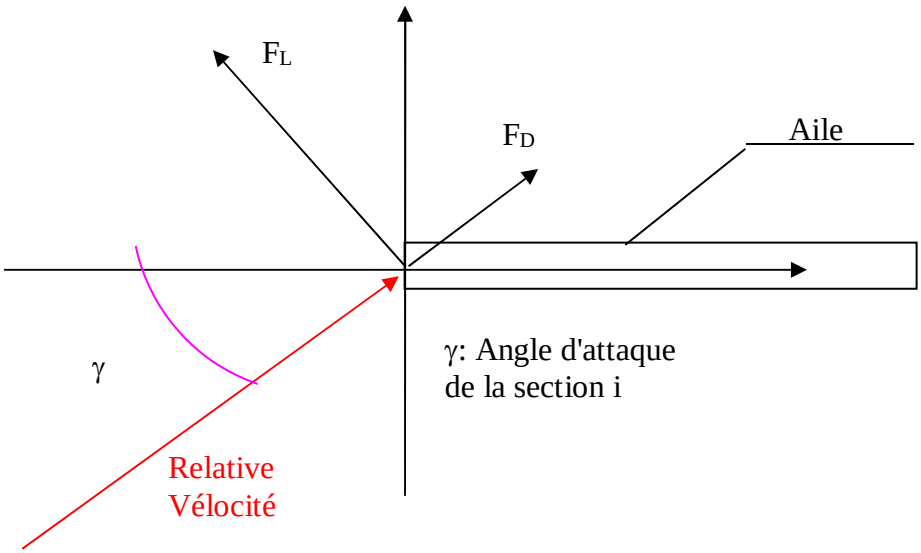


Fig (II.8): Forces agissant sur une aile

L'angle d'attaque γ est défini comme étant l'angle entre la corde de l'aile et la direction de la vitesse relative

Selon les théories classiques d'aéronautique, les forces de traînée et de portance sur une pale De géométrie donnée peuvent être décrites de la manière suivante:

$$F_L = \frac{1}{2}\rho . C_L . S . V^2$$

(13)

$$F_D = \frac{1}{2}\rho . C_D . S . V^2$$

Où ρ est la masse volumique de l'air

S est l'aire projetée du corps immergé.

C_L et C_D Sont respectivement les coefficients de portance et de traînée. Ils sont fonction de la nature et de la forme du corps immergé dans le fluide, de la valeur du nombre de Reynolds caractérisant la nature de l'écoulement et de l'angle d'attaque. Considérons maintenant une section de pale d'éolienne:

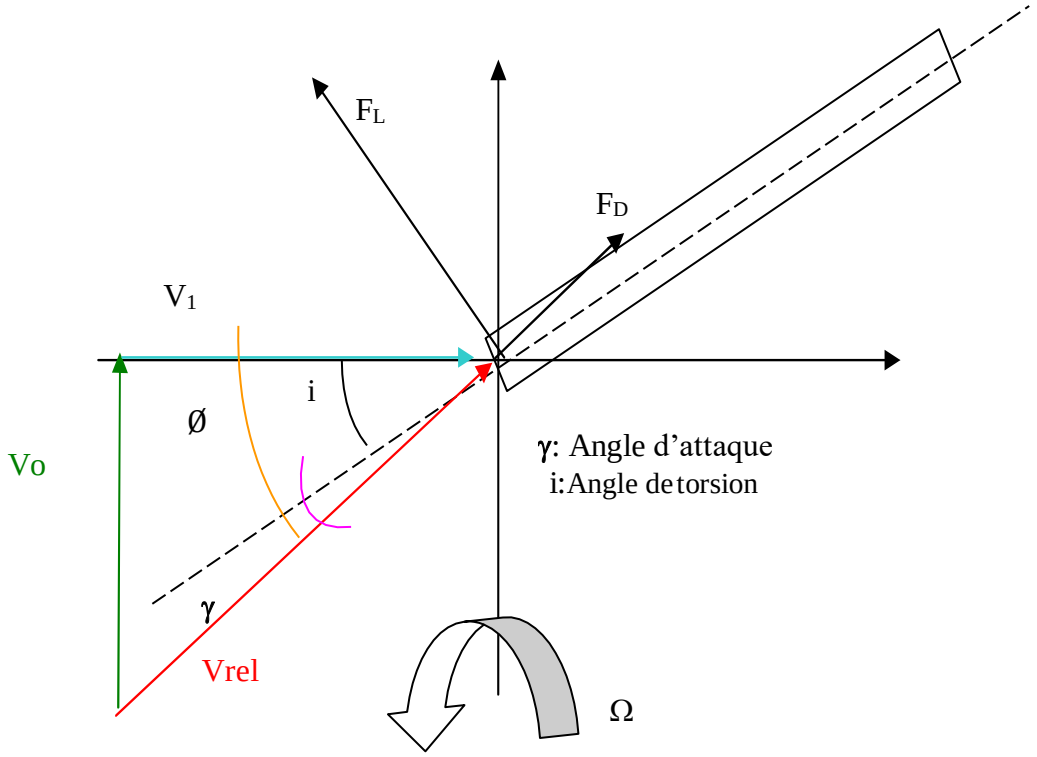


Fig (II.9): Force agissant sur une pale d'éolienne

Le vent incident est caractérisé par sa vitesse V_0. Sous l'effet de ce dernier, les pales commencent à tourner. Ceci induit la création d'un écoulement perpendiculaire au flux incident. Cet écoulement de vitesse V_1 possède une vitesse variant linéairement le long de la pale:

$$V_1 = \Omega . r_P \qquad (14)$$

La vitesse relative totale du fluide agissant sur la pale est une combinaison entre V_0 et V_1:

$$V_{rel}^2 = \Omega^2 . {r_P}^2 + V_0^2 \quad (15)$$

Les forces axiale et tangentielle peuvent être obtenues par projection dans le système de coordonnées globale cf. Figure (II.10):

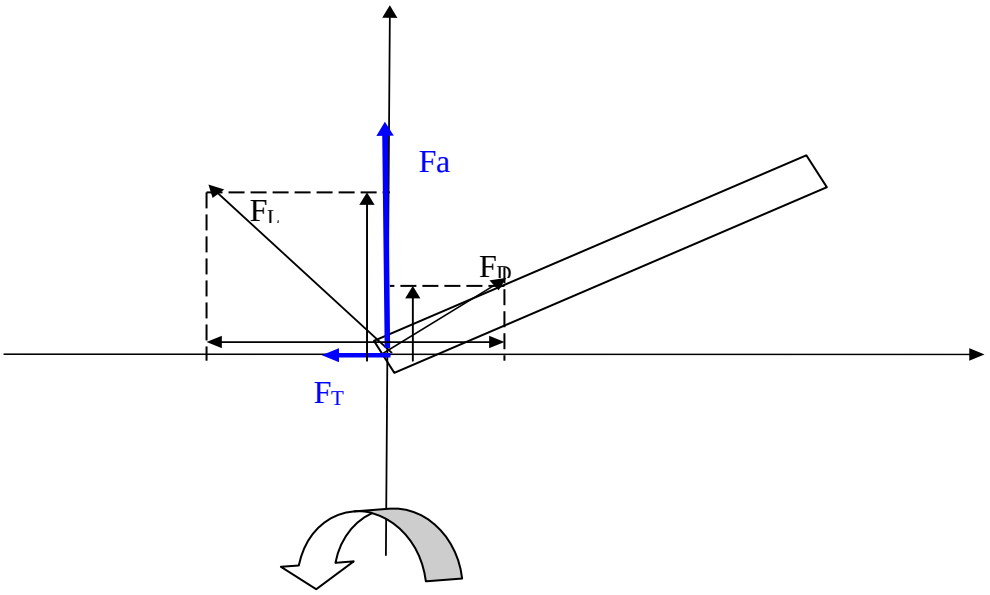


Fig (II.10): Forces axiale et tangentielle dans le repère générale.

$$F_T = F_L .\sin\emptyset - F_D .\cos\emptyset$$

$$F_a = F_L .\cos\emptyset + F_D .\sin\emptyset \quad (16)$$

La force tangentielle fournit la poussée utile sur l'arbre, la force axiale ne fait que charger la structure.

En considérant les équations (16), on peut facilement comprendre que pour augmenter la poussée sur l'arbre et donc l'énergie que l'on peut extraire du vent, il nous faut augmenter les forces de portance et diminuer les forces de traînée.

Un angle d'attaque optimum peut être défini pour maximiser le ratio entre C_L/C_D et ainsi atteindre une force tangentielle maximum.

Du fait de la variation de V_1, la direction de la vectrice vitesse relative vue par la pale aura tendance à venir tangente le vecteur V_1 en bout de pale. Ceci implique la variation de l'angle d'attaque le long de la pale. Un angle d'attaque trop petit implique des valeurs de coefficient de portance trop petites alors qu'un angle d'attaque trop important va entrainer un phénomène de palier, se traduisant aussi par une perte de portance pouvant aboutir au décrochage (local

ou global) de la pale. Cette dernière ne servira donc plus à la production d'énergie.

