

République algérienne démocratique et
populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf de M'sila
Faculty de la technologie



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER
En Génie Mécanique

Option : construction mécanique

Présenté par :
Lakhdar zouaza & ouassim yahyaoui

Thème
Revue sur les éoliennes

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZAOUI Moussa	MCA	Président
MENASRI Noureddine	MCA	Encadreur
AMROUNE Saleh	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2020 /2021
N° d'ordre : GM/...../2021



Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu de nous avoir donné courage, volonté, patience et santé durant toutes ces longues années d'études.

Mes sincères remerciements à tous mes professeurs à l'Université de

Msila,

Ensuite, je tiens à remercier les professeurs qui ont supervisé notre

mémoire, le Dr Zaoui Moussa

Dr AMROUNE Saleh

Et sans oublier notre encadreur, le distingué Dr. MENASRI

Noureddine

sur cette thèse.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu de près ou

de loin

dans ce travail.



Dédicaces

*Tout d'abord, je tiens à remercier mon collègue
ouassim yahyaoui pour son soutien, son amour et sa sincérité
depuis 5 ans.*

*Et nous donnons ce travail à nos parents qui travaillaient pour
nous*

Et un cadeau spécial à ma mère bien-aimée dans sa tombe

Je remercie tous mes amis et parents pour le soutien

Et à d'autres succès

*Enfin, je remercie Dieu Tout-Puissant pour la bénédiction de
l'Islam*



Sommaire

Sommaire	
Introduction générale	01
chapitre I:Généralité sur les éoliennes	02
I.1.Histoire de l'énergie éolienne	03
I.2. Définition de l'énergie éolienne	05
I.3.Classification des éoliennes	06
Éoliennes à axe vertical.....	06
Éoliennes à axe horizontal.....	07
Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	08
I.4.Structure de l'éolienne	10
I.4.1.Nombre de lames.....	10
I.4.2. Taille des aérogénérateurs.....	11
I.5.Principe de fonctionnement	11
I.5.1. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal).....	11
I.6.Caractéristiques technologiques de éoliennes	14
Chapitre II: étude des vents	16
II.1. Définition du vent	17
II.2. Les vents de différents types, dont les plus importants sont	18
2.1.Vents stationnaires.....	18
2.2. Moussons.....	19
2.3. Vents locaux.....	20
II.3 . Caractéristique du Vent	20
3-1-Répartition instantanée de la vitesse du vent	21
3-2 Répartition régionale de la vitesse du vent.....	22
3-3 L'histogramme des vitesses de vent	23
3-4Influence de la hauteur	23



Chapitre III : Calculs de conception d'éoliennes.....	25
III.1. introduction.....	26
III.2. La source éolienne.....	26
III.3. Aérodynamique du rotor.....	29
III.4. Théorie de la quantité de mouvement élémentaire et limite de Betz.....	30
III.5. Rotation de réveil.....	34
III.6. Théorie du moment de l'élément de lame (BEM).....	36
III.7. Calcul du couple total de l'arbre.....	41
Chapitre IV : générateur d'éolienne.....	43
IV.1. Aperçu sur Les Aérogénérateurs.....	44
1.2. Eolienne connecte au réseaux.....	45
1.3. Eolienne alimentant une charge isolée.....	45
1.4. régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	45
1.5. contrôle par angle de calage variable(pitch control).....	46
1.6. Contrôle par décrochage aérodynamique passif(passive stal).....	46
1.7. contrôle par décrochage aérodynamique actif.....	46
IV.2. technologies des systèmes éoliens.....	47
2.1.Eoliennes a vitesse fixe.....	47
2.2. Les avantages de l'éolienne a vitesse fixe.....	48
2.3. Les inconvénients de l'éoliennes a vitesse fixe.....	48.
2.4. Eoliennes a vitesse variable.....	48
2.5. les avantages de l' éolienne a vitesse variable.....	50
2.6 les inconvénients de l'éolienne a vitesse variable.....	50



IV .3. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	50
3.1.machine asynchrone a cage d'ecureuil.....	50
3.2.machine asynchrone a double stator.....	51
3.3.machine asynchrone a double alimentation type "rotor bobine".....	52
3.4.machine asynchrone a double alimentation type "brussoles".....	53
IV 4. systèmes utilisant la machine synchrone.....	54
4.1.machine synchrone à rotor bobiné.....	55
4.2. machine synchrone a aimants permanents.....	56
IV .5. description de fonctionnement de la MADA.....	57
5.1. structure de la MADA.....	57
5.2. mode de fonctionnement de la MADA.....	58
5.3.fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	58
5.4. fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	59
Conclusion générale.....	61
Liste des figures.....	62
Références.....	64
Résumé.....	65



Introduction générale



Introduction générale:

L'énergie éolienne est un moyen de production efficient, efficace et durable. En termes de production d'électricité, c'est l'un des secteurs les plus propres, les plus sûrs et les plus rapides à créer lors de son renouvellement.

Cette thèse s'intitule, visant à une meilleure compréhension de cette technologie et de toutes les étapes nécessaires à la réalisation du projet, "transformer l'idée de l'éolien en électricité renouvelable".

La structure de ce travail se compose de quatre chapitres et est organisé comme suit.

Cette étude a été présentée en donnant des informations sur les éoliennes dans le premier chapitre de la définition, les types, les classifications, les caractéristiques, le principe de fonctionnement et la structure des éoliennes requises.

Dans le deuxième chapitre, nous discutons de la définition du vent, de ses types et de ses caractéristiques. Dans le troisième chapitre, nous présentons une introduction à l'histoire des éoliennes, ainsi que les sources des éoliennes, et nous parlons également de l'aérodynamique du rotor, et nous parlons aussi de la théorie des éoliennes.

Théorie de la quantité de mouvement élémentaire et limite de **Betz** et Théorie du moment de l'élément de lame (**BEM**)

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous traitons de l'aérogénérateur, où nous présentons un aperçu général des aérogénérateurs, ainsi que le principe de travail, ainsi que la régulation mécanique de la puissance des éoliennes et les techniques de jointement éolien. .

Et à la fin on parle de la description de fonctionnement de la **MADA**.

chapitre I

généralités

sur les

éoliennes

I.1. Histoire des éoliennes

La maîtrise de l'énergie contenue dans le vent pour produire de l'énergie mécanique n'est pas un concept nouveau. Des sources historiques montrent que l'existence de convertisseurs d'énergie éolienne ou de moulins à vent remonte à 644 après JC autour de la frontière perso-afghane et que les moulins à vent étaient également utilisés pour drainer le riz par les Chinois dans les temps anciens [1]. Ces moulins à vent étaient des appareils de type traînée avec des axes verticaux, donc peu efficaces et sujets aux pannes par vent fort. On pense que le moulin à vent à axe horizontal a été inventé en Europe vers l'an 1119

A.D. dans le centre de la Belgique et ensuite développé à des conceptions plus efficaces comme le moulin à vent hollandais au milieu du 19ème siècle [1].

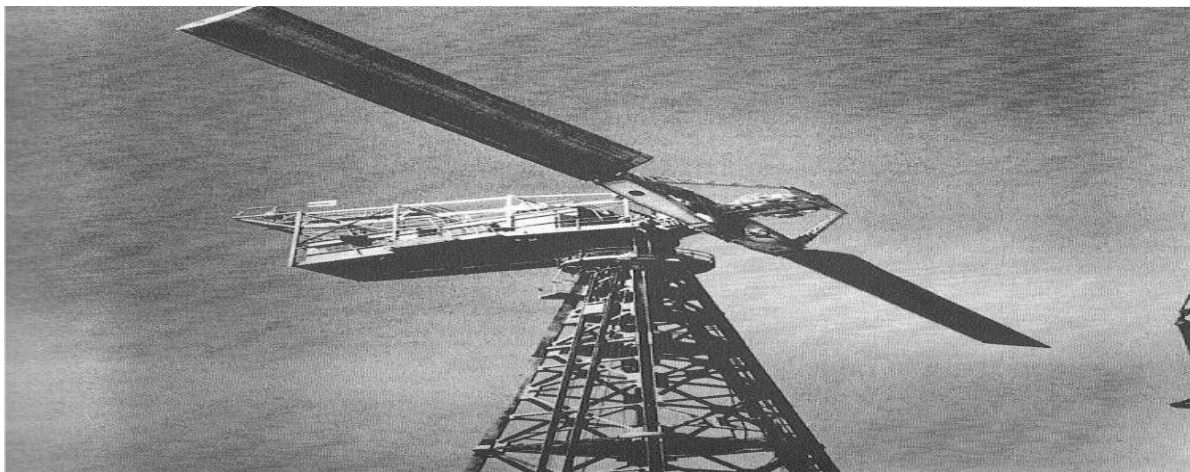
Contrairement aux éoliennes qui convertissent la puissance du vent en énergie mécanique, les éoliennes extraient l'énergie du vent et la convertissent en électricité utile. En utilisant une approche de test scientifique et un appareil spécifique, John Smeaton, un ingénieur anglais, a découvert des règles de base concernant le comportement rotor / vent. Il a été constaté que la vitesse des extrémités des pales est proportionnelle à la vitesse du vent, le couple maximal est proportionnel à la vitesse du vent au carré et la puissance maximale est proportionnelle à la vitesse du vent au cube. Ces règles simples sont encore utilisées aujourd'hui dans la conception d'éoliennes modernes [2].

La première éolienne au monde utilisée pour produire de l'électricité a été construite en 1891 par Poul la Cour, un inventeur danois et pionnier de la production d'énergie éolienne [3]. Les progrès de la conception de profil aérodynamique moderne dans l'ingénierie aéronautique et l'utilisation de principes physiques modernes de conversion de l'énergie éolienne développés par Albert Betz dans les années 1920 ont contribué à améliorer l'efficacité du rotor [1].

Au début du XXe siècle, les grandes villes des pays industrialisés étaient déjà alimentées en électricité, mais l'électrification des zones rurales se déroulait à un rythme beaucoup plus lent, principalement aux États-Unis où l'État territorial était extrêmement vaste. La production

d'électricité à partir de l'énergie éolienne a alors été considérée comme une solution à ce problème et les premières tentatives de production d'électricité, en utilisant des éoliennes avec dynamos électriques installées, ont été faites. Le développement s'est concentré sur les petites éoliennes d'une puissance nominale de 1,8 à 3 kW [1,4].

En 1940, l'approvisionnement des zones reculées n'étant plus un problème majeur, l'ingénieur américain Palmer C. Putnam a eu l'idée d'implanter de grandes éoliennes au sein du réseau national. Le résultat a été la première éolienne de taille mégawatt au monde, illustrée dans l'image ci-dessous:



**Figure I.1. La première éolienne de taille mégawatt au monde
Reproduit de [4]**

Les aubes de turbine étaient en acier inoxydable et positionnées sous le vent. Les pales utilisaient un mécanisme de tangage hydraulique pour contrôler la vitesse et la puissance de sortie. En raison des prix de fabrication élevés et du fait que plus tard il a subi une défaillance de la lame, la production a été abandonnée [2].

La popularité des éoliennes a toujours oscillé avec la variation des prix des combustibles fossiles. Un bon accès au pétrole et les investissements dans l'énergie nucléaire dans les années 60 ont conduit à un déclin du développement des grandes éoliennes. Mais après la crise énergétique de

1973, des entreprises privées et des gouvernements de pays industrialisés tels que les États-Unis, l'Allemagne, la Suède et le Danemark ont commencé le développement moderne de la conception et de la fabrication d'éoliennes. L'idée était de construire des unités de grande taille pour fournir une source d'énergie renouvelable aux services publics [1].

De nombreux efforts ont été consacrés à la recherche et au développement d'éoliennes de grande taille afin de minimiser les coûts spécifiques (EUR / kW ou EUR / m²) qui étaient jusqu'à quatre fois plus élevés que ceux des turbines de plus petite taille. L'amélioration de la conception aérodynamique et l'augmentation de la hauteur de la tour et de la taille de la turbine ont permis une réduction significative des coûts unitaires de production d'électricité [2].

À la fin du 20e siècle, l'efficacité des éoliennes a été considérablement améliorée par de nouveaux développements dans des domaines tels que la science des matériaux qui ont apporté une nouvelle gamme de composites et d'alliages avec d'excellents rapports résistance / poids et les progrès de la technologie informatique qui ont permis la modélisation et test avant la production. De plus, l'adaptation de l'électronique de puissance et de l'aérodynamique aérospatiale pour les éoliennes a permis au rotor de travailler à vitesse variable, produisant plus de puissance et réduisant les charges de fatigue sur les **pales** [8].

I.2. Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (**figure I.2**)

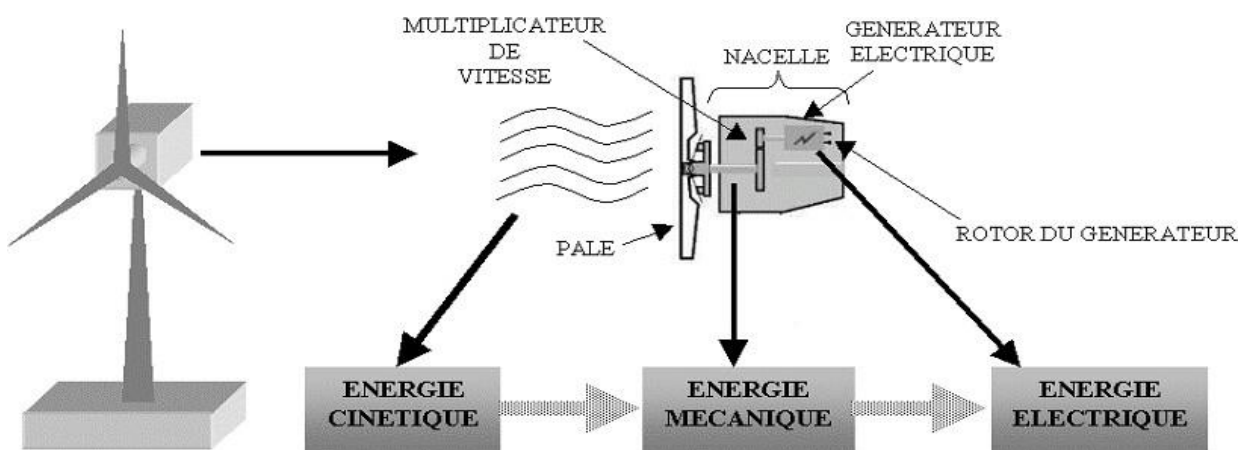


Figure I.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores[7].

I.3. Classification des éoliennes:

Depuis le début de la technologie de l'énergie éolienne, des machines de plusieurs types et les formes ont été conçues et développées autour de différentes parties du monde. Certains d'entre eux sont des conceptions innovantes qui ne sont pas commercialement acceptées. Bien qu'il y ait plusieurs façons de catégoriser les éoliennes, elles sont généralement classées en machines à axe horizontal et machines à axe vertical, en fonction de leur axe de rotation.

I.3. 1 Éoliennes à axe vertical:

L'axe de rotation de l'éolienne à axe vertical est vertical au sol et presque perpendiculaire à la direction du vent comme le montre la (figure I.3). Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitation si les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doi-

vent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal



Figure I.3 Éoliennes à axe vertical

I-3-2Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent sous vent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol et presque parallèle au courant de vent (figure I.4). Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important[8, 10].



Figure I.4. Éolienne à axe horizontal

I.3.3 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

Les principaux composants d'une éolienne sont le rotor, le système de train de transmission, le générateur, le système d'orientation des pales et de la nacelle, la tour et la fondation, et les systèmes de contrôle (**figure I.5**). Le rotor est constitué d'un moyeu et des pales de l'éolienne. Le train d'entraînement se compose d'un axe à vitesse réduite, d'une boîte de vitesses, et de l'axe à grande vitesse du côté de générateur. Le train d'entraînement inclut également des roulements de soutien, des accouplements, et des freins mécaniques. Dans certains cas, le générateur est relié directement au rotor, donc la boîte de vitesse n'est pas utilisée. La nacelle est la couverture qui protège le train et le générateur d'entraînement contre les conditions météorologiques sévères.

Le système de lacet (Écart système) garde l'arbre de rotor dans l'alignement du vent. Ce de Rnier est commandé par un système de contrôle automatique comprenant un capteur qui détecte la direction du vent,

Le système de contrôle comprend des capteurs, des contrôleurs mécaniques, des circuits électriques, des ordinateurs, des pompes et des valves hydrauliques, et des actionneurs (moteurs, pistons, etc.). Le système de contrôle est très important pour le fonctionnement de la machine et la production d'électricité, donc un contrôleur fiable est nécessaire pour faire fonctionner la turbine afin d'avoir la plus grande efficacité possible. D'autres composants électriques sont nécessaires pour le raccordement des éoliennes au réseau électrique, y compris les câbles, les appareillages, les transformateurs, les convertisseurs électroniques de puissance et dans certains cas des condensateurs de correction du facteur de puissance.

