

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par :

Mokrane Zakaria

&

Latri Chouaib

pour l'obtention du diplôme de master en Électronique option système de vision et robotique

Thème

Implémentation de contrôleur MPPT d'un générateur éolien sur circuit FPGA

Proposé par : Mr NESBA Ali et Mr Mamoun abdel montassir

Année Universitaire 2011-2012

Résumé : L'objectif de présent ce travail est l'implémentation software de contrôleur MPPT d'un générateur éolien sur un circuit FPGA en utilisant le System Generator de Xilinx. Le mode de fonctionnement et la rapidité inhérente ont permis aux circuits FPGA d'être une alternative innovante par rapport aux processeurs de contrôle conventionnels (DSP / microprocesseur). En plus, la possibilité de programmer ces circuits via une interface graphique telle que le Matlab Simulink fournit la simplicité et la souplesse de conception, de simulation et de vérification des applications sur ces circuit. En effet, au cours de ce travail, toutes les étapes utiles pour implémenter de contrôleur MPPT d'un générateur éolien sur la cible FPGA, en vue une simulation dynamique sera présentée.

Mots clés : générateur éolien ; MPPT, FPGA.

Abstract: The objective of this work is the software implementation of the controller of wind turbine on the FPGA circuit (Field programmable Gate array) using System generator from Xilinx. The modes of operation and speed inherent in FPGAs have to be an innovative alternative compared to conventional control processors (DSP / microprocessor). In addition, the ability to program these circuits via a graphical interface such as the Matlab Simulink provides the simplicity and flexibility of design, simulation and verification applications on the circuit. In did, we will represent all steps taken to implement the controller of wind turbine on the FPGA for a dynamic simulation will be represented.

Keywords: Field Programmable Gate Arrays; maximum power point tracker (MPPT); wind turbine.

ملخص : الهدف من هذا العمل هو تنفيذ البرمجيات لوحدة التحكم في مولد الرياح بواسطة دائرة (ف.ب.ج.ي) باستخدام برنامج (XILINX SYSTEME GENERATOR), في الواقع طريقة عمل دائرة FPGA والسرعة الكامنة فيها يمكنانها من ان تكون بديلا مبتكرا للمعالجات التقليدية. بالإضافة إلى ذلك القدرة على برمجة هذه الدارات عبر واجهة قابلة للرسم MATLAB/ Simulink الذي يقدم البساطة والمرونة في تصميم التطبيقات، والمحاكاة والتحقق على هذه الدارات. محتوى هذا العمل يمثل جميع الخطوات المتبعة التي اتخذت في تنفيذ البرمجيات لوحدة التحكم في مولد الرياح على دائرة (ف.ب.ج.ي) باستخدام المحاكاة الديناميكية. كلمات مفتاحيه : مولد الرياح ، MPPT.FPGA (تعقب اقصى نقطة للطاقة).

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu « DIEU » le Tout-puissant de m'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.

Après, Nous tenons à remercier notre promoteur Mr Ali NESBA et Co-promoteur Mr Maamoun abd el montassir D'avoir accepté de nous encadrer et pour le suivi continuels tous le long de la réalisation de ce Mémoire et qui n'ont pas cessé de nous donner ses conseils et ses remarques.

Et en fin nous remercions l'ensemble collègues de nos promos d'Electronique 2012 et Nos amis et toutes personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury afin d'évaluer et enrichir cette thèse.

Ma gratitude aussi au département d'électronique de l'université de Blida et à tous mes enseignants tous cycles confondus.

Enfin, une pensée affectueuse est adressée aux membres de ma famille en particulier ma mère, mon père, mes sœurs et frères, pour leur soutien sans limite durant toutes mes années d'études.

DEDICACE

Je dédie Ce Travail à:

- Mon PERE qui ne cesse pas de M'encourager.
- Ma MERE pour Sa Tendresse profonde.
- Mes chers Frères et Sœurs.
- Tous mes proches,
- Tous mes amis,
- Toute Ma promotion 2012 d'Electronique,
- Tous ceux qui me sont chers.

« 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 ».

Listes des acronymes et abréviations

<u>symbole</u>	<u>Notation</u>
S	La surface balayée par le rotor
R	Le rayon du rotor
V	La vitesse du vent
ρ	La masse volumique de l'air
C_p	Coefficient de puissance
P_{turbine}	La puissance aérodynamique
P_{vent}	La puissance du vent
β	L'angle de d'orientation des pales
λ	Le ration de vitesse ou bien (la vitesse spécifique)
Ω_t	La vitesse de rotation d'une éolienne
T_t	Le couple mécanique
C_m	Le coefficient du couple mécanique
κ, c	Les constantes des paramètres de weibull
F(x)	La fonction de probabilité de densité de weibull
V_D	La vitesse du démarrage
V_N	La vitesse nominale
V_m	La vitesse maximale
P_N	La puissance nominale
MS	Machine synchrone
MAS	Machine asynchrone
MSAP	Machine synchrone a aiment permanent
MADA	Machine asynchrone a double alimentation
g	Le glissement
Ω_s	La vitesse synchrone
Ω	La vitesse mécanique
P_r	La puissance réactive
PLD	Programmable logic device
SPLD	Simple programmable logic device
CPLD	Complex programmable logic device
FPGA	Field programmable gate array

PROM	Programmable read only Memory
LUT	Look up table
CLB	Configurable logic block
IOB	Input Output Bloc
JTAG	Join test action group
EPROM	Erasable programmable read only memory
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static random access memory
RAM	Reade only Memory
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit.
MPPT	Maximum power point tracker
PPM	Point puissance maximum