En pratique, on cherche à assurer un coefficient de portance maximum et constant le long de la pale en introduisant un angle de torsion i(r) dans la pale :

$$\emptyset(r') = A\cos\left(\frac{V_1(r)}{V_{rel}(r)}\right) = A\cos\left(\frac{V_1(r)}{\sqrt{V_1(r)^2+V_0^2}}\right) = \gamma + i(r) \qquad (17)$$

Assumons que $\gamma(r) = \gamma_{opt}$ = constante, alors:

$$i(r) = A\cos\left(\frac{V_1(r)}{\sqrt{V_1(r)^2+V_0^2}}\right) - \gamma_{optimum} \qquad (18)$$

On peut finalement déduire les forces agissant sur la pale, dans le repère de cette dernière.

Le but de ce rapport étant une étude structurelle, la force F_T fournissant l'énergie et ne chargeant pas la structure ne sera plus abordée par la suite.

En projetant la force axiale obtenue ans l'équation (18) dans le repère de la pale:

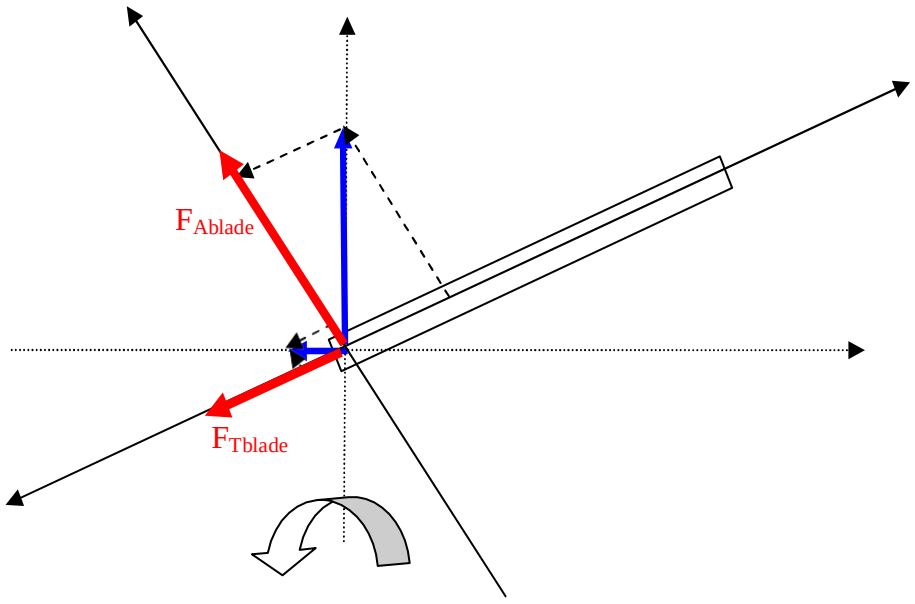


Fig (II .11): Forces axiale et tangentielle dans le référentiel de la pale.

$$F_{tblade}(r,z) = (F_L(r,z).\sin\emptyset\,(r) - F_D(r,z).\cos\emptyset(r)).\sin(i(r))$$

$$F_{ablade}(r,z) = (F_L(r,z).\sin\emptyset\theta\,(r) - F_D(r,z).\cos\emptyset(r)).\cos(i(r)) \qquad (19)$$

II.5.3 Vitesse Induite

Comme il a été vu précédemment, le facteur d'induction axiale décrit la réduction de vitesse du flux incident due aux hautes pressions régnant en amont du rotor L'énergie est extraite par un couple. Le vent exerce un couple sur l'éolienne; la poussée est un sous-produit nécessaire du couple. Les règles de la physique newtonienne stipulent que pour chaque action il existe une réaction égale, Si le vent exerce un couple sur les pales alors les pales doivent exercer un couple sur le vent. Ainsi, cette réaction va impliquer la rotation du flux d'air à l'arrière du rotor, le flux dans le sillon aura donc 2 composantes, axiales et tangentielles, le flux tangentiel est connu comme rotation du sillon. Le facteur d'induction tangentielle a_t doit être introduit pour prendre en compte la rotation relative du sillon par rapport à la pale.

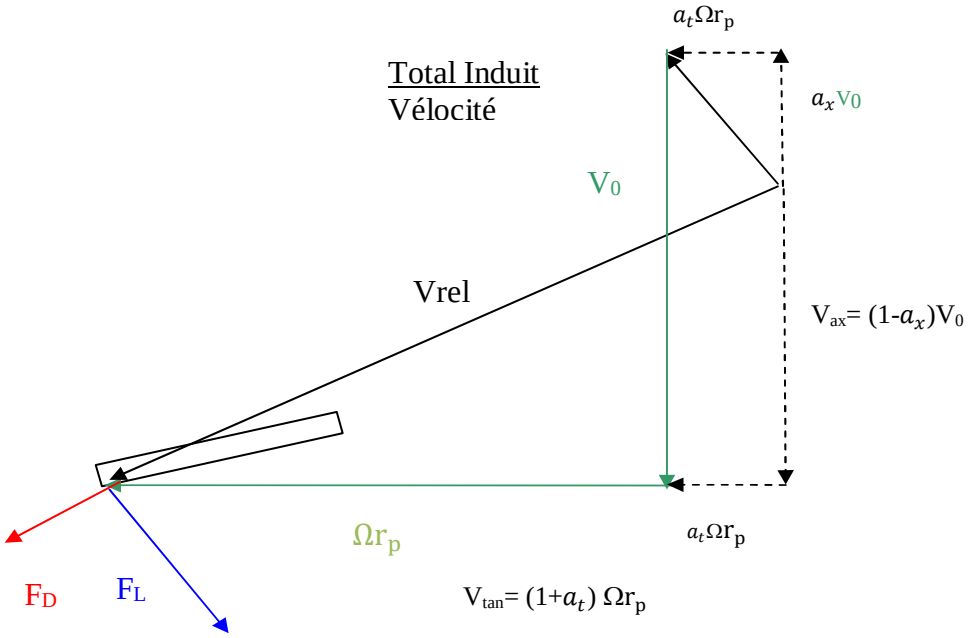


Fig (II.12): Triangle des vitesses

En vue d'augmenter l'énergie extraite, il nous faut augmenter le couple exercé sur l'arbre. Pour ce faire, la vitesse du vent incident doit augmenter. La vitesse de rotation des pales va alors croître dans les mêmes proportions, impliquant une rotation plus rapide du sillon, de ce point de vue, l'énergie dépensée pour permettre au sillon de tourner et de l'énergie qui ne sera pas transformée en électricité. On peut alors considérer que la rotation du sillon est une perte sur le plan énergétique.

Le facteur d'induction tangentielle est une fonction de l'abscisse de la pale.

$$\begin{cases} V_{ax} = (1-a_x)V_0 \\ V_{tan} = (1+a_t)\Omega r_p \end{cases} \quad Et \quad \begin{cases} V_{ax\infty} = (1-2a_x)V_1 \\ V_{tan\infty} = (1+2a_t)\Omega r_p \end{cases} \qquad (20)$$

II.5.4 Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement

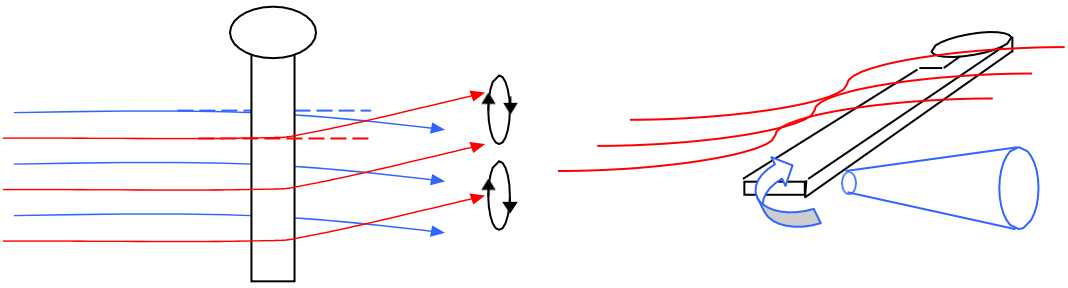


Fig (II.13): Schéma d'écoulement

Considérons maintenant l'écoulement de l'air vis à vis d'une pale en 3 dimensions, c'est à dire en considérant une pale de longueur finie, quand la pale est soumise à une force de portance, la pression sur sa face inferieure est plus importante que sur sa face supérieure. Cette différence de pression entraîne la création d'un écoulement d'air du dessous de l'aile vers le dessus, passant par l'extrémité de la pale et impliquant une perte de portance local. (Phénomène expliquant les fumées blanches observées au bout des ailes des avions en vol). La répartition de la portance le long de l'aile est donc affectée, pour prendre en compte cette perte d'efficacité, il nous faut corriger le coefficient de portance par un facteur de réduction.