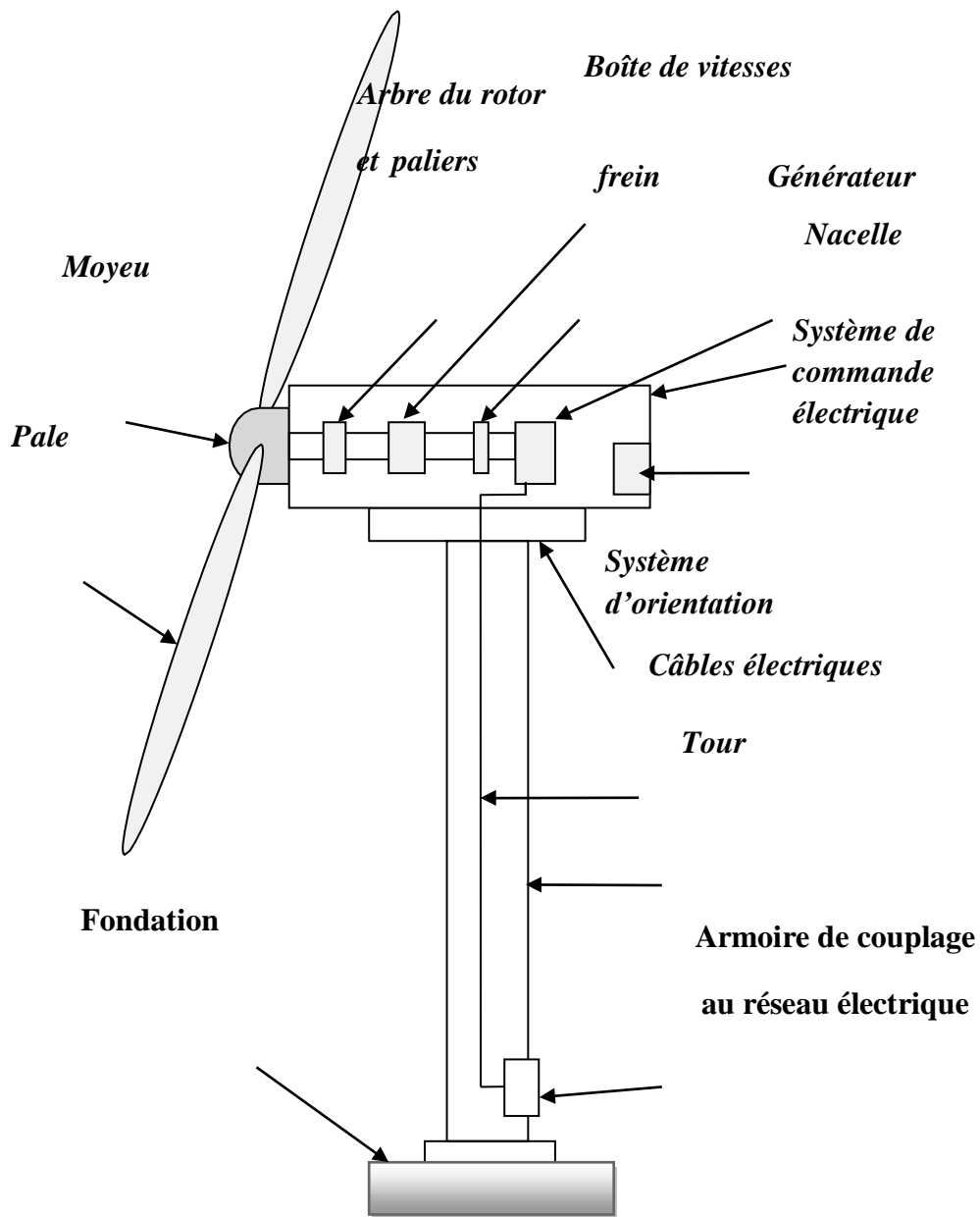


Figure I.5 Composants modernes d'éolienne

I.4 . Structure de l'éolienne:

Suite à la recherche et au développement approfondis d'éoliennes qui ont été effectués au cours des 30 dernières années, il existe un grand nombre d'options qui peuvent être adoptées lors de la conception d'un rotor pour une éolienne moderne à axe horizontal (HAWT). Chaque fabricant décide de la meilleure configuration pour une puissance nominale donnée, en tenant compte du poids final de la turbine, des coûts globaux et du rendement énergétique attendu. Les types de configurations comprennent des rotors à deux ou trois pales à vitesse fixe ou variable et contrôle de la puissance par mécanisme de tangage ou décrochage aérodynamique.

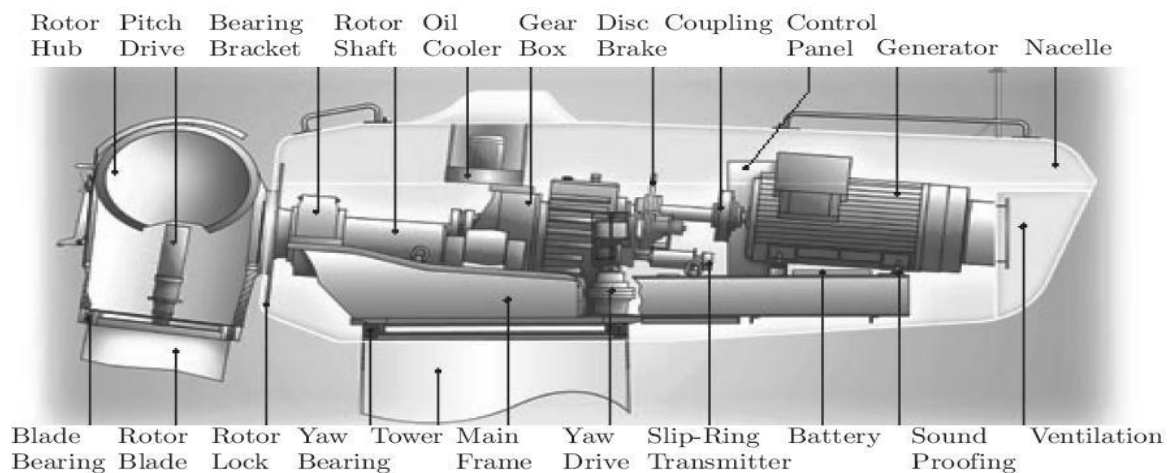


Figure I.6 Disposition Des Eoliennes

I.4.1. Nombre de lames

Dans les grandes éoliennes modernes, le nombre de pales est toujours lié à la stabilité de la turbine. Un nombre impair d'aubes (au moins trois) facilite le calcul des charges dynamiques puisque le rotor peut être considéré comme similaire à un disque. Les rotors à deux pales offrent l'avantage d'un poids réduit, mais ils doivent fonctionner à une vitesse de rotation plus élevée pour une efficacité optimale, augmentant ainsi les charges dynamiques, le bruit et l'intrusion visuelle. D'autres inconvénients sont le moment d'inertie inégal autour de l'axe de rotation et le moment de flexion net dû au cisaillement du vent lorsque les pales s'alignent verticalement avec la tour. Ce dernier problème est commun à tous les rotors avec un nombre pair de pales, car là où les pales supérieures interagissent avec plus de vent que là où les pales inférieures [11]. Le rotor à une seule pale n'existe qu'à des fins expérimentales,

bien que cela économise le coût d'une autre lame, la conception nécessite un contre-poids à des fins d'équilibrage, ce qui rend le modèle peu attrayant et non rentable par rapport à deux rotors à aubes. Par consé-

quent, les rotors à trois pales sont le choix de conception pour les grands HAWT modernes et plusieurs fabricants d'éoliennes à deux pales sont passés à des conceptions à trois pales [12].

I.4.2 Taille des aérogénérateurs :

Les besoins en énergie électrique conduit les chercheurs et les constructeurs à usiner des éoliennes de plus en plus puissantes ; la puissance de l'éolienne va avec la longueur des hélices. La classification des éoliennes selon leurs tailles se réduit à trois types, les éoliennes de petites tailles, de moyenne et de grande taille [13].

TAILLE	Diamètre de l'hélice	Puissance Dé livrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	45 m et plus	1 MW et plus

Tableau I.4.2: Taille des éoliennes

I-5-Principe de fonctionnement :

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

- ✓ Au niveau du rotor, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir 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.
- ✓ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. [14]

I-5-1 Éléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal):

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor :

cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charge si

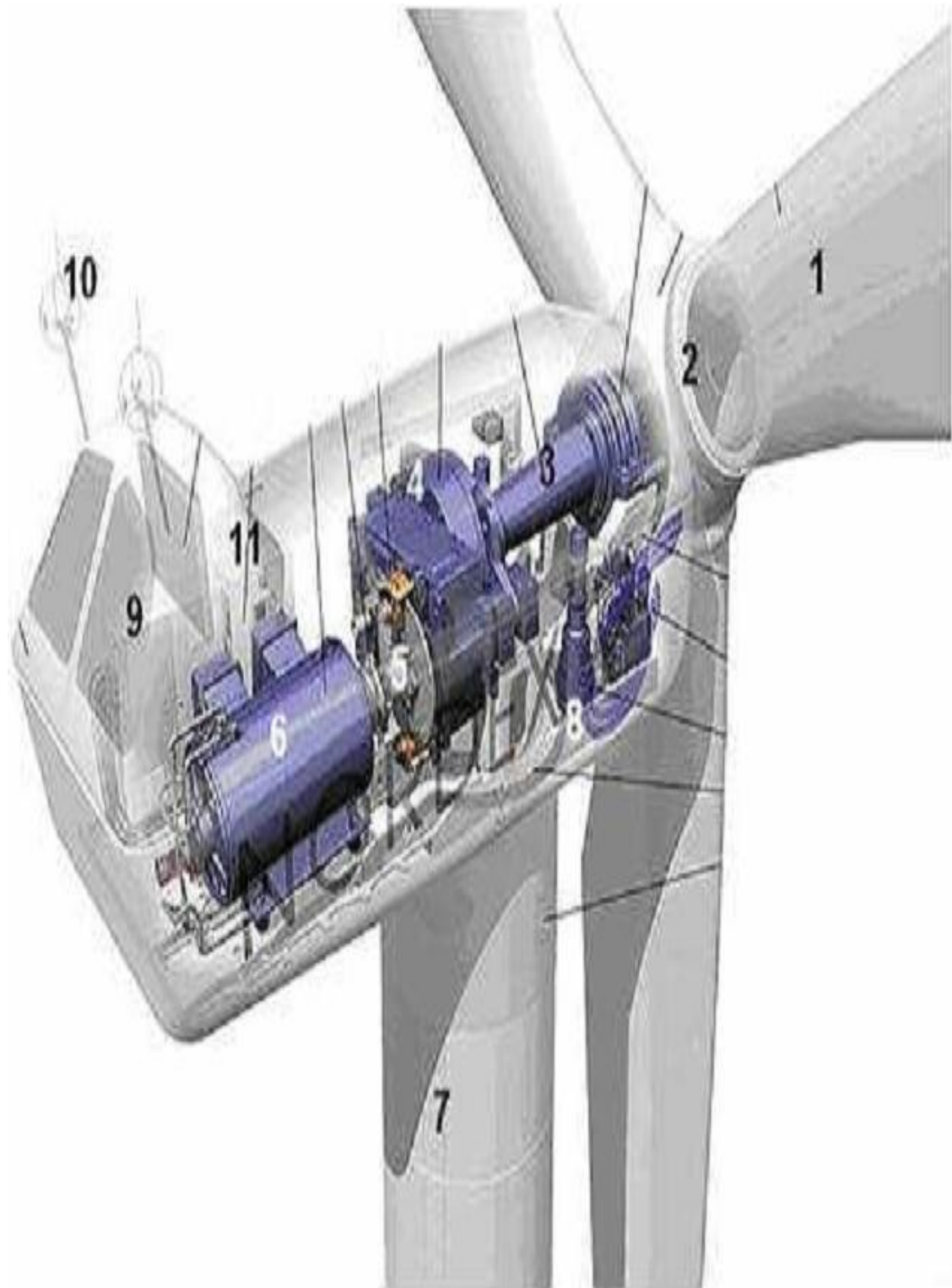


Figure I.7. les composantes de l'aérogénérateur

- 1) **Les pales:** sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
- 2) **Le moyeu:** il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- 3) **L'arbre primaire**(ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
- 4) **Le multiplicateur** :il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- 5) **L'arbre secondaire:** il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- 6) **Le générateur électrique:** il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- 7) **Le mât** :c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- 8) **Le système d'orientation de la nacelle** :c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- 9) **Le système de refroidissement:** il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- 10) **Les outils de mesure du vent:** girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- 11) **Le système de contrôle électronique** :il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

12) **Au pied du mâts trouve un transformateur.**

I.6. Caractéristiques technologiques des éoliennes:

1-Le supportage:

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés. Si le haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation au sol, le supportage de plusieurs éoliennes par une seule structure est envisagé ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques entreillissent intérieurement. Actuellement les mâts en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance. [16]

2-Les pales : [17]

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent les pales :

- ✓ **La longueur**
- ✓ **La largeur**
- ✓ **le profil**
- ✓ **les matériaux**
- ✓ **le nombre**

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat...

Longueur:

-Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Largeur :

-La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale se-

ra plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'un hélice.

Les matériaux

- Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulier cémenteux dus aux pales d'hélicoptère.
- Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.
- Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.
- On rencontre plusieurs types de matériaux:
 - **le bois**: il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
 - **le lamellé-collé** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
 - **les alliages d'aluminium**: pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
 - **les matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

Chapitre II

étude des

vents

II.1. Définition du vent :

On entend par vent le mouvement naturel de l'air, lent ou rapide, et le principal facteur des rafales de vent est la différence de pression atmosphérique d'un endroit à l'autre. Le vent souffle toujours des zones de haute pression vers les zones de basse pression proches, et quand il souffle, il suit un système fixe, car il dévie toujours vers la droite de sa cible dans l'hémisphère nord et vers sa gauche dans l'hémisphère sud, selon la loi de Ferrel.[1]

Cette déviation se produit en raison de «l'effet ou force de Coriolis» (1), qui est l'effet résultant de la rotation de la terre autour d'elle-même d'ouest en est, et la vitesse de rotation de sa circonférence diminue à mesure que nous nous dirigeons vers le cercle équatorial vers les pôles. 1700 km / h, puis il diminue vers les pôles pour en atteindre environ la moitié à 60 ° de latitude puis à zéro au pôle lui-même.[1]

Selon cette déviation, les vents généraux de l'hémisphère nord sont déviés vers l'ouest s'ils se dirigent vers l'équateur et vers l'est s'ils se dirigent vers le pôle nord. Alors que le contraire se produit dans l'hémisphère sud. [1]

La déviation des vents se produit plus clairement lorsqu'ils soufflent autour des hauteurs et des dépressions atmosphériques, où les vents dans l'hémisphère nord ont tendance à souffler dans une direction cohérente avec une direction dans le sens des aiguilles d'une montre autour de la haute atmosphérique et opposée à celle-ci autour de la dépression atmosphérique, et inversement. se produit dans l'hémisphère sud et la même règle est vraie aux coups de vent autour des centres d'ouragan et des tourbillons.[1]

Le cercle équatorial est la seule circulaire occasionnelle que les vents ne dévient pas lorsqu'ils le traversent, que ce soit du nord ou du sud, car l'influence coréenne est négligeable sur ce cercle puis augmente à mesure que l'on s'en éloigne vers le nord et vers le sud jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum aux pôles

Cela est dû au fait que la direction de l'influence coréenne est sur le cercle équatorial, perpendiculaire à la direction horizontale des vents, et en proportion directe avec sa vitesse, et donc la direction des vents est parallèle à l'axe de la Terre, mais sa déviation augmente à mesure que nous nous dirigeons vers les pôles en raison de l'influence croissante de la force coréenne de sorte que sa direction est au pôle verticalement. Sur l'axe de la Terre, où l'influence coriolienne a atteint son maximum et la déviation du vent a atteint son maximum.[1]

En fait, l'effet de la force coréenne ne tombe pas uniquement sur les vents, mais sur le mouvement du corps, c'est-à-dire un objet en mouvement à la surface de la terre qui se déplace automatiquement comme les courants océaniques et l'eau des rivières. Les deux extrémités, la direction de le mouvement est moyen entre ces deux directions dans un degré proportionnel au degré transversal, où la direction est le résultat de deux mouvements, l'un parallèle à l'axe de la terre et le second perpendiculaire à celle-ci, et le premier augmente à mesure que nous nous dirigeons vers le cercle équatorial tandis que le second augmente vers les pôles[1]

(1) Cette expression est attribuée au nom du chercheur français qui a découvert cet effet, G. Coriolis en 1844.