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Les Systèmes Eoliens

I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique.....	4
I.3. Quelques notions sur le vent.....	7
I.1.3.1. Direction et vitesse du vent.....	7
I.4. Compétition de l'éolien.....	8
I.5. Description d'une éolienne.....	9
I.6. Constitution d'une éolienne.....	9
I.6.1 Le mât.....	9
I.6.2. Le rotor.....	10
I.6.2.1. les pales.....	10
I.6.3. La nacelle.....	12
I.7. Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....	14
I.8. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	15
I.8.1. Les avantages.....	15
I.8.2. Les inconvénients.....	16
I.9. Notions Théoriques sur L'aérogénérateur.....	17
I.9.1. Coefficient de Puissance C_p	17

I.9.2. Vitesse Spécifique de L'éolienne.....	19
I.9.3 Couple Produit par L'éolienne.....	19
I.9.4. La distribution de Weibull.....	19
I.10. Différents types d'aérogénérateurs.....	20
I.10.1. Eoliennes à axe vertical.....	20
I.10.1. 1. Les avantages et les inconvénients d'une éolienne axe vertical	22
I.10.1. 1.a. Les avantage.....	22
I.10.1. 1.b. les inconvénients.....	23
I.10.2. Eoliennes à axe horizontal.....	23
I.10.2.1.Types d'éoliennes à axe horizontal.....	24
I.10.2.1.a. Eolienne en amont.....	25
I.10.2.1.b. Eolienne en aval.....	25
I.10.2.2. Les avantages et les inconvénients d'une éolienne axe horizontal.....	25
I.10.2.2.a. Les avantage.....	25
I.10.2.2.b. les inconvénients.....	26
I.11. Production Optimale d'énergie d'une éolienne.....	26
I.12. Types de régulation de puissance.....	27
I.12.1.1. Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"	27
I.12.2.2. Système à Décrochage Aérodynamique "Pitch "	28
I.12.2.3. Système à Décrochage Aérodynamique "Active Stall"	29
I.13. Conclusion.....	29

Chapitre II : les chaines de conversion

II.1.Introduction.....	30
II.2.les Machines électriques.....	30
II.3.Les différents générateurs.....	30
II.3.1.Machines Synchrone.....	31
II.3.1.1.Machines Synchrone A Electro-aimants.....	31
II.3.1.2.Machines Synchrone A Aimants Permanents.....	32
II.3.1.2.a.Les Avantages	33
II.3.1.2.b.Les Inconvénients	33
II.3.2.Machines Asynchrones.....	33
II.3.2.1.Machine à Cage D'écureuil.....	34
II.3.2.2. Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	36
II.3.2.2.a.Les Convertisseurs De Puissance.....	38
II.3.2.2.b.Puissance Réactive.....	39
II.3.2.2.c. Intérêt Du Contrôle.....	39
II.3.3. Les Avantages Et Les L'inconvénient A Vitesse Fixe.....	41
II.3.3.1. Les Avantages.....	41
II.3.3.2. Les L'inconvénient.....	41
II.3.4. Les Avantages Et Les Inconvénients De La Vitesse Variable.....	41
II.3.4.1. Les Avantages.....	41
II.3.4.2. Les L'inconvénient.....	41
II.5. Conclusion.....	42

Chapitre III: Les Circuits Logiques Programmable FPGA

III. Introduction.....	43
III.1. Présentation De La Logique Programmée.....	43
III.2. Les circuits logiques programmables.....	44
III.3. Caractéristiques d'un circuit Logique.....	45
III.4. La classification des P.L.Ds.....	46
III.4.1. Les SPLDs.....	46
III.4.1.1. Les P.A.Ls.....	46
III.4.1.2. Les PROMs.....	47
III.4.1.3. Les PLAs.....	48
III.4.2. Les C.P.L.Ds.....	49
III.4.3. Les F.P.G.A.s.....	49
III.4.3.1. Structure des FPGAs.....	50
III.4.3.2. Configuration des FPGAs.....	52
III.4.3.3. Les technologies d'interconnexion.....	53
III.4.4. Les Avantages et inconvénients des circuits FPGAs.....	60
III.4.4.1. Avantage.....	60
III.4.4.1. Inconvénients.....	60
III.4.5. Choix du FPGA.....	61
III.4.6. Principaux fondeurs d'FPGA.....	62
III.4.7. Application des FPGAs.....	62

III.4.8. Les étapes de conception d'application sur FPGA.....	63
III.4.9. Les outils de conception.....	65
III.4.10. Conclusion.....	66

Chapitre IV: Implémentation De Contrôleur MPTT Sur FPGA

IV.1. Introduction	67
IV.2. Environnement de développement Simulink-XSG	67
IV.3. Outils de conception par le XSG	67
IV.4. La communication entre les blocs SIMULINK et les blocs XSG	68
IV.5. Les Avantages et les inconvénients d'un XSG.....	69
IV.5.1. Les Avantages	69
IV.5.2. Les inconvénients.....	70
IV.6. Les principaux blocs utilisés pour l'implémentation de contrôleur MPPT D'une machine asynchrone	70
IV.7. Implémentation de contrôleur MPPT pour générateur éolien	71
IV.7.1. Méthode De Recherche De Point Maximum De Puissance.....	71
IV.7.2. Techniques de commande MPPT	71
IV.8. Les résultats de la simulation.....	74
IV.9. Interprétation des résultats	85
IV.10. Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	86
Liste des figures	
Bibliographie	

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie [1].

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, feu de bois, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire. Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX^{ème} siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs observés depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables.