Il existe deux moyens de corriger la portance, le premier est de considérer une loi de répartition elliptique le second est d'utiliser le facteur F suivant, trouvé par Prandtl **[33].**

$$F = \frac{2}{\pi} A \cos\left(exp\left(-\frac{B(R-r_p)}{2r_p \sin\theta}\right)\right) \qquad (21)$$

Le coefficient de portance doit être multiplié par F pour prendre en compte les pertes d'extrémité. F(R)=0 and F(0)=1

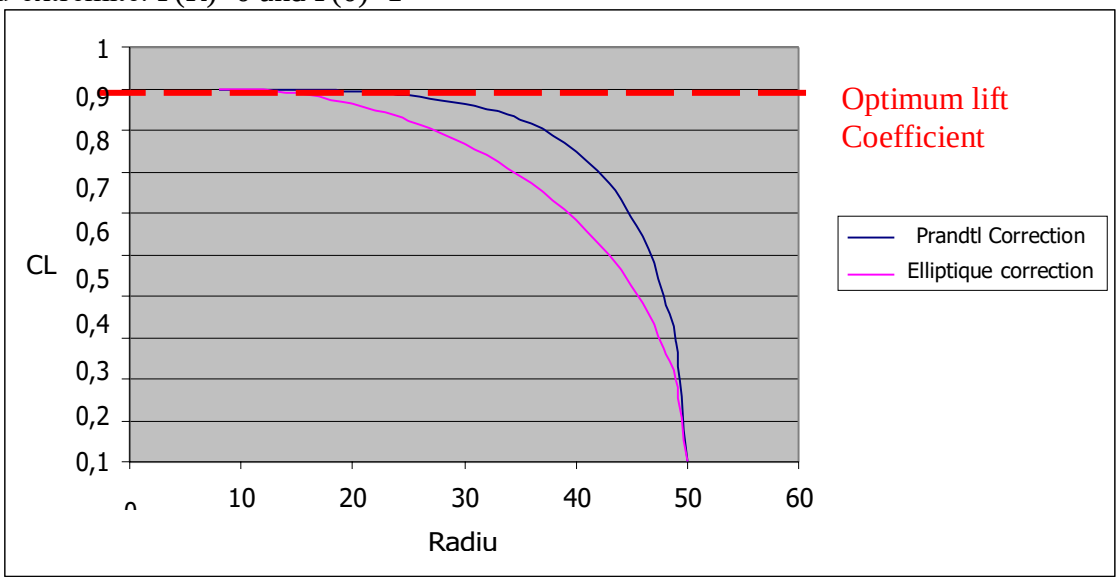


Fig (II.14) : correction du coefficient de portance.

La correction elliptique est indépendante de la position azimutale de la pale en revanche, à la vue de l'équation (21), on peut remarquer que la correction de Prandtl prend en compte la variation d'angle d'attaque et donc la position azimutale de la pale, pour une vitesse angulaire fixée et un profil de torsion de la pale donné, la vitesse relative du vent par rapport à la pale augmente au fur et à mesure que la pale s'élève pour atteindre sa position la plus élevée (CF. Profil de vent). En d'autres mots, les pertes d'extrémité augmentent vers un maximum pour un angle azimutal de 90 degrés et diminue vers un minimum pour un angle de 270 degrés.

Une autre conséquence des vortex de bout de pale est la création d'une composante de vitesse parallèle au vent incident. Cette composante est connue sous le nom de « downwash velocity » (vitesse de déflexion). Sa présence implique que la vitesse relative V_{rel} est déviée d'un angle β appelé angle d'incidence induit. Ceci implique que les forces de portance et de trainée s'appliquant sur la pale sont aussi déviée d'un angle β Pour des raisons de simplicité, il est plus aisé de travailler sans considérer l'influence de l'angle induit dans la direction des vecteurs forces et d'introduire une composante de trainée supplémentaire venant s'ajouter au composantes déjà existantes : Trainée de forme et trainée de pression.

Il peut être démontré que: $C_{DI} = \frac{cC_L^2}{2R\pi}$ (22)

Induit ⟶

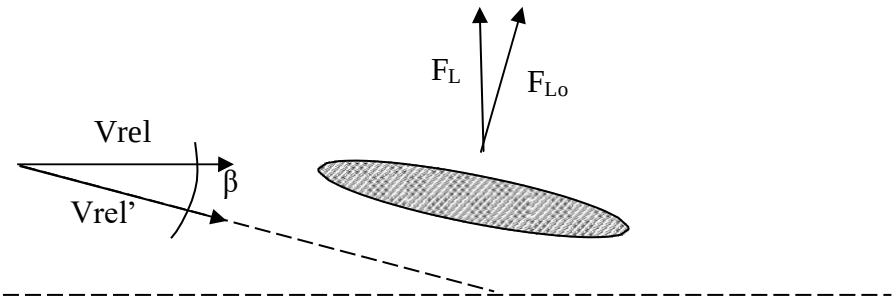


Fig (II.15): Vitesse induite

Une fois toutes les corrections effectuées, les facteurs axial et tangentiel a_x et a_t peuvent être exprimés comme suit *:*

$$\begin{cases} a_x = \dfrac{1}{\frac{4\sin^2\theta}{\sigma F C_L \cos\theta}+1} \\ a_t = \dfrac{1}{\frac{4\cos\theta}{\sigma F C_L}-1} \end{cases} \qquad Où \quad \sigma = \frac{c\,B}{2\pi r} \tag{23}$$

II.6. Profil de Torsion

En raison de la variation de vitesse du vent incident avec la hauteur il est impossible de maintenir un angle d'attaque constant lors d'une révolution complète de la pale. Le vent varie

logarithmique ment suivant l'altitude. Sur notre plage d'étude, la variation de vitesse est quasi-linéaire. On assumera que la vitesse moyenne se trouve au centre du rotor. Le profile de torsion sera déterminé en assumant un angle d'attaque constant de 5 degrés pour la position choisi.

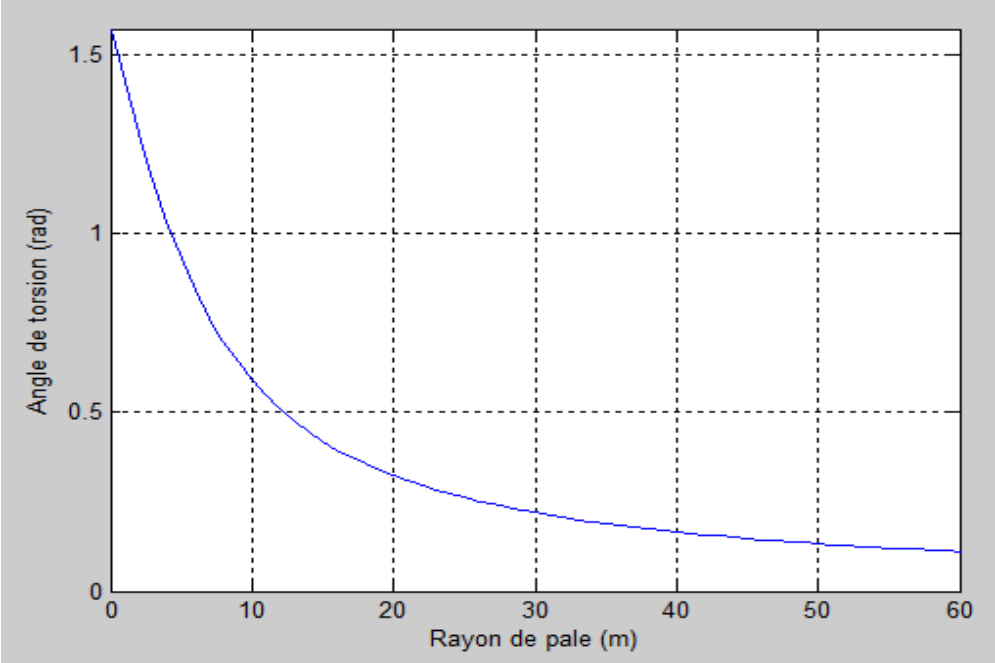


Fig.(II.16): Evolution de l'angle de torsion la langue de pale.

On observe quand La longueur de la pale augmente. L'angle de rotation est diminuer.

