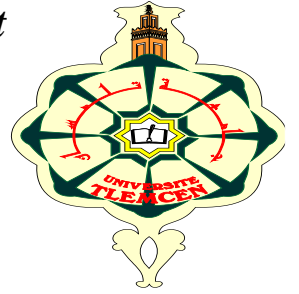




*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
De la Recherche Scientifique*



*Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique*

---

*Mémoire  
Pour l'obtention du diplôme du master  
Génie énergétique et environnement  
Option génie thermique énergies renouvelables*

---

*Thème*

*Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*

*Présenté par :*

*BELHADJ KACEM MOHAMMED TAWFIQ  
GHOMARI YUCEF AIMAD EDDINE*

*Soutenu le 23/06/2013*

*Devant le jury :*

*Président : KORTI.N*

*Univ Tlemcen*

*Encadreur : ZINAIA*

*Univ Tlemcen*

*Co-Encadreur : SAIM.R*

*Univ Tlemcen*

*Examineur : GHERNAOUT.M.E.A*

*Univ Tlemcen*

*Examineur : ALIANE.A*

*Univ Tlemcen*

*Année universitaire : 2012-2013*

## **REMERCIEMENTS**

*Nous tenons à remercier en tout premier lieu « DIEU » le Tout-puissant de nous 'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Monsieur ZINAI .A enseignant à l'université de Tlemcen, pour avoir encadré ce PFE et qui nous a suivi à la cour d'élaboration de ce mémoire.*

*Il a toujours été disponible pour répondre à nos questions.*

*Tout notre respect et notre profonde reconnaissance.*

*Monsieur SAIM.R enseignant à l'université de Tlemcen, (Co-encadreur) pour nous avoir toujours encouragés et aidés pour mener à bien ce travail.*

*Nous remercions monsieur MELIANI l'adjoint de chef département GEE à l'université de Tlemcen pour nous avoir aidé a tout temps.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à monsieur KORTI.N enseignant de l'Université de Tlemcen, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de mon projet de fin d'étude.*

*Nos remerciements vont de même aux autres membres de jury, monsieur GHERNAOUT .M.E.A et monsieur ALIANE . A qui*

*nous ont fait l'honneur de participer au jury afin d'évaluer et enrichir ce mémoire.*

*Nous remercions aussi madame BELHADJ KACEM.F de son aide et sa bonne orientation, et madame SAIDI.S, pour son bien fait pour nous et sa contribution au cours des cinq années.*

*Enfin, une pensée affectueuse est adressée Aux membres de nos familles en particulier nos parents, nos sœurs et nos frères, Pour leur soutien sans limite et leur encouragement durant toutes nos années d'études.*

## **DEDICACE**

*Je dédie Ce Travail à:*

*Ma MÈRE pour Sa Tendresse profonde et pour son encouragement*

*Mon PÈRE qui ne cesse pas de M'encourager*

*Mes chers Sœurs et mon frère Hakim*

*Mes amis (Omar, amine, les King, Ashraf, bicha, knafou, mhircha, kciha ....) camarades du département surtout promo GTER*

*Youcef Aimad*

*Je dédie Ce Travail à:*

*Ma MÈRE pour Sa Tendresse profonde et pour son encouragement*

*Mon PÈRE qui ne cesse pas de M'encourager*

*Mes chers Sœurs et mon frère Abderrahmane*

*Mes amis (Fayza, Awatif, Manel, Amel, Lotfi, Hicham, ...) camarades du département surtout promo GTER.*

*Mohammed Tawfiq*

*« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité ».*

# *Introduction générale*

Le *Sommet de la Terre* de Rio de Janeiro (Brésil, 1992) qui a défini les grandes lignes d'un « développement durable », suivi du *protocole de Kyoto* (Japon, 1997) portant sur la protection de l'environnement (réduction des gaz à « effet de serre ») a catalysé l'émergence de ressources énergétiques alternatives non polluantes. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir : (1) la première consiste à diminuer la consommation d'énergie (améliorer le rendement des récepteurs, faire des économies en changeant les habitudes de consommation, ...) tout en améliorant la productivité des centrales électriques ; (2) une deuxième approche du problème consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion thermonucléaire qui, éventuellement, pourrait être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière demeure incertain.

Par contre, on assiste actuellement à un *boom* des énergies dites renouvelables ou **EnR** (éolienne, solaire, bioénergie), inépuisables et non polluantes, qui pourraient constituer pour l'Algérie une réserve énergétique alternative intéressante, donc un axe de recherche innovant à investir, surtout dans le domaine du Génie Énergétique et Énergies Renouvelables (amélioration des chaînes de conversion électromécaniques associées à ces **EnR**).

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. Le mot éolien vient du Grec (Éole) qui est le dieu des vents. En effet, c'est le réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète qui provoque les vents. Cette énergie propre Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne de CO<sub>2</sub> rejeté chaque année par la production d'électricité d'origine thermique et de moins en moins coûteuse avec les progrès technologiques, permet une production électrique décentralisée

faiblement émettrice de gaz à effet de serre. En effet, la production d'électricité à partir des ressources fossiles (charbon, pétrole ou gaz) ou fissiles (uranium,...) contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ces ressources non renouvelables et d'autre part à aux émissions de gaz à effet de serre provoquées par les hydrocarbures, ceci sans parler de la production de déchets radioactifs difficiles à traiter dans le cas du nucléaire.

Tous ces facteurs ont fait de l'éolien, l'énergie renouvelable la plus prometteuse, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie dans le monde. Ainsi, durant les dernières décennies, l'utilisation des méthodes alternatives de production d'électricité, et notamment l'énergie éolienne, ont connu une forte et rapide croissance à travers le monde. Par conséquent, l'énergie éolienne raccordée au réseau a augmenté, et devrait être un contributeur important à la production d'électricité, avec un taux de pénétration pouvant atteindre 50%, dans certains pays comme le Danemark, la Norvège, la Suède et l'Allemagne [1].

C'est dans cette perspective de contribuer au développement des **EnR** que s'inscrit notre mémoire de mastère. Pour diverses raisons, nous nous sommes particulièrement intéressés à la filière *éolienne*. L'étude de la chaîne de conversion d'énergie a été scindée en 3 chapitres :

Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre de ce document. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production renouvelable mondiale. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée et développée. On s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices. Et on a présenté les types des génératrices. La dernière partie de ce chapitre illustre que il a d'autre éolienne au cours de développement.

Le second chapitre est consacré à l'étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie et les caractéristiques de gisement du vent et l'intérêt de la vitesse variable.

Dans le troisième chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à double alimentation sa structure et son principe de fonctionnement et son intérêt.

# **CHAPITR 01**

## **Généralités sur les Systèmes Eoliens**

### **1. Introduction**

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [2].

### **2. Les principales sources d'énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz



dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..).

## **2.1. Génération de la chaleur**

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole [3].

Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables:

### **2.1.1. Thermo solaire**

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage [4].

Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [3].

Cette énergie représente un rendement élevé et permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement. La marge de manœuvre, en matière de substitution aux énergies fossiles, est très importante : s'il est certes impossible de se chauffer uniquement par le soleil (la chaleur ne se stocke pas sur de longues périodes), il serait toutefois possible de produire 50% de l'énergie de chauffage dont nous avons besoin [4].

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs sont élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation on locale (principalement chauffage individuel, piscines). Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau

douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement.

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent. En 2003 environ 14000 m<sup>2</sup> de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22% [4].

### **2.1.2. Biomasse**

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage.

L'énergie peut être stockée et émet peu de gaz à effet de serre. Cependant, la biomasse ne peut avoir qu'un apport limité, en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement.

L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir [3].

### **2.1.3. Thermique**

La centrale thermique produit l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant un combustible tel que charbon, gaz ou fuel. Son cycle de fonctionnement comporte trois phases :

- La transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie de la vapeur dans la chaudière.
- La transformation de l'énergie de la vapeur en énergie mécanique dans la turbine.
- La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans l'alternateur.

Suivant la forme de l'énergie produite, les centrales thermiques sont classées en 2 catégories :

Centrales à turbines à vapeur à condensations et les centrales à turbines à prélèvement dites aussi à turbines contre pression qui sont destinées à la production simultanée d'énergie thermique et d'énergie électrique (chauffage urbain, alimentation en eau chaude).

Ces dernières sont construites au voisinage de grandes villes et sont plus économiques que les centrales à condensation [6].

## **2.2. Générations d'électricités**

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

Selon l'article de [la géo], la production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ en 1998.

Le plus fort taux de croissance actuel (Environ 30% par an en moyenne depuis plus de 10 ans). A la fin de 2002, La génération d'électricité éolienne est environ de 30,5 GW mondiaux (1% de la puissance totale), 22 GW en Europe et 12 GW en allemands.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une production d'électricité éolienne de 140 GW mondiaux et 90 GW en Europe [7].

### **2.2.1. Hydraulique**

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment [le sol]. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable» [3].

Son principal avantage est de fournir de fortes puissances et de stocker l'énergie dans les retenues d'eau.

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique.

En Europe, en 1999, on comptait environ 10 GW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13 GW [8].

### **2.2.2. Énergie de la mer**

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [3].

### **2.2.3. Photovoltaïque**

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standards fournissent une

puissance moyenne de 100 W par m<sup>2</sup> (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production. [5].

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible [4].

Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [3].

#### **2.2.4. Production éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur): Ces systèmes demandent une bonne technicité. Si l'on excepte l'Inde et la Chine, peu de pays en développement en fabriquent. Les projets exigent des sites ventés et des niveaux d'investissement élevés. Les puissances obtenues demeurent encore à l'heure actuelle des projets pilotes, sauf au Maroc ou en Mauritanie, car ces applications sont variables selon la vitesse du vent et la taille des pales. Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 KW. C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum [4].

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

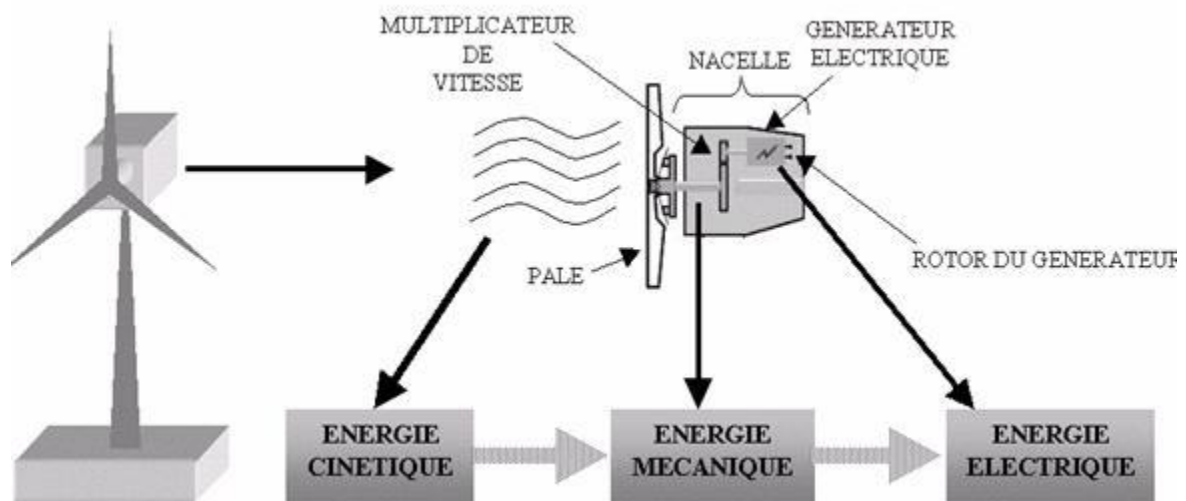
Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70 GW.

Parmi les avantages de la production éolienne, le Coût de fonctionnement est relativement faible [3].

### **3. 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'une génératrice [9].



**Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [9]**

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). 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 mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [9].

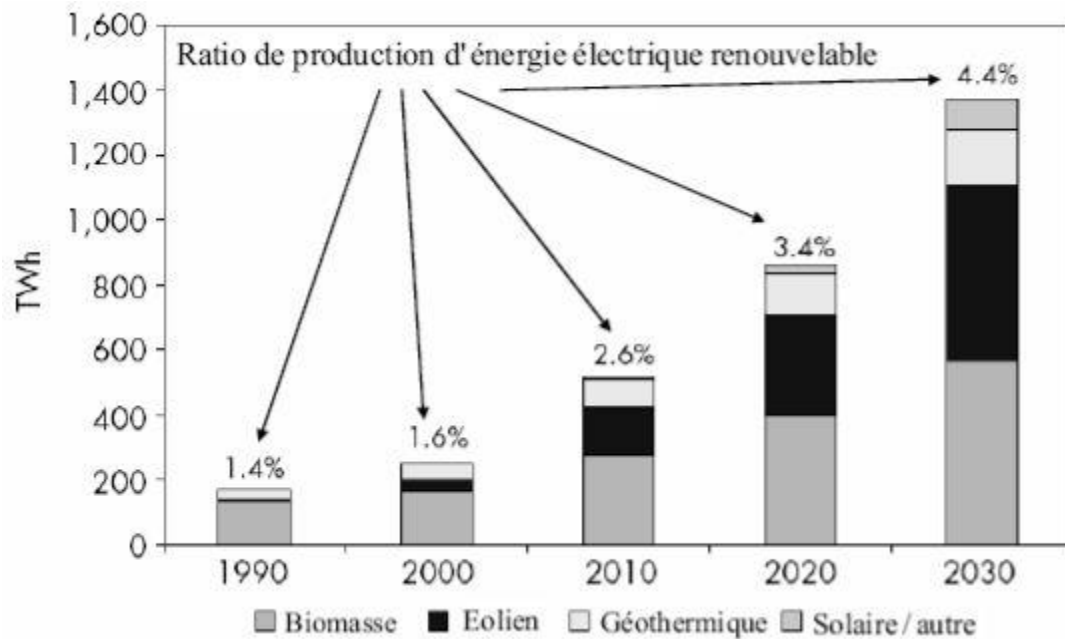
L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

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 produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

#### **4. Production d'Énergie Électrique à Partir des EnR**

La majorité des sources traditionnelles sont extraites des gisements puis acheminées vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être très éloignées, ce qui influera sur les coûts. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation.

C'est cette propriété qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable pour la production d'énergie électrique. La (*Figure 1.2*) donne une idée sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que des prévisions jusqu'à l'horizon 2030 [10].



**Figure 1.2 : Estimation de la production mondiale d'électricité basée sur les EnR[10]**

## **5. L'histoire de L'éolienne**

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle : on a retrouvé la trace de systèmes fixes de conversion du vent qui remontent à 2000 ans avant J-C, et l'utilisation du vent pour la navigation date peut être de 5000 ans. Certains pays ont depuis le Moyen-âge largement fait usage de ce type d'énergie par le biais de moulins à vent ou d'éoliennes dites américaines que ce soit pour moudre le grain ou pomper l'eau. Les années 1970 à 2000 ont vu une importante évolution à la fois de leur utilisation par le monde et de leur conception, bénéficiant des progrès technologiques et scientifiques dans les domaines de l'aérodynamique, la structure, les matériaux, l'électronique, etc. : l'accroissement de nos besoins énergétiques suscite en effet leur développement et leur mise en œuvre. De par notre mode de vie, nous avons créé une forte demande d'énergie ; de plus, confrontés aux réductions des réserves, aux augmentations des coûts et aux impacts écologiques des énergies traditionnelles, nous sommes amenés à proposer des alternatives intéressante et renouvelable pour compléter ces sources traditionnelles, et l'éolienne constitue une source d'énergie adéquate car fiable, inépuisable et sans conséquences indésirables sur l'environnement, s'inscrivant notamment dans l'effort global de réduction des émissions des gaz à effet de serre [11].



## 5.1. Des moulins à vent aux éoliennes modernes

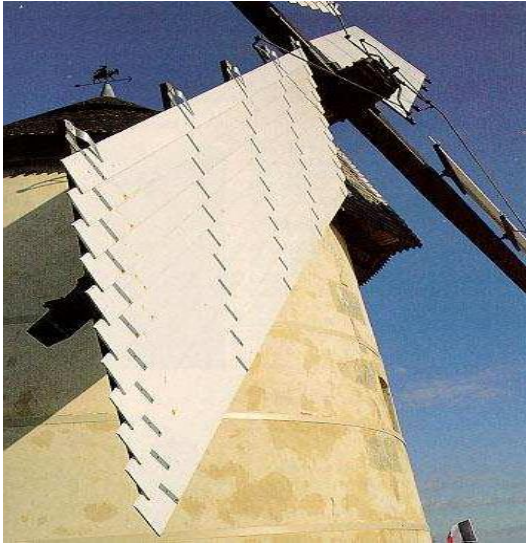
L'énergie éolienne tire son nom d'Eole, le nom donné par les anciens Grecs au dieu produisant le vent.



***Figure1.3 : Moulins a vent [11]***

Il y a bien longtemps que les hommes ont imaginé des moyens pour exploiter les vents : on a par exemple trouvé des roues à aubes que le vent faisait tourner chez les perses. Mais c'est vers le 12ème siècle qu'apparaissent en Europe les premiers moulins à vent.

Vers le début du 13ème siècle, les moulins étaient constitués d'une solide tour ronde et les ailes ressemblaient à des échelles sur lesquelles on accrochait des toiles. Vers la fin du 14ème siècle on améliora les mécanismes, en permettant par exemple au chapeau du moulin de tourner pour orienter les pales vers le vent pour une utilisation plus intensive. Puis les moulins pivot sont apparus, dont le bâtiment était suspendu sur un axe central, permettant de l'orienter dans la direction du vent[11].



**Figure 1.4 : Hélicis à pas variable [11]**

Vers 1845, les meuniers étant fatigués de devoir en permanence monter dans les ailes pour faire varier la surface de voilure, on remplaça le tissu des ailes par un ingénieux système de planches mobile. Nous devons cette amélioration à un inventeur français, du nom de Berton.

Nos hélices modernes à pas variable ne constituent finalement qu'une modeste amélioration de ce mécanisme. La dernière évolution marquante a été l'adoption de profils semblables à des ailes d'avion[11].



**Figure 1.5 : Pompage d'eau [11]**

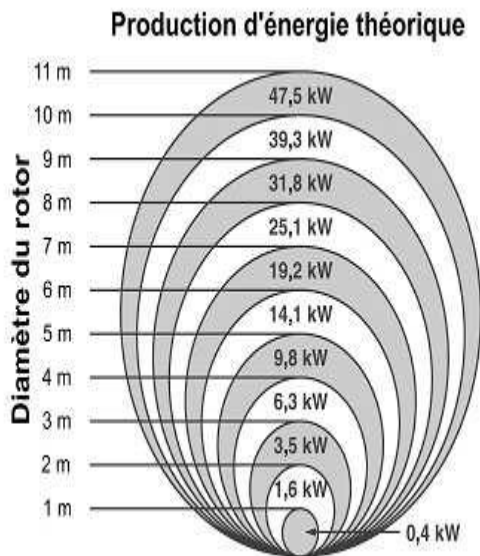
Ce sont sans doute les films du Far West qui ont fait découvrir au grand public l'éolienne moderne, tournant et grinçant dans la ferme américaine traditionnelle. Plusieurs milliers furent installés aux Etats-Unis, en particulier en Californie, servant au pompage de l'eau dans les élevages [11].



**Figure 1.6 : Production d'électricité [11]**

Des moulins massifs et trapus d'autrefois nous avons aujourd'hui évolué vers des structures légères, aériennes et élégantes. Le système de production électrique occupe en effet peu d'espace : il s'agit d'une hélice branchée sur un alternateur. Les principes qui gouvernent les rotors de ces machines s'apparentent ou sont issus de ceux des hélices ou des rotors d'hélicoptères [11].

## **5.2. L'éolien aujourd'hui**



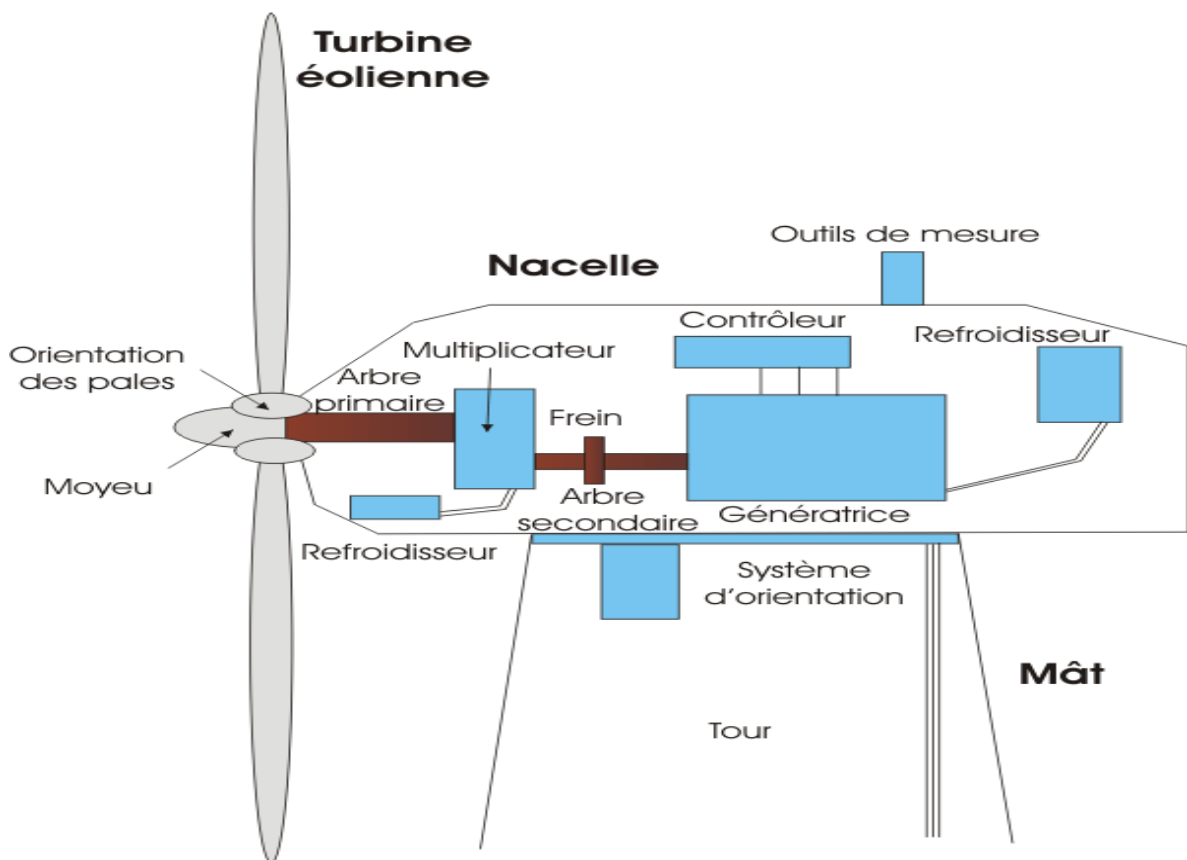
Il existe ainsi de nos jours une large palette d'éoliennes différentes, surtout utilisées pour la production électrique. Le « petit éolien » par exemple, utilisé par les particuliers, délivre des puissances de quelques dizaines de Watts pour des surfaces d'une cinquantaine de centimètres de diamètre balayées par l'hélice. Le « gros éolien » se tourne plutôt vers la production d'électricité nationale, qui est directement injectée sur le réseau de distribution ; des puissances de 5 000 kilowatts peuvent ainsi être obtenues pour des éoliennes de 80 mètres de diamètre [11].

**Figure 1.7 : Diamètre du rotor=f(puissance)[11]**

Des projets actuels se tournent vers des Parcs maritimes en haute mer, aussi appelés parcs en « offshore », car bien que le coût du kWh produit soit plus élevé que sur le continent, la production y est plus stable et plus importante du fait de la présence quasi constante de vent. Les sommets de Bonn en juillet 2001 et de Johannesburg en septembre 2002 ont permis de définir la mise en œuvre du protocole de Kyoto et de réaffirmer l'objectif de réduction des gaz à effet de serre. Le développement des énergies renouvelables est alors un enjeu primordial, puisque la France s'est engagée à produire 21% de son électricité à partir d'énergies propres d'ici 2010, au lieu de 15% actuellement (comprenant déjà l'énergie hydraulique fournie par les barrages) [11].

## **6. Constitution principale d'une Eolienne**

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux :



**Figure 1.8: Principaux composants d'une éolienne [12]**

## 6.1. Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. . Il supporte le rotor et la nacelle. En général, le mât est composé de trois parties permettant un transport plus simple. Il est fixé aux fondations par des boulons, partiellement serrés, permettant ainsi une certaine extension de la structure soumise en permanence à de nombreuses forces.

Le mât sert également à protéger les immenses câbles électriques qui passent à l'intérieur, ainsi l'électricité produite est acheminée peu à peu vers le réseau principal d'EDF. Dans le mât se trouve un passage permettant l'accès des agents d'entretien à la nacelle. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition au vent souhaité. En effet, plus la hauteur du mât augmente plus la vitesse du vent et le coût de la structure augmente. Généralement on choisit un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre des pales. La hauteur d'une éolienne varie entre 40 et 80 mètres. Le mât renferme les câbles qui assurent la liaison au réseau de distribution [12].



Mât en béton[12]

Mât en métal[12]

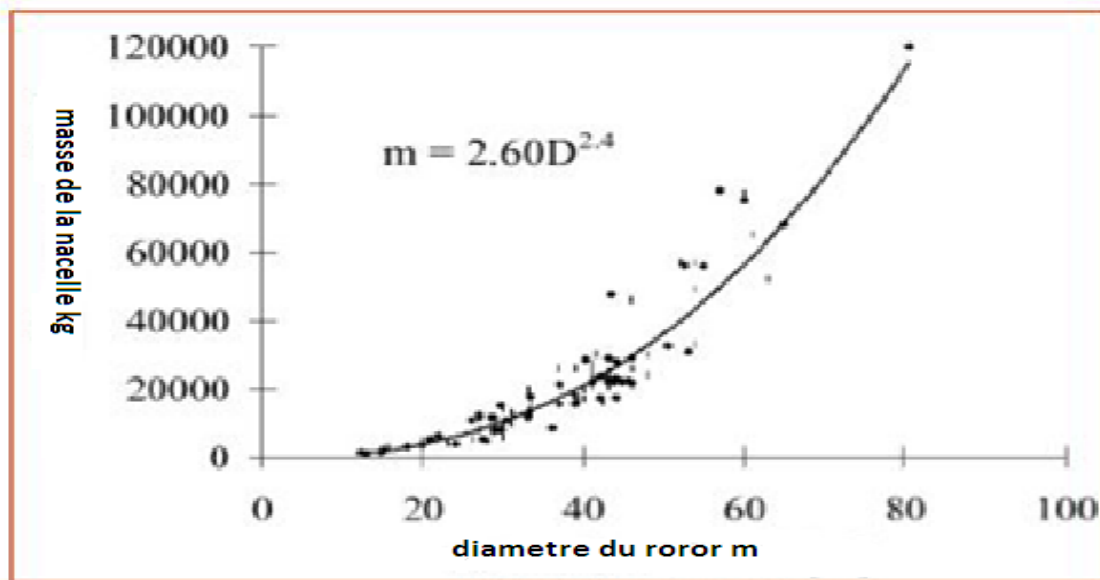
Mât haubané[12]

Mât en treille[12]

**Figure 1.9 :different type des Mâts**

## 6.2. La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent), la variation de la masse d'une nacelle en fonction de diamètre du rotor évolue de manière exponentielle selon la figure (1.4) [16].