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de l'Europe occidentale de tels « sites isolés » ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elles perturbent généralement moins l'environnement, n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ; elles sont inépuisables ; elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ; elles offrent une importante indépendance énergétique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine et à finalité mécanique (à partir du vent, des mouvements de l'eau...), l'énergie à finalité électrique (à partir de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de barrages hydrauliques...) et l'énergie d'origine et à finalité thermique (géothermie, solaire thermique...). La plupart de ces formes d'énergie proviennent du soleil, à quelques exceptions près (marées, géothermie...).

Etant donné que l'énergie sous forme mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable que localement (pompage direct de l'eau, moulins...). C'est pourquoi, pour l'essentiel, elle est transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, un inconvénient majeur des énergies renouvelables provient de la non-régularité des ressources. De plus, les fluctuations saisonnières et journalières de la demande en puissance ne sont pas forcément synchronisées avec les ressources. Par exemple, en hiver, le besoin énergétique est plus important pour le chauffage et l'éclairage alors que les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La diversification des sources permet statistiquement de limiter ces inconvénients. Il peut s'agir notamment de coupler des panneaux photovoltaïques avec une éolienne. Le stockage de l'énergie électrique supprime ces inconvénients lorsque la technologie le permet [2].

Introduction Générale

Les formes d'énergie renouvelables à finalité électrique qui sont actuellement les plus exploitées tout en respectant au mieux l'environnement sont : l'hydraulique, le solaire photovoltaïque et l'éolien. Parmi ces systèmes notre étude s'intéresse aux systèmes éoliens

Notre mémoire est réparti en quatre chapitres, chacun dispose d'un but bien déterminé :

- Le premier chapitre consiste à donner une idée générale sur les systèmes éoliens.
- Le deuxième chapitre a pour objectif de définir les différentes chaînes de conversion dans un système éolien et voir le fonctionnement d'une éolienne qui marche à vitesse fixe ou une vitesse variable.
- Le troisième chapitre concerne les circuits logiques programmables FPGA. On traitera l'architecture interne de ces circuits, ensuite on passe à la partie qui est consacrée aux moyens de développement et les outils de conception, en fin nous passons à la description de langage VHDL.
- Le dernier chapitre est consacré à l'implémentation du contrôleur MPPT d'un générateur éolien en utilisant le Matlab Simulink et l'environnement SIMULINK-XSG (XILINX SYSTEM GENERATOR), ainsi que les résultats obtenus nous les comparerons avec un système éolien qui n'utilise pas ce contrôleur et qui marche à l'état normal pour voir l'efficacité de ce contrôleur MPPT.

En fin, nous clôturons ce document avec une conclusion générale sur ce qu'on a traité dans notre étude.

I.1. Introduction

Parmi les différents énergies renouvelables on a traité le domaine de L'énergie éolienne qui est l'une des sources les plus économiques de nouvelle production d'électricité à grande échelle en plus cette énergie ne produit pas les émissions nocives d'origine hydrique ni de déchets solides toxiques donc hautement fiable et très efficace.

I.2. Historique :

Le terme 'éolienne' désigne d'une manière générale une machine capable de capter l'énergie cinétique du vent à l'aide d'un rotor monté sur un mat. Plus scientifiquement, le terme d'aérogénérateur désigne les éoliennes destinées à produire du courant électrique. Ce sont les pêcheurs qui furent les premiers à dompter l'énergie du vent pour pouvoir déplacer leurs embarcations sur les flots. Les Perses utilisaient déjà les éoliennes pour irriguer leurs champs, il fallut attendre le 12ème siècle pour voir émerger les moulins à vent qui ornent encore quelque campagnes actuellement. L'un des perfectionnements majeurs du moulin à vent fut la mise en place du pivot qui permit au bâtiment qui soutient les pales de pivoter afin de se situer toujours face au vent[site 1].



Figure (1-1) : moulin à vent

Chapitre I : Les systèmes éoliens

C'est, en fait, en 1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Dans cet élan, en 1888, Charles F. Brush, un scientifique américain de Cleveland en Ohio, construit la première turbine éolienne capable de produire de l'électricité. Avec un diamètre de rotor de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle est énorme mais la puissance de sa génératrice est seulement de 12 kW.

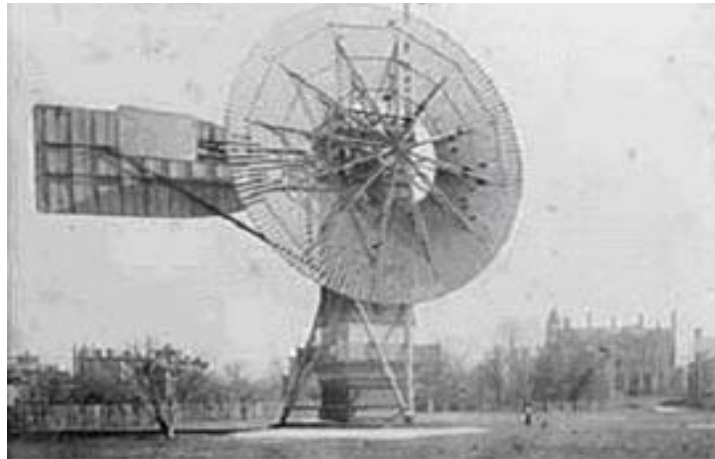


Figure (1-2) : Aéromoteur construit par Charles F. Brush

Ensuite, dès 1891 les travaux du danois Paul La Cour permettent la commercialisation pendant la première guerre mondiale d'aérogénérateurs de petite taille destinés à l'électrification rurale.

C'est au début du 20ème siècle qu'apparaissent les premières éoliennes générant de grande quantité d'électricité. Il y eut alors trois grandes nouvelles innovations:

- en 1931, un prototype soviétique d'une puissance de 100 kW avec un rotor de 30 mètres de diamètre.
- en 1957, l'éolienne de Gedser, éolienne tripale, construite par Johannes Juul avec une puissance de 200kW.