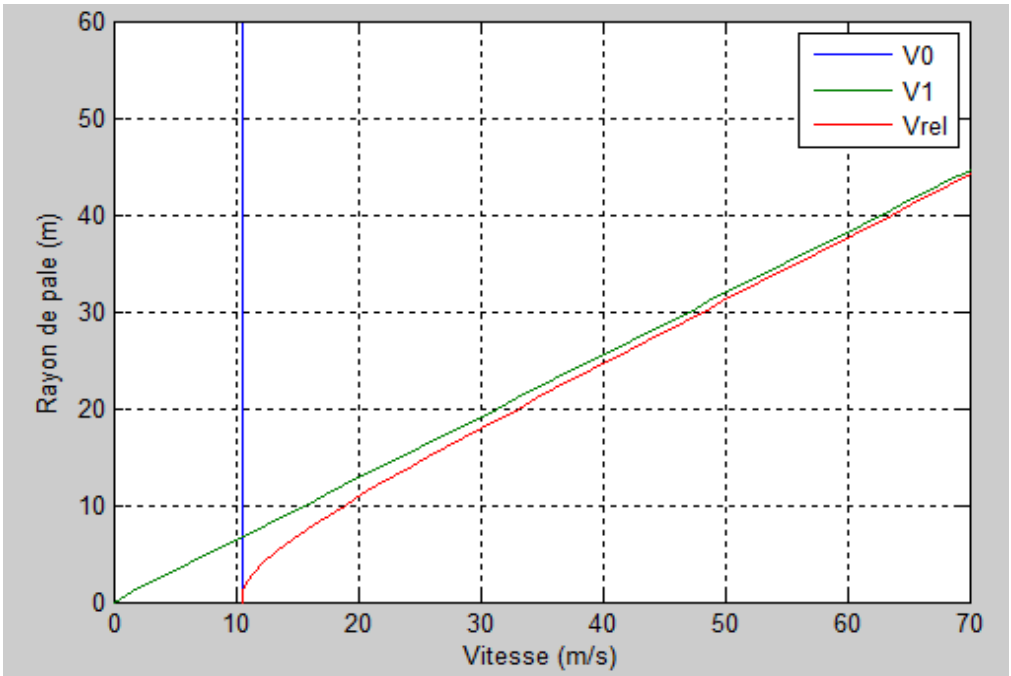


Fig (II.17): variation de la vitesse relativeV_{rel} , la Vitesse tangentielle V_1 ET la Vitesse du vent incident V_0 par rayon de la pale.

La vitesse relative vient tangente la vitesse V_1 de l'écoulement perpendiculaire en Fin de pale.

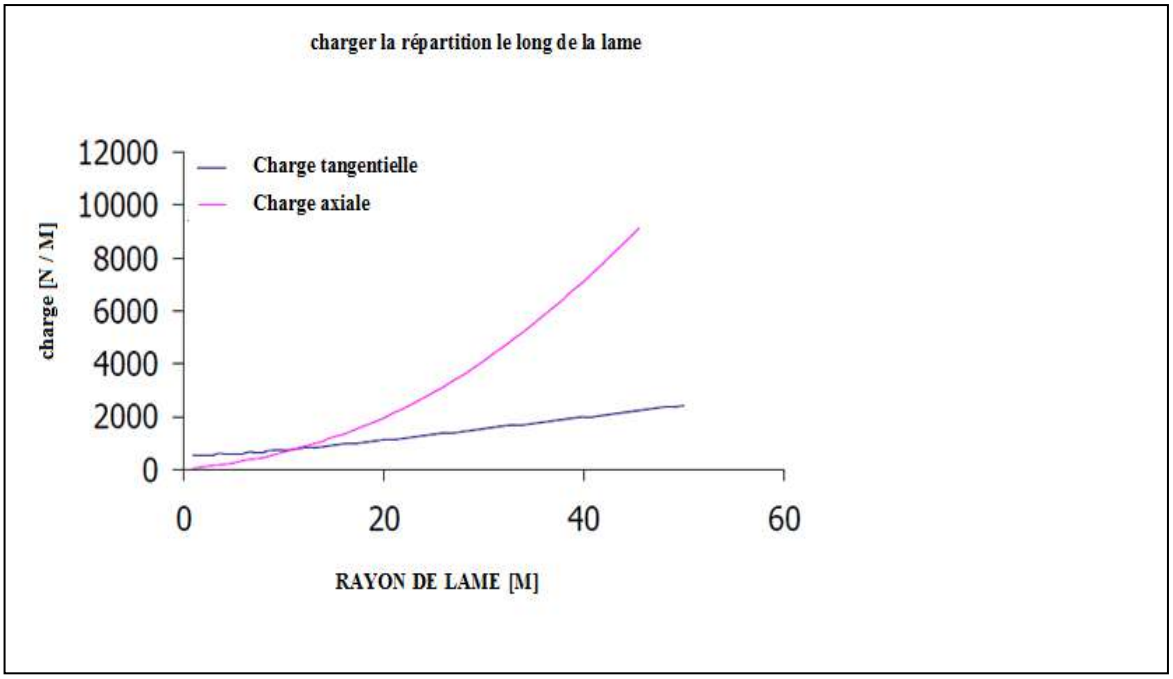


Fig :(II.18) charger la répartition le longe de la lame.

Du fait de vitesses plus importantes, on remarque que la pale est aérodynamiquement plus active dans son extrémité. Les forces tangentielles permettant l'extraction de l'énergie, bien que croissantes en fonction du rayon de la pale, reste faible en comparaison avec les forces chargeant la structure.

Données :

Vitesse du vent incident a 70m	14,45[m/s]
Vitesse angulaire	12 [rad/s]
Facteur d'induction axiale	0,1743

II.7. Conclusion

On étude dans ce chapitre l'aérodynamique de la turbine d'éolienne par le vent et ses caractéristiques, puissance d'une éolienne les charges de vent agissant sur le rotor dans ce cette titre on a vue théorie des ailes, effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement et on a fini par Profil de Torsion.

chapitre III:

Analyse des oscillations de couple dans l'éolienne à trois pales

III .1 Introduction

La nature stochastique des conditions de vent à différent temps et les hauteurs sont les principaux facteurs d'influence sur Oscillations de puissance et de couple dans les éoliennes. Entre eux, nous pouvons observer des processus périodiques. Ces périodiques processus sont en grande partie dus à deux effets: Le cisaillement du vent et ombrage de la tour,le cisaillement du vent décrit la variation de la vitesse du vent avec la hauteur alors que l'ombrage de la tour décrit la réorientation du vent due à la structure de la tour, des oscillations de couple ont été notées dans plusieurs etudes il a été déclaré que le couple maximal et la puissance étaient notés quand une pale individuelle a été positionnée directement vers le bas **[25],** bien que Thiringer ait été incapable de Certifier la dépendance de l'oscillation au cisaillement du vent. Il on croit que l'ombrage de la tour est également une source de les oscillations observées dans les éoliennes bien que des études**, [24]** ne peuvent pas le confirmer. Les oscillations à trois impulsions sont importantes à modéliser puisque ils pourraient avoir des effets étendus sur les systèmes de contrôle et la qualité de l'alimentation, le modèle d'oscillation de couple serait utile pour étudier ces effets via un simulateur d'éolienne ou autre outils de modélisation d'éoliennes dynamiques. dans la littérature récente, les modèles dynamiques d'éoliennes ont été utilisés lorsque le couple aérodynamique était soit représentés par les courbes de couple à l'état d'équilibre **[28], [29]** ou par oscillations simples sinusoïdales **[30].** notre travail présenté dans ce chapitre est consacré à développer un modèle plus complet du vent turbine. La formulation comprend un modèle de couple pour le turbine à trois pales qui incluent les effets du vent cisaillement et ombrage de la tour.

III.2. Systéme de conversion du vent

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées que les éolienne à axe vertical car ils sont moins exposés à la contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégient leurs efficacité..

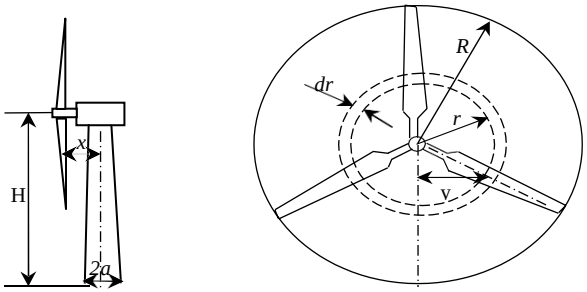


Fig. III.1 Schéma simplifié d'une éolienne horizontale à trois pales

L'étude de certains sous-ensembles de ce modèle n'est pas spécifique au cas de l'éolienne et ne sera donc pas approché ici. On se consacrera plus en particulier au comportement des pales et de la sollicitations qu'ils transmettent au axe.

III .3. Transformation d'nergie cinetique du vent en énegie mecanique

III .3.1.Effet de cisaillement du vent

La vitesse du vent est une fonction croissante avec la hauteur au-dessus du sol et l'altitude (par rapport à la mer niveau). cette variation est appelée cisaillement du vent. La loi de la distribution de vitesse selon une vertical dépend, d'une part, du relief local et, d'autre part, la rugosité de la région. Au sommet d'un autour de la colline, il y a une vitesse d'augmentation locale dont l'effet peut inverser la vitesse de gradient habituelle et faire que la vitesse au sol est plus grande qu'avec une certaine hauteur.