***Figure 1.10 : variation de masse de la nacelle en fonction de diamètre du rotor [16]***

## 6.3. L'arbre primaire

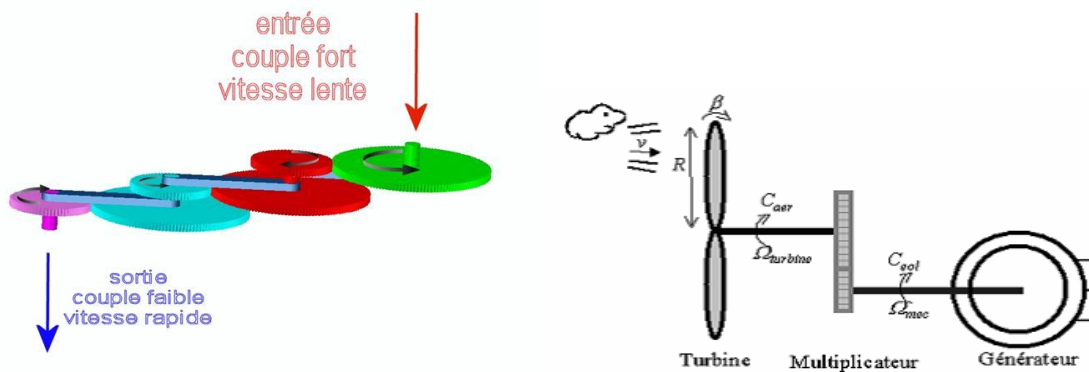
C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 - 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur [17].



**Figure 1.11 : schéma d'un arbre primaire [18]**

#### **6.4. Multiplicateur (boite vitesse)**

Ensemble d'engrenages transformant la grande force et petite vitesse de l'**arbre principale** (directement relié au rotor) en petite force mais très grande vitesse à l'**arbre rapide**. Ainsi la vitesse de l'arbre principal est de [10.40] tours par minute et passe grâce au multiplicateur à plus de [1500.3000] tours pour l'arbre rapide [19].



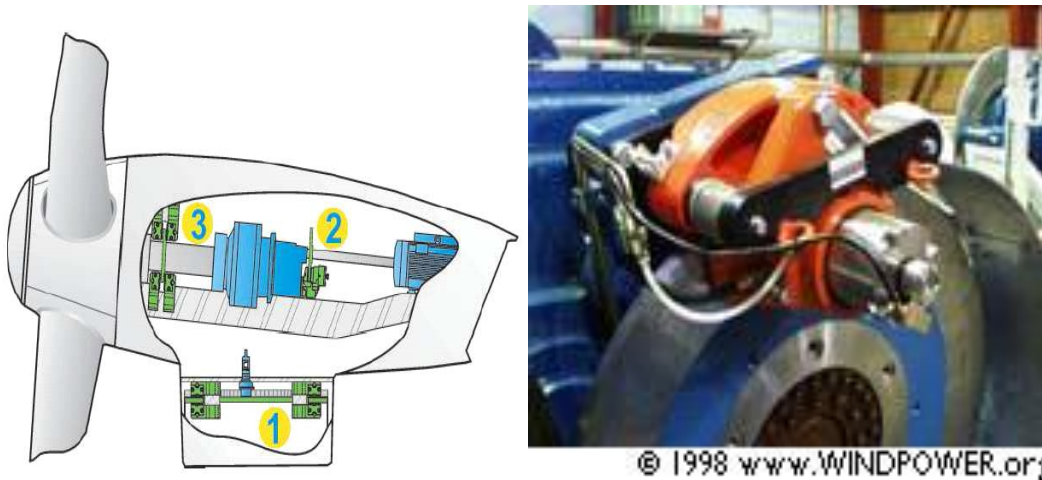
**Figure 1.12 : schéma du multiplicateur [19]**

#### **6.5. L'arbre secondaire**

Il convient donc maintenant de voir l'arbre secondaire ou l'arbre de la génératrice après avoir parlé de l'arbre primaire. Il succède au multiplicateur et est relié à la génératrice. Il tourne cinquante à cent fois plus vite que l'arbre primaire à l'entrée du multiplicateur. Il est équipé d'un frein à disque mécanique (dispositif de sécurité) qui limite la fréquence de rotation en cas de vent violent (d'autres dispositifs de sécurité peuvent être utilisés) [20].

## 6.6. Frein mécanique

Il a 3 principales frein dans l'éolienne un pour la vitesse du l'arbre primaire et l'autre relié à l'arbre rapide Il est actionné en cas de vent trop violent (+ De 25 m/s) et le troisième il est fait pour l'orientation de la nacelle, il a beaucoup de type de freinage mais les plus utiliser c'est les freins a disc [21].



**Figure 1.13 : schéma d'un frein à disc d'un arbre secondaire [21]**

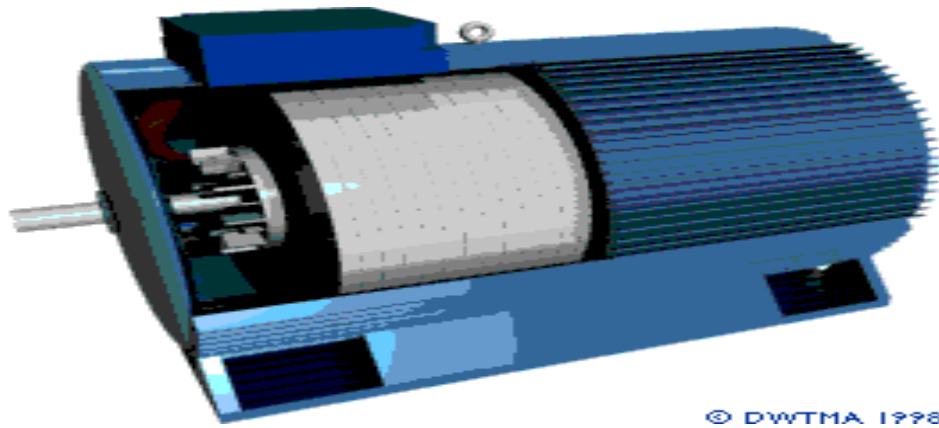
## 6.7. Génératrice électrique:

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure.

Elle est composée d'un rotor et un stator C'est grâce à ce composant que l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique. L'arbre du rotor entraîne la rotation de son axe (stator), généralement à [1500,3000] tours par minute, et elle produit de l'électricité dans la plupart des cas en [500 ; 700] V. Un câble triphasé conduit cette énergie à la base du mât où elle est directement injectée sur le réseau après avoir été élevée



à la bonne tension. Synchrones ou asynchrones (généralement du courant électrique alternatif) [22].



**Figure 1.14 : Schéma d'une génératrice [22]**

### **6.7.1. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens**

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge

L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore)

Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

#### **6.7.1.1. Machine synchrone**

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par

l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance [5].

### **6.7.1.2. Machine asynchrone à cage**

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant [23].

### **6.7.1.3. Machine Asynchrone à Double Stator :**

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand

nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$p_{mg} = C_{em}\Omega_s \quad (1.1)$$

Avec :

$p_{mg}$  La puissance transmise par la génératrice,  $C_{em}$  Le couple électromagnétique,  $\Omega_s$  La vitesse de synchronisme,  $\omega$  La pulsation du réseau et  $p$  le nombre de paires de pôles. A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (1.2)$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs [12].

#### **6.7.1.4. Machine asynchrone à double alimentation :**

Il plusieurs type des machines asynchrone a double alimentation une de ces machines La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette

génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation avec leurs dispositifs de réglage de la vitesse à travers le contrôle de glissement sont envisageables [24].

### **6.8. Anémomètre et girouette:**

Girouette pour évaluer la direction ainsi qu'un anémomètre qui sert à mesurer la vitesse [25].



***Figure1.15 :schéma Anémomètre et girouette[25]***

### **6.9. Système de refroidissement :**

Le système de refroidissement est formé de plusieurs refroidisseurs nécessaires au bon fonctionnement du multiplicateur de vitesse qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre, et ils permettent d'éviter la surchauffe de la génératrice et pour les freins. Ce sont des ventilateurs, des radiateurs à eau ou à huile ou à partir de l'air frais [25].

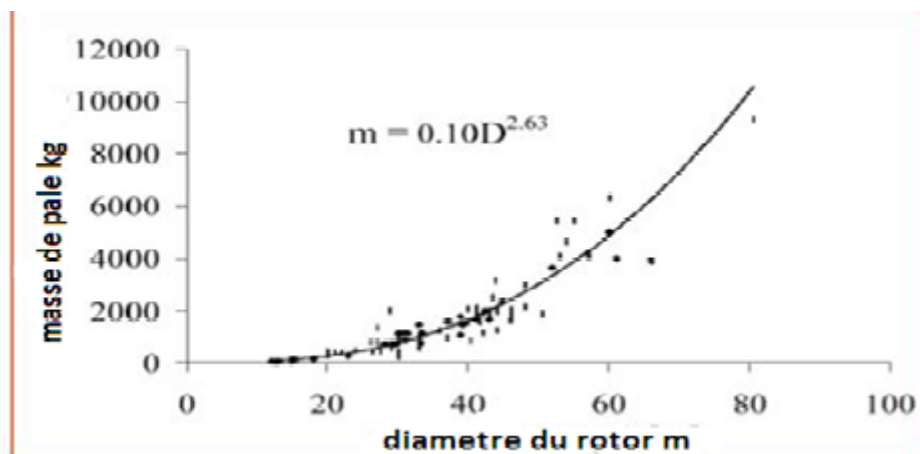
### **6.10. Le rotor**

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées ; actuellement, les matériaux

composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales comme indiqué [12].



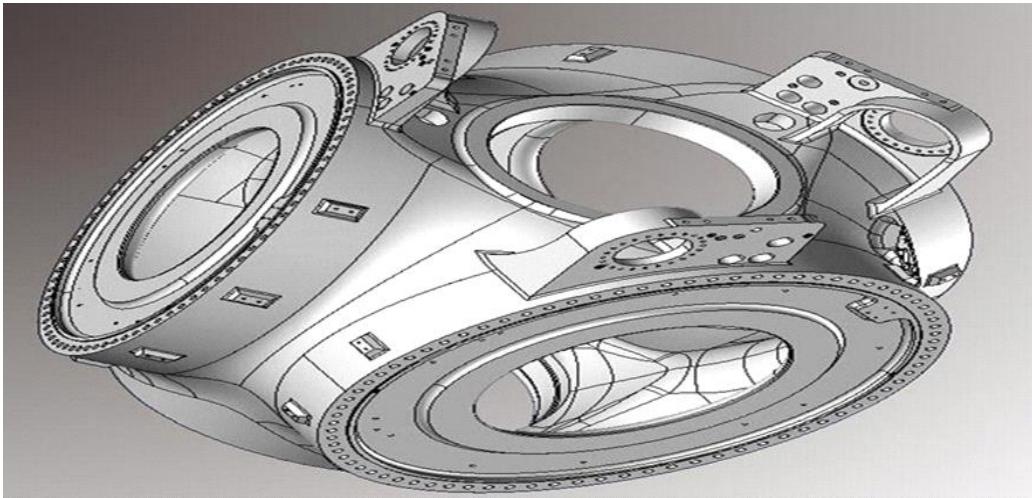
***Figure.1.16: Schème d'un retord et son moyeu [12]***



***Figure 1.17: Variation de la masse d'une pale en fonction de diametre du rotor [16]***

### **6.10.1. Le moyeu:**

Le moyeu est une pièce en acier moulé. Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément.

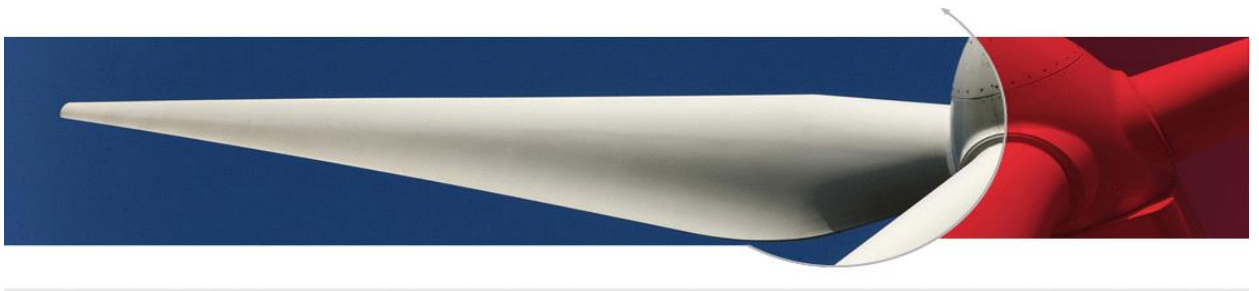


**Figure 1.18 : Schéma d'un moyeu a 3 pales [26]**

### **6.11. Les pales**

Ou capteurs d'énergie Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor.

Il existe des éoliennes bipales et bientôt même mono pale l'intérêt de ces deux dernières étant de diminuer au maximum les coûts de fabrication en essayant de garder la même productivité une pale en moins diminuer la portance mais aussi le poids du rotor donc l'éolienne peut garder la même vitesse avec une ou deux pales en moins. Mais l'éolienne bipale et mono pale souffre pour l'instant d'une trop grande fragilité. Tableau (1.1) [tab1.1] schéma [27].



**Figure1.19 :Schéma d'une pale[27]**

<b>ECHELLE</b>	<b>DIMÉTRE L'HÉLICE</b>	<b>DE PUISSANCE DELIVRÉE</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
<b>Moyenne</b>	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
<b>Grande</b>	46 m et plus	1 MW et plus

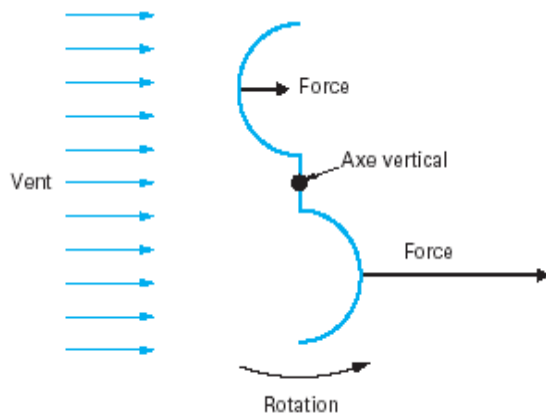
**Tableau 1-1 : Classification des turbines éoliennes.**

## **7. Modes d'installation et Différents Types d'éoliennes**

Généralement il y a deux types d'installations des éoliennes : l'éolienne qui n'est pas raccordée au réseau dite « individuelle » est installée en site isolé ; le deuxième mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes installées sur la terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière. Avec les fermes « offshore » on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique. Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont

### **7.1. Eoliennes à Axe Vertical**

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.



Le principe de mise en mouvement est le suivant : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

**Figure 1.20 : Effet du vent sur un corps creux[29]**



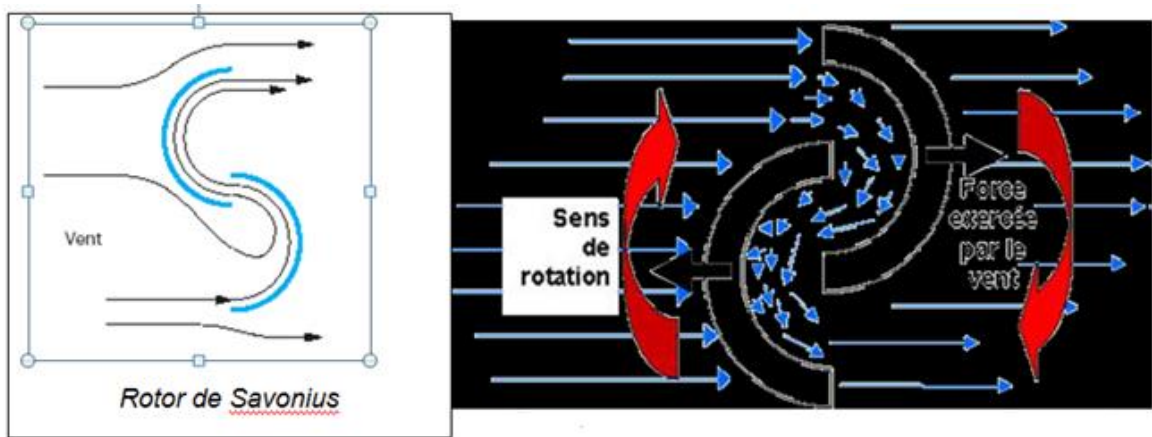
**Figure 1.21 : Petites éoliennes à axe vertical [29]**

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

### **7.1.1. Le rotor de Savonius**

Dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

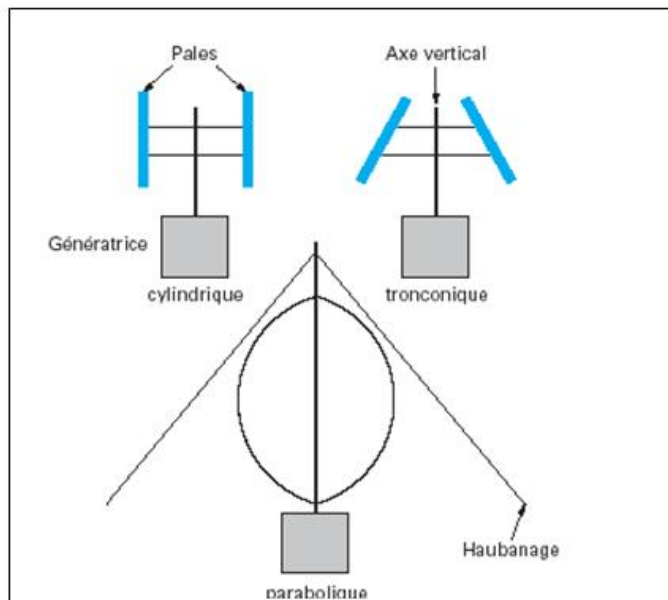




**Figure 1.22 : Schéma principe rotor savonius [12]**

### **7.1.2. Le rotor de Darrieus**

Est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [11].



**Schéma du rotor de Darrieus [31]**

**Figure 1.23 : Différents types de rotor Darrieus [10]**

## **7.2. Éoliennes à Axe Horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement . Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.



***Figure 1.24 : Petite éolienne à axe horizontal [29]***

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (*Figure 1.24*) [12]:

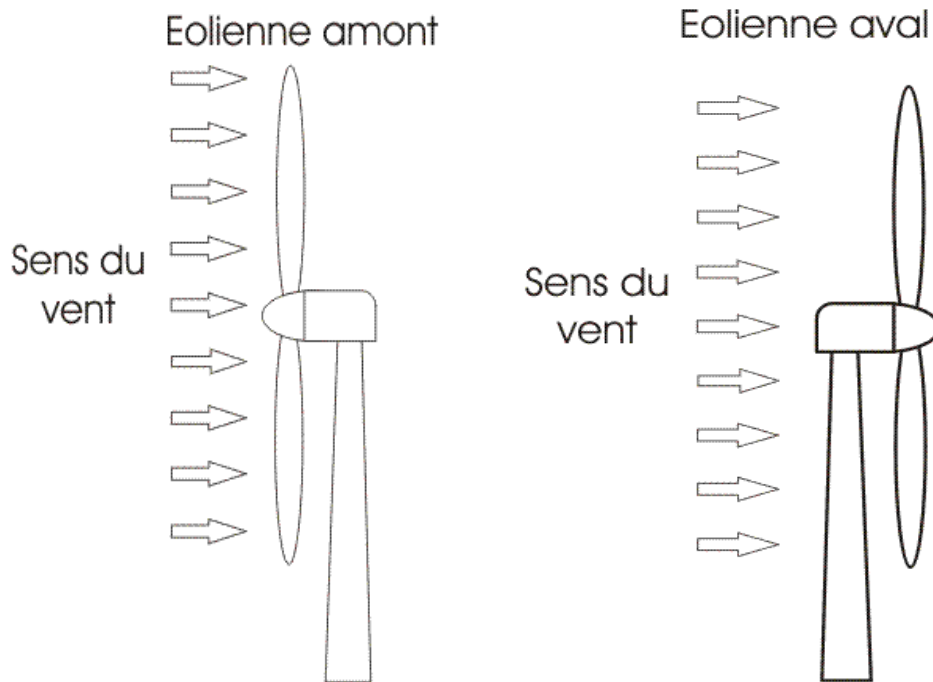
### **7.2.1. Amont**

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

### **7.2.2. Aval**

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de

meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.



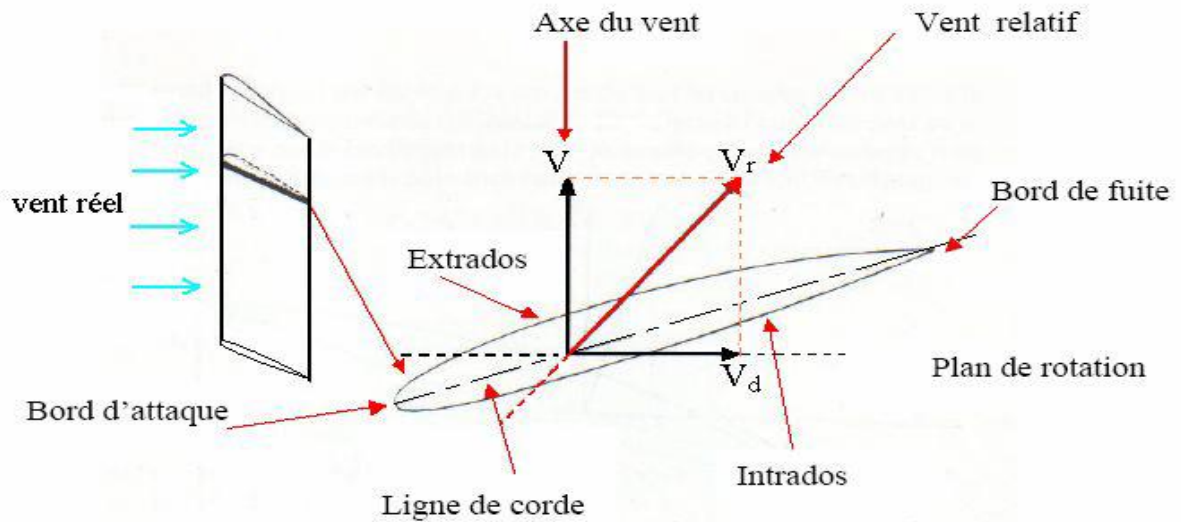
***Figure 1.25: Types d'éoliennes à axe horizontal[12]***

## **8. Fonctionnement d'une Pale d'éolienne**

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

### **8.1. Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne**

La (Figure1.25) décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée [32]



**Figure 1.26 : Description d'une pale d'éolienne [32]**

$V$  : vent qui souffle réellement.

$V_d$  : vent dû à la rotation.

$V_r$  : vent de combinaison ou vent relatif.

$V_r$  est la résultante de  $V$  et  $V_d$ . La construction de résultantes forme un triangle, d'où le nom de *triangle des vitesses*. Lors du mouvement de rotation des pales, chaque point appartenant aux pales se déplace sur un cercle. Le rayon  $r$  du cercle, correspond à la distance depuis le centre de rotation. Plus le rayon du cercle sur lequel le point se trouve est grand, plus le point devra parcourir de distance à chaque tour, et donc, plus sa vitesse tangentielle,  $V_d$ , sera élevée. On peut écrire que, pour un régime,  $\omega$ , de rotation des pales la vitesse tangentielle  $V_d$  seront :

$$V_d = r \cdot \omega$$

## **8.2. Systèmes de Régulation de Vitesse d'une Eolienne**

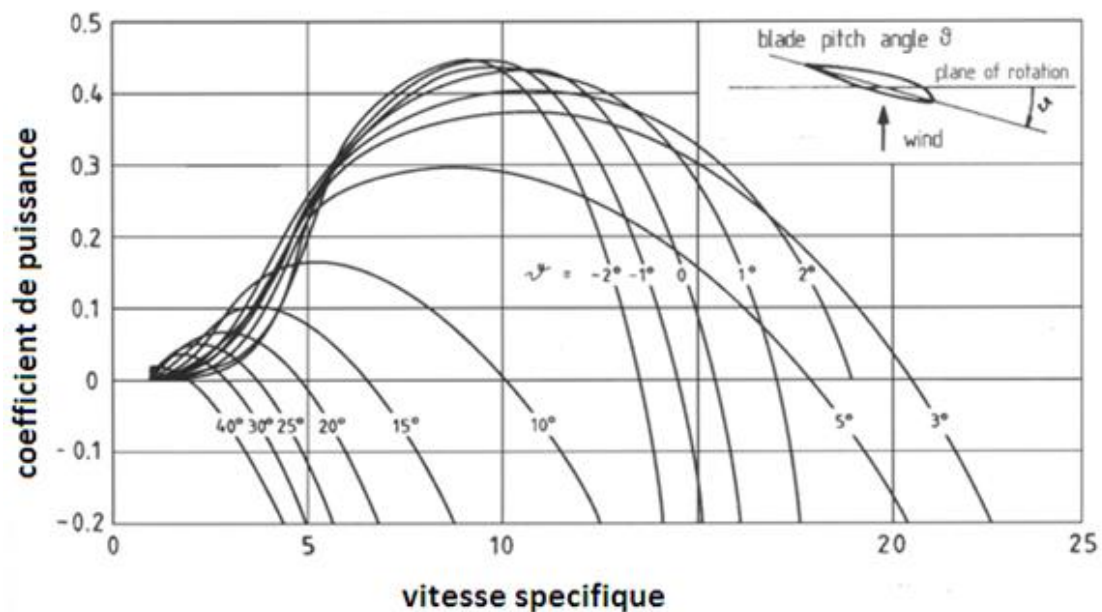
### **8.2.1. Système à Décrochage Aérodynamique " Pitch "**

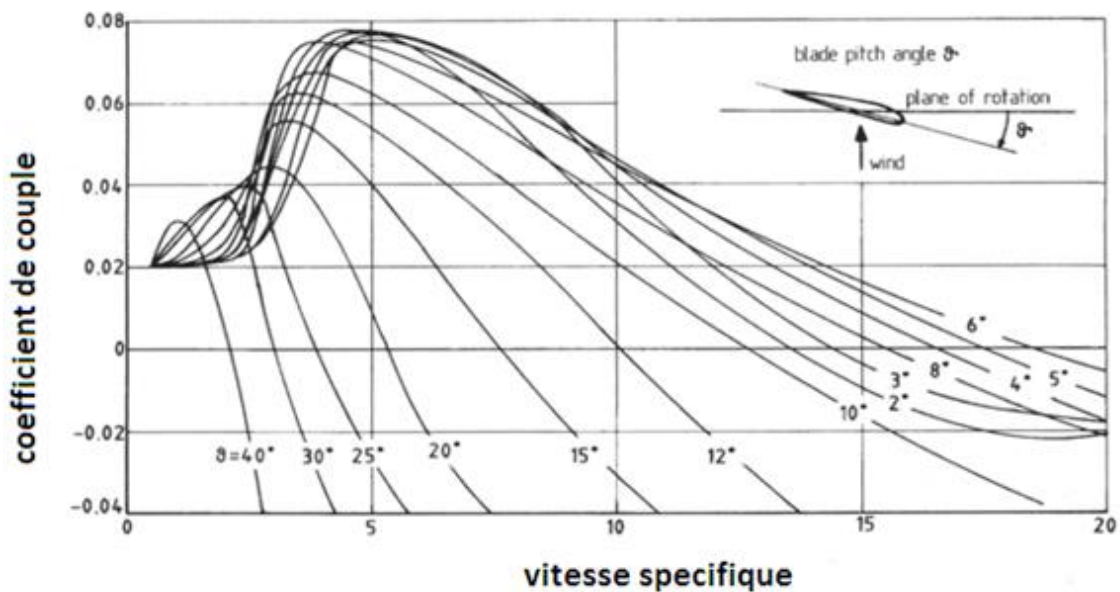


**Figure 1.27: Système d'orientation des pales [12]**

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment (Fig1.27). C'est à dire il faut que varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

La figure (1.28) [33] met en évidence l'effet de l'angle de pas sur le coefficient aérodynamique de puissance, un angle nul correspond à une pale face au vent. L'influence sur le couple est plus facile à comprendre, c'est pourquoi on a également tracé le coefficient aérodynamique de couple. Précisons qu'une valeur négative de  $C_p$  correspond à un fonctionnement frein.