Chapitre I : Les systèmes éoliens

- en 1927 un ingénieur français en aéronautique invente une éolienne à axe vertical, on parle de l'éolienne de type Darrieus.



Figure (1-3) : Eolienne de gedser

En 1973, après la guerre du Yom Kippour, les pays arabes fournisseurs de pétrole réduisent leurs exportations; les pays de l'Europe occidentale et les Etats-Unis prennent alors la mesure de leur dépendance énergétique et essayent de garantir leur autonomie. Certains pays se lancent dès lors dans l'énergie éolienne. Le Danemark qui ne voulait pas du nucléaire couvre aujourd'hui environ 20% de la consommation électrique du pays avec cette source d'énergie[site 1].

En 1977 est mis en place un programme danois dont le but est d'analyser les données fournies par l'éolienne de Gedser. A la même époque, un programme britannique vise à étudier la faisabilité ainsi que le coût d'éoliennes de grande puissance. Le but : concevoir une éolienne de grande puissance dont les caractéristiques pourraient lui permettre d'être utilisée sur les nombreux sites potentiels au Royaume-Uni; malheureusement le projet fut abandonné. De même, un projet similaire fut lancé en Suède mais en vain.

Depuis quelques années les éoliennes terrestres rencontrent une résistance plus forte de la part des populations. Dans ce contexte les éoliennes offshore, c'est à dire placées sur les

littoraux apparaissent comme l'eldorado de cette forme d'énergie. Plus coûteuses à installer, elles bénéficient de vents plus forts et plus réguliers, et leur éloignement par rapport aux populations facilite leur installation.

De plus, les éoliennes de mer produisent beaucoup plus d'énergie que les éoliennes terrestres.



Figure (1-4) : parc d'éolienne offshore

I.3.Quelques notions sur le vent :

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante.

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse[3].

I .1.3.1.Direction et vitesse du vent :

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles

Chapitre I : Les systèmes éoliens

d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression).

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne.

Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude[3].

I.4.Compétition de l'éolien :



Figure (1-5) : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [site 2]

Le potentiel des filières énergétiques renouvelables est sous-exploité. La Figure (1-5) montre que les améliorations technologiques ont favorisé l'installation de l'énergie éolienne qui évolue de manière exponentielle, L'Europe est le leader sur le marché mondial de l'éolien Cette production assure la consommation électrique d'environ 10 millions de personnes.

Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance.
- l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes.
- le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

I.5.Description d'une éolienne :

L'énergie cinétique du vent est captée par les pales afin de la transformer en énergie mécanique, la transformation de cette dernière en énergie électrique.

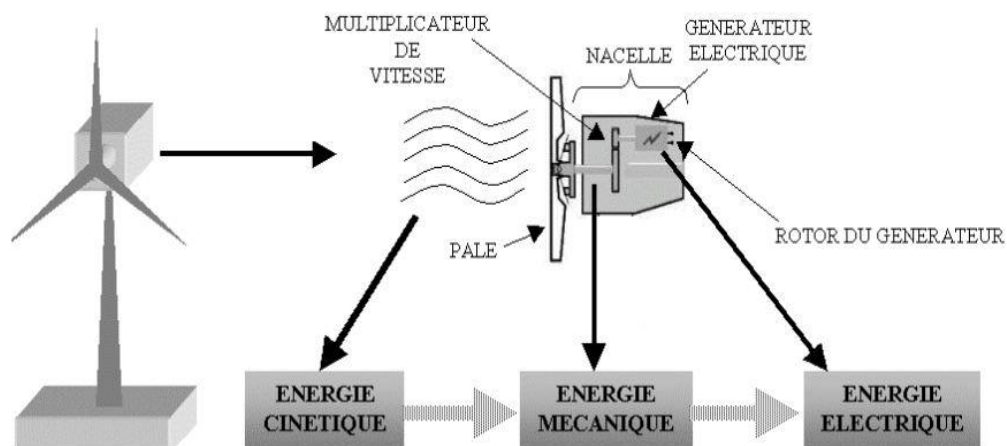


Figure (1-6) : principe de conversion de l'énergie dans une éolienne [12]

I .6.Constitution d'une éolienne :

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois parties nécessaires[site 2]:

I.6.1.Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus Puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m).



Mât en béton



Mât en métal



Mât haubané



Mât en treillis

Figure (1-7) : d'autres types de mâts

I.6.2. Le rotor :

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 90 mètres, la puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [7].

I.6.2.1. Les pales

Les pales ont de l'influence sur la durée de vie et le rendement de l'éolienne. Les pales sont caractérisées par les éléments suivants : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux, et le nombre.

La longueur : La longueur est fonction de la puissance désirée. Elle déterminera aussi la fréquence de rotation maximum. En effet, pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge (le travail en fatigue et les risques), l'hélice ne doit pas dépasser une certaine vitesse en particulier lorsque les pales sont longues.

Largeur : Plus les pales sont larges, meilleur est le couple de démarrage. Cependant pour obtenir des vitesses de rotation rapides, les pales fines et légères sont préconisées. Le choix de la largeur résulte donc d'un compromis entre ces deux aspects.

Chapitre I : Les systèmes éoliens

Les profils : Les profils ont profités des études pour l'aviation ; leurs caractéristiques sont déterminées en soufflerie. Les pales des éoliennes de faible puissance ne sont pas vrillées. Par contre les éoliennes de forte puissance ont la forme d'une hélice.