II.2. Les vents de différents types, dont les plus importants sont :

- *Vents stationnaires*
- *Les moussons*
- *Vents locaux*

2.1. Vents stationnaires:

C'est le type de vent le plus important car il souffle tout au long de l'année et comprend des vents commerciaux réguliers et inversés (ouest) et polaires

alizés:

Le vent souffle des deux zones de haute pression

Au-delà des orbites (le cheval montre 30 et 35 nord et sud) vers la zone de basse pression équatoriale (lente ou stagnation), et sa direction est nord-est dans l'hémisphère nord, et sud-est dans l'hémisphère sud, et ces vents sont réguliers tout au long de l'année, que ce soit dans leur direction ou dans sa puissance, il est presque limité aux couches inférieures de l'air, et il était d'une grande importance dans la navigation maritime à l'époque de la propagation des voiliers, car les vents du nord-est ont aidé Colomb à traverser l'océan Atlantique de l'Afrique de l'Ouest aux îles occidentales, et ce sont les parties hautes des côtes orientales des continents qu'ils sont situés dans leurs régions en éruption, mais ils atteignent à sec les parties occidentales des continents qui tombent dans les mêmes largeurs. C'est la raison pour laquelle la plupart des déserts du monde dans la zone des alizés sont situés à l'ouest des continents, les vents de bord en général, à moins qu'ils ne passent au-dessus des mers ou des océans, et qu'ils soient saturés de vapeur d'eau, ce qui tombe sous forme de pluie sur les alizés, et l'effet de modérer la température de l'air dans les régions qui est soufflé par celui-ci, car il se déplace des zones moins chaudes vers des endroits plus chauds. [2]

Les alizés sont de vitesse modérée variant entre 16-24 kilomètres par heure, qui sont plus stables et calmes dans les parties orientales des océans que dans les parties occidentales de ceux-ci. [2]

Vent de face (ouest):

Il souffle des deux régions de haute pression au-delà des orbites (spectacles de chevaux) aux deux zones de basse pression aux deux cercles polaires, et sa direction est vers le sud-ouest dans l'hémisphère nord et le nord-ouest dans l'hémisphère sud, et est parfois connue comme des vents d'ouest, d'ouest, et se distingue des alizés par leur manque de régularité et d'irrégularité. Sa stabilité sur un seul état ou dans sa puissance. Elle se caractérise également par l'émergence de nombreux ouragans qui voyagent d'ouest en est, et lors des ouragans

Il y a de la turbulence dans la direction et la vitesse des vents, et de violentes tempêtes peuvent se produire, qui deviennent des vents soufflants de tous les côtés. Les vents contraires soufflent sur des destinations plus fraîches que celles d'où ils soufflent, et ils sont saturés de vapeur, et apportent donc chaleur et pluie vers les destinations qui soufflent sur eux dans les continents occidentaux.[2]

Les vents d'ouest sont plus réguliers dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord, car ils sont caractérisés dans l'hémisphère nord avec un grand changement d'une saison à l'autre, en raison de la différence saisonnière des températures et de la répartition de la pression sur terre et sur l'eau, qui se chevauchent clairement. Quant à l'hémisphère sud, il souffle régulièrement en raison de l'homogénéité de la surface due à la prédominance de l'eau dessus, notamment entre les deux cercles de largeur 35° - 60 au sud.[2]

Vent polaire:

Il souffle des pôles vers les zones de basse pression aux deux cercles polaires, et sa direction est vers le nord-est dans l'hémisphère nord et le sud-est dans l'hémisphère sud, et l'une des caractéristiques les plus importantes de ce vent est qu'il fait froid[2]

C'est sec et sec, et ce sont généralement des vents faibles, et c'est pourquoi lorsqu'ils rencontrent les vents contraires, ces derniers les dépassent, et prévalent dans leurs zones de soufflage, et cette rencontre des vents inversés avec les vents polaires crée un air. Front qui génère le long de son extension des ouragans qui voyagent d'ouest en est avec les vents d'ouest.[2]

2.2. Moussons:

Ces vents soufflent pendant certaines saisons, et se caractérisent par le changement de leur direction

La plupart du temps en été qu'en hiver, et il apparaît souvent entre les tropiques, et sur les régions orientales des continents, et le meilleur exemple pour nous est les vents qui soufflent sur le continent asiatique, en particulier sur l'Inde, l'Indochine, la Chine, le Japon et la Corée, et il est de deux types: hiver de mousson et été saisonnier.[2]

En hiver, l'air est froid sur le continent asiatique, de sorte que sa pression augmente en raison de sa haute densité, tandis que l'air dans les océans Pacifique et Indien est plus chaud que l'air sur terre, et donc sa pression est plus faible, et en conséquence les vents poussent du continent asiatique vers les deux océans précédents. Il souffle de l'intérieur vers les côtes sud et est, et cette mousson hivernale se caractérise par être froide et sèche, à moins qu'elle ne traverse les mers ou les océans, et elle est saturée de vapeur d'eau qui tombe sous forme de pluie interceptée par les hauteurs.[2]

En été, c'est le contraire qui se produit, car l'air sur le continent est plus chaud, ce qui réduit sa pression (basse pression), tandis que l'air sur les océans Indien et Pacifique est moins chaud, et donc plus haute pression, donc les vents s'en échappent vers le continent, et ils sont au sud-est sur l'est et le sud du continent. Inde occidentale, et ces vents d'été ont une grande importance, car ils apportent de fortes pluies au sud et à l'est du continent, les pluies sur lesquelles l'établissement et le succès de l'agriculture dépend de ces régions

et le continent asiatique est unique dans ce système saisonnier idéal. On trouve des systèmes semi-saisonniers dans d'autres parties du monde, comme dans le sud-est des États-Unis d'Amérique, dans le nord de l'Australie, en Abyssinie et sur les côtes du Yémen et d'Asir.[2]

2.3 .Vents locaux:

Ce sont des vents qui résultent de la différence de pression dans une petite zone et pour une courte période, ainsi que provoqués par des facteurs spécifiques au terrain. Il diffère des moussons en ce qu'il n'inclut pas une saison complète, mais plutôt il souffle par périodes intermittentes.

Et les vents locaux soufflent autour des dépressions

Son système de soufflage dispose donc d'un système spécial qui n'est pas forcément compatible avec la circulation générale de l'air. Dans l'hémisphère nord, les vents locaux soufflent à l'avant des dépressions du sud, et donc ils sont chauds ou chauds, surtout dans la moitié d'été de l'année. Quant au fond de la dépression, il souffle du nord, il fait donc froid, surtout en hiver la moitié de l'année, et il est appelé par des noms différents selon les régions sur lesquelles il souffle.[2]

les vents locaux peuvent être divisés en trois groupes principaux suivants:

Groupe de vent local chaud:

La plupart soufflent à l'avant des dépressions, dont les plus célèbres sont la Cinquième et Qibli, le Sirocco et Solano, l'Hermann et les vents.[2]

Groupe éolien local à effet de serre:

La plupart d'entre eux soufflent à l'avant des dépressions, mais ils n'apparaissent que dans les zones montagneuses, où ils gagnent la majeure partie de leur température en raison de leur pression sur les pentes des montagnes, et les plus célèbres d'entre eux sont les Fon et les vents Chinook.[2]

Groupe de vent froid:

Et à l'arrière des dépressions, les vents du Mistral soufflent dans la vallée du Rhône, et les vents de Bora au nord de la mer Adriatique.[2]

II.3. Caractérisation du Vent :

3.1.Répartition instantanée de la vitesse du vent :

Le vent souffle là où l'air présente des différences de température et de pression et se dirige toujours des hautes pressions vers les basses pressions. Si la terre ne tournait pas, l'air se

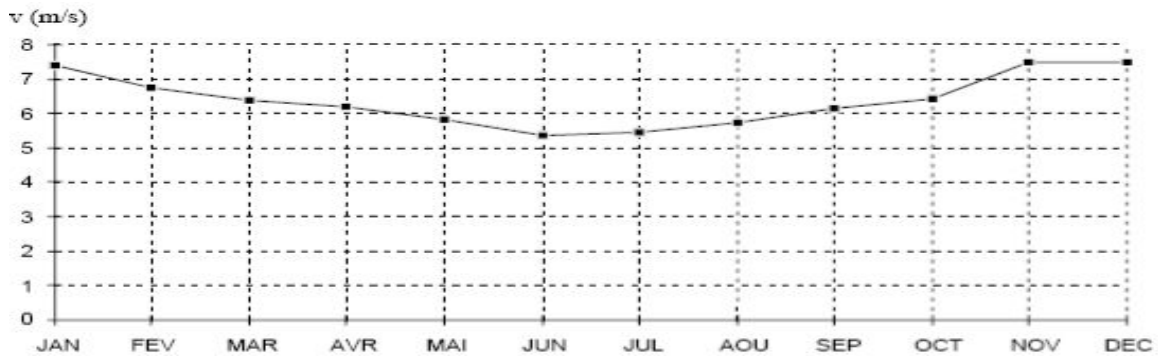


Figure II.1. Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an [3].

Déplace rait directement (en ligne droite) des centres de haute pression (anticyclone) vers les centres de basse pression (cyclone) mais à cause de cette rotation du globe, l'air est forcé de suivre une trajectoire courbe, légèrement infléchie vers la basse pression (force de Coriolis). Le choix



dossier zaouza et yahyaoui.rar

géographique d'un site éolien est important dans un projet de production d'énergie éolienne. Pour déterminer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait déterminer les caractéristiques du vent dans ce site. Pour connaître les propriétés d'un site, nous devons faire des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps. Les figures ci-dessous montrent les variations des vitesses moyennes sur unité pour une période donnée.[3]

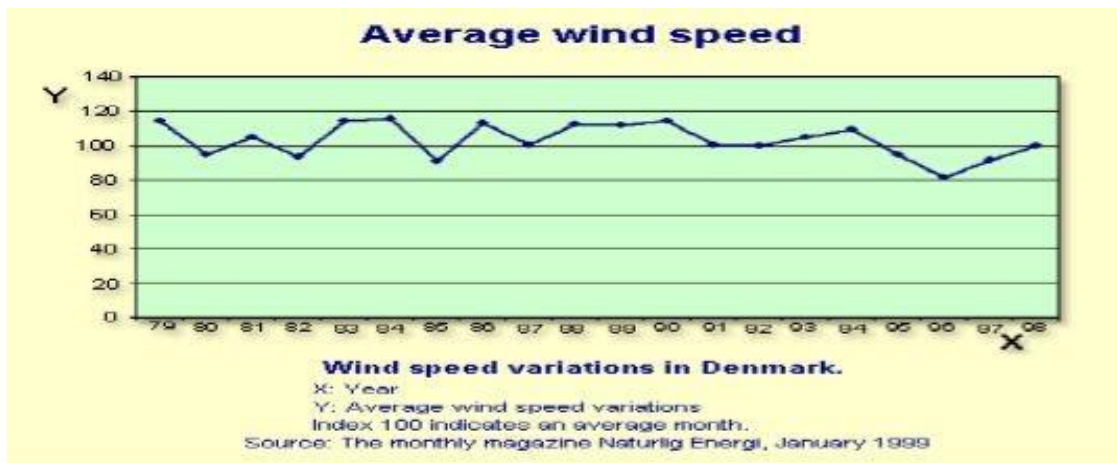
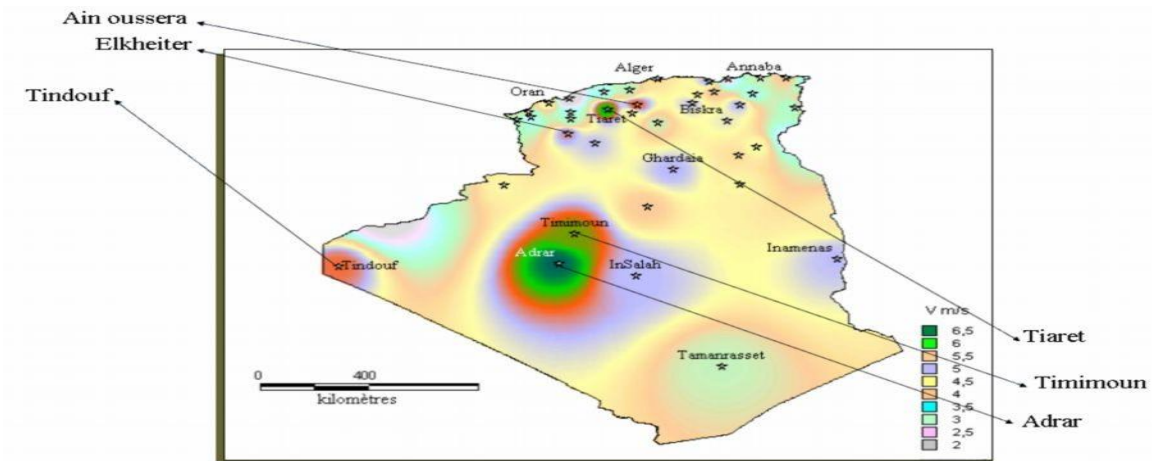


Figure II.2. Variations des vitesses moyennes du vent sur 20 ans [3].

3.2.Répartition régionale de la vitesse du vent :

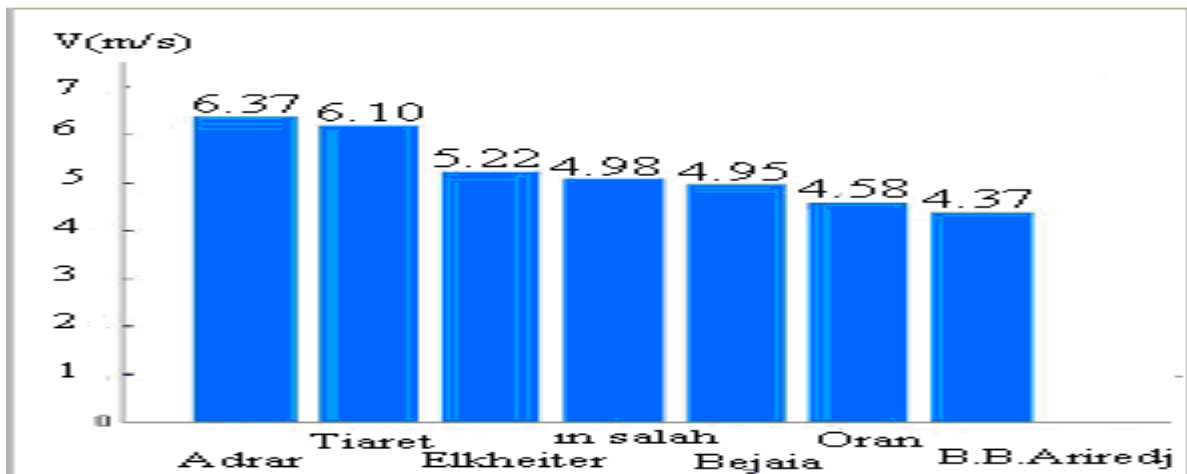
Pour implantée une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire

nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La (Figure II.3) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'«Energie Eolienne» du CDER.



(Figure II.3):les régions ventées en Algérie[3]

D'après les données du CDER, la Figure II.3 indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.



(Figure II.3):Comparaison entre les vitesses moyennes des sites ventés [3].

3.3.L'histogramme des vitesses de vent :

L'histogramme des vitesses des vents ou courbe de durée en vitesse du site est un outil important dans la caractérisation d'un site éolien. La courbe de durée en vitesse représente le temps durant lequel le vent se situe dans chaque fourchette ou palier de valeurs de vitesse. Par exemple, indisposant d'un ensemble N de valeurs mesurées de la vitesse du vent on détermine l'histogramme de la vitesse du vent (la courbe de distribution des vitesses du vent (**Figure II.4**) ; l'exemple de calcul est basé sur les données météorologiques de la station de Hassi Rmal[3].

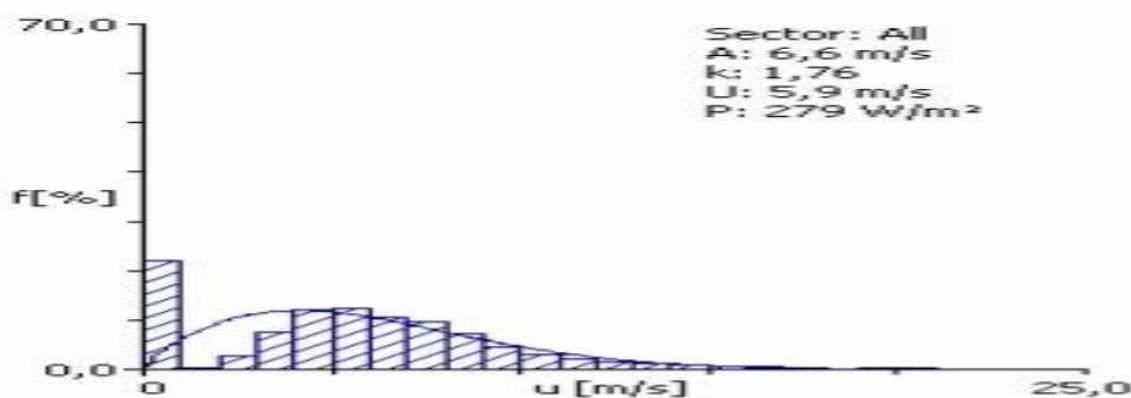


Figure II.4 Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp[3].

3.4 Influence de la hauteur :

Pour définir les caractéristiques d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent Augmente selon la hauteur hl expression(1.20)donne la méthode de ce

Calcule ton précise queues la hauteur du mate thèmes la hauteur des appareils de mesure.

$$V_v(h) = V_v(h_{mes}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{mes}/\alpha)}$$

Chapitre III

Calculs de Conception d'éoliennes

III.1. introduction:

Les pales des éoliennes modernes utilisent des sections de profil aérodynamique pour convertir l'énergie du vent en énergie mécanique utile. Il existe de nombreuses méthodes différentes pour concevoir et prédire les performances d'une éolienne. À partir du concept de disque d'actionneur de base développé par Betz (1926) [1] et Glauber (1935) [28] - qui a ensuite été étendu à la théorie dite Balade Elément Moment (BEM) par Wilson (1976) [3] et De Vires (1979) [4]

à des méthodes plus avancées telles que la résolution des équations de Navier-Stokes en utilisant des logiciels de Dynamique des Fluides Numérique (CFD) [12,21,22,23]. De plus, comme les éoliennes sont placées sur de nombreux terrains complexes avec des conditions de vent très variables, comme en montagne par exemple, le profil du vent doit être soigneusement analysé.

III.2. La source éolienne:

Il est très important de décrire avec précision le comportement du vent d'un point de vue conceptuel et économique. Les concepteurs de turbines utilisent les données éoliennes pour l'optimisation des turbines et les investisseurs les utilisent comme moyen de calculer le rendement énergétique possible d'un site déterminé.

Le vent est le mouvement des masses d'air dans l'atmosphère entraîné par des forces convectives générées principalement par l'absorption inégale du rayonnement solaire à la surface de la Terre ; pour cette raison, l'utilisation de l'énergie éolienne est une forme indirecte d'utilisation de l'énergie solaire. Les météorologues estiment que la plupart des $1,5 \times 10^{18}$ kWh d'énergie solaire absorbés annuellement par la surface de la Terre sont convertis en chaleur [5], alors que seulement 2% environ sont convertis en mouvement de l'air, ou vent. Néanmoins, compte tenu des limitations de l'extraction de l'énergie éolienne dans l'atmosphère telles que la hauteur et l'accessibilité, il en résultera une puissance calculée dans le vent de 4×10^{12} kWh, soit cent fois la production électrique de toutes les centrales électriques du monde [6], D'après la mécanique newtonienne, l'énergie cinétique d'une particule en mouvement est :

→

K. E = $\frac{1}{2} m u^2$ (j) , et pour un fluide en mouvement le débit massique est $\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho A U$ (Kg/s)

La puissance étant l'énergie par unité de temps, la puissance disponible dans le vent est :

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} u^2 = \frac{1}{2} \rho A U^3 (W)$$

(3.1)

Par conséquent, la puissance du vent est proportionnelle à la densité de l'air, à la surface balayée, et au cube de la vitesse du vent, .