**Figure 1.28 : Effet de l'angle de pas sur le coefficient aérodynamique de puissance (en haut) et sur le coefficient aérodynamique de couple (en bas) éolienne WKA60 [33]**

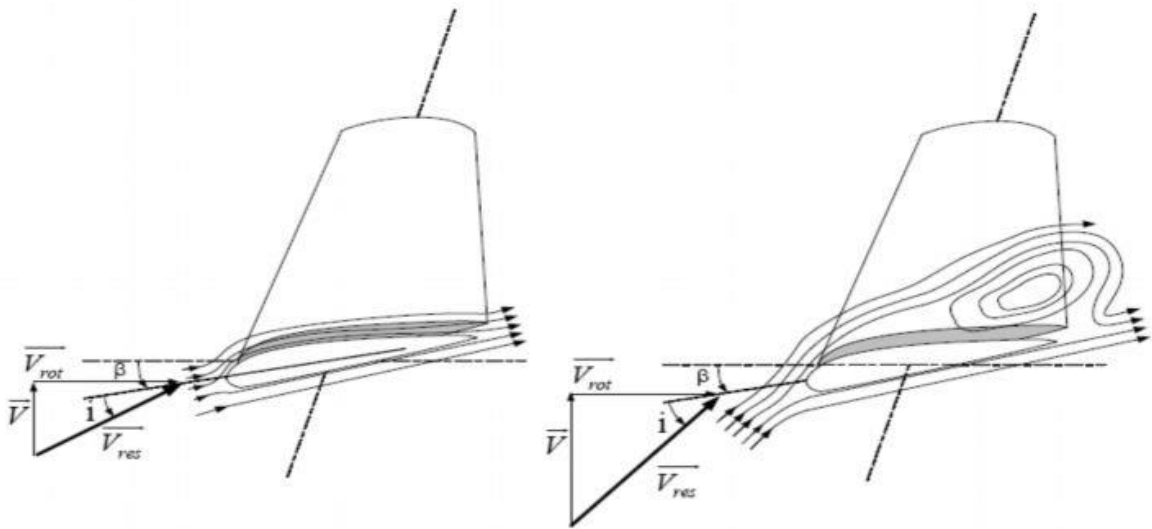
Ce système de régulation offre les avantages suivants :

- la possibilité de pouvoir effectuer un contrôle actif de la puissance sous toutes les conditions de vent (en dehors de la vitesse limite de sécurité), y compris à une puissance partielle
- elles peuvent fournir la puissance nominale même quand la densité de l'air est faible (des sites sur les hauteurs, grandes températures) ;
- une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage stall dans les mêmes conditions de fonctionnement
- démarrage rapide par changement de l'angle de calage
- il n'y a pas besoin de freins puissants pour les arrêts d'urgence
- les contraintes des pales sont plus faibles quand les puissances sont supérieures à la valeur nominale
- la masse réduite des pales du rotor mène à une masse réduite de la turbine éolienne.

### **8.2.2. Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"**

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de

l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique [34].



**Figure 1.29: Flux d'air sur un profil de pale "stall" [34]**

### **8.2.3. Système à Décrochage Aérodynamique "Active Stall"**

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « stall » et de la régulation « pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

## **9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

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

## 9.1. Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [35], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [36].
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub>, etc. ... [37].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [38].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [39].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [40].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [40].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [42].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [43], selon l'article [44] le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées



technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [42].

## **9.2. Les inconvénients**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [40], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc
- La source d'énergie éolienne étant stochastique [44], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques .

## **10. Différents technologies d'éoliennes**

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse variable.

### **10.1. Fonctionnement à vitesse fixe**

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas).

Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un

câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit [46].

### **10.1.1. Les avantages de la vitesse fixe**

- Simplicité d'implantation [47].
- Plus grande fiabilité [47].
- Pas besoin de système électronique de commande [48].
- Moins cher [47].

### **10.1.2. Les inconvénients de la vitesse fixe**

- En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint [49].

## **10.2. Fonctionnement à vitesse variable**

Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [50].

### **10.2.1. Les avantages de la vitesse variable**

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent [47].
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques [47].
- Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales, tout en stockant l'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale.

Cela requiert évidemment un système de contrôle très intelligent qui est en mesure de distinguer entre une vraie rafale et simplement des vitesses élevées du vent. De cette manière, on arrive à réduire le couple maximal [51].

### **10.2.2. Les inconvénients de la vitesse variable**

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance complexe [49].
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

## **11. Emission de CO<sub>2</sub>**

En 2011, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> dues à la production d'électricité ont atteint 365 000 kilos de CO<sub>2</sub> par seconde, soit 11 500 milliards de kilos de CO<sub>2</sub> par an (Gt CO<sub>2</sub>) [52]

Sur une année, une éolienne de 1.5 MW permet donc d'économiser 20064 tonnes de CO<sub>2</sub> (en considérant un taux de charge annuel moyen de 25,1%) [53].

Quand l'éolienne tourne, elle produit des KWh à 0 Kg de CO<sub>2</sub>/KWh.

Ainsi :

1 KWh Gaz seul = (émet) 456 g CO<sub>2</sub>

1 KWh Eolien + Gaz = 25 % (max éolien présent) x 0 g + 75 % (éolien absent) x 456 g = 342g

→ Gains : 456 g – 342 g = 114 g de CO<sub>2</sub> économisé pour 1 KWh [55].

## **12. Commentaire**

La rumeur laisse également croire que l'absence de vent doit automatiquement être compensée par les centrales les plus polluantes. C'est faux car cela serait une aberration économique. Ce sont les centrales les plus efficaces (en termes de réactivité et de rentabilité) qui sont sollicitées en priorité. Or actuellement, les unités de production les plus efficaces sont les moins polluantes.

D'autre part, l'absence de production éolienne peut être directement compensée par une diminution de la demande en électricité. En règle générale, il est important de rappeler que les variations de l'éolien sont intégrées dans la gestion générale du réseau électrique. Cette gestion, opérationnelle depuis plus d'un siècle, intègre les fluctuations de l'éolien dans l'ensemble des variations de l'offre (production d'électricité) et de la demande (consommation). Il n'y a donc pas de compensation spécifique pour l'éolien.

### **13. Les nuisances sonores de l'éolien industriel**

Les nuisances sonores que certains reprochent aux éoliennes sont quand à elles infondées : s'il est vrai que les premières éoliennes étaient bruyantes, la grande majorité des éoliennes actuelles à trois pâles tournent moins vite et le niveau sonore au pied de leur mât est de [40 ;55] dB soit l'équivalent d'une conversation entre deux personnes à hot voie . Or la réglementation impose que les éoliennes soient placées à une distance minimale de 500 mètres des habitations.

- La source de bruit la plus gênante est due au passage de la pale devant le mât (infra son). C'est surtout ce battement qui s'entend de très loin et qui gêne les riverains. Avec les variations du vent en direction et intensité, le volume du son monte et descend avec pour résultat un sentiment d'anxiété et même quelque fois des nausées.

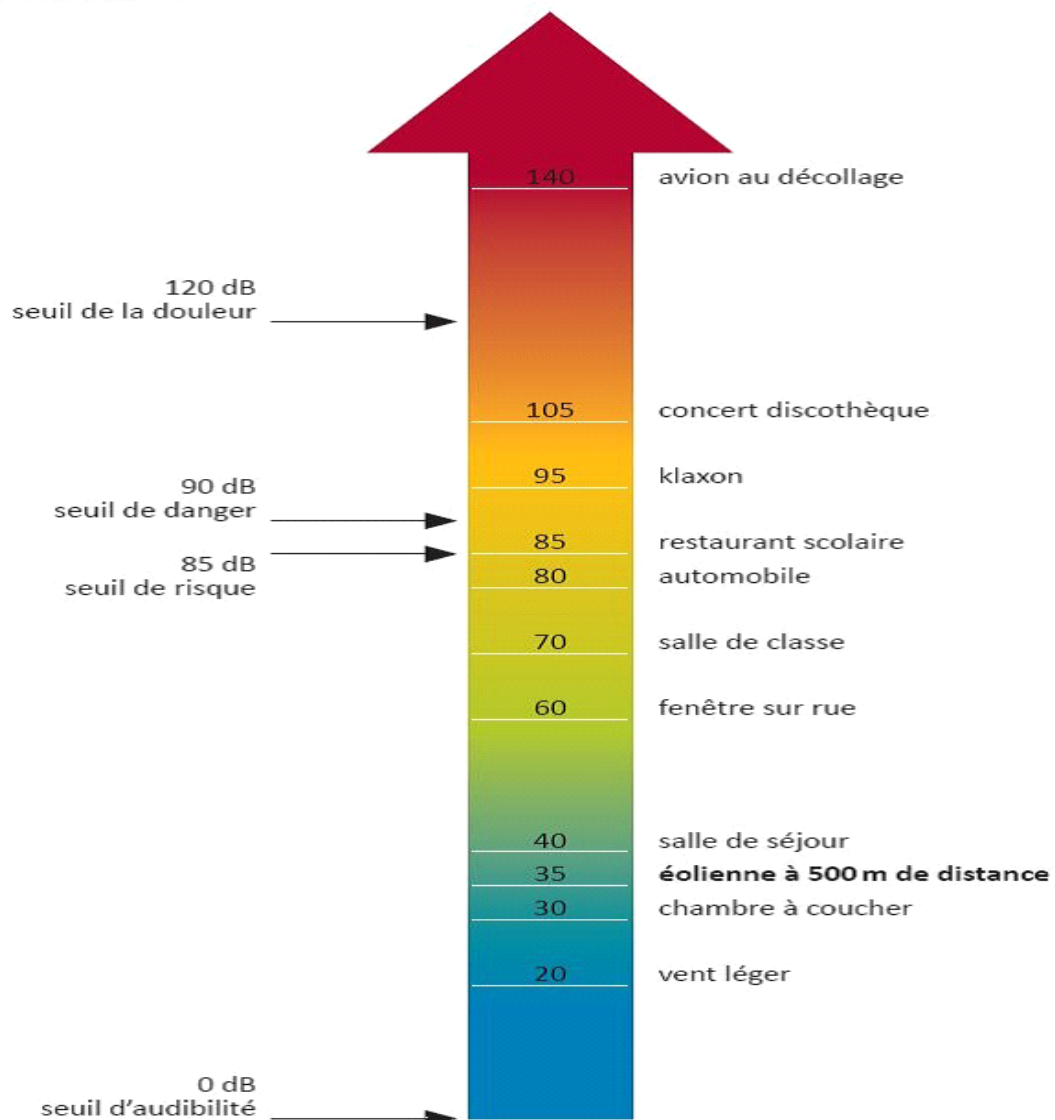
- le fait d'avoir plusieurs machines augmente la quantité d'énergie sonore (en gros 3 dB quand on double le nombre de machines). Mais cela a un autre effet : dans une centrale éolienne il arrive très souvent que le passage d'une pale devant le mât se produise au même instant pour deux ou plusieurs machines. Cela augmente considérablement la nuisance et surtout la distance à laquelle on l'entend. Là encore les variations du vent font varier le phénomène de battement [54].

#### **13.1. Bruit mécanique :**

Une source moins importante de bruit provient de la mécanique (engrenages, roulements à billes, etc ...). Si, sur les machines neuves d'aujourd'hui, le bruit « mécanique » est relativement réduit (c.a.d n'émerge que peu du bruit de fond à partir de 150 m des machines), ce n'est absolument pas le cas pour les machines ayant quelques années (usure, manque de maintenance, défauts de conception, ... ?).

## Échelle du bruit (dB)

source : ADEME



***Figure 1.30 : Approximation d'échelle de bruit [54]***

## **Conclusion**

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des

meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

# **CHAPITR 02**

## **Notions Théoriques sur L'aérogénérateur**

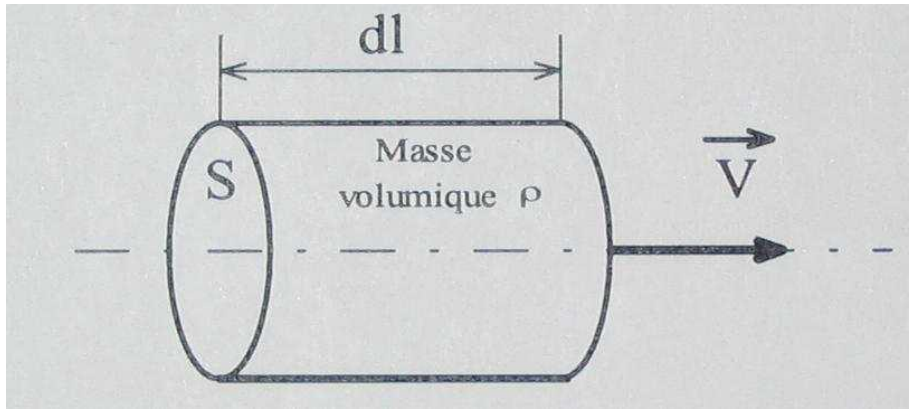
### **1. Introduction**

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique [57].

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [58].

### **2. Coefficient de Puissance $C_p$**

On considère une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse  $V$  conformément à la figure suivante :



**Figure 2.1 : une colonne d'air**

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est donc :

$$dE = \frac{1}{2} dm v^2 \quad \text{Avec} \quad dm = \rho S dl$$

Or nous savons que  $dl = v dt$  car  $v = dl/dt$  D'où

$$dE = \frac{1}{2} \rho S v^3 dt$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_{vent} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ( $S = \pi R^2$  où  $R$  = rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse  $V$  [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \tag{2.1}$$

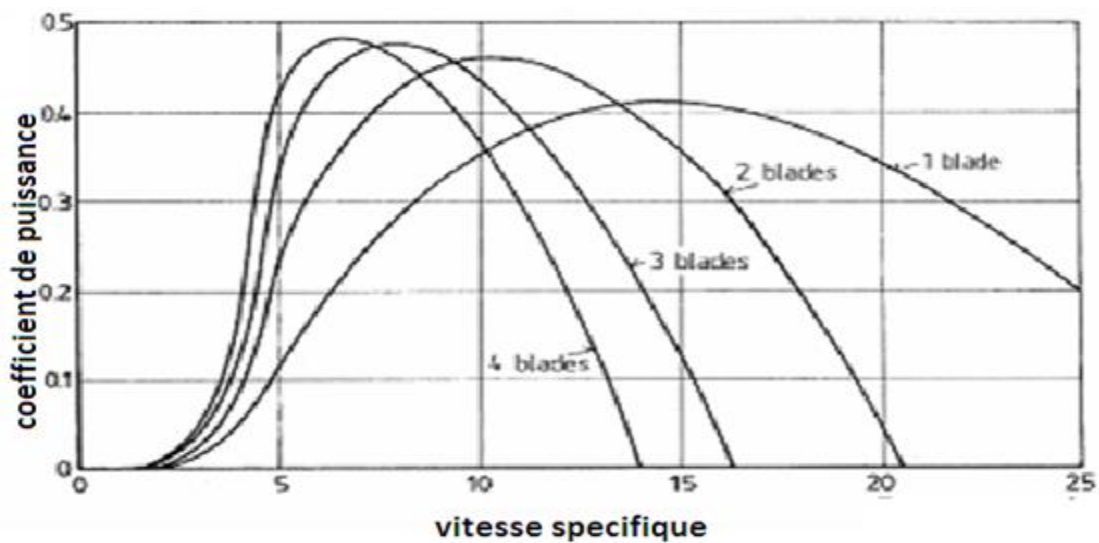


Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance  $C_p$  dans le calcul de la puissance aérodynamique [12] :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (2.2)$$

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  : masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient  $C_p$  caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)}) \quad (2.3)$$



**Figure 2.2: Coefficient de puissance [59]**

### **3. Couple Produit par L'éolienne**

$$C_{aer} = \frac{P_{turbine}}{\Omega_{turbine}} = \frac{\frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega_{turbine}} \quad (2.4)$$

Avec :

$\Omega_{\text{turbine}}$  : La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s]

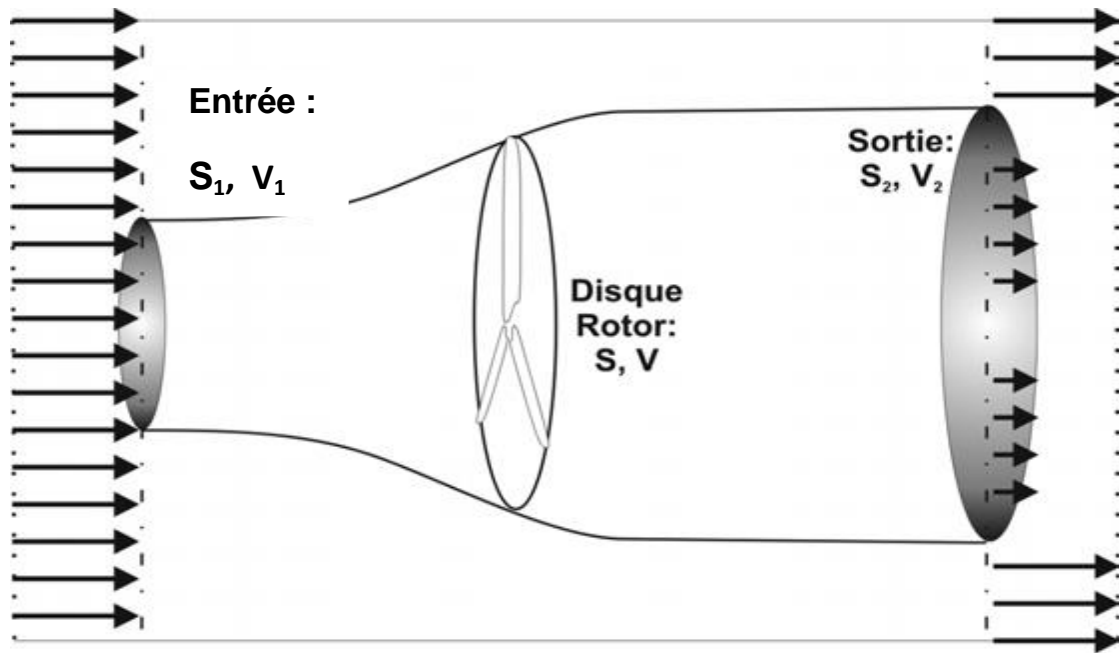
#### **4. Vitesse Spécifique de L'éolienne**

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega_{\text{turbine}}}{V_{\text{vent}}} \quad (2.5)$$

#### **5. Limite de Betz**

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée. Le théorème du physicien allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à  $16 / 27$ , soit environ 59 % de l'énergie totale du vent. La notion de coefficient de puissance  $C_p$  peut maintenant être présentée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique normalisée  $\lambda$  [12].



**Figure 2.3: Tube de courant autour d'une éolienne[12]**

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant (*Figure 2.3*).

Avec:

$V_1$  : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

$V$  : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, de l'ordre de quelques m/s.

$V_2$  : la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne

Où :

$V_1 > V > V_2$  Sont parallèles à l'axe du rotor.

La puissance récupérable du vent s'exprime par:

$$P_{turb} = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \quad (2.6)$$

On peut retrouver le  $(C_p)_{max}$  en faisant une étude des puissances, sachant que :

- la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation d'énergie cinétique du vent :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) \quad (2.7)$$

- d'autre part, l'effort qui s'exerce sur l'éolienne crée une puissance  $P_m$  ; le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (2.8)$$

Alors :

$$P_m = FV = \rho S V (V_1 - V_2) V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (2.9)$$

$P_m$  : correspond à la puissance absorbée par le rotor, soit la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur.

On peut déterminer la vitesse  $V_2$  pour laquelle la puissance est maximale :

$$P_m = \Delta E_c \quad \text{Soit :}$$

$$\rho S V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) \quad (2.10)$$

Par simplification :

$$V(V_2 - V_1) = \frac{1}{2} (V_2 - V_1)(V_2 + V_1) \quad (2.11)$$

Alors :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.12)$$

En reportant l'expression de  $V$  (2-12) dans l'expression (2-9) :

$$P_m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} (V_1 - V_2) = \rho S \frac{(V_1 + V_2)}{4} (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.13)$$

La puissance est maximale, pour  $V_2$  telle que :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0$$

Ce qui donne : 
$$-3V_2^2 - 2V_1V_2 + V_1^2 = 0$$

On résout alors cette équation du second degré, d'inconnue  $V_2$ . On obtient deux solutions : l'une est négative donc impossible et l'autre correspondant à

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (2.14)$$

La puissance est maximale pour :  $V_2 = \frac{V_1}{3}$

En reportant (2-12) et (2-14) dans l'expression (2-9) la puissance maximale  $P_{max}$  devient :

$$P_{max} = \rho S V_1^3 \left( \frac{8}{27} \right) \quad (2.15)$$

On déduit le coefficient de puissance maximal  $C_{Pmax}$  pour une éolienne.

$$P_{max} = \rho S V_1^3 \left( \frac{8}{27} \right) = \frac{1}{2} C_{p \max} \rho S V_1^3$$

On trouve alors :

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} \approx 0.59 \quad (2.16)$$

Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent :

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}}$$

En tenant compte de la limite de Betz,  $C_{p \max}$  vaut donc :

$$C_{p \max} = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho A V^3} = \frac{16}{27} \quad \text{Avec : } A = \pi R^2$$

On peut définir la notion de rendement aérodynamique de l'éolienne par le rapport :

$$\eta_{aer} = \frac{C_p}{C_{p \max}} = \frac{C_p}{0.59}$$

Qui est représentatif de la « qualité aérodynamique » de l'éolienne.

La puissance maximale du rotor sera égale à :

$$P_{max \text{ rotor}} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.17)$$

En tenant compte de tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50 % de la limite de Betz.

$$P_{reel,rotor} = \frac{1}{2} \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.18)$$

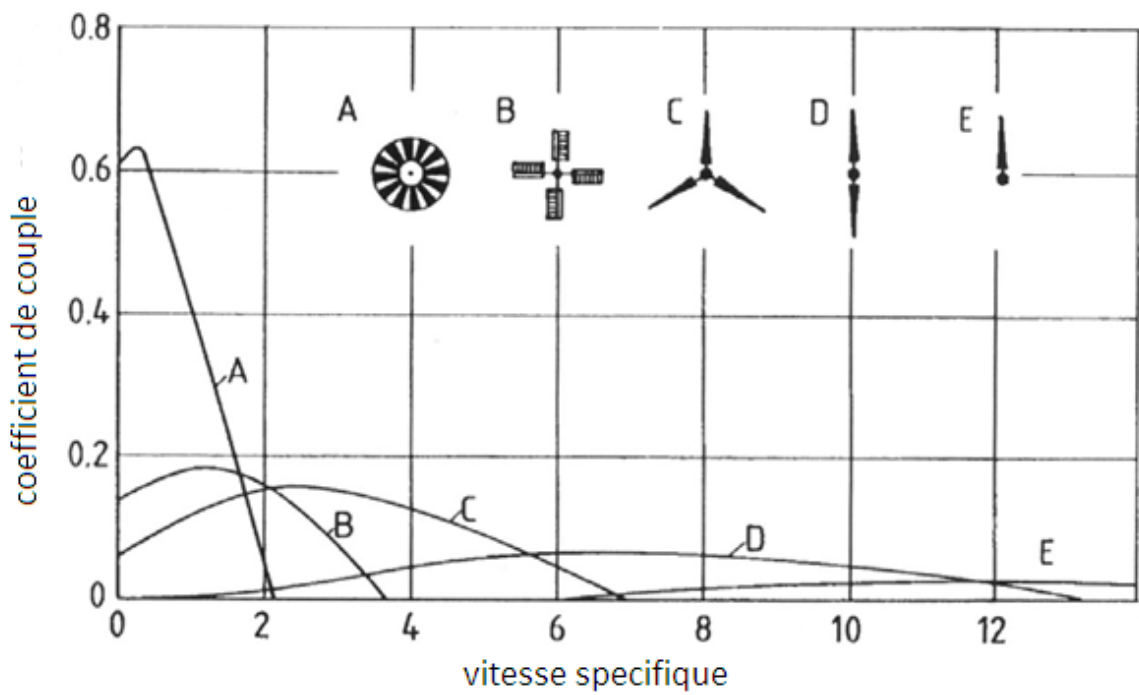
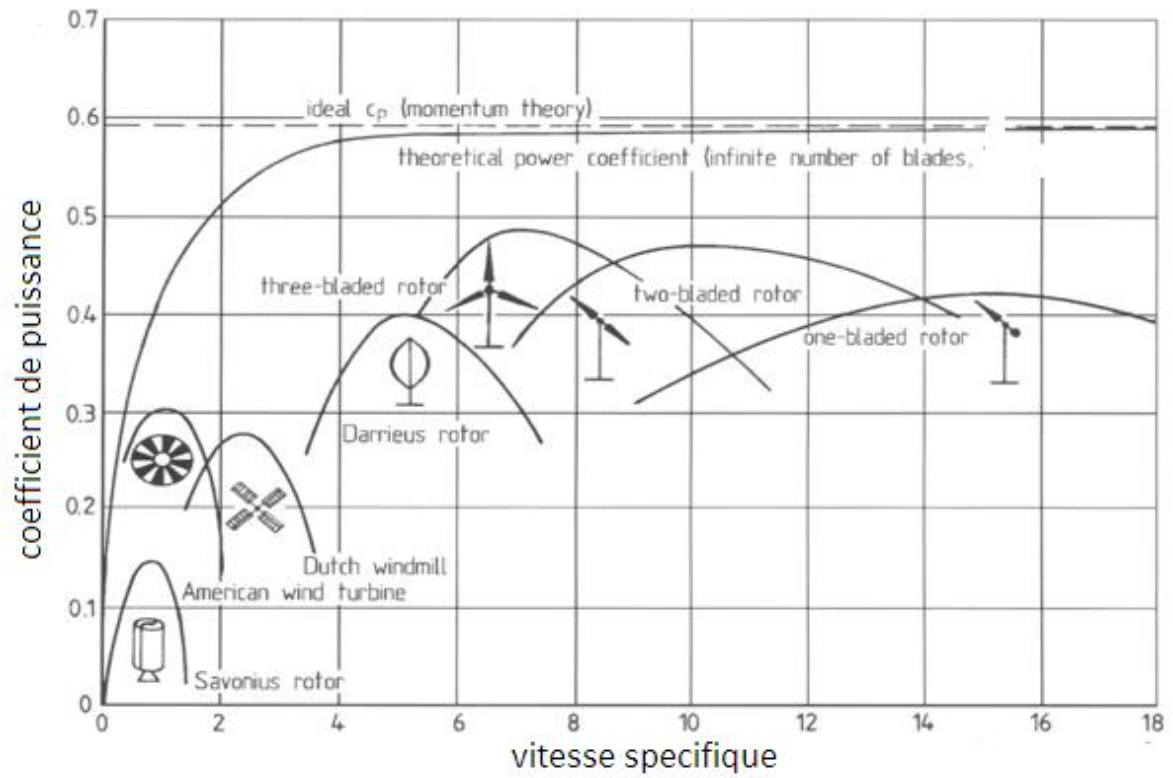
Pour conclure, dans bien des cas :

$$P_{reel,rotor} = 0.3 P_{vent} \quad (2.19)$$

Les courbes de  $C_p$  (Figure 2.4) montrent l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales ; notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Elles dépendent pratiquement du profil des pales. Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour  $\lambda \cong 7$ , c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale. Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$ .