Les matériaux : La légèreté, le prix, la résistance à la fatigue mécanique, à la corrosion et à l'érosion sont pris en compte dans le choix du matériau constituant les pales. On rencontre les matériaux suivants :

- Le bois : peu coûteux, léger, résiste bien à la fatigue mais sensible à l'érosion. IL est réservé aux petites pales.
- Le lamellé-collé : C'est un empilement de lamelles de bois collées ensemble permettant de réaliser des pales de 6 m ayant une bonne tenue à la fatigue.
- Les alliages d'aluminium utilisés pour des pales de 20 m.
- Les matériaux composites : Permettent la réalisation de toutes les formes et dimension de pales.

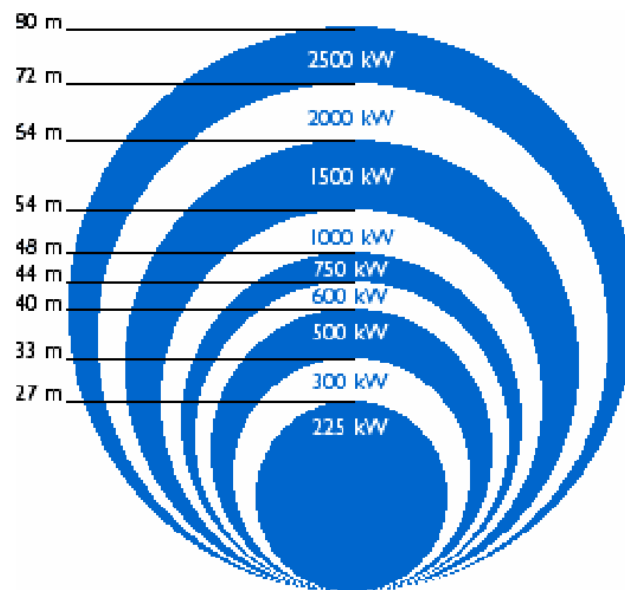


Figure (1-8) : la Puissance des éoliennes en fonction de leur diamètre

La puissance réelle d'une éolienne est souvent bien inférieure. En théorie lorsque l'on double le diamètre d'une éolienne, sa puissance est multipliée par quatre.

Aujourd'hui les éoliennes peuvent atteindre les 5MWh et atteindre plus de 100 mètres de diamètre, ce qui a beaucoup augmenté en 15 ans

Chapitre I : Les systèmes éoliens

▪ Remarque :

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. De ce fait, la force du vent en haut d'une éolienne sera plus importante qu'en bas du rotor. Dans le cas d'une éolienne à une ou deux pales, la variation de la force sur le moyeu est alors importante car lorsqu'une pale est au plus haut (et donc produit le plus), l'autre pale est au plus bas (et produit le moins), obligeant alors la mise en place de systèmes spécifiques. En revanche, l'installation de trois pales permet une compensation de ces différences et une moindre variation de puissance à chaque rotation du rotor.

Voilà l'exemple d'un tableau qui montre la comparaison entre le nombre des pales :

Effet de battement visuel

B (nombres de pales) :	1	2	3	4	5
Equilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Rigidité à la flexion	+	+	=	-	-
Bruit - fatigue	-	-	+	+	+

Charge trop importante par pale
 λ plus élevé => plus de bruit

Corde trop petite,
trop de flexion
(sauf petites tailles)



Tableau (1-1) : la comparaison entre le nombre des pales [15]

Donc, pratiquement toutes les turbines éoliennes installées ou à installer prochainement sont du type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement.

I.6.3. La nacelle :

Elle contient les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine, Le transport de

Chapitre I : Les systèmes éoliens

l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne [7].

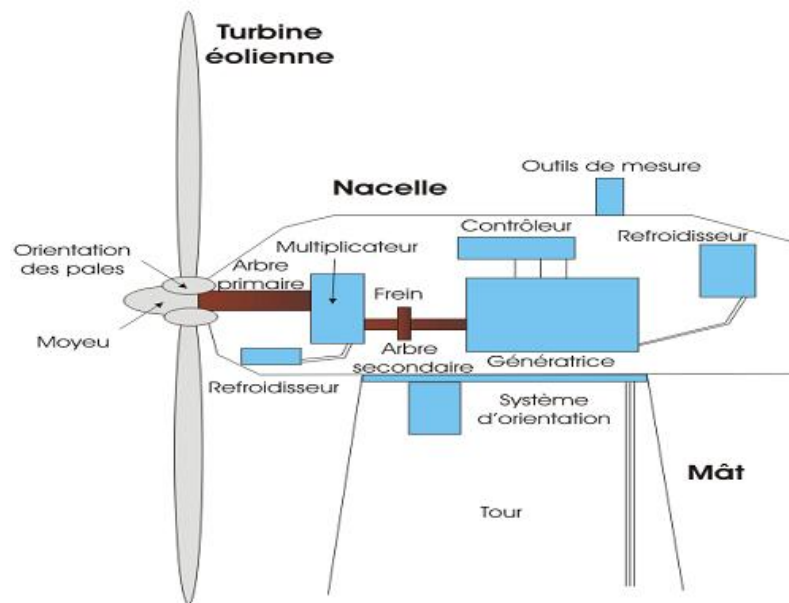


Figure (1-9) : L'architecture d'une nacelle [site 2]

Les différents composants d'une nacelle :

- **Le multiplicateur** : L'arbre principal entraîne le multiplicateur qui par un système complexe d'engrenages va transformer le mouvement lent et puissant de l'axe principal en un mouvement très rapide mais de force plus faible.
- **La génératrice** : est un élément indispensable pour une éolienne, c'est elle qui permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est soit directement sur l'axe de l'aéromoteur, soit entraînée par un multiplicateur.
- **L'arbre principal (ou axe principal)** : Cet axe est directement entraîné par le rotor (principalement par les pales), il tourne à basse vitesse mais avec beaucoup de force (couple fort). Il est relié ensuite à un multiplicateur.
- **L'arbre rapide (ou axe secondaire)** : L'arbre rapide est relié en sortie du multiplicateur, il fait la liaison entre le multiplicateur et la génératrice. Sa rotation est donc beaucoup plus rapide (environ 1500tr/min), mais sa force est bien plus faible.
- **La girouette et l'anémomètre** : La girouette et l'anémomètre permettent de connaître la direction et la vitesse du vent.