La surface de la terre ralentit le flux d'air au niveau du sol en raison de la résistance de la couche limite qui est amplifiée à cause des bâtiments et des structures au sol [33].

Chiffre 2.10 représente une courbe de vitesse du vent typique sur un site donné avec une altitude croissante et la courbe de puissance respective pour la vitesse du vent croissante.

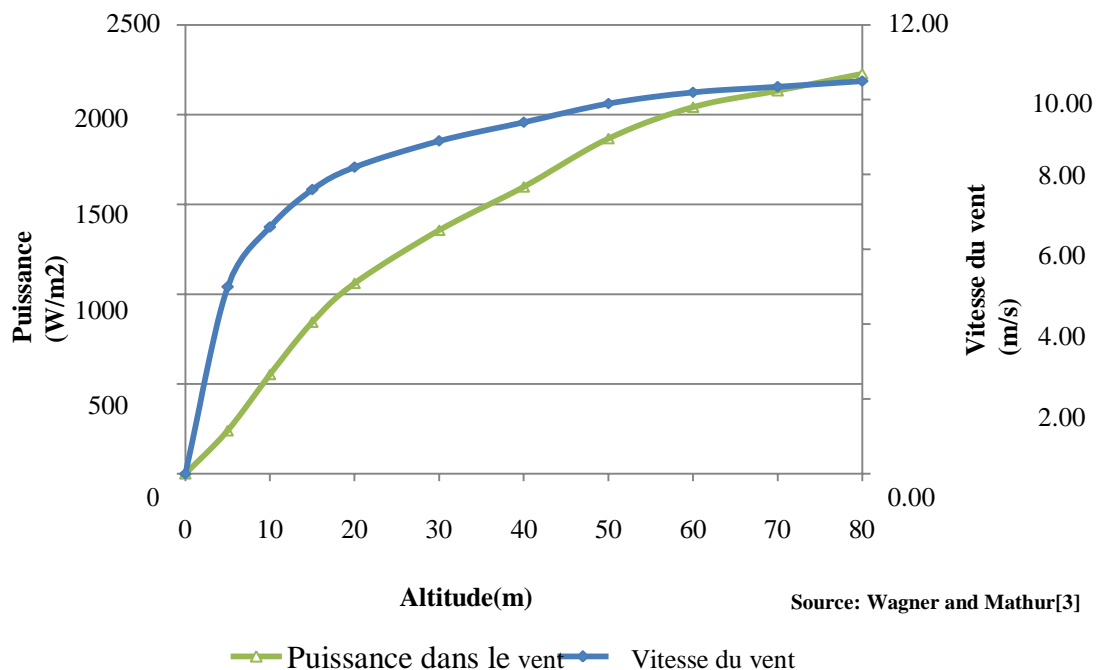


Figure III.1. Puissance dans le vent et variations de la vitesse du vent avec altitude

La vitesse du vent augmente fortement du niveau du sol à 20m, et de 10m à 20m la puissance disponible dans le vent double. Il met en évidence l'importance de placer le rotor le plus haut possible du sol afin d'augmenter le rendement énergétique.

Comme le vent est très variable, la quantité de vent d'une année à l'autre variera certainement, et si des décennies sont prises en considération, les variations seront considérablement plus élevées. Étant donné que ces variations à long terme ne sont pas entièrement comprises et très difficiles à prévoir [8], la précision

la prédiction de la viabilité économique d'un site choisi n'est pas toujours une tâche facile. Afin de surmonter ce problème, le concepteur HAWT peut utiliser des outils tels que l'Atlas éolien européen (EWA) - trouvé à l'annexe A - ou approximer la fluctuation de la vitesse du vent en utilisant une fonction de distri-

bution de probabilité. L'une des plus couramment utilisées est la distribution de Rayleigh en raison de sa simplicité de ne prendre en compte que la vitesse moyenne du vent, , qui peut être déterminé en examinant les données météorologiques telles que l'EWA [6,8]. La distribution de Rayleigh prend la forme :

$$F(U) = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{U}{\bar{U}}\right) e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2}$$

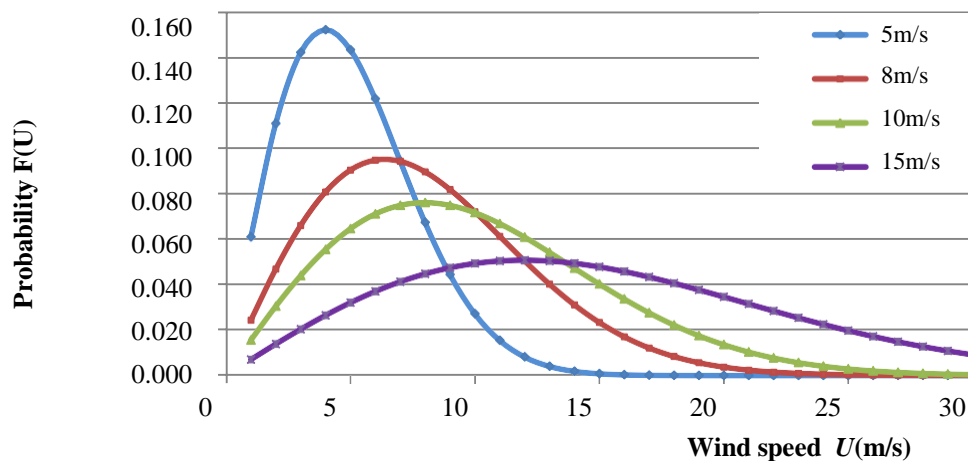


Figure III.2.montre comment la probabilité d'avoir des vents forts varie en fonction de la vitesse moyenne du vent.

À des vitesses de vent moyennes plus élevées, les courbes se déplacent vers la droite, c'est-à-dire que plus la vitesse moyenne du vent est élevée, plus la probabilité d'avoir des vents forts tout au long de l'année est élevée. A partir de la distribution de Rayleigh, la puissance du vent est calculée en intégrant la courbe de probabilité par rapport à U [9] :

$$\begin{aligned} P_{avg} &= \\ \left(\frac{1}{2}\rho AU^3\right)_{avg} &= \\ \frac{1}{2}\rho A(U^3)_{avg} &= \\ \frac{1}{2}\rho A \int_0^{\infty} U^3 F(U) dv &= \\ = \frac{6}{\pi} * \frac{1}{2}\rho A(U^3)_{avg} & \end{aligned}$$

Par exemple, étant donné que la variation du vent suit la distribution de Rayleigh, si une éolienne devait être située sur une colline avec une vitesse moyenne du vent de 8,5 m/s à 15 Co, la puissance moyenne disponible dans le vent serait

$$P_{avg} = \frac{6}{\pi} * \frac{1}{2} \rho A (U^3)_{avg} = \frac{6}{\pi} * \frac{1}{2} * 1,225 * 8,5^3 = 718,4 \text{ W/m}^2$$

Il montre un bon accord avec l'Atlas éolien européen qui pour une vitesse moyenne du vent de 8,5 m/s la puissance moyenne disponible est de 700 W/m².

III.3. Aérodynamique du rotor:

Comme indiqué ci-dessus, il existe différentes approches pour concevoir un rotor pour les éoliennes. L'approche analytique la plus couramment utilisée aujourd'hui est la théorie BEM car elle a montré qu'elle donnait des résultats précis par rapport aux données expérimentales [10]. Grâce à la théorie BEM, des paramètres importants tels que le couple de sortie du rotor, la puissance de sortie, la vitesse de rotation optimale et l'efficacité peuvent être facilement dérivés. La théorie BEM utilise des courbes de profil aérodynamiques 2D mesurées dans des souffleries, et comme mentionné dans la section 2.4.2, les performances attendues du rotor calculées en utilisant des données de profil aérodynamiques bidimensionnelles peuvent différer considérablement lorsque le rotor est analysé dans un environnement 3D. Pour cette raison, un rotor 3D est généralement modélisé afin de résoudre les équations aux dérivées partielles non linéaires 3D de Navier-Stokes pour l'écoulement compressible global ainsi que l'écoulement près de la surface de la pale. Ceci est fait en utilisant des codes de dynamique des fluides computationnelle (CFD) en raison de la quantité d'équations qui doivent être résolues simultanément [11,12]. L'approche analytique suit [10, 13, 14].

III.4. Théorie de la quantité de mouvement élémentaire et limite de Betz:

La théorie de la quantité de mouvement élémentaire généralement attribuée à Betz (1926) [1], est une méthode simple mais puissante pour décrire l'écoulement à travers une éolienne. La théorie ne prend pas en considération la forme géométrique du convertisseur d'énergie ou du rotor, qui est représenté par un disque d'actionnement travaillant dans un environnement sans frottement idéal contraint par une limite de tube de flux où le seul flux est à travers les extrémités du tube de flux (c'est-à-dire l'écoulement ne traverse pas la limite du tube d'écoulement). L'énergie est extraite en décélérant la vitesse d'entrée U_1 loin en amont du disque vers U' à travers le plan du rotor et U_3 loin en aval du volume de contrôle. La poussée est obtenue par la discontinuité de la pression à travers le disque de l'actionneur avec la zone balayée A . Le nombre de Mach étant inférieur à 0,3, l'écoulement est traité comme incompressible,

c'est-à-dire à densité constante [10, 13]. La diminution de la vitesse axiale, la chute de pression et le sillage (sillage) derrière le rotor peuvent être observés sur la figure 3.3.

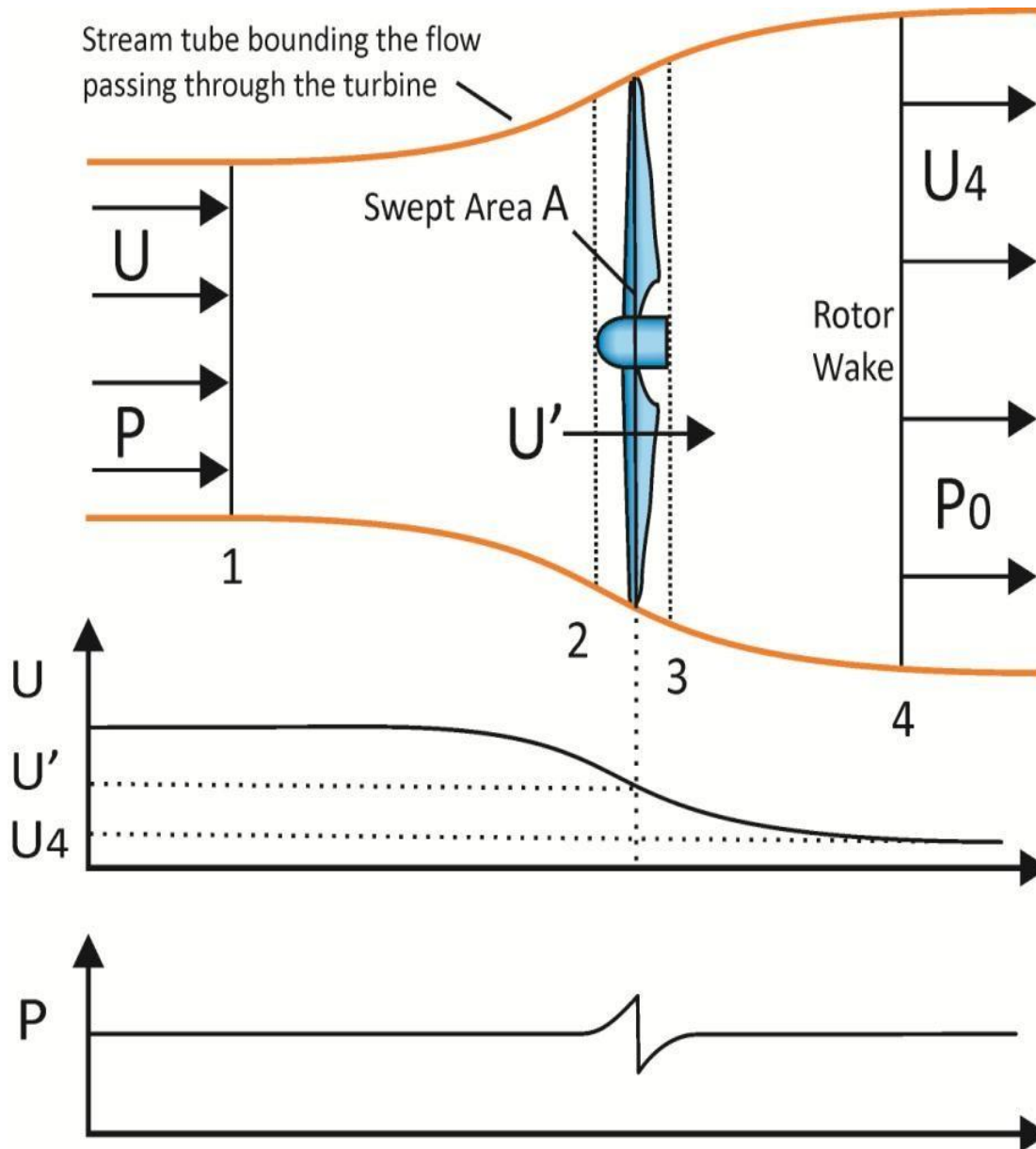


Figure III.3. Volume de contrôle pour l'analyse du rotor idéal et la vitesse et la pression en amont et en aval du plan du rotor. Redessiné à partir de [10]

Comme spécifié dans [10], les hypothèses et limitations suivantes s'appliquent à la théorie :

- Le disque est infiniment fin
- Le débit et la poussée sont uniformes sur tout le disque.
- La pression statique aux stations 1 et 4 est égale à la pression statique ambiante non perturbée.
- Il est implicitement supposé qu'il n'y a pas de rotation de sillage car il n'y a pas de composantes radiales.
- Le calcul des caractéristiques de l'expansion du sillage ne peut pas être effectué car la théorie ne considère pas les composantes de la vitesse radiale.

Le rotor extrait la puissance du vent en ralentissant sa vitesse. Comme le flux est incompressible, la surface derrière le rotor doit augmenter car le même débit massique doit le traverser. En raison de l'incompressibilité du fluide, la diminution de la vitesse entraînera un changement de quantité de mouvement à travers le volume de contrôle. Le changement de moment du vent exercera une poussée axiale sur le rotor et une force égale et opposée sera exercée sur le vent. En appliquant une relation de quantité de mouvement horizontale entre les stations 1 et 4, la poussée sur le disque est trouvée

$$\Sigma F_x = T = \dot{m}(U - U_4) = \rho A \dot{U}(U - U_4) \text{ (Newton)} \quad (3.4)$$

Où T est la poussée générée, ρ est la densité et \dot{U} est le débit massique à travers le tube, qui est égal à $(\rho A U)_1 = (\rho A U)_4 = \text{constant}$, pour un fluide incompressible et un écoulement en régime permanent. Il est donc clair que si la poussée est positive alors $U_1 > U_4$ donc le fluide doit ralentir. La poussée peut également être exprimée en termes de différence de pression à travers le disque :

$$T = A(P_2 - P_3) \quad \text{(Newton)} \quad (3.5)$$

On peut se montrer qu'en utilisant l'équation de Bernoulli sur les stations 1-2 et 3-4 où aucun travail n'est donné (no change in pressure, and $P_1 = P_4$) la pression différentielle ($P_2 - P_3$) s'exprime de la façon suivante :

$$(P_2 - P_3) = \frac{1}{2} \rho (U^2 - U_4^2) \text{ (Pascal)} \quad (3.6)$$

Substituting this into (3.5) gives

$$T = \frac{1}{2} \rho A (U^2 - U_4^2) \text{ (Newton)} \quad (3.7)$$

Équation avec (3.4) rendements:

$$\dot{U} = \frac{1}{2} (U - U_4) \text{ m/s} \quad (3.8)$$

Où U' est la vitesse du vent à la turbine, qui, à partir de la quantité de mouvement et de la continuité, s'est avérée être la moyenne de la vitesse en amont non perturbée et de la vitesse en aval. La diminution fractionnaire de la vitesse du vent entre le flux libre non perturbé et le plan du rotor est exprimée en termes de facteur d'induction axiale, a :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \text{ m/s} \quad (3.9)$$

La substitution dans l'équation (3.8) donne deux expressions (3.10) et (3.11) pour le plan du rotor et les vitesses lointaines en aval, U' et U_4 respectivement :

$$U' = U_1(1 - a) \quad \text{(m/s)} \quad (3.10)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad \text{(m/s)} \quad (3.11)$$

L'équation (3.11) montre que la théorie ne représente que des valeurs de $a < 0,5$, car cela nécessiterait que la vitesse U_4 soit réduite à zéro (pas de flux), ce qui est physiquement impossible.

La puissance P , extraite du vent est donnée en multipliant la poussée T , (équation 3.7) par la vitesse. Si les valeurs de a et U_4 sont substituées dans cette nouvelle équation, P peut être exprimé comme :

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1 - a)^2 \quad (3.12)$$

Le coefficient de puissance, utilisé pour démontrer les performances du rotor, est défini comme le rapport de la puissance totale extraite du vent à la puissance totale disponible dans le vent :

$$C_p = \frac{\text{Power extracted}}{\text{Available Power in the wind}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (3.13)$$

En traçant l'équation (3.13), comme le montre la figure 3.4, la valeur maximale de C_p est montrée comme étant

0,593 lorsque $a = 1/3$. En substituant cette valeur de a dans les équations (3.11) et (3.10) la réduction de la vitesse du vent pour l'extraction de puissance maximale au plan du rotor et loin

2 1

en aval doit être égal à 3 et 3 respectivement.