La figure III.2.représente la distribution de la vitesse du vent en fonction du relief et de l'altitude

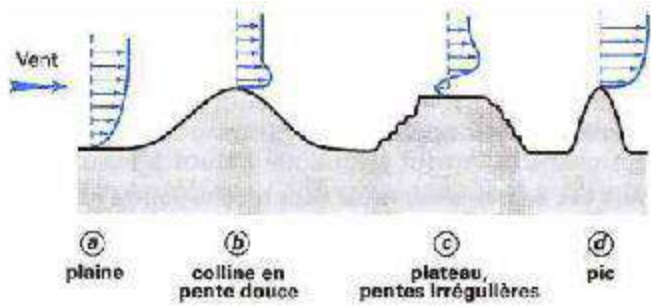


Fig III.2. Distribution de la vitesse du vent vs du relief et de l'altitude **[31]**

Un modèle commun de cisaillement du vent est tiré directement de la littérature sur la dynamique des éoliennes **[23],** En terrain plat, on peut représenter la vitesse de variation v selon la hauteur H au-dessus du niveau du sol selon la loi:

$$V(Z)=V_H\left(\frac{Z}{H}\right)^{\alpha} \qquad (24)$$

Le coefficient α sensiblement les valeurs suivantes

-en mer: α=0.13;

-sur un ravage: α =0.16;

-en clair: α=0.2;

-dans la plaine boisée: α=0.24;

-centre ville: α=0.3;

La figure III.3 montre la variation de la vitesse du vent par l'élévation par rapport au sol pour le coefficient empirique caractéristique du lieu (centre ville: α=0.3)

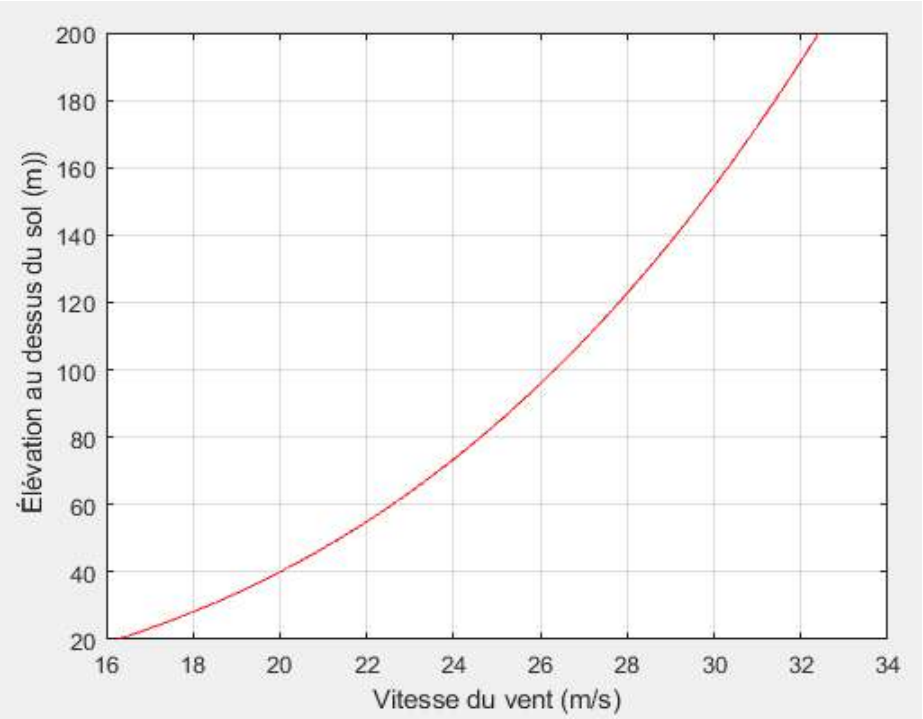


Fig. III.3.: variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude par rapport au sol.

Aux fins de l'analyse, (24) est converti en fonction de r (distance radiale de l'axe du rotor) et θ (angle azimutal) donnant ce qui suit:

$$V(r,\theta)=V_H\left(\frac{r\cos\theta+H}{H}\right)^{\alpha} \tag{25}$$

Nous définissons la fonction Ws (r,θ) la perturbation vue dans vitesse du vent due au cisaillement du vent ajouté au vitesse du vent à la hauteur du moyeu **[20].** (25) peut être écrit comme:

$$V(r,\theta)=V_H\left(1+W_s(r,\theta)\right) \tag{26}$$

L'approximation utilisée pour Ws (r,) devrait être la suivante**[20]:**

$$W(r,\theta)\approx\alpha\left(\frac{r}{H}\right)\cos\theta+\frac{\alpha(\alpha-1)}{2}\left(\frac{r}{H}\right)^2(\cos\theta)^2+\frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6}\left(\frac{r}{H}\right)^3(\cos\theta)^3 \tag{27}$$

La figure III.4. montre la variation de cette perturbation par l'angle azimutal pour un élément éloigné de r de l'axe du rotor.

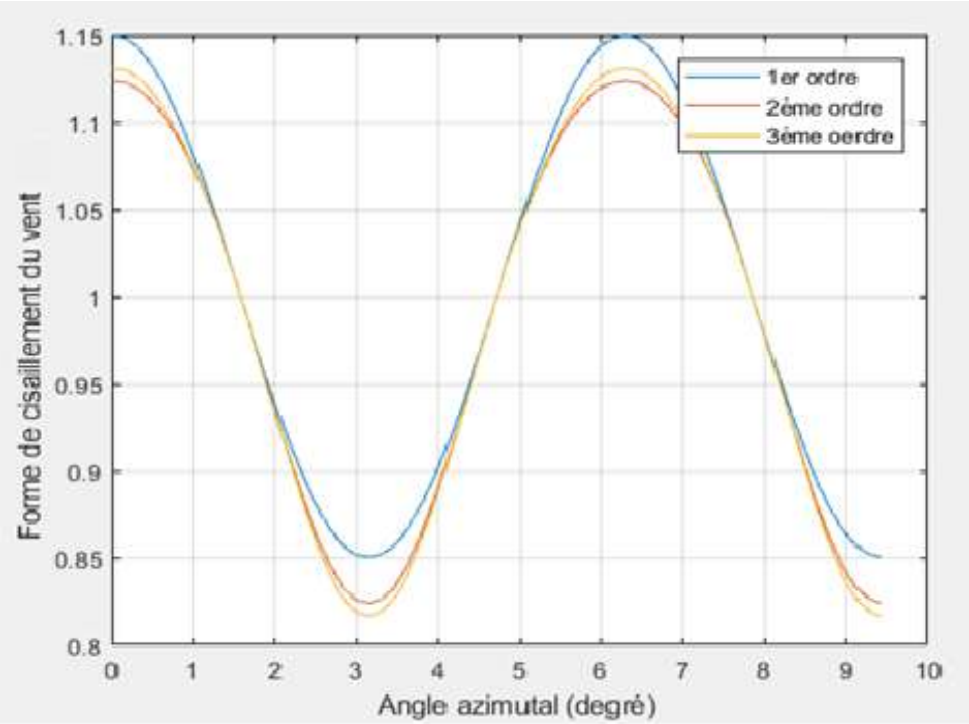


Fig III.4. variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor avec prise en compte de l'effet de cisaillement du vent

III.3.2. Présence de la tour

Dans le cas du vent "en aval", la tour provoque un phénomène appelé "masque". A chaque tour, La pale perçoit une perturbation aérodynamique qui résulte en :

- un rendement moins purement aérodynamique;
- les demandes alternatives qui peuvent être préjudiciables en termes de durée de vie (phénomène de fatigue).

Dans le cas du vent "en amont", la tour provoque une effet équivalent mais moins dit "vent d'ombre". On peut en tenir compte en modifiant la vitesse axiale.

Le champ de vent, ne considérant que l'ombre de la tour, est défini comme:

$$V(y,x)=V_H+v_t(y,x) \tag{28}$$

Le terme vt (y, x) est la perturbation observée dans la vitesse du vent due à l'ombrage de la tour. ajoutée au vitesse du vent a la hauteur du moyeu .**[19]**

$$v_t(y,x)=V_0a^2\frac{y^2-x^2}{\left(y^2+x^2\right)^2} \tag{29}$$

V0 est la vitesse spatiale moyenne du vent, α est le rayon de la tour, y est la distance latérale de la pale à la tour, ligne médiane et x est la distance entre l'origine de la pale et la tour médiane.

Résultats de la perturbation de la tour pour quatre different distances longitudinales entre la tour et les pales sont illustrés à la Fig.III.5.