- **Le dispositif d'orientation** : est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la girouette et l'anémomètre. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne.
- **Le système de freinage** : Un système de freinage est très important dans une éolienne le dysfonctionnement des freins peut être fatal à l'éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les ingénieurs lors des débuts des éoliennes. Pour des vents trop forts le générateur « s'emballe » et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassant les 90km/h il permet alors d'empêcher le rotor de tourner.
- **Divers dispositifs de refroidissement** : (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.
- **Un ordinateur** : Il permet de gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/sec), de commander le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de la nacelle face au vent. Enfin, il permet de diagnostiquer les éventuelles pannes.

I.7. Le principe de fonctionnement d'une éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en

fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

I.8. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

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

I.8.1. Les avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement **[13]**.
- 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 CO₂. Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne

aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique[site 5].

- 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.
- 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.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace .
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles[14].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article le coût de l'éolienne a diminué 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.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Car elle répond au besoin énergétique de ces pays. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant.
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple[site 6].

I.8.2. Les inconvénients :

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

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif[8].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.

- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien[Site 6].

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.9. Notions Théoriques sur L'aérogénérateur :

I.9.1. Coefficient de Puissance Cp :

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] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.1)$$

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 [site 2].

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.2)$$

Ou :

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer.

R = le rayon de la turbine ou (la longueur d'une pale) en mètre (m) .

Chapitre I : Les systèmes éoliens

V = la vitesse du vent en mètre par second (m.s^{-1}).

Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)}) \quad (1.3)$$

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales et (β) et le ratio de vitesse (λ)

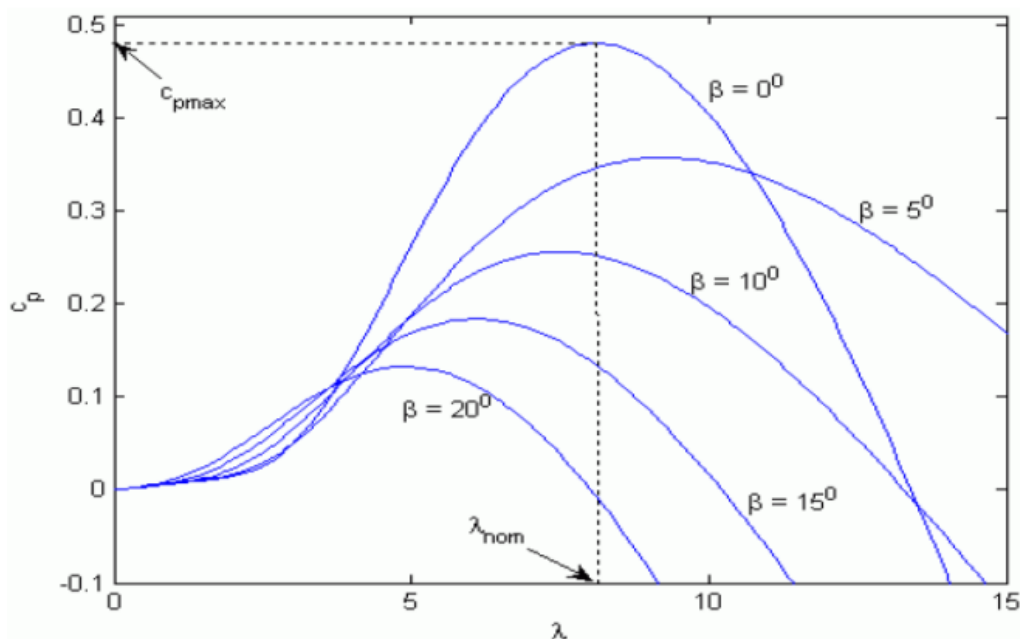


Figure (1-10) : exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et du ratio de vitesse[5]

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la Figure (1-10)) les maximums théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1250 et 2000 tr/min pour cet exemple.

I.9.2.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 :

$$\lambda = \frac{R_t \cdot \Omega_t}{V_{vent}} \quad (1.4)$$

Où Ω_t est la vitesse de rotation d'une éolienne en radians par second (rd.s^{-1}).

I.9.3. Couple Produit par l'éolienne :

Le couple mécanique produit par l'éolienne s'exprime de la façon suivante :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_m \quad (1.5)$$

On appelle coefficient de couple mécanique :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (1.6)$$

I.9.4. La distribution de Weibull :

C'est le modèle général qui décrit les variations de la vitesse du vent. Ce modèle permet d'optimiser la conception des éoliennes pour minimiser les coûts liés à la production d'électricité[Site 3].

Le coefficient de Weibull traduit la distribution des vitesses du vent et déterminé par la courbe de distribution Weibull.

La Fonction de probabilité de densité de Weibull définit par :

$$F(x) = k \cdot c^{-k} \cdot c^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (1.7)$$

La fonction de probabilité de densité de Weibull destinés à refléter la probabilité qu'un événement se produise entre deux points. L'aire sous la courbe entre deux vitesses de vent

supérieures à zéro sera égale à la probabilité que le vent souffle quelque part entre ces deux vitesses. Sur la courbe de puissance ci-contre, nous pouvons déterminer les constantes des paramètres de Weibull $k = 1.751311$ et $c = 5,986052$.