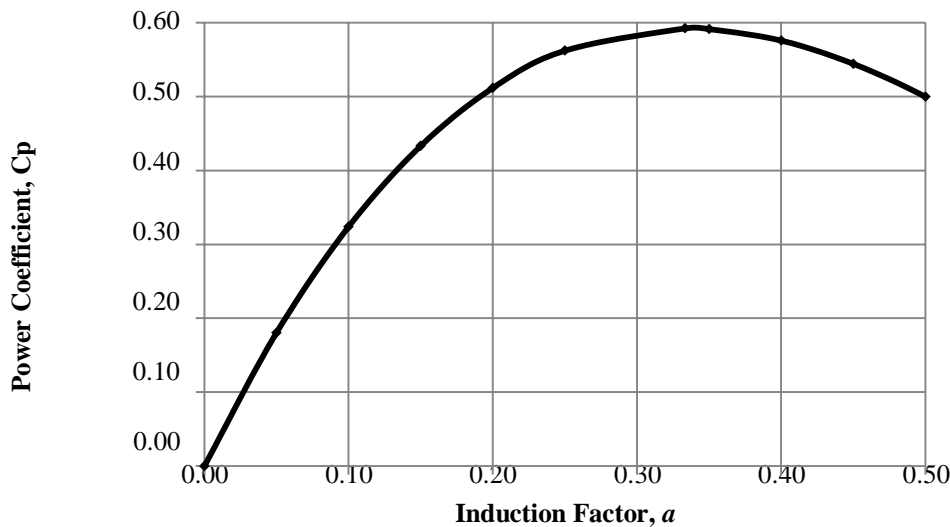


Figure III.4. Coefficient de puissance par rapport aux valeurs du facteur d'induction axiale, a

La valeur idéale maximale de $C_p = 0,593$, connue sous le nom de limite de Betz, c'est un résultat important car il montre que même pour un rotor fonctionnant avec un débit d'air idéal et dans un environnement sans perte la puissance mécanique extractible maximale du vent est limitée à 59,3 %. Le result est.

- indépendant de la vitesse de rotation du rotor et non limité à un type particulier d'éolienne [10]. En conditions réelles de fonctionnement, cette valeur sera considérablement plus faible autour de 0,50 pour les rotors tripales et 0,46 pour les rotors bipales [1] influencée par :
- La rotation du rotor qui induit une rotation dans le sillage
- Tourbillons aux extrémités des pales et nombre limité de pales
- Effets visqueux induisant une traînée aérodynamique au niveau des pales.

Des études ont montré que l'énergie cinétique dans le sillage de l'éolienne est proportionnelle au couple du rotor. Étant donné que les éoliennes modernes à trois pales fonctionnent à de faibles vitesses de rotation et à un couple élevé, elles finiront par subir plus de pertes de sillage que les rotors à rotation plus rapide [10]. Il s'agit d'un compromis de conception pour les fabricants d'éoliennes, car les grandes éoliennes à grande vitesse ne sont toujours pas économiquement viables en raison des matériaux coûteux utilisés dans leur construction.

III.5. Rotation de réveil:

La théorie de la quantité de mouvement simple modélise un écoulement 2D à travers un rotor où le flux de vent est ralenti et dévié uniquement dans la direction axiale où aucune rotation n'a été communiquée à l'écoulement. Cependant, en raison de la loi d'action-réaction, le rotor en rotation imprime un mouvement de rotation au sillage, qui tourne dans le sens opposé au rotor afin de maintenir le moment angulaire. Par conséquent, cela induira sur l'éolienne non seulement une composante de vitesse axiale w , mais également une composante de vitesse tangentielle $\Omega r a'$. Où est le facteur d'induction angulaire, défini comme :

$$a' = \frac{\text{Angular relacity Induced in the wake}}{2 \times (\text{turbine angular relacity})} = \frac{W}{2\Omega} \quad (3.14)$$

Deux autres expressions doivent être introduites dans l'analyse : le rapport de vitesse de pointe λ et le rapport de vitesse local λ_r défini comme :

$$\lambda = \frac{\text{Tangential Velocity of Blade tip}}{\text{Wind Speed (undisturbed)}} = \frac{\Omega R}{U} \quad (3.15)$$

$$\lambda_r = \lambda(\text{blade locotion}) = \lambda \frac{r}{R} \quad (3.16)$$

Où Ω est la vitesse angulaire de la turbine, R est le rayon de la pointe et r est le rayon local.

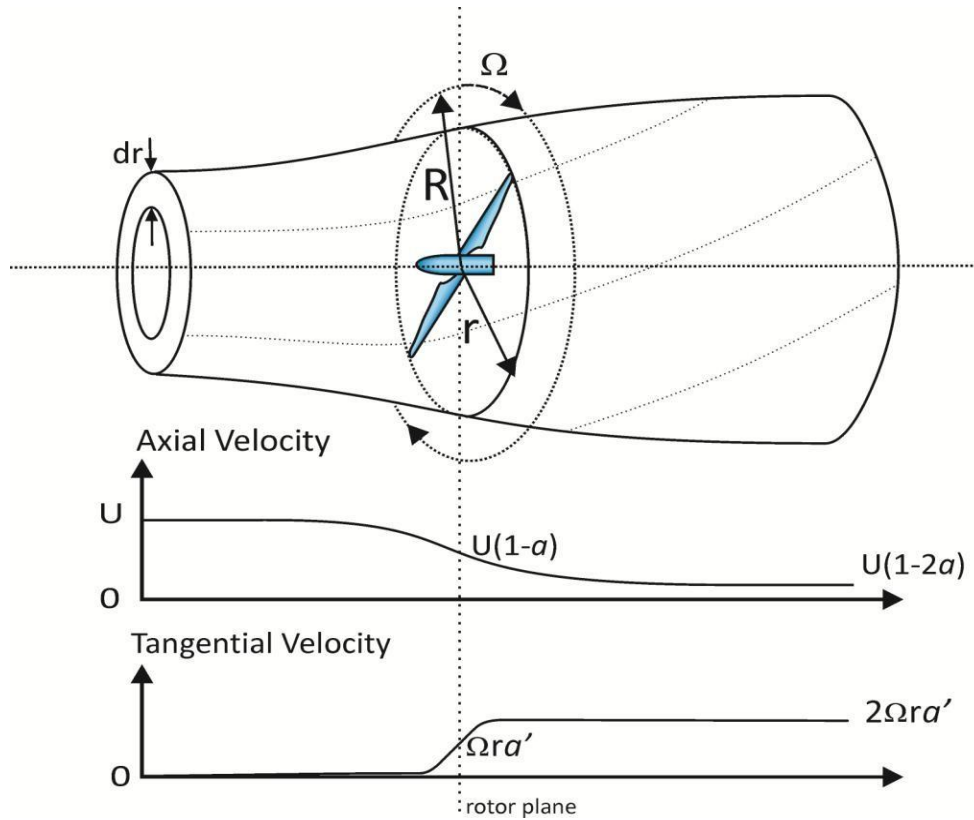


Figure III.5. Volume de contrôle annulaire tenant compte du sillage rotatif. Redessiné à partir de[14]

La poussée est trouvée en appliquant la conservation du moment angulaire à travers l'éolienne dans la direction axiale, comme dans l'équation (3.4). Étant donné que la section transversale du volume de contrôle annulaire au niveau du plan du rotor est de $2\pi r dr$, et que les vitesses d'écoulement à travers la turbine et loin en aval peuvent être exprimées en fonction de la vitesse du flux libre, U et du facteur d'induction axiale a , comme dans les équations (3.10) et (3.11) cela donne :

$$dt = \dot{m}(U - U_4) = 2\pi r \rho U(1 - a)[U - U(1 - 2a)]dr = 4\pi r \rho U^2 a(1 - a)dr$$

$$(3.17)$$

De même, en appliquant la conservation du moment cinétique à travers la turbine et en utilisant les équations (3.14) et (3.10) pour substituer les valeurs de la vitesse angulaire induite dans le sillage m , et la vitesse à travers le disque U' , le couple induit généré par le flux d'écoulement sur les aubes dans cette section transversale annulaire sera :

$$dM = \dot{m}r(wr) = \dot{m}2\Omega r^2 \dot{a} = 4\pi r^3 \rho U(1-a)\Omega \dot{a} dr \quad (3.18)$$

III.6. Théorie du moment de l'élément de lame (BEM);

La théorie du moment de l'élément lame (BEM), initialement attribuée à Glauert (1935) [2] puis développée par Wilson (1976) [3] et De Vries (1979) [4], suit le même principe que dans la théorie du moment avec sillage rotation mais maintenant, au lieu de considérer le rotor dans son ensemble, les aubes de turbine sont divisées sur sa longueur en un certain nombre d'éléments indépendants. Les forces au niveau des pales sont calculées en utilisant des données empiriques de profil aérodynamique 2D pour les coefficients de portance et de traînée qui sont ensuite assimilés aux changements de quantité de mouvement dans l'air circulant à travers la section de l'éolienne.

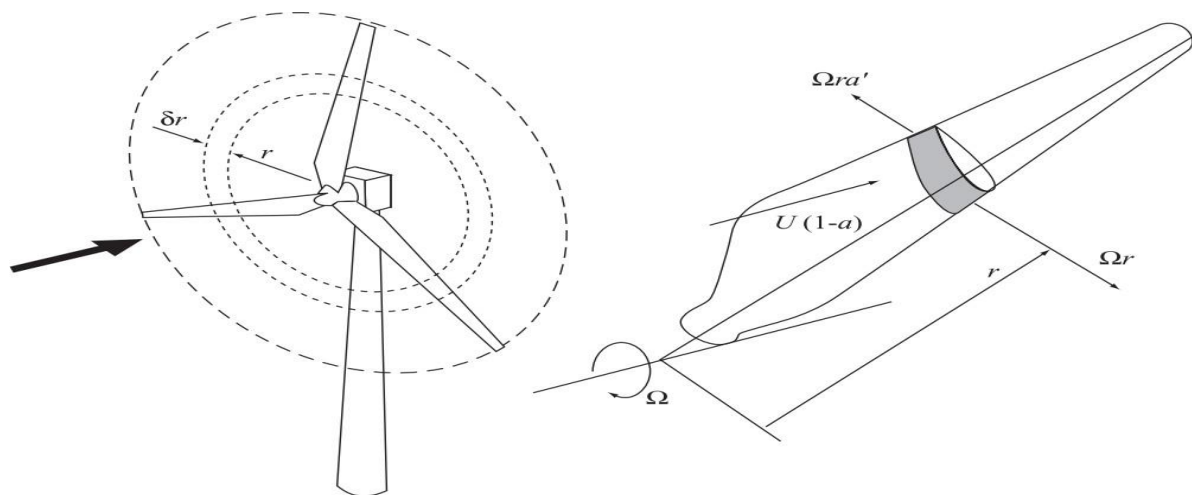


Figure III.6. Rotor d'une éolienne à trois pales et la section de l'élément de pale. Reproduit de [13]

La vitesse tangentielle nette sur l'élément de pale sera la somme de la composante de vitesse tangentielle ra' du sillage et de la vitesse tangentielle r de l'élément de pale. Le vent relatif vu par la pale est la somme vectorielle des composantes de vitesse axiale et tangentielle. La figure 3.6 montre les vitesses vues par la pale dans une section de rayon r .

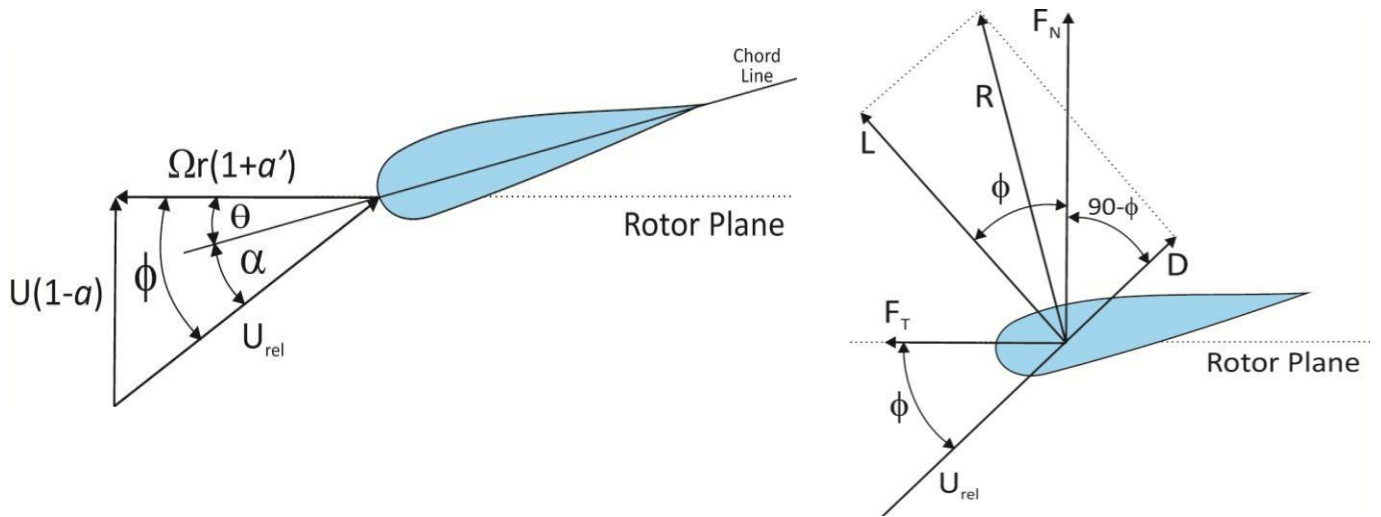


Figure III.7. Vitesses et forces à l'élément lame. Redessiné à partir de [14]

Où est l'angle de pas local de la pale, défini comme l'angle entre la ligne de corde et le plan du rotor. Si l'angle de vrillage local de la pale, était défini par rapport au bout de pale, l'angle de tangage local serait la somme de l'angle de tangage au bout atip et de l'angle de vrillage local de la pale (c'est-à-dire $\theta = \theta_{tip} +$). En ce qui concerne cette thèse, l'angle de torsion a été défini par rapport au plan du rotor, donc les valeurs de l'angle de tangage local et de l'angle de torsion local seront les mêmes (c'est-à-dire $\theta = \beta$). D'après la figure 3.6, l'incidence locale α est donnée par

$$\alpha = \phi - \theta (\text{degrees}) \quad (3.19)$$

Où ϕ est l'angle du vent relatif (angle entre le plan du rotor et le vent relatif), calculé comme :

$$\tan \phi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{(1-a)}{\lambda r(1+a')} (\text{degrees}) \quad (3.20)$$

and.

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \phi} \text{ m/s} \quad (3.21)$$

$$U_{rel} = \frac{\Omega r(1+a')}{\cos \phi} \text{ m/s} \quad (3.22)$$

L'angle ϕ et la vitesse relative du vent U_{rel} varieront le long de l'envergure de la pale puisque la composante tangentielle $\Omega r(1+a)$ variera. En conséquence, selon l'équation (3.19), les pales doivent être vrillées de la racine à la pointe afin de maintenir un angle d'attaque constant sur toute sa longueur conduisant à une distribution de couple beaucoup plus uniforme sur les pales.

La portance et la traînée D sont des forces par unité de longueur et définies respectivement perpendiculairement et parallèlement à la vitesse relative du vent U_{rel} :

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{rel} c C_l (\text{N/m}) \quad (3.23)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c C_d (\text{N/m}) \quad (3.24)$$

Où c est la longueur de corde C_l est le coefficient de portance et C_d est le coefficient de traînée. et C_d sont fonction de l'angle d'attaque α et du nombre de Reynolds et doivent être lus à partir des données de voilure 2D car ils ne peuvent pas être calculés. Comme on ne s'intéresse qu'à la force normale au plan rotorique, qui contribue à la poussée, et à la force tangentielle au plan rotorique, qui contribue au couple, la portance et la traînée sont projetées sur ces directions :

$$F_N = L \cos \phi + D \sin \phi (\text{N/m}) \quad (3.25)$$

et

$$F_T = L \sin \phi - D \cos \phi (\text{N/m}) \quad (3.26)$$

Comme pour la portance et la traînée, les forces par unité de longueur F_N et F_T peuvent être exprimées en fonction des coefficients C_N et C_T :

$$F_N = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c C_N \quad (\text{N/m}) \quad (3.27)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho U_{rel} c C_r \quad (\text{N/m}) \quad (3.28)$$

et projeter le coefficient de portance C_l et le coefficient de traînée C_d sur les NT directions donne :

$$C_N = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (3.29)$$

et

$$C_T = C_e \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (3.30)$$

Besoin de définir une autre expression, le local solidité σ

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.31)$$

Where is the number of blades.

D'après les relations ci-dessus, la force normale totale et le couple sur le volume de contrôle à une distance r et à une épaisseur sont :

$$dF = BF_N dr = \frac{1}{2} \rho B \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_N dr \quad (3.32)$$

$$dM = BF_T r dr = \frac{1}{2} \rho B \frac{U(1-a)\Omega r(1+a)}{\sin \phi \cos \phi} c C_r r dr \quad (3.33)$$

Le vent crée une différence de pression entre les faces supérieure et inférieure des pales en dissipant une partie de son énergie cinétique. Comme le montre la figure 3.8, la plus grande pression d'un côté fera qu'une partie du vent s'écoulera autour des extrémités des pales. Étant donné que les forces tangentielles près de la pointe contribuent grandement au couple, le couple global sera réduit. Afin de corriger l'hypothèse selon laquelle le rotor a un nombre fini de pales, le facteur de perte de pointe F développé par Prandtl et trouvé dans Wilson, Lissaman et Walker [29] doit être introduit :

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (3.34)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{B-r}{r \sin \theta} \quad (3.35)$$

et est le rayon de bout de pale et r est le rayon de section locale.