Comparaison des différents types de turbines :

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$ . [33]



***Figure 2.4: Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour différents types de turbines [33]***

- D'après la (Figure 2.3), les courbes donnant le coefficient de couple dans les systèmes à axe vertical indiquent qu'il évolue de manière identique.



- Ces courbes  $C_p(\lambda)$  montrent clairement l'avantage des axes horizontaux en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...).

- Les courbes  $C_p(\lambda)$  sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (3, 2,1) par rapport aux axes verticaux ou aux multipales.

## **6. Caractérisation du Vent**

### **6.1. 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 déplacerait 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) [60]. Le choix 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.

Type du vent	Vitesse (m/s)	Puissance (kW/m <sup>2</sup> )
Vent léger, brise	3	0.016
Vent modéré	7	0.2
Vent fort	12	1
Tempête	18	3.5
Ouragan	>32	>20

**Tableau 2-1 : Classification des vitesses et des puissances de différents types de vents**

**[61]**

La loi de répartition de la vitesse suivant une verticale dépend, d'une part, du relief local et, d'autre part, de la rugosité de la région. Au sommet d'une colline arrondie, on a un accroissement local de vitesse dont l'effet peut inverser le gradient de vitesse habituel et faire que la vitesse au sol soit plus grande qu'à une certaine hauteur.

En terrain plat, on peut représenter la variation de vitesse  $v$  en fonction de la hauteur  $Z$  au-dessus du sol par la loi (empirique) de Davenport et Harris :

$$\frac{V}{V_0} = \left[ \frac{Z}{Z_0} \right]^\alpha \quad (2.20)$$

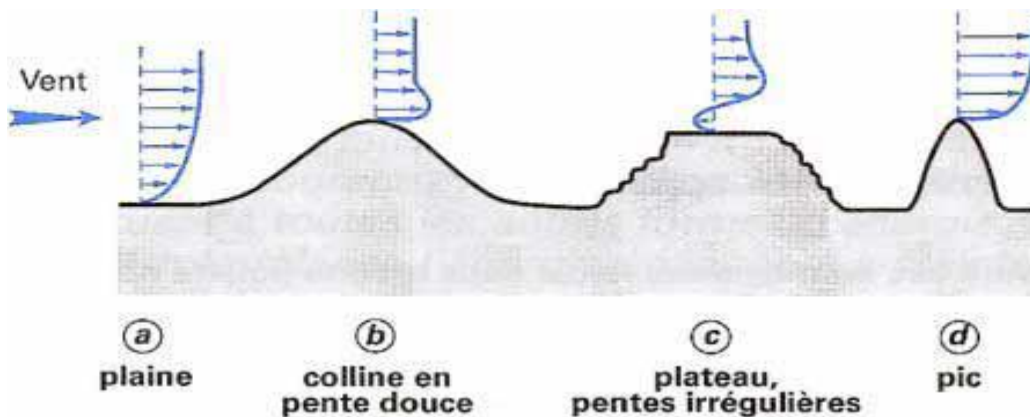
Avec  $v_0$  : vitesse à la hauteur

$Z_0$ : de référence au-dessus du sol

$\alpha$ : Coefficient caractéristique du lieu.

Le coefficient  $\alpha$  a sensiblement les valeurs suivantes :

Avec  $\alpha$  compris entre 0,1 et 0,4, la modélisation est valable s'il n'y a pas de changement de rugosité en amont ( $\alpha$  constant).



**Figure 2.5 : Répartition de vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude**

Cette figure traduit la répartition de la vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude.

Le coefficient  $\alpha$  a sensiblement les valeurs suivantes :

Lieu	Valeurs de $\alpha$
En mer	0.13
Sur un rivage	0.16
En plaine	0.2
En plaine boisée	0.24
En ville	0.3

**Tableau 2-2 : variation du coefficient  $\alpha$  en fonction de lieu**

## **6.2. Distribution du Vent Incident**

Chaque vent est défini par la vitesse de son écoulement. L'information contenue dans le spectre de vent est fonction de la distribution de la probabilité d'occurrence de chaque vent. Il nous est donc important, avant même de commencer l'étude, d'attribuer au vent incident une répartition.

## **6.3. Distributions de Weibull**

Le calcul stochastique est l'étude des phénomènes aléatoires dépendants du temps. À ce titre, il est une extension de la théorie des probabilités.

On rappelle que la fonction de répartition  $F(v)$  est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur  $v$  et que la densité de probabilité  $f(v)$  est la dérivée de :

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} \quad (2.21)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de répartition Weibull à deux paramètres  $c$  et  $k$  s'écrit :

$$f(v) = 1 - e\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.22)$$

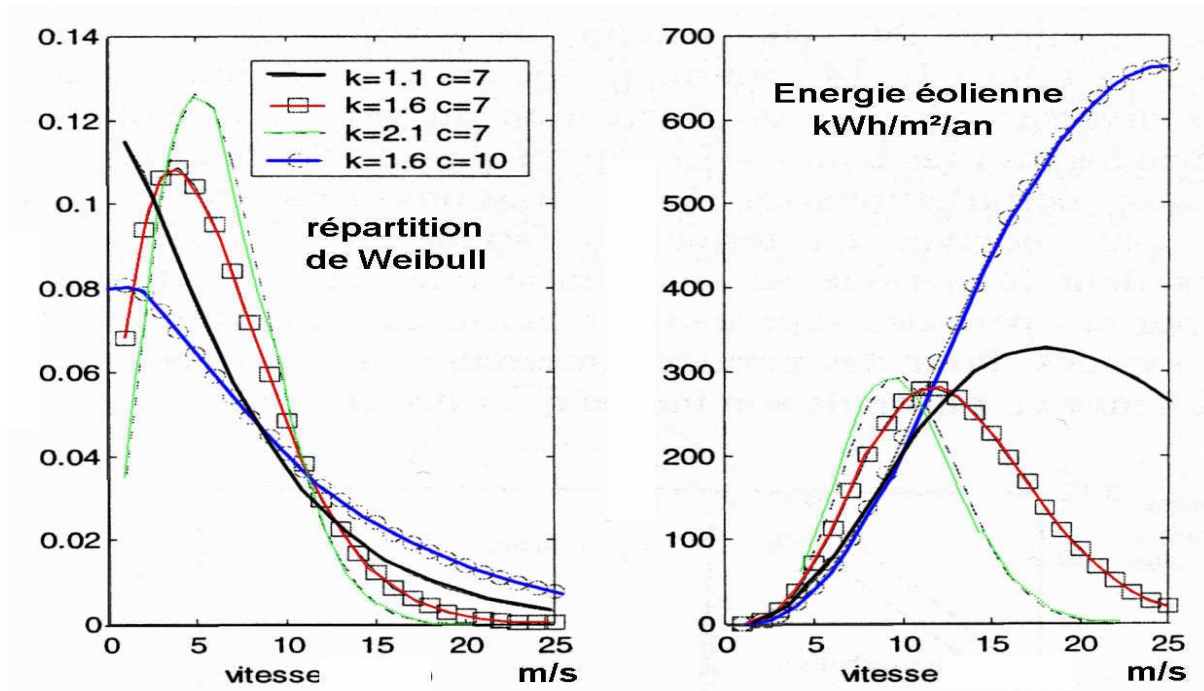
En utilisant la relation donnée par l'équation (1-18), il résulte la fonction de la densité de probabilité

$$f(v) = \left(\frac{k}{v}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^k e\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.23)$$

Avec :

- k paramètre de forme caractérise la répartition du vent.
- c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses).
- V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

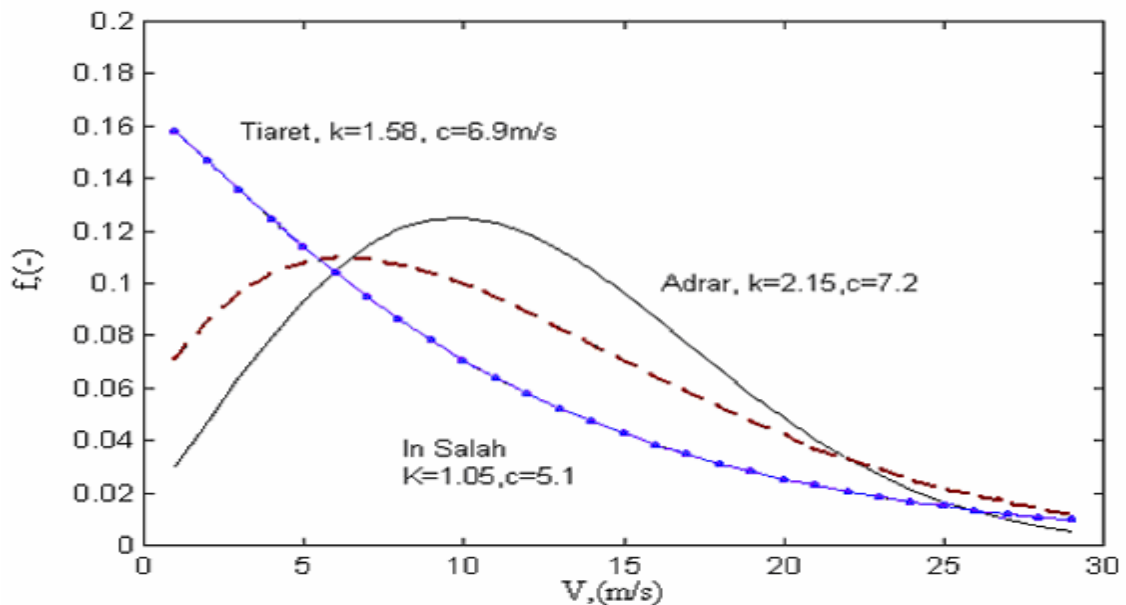
L'expression *loi de Weibull* recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est, en particulier, le cas de la loi exponentielle (k = 1) et de la loi de Rayleigh (k = 2) importantes en matière de processus stochastique.



**Figure 2.5 : Exemple de densité de probabilité selon Weibull [62]**

Cette figure est obtenue grâce à l'expression (2.23) qui présente la fonction de distribution statistique de Weibull. Les paramètres  $k$  et  $c$  sont respectivement facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en m/s. Habituellement, le facteur de forme qui caractérise la symétrie de la distribution est dans l'éolien égal à  $k=2$ . Le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent  $V_v$ .

**6.3.1. L'étude statistique des données vent pour les sites de Tiaret, Adrar, et In-Salah donne le graphe suivant :**



**Figure 2.7: Eude statistique des données vent pour les sites de Tiaret, Adrar et In Salah [63]**

**6.4. Distribution de Rayleigh**

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme  $k$  est égal à 2.

Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(v) = 2 \frac{v}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \tag{2.24}$$

## 6.5. Influence de la hauteur

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans). En effectuant la caractérisation 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. L'expression (2.25) donne la méthode de ce calcul et le Tableau (2.3) les valeurs de rugosité  $\alpha$  en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche. On précise que  $h$  est la hauteur du mat et  $h_{mes}$  la hauteur des appareils de mesure.

$$V_v(h) = V_v(h_{mes}) \frac{\ln\left(\frac{h}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{h_{mes}}{\alpha}\right)} \quad (2.25)$$

<i>Nature du sol</i>	<i>Paramètre de rugosité</i>
<i>Surface d'un plan d'eau</i>	0.0002
<i>Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu, ...)</i>	0.0024
<i>Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.</i>	0.03
<i>Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.</i>	0.055
<i>Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.</i>	0.1
<i>Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.</i>	0.2

<i>Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.</i>	0.4
<i>Grandes villes avec bâtiments hauts</i>	0.8
<i>Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.</i>	1.6

**Tableau 2-3 : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [3]**

Le tableau (2.4) donne un exemple de l'évolution du vent en fonction de la hauteur dans une région ventée par un « vent orographique » (vent existant au niveau d'une région indépendamment des effets de rugosité)

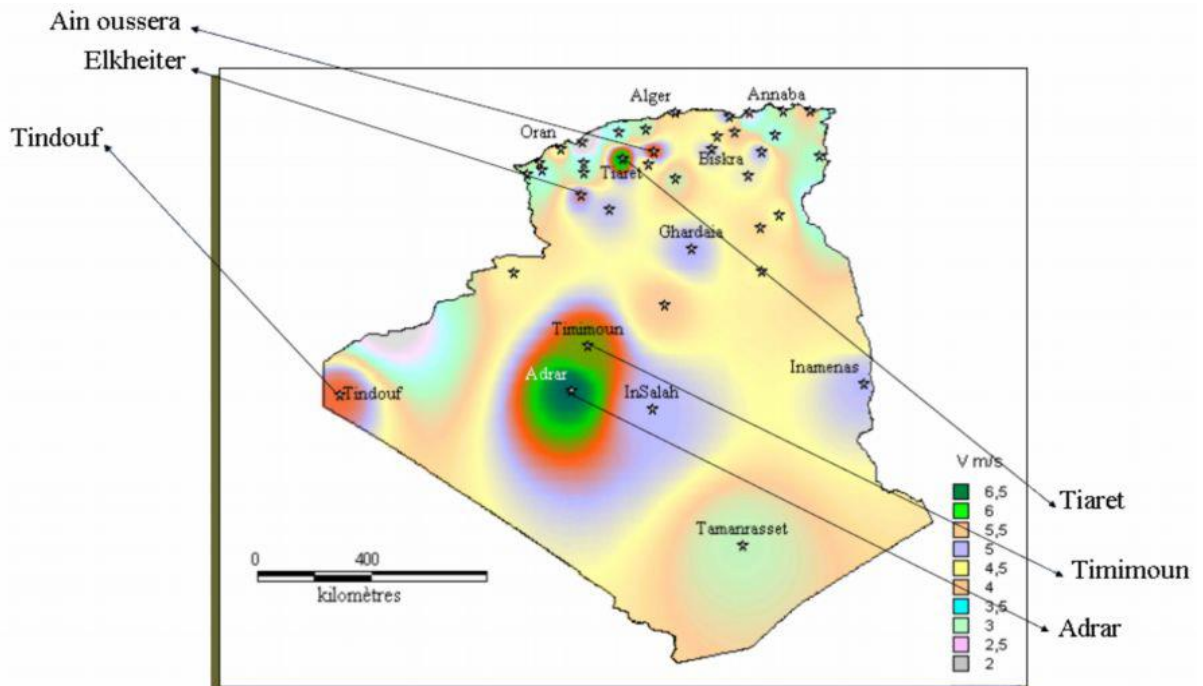
Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m (vent orographique)	6,8 m/s
80 m	6,5 m/s
70 m	6,3 m/s
60 m	6,0 m/s
50 m	5,7 m/s
40 m	5,3 m/s
30 m	4,9 m/s
20 m	4,3 m/s
10 m	3,5 m/s

**Tableau 2-4 : les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur [64]**

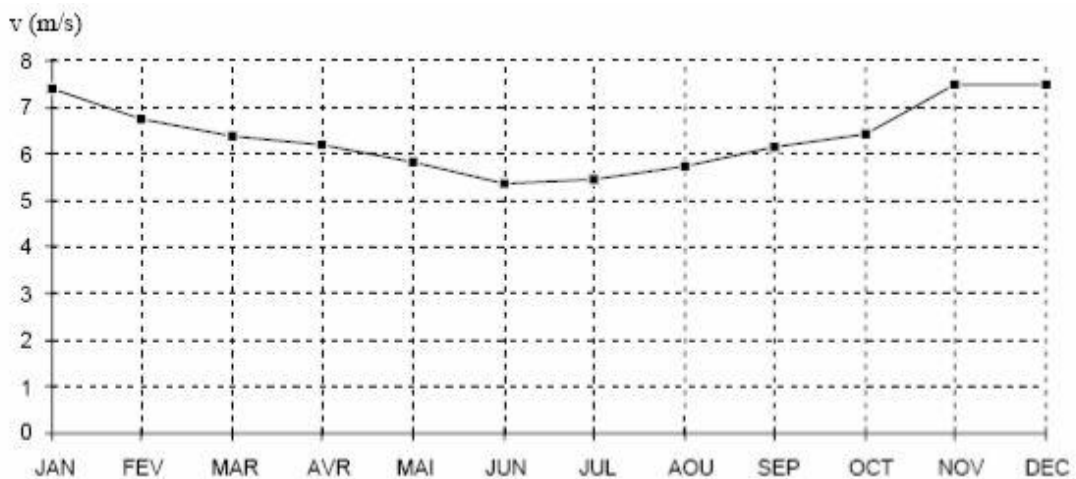
## **7. Répartition régionale de la vitesse du vent**

Pour implanter 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 2.8) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'« Energie Eolienne » du *CDER*.



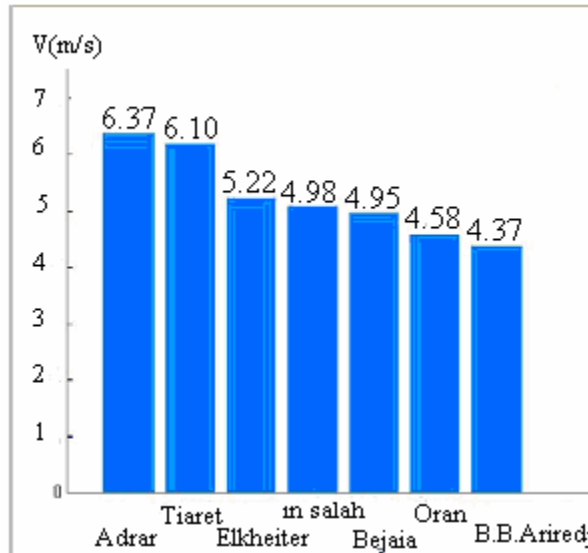
***Figure 2.8: les régions ventées en Algérie à 60 m [63]***



***Figure 2.9: Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an CDER [59]***

D'après les données du CDER, la (Figure 2.10) indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie. [26]

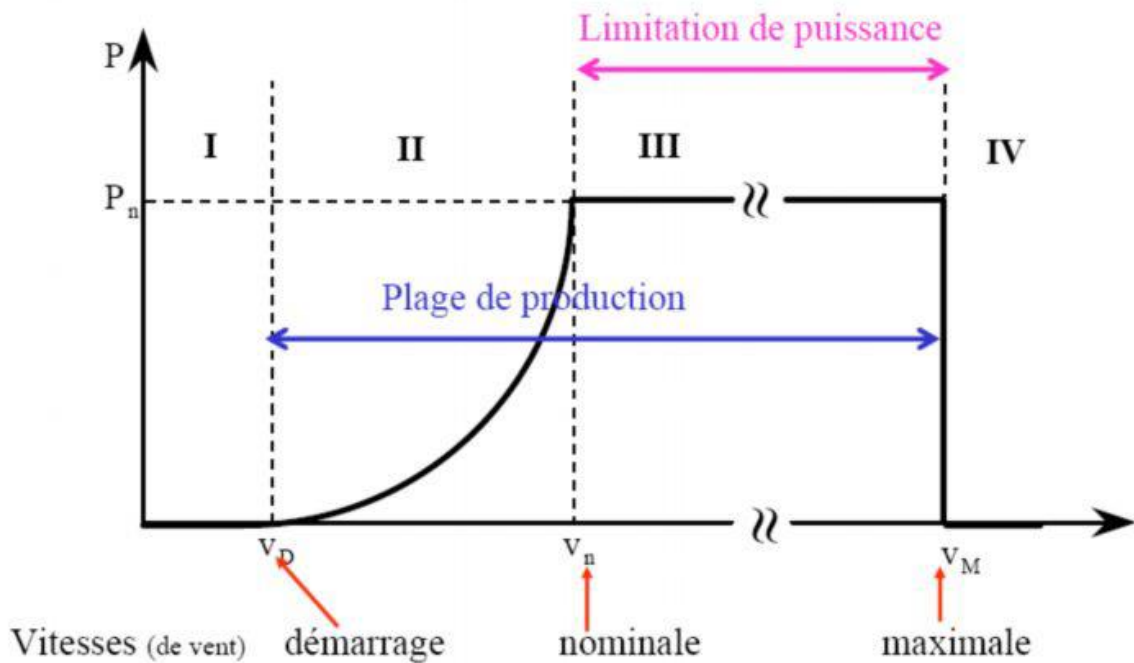




**Figure 2.10: Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés[29]**

## 8. Production Optimale d'énergie

Présentation du graphe de puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [59]



**Figure 2.11: Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent[59]**

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente, il faut adapter en régularité la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales. Sur la caractéristique d'exploitation d'une éolienne de la (Figure 2.11). Il existe quatre zones principales qui sont :

➤ **la zone 1 :**

Où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage  $V_D$  de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas.

➤ **la zone 2 :**

Dans laquelle la vitesse du vent est comprise dans le domaine  $[V_D, V_N]$  correspond à la conversion d'énergie éolienne. La zone où il est possible d'optimiser.

➤ **la zone 3 :**

Où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale  $P_n$ . En effet, au-delà de la « vitesse nominale »  $V_N$  du vent, le surcoût de dimensionnement (puissance du générateur, résistance mécanique des structures) ne serait pas amorti par le gain de production.

➤ **la zone 4 :**

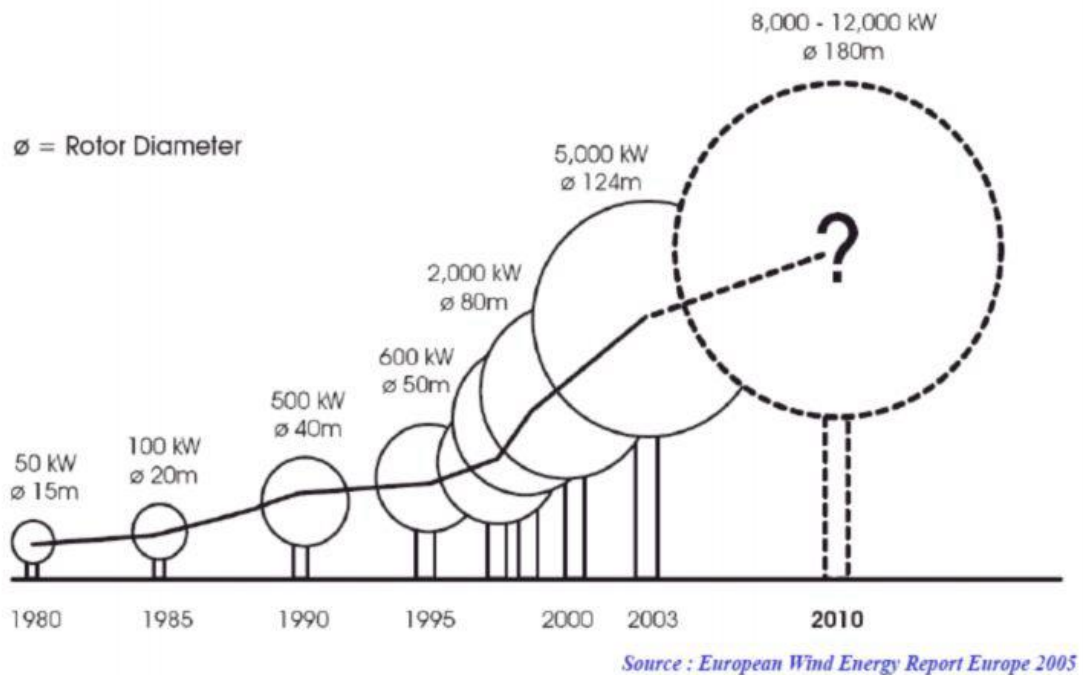
Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne  $V_M$ . Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence [65].

Il y a trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

### **8.1. La surface balayée par le rotor**

Dépend directement de l'éolienne et de sa taille. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de  $2^2 = 2 \times 2 =$  quatre fois plus d'énergie. La (2.12) donne une idée sur la

variation de la puissance unitaire en fonction du diamètre du rotor balayé ainsi que d'une prévision en 2010. [59]



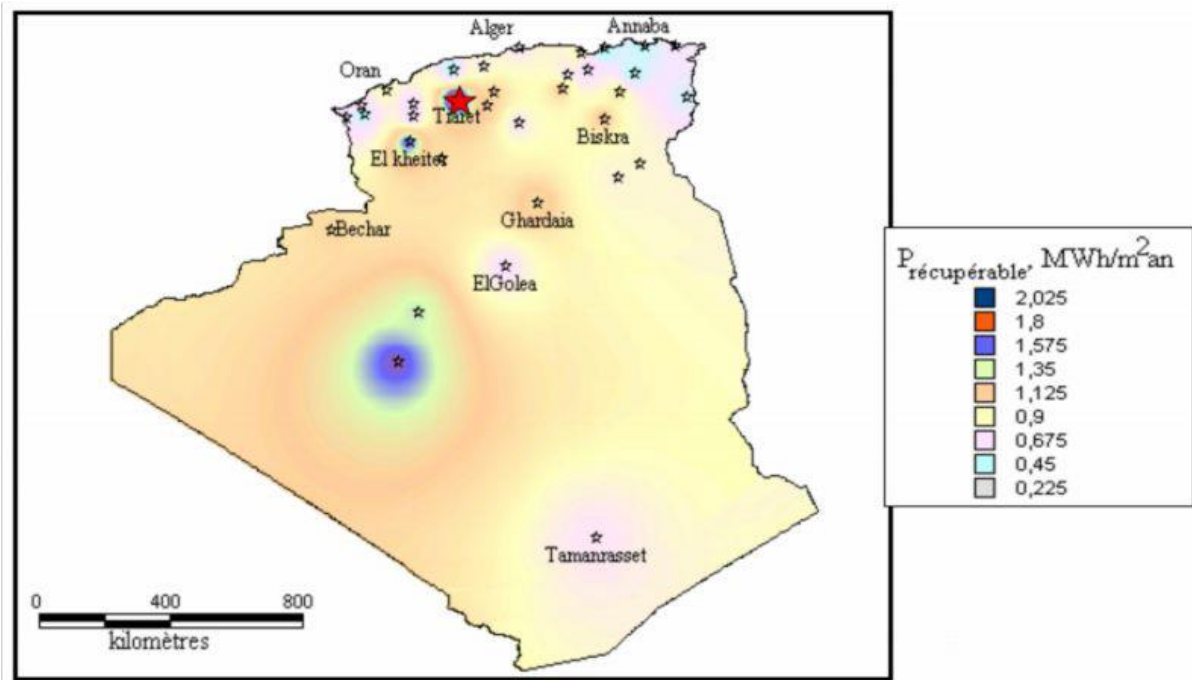
**Figure 2.12 : Puissances selon les tailles des éoliennes[59]**

## **8.2. La densité de l'air et la vitesse du vent**

La capacité de production d'une éolienne se caractérise par sa courbe de puissance. Celle-ci fournit sa capacité de production (puissance en Watt) en fonction de sa vitesse de vent moyenne au niveau du moyeu (*Figure 2.13*). Cette courbe de puissance dépend de la température moyenne annuelle du site, de l'altitude du site : la condition *standard* dans lesquelles elle est fournie avec une température moyenne de 15°C et une altitude de 0 m au-dessus de la mer. Dès lors l'énergie produite est l'intégration sur le temps de la courbe de puissance de l'éolienne. Cela s'exprime en fonction de la courbe de puissance  $P$  d'une éolienne et de la distribution  $V$  de vitesse par :

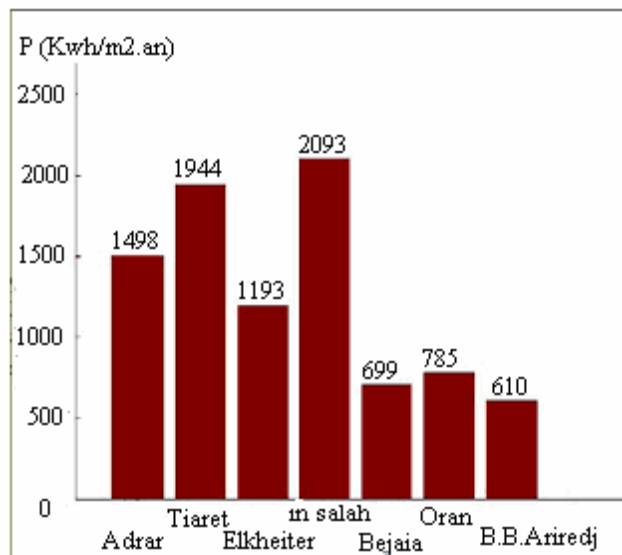
$$E = \int P(V(t)) dt \quad \text{En KWh/an} \quad (2.26)$$

L'atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m en Algérie est donné dans la figure ci-dessous Figure (2.13).



**Figure 2.13: Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie [63]**

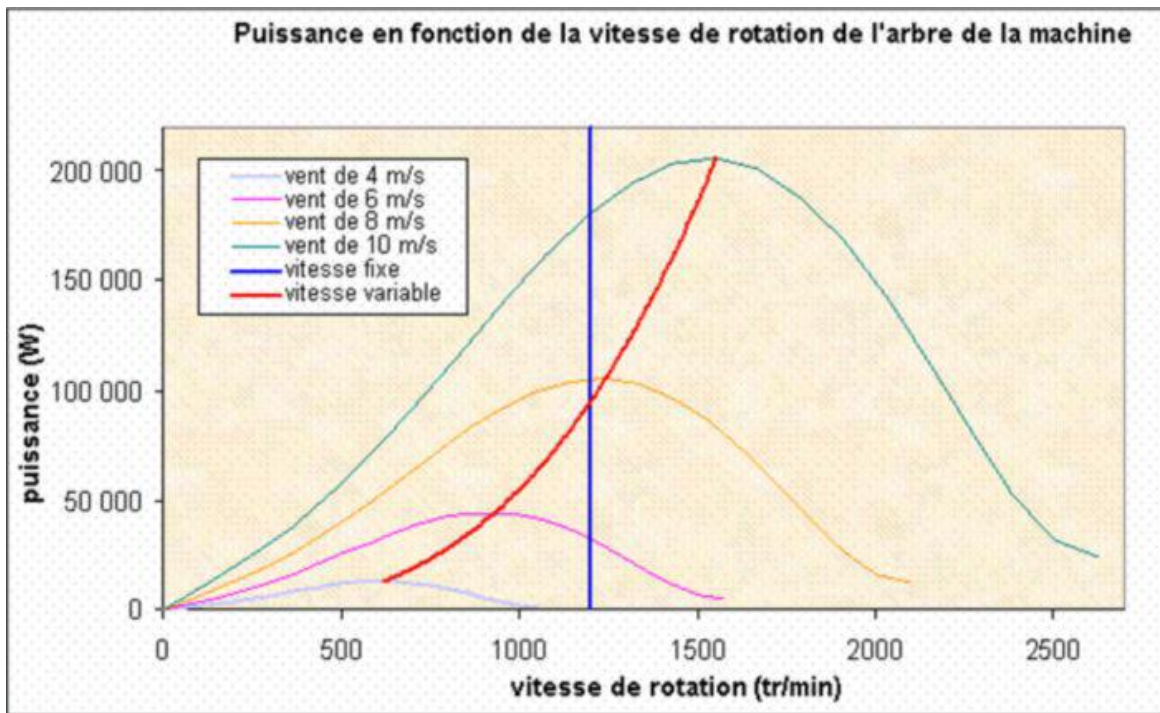
Une comparaison entre les sites ventés en Algérie est donnée dans la (Figure 1.14)



**Figure 2.14: Comparaison entre les vitesses cubiques des Sites Ventés [63]**

### 8.3. Intérêt de la Vitesse Variable

En vitesse variable, on règle le système éolien de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le « *Maximum Power Point Tracking* » (MPPT). La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne  $P(\Omega)$ . Alors on peut réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance. La (Figure2.15) montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage de vitesse dans une plage de 1 à 2 est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. [12]



**Figure2.15: Caractéristique de l'éolienne [12]**

En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent. Un système à deux vitesses de

rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons développé des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

# **CHAPITR 03**

## **Modélisation de la turbine** **Eoliens**

### **1. Introduction**

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de fait tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

Dans ce travail nous choisissons une grande éolienne avec une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

### **2. Le choix d'une grande éolienne**

Trois raisons sont distinguées pour le choix de l'éolienne.

- Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande, p, ...) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.
- Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

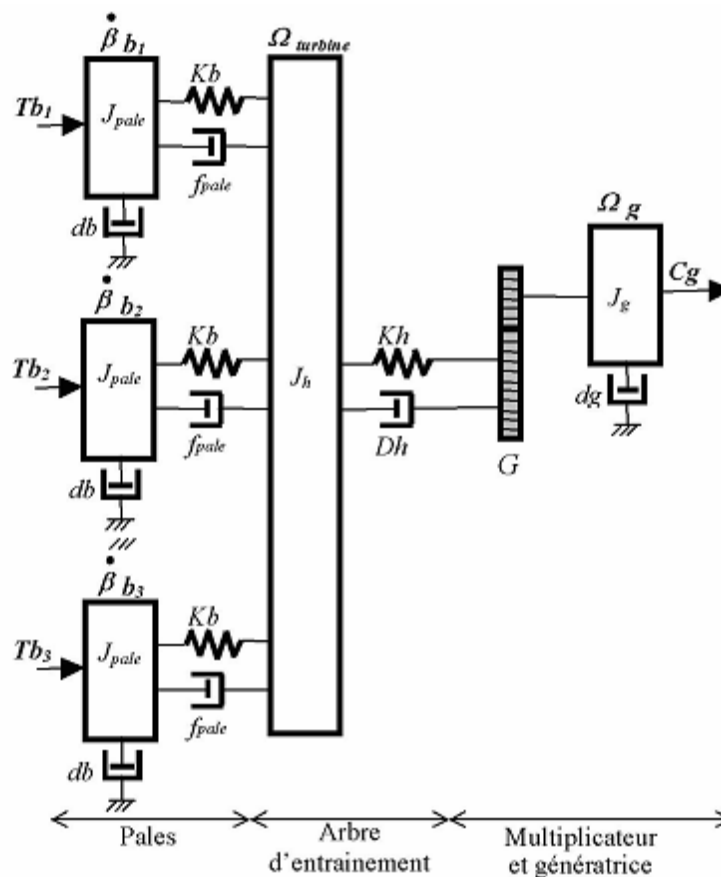
- Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

### 3. Modélisation de la turbine éolienne

Les résultats obtenu dans ce chapitre leurs calculs est démontré dans le chapitre quatre.

#### 3.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure (3-1)).



**Figure 3.1: Système mécanique de l'éolienne [70]**

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie  $J_{pale}$



- la même élasticité  $K_b$
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$

Ces pales sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées  $\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$ . Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse du vent, qui lui appliquée [80].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie  $J_h$
- son élasticité  $K_h$
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie
- un coefficient de frottement  $dg$

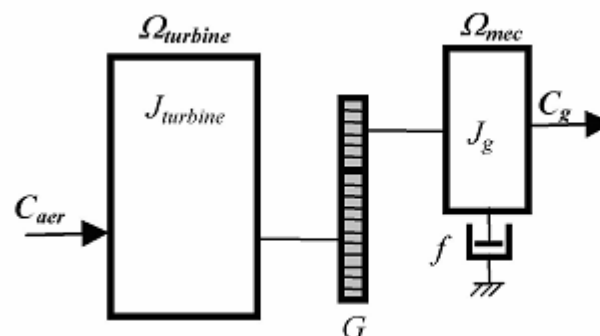
Ce rotor transmet un couple ( $C_g$ ) entraînant la génératrice électrique qui tourne à une vitesse  $\Omega_{mec}$ .

Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, on aura une égalité des forces de poussées ( $Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$ ).

On peut simplifier l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales et leurs coefficients de frottement par rapport à l'air ( $db$ ) est très faible, donc on peut l'ignorer.

De même, la vitesse de la turbine est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure (3-2)) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [66].



**Figure 3.2 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine [66]**

### 3.1.1. Formulation de la turbine

La puissance du vent et appelée aussi la puissance éolienne est définie par l'expression suivante [67] :

$$P(v) = \frac{\rho S v^3}{2} \quad (3.1)$$

Avec :

- $\rho$  : densité de l'air (approxime.  $1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ \text{C}$ )
- $S$  : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- $v$  : vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (3.2)$$

Le couple est déduit

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{\frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega_{turb}} \quad (3.3)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine [67], [68].

Nous représentons la caractéristique de la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation des pales  $\beta$  dans la figure (3.2b).

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turb}}{V_v} \quad (3.4)$$

Nous étudions une turbine éolienne avec un système d'orientation des pales "pitch".

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 (C_2 \lambda_i - C_3 \beta - C_4) e^{C_5 \lambda_i} + C_6 + \lambda \quad (3.5)$$

$$c1=0.5176$$

$$c2=116$$

$$c3=0.4$$

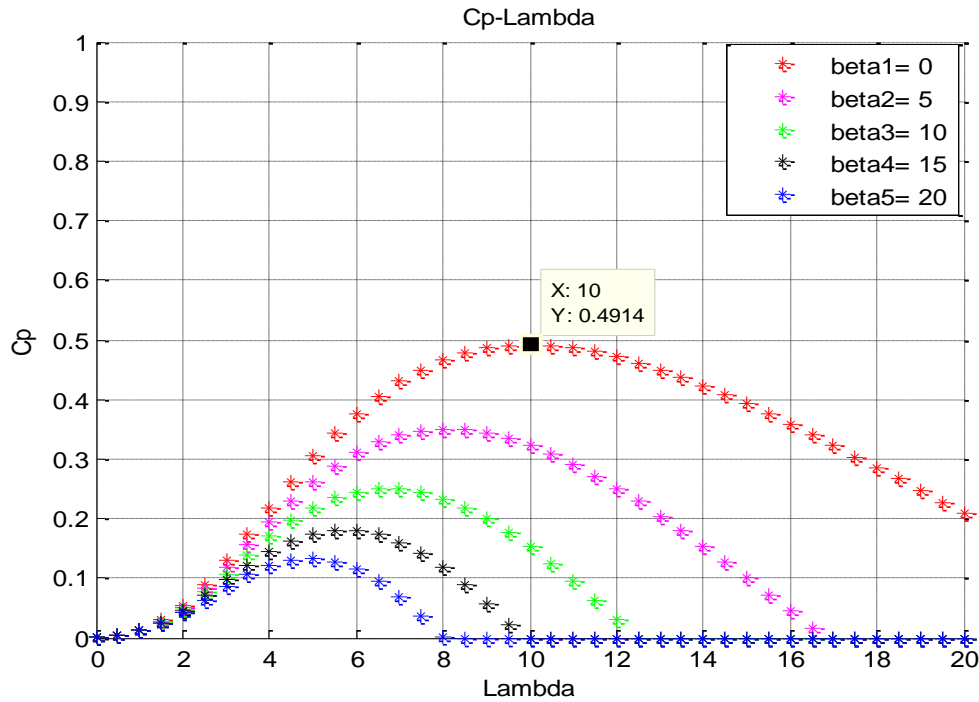
$$c4=5$$

$$c5=21$$

$$c6=0.0068$$

$$\lambda_t = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

L'expression précédente donne une valeur approchée de manière empirique pour une éolienne horizontale tripale haute puissance (par exemple pour P=1MW) utilisant une génératrice de type MADA.



**Figure 3.3 : Coefficient de puissance  $C_p(\lambda)\lambda_{opt}$**

La figure (3.3) représente le coefficient de puissance  $C_p$ , calculé à partir de l'équation (3.5), en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta_i$ . On remarque que si, pour un angle constant  $\beta_i$ , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant et égal à  $\lambda_{optimal}$  à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale [69]. La figure (3.3) montre le  $\lambda_{optimal}$  correspondant à un angle d'inclinaison des pales  $\beta_i$ . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir  $\lambda = \lambda_{optimal}$ , il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation (3.4).

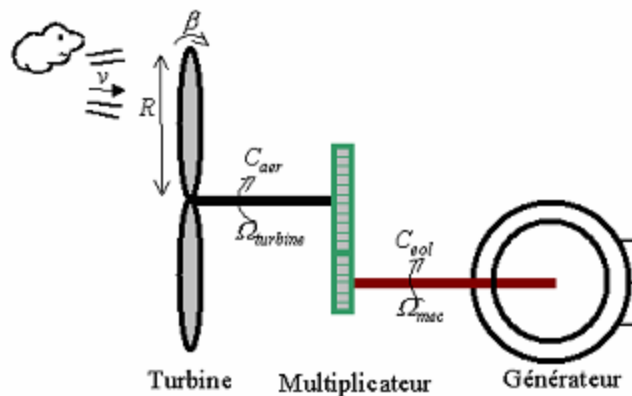
Est on a remarqué que pour l'angle de calage beta joue un rôle très important dans la variation de coefficient de puissance elle est inversement proportionnel avec le coefficient de puissance (beta augmente le Cp diminue)

$\beta$	$\lambda$ optimal	$C_p$ optimal
20	5	0.12
10	6.2	0.26
5	8	0.35
0	10	0.49

**Tableau 3-1 : la variation de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$**

### 3.2. Le multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice [70]. L'accouplement de la génératrice à la turbine est assuré par engrangement dont il est défini le multiplicateur Figure 3.4.



**Figure 3.4: Schéma de la turbine éolienne [70].**

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

Avec :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (3.6)$$

Utilisant les transformées de Laplace sur les expressions temporaire nous obtenons les déférentes expressions :

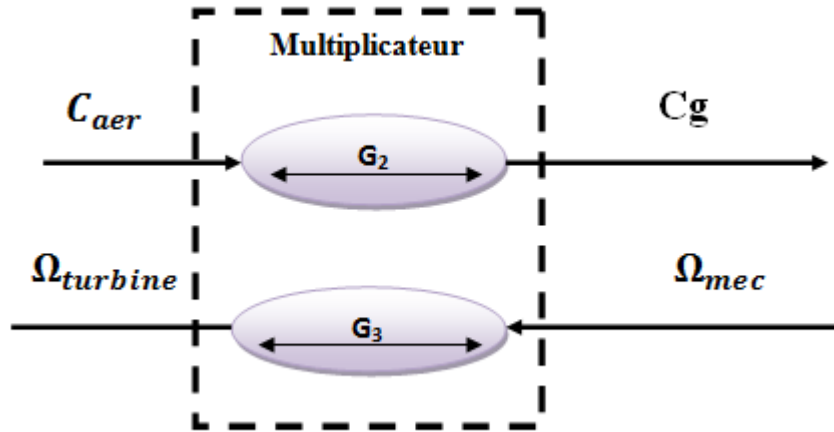
$$G_2(P) = \frac{C_g}{C_{aer}} = \frac{1}{G} \quad (3.7)$$

C'est une fonction de transfert d'un amplificateur noté  $G_2(p)$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (3.8)$$

$$G_3(p) = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{G} \quad (3.9)$$

**Remarque :** dans les schémas qui suivent les équations (3.6) (3.8) sont noté respectivement  $G_2, G_3$ .



### 3.3. Formulation cinématique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (3.10)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (3.11)$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3.12)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$ [71]:

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \quad (3.13)$$

Utilisant les transformées de Laplace sur les expressions temporeire nous obtenons les déférentes expressions :

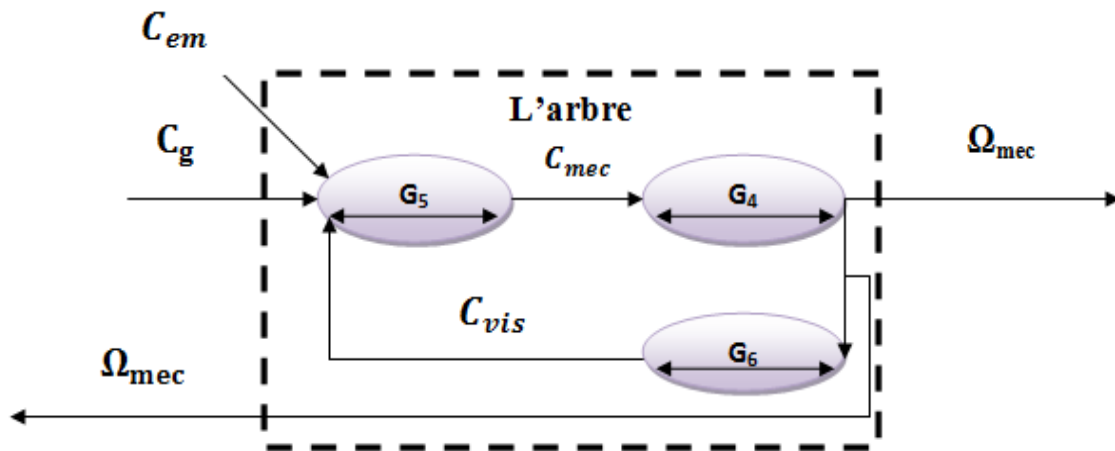
$$C_g(p) - C_{em}(p) = C_{mec}(p) + C_{vis}(p) \quad (3.14)$$

$$C_g(p) - C_{em}(p) = J p \Omega_{mec}(p) + f \Omega_{mec}(p) \quad (3.15)$$

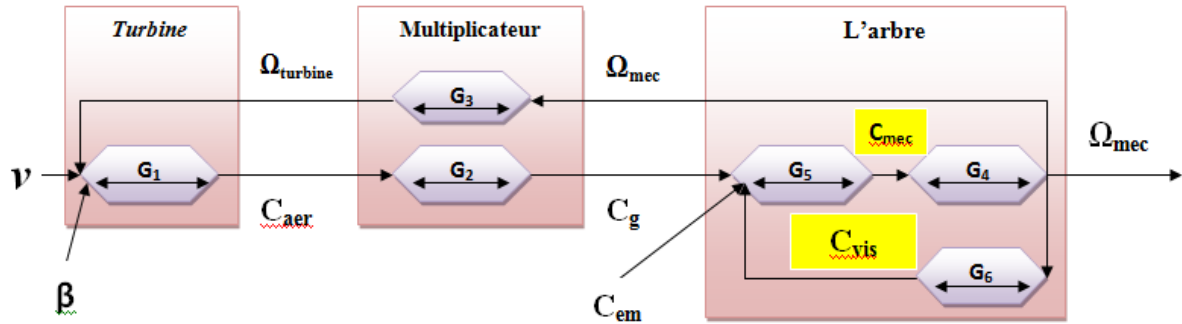
$$C_g(p) - C_{em}(p) = (J p + f) \Omega_{mec} \quad (3.16)$$

$$\frac{\Omega_{mec}}{C_g(p) - C_{em}(p)} = \frac{1}{J p + f} \quad (3.17)$$

**Remarque :** dans les schémas qui suivent les équations (3.4), (3.3), (3.11), (3.12) et (3.13) sont respectivement noté  $G_0$ ,  $G_1$ ,  $G_4$ ,  $G_5$  et  $G_6$ .

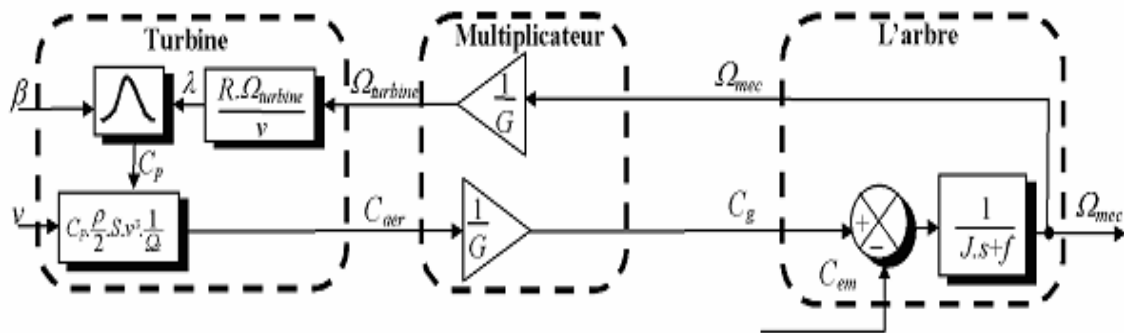


Donc le schéma du Graph Informationnel Causal du modèle de la turbine (G.I.C) devient comme suit :



**Figure 3.5 : Informationnel Causal du modèle de la turbine**

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basé sur ces équations, est donné par la figure suivante :



**Figure 3.6: Schéma bloc du modèle de la turbine**

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission, dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales. Le vent étant par nature imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne.

Partant de ce constat, la machine à courant continu est destinée à reproduire le comportement d'une éolienne à vitesse variable [70].

### **3.4. Génératrice asynchrone à double alimentation**

#### **3.4.1. Présentation de la Machine asynchrone à double alimentation**

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [72].

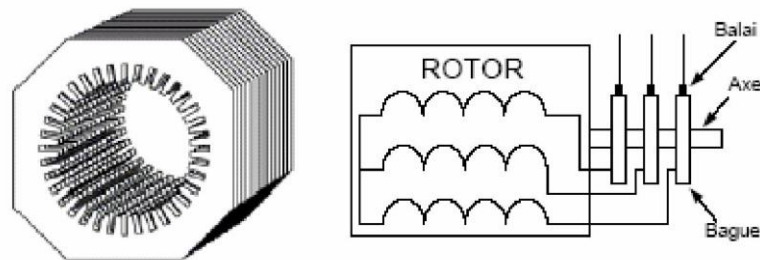
Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [3] [74].

### **3.4.2. Structure des machines asynchrones à double alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [73].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure3.7) [70].



**Figure 3.7 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [70]**

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

### **3.4.3. Hypothèses simplificatrices**

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [73]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :



- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

### **3.4.4. Les avantages et les inconvénients de la génératrice asynchrone à double alimentation**

#### **3.4.4.1. Avantages de la génératrice asynchrone à double alimentation**

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale.
- Fonctionnement à vitesse variable ( $\pm 30\%$  de la vitesse nominale).

#### **3.4.4.2. Inconvénients de la génératrice asynchrone à double alimentation**

- Maintenance du multiplicateur.
- Commande complexe.
- Oscillations mécaniques.

### **3.4.5. Expression du couple électromagnétique**

Une consultation est faite sur la modélisation des machines asynchrones à double alimentation afin d'exploiter les différentes équations formulées pour l'étude de la génératrice

#### **3.4.5.1. L'équation mécanique**

L'équation mécanique découle :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega_r \quad (3.18)$$

Et

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} \quad (3.19)$$

Alors l'expression générale du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = C_r + J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \frac{\omega_r}{p} \quad (3.20)$$

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

## **4. Techniques d'extraction du maximum de la puissance**

### **4.1. Bilan des puissances**

$$P_{elec} = P_{aer} - \text{Pertes} \quad (3.21)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale  $J$  et apparaissant sur l'arbre de la génératrice ( $P_{mec}$ ) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique ( $C_{mec}$ ) et la vitesse mécanique ( $\Omega_{mec}$ ) :

$$P_{mec} = C_{mec} \Omega_{mec} \quad (3.22)$$



**Figure 3.8 : Diagramme de conversion de puissance**

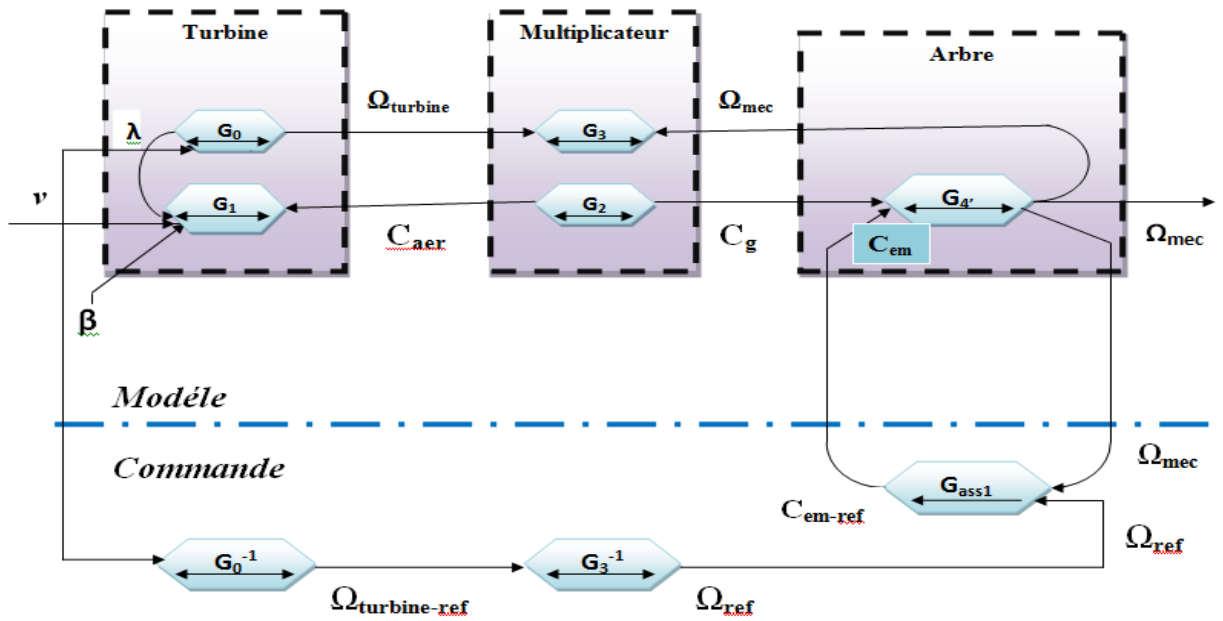
Dans cette partie, Nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie "Maximum Power Point Tracking" (M.P.P.T), On distingue deux familles de structures de commandes qui sont maintenant expliquées [75] :

### **4.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :**

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développée est à tout instant égale à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (3.23)$$

La vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$



**Figure 3.9 : GIC du modèle de la turbine et de son dispositif de contrôle de la vitesse en boucle fermé**

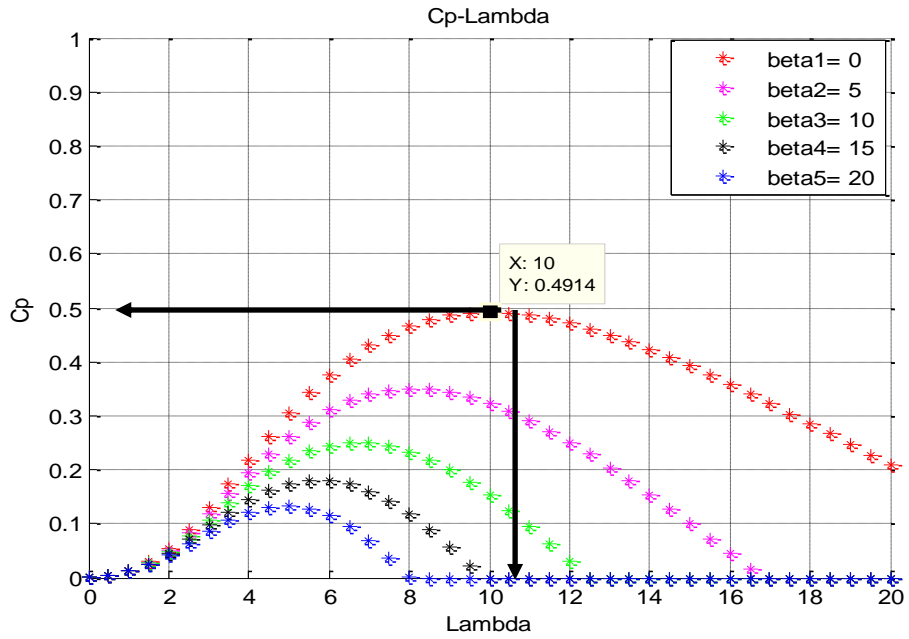
Le couple électromagnétique de référence  $C_{em-ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est obtenue par une relation inverse indirecte

$$C_{em\_ref} = C_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (3.24)$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ( $\Omega_{turbine-ref}$ ) pour maximiser la puissance extraite, En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc

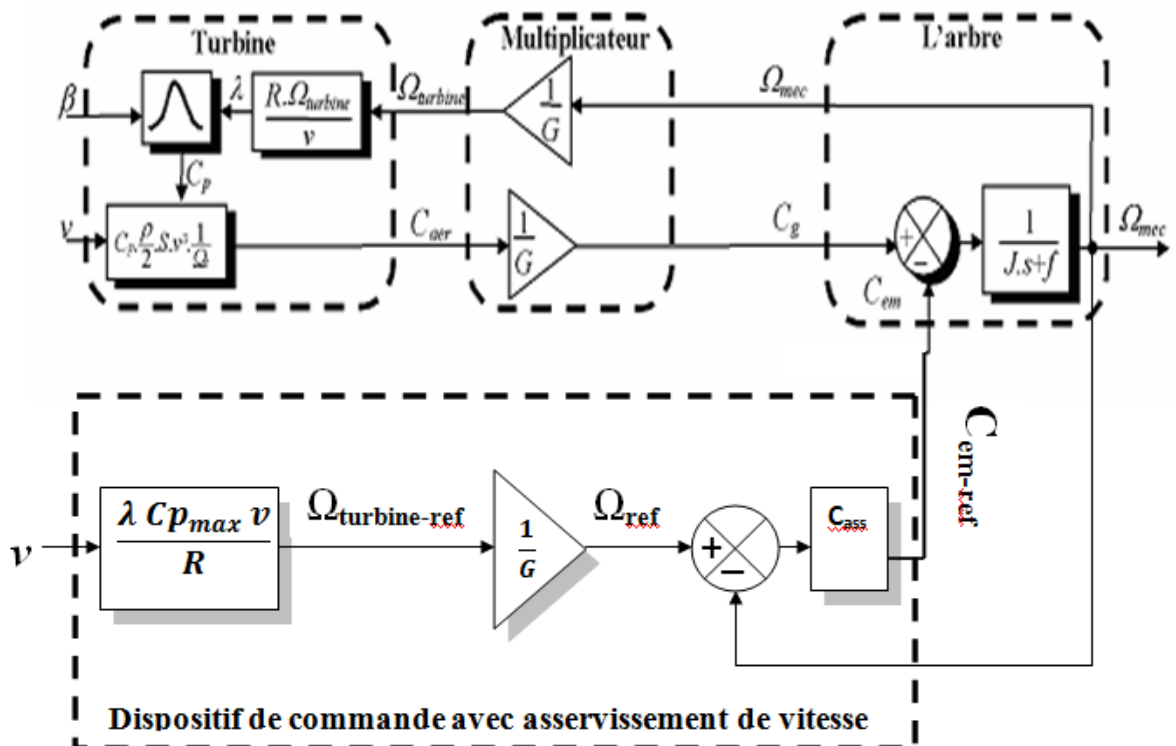
$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine\_ref} \quad (3.25)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond a celle correspondant a la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{cpmax}$  (a  $\beta$  constant et égale a  $0^\circ$ ) permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$ .



**Figure 3.10 : Fonctionnement optimal de la turbine**

$$\Omega_{turbine\_ref} = \frac{\lambda_{cp\ max} \cdot v}{R} \quad (3.26)$$



**Figure 3.11: Schéma bloc de la Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse**

### 4.3. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :

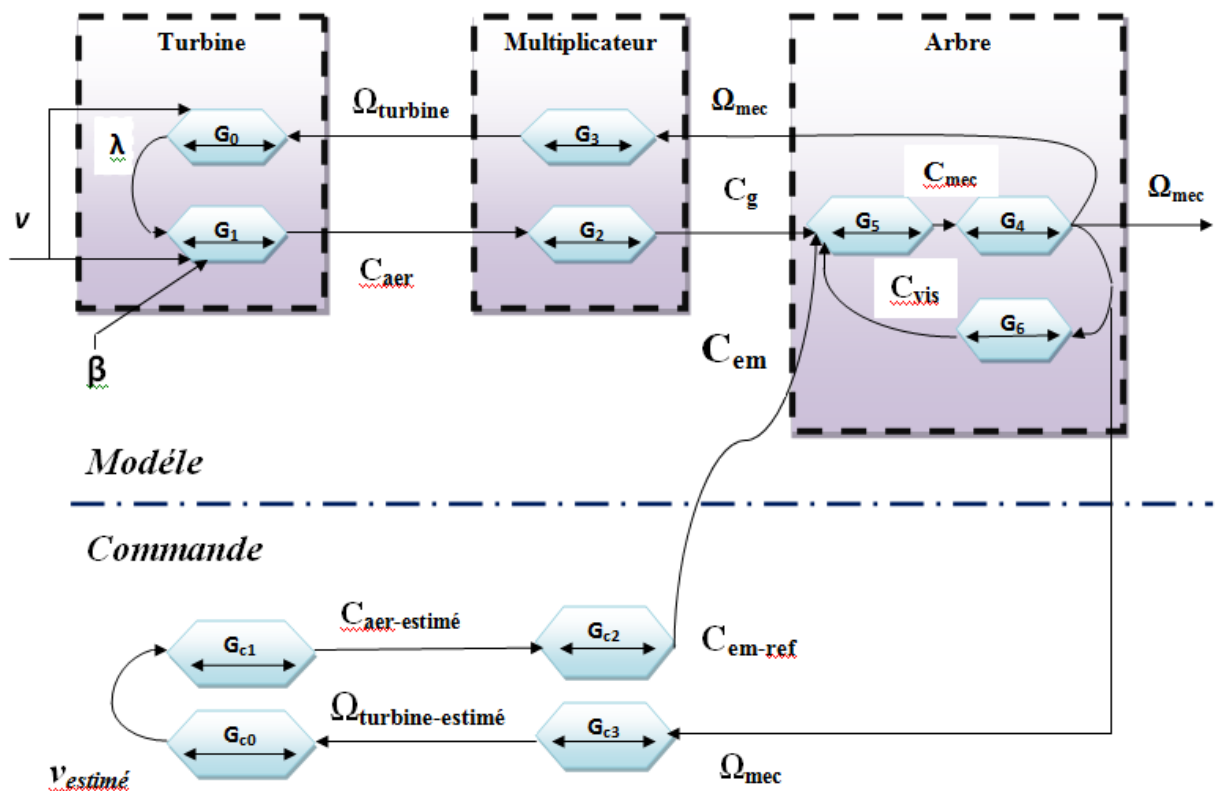
Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [75].

Cette second structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3.27)$$

Ce si revient à considérer le couple mécanique  $C_{mec}$  développé comme étant nul. Donc, on négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_{vis} \approx 0$ ) on obtient

$$C_{em} = C_g \quad (3.28)$$



**Figure 3.12 : Maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse**

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolienne

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (3.29)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (R<sub>1</sub>)

$$C_{aer-estimé} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} v_{estimé}^3 \quad (3.30)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine-estimé}$  est calculer à partir de la mesure de la vitesse mécanique

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (3.31)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (R<sub>c0</sub>)

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} R}{\lambda} \quad (3.32)$$

**Remarque :** dans les schémas qui suivent les équations (3.29), (3.30), (3.31) et (3.32) sont respectivement noté  $G_{c0}$ ,  $G_{c1}$ ,  $G_{c2}$  et  $G_{c3}$ .

En regroupant ces quatre équations  $G_{c0}$ ,  $G_{c1}$ ,  $G_{c2}$  et  $G_{c3}$ , on obtient une relation globale de contrôle

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (3.33)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{Cpmax}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3 C_{pmax}} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (3.34)$$

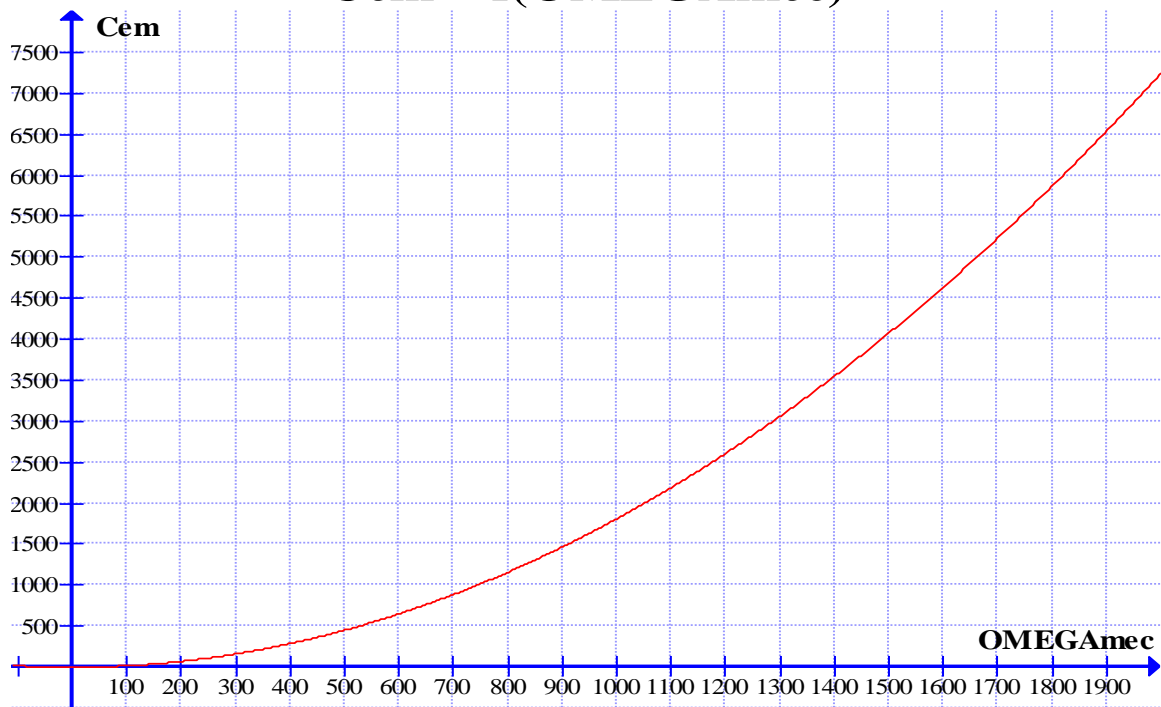
L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice

$$C_{em-ref} = A \Omega_{mec}^2 \quad (3.35)$$

Avec

$$A = \frac{C_p}{\lambda^3 C_{pmax}} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{1}{G^3} \quad (3.36)$$

$$C_{em} = f(\Omega_{mec})$$

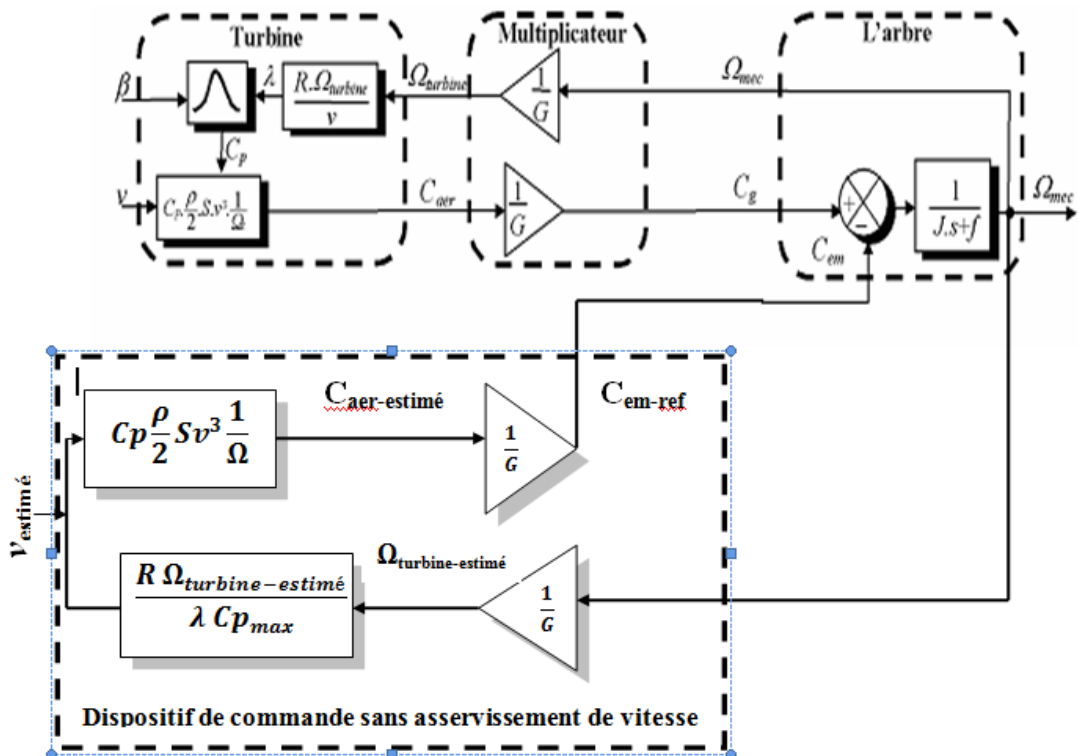


**Figure 3.13 : le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation mécanique**

### **Interprétation**

On constate que la variation de couple électromagnétique est proportionnelle carré part rapport à la vitesse mécanique.

La représentation sous forme de schéma-bloc est montrée à la figure (3.11)



**Figure 3.14 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse**

## 5. Modélisation du système d'orientation des pales

### 5.1. Généralités

La plupart des grandes turbines éoliennes utilise deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale :

- Un système d'orientation des pales qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante.
- Un système à décrochage aérodynamique qui consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au-delà d'une certaine vitesse du vent.

Les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances utilisent généralement le système à décrochage dynamique [21], plus économique. Les éoliennes à vitesse variable, de puissance nettement supérieur, utilisent un système d'orientation des pales. Les constructeurs justifient ces choix par des considérations technico-économiques [76].

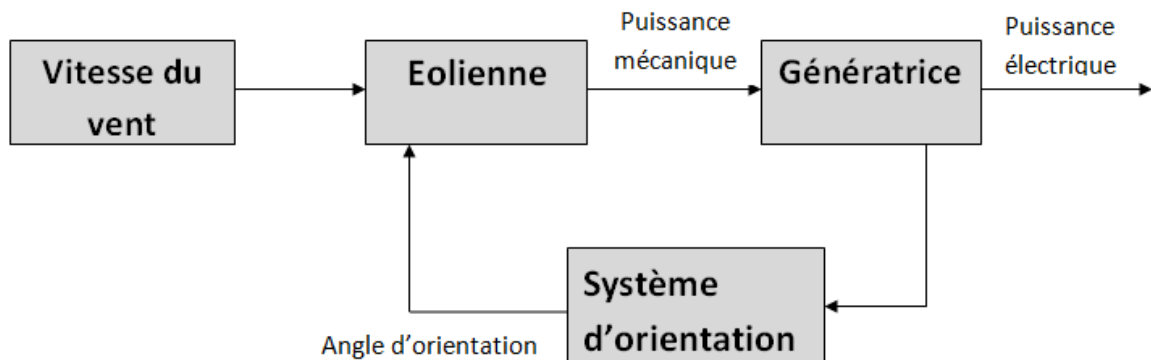
Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé " pitch contrôle ".



Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants :

- ☞ Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sur en dessous de la limite de sécurité).
- ☞ Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses du vent.
- ☞ Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de feins puissants.
- ☞ Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grand vitesses.

L'entrée de command du système d'orientation des pales est puissance électrique mesurée (figure 3.15) [76].



***Figure 3.15: Application du système d'orientation des pales***

## **5.2. Système d'orientation**

Il existe divers types de système de régulation de l'angle de calage des pales. L'angle peut être variable tout le long de la pale, comme l'exemple ici étudié, ou simplement sur le bout des pales. L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système hydraulique ou des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externe. Le transfert de cette énergie jusqu'aux pales en rotation augmente considérablement les coûts de fabrication. Le système hydraulique est néanmoins le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance alors que le système électrique est uniquement utilisé pour les éoliennes de forte puissance. Normalement, il faudrait également tenir compte des efforts d'origine inertielle (gravité, force centrifuge, efforts gyroscopiques) et des efforts d'origine élastique (déformation des pales). Dans cette étude, ces effets ne sont pas pris en compte car ils ont peu d'influence sur les éoliennes à vitesse variables [76].

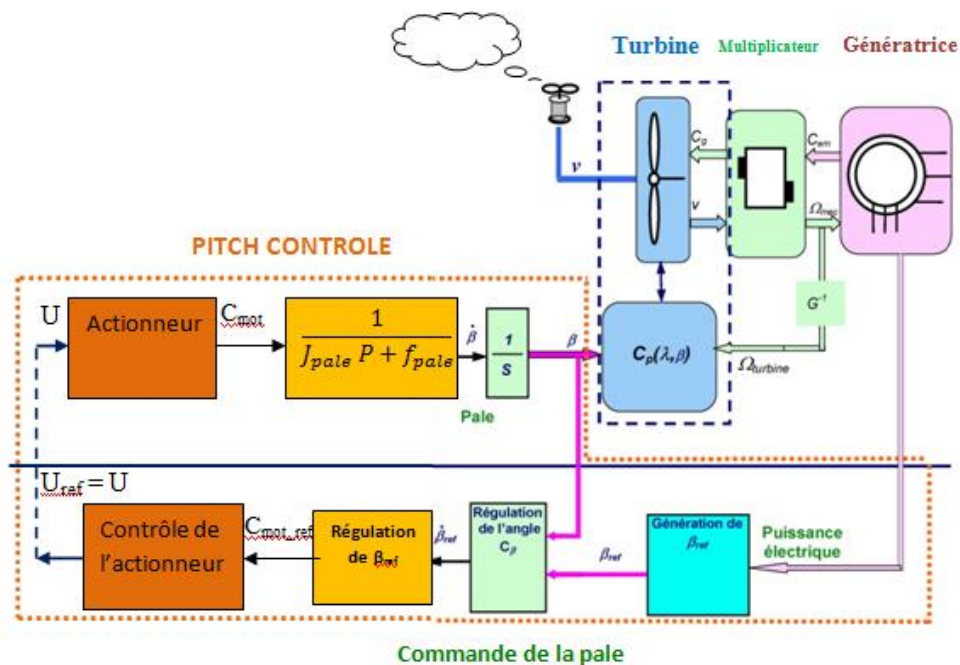
L'actionneur génère un couple électromoteur  $C_{mot}$  à partir de la tension  $U$  qui est appliquée (Fig.3.16). Le moment d'inertie de la pale et le coefficient de frottement sont notés respectivement  $J_{pale}$  et  $f_{pale}$ . Le dispositif de commande est composé par quatre fonctions :

le contrôle de l'actionneur, la régulation de la vitesse de l'angle, la régulation de l'angle, la génération de l'angle de référence permettant d'obtenir une puissance électrique constante.

### 5.3. Génération de l'angle de référence : $\beta_{ref}$

L'angle d'orientation des pales doit être réglé de manière à maintenir constante la puissance électrique générée. La forme des pales et, plus généralement, les caractéristiques de la turbine jouent un rôle primordial dans ce réglage de puissance.

Le modèle non-linéaire de la turbine rend complexe une conception analytique de ce réglage. De plus, de très grandes disparités peuvent apparaître d'une turbine à l'autre.



*Figure 3.16: Schéma bloc du système d'orientation des pales*

### 5.4. Système de régulation de l'angle d'orientation

#### 5.4.1. Principe

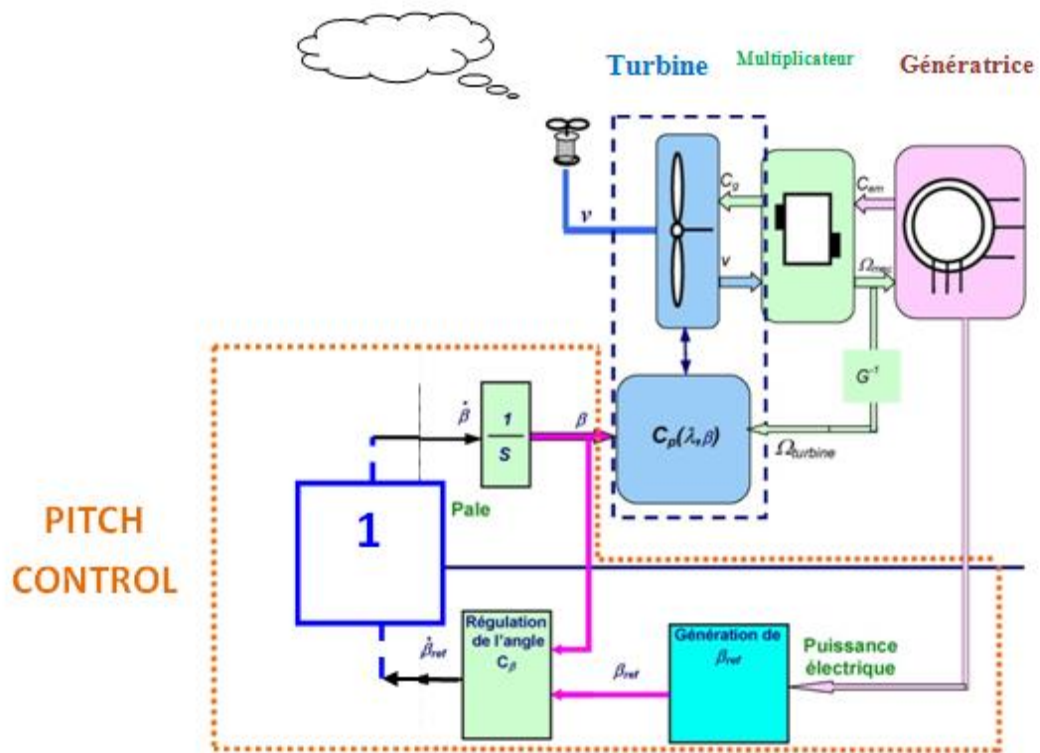
Le régulateur peut être théoriquement conçu soit pour le calage de toutes les pales, soit pour celui de chacune d'elles indépendamment. Cette régulation indépendante donne plus de degrés de liberté au système de commande. Mais, dans un but de simplicité, on supposera que l'angle de référence est appliqué sur les trois actionneurs d'orientation.

Il existe deux technologies d'actionneurs électriques :

- Pour un actionneur pas à pas, l'angle de calage est obtenu à partir d'une variation pas à pas en fonction de la vitesse du vent.
- Pour un actionneur linéaire, la variation de l'angle de calage est réalisée, selon une fonction linéaire de la vitesse du vent.