L'aire sous la courbe est définie par :

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (1.8)$$

Dans l'exemple ci-contre, la probabilité pour que le vent souffle entre 3 m/s et 4 m/s est de :

$$F(4) - F(3) = 0.38958 - 0.25788 \text{ soit } 13.17\%$$

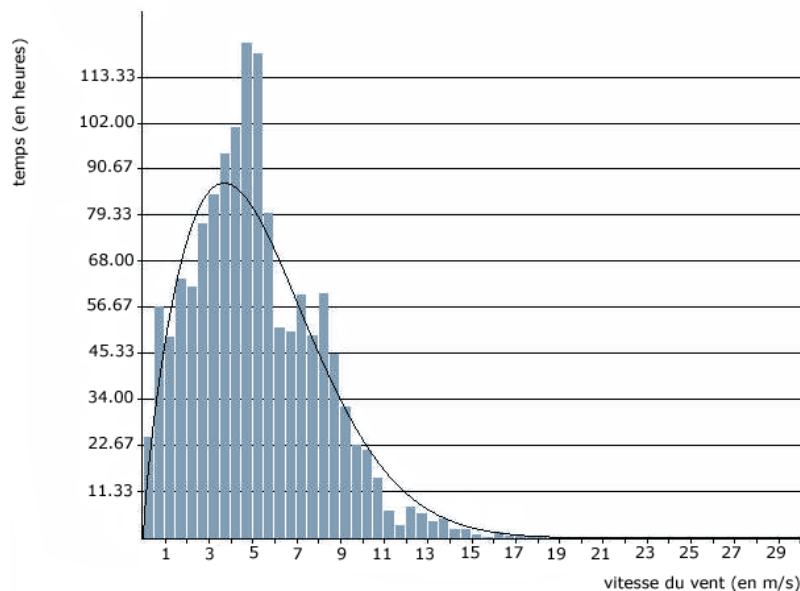


Figure (1-11) : La distribution de Weibull [Site 3]

I.10. Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent :

Les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT),

I.10.1. Eoliennes à axe vertical :

Elles sont très peu mises en jeu de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une

Chapitre I : Les systèmes éoliens

direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre la machinerie au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur) mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteurs car freinés par le relief.

De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor.

Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances.

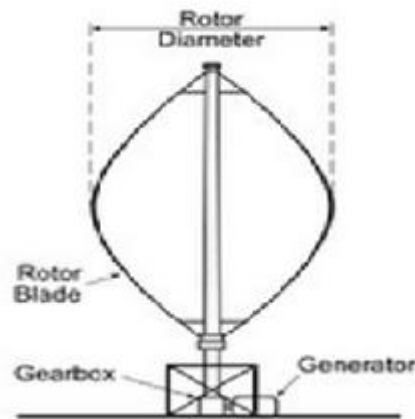


Figure (1-12) : éolienne à axe vertical

En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

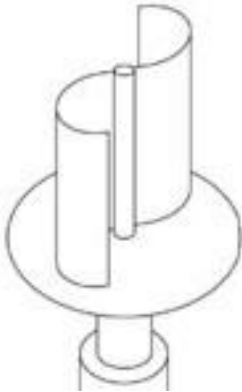
Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- **Eolienne 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

Chapitre I : Les systèmes éoliens

corps creux sont d'intensités différentes Figure (1-13) (a). Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

- **Eolienne 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 Figure (1-13) (b).



Eolienne de Savonius (a)



Eolienne de Darrieus (b)



Eolienne à voile (c)



Eolienne en hélice (d)



Eolienne Windside (e)



Eolienne à rotor vertical (f)

Figure (1-13) : les différents types d'éoliennes à axe vertical [9]

I.10.1.1. Les avantages et les inconvénients d'une éolienne à axe vertical :

I.10.1.1.a Les avantages :

Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivants [site 4]:

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur...etc. à terre.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

I.10.1.1.b. Les inconvénients :

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

I.10.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aéro-dynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

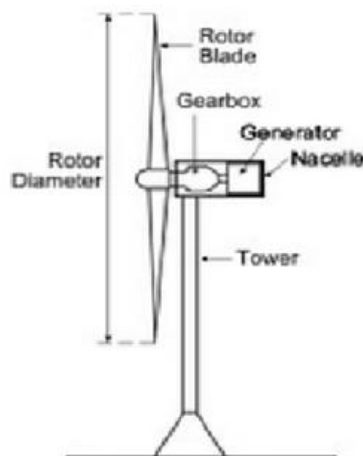


Figure (1-14) : éoliennes à axe horizontal

Chapitre I : Les systèmes éoliens

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères[7].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [8].



Eolienne moderne classique à 3 pales



Eolienne moderne classique à 2 pales



Eolienne de Darrieus horizontale



Zephyreco



Eolienne monopale



Eolienne de pompage

Figure (1-15) : les différents types d'éoliennes à axe horizontal

I.10.2.1. Les Types d'éoliennes à axe horizontal :

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal sont présentés sur la Figure (1.16) :

I.10.2.1.a. Eolienne en 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[6].

I.10.2.1.b. Eolienne en 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.