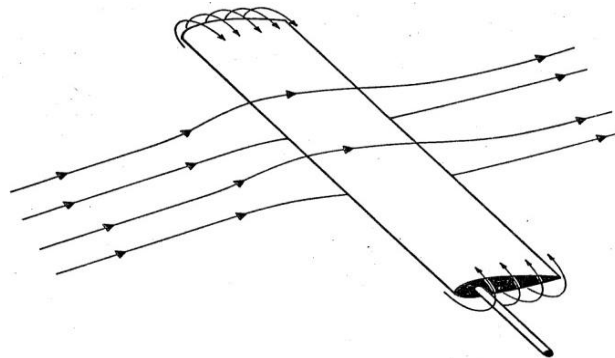


Figure III.8. Pertes dues au vent « s'échappant » autour de la pointe et du moyeu. [3]

En tenant compte du facteur de perte de pointe, les équations (3.17) et (3.18) deviennent :

$$dT = 4\pi r \rho U^2 a(1-a)Fdr \quad (3.36)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho U(1-a)\Omega a' Fdr \quad (3.37)$$

Now the values of dT and dM from the blade element method (equations 3.32 and 3.33) can be equated to the values of dT and dM above to solve for the axial induction factor a and the angular induction factor a' yielding:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \theta}{6C_N} + 1} \quad (3.38)$$

$$\dot{a} = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{6C_T} - 1} \quad (3.39)$$

Une correction doit être appliquée à l'équation (3.38) car pour des valeurs de $a > 0,4$ la théorie de la quantité de mouvement n'est plus valide. La correction empirique développée par Glauert (1935) [2] (Figure 3.9) et trouvée dans [14] prend la forme :

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (3.40)$$

$$K = \frac{4 \sin^2 \phi}{\delta C_N} \quad (3.41)$$

$$a_c \approx 0.2$$

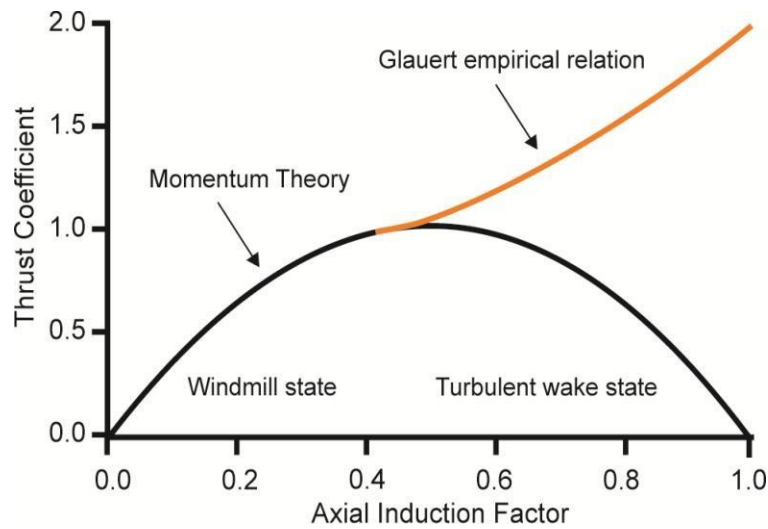


Figure III.9. Correction de Glauber pour s'adapter aux coefficients de poussée HAWT mesurés. [10]

Enfin, en négligeant la traînée ($C_d = 0$) et les pertes en pointe ($F = 1$), une expression analytique peut être dérivée pour la distribution aérodynamiquement optimale de la corde sur la longueur de la pale [10] :

$$C = \frac{8\pi r}{BC_r} (1 - \cos \phi) \quad (3.42)$$

III.7. Calcul du couple total de l'arbre

Afin de calculer le couple total sur les pales, l'équation (3.33) doit être intégrée du pied de pale à la pointe de pale. Puisque les valeurs de la force tangentielle FT sont connues à chaque section de pale de rayon r_i , une bonne approximation de l'intégrale est obtenue en supposant une variation linéaire de la section au rayon r_i à la section suivante au rayon r_{i+1} . L'approche trouvée dans [14] prend la forme :

En supposant une variation linéaire, la valeur de entre r_i et r_{i+1} est :

$$F_T = A_i r + B_i \quad (3.43)$$

Ou

$$A_i = \frac{F_{T_{i+1}} - F_{T_i}}{r_{i+1} - r_i} \quad (3.44)$$

$$B_i = \frac{F_{T_i} r_{i+1} - F_{T_{i+1}} r_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (3.45)$$

La contribution pour le couple total de la section de pale de rayon r_i à r_{i+1} est :

$$\begin{aligned} M_{i,i+1} &= \int_{r_i}^{r_{i+1}} F_T r dr = \int_{r_i}^{r_{i+1}} (A_i r^2 + B_i r) dr \\ &= \left[\frac{1}{3} A_i r^3 + \frac{1}{2} B_i r^2 \right]_{r_i}^{r_{i+1}} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Et le couple total est :

$$M_{total} = B \sum_1^{N-1} M_{i,i+1} \quad \text{Nm} \quad (3.47)$$

Où est le nombre de lames.

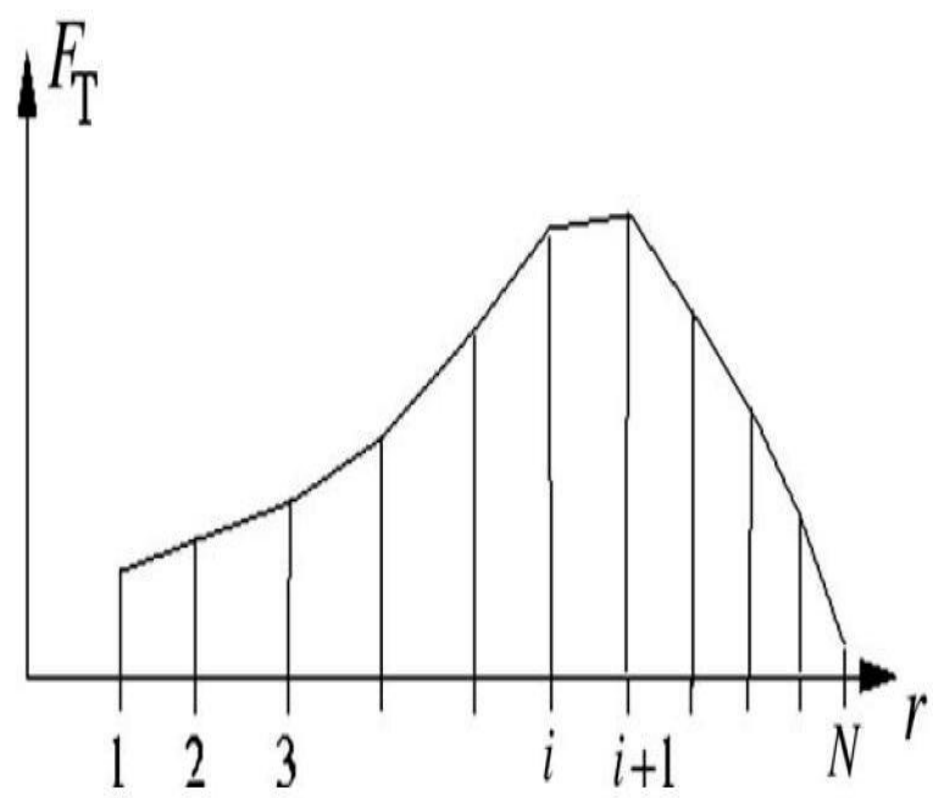
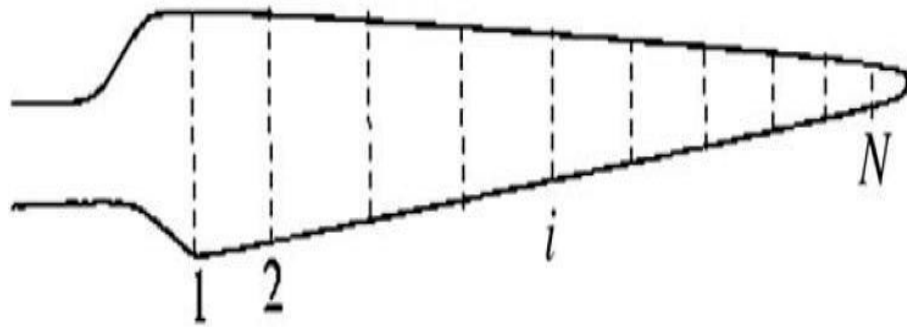


Figure III.10. En supposant une variation linéaire de la force tangentielle FT de r_i à r_{i+1} . [14]

chapitre IV

Générateur d' éolienne

IV.1. Aperçu Sur Les Aérogénérateurs

Un aérogénérateur, appelé généralement éolienne, est un dispositif qui capte l'énergie cinétique du vent pour la transformer en une énergie mécanique disponible (mouvement rotatif). Cette énergie est amplifiée par un système d'engrenage (multiplicateur), puis transmise à un arbre de rotation lié à une génératrice qui la convertit à son tour en une énergie électrique [LOP08, LAV05].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale en trois catégories [MUL08]:

- ✓ Eoliennes de petites puissances: $P < 40 \text{ kW}$.
- ✓ Eoliennes de moyennes puissances: $40 \text{ kW} < P < 1 \text{ MW}$.
- ✓ Eoliennes de fortes puissances: $P > 1 \text{ MW}$.

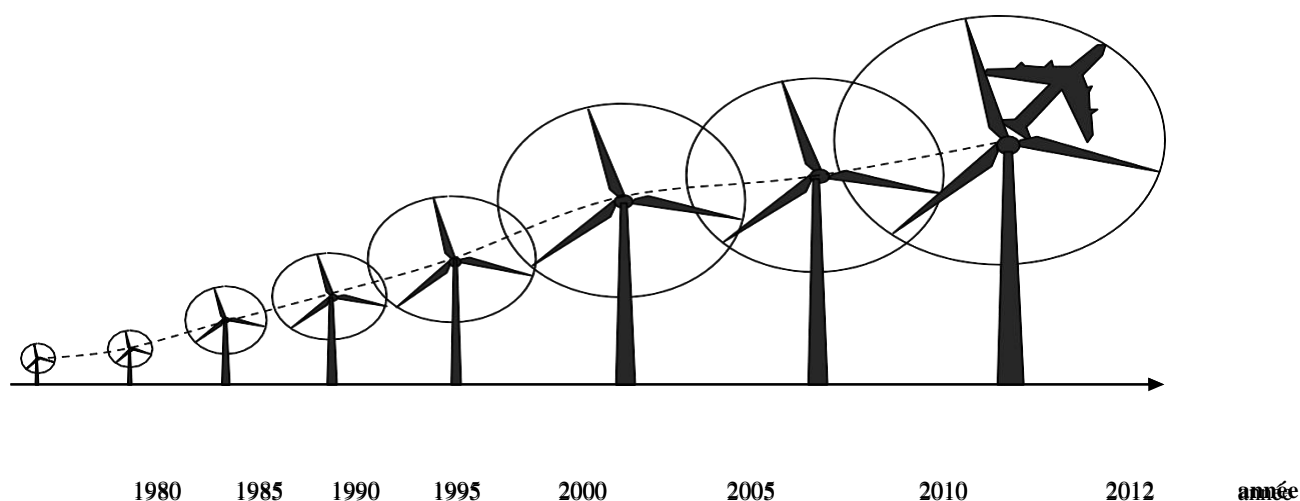


Figure (IV.1) illustre la correspondance de taille et puissance des éoliennes.

1.2. Eolienne connecte au réseaux

C'est la méthode la plus utilisée grâce aux avantages qu'elle apporte. Elle permet de compenser le manque de puissance de l'éolienne par la puissance générée par les centrales conventionnelles connectées aux mêmes réseaux. Cette méthode est moins complexe puisque elle facilite au système de commande de l'éolienne pour avoir une puissance optimale.

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont généralement regroupées dans un parc où il y a environ 5 à

50 machines. On peut aussi retrouver des éoliennes isolées connectées au réseau

Le raccordement de l'éolienne au réseau électrique exige la même fréquence et la même tension que celles du réseau quel que soit la vitesse du vent, soit en gardant la vitesse de rotation de la génératrice constante par l'orientation des pales, soit par l'insertion d'un convertisseur statique [EPS09, BOY06].

1.3. Eolienne alimentant une charge isolée

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés comme: l'alimentation des îles par l'énergie électrique, le pompage d'eau pour l'irrigation des champs agricoles, l'alimentation en électricité des voiliers, des phares et des balises [EPS09, BOY06].

1.4. régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Le dimensionnement en puissance d'un système de conversion d'énergie éolienne (la turbine, le générateur, etc...) est prédéfini pour fonctionner à une vitesse du vent nominale comme il est indispensable de limiter la vitesse du vent captée pour nominaliser la puissance convertie par la turbine et empêcher la destruction de tout le système. Le réglage de la puissance captée par la turbine se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend de l'angle d'incidence α et de calage β .

Il existe trois méthodes principales pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et la limiter lorsque la vitesse du vent est trop élevée.

1.5. contrôle par angle de calage variable (pitch control)

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à contrôler la puissance mécanique générée par la turbine pour les faibles et fortes vitesses du vent. Pour un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé (pitch control). Pour modifier les performances de la turbine, plus précisément le coefficient de puissance, on varie l'angle d'orientation de ces pales lors des fortes vitesses du vent. Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales, donc l'angle d'incidence, ce qui limite l'action des forces aérodynamiques exercées sur les pales. Cela réduit considérablement toutes les contraintes sur la turbine face aux fortes vitesses du vent, tout en maintenant un couple mécanique constant qu'on peut annuler par une mise en drapeau [BIA07, MUN 08, LAV05, COU08].

1.6. Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stal)

Ce système est plus léger et moins coûteux que le système précédent, à cause de l'absence du système de contrôle de l'angle de calage; comme il est simple et robuste, du fait qu'il ne dispose d'aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. L'angle de calage est fixe, alors que l'angle d'incidence varie avec la vitesse du vent incident, et son augmentation entraîne une augmentation de la traînée, un décrochage progressif des pales et un maintien de la vitesse de rotation de la turbine constante.

Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine. Aussi, il faut s'assurer que pour une certaine vitesse du vent, l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée [BIA07, BUR01, LAV05, COU08].

1.7. contrôle par décrochage aérodynamique actif

Ce système est l'hybridation des deux systèmes décrits précédemment. Il est utilisé pour les systèmes de très grandes puissances. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est plus simple et moins coûteux.

Cette technique, appelée aussi décrochage par calage négatif des pales (négative -pitch control), est basée sur le même principe que le décrochage actif. Cependant, celui-ci est assuré en diminuant légèrement l'angle de calage pour augmenter l'angle d'incidence, et qui peut être légèrement avancé ou retardé. La vitesse est maintenue pratiquement constante jusqu'au décrochage total. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale [COU 08, BEL 10,BUR01,KEN 12].

IV.2. technologies des systèmes éoliens

2.1.Eoliennes a vitesse fixe

Ces éoliennes sont les premières à avoir reçu une technologie développée. La génératrice qui est généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en hypersynchronisme à une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique fixe est imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles.

Le contrôle de la puissance de ce type de système se fait au niveau de la turbine, soit par décrochage aérodynamique, soit par calage variable des pales de l'aérogénérateur pour s'approcher du fonctionnement synchrone. Il est doté d'un multiplicateur de vitesse pour s'adapter à la vitesse de la turbine et de la génératrice [MON12,WAN 12,COU08].

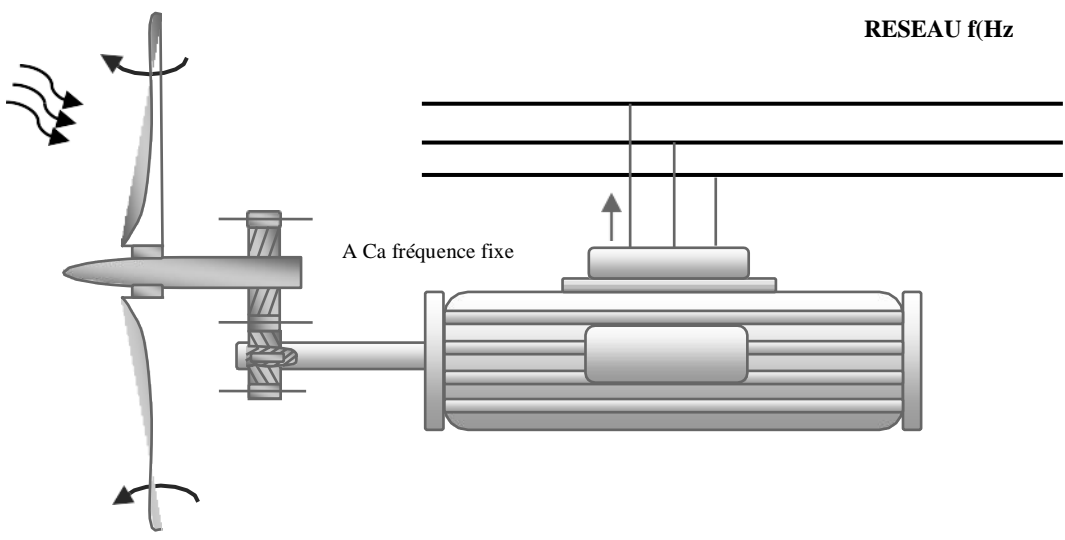


Figure IV.2 Eolienne à vitesse fixe.

2.2. Les avantages de l'éolienne a vitesse fixe

Les principaux avantages de ce type d'éolienne sont [KEN12,BEL10,HAM 13]:

- ☞ La simplicité d'implantation.

- ☞ L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- ☞ Une grande fiabilité.
- ☞ Un faible coût.

2.3. Les inconvénients de l'éoliennes a vitesse fixe

Cesystème possède beau-

coup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [KEN 12,BEL10,HAM13]:

- ☞ Une puissance extraite non optimisée (On rate les maximas théoriques).
- ☞ Un rendement très faible pour les vents faible et moyens.
- ☞ Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- ☞ La perte du contrôle de la puissance réactive.
- ☞ L'absence de contrôle du système de magnétisation de la génératrice.

2.4. Eoliennes a vitesse variable

A cause des inconvénients du système éolien à vitesse fixe, les industriels ont développés d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. Ces systèmes sont basés sur l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle du vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaîne globale du système à savoir :

La turbine le générateur tel convertisseur utilisé qui sert synchroniser la fréquence et l'amplitude de générés par le générateur avec celles du réseau [MON 12,WAN12,COU08].

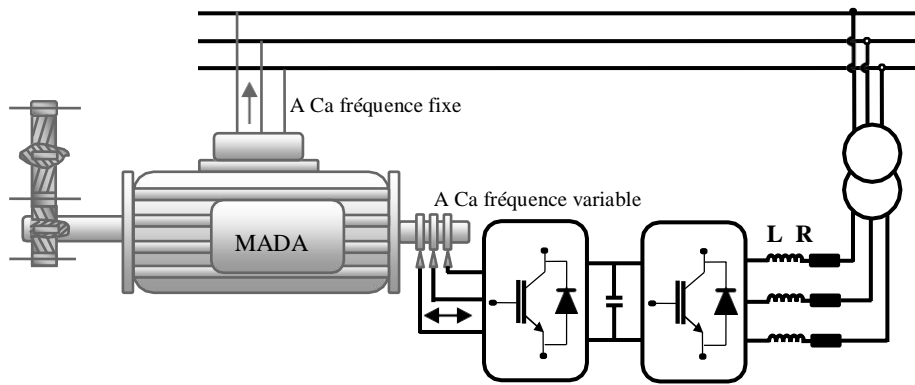


Figure IV.3. Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

REDRESSEURHACHEURONDULEUR

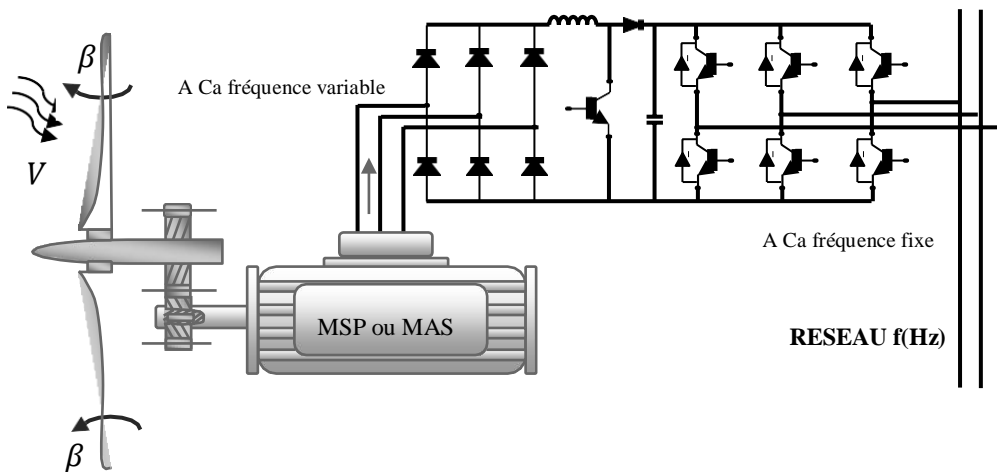


Figure IV.4. Eolienne à vitesse variable basée sur une MSP ou une MAS.

2.5. les avantages de l'éolienne vitesse variable [ken12,bel10,ham13]

- ☞ Une exploitation optimale de l'énergie du vent.
- ☞ Une limitation des oscillations mécaniques.
- ☞ Une impossibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.

2.6 LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNE A VITESSE VARIABLE [KEN12, BEL 10, HAM13]

- ☞ Un raccordement indirect du système au réseau et son coût.
- ☞ Une grande complexité du système de puissance.
- ☞ Une perte d'énergie pendant le processus de conversion.

IV .3. Systèmes utilisant la machine asynchrone

La machine asynchrone est la machine la plus répandue dans le domaine de production d'énergie éolienne. Ce type de machine offre la possibilité de travailler à vitesse variable tout en évitant les contraintes de fréquence et de tension.

Il existe plusieurs types de machines asynchrones à savoir : la machine asynchrone à cage, la machine asynchrone à double stator, la machine asynchrone double alimentée à rotor bobiné et la machine asynchrone double alimentée sans collecteur.

3.1. machine asynchrone à cage d'écureuil:

La machine asynchrone à cage est la machine la plus utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à cause de sa réversibilité, sa robustesse, son faible coût de construction, l'absence du système de contact glissant qui n'exige que peu d'entretien et sa facilité de connexion au réseau. Ces caractéristiques ont permis la fabrication en grandes quantités et à de grandes échelles de puissances de ce type de machines.

Les machines asynchrones à cage utilisées dans les aérogénérateurs sont à nombre de pôles fixe. Par conséquent, la plage de variation de glissement est comprise entre 0 et 0,08, d'où l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable. De plus, la turbine tournant à une vitesse lente nécessite l'insertion d'un multiplicateur mécanique de vitesse entre la turbine et la machine. L'énergie réactive consommée par la machine pour magnétiser son rotor n'est pas contrôlée, ce qui diminue le facteur de puissance du réseau. Pour résoudre ce problème, il faut compenser cette demande par la connexion d'un groupe de condensateur en parallèle avec le stator du générateur pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la machine [ABD13, BOU14].

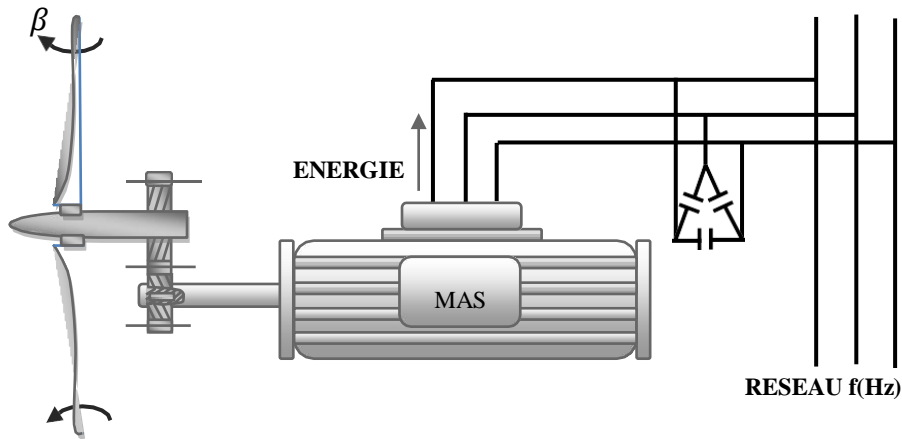


Figure IV.5. Machine asynchrone à cage d'écureuil dans une chaîne de conversion éolienne.

3.2. machine asynchrone double stator:

Pour assurer la possibilité de fonctionnement à deux vitesses fixes différentes et améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machines asynchrones à double stator; l'un pour les faibles puissances à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses du vent, et l'autre pour les fortes puissances à faibles nombre de paires de pôles pour les grandes vitesses du vent.

Pendant, la présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière, avec un diamètre et un poids plus grands. Le coût de la machine augmente. Le bruit engendré par l'éolienne est plus faible pour les petites vitesses du vent car l'angle de calage nécessaire à

l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées [AMI10, AMI12].

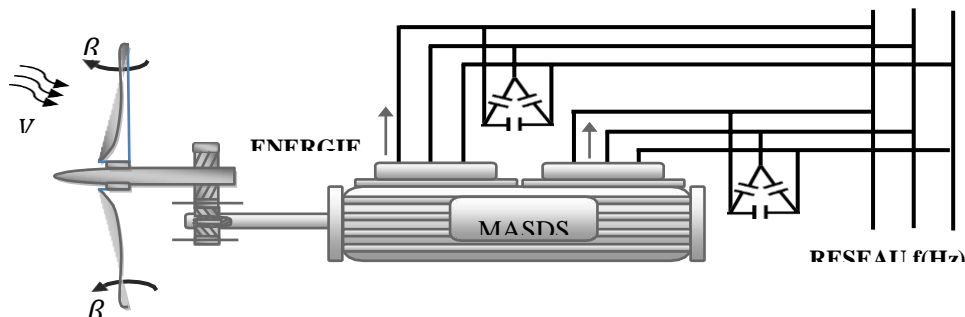


Figure IV.6. Machine asynchrone à double stator dans une chaîne de conversion éolienne

3.3. machine asynchrone a double alimentation type "rotor bobine":

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a trouvé la voie libre pour s'intégrer dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède des caractéristique sa dé quartes pour un bon fonctionnement du système éolien.

La configuration la plus simple est de connecter le stator et le rotor de la MADA

Directement au réseau avec un système de protection pour le stator, et un

Convertisseur statique pour le rotor afin d'assurer la variation du glissement, ce qui permet à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une grande plage de vitesse par rapport à la machine

asynchrone à cage, et de compenser la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor [ROU15, MES13].

L'avantage de cette configuration est de minimisera dimension du convertisseur de puissance grâce à la puissance échangée entre le rotor et le réseau qui est faible par rapport à la puissance statorique [HME13, BEL 12].

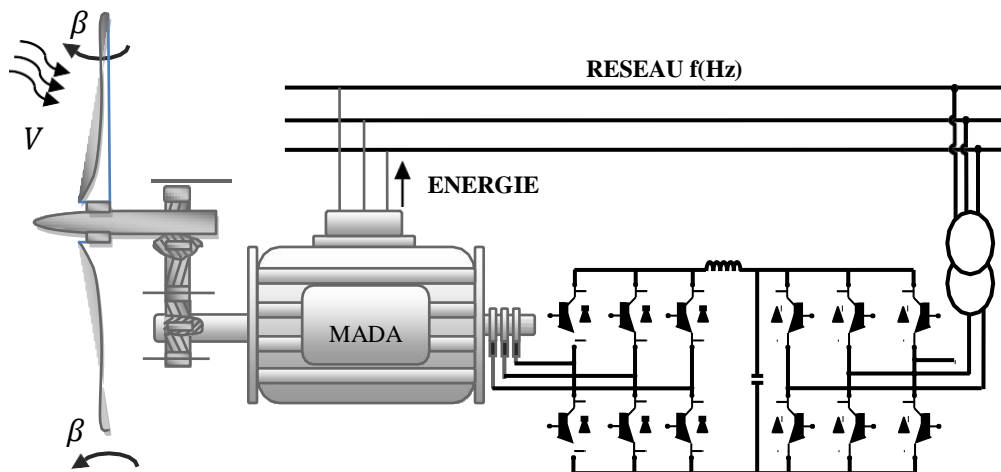


Figure IV.7. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" dans une chaîne de conversion éolienne.

3.4. machine asynchrone à double alimentation type "brushless"

Pour éliminer l'inconvénient majeur du dispositif précédent (maintenance du Système contact glissant), certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double alimentation sans balais- type "brushless". Cette machine a la particularité de fonctionner à vitesse variable, et possède deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator.

Le premier bobinage est directement connecté au réseau destiné aux grandes puissances, le second bobinage dont la section des conducteurs est moins élevée sert à faire varier le

Courant d'excitation de la machine au moyen d'un convertisseur bi directionnel commandé. Le rotor de la machine possède une structure différente de celui de la machine à cage d'écuriel classique, mais aussi robuste, constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques ayant un nombre de paires de pôles égal à la somme des nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques [BEN13, XIA08, BEN 10].

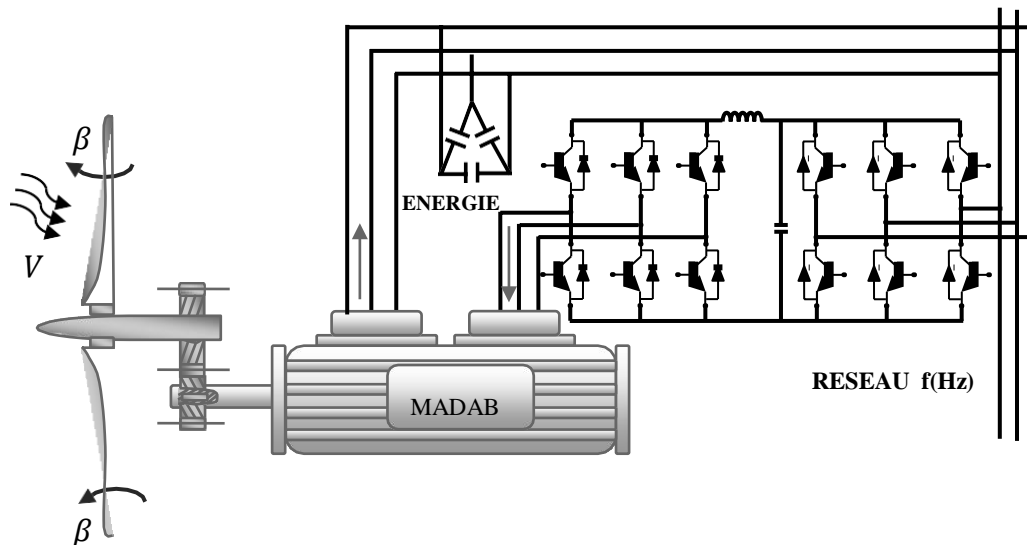


Figure IV.8. Machine asynchrone à double alimentation type "brussoles" dans une chaîne de conversion éolienne.

IV. 4. Systèmes utilisant la machine synchrone

Les grandes éoliennes qui n'ont pas besoin de multiplicateur, sont basées généralement sur les génératrices synchrones. Ces dernières ont plusieurs avantages, à savoir: un bon rendement, un couple massique important à dimensions convenables, comme ils ne demandent pas d'énergie réactive pour la magnétisation du rotor qui est assuré directement par un aimant permanent ou par un enroulement d'excitation. Leur caractéristique (couple-vitesse) en fonctionnement génératrice exige le synchronisme entre les forces électromotrices rotoriques et statoriques, ce qui pose un problème pour l'utilisation de ces machines dans un système de

Production d'énergie éolienne où la vitesse du vent est variable.

Pour ces raisons, on place une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau composé d'un onduleur et d'un redresseur permettant la circulation de puissance même en ayant deux fréquences différentes entre celle du stator et celle du réseau pour

Faire fonctionner la machine synchrone à vitesse variable et maximiser la puissance générée. Dans ce système, le convertisseur doit être dimensionné pour supporter la puissance générée, ce qui impose des composants plus puissants un coût plus élevé [BOY06, COU08].

4.1. machine synchrone à rotor bobiné:

Les variations importantes des couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu

Dans un système éolien peu vent causer une dé magnétisation des aimants et une

Diminution de leur

duréedevie, carcesdernièresontconstituéesgénéralementd'unmatériaupeufréquent, àcause de la

difficulté et du coût de son extraction de la terre.

Pour limiter cet inconvénient, certains fabricants ont développé des éoliennes

Basées sur des machines synchrones à rotor bobiné, le champ tournant rotori que est créé par une enroulement alimenté en courant continu(roue polaire) au moyen d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation exige la présence d'un contact glissant au rotor, ou par un système "Brushless" avec un redresseur tournant[BOY06, POI 03].

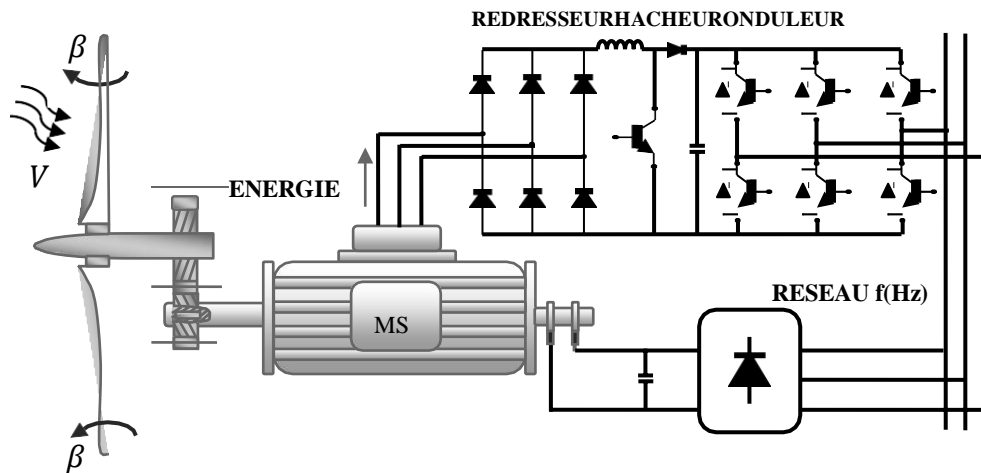


Figure IV.9. Machine synchrone à rotor bobiné dans une chaîne de conversion éolienne.

4.2. Machine synchrone à aimants permanents:

Le développement des matériaux magnétiques a permis l'amélioration des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs. Ce type de machine utilise un aimant permanent rotor multi-pôles, ce qui donne l'avantage d'avoir un grand couple massique.

La suppression du système de balais - bagues et du multiplicateur de l'éolienne a minimisé les frais d'entretien du système. De plus, la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement. Il existe plusieurs types de ces machines destinées aux applications éoliennes comme: les machines de construction standards (radiales), les génératrices discoïdes (champs axial) et les machines à rotor extérieur [WAN08, ERR12].

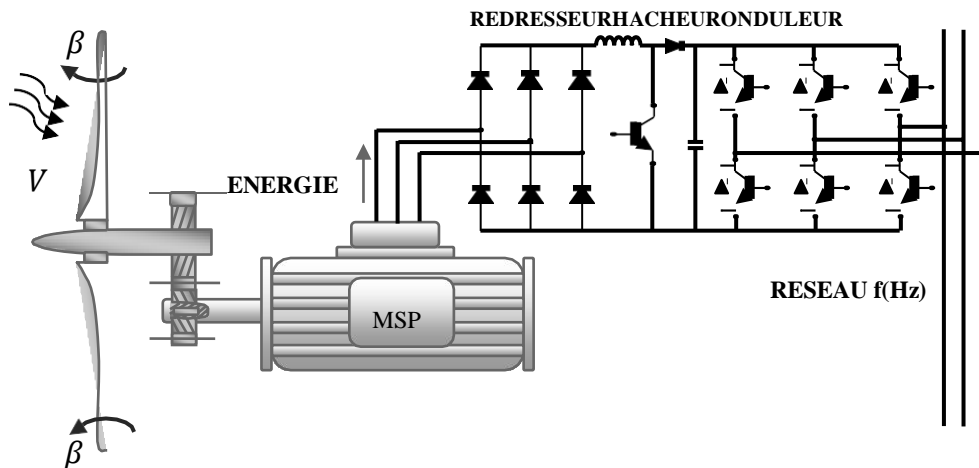


Figure IV.10. Machine synchrone à aimants permanents dans une chaîne de conversion éolienne.

IV .5. description de fonctionnement de la MADA

5.1. structure de la MADA:

La MADA à rotor bobiné est une machine qui a un stator de antique celui des machines asynchrones et synchrones classiques. Le rotor est constitué d'enroulement triphasés connectés en étoile dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants. Le contrôle de la machine se fait par le contrôle de la puissance nominale qui circule dans le rotor à travers un convertisseur de puissance réduites moins coûteux[VID04].

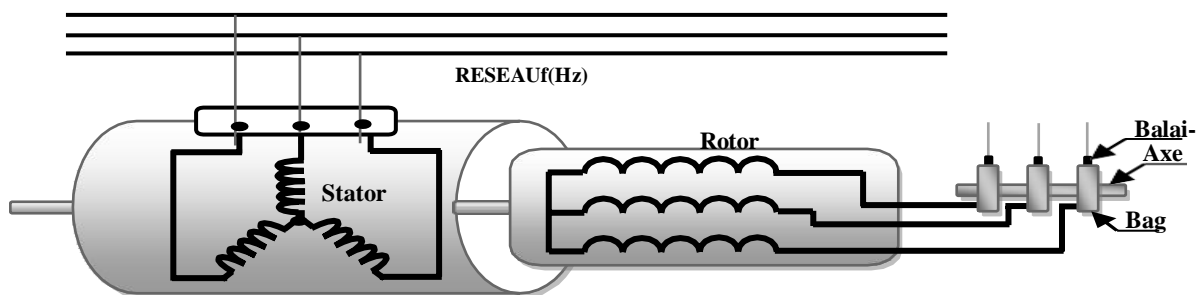


Figure IV.11. schéma de la structure de la MADA à rotor bobiné[VID 04].

5.2. Mode de fonctionnement de la MADA:

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA peut fonctionner en moteur et en générateur. La différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement mais la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA un meilleur choix pour des entraînements vitesse variable [SEG06, BOY06, PET03, POI03, HAM 13, BOU07].

5.3. fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:

Dans ce mode de fonctionnement, l'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine pour être convertie en puissance électrique fournie au réseau par le stator. Une partie de cette puissance est convertie en puissance de glissement, Figure (I-21). L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation, et la machine fonctionne en générateur en dessous de la vitesse du synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas fonctionner dans ce mode.

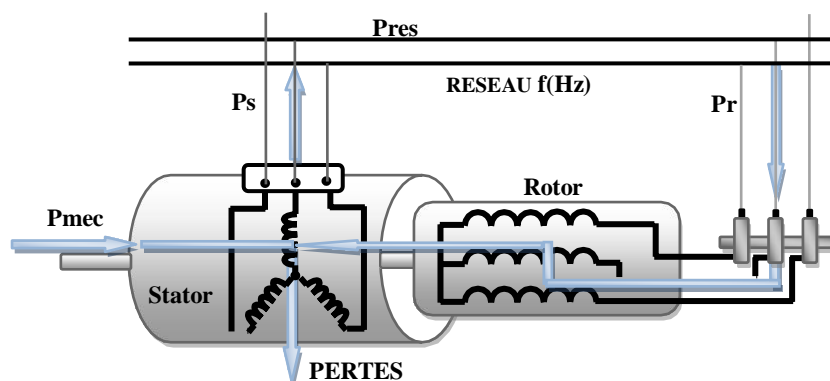


Figure IV.12. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

5.4. fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance mécanique fournie à la machine est convertie en puissance électrique, et la totalité de cette puissance est transmise au réseau par le stator. La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau (voir figure I.22), la machine fonctionne en mode générateur au-dessus de la vitesse du synchronisme. La machine asynchrone classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais avec une puissance de glissement totalement dissipée en pertes Joule dans le rotor.

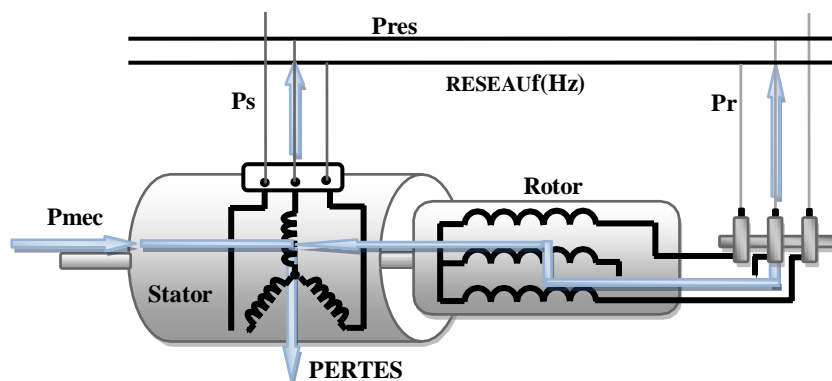


Figure IV.13. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

Conclusion

générale

Conclusion générale:

grâce à ce qui précède et à l'étude de l'énergie éolienne, nous avons appris sur l'énergie éolienne, ses types, ses caractéristiques, sa structure, sa description et les composants des éoliennes.

et apprendre à connaître le générateur d'éolienne et à connaître ses divers composants et composants ainsi que leurs types, et nous constatons également que l'énergie éolienne a ses points négatifs et positifs dans le domaine de l'extraction d'énergie électrique, mais les avantages surmontent ses points négatifs et nous avons discuté de la recherche de solutions pour améliorer les générateurs d'énergie éolienne.

par conséquent, nous concluons à la fin de cette étude approfondie que l'énergie éolienne est une énergie renouvelable et une alternative aux énergies non renouvelables (comme le gaz et pétrole), et que l'énergie éolienne est une énergie propre et respectueuse de l'environnement qui peut être exploitée à l'avenir.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. La première éolienne de taille méga watt au monde.....	04
Figure I.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	5
Figure I.3 Éoliennes à axe vertical.....	7
Figure I.4. Éolienne à axe horizontal.....	7
Figure I.5 Composants modernes d'éolienne.....	9
Figure I.6 Disposition Des Eoliennes.....	10
Figure I.7. les composantes de l'aérogénérateur.....	12

CHAPITRE II

Figure II.1. Variations des vitesses moyennes du vent sur	21
Figure II.2. Variations des vitesses moyennes du vent sur 20 ans.....	21
Figure II.3 les régions ventées en Algérie.....	22
Figure II.3 Comparaison entre les vitesses moyennes des ite ventés	22
Figure II.4 Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp.....	23

CHAPITRE III

Figure III.1. Puissance dans le vent et variations de la vitesse du vent avec altitude.....	27
Figure III.2. montre comment la probabilité d'avoir des vents forts varie en fonction de la vitesse moyenne du vent...	28
Figure III.3. Volume de contrôle pour l'analyse du rotor idéal et la vitesse et la pression en amont et en aval du plan du rotor.	30.
Figure III.4. Coefficient de puissance par rapport aux valeurs du facteur d'induction axiale.....	33
Figure III.5. Volume de contrôle annulaire tenant compte du sillage rotatif.	35
Figure III.6. Rotor d'une éolienne à trois pales et la section de l'élément de pale. Reproduit.....	36
Figure III.7. Vitesses et forces à l'élément lame. Redessiné à partir de.....	37.
Figure III.8. Pertes dues au vent « s'échappant » autour de la pointe et du moyeu.....	39.

Figure III.9. Correction de Glauber pour s'adapter aux coefficients de poussée HAWT mesurés. Redessiné à partir ...	40
Figure III.10. En supposant une variation linéaire de la force tangentielle FT de ri à $ri+1$. Reproduit.....	42

CHAPITRE IV

Figure (IV.1) illustre la correspondance entre la taille et la puissance des éoliennes.....	44
Figure IV.2. Éolienne à vitesse fixe.....	47
Figure IV.3. Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	49
Figure IV.4. Éolienne à vitesse variable basée sur une MSP ou une MAS.....	49
Figure IV.5. Machine asynchrone à cage d'écurieuil dans une chaîne de conversion éolienne.....	51
Figure IV.6. Machine asynchrone à double stator dans une chaîne de conversion éolienne.....	51
Figure IV.7. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" dans une chaîne de conversion éolienne.....	53
Figure IV.8. Machine asynchrone à double alimentation type "brussoles" dans une chaîne de conversion éolienne.....	54
Figure IV.9. Machine synchrone à rotor bobiné dans une chaîne de conversion éolienne.....	56
Figure IV.10. Machine synchrone à aimants permanents dans une chaîne de conversion éolienne.....	57
Figure IV.11. Schéma de la structure de la MADA à rotor bobiné.....	57
Figure IV.12. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	58
Figure IV.13. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	59

References:

Chapitre: I

- 1) Hau Erich, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition, pp 01-35, Springer, 2006
- 2) Man well J.F, McGowan J. G., Rogers A. L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, 1st Edition, pp 11-19,
- 3) Wiley, 2002
- 4) Randolph John, Masters Gilbert M. – Energy for Sustainability – Technology, Planning, Policy, 1st Edition, –pp 466- 467,
- 5) Island Press, 2008
- 6) Haul Erich, Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition, pp35, Springer, 2006
- 7) F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation réa lite au réseau," Université de Nantes,2003.
- 8) B. Melton, "Production d'énergie électrique par sources renouvelables," Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique,2003.
- 9) N.Cherfia,"Conversion d'énergie produite par des générateur éoliens."
- 10) N.Cherfia, "Conversion d'énergie produite par de générateurs éoliens."
- 11) J.Martin,"Energies éoliennes,"1997.
- O. Varies, "On the theory of the horizontal-axis wind turbine," Annual review of fluid mechanic cs,vol. 15, pp. 77-96, 1983.
- 12) Matthew Sathyajith, Wind Energy - Fundamentals, Resource Analysis and Economics, pp 96-99, 1st Edition, Springer, 2006
- 13) Wagner Hermann J.,MathurJyotirmay, Introduction to Wind Energy Systems – Green Energy and Technology, 1st Edition, pp 41-55, Springer, 2009.
- 14) B.BOUKHEZZAR, « Stratégies de Commande pour L'optimisation et la Régulation de Puissance des Éoliennes à Vitesse Variable ». Thèse de Doctorat de l'université de Pari XI France, 2006
- 15) N. La verdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004
- 16) <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>
- 17) [16]C.Boris et G. Christophe « Energie éolienne, fonctionnement, contraintes et perspective sue l'avenir <http://membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole.html>
- 18) C. Benoudjit « étude pour la conception d'un banc d'essais pour énergie éolienne » : thèse de magistère de l'université de Batna, juin 2004

Chapitre: II

- 1) Géographie climatique et botanique, Abdul Aziz tereh Sharif.
- 2) Fondements de la géographie générale, Gouda Hassanien Gouda.
- 3) Mémoire Etude d'une chaine de conversion d'énergie Eolienne

Chapitre: III

- 1) Betz, A., Wind energies und Ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Vandenhoeck und Rupprecht 1926; Gottingen, Germany, 1926
- 2) Gluer, H., Airplane Propellers – Aerodynamic Theory (ed. W.F. Durand), Div. L. Chapter XI, Springer Verlag, Berlin, 1935
- 3) R.E. Wilson, P.B.S. Lissaman, S.N. Walker, Aerodynamic Performance of Wind Turbines, Oregon State University Report, USA, 1976.
- 4) de Vries O., Fluid Dynamics Aspects of Wind Energy Conversion, AGARD, North Atlantic Treaty Organization, France, 1979.
- 5) Chaviaropoulos, P. K. and Hansen, M. O. L., Investigating three-dimensional and rotational effects on wind turbine blades by means of a quasi-3D Navier-Stokes solver, Journal of Fluids Engineering, vol 122, pp330–336, 2000
- 6) A. De Vos, P. Van Der Wel, The efficiency of the Conversion of Solar Energy into Wind Energy by Means of Hadley Cells, Theoretical and Applied Climatology 46, 193-202, pp 01, 1993
- 7) Hau Erich, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition, pp 451-464, Springer, 2006
- 8) Wagner Hermann J., Mathur Jyotirmay, Introduction to Wind Energy Systems – Green Energy and Technology, 1st Edition, pp 48, Springer, 2009.
- 9) Burton Tony, Sharpe David, Jenkins Nick, Bossanyi Ervin, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, pp 11-20, 2001
- 10) Randolph John, Masters Gilbert M. – Energy for Sustainability – Technology, Planning, Policy, 1st Edition, pp 473-477, Island Press, 2008
- 11) Manwell J.F, McGowan J. G., Rogers A. L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, 1st Edition, pp 83- 138, Wiley, 2002
- 12) Sezer-Uzol N., Long L.N., 3-D Time-Accurate CFD Simulations of Wind Turbine Rotor Flow Fields , AIAA Paper 2006-0394.
- 13) Jan., 2006
- 14) Tu Ji Yuan, Yeoh Guan Heng, Liu Chaoqun, Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach, 1st Edition, Elsevier, 2008.
- 15) Burton Tony, Sharpe David, Jenkins Nick, Bossanyi Ervin, Wind Energy Handbook, 1st Edition, John Wiley & Sons, pp 41- 170, 2001
- 16) Hansen Martin O. L., Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd Edition, Earthscan, pp 45-62, 2008
- 17) Somers D. M., Tangler J. L., NREL Airfoil Families for HAWTs, National Renewable Energy Laboratory, January 1995
- 18) <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators> (last accessed on 14/04/10)
- 19) <http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/default.asp> (last accessed on 14/04/10)

- 21) Matveev Konstantin, Ockfen Alex E., Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect, *Inter J NavArchitOcEngng* (2009), DOI 10.3744/JNAOE.2009.1.1001, Pullman, USA
- 22) <http://v112.vestas.com/> (last accessed on 14/04/10)
- 23) Hansen M.O.L., Sørensen J.N., Voutsinas S., Sørensen N., Madsen H.Aa., State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity, *Progress in Aerospace Sciences* 42 285–330, Elsevier, 2006
- 24) Ferrer E., Munduate X., Wind turbine blade tip comparison using CFD, *The Science of Making Torque from Wind -*
- 25) *Journal of Physics: Conference Series* 75 (2007) 01200, 2007
- 26) Amano R.S., Malloy R.J., CFD Analysis on Aerodynamic Design Optimization of Wind Turbine Rotor Blades, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 60, 2009
- 27) Mandas N., Cambuliand F., Carcangiu C., Numerical Prediction of Horizontal Axis Wind Turbine Flow, University of Cagliari, EWEC 2006, Athens, Business, Science, and Technology, 2006

Chapitre: IV

- 1) **(BEL 14)** K. Belmokhtar, M.L. Doumbia , K. Agbossou, « Nouvelle stratégie de suivi du point de puissance maximale sans capteur basée sur la logique floue pour les systèmes éoliens pilotés par DFIG (générateur à induction doublement alimenté) ». *Energies*, Vol. 76, 2012, p. 679-693.
- 2)
- 3) **(BEL 09)** En du sa Billy Mohandas , Member, IEEE, Tomonobu Senjyu, Member senior, IEEE, « LQG Design for Megawatt-Class WECS With DFIG Based on Functional Models' Fidelity Prerequisites ». *Transactions IEEE sur la conversion d'énergie*, vol. 24, non. 4 décembre 2009.
- 4) **(BIA 07)** F.D. Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz, « Systèmes de contrôle d'éoliennes, principes, modélisation et conception d'ordonnancement des gains ». Springer 2007.
- 5) **(BOY 06)** A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.
- 6) **(HME 13)** Hamed M. Kassem , Khaled M. Hassanién , Ali M. Yousef , « Modélisation dynamique et contrôle de puissance robuste de DFIG entraîné par une éolienne à grille infinie. Systèmes d'alimentation électrique et d'énergie ». 44 (2013). pp : 375-382.
- 7) **(KAI 12)** D. Carious, R. Wamkeue. « Contrôle en mode glissant flou basé sur DFIG de WECS avec stockage d'énergie par volant d'inertie ». *Electric Power Systems Research* 93 (2012), pp. 16-23.
- 8) **(KEN 12)** F. KENDOULI, « Centrale éolienne et qualité d'énergies électriques ». Thèse de doctorat, À
- 9) l'Université Mentouri de Constantine 2012.
- 10) **(LAV 05)** N. La verdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- 11)
- 12) **(MON 12)** P. Monjean, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore utilisées de liaisons en continu ». Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2012.

Résumé :

.
Enfin, et à travers ce qui précède, et dans cette thèse, qui est entre vos mains

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et une alternative aux énergies non renouvelables. C'est une énergie respectueuse de l'environnement. Par conséquent, cette énergie doit être améliorée par la modernisation et l'amélioration des turbines qui produisent l'énergie électrique dans sa totalité, ainsi que son exploitation en Algérie et l'utiliser dans divers domaines

ملخص :

في الاخير و من خلال ما سبق و في هاذه الأطروحة التي هي بين يديكم.
طاقة الرياح طاقة متجددة وبديلة للطاقات الغير متجددة وهي طاقة صديقة للبيئة وعليه يجب تحسين هاده الطاقة من خلال تحديث التوربينات المولدة للطاقة الكهربائية وتحسينها في كامل اجزائها وكذلك استغلالها في الجزائر واستعمالها في شتى المجالات