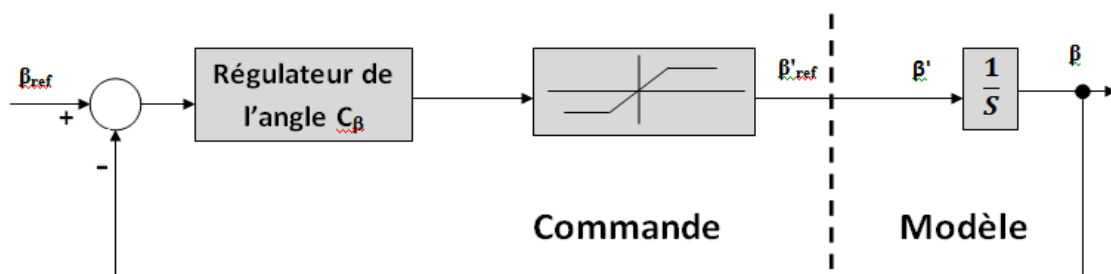
Généralement, le système d'orientation de l'angle d'orientation est approché par une fonction de transfert du premier ordre [76]. En effet, si l'on considère que la régulation de la vitesse de l'angle de calage et l'actionneur sont parfaitement réalisés (ou en un temps court par rapport à la dynamique de réglage de l'angle) on a :  $U = U_{reg}$ ,  $C = C_{ref}$ ,  $\dot{\beta} = \dot{\beta}_{ref}$ .

Dans ces conditions, la figure 3.16 peut être simplifiée par la figure 3.17



**Figure 3.17 : schéma bloc de l'orientation des pales en boucle fermée.**

On obtient donc le modèle simplifié sous forme de schéma-bloc de la figure 3.18.



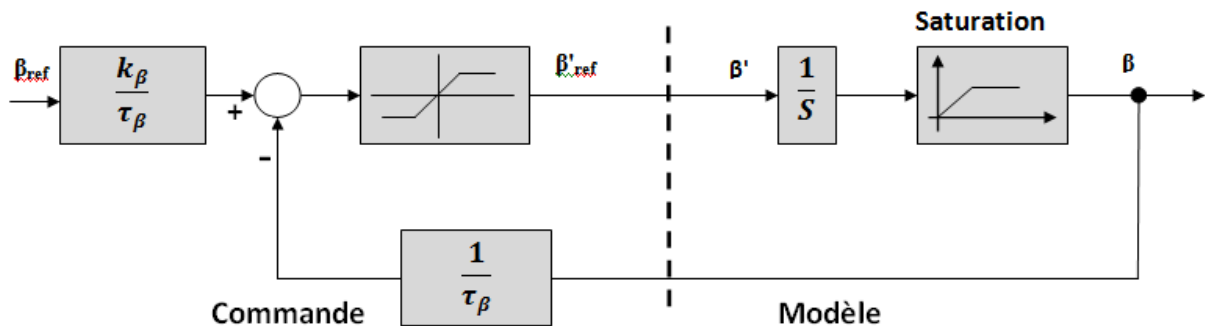
**Figure 3.18 : Modélisation du système de régulation de l'angle de calage en boucle fermée.**

Lors de la modélisation du système de commande de l'orientation des pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à environ 10°/s [76] lors d'un fonctionnement normal et à 20°/s pour des cas d'urgence [76]. La régulation de l'angle de calage est donc modélisée par un régulateur générant une référence de vitesse de variation de l'angle. Il existe plusieurs façons de concevoir le système de régulation de l'angle des pales en boucle fermée.

Nous présentons une technique de réglage d'angle de la pale rencontrée dans la littérature.

### 5.5. Régulation de l'angle à partir de gains

Cette technique de régulation n'utilise que deux gains et un comparateur et a donc l'avantage d'être facilement réalisable sous format analogique [76] (figure 3.19).



**Figure 3.19: Schéma bloc d'une boucle de régulation de l'angle de la pale.**

La réponse de ce système en boucle fermée correspond à un système du 1<sup>er</sup> ordre :

$$G(s) = \frac{\beta}{\beta_{ref}} = \frac{k_{\beta}}{1 + \tau_{\beta} \cdot s} \quad (3.37)$$

Le temps de réponse est fixé par le gain  $\tau_{\beta}$ , et le gain statique par le gain  $k_{\beta}$ .

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé la turbine éolienne, avec ses différents éléments et on a démontré le coefficient de puissance et on a déduit que pour extraire le maximum de puissance on est obligé d'utiliser des différents systèmes de régulation (vitesse, angle de calage).

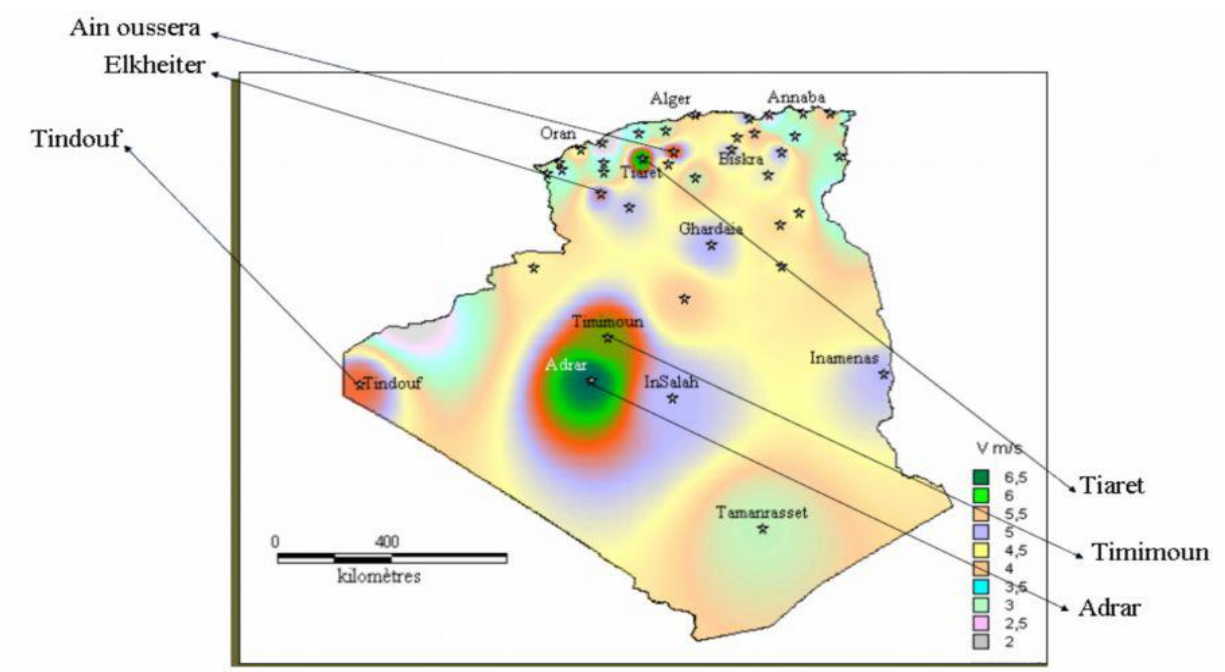
# **CHAPITR 04**

## **Etude de calcul et dimensionnement**

Dans cette partie nous avons élaboré un programme matlab afin de pouvoir tracer des courbes différentes pour les systèmes de fonctionnement.

### **1. Exemples de Dimensionnements**

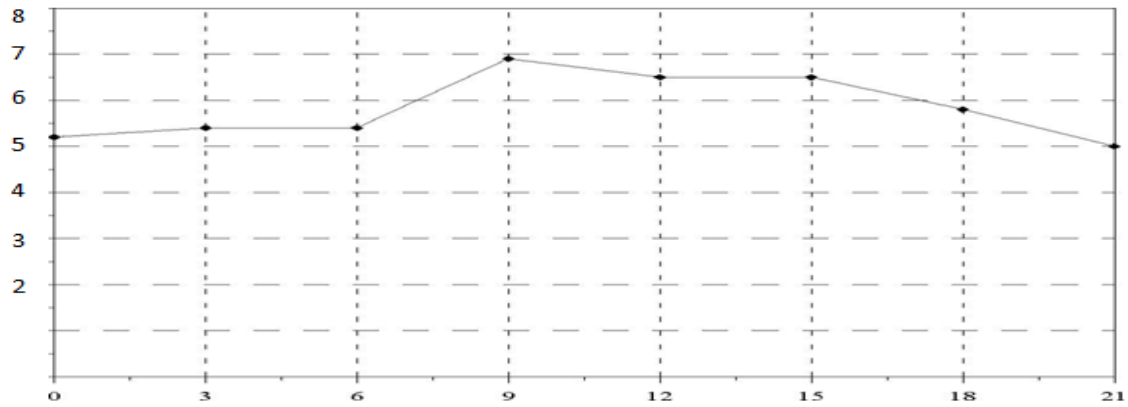
#### **1.1. Application pour cite d'Adrar**



***Figure 4.1 : les régions ventées en Algérie à 60 m [63]***

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar *	0.28	27.82	0.1	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba *	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna *	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

***Tableau 4-1: Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M. [tab 4.1]***



**Figure 4.2: Evolution de la vitesse moyenne horaire du Adrar vent pour le site d'Adrar (à 10 m du sol) [77]**

## **1.2. Problème**

Pour obtenir une énergie électrique de puissance  $P_{elec}=1$  MW à l'aide d'une éolienne, avec les données :

- Le vent qui circulant dans la région de Adrar est d'une vitesse moyenne  $V=7$  m/s.
- La machine est tripale et fonctionne à vitesse variable.
- La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone MADA,

$\Omega_{mec-opt}=1800$ tr/mn (avec un rendement de  $\eta_g = 0.8$  et un glissement de  $g = -1\%$ ) et un multiplicateur de vitesse (avec un rendement de  $\eta_m = 0.9$  et un coefficient de multiplication  $G=87$ ).

### **1.2.1. Dimensionnement des différents éléments**

#### **1.2.1.1. Dimensions de l'aérogénérateur**

##### **a. La puissance mécanique nécessaire**

$$P_{elec} = P_{mec} \eta_g \eta_m$$

AN:

$$P_{mec} = \frac{10^6}{0.8 \cdot 0.9} = 1.38 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 = 1.397 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$P_{aer} - P_{mec} = 9000 \text{ W}$$

## Interprétation

Cette différence de puissance définit les pertes dues aux frottements entre les organes de la turbine (arbre, multiplicateur) et aussi pertes mécaniques.

En combinant les équations (2.1) (2.13) la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi par:

$$P_m = \frac{P_m}{P_{vent}} P_{vent} = C_p(\lambda) P_{vent} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $G$ , la puissance mécanique  $P_{mec}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_{mec} R}{G V} \right) \rho \pi R^2 V^3$$

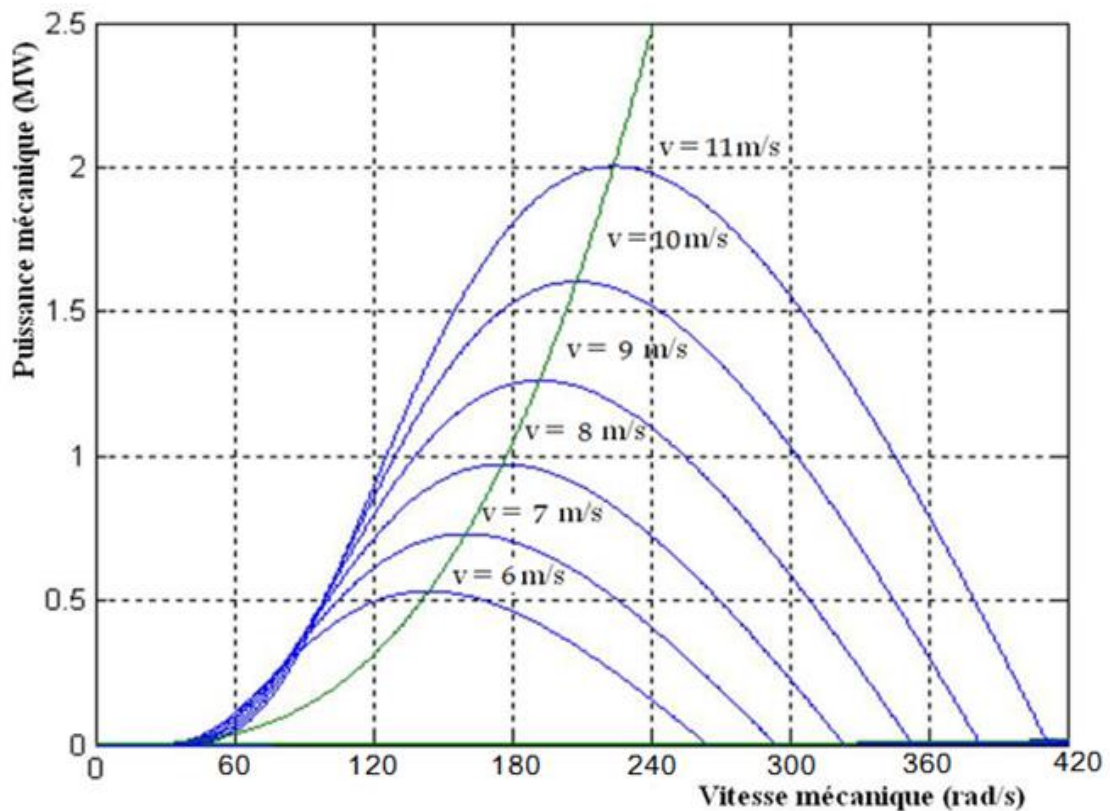


Figure 4.3 : puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique



## Interprétation

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

Si on prend en considération notre calcul en remarque que notre vitesse mécanique optimale a 187 rad/s qui correspond a une vitesse du vent de 9 m/s pour qu'on obtienne une puissance mécanique de 1.38 MW et ce dernier fournit une puissance électrique de 1MW.

### b. Coefficient de puissance Cp

Nous étudions une turbine éolienne avec un système d'orientation des pales "pitch".

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 \lambda_i - C_3 \beta - C_4) e^{C_5 \lambda_i} + C_6 \lambda \quad (3.5)$$

$$c1=0.5176$$

$$c2=116$$

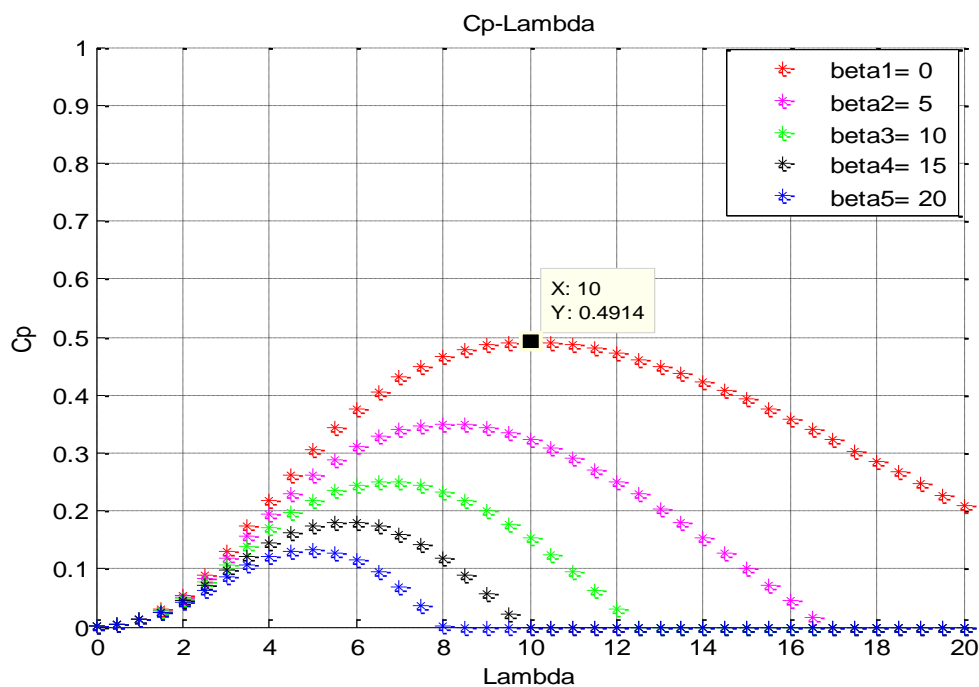
$$c3=0.4$$

$$c4=5$$

$$c5=21$$

$$c6=0.0068$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$



**Figure 4.4 : Coefficient de puissance Cp (λ)λ<sub>opt</sub>**

## Interprétation

Dans cette éolienne le coefficient de puissance augmente avec la vitesse spécifique jusqu'à qu'il atteigne une valeur de 0.5 qui correspond une vitesse spécifique de  $\lambda=10$  qu'elle est très proche de la limite de betz 0.59 donc on a un idéal coefficient de puissance pour cette éolienne

### c. Calcul de coefficient de couple

$$C_q = \frac{C_p}{\Omega_{turb}} = \frac{0.49}{2.1} = 0.23$$

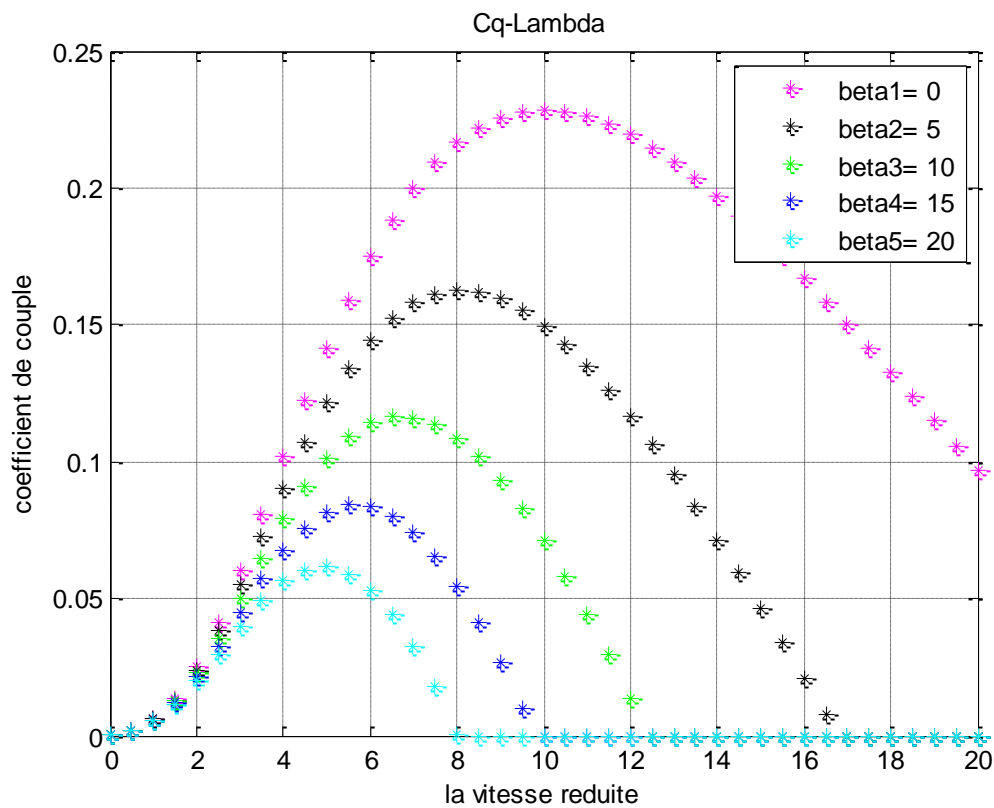


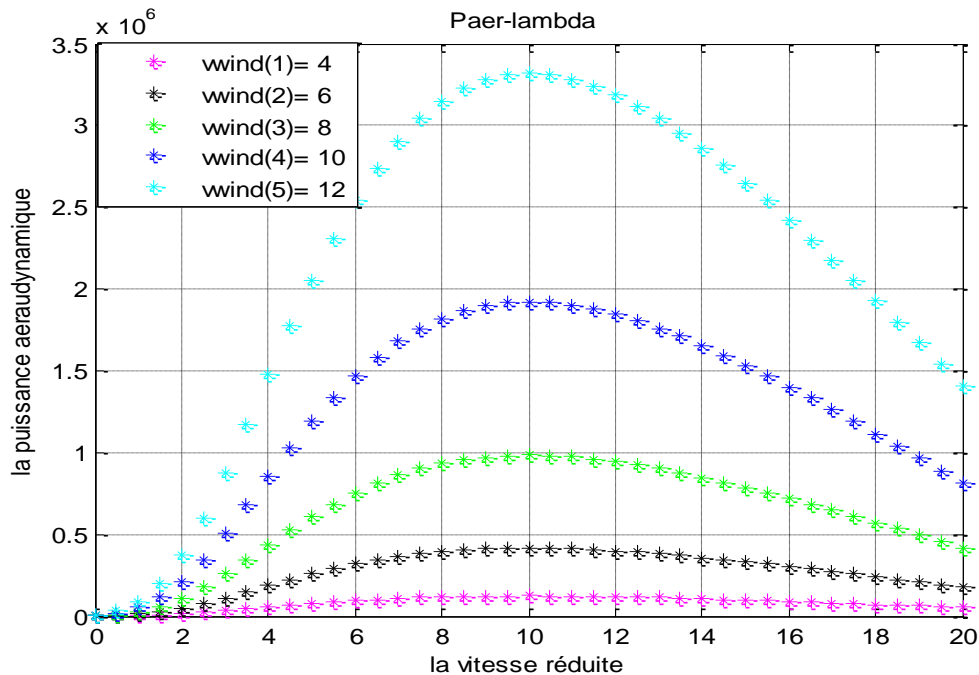
Figure 4.5: Coefficient de couple  $C_q=f(\lambda)$

### d. Courbe de puissance en fonction de lambda

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p$$

Dans cette expression la vitesse réduite est intégrée dans le coefficient de puissance c'est pour ça qu'on a tracé cette figure à l'aide du matlab.

$$P_{aer-opt} = \frac{1}{2} 1.23 \pi 45^2 9^3 0.49 = 1390000 w$$



**Figure 4.6: puissance aérodynamique  $P_{aer}=f(\lambda)$**

### **Interprétation**

On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de lambda jusqu'à atteindre une puissance maximale et après on a une diminution malgré que lambda augmente et sa et du a cause l'élévation de la vitesse du vent qu'elle dépasse la valeur nominal  $v_{nom}$  qui provoque des turbulences et perturbation sur la surface des pales.

### **e. La Longueur de pale**

- pour capter une puissance maximale il s'agit de choisir la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{pmax} = 0.49$
- la puissance mécanique s'exprime par:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3 \quad \Longrightarrow \quad s = 2 \frac{P_{turbine}}{v^3 C_p \rho}$$

Avec :

$$C_p = 0.49$$

$$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 9 \text{ m/s}$$

A.N:

$$s = 2 \frac{1.38 \cdot 10^6}{9^3 \cdot 0.49 \cdot 1.22} = 6333.2 \text{ m}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{s}{\pi}} = 45 \text{ m}$$

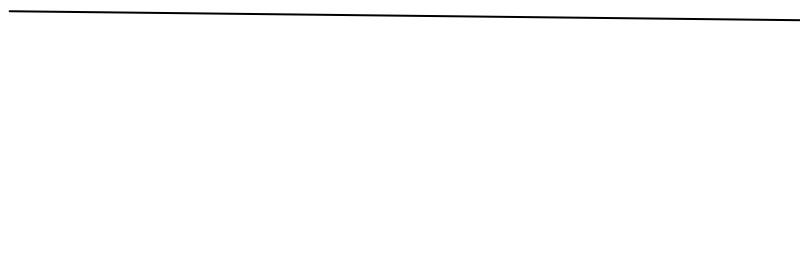
**f. Courbe de rayon en fonction de coefficient de puissance**

$$R = \sqrt{\frac{P_{turb}}{v^3 C_p \rho \pi}}$$

$$C_p = \frac{P_{aer}}{0.5 \rho \pi V^3 R^2}$$

$$\mathbf{R = f(C_p)}$$

$$f(x) = \frac{(2 \cdot 1.38 \cdot 10^6)}{(9.1^3 \cdot x \cdot 1.25 \cdot \pi)^{0.5}}$$



**Figure 4.7 : Caractéristique de rayon en fonction de Cp**

**Interprétation**

D'après ce que nous avons trouvé on remarque que le rayon de la pale influe sur le coefficient de puissance (R augmente implique que le coefficient de puissance diminue) bien sûr sans dépasser la limite de Betz  $C_p=0.59$ .

### 1.2.1.2. Dimensions de la génératrice

#### a. La vitesse de l'arbre primaire de l'éolienne 1 W en rad/s et L N en tr/min

D'après la figure (3.8) ( $C_p= 0.43$  et  $\lambda= 11$ ) et à partir de la formule :

$$\lambda = \frac{R\Omega_{\text{turbine}}}{V_{\text{vent}}} \implies \Omega_{\text{turbine}} = \frac{v_{\text{vent}} \lambda}{R}$$

Avec:

$$\lambda_{\text{opt}} = 10$$

$$V_{\text{vent-opt}} = 9\text{m/s}$$

$$R = 45$$

$$\Omega_{\text{turbine-opt}} = 2.1 \text{ rad/s} = 19.89 \text{ tr/min}$$

#### b. La vitesse du rotor de la génératrice en rad/s et en tr/min

D'après la formule (3.8)

Avec :

$$G=87$$

$$\Omega_{\text{turbine}} = 2.1 \text{ rad/s}$$

$$\Omega_{\text{mec}} = 20.55*87=1737 \text{ tr/min}$$

Cette éolienne tourné a une vitesse mécanique de 1787tr/min max et notre génératrice MADA a pour caractéristique une vitesse nominale de 1800tr/min donc ont a trouver une valeur proche a la rotation nominale de notre génératrice.

Finalement, pour installer une éolienne qui donne une puissance électrique  $p_{\text{elec}} = 1 \text{ MW}$ , il, faudrait choisir les dimensions suivantes :

##### ➤ Dimensions de l'aérogénérateur

La vitesse du vent dans cette région est supérieure à la vitesse 7m/s.

L'éolienne est tripale.

La longueur des pales est égale à 45 m.

##### ➤ Dimensions du multiplicateur

Le rapport de multiplication de ce multiplicateur est de  $G=87$ .  
 Le multiplicateur est fonctionné avec un rendement de  $\eta_m = 0.9$

➤ **Dimensions de la génératrice**

- La Génératrice fonctionne à une vitesse fixe supérieure à la vitesse synchrone  $\Omega_{mec} = 1500 \text{ tr/min}$
- (glissement négatif  $g = -1\%$ ) avec un rendement de  $\eta_g = 0.8$ .

**1.3. Relation Entre la Vitesse du Vent Nécessaire et la Hauteur de la Tour**

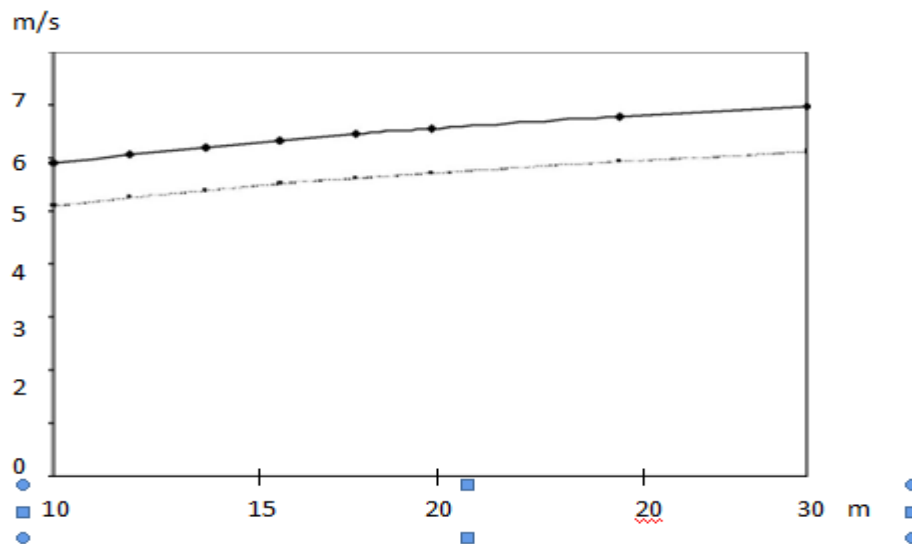
**1.3.1. Calculer de la vitesse nécessaire**

$$v^3 = \frac{2 P_{mec}}{\rho C_p S} = 9.007 \text{ m/s}$$

**1.3.2. Calculer la hauteur de la tour nécessaire**

D'après la formule de la distribution de Weibull (2.25)

$$V_v(h) = V_v(h_{mes}) \frac{\ln\left(\frac{h}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{h_{mes}}{\alpha}\right)} \implies \ln\left(\frac{h}{\alpha}\right) = \frac{V_v(h) \cdot \ln\left(\frac{h_{mes}}{\alpha}\right)}{V_v(h_{mes})}$$



**Figure 4.8: Vitesse du vent moyennes annuelle a différents altitude pour les 2 sites considérer [79]**

— Adrar      ..... Timimoune

Avec:

$$V_v(h) = 9.007 \text{ m/s}$$

$$h_{mes} = 10 \text{ d'apprêt figure (3.20)}$$

$$V_v(h_{mes}) = 5.9 \text{ m/s d'apprêt figure (3.20)}$$

Paramètre fonction de la rugosité du sol. Pour une rugosité de 0.01 mètres

$\alpha$  : Paramètre de rugosité varie selon la nature du sol dans cette casa a Adrar  $\alpha = 0,1$

AN :

$$h = 112 \text{ m}$$

### **Interprétation**

On déduit de notre étude de calcul de dimensionnement que cette éolienne industrielle de 1 MW implanté dans le site le plus venté en Algérie elle peut atteindre jusqu'à 110m de hauteur du mat et de 46m comme rayon du rotor et une machine asynchrone a double alimentation donc cette éolienne elle est gigantesque on peut la comparer avec une éolienne de 2MW en Europe avec ces caractéristiques tout ça c'est à cause de gisement du vent faible mais ça reste toujours une source fiable d'énergie électrique quelle a peut des inconvénients contre les autres sources.

### **Conclusion**

Le point de fonctionnement de l'éolienne peut être déterminé à partir de la caractéristique de la puissance P fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation  $\Omega_{turbine}$  de la turbine, pour une vitesse de vent donnée. Le point de fonctionnement nominal est choisi tel que la puissance fournie par l'éolienne soit maximum. (Lambda et beta Cp optimale)

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Une description technologique assez détaillée du système éolienne et des différents types et structures existantes (les éoliennes à axes verticale et horizontale, à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution) a été abordé. Nous avons parvenu aussi l'étude des différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'est intéressé dans ce mémoire à la conception d'un modèle mathématique d'une éolienne avec une génératrice.

Dans un second temps, On s'est intéressé à l'étude la génératrice à double alimentation.

Nous avons introduit une description détaillé sur la machine asynchrone entraînée par la turbine éolienne basée sur :

- La théorie aérodynamique influence sur la turbine éolienne
- La définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques,
- Le gisement du vent existe dans plusieurs sites en Algérie
- L'intérêt de la vitesse variable.
- Une génératrice à double alimentation.



La modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion a été abordée, Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, en décrivant les différents constituants de cette chaîne de conversion.

Nos résultats ont été validés par un exemple de calcul de dimensionnement dans le site choisi d'Adrar qui enregistre un meilleur gisement du vent en Algérie.

Finalement on a conclu que chaque éolienne a son propre  $C_p$  qui joue un rôle très important dans la production d'énergie électrique et qui a une relation avec l'angle de calage  $\beta$  qui influe fortement sur ce dernier (si le  $\beta$  augmente, le  $C_p$  diminue). Un autre point très important, est que toutes les éoliennes auront un système de régulation au niveau des pales et de la génératrice pour extraire le maximum de puissance à la sortie du système.

En perspective, on propose d'étaler, poursuivre et compléter cette étude par d'autres travaux afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque -diesel)...etc.
- Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.
- Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
- Etudier la gestion des systèmes, c.à.d. réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.
- Appliquer des techniques de commande intelligente.

## *Références Bibliographiques*

- [1] : I. M. De Alegria, J. Andreu, J. L. Martin, P. Ibañez, J. L. Villate, et H. Camblong, « Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11, 1858-1872
- [2] : T. Wildi, Gilbert Sybille, « Electrotechnique », Chapitres 34, 36 et 45, 4<sup>ème</sup> édition 2005, Ed. «De Boeck ».
- [3] : A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [4]: O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », *European wind energy conf.*, 1994, p. 500-505.
- [5] : B. Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3<sup>ème</sup> situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.
- [6] : OM. Gallopin G-C., Funtowicz S., Ravetz J, « La science pour le XXI<sup>e</sup> siècle : du contrat social aux fondements scientifiques », revue internationale des sciences sociales, N°168, juin 2001.
- [7] : G-Octavian Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », thèse doctorat, E.N.S.A.M, centre de Lille, 2005.
- [8] : Communication à l'académie des technologies pour un progrès raisonné de Bernard Tardieu « Rapport énergie hydraulique éolienne », novembre 2005.
- [9] : F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.
- [10] : A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.

[11] : TP éol.pdf, Pierre Boscq, Baptiste Dumortier, Aurore Dutin et Kevin Friry durant leur projet de fin d'études 2005/2006.

[12] : Historiquedeséoliennes <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>

[13] : <http://www.info-eolien.com/energie-eolienne-composants.html>

[14]: <http://energie-verte.blogspot.com/2007/01/des-ides-pour-stocker-l-deseoliennes.html>

[15]: <http://tpeeolien.e-monsite.com/pages/i-quels-sont-les-composants-d-une-eolienne>  
HYPERLINK "<http://tpeeolien.e-monsite.com/pages/i-quels-sont-les-composants-d-une-eolienne-ou-peut-on-introduire-des-eoliennes.html>"  
HYPERLINK "<http://tpeeolien.e-monsite.com/pages/i-quels-sont-les-composants-d-une-eolienne-ou-peut-on-introduire-des-eoliennes.html>"  
HYPERLINK "<http://tpeeolien.e-monsite.com/pages/i-quels-sont-les-composants-d-une-eolienne-ou-peut-on-introduire-des-eoliennes.html>"  
HYPERLINK "<http://tpeeolien.e-monsite.com/pages/i-quels-sont-les-composants-d-une-eolienne-ou-peut-on-introduire-des-eoliennes.html>"-ou-peut-on-introduire-des-eoliennes.html

[16]: [AWEA] American Wind Energy Association: <http://www.awea.org>

[17]: <http://tpe-energie-eolienne.fr/composants.html>

[18]: <http://tpeeoliennefoucauld20092010.wifeo.com/3-la-structure-externe-des-eoliennes.php>

[19]: <http://tpeeoliennefoucauld20092010.wifeo.com/3-la-structure-externe-des-eoliennes.php>

[20]: <http://tpe-energie-eolienne.fr/composants.html>

[21] : [moodle.insa-toulouse.fr/pluginfile.../modelisation-sem2-03-04.pdf](http://moodle.insa-toulouse.fr/pluginfile.../modelisation-sem2-03-04.pdf)

[22] : B. Mmulton « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.

[23] : Machine asynchrone Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_asynchrone](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone).

[24] : F. POITIERS « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2003.

[25]: <http://tpe-energie-eolienne.fr/composants.html>

[26]: <http://www.leseoliennes.be>

[27] : [http://www.nskeurope.fr/cps/rde/xchg/eu\\_fr/hs.xsl/industrie-eolienne.html](http://www.nskeurope.fr/cps/rde/xchg/eu_fr/hs.xsl/industrie-eolienne.html)

[28]: Bernard MULTON, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, Xavier ROBOAM, Stéphan ASTIER, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA. Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques, Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002

[29] : D. Tran, "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse le 27 septembre 2010.

[30] : Jean MARTIN, Ingénieur de l'École nationale supérieure des arts et métiers

[31] : E.Hau « wind turbine : fondamentale, technologie,application,economics »deusieme edition springer-verlag berlin heidelberg2006

[32] : Ph .Terrier avec la collaboration de CLAUD THÉORÊT, ING « TCH-090-095 projet technologique étude d'un éolien » MONTRÉAL, 14 août 2006 révision juillet 2007

[33]: E. Hau, Wind-Turbines, Springer, 2000

[34] : F. Poitiers « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2003.

[35] T. G R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.

[36]: J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.

[37]: S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[38] : R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.

[39] : Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.

[40] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.

[41] : Site Internet « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, <http://www.arenidf.org>.

[42]: J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.

[43]: R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.

[44]: R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.

[45] : Site Internet, [www.rncan.gc.ca/penser](http://www.rncan.gc.ca/penser). Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.

[46] : B. Beltran, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur", Thèse de Doctorat de l'université de Bretagne occidentale le 6 juillet 2010.

[47] : S. El. Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat de L'Université des Sciences et Technologies de Lille 2004. [8] Technique de l'ingénieur BM 4640.

[48] : H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.

[49] : M. Machmoum, F. Poitiers, L. Moreau, M.E. Zaïm, R. Le Doeuff, "Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) ", Large-GE44, Pole Atlantique De Génie Electrique, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

[50] : B. Beltran, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur", Thèse de Doctorat de l'université de Bretagne occidentale le 6 juillet 2010.

[51]: H. L. Naqra, B. Dubé, "Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbine", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988, pp.733-737.

[52] : <http://www.planetoscope.com/co2/819-emissions-de-co2-dues-a-la-production-d-electricite-et-de-chaleur-dans-le-monde.html>

[53] : <http://eolien.be/node/16>

[54] : GE36: Les éoliennes

[55] : T. Grignoux, R. GIBERT, P. NEAU, C. BUTHION « éoliennes en milieu urbain », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies « Il-de-France » Actualisation janvier 2006 (P.SALVI).

[56] : L'énergie éolienne [http://www. Domsweb.org](http://www.Domsweb.org)

[57] : Technique de l'ingénieur BM 4 640.

[58] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.

[59] : B. Multon « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.

[60] : P. Boucher, Le Vent et ses caprices (<http://www.Le Vent - Wind.com>).

[61] : T. Wildi, Gilbert Sybille, « Electrotechnique », Chapitres 34, 36 et 45, 4ème édition 2005, Ed. «De Boeck ».

[62] : T. Diveux, « Implantation d'un système éolien. Optimisation par algorithmes génétiques », Thèse LEPT-ENSAM Bordeaux, 29 septembre 2000.

[63] : N. Kasbadji merzouk et M. MERZOUK « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.

[64] : T. Grignoux, R. GIBERT, P. NEAU, C. BUTHION « éoliennes en milieu urbain », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies « Il-de-France » Actualisation janvier 2006 (P.SALVI).

[65]: B. Multon, Xavier ROBOAM, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA, Olivier GERGAUD et Hamid BEN AHMED. Aérogénérateurs électriques

[66] : C.Saget , « la variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne » .REE , n° 7, juillet 1998, pp. 42-48.

[67]: L. Xu & W. Cheng “Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem “, IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.

[68]: R.Mukand patel , « wind and solan power systems» CRC .press, 1999.

[69]: K. Mok, "Identification of the Power Coefficient of Wind Turbines", Power Engineering Society General Meeting IEEE 12-16 June 2005, Vol. 2, PP. 2078-2082.

[70] : S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[71] : Technique de l'ingénieur BM 4 640.

[72] : P. Gipe, collaborateur régulier des revues Independent Energy et Windstats. Et l'autreur des ouvrages Wind Power for Home & Busines et Wind energy comes of age. «Á l'étape de la maturité : L'énergie éolienne », <http://WWW.ilr.Tu-berlin.de/WKA /aletape.html>

[73]: M. G. Jovanovid\* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016, Fax: +44-191-2273684 ,EMail: milut in. j ovanovic@unn. ac . uk University of Newcastle, NSW 2308, Australia.

[74]: H.S.vicators , J.A Tegopoulos , Fellon .IEEE « Stady state Analysis of A Doubly . FED induction generator under synchronous operation» national Technical University of Athens, Département of éléctrical engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol .4, NO.3, September 1989.

[75] : S El Aimani, «Modélisation Maximisation de puissance (MPPT) par différents stratégies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[76] : S El Aimani, « Régulation et modélisation de système d'orientation des pales par des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[77] : S.Daif, CDER. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE'2010.

[78] : S El Aimani, « validation expérimental sur une éolienne de 1.5 MW ».

[tab1.1] : L. Moreau, « Modélisation conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, de l'université de Nantes, le 9 décembre, 2005.

[tab1.2] : T. Grignoux, R. GIBERT, P. NEAU, C. BUTHION « éoliennes en milieu urbain », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies « Il-de-France » Actualisation janvier 2006 (P.SALVI).

[tab 4.1] : R. Hammouche, '*Atlas Vent de l'Algérie*', Publication Interne de l'ONM, Office National de Météorologie, Alger, 1990.



# Annexes

## Annexe 01:

### **Paramètres de la turbine [78] :**

Puissance nominale :  $P_n = 1.5 \text{ MW}$

Rayon de l'éolienne :  $R = 35 \text{ m}$

Gain du multiplicateur de vitesse :  $G = 90$

Vitesse du vent :  $V_{\text{vent}} = 12 \text{ m/s}$

Inertie de l'arbre :  $J = 1000 \text{ kg.m}^2$

Hauteur du rotor  $H=80\text{m}$

### **Paramètres de la turbine [78] :**

Coefficient du frottement :  $f = 0.0024$

Nombre de paires de pôles :  $p = 2$

Vitesse nominale (synchronisme) :  $\Omega_n = 1850 \text{ tr/mn}$

Fréquence nominale :  $f = 50 \text{ Hz}$

Couple nominale :  $C_{em\ n} = 7800 \text{ Nm}$

## Annexe 02:

```
clc,clear all,close all
%.....parametre de l'eolienne ....%
%.....Cp parameters....%
f=50; %.....frequence (HZ)....%
c1=0.5176;
c2=116;
c3=0.4;
c4=5;
```

```

c5=21;
c6=0.0068;
Beta=[0;5;20]
Beta1=0; % ....L'angle de calage (Degres)....%
Beta2=5;
Beta3=10;
Beta4=15;
Beta5=20;
lambda =[0:0.5:20]; %la vitesse reduite....%
vwind=[4:2:12]; % .....vitesse de vent (m/s)....%
vwind1=4 ;
vwind2=6 ;
vwind3=8 ;
vwind4=10 ;
vwind5=12 ;
rho=1.229;% .....la masse volumique de l'air (Kg/m^3).....%
R=45; % .....rayon du rotor (m).....%
omegamec =182.7; % .....la vitesse mécanique nominal (rpm).....%
omega=2.1;% .....nominal speed [rpm].....%
G=87; % .....gain de multiplicateur .....%
f=50; % .....frequency [HZ].....%
p=2; % ....pole pairs....%
% ....calcul du vitesse reduite....%
% ....lambda=omega_n*R/vwind....%;
lambda_i=1./(lambda+0.08.*Beta1)-0.035./(Beta1.^3+1);
lambda_i=1./(lambda+0.08.*Beta2)-0.035./(Beta2.^3+1);
lambda_i=1./(lambda+0.08.*Beta3)-0.035./(Beta3.^3+1);
lambda_i=1./(lambda+0.08.*Beta4)-0.035./(Beta4.^3+1);
lambda_i=1./(lambda+0.08.*Beta5)-0.035./(Beta5.^3+1);
% ....calcul du coefficient de puissance....%
cp1 = c1*(c2*lambda_i - c3*Beta1 - c4 ).* exp( -c5 *lambda_i)+c6.*lambda;
cp2 = c1*(c2*lambda_i - c3*Beta2 - c4 ).* exp( -c5 *lambda_i)+c6.*lambda;
cp3 = c1*(c2*lambda_i - c3*Beta3 - c4 ).* exp( -c5 *lambda_i)+c6.*lambda;
cp4 = c1*(c2*lambda_i - c3*Beta4 - c4 ).* exp( -c5 *lambda_i)+c6.*lambda;
cp5 = c1*(c2*lambda_i - c3*Beta5 - c4 ).* exp( -c5 *lambda_i)+c6.*lambda;
cp1=1/2*(cp1+abs(cp1));% ....uniquement pour les valeurs positif ....%
cp2=1/2*(cp2+abs(cp2));% ....uniquement pour les valeurs positif ....%
cp3=1/2*(cp3+abs(cp3));% ....uniquement pour les valeurs positif ....%
cp4=1/2*(cp4+abs(cp4));% ....uniquement pour les valeurs positif ....%
cp5=1/2*(cp5+abs(cp5));% ....uniquement pour les valeurs positif ....%
hold on
figure(1)
axis([0,20,0,1])
plot(lambda,cp1,'*r',lambda,cp2,'*m',lambda,cp3,'*g',lambda,cp4,'*k',lambda,cp5,'*b')

```

```

title('Cp-Lambda')
xlabel('Lambda')
ylabel('Cp')
legend('beta1= 0','beta2= 5','beta3= 10','beta4= 15','beta5= 20')
grid on
hold off
%....calcul de puissance aerodynamique....%
for k=1:length(vwind)
    Paer = (1/2*rho*pi*R^2).*vwind(k).^3.*cp1;
%.....calcul du coefficient aerodynamique.....%
cq1=cp1/omega;
cq2=cp2/omega;
cq3=cp3/omega;
cq4=cp4/omega;
cq5=cp5/omega;
%.....calcul du couple aerodynamique.....%
Ta = (1/2*rho*pi*R^3.*vwind(k).^2.*cq1);
cq1=1/2*(cq1+abs(cq1));%....uniquement pour les valeurs positif ....%
cq2=1/2*(cq2+abs(cq2));%....uniquement pour les valeurs positif ....%
cq3=1/2*(cq3+abs(cq3));%....uniquement pour les valeurs positif ....%
cq4=1/2*(cq4+abs(cq4));%....uniquement pour les valeurs positif ....%
cq5=1/2*(cq5+abs(cq5));%....uniquement pour les valeurs positif ....%

Paer1 = (1/2*rho*pi*R^2).*vwind(1).^3.*cp1;
Paer2 = (1/2*rho*pi*R^2).*vwind(2).^3.*cp1;
Paer3 = (1/2*rho*pi*R^2).*vwind(3).^3.*cp1;
Paer4 = (1/2*rho*pi*R^2).*vwind(4).^3.*cp1;
Paer5 = (1/2*rho*pi*R^2).*vwind(5).^3.*cp1;
Ta1 = (1/2*rho*pi*R^3.*vwind(1).^2.*cq1);
Ta2 = (1/2*rho*pi*R^3.*vwind(2).^2.*cq1);

for k=1:length(vwind)
    Pm = (0.5*cp1*rho*pi*(R^2)*vwind(k)*(omegamec^2))/(lambda) ;

%.....calcul du vitesse mecanique.....%
omegamec = G*omega ;

%.....calcul de puissance mecanique.....%
Pm1 = (0.5*cp2*rho*pi*(R^2)*vwind(1)*(omegamec^2))/(lambda) ;
Pm2 = (0.5*cp2*rho*pi*(R^2)*vwind(2)*(omegamec^2))/(lambda) ;
Pm3 = (0.5*cp3*rho*pi*(R^2)*vwind(3)*(omegamec^2))/(lambda) ;
Pm4 = (0.5*cp4*rho*pi*(R^2)*vwind(4)*(omegamec^2))/(lambda) ;
Pm5 = (0.5*cp5*rho*pi*(R^2)*vwind(5)*(omegamec^2))/(lambda) ;

```

```

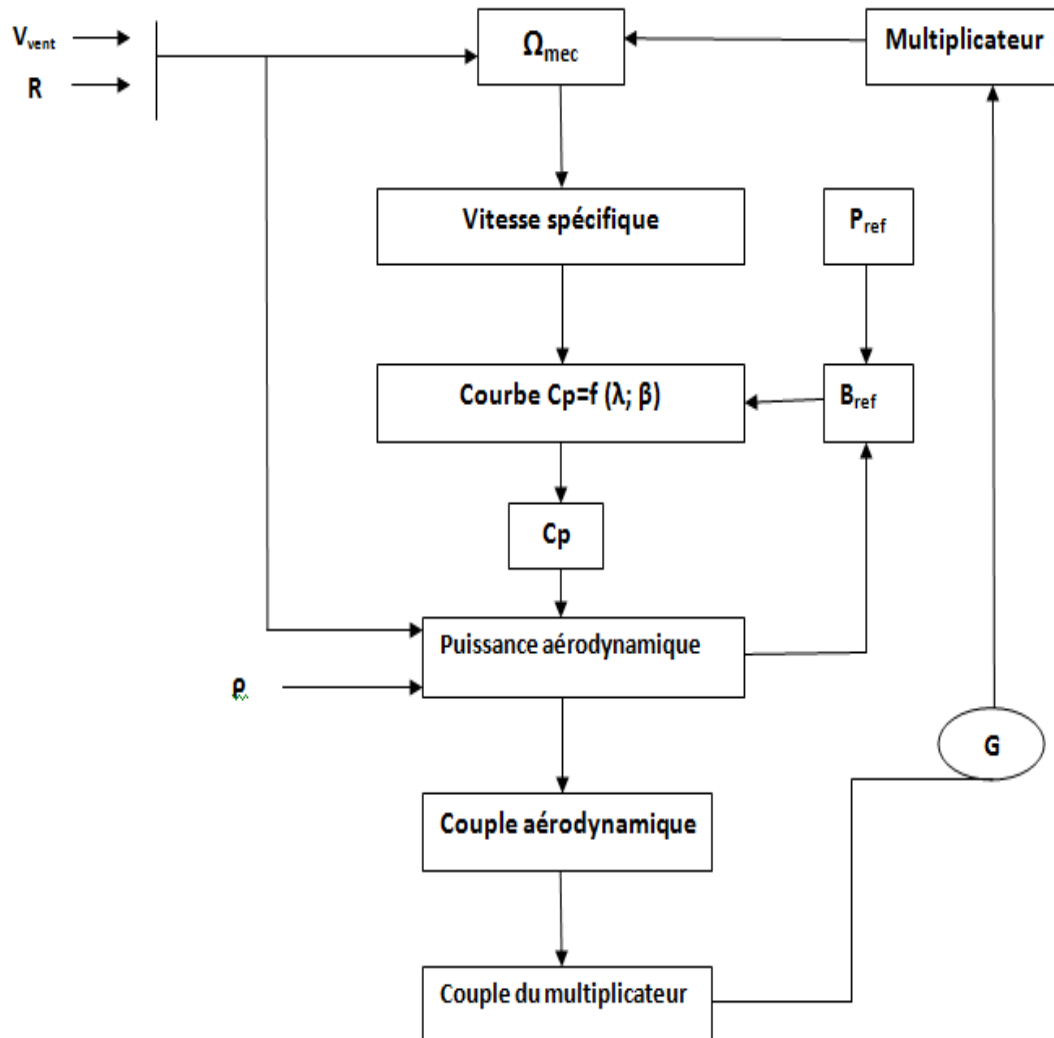
end
end
hold on
figure(2)
axis([0,20,0,0.1])
plot(lambda,cq1,'*m',lambda,cq2,'*k',lambda,cq3,'*g',lambda,cq4,'*b',lambda,cq5,'*c')
title('Cq-Lambda ')
xlabel('la vitesse reduite')
ylabel('coefficient de couple')
legend('beta1= 0','beta2= 5','beta3= 10','beta4= 15','beta5= 20')
grid on

hold on
figure(3)
axis([0,500,0,0.1])
plot(lambda,Paer1,'*m',lambda,Paer2,'*k',lambda,Paer3,'*g',lambda,Paer4,'*b',lambda,Paer
5,'*c')
title('Paer-lambda ')
xlabel('la vitesse réduite')
ylabel('la puissance aeraudynamique')
legend('vwind(1)= 4','vwind(2)= 6','vwind(3)= 8','vwind(4)= 10','vwind(5)= 12')
grid on

hold on
figure(4)
axis([0,300,0,1400000])
plot(omegamec,Pm1,'*m',omegamec,Pm2,'*k',omegamec,Pm3,'*g',omegamec,Pm4,'*b',om
egamec,Pm5,'*c')
title('Pm-omegamec ')
xlabel('la vitesse de rotation mécanique')
ylabel('la puissance mécanique')
legend('vwind(1)= 12','vwind(2)= 10','vwind(3)= 8','vwind(4)= 6','vwind(5)= 4')
grid on

```

### Annexe 03 :



## ملخص

إن مصادر الطاقة المتجددة لإنتاج الكهرباء من اللامركزية، يمكن أن تساعد في حل مشكلة كهربة المناطق النائية حيث يحرم عدد كبير من الأفراد من جميع هذه المصادر لاستهلاك الطاقة، وبالتالي تلبية حاجاتهم تؤدي إلى تحسين ظروفهم المعيشية.

الرياح هي مصدر مستمر للطاقة المتجددة، لكنها ليست مستقرة، فمن أجل الاستغلال الأمثل لهذه الطاقة لابد من استعمال مولدات تعمل بسرعات متغيرة، كما كان الحال في هذه الدراسة التي تتعامل مع النمذجة الرياضية لمختلف المكونات الأساسية لهذا التركيب و التي هي :  
توربينات الرياح والجهاز الحث التغذية المضاعفة والمحولات. كما قدمنا أيضا الطريقة المستخدمة لحساب المعلمات الأمثل لهذه التوربينات.

### **الكلمات المفتاحية :**

الطاقة المتجددة، النمذجة الرياضية، توربينات الرياح، والجهاز الحث التغذية المضاعفة.

## Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Le vent est une source permanente d'énergie renouvelable, mais elle n'est pas stable. Pour une exploitation optimale de cette énergie, il faut utiliser des générateurs fonctionnant à des vitesses variables, comme été le cas dans cette étude qui traite la modalisation mathématique des différents composant d'installation éolienne qu'ils sont :

La turbine éolienne et la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et les convertisseurs. Nous avons également présenté la méthode utilisée pour calculer les paramètres optimaux de la turbine.

### **Mots clés :**

Énergie renouvelable, vent, la modélisation mathématique, La turbine éolienne, la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

## Abstract

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy.

The wind is a permanent source of renewable energy, but it is not stable. To optimally exploit this energy, it is preferable to use generator operating at variable speeds, as was the case in this thesis, where we are making a mathematical model to the different parts of a wind turbine, those are:

The wind turbine, the doubly alimentation asynchronous generator. We also, presented the methodology used to calculate the optimal parameters of the turbine.

### **Key words:**

Renewable energy, mathematical modeling, The wind turbine, the doubly alimentation asynchronous generator.