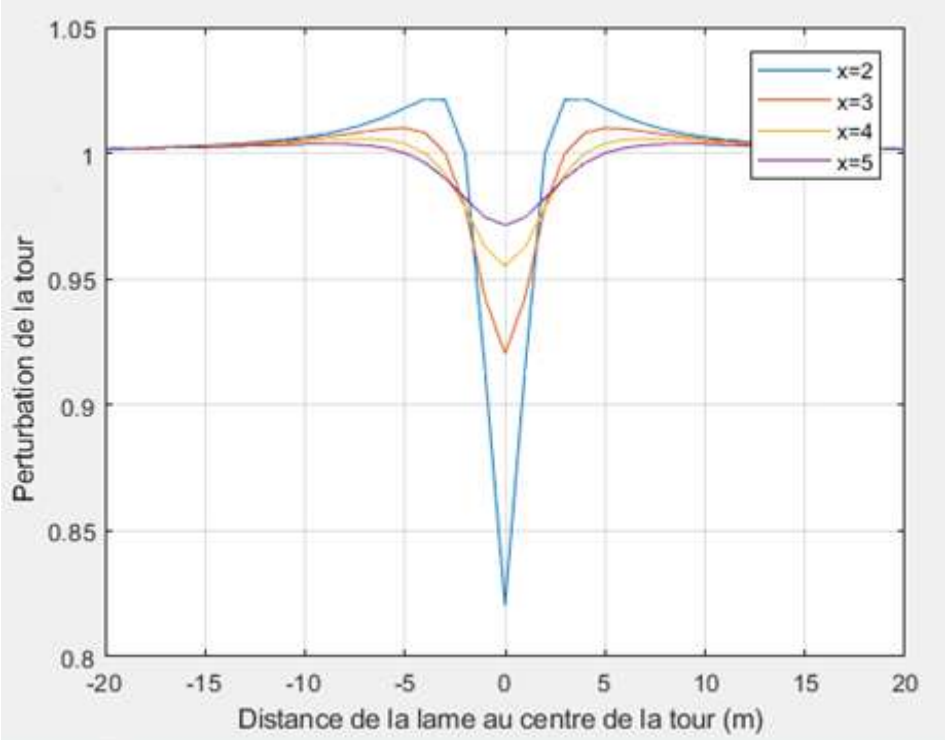


Fig III.5. Perturbation de la tour en fonction de la distance entre la pale et le centre de la tour.

Comme on pouvait s'y attendre, l'effet d'ombrage de la tour est visible. plus prononcé lorsque les pales sont plus proches à la tour (x plus petites).

Un modèle alternatif ombrage-tour-déficit (30) est développé dans **[21]** et montré comme suit:

$$v_t(r,\theta,x) = ma^2 \frac{(r\sin\theta)^2 - x^2}{\left((r\sin\theta)^2 + x^2\right)^2} \tag{30}$$

Avec

$$m = \frac{V_0}{V_H} = \left(1 + \frac{\alpha(\alpha-1)R^2}{8H^2}\right)$$

où R est le rayon du rotor.

Résultats pour ce modèle alternatif avec un rayon de tour de 2 m et quatre distances longitudinales différentes entre la tour et les pales sont illustrés à la Fig. III. 6.

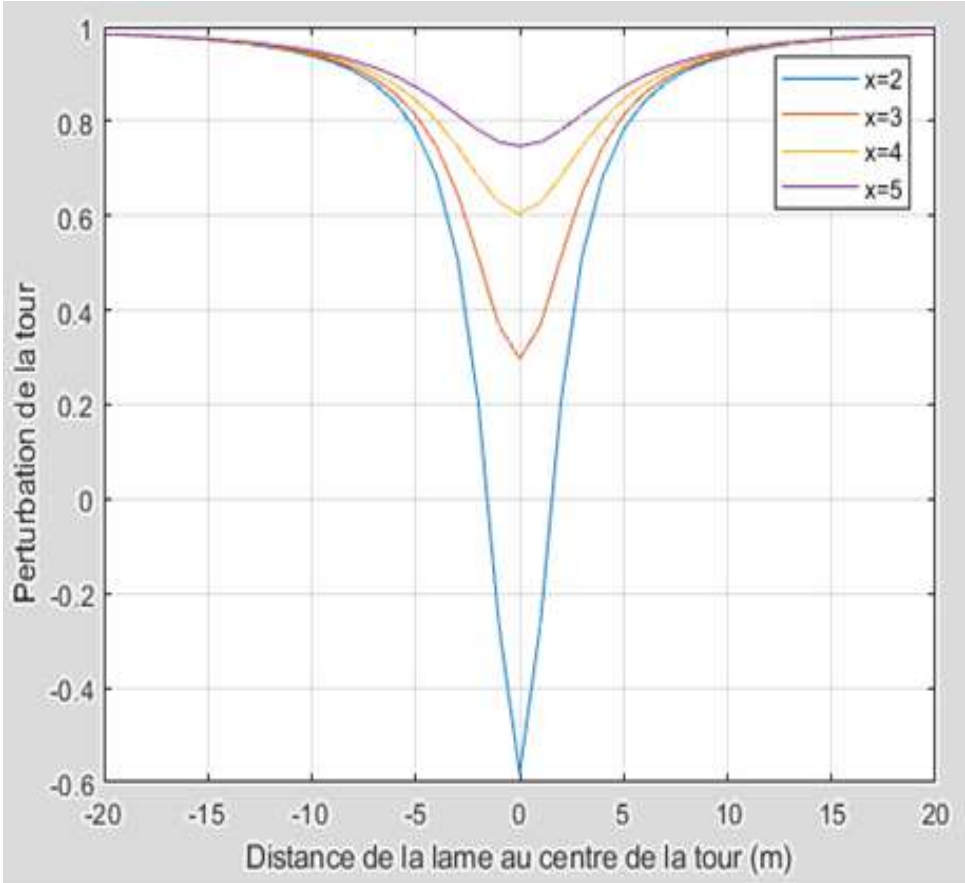


Fig III.6. variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor avec prise en compte l'effet d'ombrage de la tour (modèle 1) avec une distance différente entre la tour et les pales

La comparaison des deux modèles montre graphiquement qu'un modèle plus raisonnable est représenté par (III.6), car il modélise à la fois la décélération du vent devant la tour et l'accélération du vent de chaque côté de la tour.

Par conséquent, pour la modélisation des oscillations de couple en raison de l'ombrage de la tour, (III.6) est préférable et sera utilisé dans développement ultérieur du modèle.

La figure (III.7) montre la variation de la vitesse du vent par l'angle azimutale pour une distance différente entre la tour et la pale

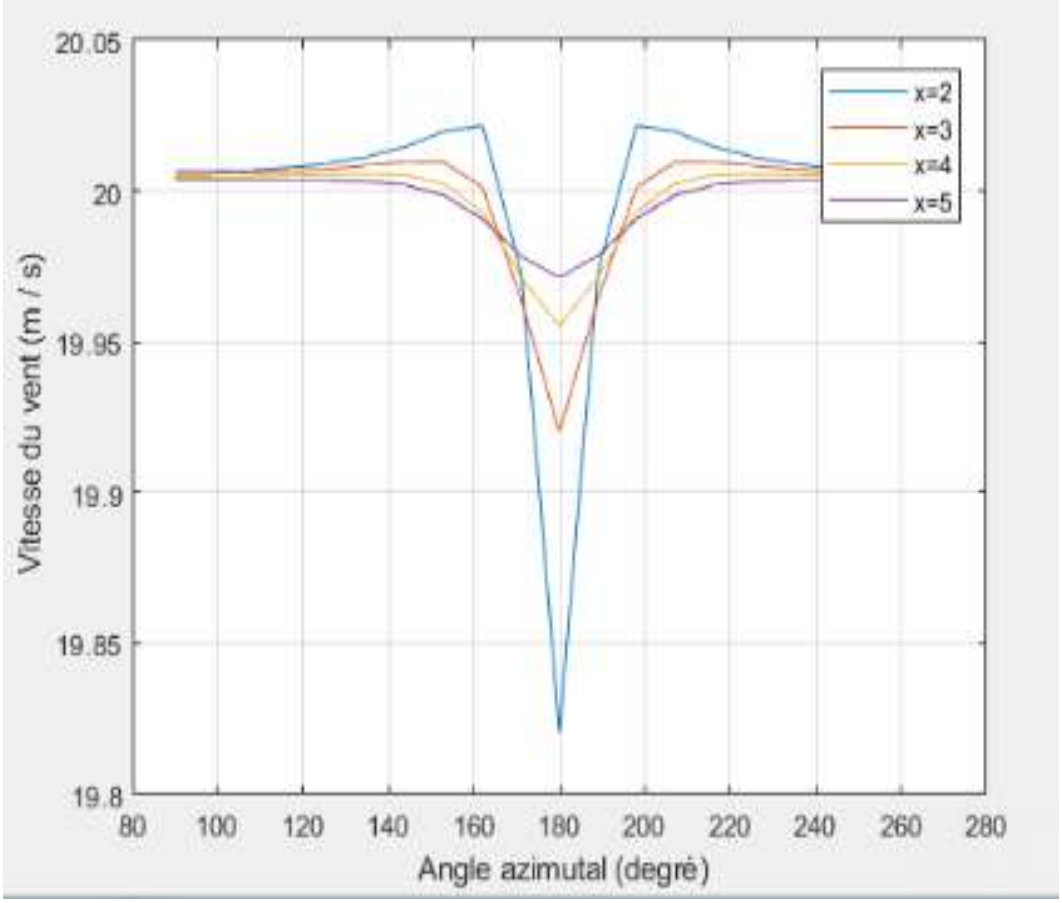


Fig III.7. variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor avec prise en compte de l'effet d'ombrage de la tour (modèle avec r, thêta) avec différents distance entre la tour et les pales.

Comme on pouvait s'y attendre, . variation de la vitesse du vent est visible. plus prononcé lorsque les pales sont plus proches à la tour (x plus petites),avec prise en compte de l'effet d'ombrage de la tour.

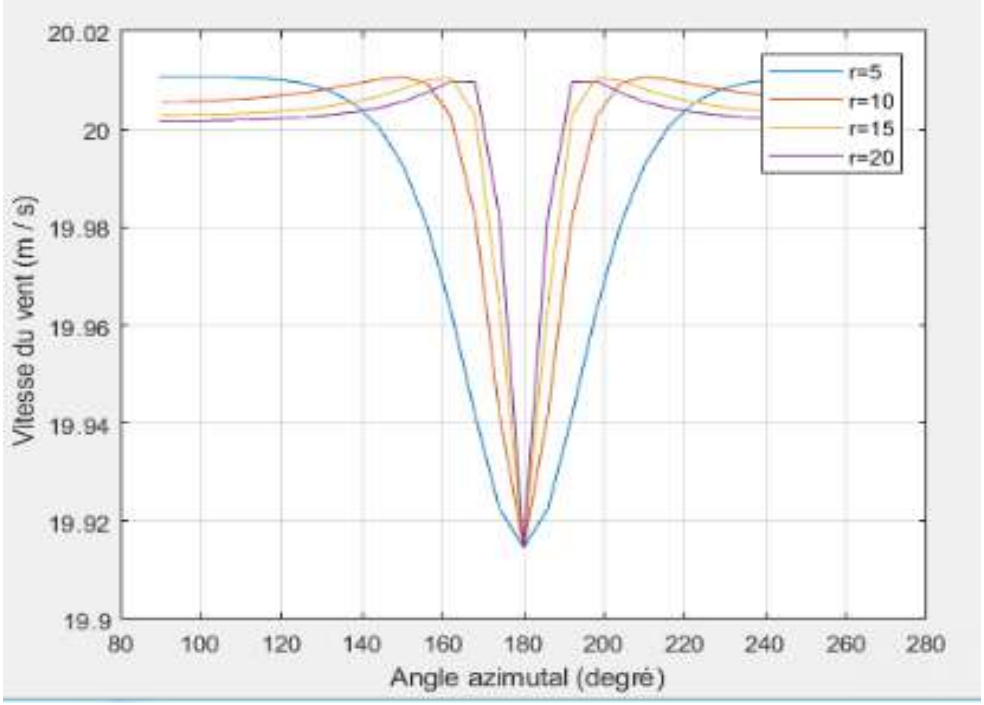


Fig III.8. variation de la vitesse du vent de l'élément éloigné r de l'axe du rotor avec prise en compte de l'effet d'ombrage de la tour (modèle 2) avec différents r.

Comme on pouvait s'y attendre, . variation de la vitesse du vent est visible. plus prononcé lorsque la distance radiale de l'axe du rotor (r plus petites). Avec prise en compte de l'effet d'ombrage de la tour.

III.3.3. vitesse équivalente du vent

Le champ de vent total, y compris l'ombrage de la tour et le vent les effets de cisaillement seront maintenant convertis en un equivalent vitesse du vent,trois composantes de cette vitesse de vent équivalente seront séparés et résolus individuellement de telle sorte que les effets à partir de la hauteur du moyeu , vitesse du cisaillement du vent et l'ombrage de la tour peut être observée séparément.

$$v_{eq}(t,\theta) = v_{eq_0} + v_{eq_{ws}} + v_{eq_{ts}} \tag{31}$$

Si

$$n = \frac{r_0}{R}, \quad s = 1 - n^2$$

Où r_0 est le rayon au souhait, le profil de la lame commence

$$v_{eq_0} = \frac{2V_H}{3sR^2} \sum_{b=1}^{3} \int_{r_0}^{R} r dr = V_H \tag{32}$$

$$v_{eq_{ws}} = \frac{2V_H}{3sR^2}\sum_{b=1}^{3}\int_{r_0}^{R}\left(\frac{r^2\alpha}{H}\cos\theta_b + \frac{r^3\alpha(\alpha-1)}{2H^2}(\cos\theta_b)^2 + \frac{r^4\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6H^3}(\cos\theta_b)^3\right)dr \quad (33)$$

$$v_{eq_{ts}} = \frac{2V_H}{3sR^2}\sum_{b=1}^{3}\int_{r_0}^{R}\left(\frac{ma^2\left(r^3(\sin\theta_b)^2 - rx^2\right)}{\left(r^2(\sin\theta_b)^2 + x^2\right)^2}\right)dr \quad (34)$$

Si nous considérons: $r_0 = 0,\ s = 1$

$$v_{eq_{ts}} = \frac{mV_H}{3R^2}\sum_{b=1}^{3}\left(\frac{a^2}{(\sin\theta_b)^2}\ln\left(\left(\frac{R\sin\theta_b}{x}\right)^2 + 1\right) - \frac{2a^2R^2}{(R\sin\theta_b)^2 + x^2}\right) \quad (35)$$

La vitesse du vent équivalente, causée par l'ombrage de la tour et le cisaillement du vent ensemble et individuellement pour un turbine avec les spécifications suivantes: R = 20, H = 40, θ = 0,3, α= 0,85 et x = 2,9., Sont illustrés à la Fig.III.9.

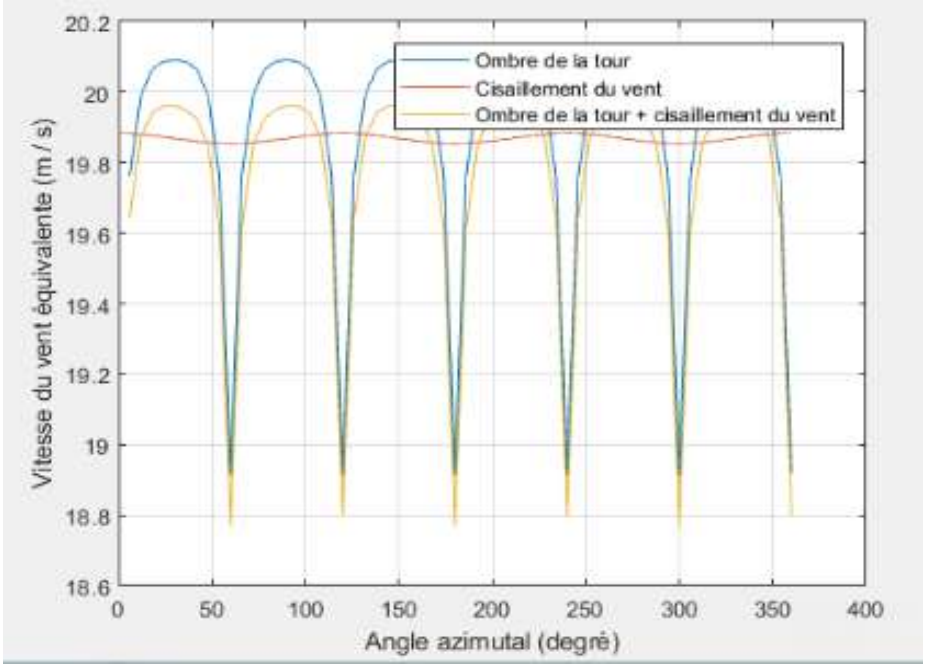


Fig III.9. vitesse du vent équivalente en raison de l'ombrage de la tour, du cisaillement du vent et combinaison du cisaillement du vent et de l'ombrage de la tour .

On voit que l'effet de l'ombrage de la tour est plus dominant que l'effet du cisaillement du vent.

III.4. Oscillation de couple

A chaque tour, le couple oscille trois fois en raison de chaque pale passant par minimum et maximum du vent. Le couple aérodynamique produit par une éolienne à trois pales immergée dans un champ de vent v (t, r,) est donnée comme suit:

$$T_{aero}(t,\theta) = \frac{1}{2}\rho A V_0 R\frac{C_p(\lambda_0)}{\lambda_0} + \rho A V_0 R\frac{C_p(\lambda_0)}{\lambda_0}\Delta V \quad (36)$$

Avec $\Delta V = V_{eq}(t,\theta) - V_0$

Avec les trois formulations composants de vitesse de vent équivalente, les oscillations globales du couple peuvent maintenant être modélisé.

$$\overline{T_{aero}(t,\theta)} = 1 + \frac{2}{mV_H}\left(V_{eq_{ws}} + V_{eq_{ts}} + (1-m)V_H\right) \quad (37)$$

Les oscillations de couple normalisées dues au cisaillement du vent et l'ombrage de la tour seule, ainsi que le couple total les oscillations sont illustrées à la Fig.III.10.

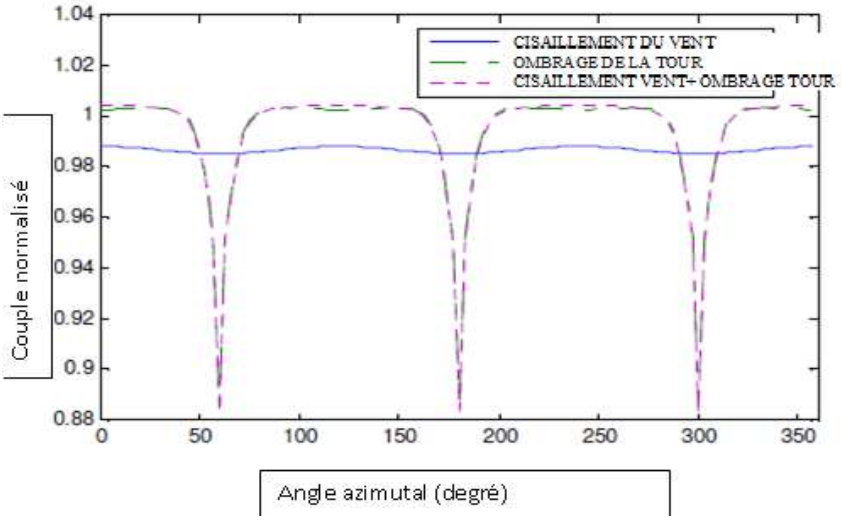


Fig III.10. Couple aérodynamique normalisé dûe à l'ombrage de la tour, et Cisaillement du vent ,et combinaison de cisaillement du vent et de l'ombrage de la tour.

On observe à nouveau que les effets du cisaillement du vent sur le couple aérodynamique total est beaucoup plus petit que ceux dus à l'ombrage de la tour,on observe que les deux oscillations en raison du cisaillement du vent et de l'ombrage de la tour ont un minimum quand une pale est dirigée directement vers le bas et un maximum quand une pale est dirigée directement vers le haut.

III.5. Conclusion

Un modèle de couple a été développé pour le modèle à trois pales éolienne. Le modèle prouve l'apport du cisaillement du vent et ombrage de la tour lors de la réduction du couple moyen. Il est déterminé que le couple maximal est vu quand une pale pointe directement vers le haut pour le cisaillement du vent et effets d'ombrage de la tour. Les oscillations de couple modélisées dépendent principalement de R, a, et x, car ils sont liés à la tour d'ombrage. Ce modèle est une représentation utile du couple aérodynamique pour l'utilisation d'éoliennes et d'autres applications de modélisation basées sur la simulation dynamique.

Conclusion générale

Dans notre travail nous a permis de faire l'étude de l'effet de gradient du vent et de l'ombrage de la tour sur la puissance produite par une éolienne à axe horizontal.

Un modèle de couple a été développé pour le modèle à trois pales éolienne. et déterminé aussi quand on à vu le couple maximal.

- Le premier chapitre rappelle la généralité aux systèmes éoliens.
- Dans le deuxième chapitre rappelle modèle aérodynamique de la turbine éolienne à axe horizontal.
- Dans le troisième chapitre on analyse des oscillations de couple dans l'éolienne à trois pales pour la simulation en étudiant la transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et l'oscillation de couple.

Par les résultats de simulation - matlab - on peut déduire à travers ce travail:

- Les effets du cisaillement du vent sur le couple aérodynamique total est beaucoup plus petit que ceux dus à l'ombrage de la tour.
- Le couple maximal est vu quand une pale pointe directement vers le haut et un minimum quand une pale est dirigée directement vers le bas.
- Les oscillations de couple modélisées dépendent principalement de R, a, et x, car ils sont liés à l'ombrage de la tour.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **M.SALIHA** <<contribution à la modélisation et la commande d'une turbine éolienne>> mémoire de Magister spécialité : Génie électrique 2010.

[2] **N.HAMDI** << Modélisation et commande des génératrices éoliennes>>

[3] Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2008

[4] **K.IDJDARENE** << Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eolien autonomes >> Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010

[5] **THOMAS ACKERMANN**, Wind Power in Power Systems, Royal Institute of Technologie Stockholm, Sedan, 2005.

[6] **JEAN CHATELAIN**,<< Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X, Presse Polytechniques romandes>> édition Georgi, 1983

[7] **R.REDJEM** << Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne>> Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2009

[8] **O. DE VRIES** <<On the theory of the horizontal axis Wind turbine>>, Ann. Rev. Fluide. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.

[9] **D.DJEMAA** << Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne>> Thèse Magister Université El-hadj lakhdhar – Batna, 2010

[10] **MIRECKI A** Etude comparative de chaînes de convers**.** << on d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance >>, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.

[11] **L. LECLERCQ** << Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un Réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes >>, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.

[12] **F. POITIERS** << Etude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau >>, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.

[13] **H.ARANTZMENDI** <<Etude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisés>>, Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de

Grenoble, France, 2006.

[14] **L. CHANG** << Systèmes de conversion de l'énergie éolienne >>, IEEE Canadian Review - sommer / Eté 2002, pp. 1-5.

[15] **R. SWISHER, C. REAL DE AZUA, J. CLENDENIN,** << Strong winds on the horizon: wind power come of âge >>, procédions of the IEEE, vol. 89, N°. 12, Décembre 2001, pp. 1757-1764

[16] **Duc-Hoan TRAN**, << Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive >>Analyse de robustesse, validation expérimentale», Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Toulouse 2010.

[17] **Y.Ettoumi**, << Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie. >> Thèse, USTHB, Alger 2002.

[18] **B. ROBYNS,** B. FRANÇOIS, F. DEGOBERT ET J. P. HAUTIER << Commande Vectorielle de la machine asynchrone, désensibilisation et optimisation par la Logique floue >>, Editions Technip, France, Juillet 2007.

[19] **R. Maouedj, S. Bousalem , B. Benyoucef**, << Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens>>, Revue des Energies Renouvelables, 2008**.**

[20] **P. Sorensen**, **A. D. Hansen**, and **P. A. C. Rosas**, <<Wind models for Simulation of power fluctuations from wind farms, >>J. Wind Eng. Ind. Aerodynam., vol. 90, pp. 1381–1402, Dec. 2002.

[20] **D. A. Spera**, Wind Turbine Technology. New York: ASME Press 1994. [19] R.W. Thresher, A. D. Wright, and E. L. Hershberg, <<A computer analysais of wind turbine blade dynamic loads,>> ASME J. Solar Energy Eng., vol. 108, pp. 17–25, 1986.

[21] **O. Garcia**. (1998).Wind Turbine Dynamic Modelling, [Online]. Available: www.iit.upco.es/oscar/download/model.ps

[22] **FFAM** .Fédération Française d'Aéro-Modélisme << *Aerodynamique et mécanique du vol simplifier* >> Edition juillet 2009.

[23] **T. Thiringer** and **J.-A. Dahlberg**, <<Periodic pulsations from a threebladed wind turbine,>> *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, pp. 128– 133, Jun. 2001

[24] **T. Thiringer**, <<Power quality measurements performed on a lowvoltage grid equipped with two wind turbines,>> *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, pp. 601–606, Sep. 1996.

[25] **S. B. Bayne and M. G. Giesselmann**, <<Effect of blade passing on a wind turbine output>> in *Proc. Energy Conversion Engineering Conf. Exhib., (IECEC) 35th Intersociety*, Jul. 2000, vol. 2, pp. 775–781.

[26] : DEBBACHE. M << De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites >> université de Biskra, 2012.

[27] : nouvelle carte du gisement éolien en Algérie par **le CDER** – 2014

[28] **J. B. Ekanayake**, L. Holdsworth,W.XueGuang, andN. Jenkins, <<Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines,>> *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 803–809, May 2003.

[29] **D. J. Trudnowski**, A. Gentile, J. M. Khan, and E. M. Petritz, <<Fixedspeed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies,>> *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 1911– 1917, Nov. 2003.

[30] **J. Cidras and A. E. Feijoo**, <<A linear dynamic model for asynchronous wind turbines with mechanical fluctuations>> *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 681–687, Aug. 2002.

[31] **P.Leconte** and All. *Eolienne*,<<Technique de l'ingénieur, traité Génie mécanique>>BM4 640

[32] **Multon.**(1999).

[33] **Claude Monets** INSA de Strasbourg Projet de Fin d'Etudes << CONCEPTION D'EOLIENNES >> FORCE TECHNOLOGY NORWAY AS Allé 5 (1338 SANDVIKA Juin 2008)

[34] **Ghiti Nadjib** << Aérodynamique et Turbulence Dans Des Cyclones Séparateur>> université de Constantine 2006.

[35] **Hamza Soumia**. << Conception par la CAO des parties fixes d'une éolienne et les solutions technologiques de liaisons de l'installation >>