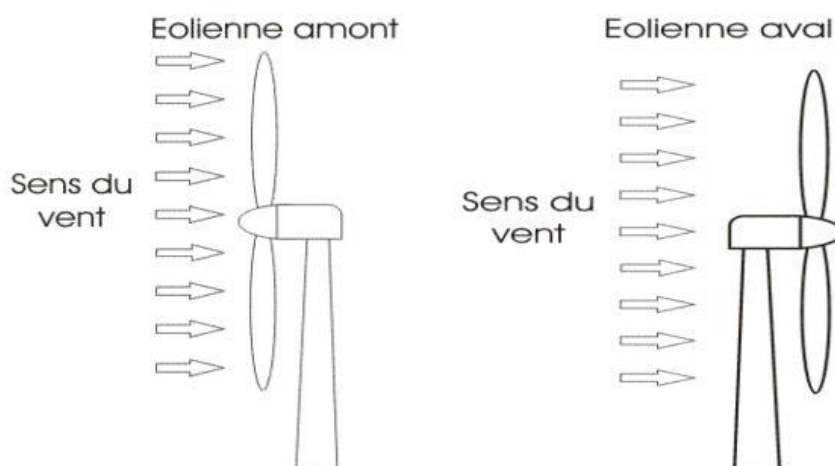


Figure (1-16) : les Types d'éoliennes à axe horizontal[6]

I.10.2.2. Les avantages et les inconvénients d'une éolienne à axe horizontal :

I.10.2.2.a. Les avantages :

- Elle a un rendement très élevé car elle s'adapte à la direction du vent.

- Vu qu'elle est répandue, vous n'aurez pas de mal à trouver les accessoires et pièces de rechange.
- Malgré sa puissance, elle est très silencieuse.

En cas de grosse tempête, vous pouvez descendre l'éolienne grâce à un mât haubané .

I.10.2.2.b. Les inconvénients :

Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale, l'éolienne horizontale doit être renforcée. Ainsi, dans les régions où le risque de vents violents existe, on a recours à des mâts haubanés (l'ancrage est renforcé), et on installe un frein au niveau du rotor.

I.11. Production Optimale d'énergie d'une éolienne:

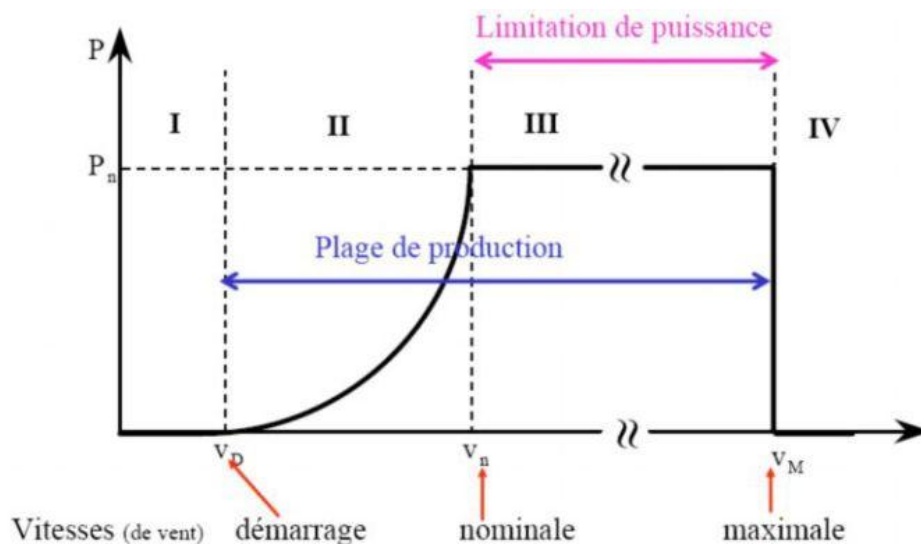


Figure (1-17) : Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [10]

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(1-17). 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.

I.12.Types de régulation de puissance :

I.12.1.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 Figure (1-18)[11].

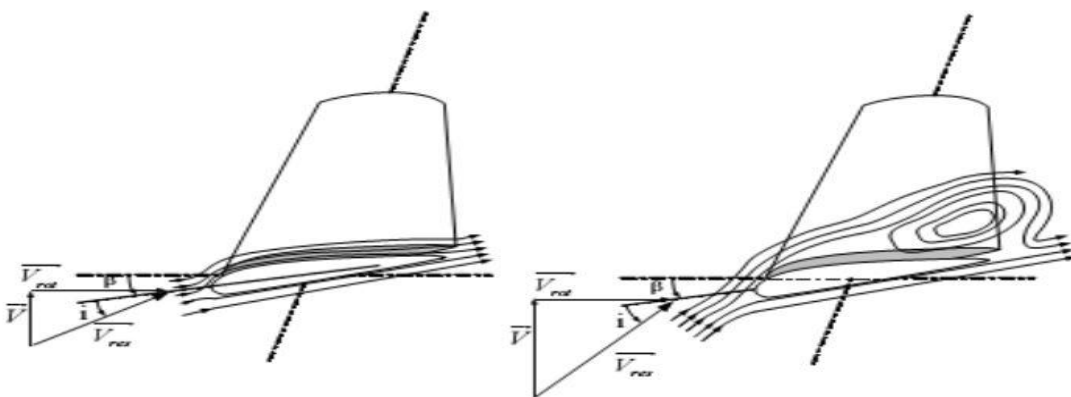


Figure (1-18) : Flux d'air sur un profil de pale "stall" [3]

I.12.2. Système à Décrochage Aérodynamique "Pitch " :

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 Figure(1-19). C'est à dire il me 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[11].



Figure (1-19) : Système d'orientation des pales[site 2]

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

- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

L'auteur a étudié la commande d'une éolienne à vitesse variable avec régulation pitch. La simulation montre qu'il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges

variations de vent, ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grande vitesse et permet également de freiner la turbine si nécessaire.

Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un contrôle stall-actif.

En 2000, environ 60% des aérogénérateurs utilisaient la régulation « stall » mais les grandes machines d'aujourd'hui utilisent presque en exclusivité le contrôle « pitch ».

I.12.3. Système a 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.

I.13. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes éoliens, Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants.