REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : énergie renouvelable
Spécialité : énergie renouvelable en mécanique

Contribution a l'étude d'un système éolien pour la production de l'électricité

Présenté par :

Fergani Mahfoud

Gasmi Larbi

Proposé et Dirigé par :

Dr :Chiba Younes

Promotion 2019

ملخص:

يقدم العمل الحالي محاكاة عددية لنظام الرياح لغرض إنتاج الكهرباء بناءً على الجانب الميكانيكي لتوربينات الرياح. سمح لنا النهج العددي بحساب الكفاءة الديناميكية الهوائية للنظام ، وتستند هذه الدراسة إلى دراسة الظواهر الفيزيائيـة المختلفة من أجل التنبؤ بالكفاءة الميكانيكية لنظام الرياح. يتم تحليل النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة المحاكاة العددية ومناقشتها

الكلمات المفتاحية

طاقة الرياح ، المحاكاة العددية والكفاءة الميكانيكية

Résumé

Le présent travail de master présente une simulation numérique du système éolienne pour la production de l'électricité en se basant sur l'aspect mécanique de l'aérogénérateur. L'approche numérique nous a permis de calculer l'efficacité aérodynamique du système, Cette étude est basée sur étude paramétrique de différentes grandeurs physiques afin de prédire l'efficacité mécanique du système éolien. Les résultats obtenus par la simulation numérique sont analysés et discuté

Mots clés

L'énergie éolienne, simulation numérique, efficacité mécanique.

ABSTRACT

The present master's work presents a numerical simulation of the wind system for the production of electricity based on the mechanical aspect of the wind turbine. The numerical approach allowed us to calculate the aerodynamic efficiency of the system, This study is based on parametric study of different physical quantities in order to predict the mechanical efficiency of the wind system. The results obtained by the numerical simulation are analyzed and discussed

KEYWORDS

Wind energy, numerical simulation, mechanical efficiency

Remerciements

Avant tout, on remercie le bon dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force nécessaire pour mener à terme ce travail.

Après cela, nous voudrions exprimer notre gratitude à M. Chiba pour sa formation, son soutien et sa disponibilité effective. Ici, ils peuvent trouver l'expression de notre profonde gratitude.

En outre, nous n'oublions pas de remercier les enseignants Triki et Henini pour le soutien et les conseils qu'ils nous ont donnés pendant l'absence du professeur chiba dans la sainte Bekaa et l'Omrah, acceptable, si Dieu le veut.

On tient à remercier vivement les membres de nos familles qui nous ont toujours encouragé et soutenu.

On remercie, tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, de même que ceux qui ont participé à notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Enfin, sans oublier on remercie les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à mes chers parents pour leur sacrifice, leur compassion, leur amour, leur patience, leur soutien, leuraide et leurs encouragements, qui sont l'essence même de mon succès. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

À mes chères sœurs et à leurs maris et fils, en particulier les poussins: Nofal, Rimas, Isra, Sereen, AbdelJalil et tous les membres de la famille noble.

À tous mes amis promotion 2019/2018 et les féliciter pour leur diplôme et leur réussite dans leur carrière.

A tous mes collègues de la profession sans exception pour m'aider dans mes études universitaires.

À tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin a la réalisation de ce modeste travail.

À mon cher ami et binôme larbi .

Et mes amis ouanes et yazid

À tous ceux dont les noms m'ont échappé.

Mahfoud

Dédicace

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, L'estime,
le dévouement et le respect que j'ai toujours
eu Pour vous Mon père.
Que
Dieu te garde dans son vaste paradis

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie,
le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour
mon bonheur et ma réussite, à ma mère ...

Que Dieu la garde et protège.
Je le dédie particulièrement a tous les membres de la famille noble.

Enfin je le dédie à mon binôme mahfoud et tout les étudients de promotion 2018 /2019 ,et à touts mes chères amis que je n'ai pas cités.

Larbi

SOMMAIRE

ملخص..... I

Résumé ……..…….……..……I

ABSTRACT …… ….…..……I

Remerciements……..…….……..……..II

Dédicace …….……..….. ……..……..…….……III

Dédicace ……..……..…..……IV

SOMMAIRE…….……V

Liste des figures …… ……...……....…VIII

Liste des tableaux…….……..……X

Liste des symboles ……..……....XI

INTRODUCTION GENERALE ..……. . ..……..……1

CHAPITRE I : Généralité sur les énergies renouvelables

I-1 – Introduction.....4

I-2 - Production des énergies renouvelables dans le monde par région 4

I-3 - Les déférents types d'énergies renouvelables.....5

I-3-a : L'énergie géothermique 5

I-3-b - L'énergie solaire :.....6

I-3-b-1 - L'énergie solaire thermique : 6

I-3-b-2 - L'énergie solaire à effet photovoltaïque : 7

I-3-c- L'énergie Biomasse : 9

I-3-d- L' énergie éolienne : …… 10

I-3-e- L'énergie hydraulique : 11

I-3-f- L'énergie Hydrolienne :.....12

I-3-g- L énergie marémotrice : 13

I- 4 - Autres nouvelles techniques d'énergie de la mer 14

I-4-a- L 'énergie houlomotrice ou énergie des vagues.....14

I-4-b- L'énergie thermique des mers ou énergie maréthermique ou OTEC.....14

I-4-c- L'énergie osmotique des mers.....14

I-5-Conclusion 15

CHAPITRE II : Technologies des éoliennes

II-1 - Introduction 17

II-2 - Historique : 17

II-3 - Définition de l'énergie éolienne : 18

II-4 - Définition du vent : 18

II-5- Direction et vitesse du vent : 18

II-6- Mesure du vent : 19

II-6 - a- Anémomètre : 19

II-6 -b- Girouette : 20

II-7 - L'éolienne dans le monde : 20

II-8 -L'énergie Eoliennes en Algérie : 21

II-8 -a- Potentiel du vent en Algérie : 21

II-8 -b- L'Atlas de la puissance en Algérie : 23

II-9- Aspects Economiques de l'Eolienne : 24

II-10 -Impacts Environnementaux des éoliennes 24

II-11 - définition et description d'une éolienne : 25

II-11 -a- Le principe de fonctionnement d'éolienne: 27

II-11 –b- Principaux composants d'une éolienne : 27

II-11 –c- Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne : 31

II-12 - Les différents Types d'éoliennes: 32

II-12–a- Les éoliennes à axe horizontal: 33

II-12 –b- Les éoliennes à l'axe vertical: 33

II-13 - L'éolienne Darrieus: 34

II-14 - L'éolienne Savonius: 35

II-15 - Eoliennes lentes : 37

II-16 - Eoliennes rapides : 37

II-17– Stratégie de fonctionnement d'une éolienne : 38

II-18 - Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne : 38

II-18- a- Système à décrochage aérodynamique "stall" : 38

II-18- b- Système d'orientation des pales "pitch" : 40

II-19 - Paramètres de classification des capteurs éoliens : 41

II-19- a- La vitesse périphérique : 41

II-19- b- Le coefficient de puissance : 42

II-19- c- Le coefficient du couple :.....42
II-20- Efficacité énergétique des éoliennes :.....42
II-21- Conclusion :.....43

CHAPITRE III : Modèle mathématique

III-1 Introduction.....45
III-2 Energie cinétique du vent– conversion en énergie mécanique.....45
III-3 Limite de Betz.....45
III-4 Performance de l'éolien.....47
III-5 Le couple aérodynamique.....47
III-6-La fonction de distribution de Wei bull.....47
III-7 Puissance d'une éolienne.....47
III-7-a La puissance maximale récupérable.....48
III-7-b Courbe de puissance d'une éolienne.....48
III- 7 –c Puissance utilisable.....49
III-7-d La puissance utile d'une éolienne :.....50
III-8 Conclusion :.....51

CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

IV-1 Introduction.....53
IV-2 Coefficient de puissance et la puissance mécanique.....53
IV-3 L'efficacité mécanique.....57
IV-4 Le couple aérodynamique :.....58
IV-5 La distribution de Weibull.....59
IV-6 La puissance mécanique de l'éolienne.....60
CONCLUSION GENERALE……..…….…… 61
Référence bibliographique ……..……...63

Listes des figures

figures	Titres	pages
Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables		
Figure(I-1)	Production mondiale d'électricité renouvelable par région	4
Figure(I-2)	énergie Géothermique	5
Figure(I-3)	les effets de l'énergie solaire	6
Figure(I-4)	principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique	7
Figure(I-5)	principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque	8
Figure(I-6)	schéma de principe d'une usine biomasse	9
Figure(I-7)	Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique	10
Figure(I-8)	schéma de principe d'une centrale gravitaire	11
Figure(I-9)	L'énergie Hydrolienne	12
Chapitre II : Technologies des éoliennes		
Figure(II-1)	Un anémomètre	20
Figure(II-2)	Une girouette	20
Figure(II-3)	Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010	21
Figure(II-4)	L'énergie éolienne mondiale (MW)	21
Figure(II-5)	Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol	22
Figure(II-6)	Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie	23
Figure(II-7)	Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés	23
Figure(II-8)	Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	26
Figure(II-9)	Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique	27
Figure(II-10)	Tour d'une turbine	28
Figure(II-11)	Rotor d'une turbine	29
Figure(II-12)	Constitution d'une nacelle	30
Figure(II-13)	Technologie éolienne à axe horizontale	33
Figure(II-14)	Présente Différentes formes du rotor de Darrieus	35
Figure(II-15)	L'éolienne Savonius	36
Figure(II-16)	Performance du rotor pour diverses valeurs du rapport e/d	36

Figure(II-17)	Bilan des forces sur une pale	38
Figure(II-18)	Flux d'air sur un profil de pale " stall "	38
Figure(II-19)	La génération à puissance électrique Variable (pales fixe décrochage aérodynamique)	39
Figure(II-20)	Variation de l'angle de calage d'une pale	40
Figure(II-21)	Génération à puissance électrique constante (pâles orientables)	41
Figure(II-22)	Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents types de turbines	42
Chapitre III :Modèle mathématique		
Figure (III-1)	Eolienne simplifiée	46
Figure (III-2)	Courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction des vitesses du vent	49
Figure (III-3)	Représentation schématique des pertes successive de puissance éolienne	50
Chapitre IV : Résultats et interprétations		
Figure (IV -1)(a,b)	Variation du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse spécifique pour différentes valeurs de l'angle de calage	53
Figure (IV -2)(a,b)	Variation du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de vitesse et de rayon	55
Figure (IV - 3)	Variation de l'efficacité mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de vitesse	57
Figure (IV - 4)	Variation du couple aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine	58
Figure (IV - 5)	Fonction de densité de probabilité de Weibull pour différentes valeurs du facteur de forme	59
Figure (IV-6)	Evolution de la puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent	60

Listes des tableaux

Tableau	Titres	Pages
Tableau(II-1)	Échelle Beaufort	19
Tableau(II-2)	Comparaison des émissions des centrales à charbon et à gaz avec les centrales éoliennes	25
Tableau(II-3)	Classification des turbines éoliennes	37

Liste de symboles

Symboles	Définitions	Unités
P	La puissance	[W]
Q	Le couple	[N .m].
C_p	Le coefficient de puissance	_
C_d	Le coefficient de traînée	_
S	La surface balayée par le rotor	[m²]
V	La vitesse du vent	[m/ s]
ω, Ω	La vitesse angulaire du rotor	[rad /s]
R	Le rayon du rotor	[m]
ρ	La densité de l'air	[kg/m^3]
β	L'angle de calage	[deg]
λ	Le rapport de vitesse de pointe ou bien la vitesse spécifique	_
D	Le diamètre	[m]
C	Le facteur d'échelle	_
K	Le facteur de forme	_
η	L'éfficacité mécanique et électrique	_
Les acronymes		
AIE	Agence internationale de l'énergie	
EDF	Électricité de France	
OTEC	Océan thermal energie conversion	
ETM	L'énergie thermique des mers	
BEMT	Théorie de l'élément de pale	

Introduction générale

Les énergies renouvelables se révèlent aujourd'hui, comme sources de production d'électricité vitales, obtenues à partir des gisements inépuisables telle que : « le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau ou encore les marées ». L'avance spectaculaire dans les différents domaines de technologie ces dernières années, ces formes alternatives de production d'électricité deviennent, pour certaines, compétitives par rapport aux combustibles fossiles qui révèlent leur épuisement et leur incidence environnementale (pétrole, gaz, et dans une moindre mesure, charbon et uranium). Les pays en développement produisent (44%) de cette capacité, soit (70 G). L'éolien contribue de façon significative à la production de l'énergie électrique pour certains pays et ce grâce à sa maturité. L'éolien pourrait jouer un rôle clef dans l'évolution de la production d'électricité à base d'énergie renouvelable œuvrant ainsi à la prévention du changement climatique vus qu'elles n'engendrent pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de la production 'électricité. A travers notre étude du sujet, nous nous appuyons sur l'aspect mécanique de l'aérogénérateur pour analyser les différents phénomènes physiques afin de prédire l'efficacité aérodynamique du système éolien pour la production de l'électricité. en plus de certains paramètres liés à la structure de la machine et , tels que le rayon des pales, par simulation numérique et leur discussions . De là, on peut déduire les effets de ces facteurs sur la production d'énergie

Nous avons divisé le travail en quatre chapitres: Dans le premier chapitre, nous avons présenté les généralités sur les énergies renouvelables de différents types et formes et quelques avantages et inconvénients, tandis que dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les technologies de l'énergie éolienne avec une explication du principe de fonctionnement de l'éolienne et de ses types et quelques notions générales. Concernant le troisième chapitre, nous avons fait une modélisation mathématique avec des relations explicatives des phénomènes physiques et des paramètres qui influant sur la production de l'énergie éolienne et les avons expliquées. Dans le quatrième, nous avons extrait certaines des courbes explicatives de certains paramètres affectant la production d'énergie en tant que la vitesse de vent la vitesse spécifique ,vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs des rayons des pales et d'angle de calage, sur la base du modèle mathématique présenté au cours du troisième chapitre et a l'aide de code fortran, nous présentons les résultats obtenus comme preuve des effets des facteurs susmentionnés sur la production d'énergie.

Généralité sur les énergies renouvelables

I-1 – Introduction

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermique …etc . Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux. L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre (elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans.

I-2 - production des énergies renouvelables dans le monde par région

La production d'électricité de l'hydraulique, du vent, du solaire et d'autres sources renouvelables dépassera celle du gaz et sera le double de celle du nucléaire dans le monde en 2016, indique l'AIE dans un rapport sur les perspectives à moyen terme des énergies renouvelables.

La croissance du secteur devrait atteindre un total de 40% au cours des cinq ans à venir, selon l'agence énergétique des pays développés. En 2018, les énergies renouvelables représenteront 25% de la production d'électricité mondiale, contre 20% en 2011 et 19% en 2006, en s'approchant de la barre des 6.000 térawatts/heure annuels, selon l'AIE. [1]

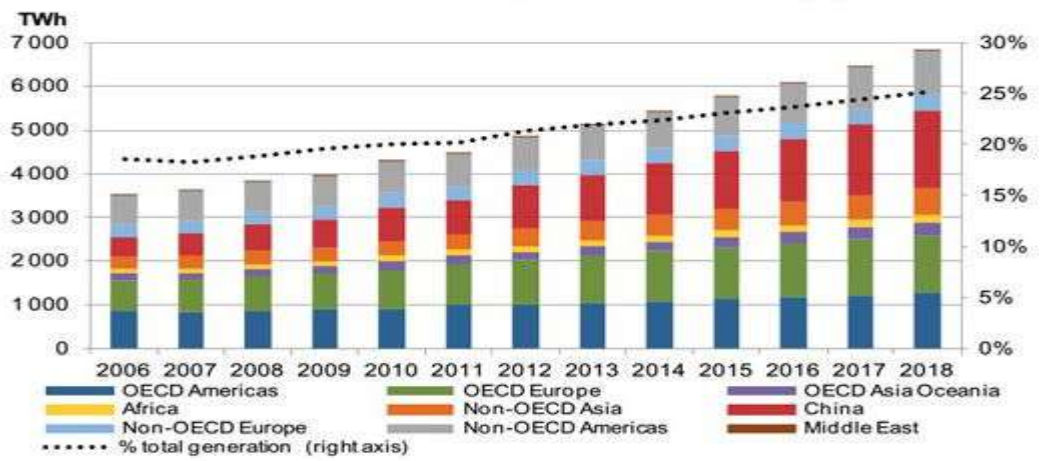
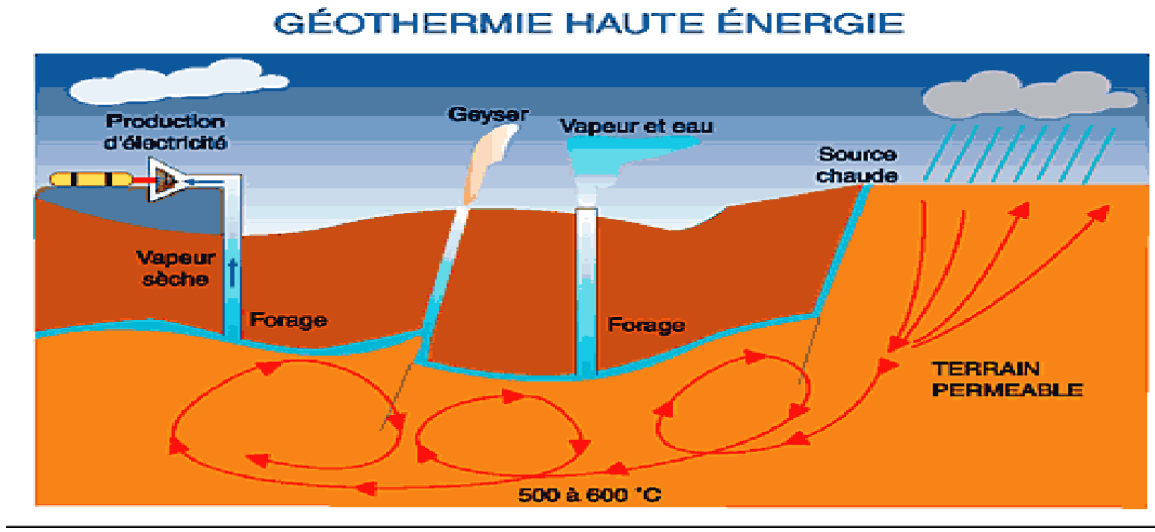


Figure (I-1) : Production mondiale d'électricité renouvelable par région [1]

I-3 - Les déférents types d'énergies renouvelables

I-3-a : L'énergie géothermique

L'énergie géothermique produite grâce à la chaleur de la terre, elle est contenue à l'intérieure de réservoir souterrains de vapeur d'eau chaude et des roches chaudes, est utilisée comme ressource générant de l'électricité, l'eau chaude ou la vapeur extraite des réservoirs géothermiques de la croute de la terre, fait tourner les turbines électriques qui alimentent les générateurs pour produire de l'électricité. [2]



Figure(I-2) : énergie Géothermique[2]

Les installations géothermiques sont de trois types :

- Les pompes à chaleur : elles se servent de l'énergie géothermique de surface pour servir au chauffage.
- Les installations hydrothermales : elles exploitent les sources d'eau naturellement chaude, et servent pour le chauffage ou la production d'électricité (pour les sources en profondeur).
- Les installations pétro thermales : c'est la solution qui peut être utilisée quand il n'y a pas de source thermale. Il s'agit alors de géothermie profonde.

Les avantages

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermique présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni mémé de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse.

Les inconvénients

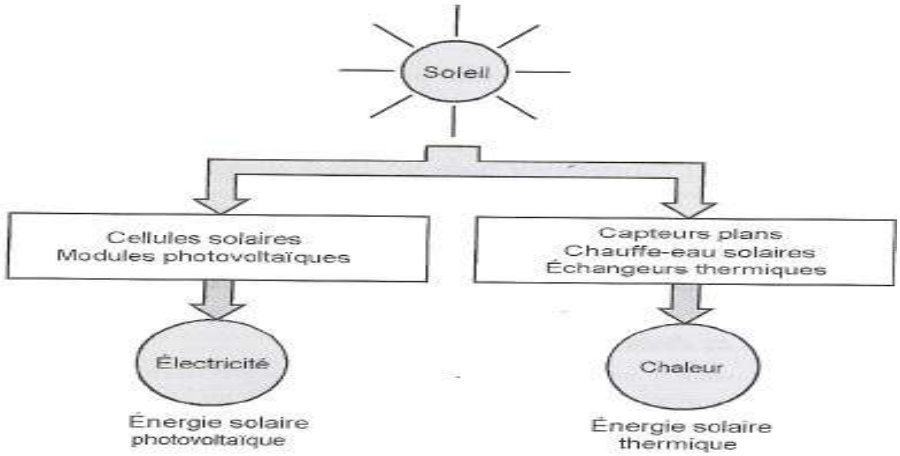
Selon la nature du sol, les couts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le cout d'exploitation est quasiment nul.

Risque de pollution existants sont rejetés a la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol

I-3-b - L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Bien sûr, le soleil nous chauffe et nous éclaire. Alors cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Alors on distingue deux types de l'énergie solaire : l'énergie à effet thermique, et à éffet photovoltaïque. [2]



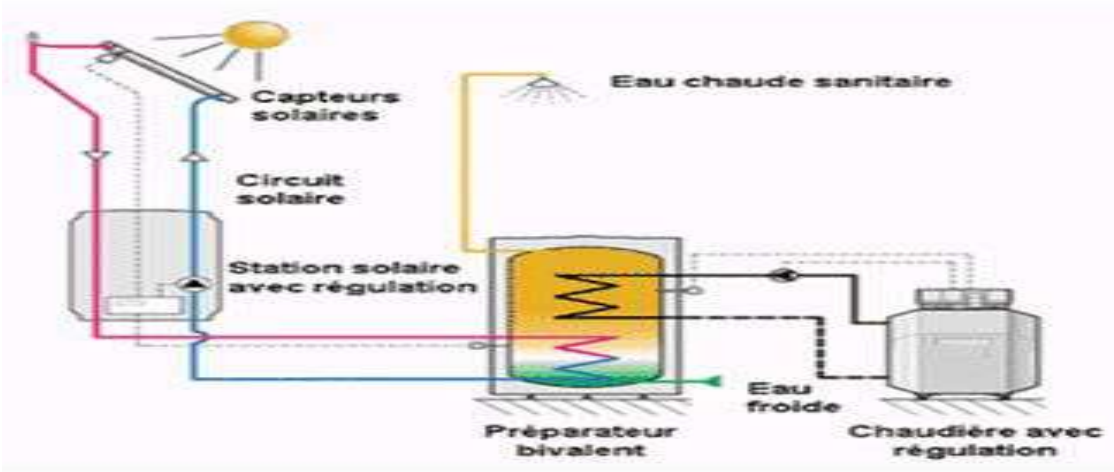
Figure(I-3) : Les éffets de l'énergie solaire[2]

I-3-b-1 - L'énergie solaire thermique

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) , S'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

Les formes d'utilisation finale de cette énergie sont :

- A basse température (30à100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- A moyenne température (100à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation,……
- A haute température (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques [2]



Figure(I-4): Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique[2]

Les avantages

- Rendement élevé (jusqu'a 80%) : on peut récupérer jusqu'à 1200 W/m² de calories
- Permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient maîtriser leurs dépenses telles que les piscines. Source d'énergie inépuisable mais attention les installations s'usent elles...surtout si le montage a été fait à la va-vite .
- Potentiel de développement énorme

Les inconvénients

- Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire sauf si vous disposez d'un plancher chauffant basse température.
- L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds (de 500 à 1500€ le m2 installé).
- Retour sur investissement assez long (un retour de 10 à 15 ans n'est pas rare).
- Durée de vie des panneaux sont généralement limitée à 20 ans.
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...).
- ·Surfacturation du matériel dans bien des cas.

I-3-b-2 - L'énergie solaire à effet photovoltaïque

Le principe de la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique est issu de la découverte par Becquerel en 1839 de l'effet photovoltaïque. Le mot photovoltaïque vient du mot « photo » (du Grec « phos » qui signifie lumière) et du mot « volt »(patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité. [2]

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en utilisant un effet physique de certains matériaux : l'effet photovoltaïque.

Les premières cellules solaires à base de silicium ont vu le jour au milieu des années 1950 et utilisent cet effet photovoltaïque. Lorsque ces cellules solaires illuminées sont raccordées à un circuit extérieur, un courant est alors débité dans ce circuit et l'énergie lumineuse est convertie en électricité. [2]

Figure 1



Figure(I-5): Principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque[2]

Les avantages :

Les installations bien conçues sont fiables, même dans des conditions climatiques très rudes.

La durée de vie des modules photovoltaïques dépasse 20 ans, celle des batteries atteint 8 à 10 ans.

Les systèmes peuvent être conçus pour des puissances très variables.

Le montage est aisé et rapide. Les panneaux sont relativement légers (10 à 15 kg).

Le coût de fonctionnement est faible. La maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.

Les inconvénients

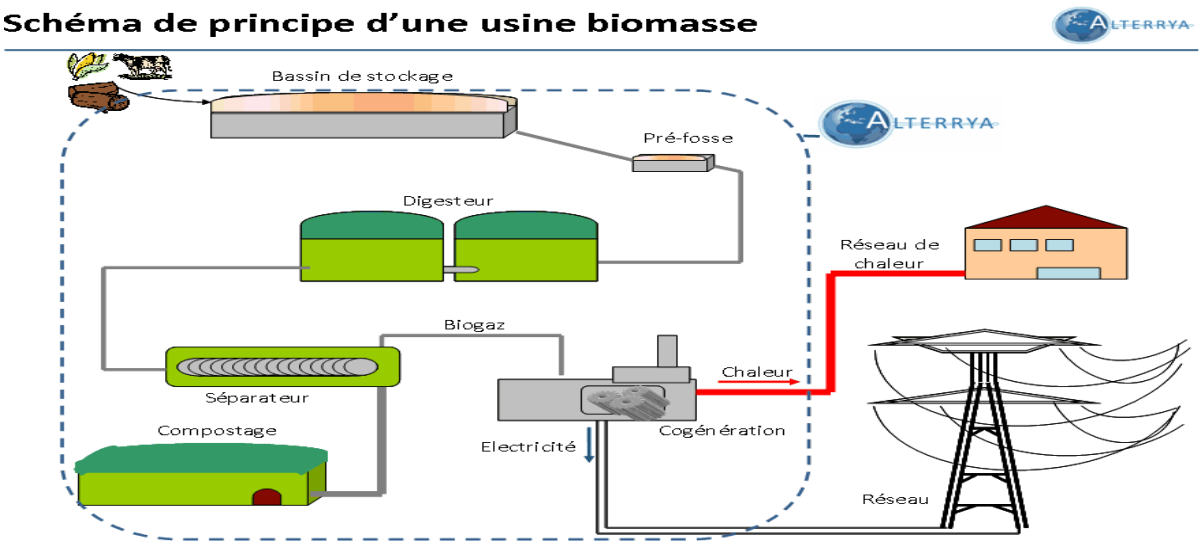
Les seules contraintes sont l'orientation, l'inclinaison et leur disposition par rapport aux masques éventuels.

Les panneaux doivent être orientés en direction de l'équateur. Leur inclinaison par rapport à l'horizontale doit être adaptée à la saison d'utilisation la plus défavorable pour les systèmes autonomes (elle a moins d'importance sur les systèmes connectés au réseau, c'est pourquoi on peut trouver des capteurs en façade ou en toiture à faible pente).

Les investissements sont élevés et le recours à cette technologie impose une analyse très fine des besoins et l'utilisation impérative d'appareils énergétiquement performants.

I-3-c- L'énergie Biomasse

L'énergie de biomasse est produite grâce aux déchets et grâce à la combustion des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, ou après méthanisation (biogaz), et aussi après de nouvelles transformations chimique.



Figure(I-6): Schéma de principe d'une usine biomasse[2]

Les avantages

- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- Biodégradable rapidement
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- Elle dégage autant de qu' $C0_2$elle n'en absorbe (les plantes absorbent du $C0_2$ de la photo synthèse)
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables
- La biomasse est disponible partout
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.
- L'utilisation de la biomasse produite localement réduit notre dépendance vis-à-vis de pays extérieurs pour l'approvisionnement en énergie et améliore notre sécurité d'approvisionnement.
- Les activités de production, de collecte, de conditionnement, de transport et de vente de la biomasse maintiennent et créent de nombreuses activités et emplois directs et indirects dans notre pays, principalement en zones rurales.

Les inconvénients

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Dégage du $C0_2$: Une sur exploitation de la biomasse peut entrainer une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque

I-3-d- L' énergie éolienne : (qui est l'objet de notre étude)

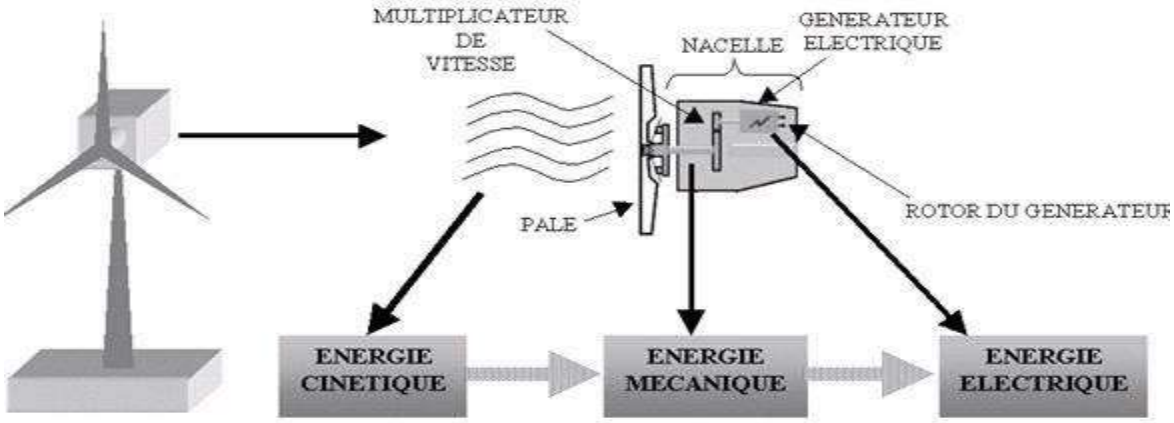
L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à:

-Une énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.

-Une énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage.

Donc L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor: celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être: soit direct, si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.

Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : Soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique. [3]



Figure(I-7) : Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique. [3].

Les avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimes.

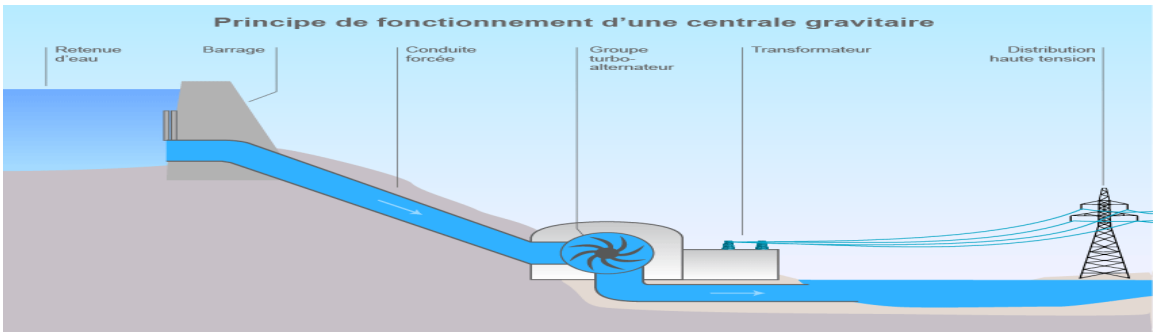
Les inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le cout de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaitre après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

I-3-e- L'énergie hydraulique

Est une source de production d'électricité essentielle, qui fait jeu égal avec le nucléaire au plan mondial. Elle occupe le premier rang des énergies renouvelables. Respectueuse de l'environnement, elle ne participe ni à l'augmentation de l'effet de serre, ni à la pollution de l'air, n'émettant ni $C0_2$, ni gaz polluants. [4]

Cette énergie est produite par une chute d'eau à deux niveaux, l'un étant plus élevé que l'autre, le courant d'eau fait tourner les turbines dont l'énergie alimente les générateurs électriques.



Figure(I-8) : Schéma de principe d'une centrale gravitaire[4]

Les avantages

-Source d'énergie renouvelable.

-Production d'énergie locale.

-Contrôle des inondations.

-Création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations.

Les inconvénients

-Bloque les passes à poissons.

-Modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température).

-Dégrade la qualité d'eau (accumulation de contaminants).

I-3-f- L'énergie Hydrolienne

L'énergie hydrolienne est une nouvelle technologie, appartenant au domaine d'énergies renouvelables et non polluantes, permettant de produire de l'électricité régulièrement grâce à la force des courants marins qui peuvent fournir de l'électricité par des turbines appelées hydroliennes. Cette énergie fonctionne avec le même principe que l'éolienne mais sous-marine.



Figure (I-9): L'énergie Hydrolienne[5]

L' hydrolienne est une turbine sous- marine qui peut se submerger ou qui utilise l'énergie des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur.

Les avantages

-Disponibilité continue tel que Les courants marins se déplacent de façon incessante tout au long de la journée, ce qui permet de fournir une capacité constante de production d'électricité.

-L'énergie hydrolienne ne crée pas d'émissions de gaz à effet de serre ou de polluants pour l'eau.

- Elle ne génère pas de bruit ni de nuisance particulière.

-Après l'installation des turbines, il y a juste quelques frais d'exploitation et de main-d'œuvre, à moins d'une panne dans le dispositif. Une fois l'investissement de départ amorti, c'est une énergie quasi gratuite qui est produite.

-Aucune ressource matérielle n'est utilisée ou modifiée dans la production de l'énergie hydrolienne, ce qui en fait une forme d'énergie inépuisable.

-Les dispositifs du système sont complètement immergés dans l'eau, bien au large. Cela réduit la défiguration du paysage qui a été associée aux éoliennes offshore.

-L'énergie hydrolienne convertit environ 80% de l'énergie cinétique en électricité, par opposition au charbon et au pétrole qui ne convertissent que 30% de l'énergie qu'ils contiennent. [5]

Les inconvénients

-De fortes tempêtes océaniques ainsi que la corrosion de l'eau salée, mais également la présence d'algues autour des hélices, tout cela peut endommager les appareils. Des travaux de maintenance sous l'eau doivent être effectués de façon régulière.

-Certains poissons pourraient être blessés par les lames des turbines ouvertes. La fixation au sol des hydroliennes pourrait également perturber l'habitat de différentes plantes et vies sous-marines.

-Le temps d'amortissement des coûts d'installation des hydroliennes et des lignes électriques sous-marines pourrait s'avérer très long. Un investissement prohibitif qui dissuadera plus d'une entreprise. [5]

I-3-g- L énergie marémotrice

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant). Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil.

Contrairement aux hydroliennes qui captent l'énergie cinétique des courants de marée, le principe d'une centrale marémotrice s'appuie sur une énergie potentielle : Cette source d'énergie utilise le marnage pour produire de l'électricité en exploitant la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage. La centrale de la Rance en Bretagne a été la première grande centrale marémotrice dans le monde et longtemps la plus puissante avec une capacité installée de 240 MW. [6]

Un bras de mer ou un estuaire en zone de fort marnage est équipé d'une infrastructure qui met en œuvre des turbines de basse chute actionnées par le flux d'eau de mer entre les deux

bassins (situés à des niveaux différents).Les conditions naturelles favorables à l'implantation de sites marémoteurs sont :

- Un marnage supérieur à 5 mètres, idéalement entre 10 et 15 mètres ;
- Une profondeur de 10 à 25 mètres sous les basses mers ;
- Un substrat rocheux (ou sablo-graveleux) pour fixer les fondations de l'infrastructure. [6]

Les avantages

-L'énergie marémotrice est un bon moyen pour produire de l'électricité car c'est une énergie renouvelable, propre et naturelle (non polluante).

- Cette énergie est inépuisable et n'est pas soumise aux aléas climatiques contrairement à l'énergie solaire et éolienne.

- Les usines marémotrices peuvent donc être une des solutions contre le danger de radioactivité des centrales nucléaires. Donc l'énergie marémotrice est une énergie renouvelable et sans danger sur l'environnement.

Les inconvénients

Les investissements pour une usine marémotrice sont énormes. Une usine marémotrice ne peut pas être construite par hasard. Les usines demandent de grands espaces et une bonne composition du sol. La construction de barrage peut perturber les habitants, les pêcheurs.La construction de l'usine provoque des modifications dans l'écosystème du fleuve. [7]

I-4-Autres nouvelles techniques d'énergie de la mer

I-4-a- L 'énergie houlomotrice ou énergie des vagues

L'énergie houlomotrice ou énergie des vagues désigne la production d'énergie électrique à partir de la houle, c'est-à-dire à partir de vagues successives nées de l'effet du vent à la surface de la mer et parfois propagées sur de très longues distances. Il existe différents dispositifs pour exploiter cette énergie. De nombreux systèmes sont actuellement à l'étude, certains sont déjà commercialisés mais aucun n'est arrivé au stade de la maturité industrielle.

I-4-b- L'énergie thermique des mers ou énergie maréthermique ou OTEC

Océan Thermal Energie Conversion: L'énergie thermique des mers (ETM) ou énergie aérothermique, appelée « Océan Thermal Energy Conversion » (OTEC) en anglais, consiste à exploiter le différentiel de température des océans entre les eaux de surface et les eaux profondes afin de produire de l'électricité. [7]

I-4-c- L'énergie osmotique des mers

L'énergie osmotique désigne l'énergie exploitable à partir de la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce, les deux natures d'eau étant séparées par une membrane semi-

perméable. Elle consiste à utiliser une hauteur d'eau ou une pression créée par la migration de molécules d'eau à travers ladite membrane. La pression d'eau en résultant assure un débit qui peut alors être turbiné pour produire de l'électricité. [7]

I-5-Conclusion

Aujourd'hui, l'électricité et omniprésente dans notre quotidien dans les maisons les entreprises les moyens de productions actuels de l'électricité sont divers et variés aussi bien que les méthodes d'utilisation mais celle-ci fait tellement partie de nos habitude qu'elle nous et indispensable à l'échelle humaine qu'économique. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté quelques sources permettant la production d'énergie pure sans causer de pollution pour l'environnement et qui contribueraient à la production d'électricité de manière moderne. Comme La consommation d'énergie ne cesse d'augmenter, il semble que les énergies renouvelables remplaceront les autres ressources énergétiques dans un avenir proche.

Technologies des éoliennes

II-1 - Introduction

Avec la croissance des industries et par conséquent avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le problème des énergies renouvelables est un sujet d'actualité. C'est pour cette raison, que nous allons ici nous intéresser à un des outils permettant de produire une énergie renouvelable: Les éoliennes. En effet, elles sont aujourd'hui de plus en plus répandues dans le monde, et plus particulièrement en France. Le secteur de l'industrie et de la technologie des éoliennes a été d'un grand intérêt ces dernières années, en particulier dans les pays développés, notamment les pays européens, pour améliorer leur rendement et produire une électricité abondante.

Dans ce chapitre, nous présentons le concept d'énergie éolienne et le principe de fonctionnement de l'éolienne et de ses types, ainsi que l'explication de certains des phénomènes qui les affectent et qui jouent un rôle important dans la production énergétique.

II-2 - Historique

Depuis l'Antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisée pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier... ou relever de l'eau). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail. Historiquement, on note que c'est en 1888 qu'un certain Charles F. Brush construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est mise au point par le Danois Poul Lacour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908. En France, une éolienne expérimentale de 800 kVA était mise en fonctionnement de 1955 à 1963, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF. Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint-Rémy-des-Landes (Manche). En Algérie, une éolienne fut montée sur les hauteurs d'Alger (Dély Ibrahim) en 1957.

Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que le Danemark relance les activités dans les installations d'éoliennes. [8][9]

II-3 - Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif [10]

Un aérogénérateur, appelé souvent éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. D'un premier regard, le processus parait simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuse discipline scientifique et du savoir faire de la météorologie à l'écologie [10]

II-4 - Définition du vent

Le vent correspond au déplacement d'une masse d'air consécutif à des différences locales de température et de pression. D'une légère brise à une forte tempête, la vitesse et l'amplitude géographique des vents peuvent être très variables dans l'espace et dans le temps. L'homme l'utilise aujourd'hui comme source d'énergie : l'éolien [11]

II-5- 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 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). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau (II-1) [12].

Degrés Beaufort	Vitesse de vent (m/s)	Description général	Pression sur surface plane (de N/m^2)
0	0à0.4	calme	_
3	3.5à5.5	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5à8	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4à13.9	Vent frais	22(13 m/s)
8	17.4à20.4	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4à32.5	Violente tempête	117(30 m/s)
17	54.0à60	cyclone	470(60 m/s)

Tableau (II-1) : Échelle Beaufort[12].

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. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à10m/s [12].

II-6- Mesure du vent

Pour évaluer l'énergie disponible, il faut disposer de données sur les vents de la région, et de manière plus précise au lieu d'implantation exact de la machine. La puissance récupérable étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Il existe des outils simples pour mesurer et surtout enregistrer la vitesse des vents sur une assez longue période, car il y a souvent l'avantage de vent en hiver qu'en été. On utilise alors un anémomètre et une girouette, reliés à un système électronique qui affiche ou enregistre les données. Ces deux appareils sont installés en haut d'un mât dont la hauteur correspond la hauteur moyenne de l'éolienne [13].

II-6 - a- Anémomètre

Fournit le module du vecteur vent (vitesse ou force du vent), on l'exprime en mètre/seconde ou en nœud (1 nœud = 0.515 m/s). Il existe plusieurs types d'anémomètre (à ultrason ou à laser, à fil chaud) mais l'anémomètre le plus utilisé c'est l'anémomètre à coupelle (moulinet) : Il est muni d'un rotor de trois coupelles en métal ou en plastique qui

sous l'effet du vent se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse est enregistrée électroniquement [13].



Figure(II-1) : Un anémomètre. [13].

II-6 -b- Girouette

Permet d'indiquer la direction du vent. Celle-ci est fixée sur un axe vertical à la base Duquel se trouve une rose des vents [13].



Figure(II-2) : Une girouette[13]

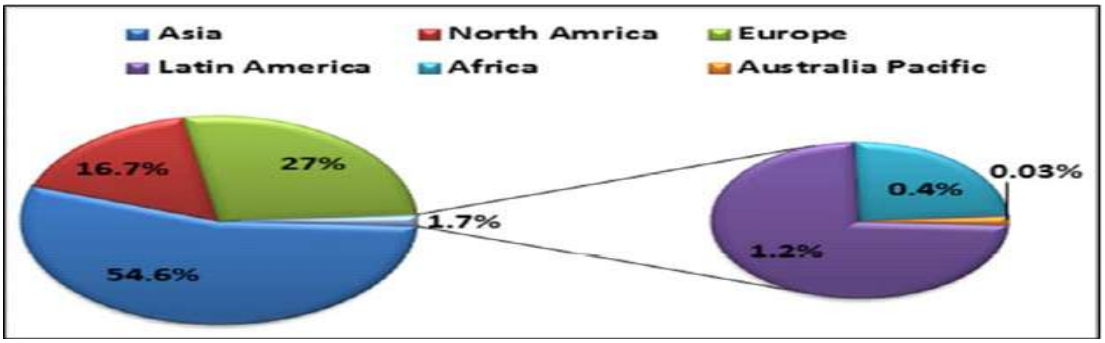
II-7 - L'éolienne dans le monde

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à l'effet de serre.

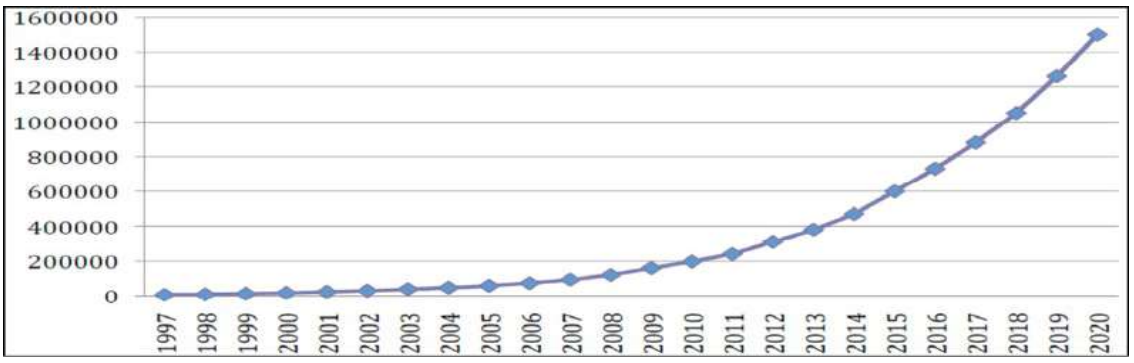
Cet accord a participé à l'émergence des politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies, car les éoliennes n'émettent pas le dioxyde de carbone. [14]

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.



Figure(II-3): Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010 [14].



Figure(II-4): L'énergie éolienne mondiale (MW) [15]

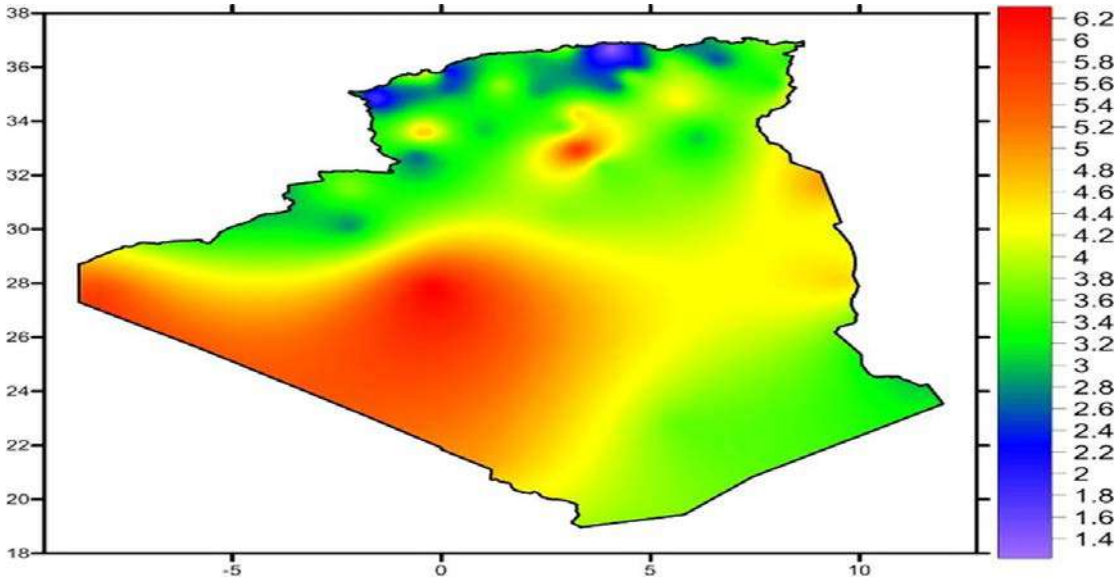
II-8 -L'énergie Eoliennes en Algérie

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés en 1984, suivis en 1985, en 1990, en 1994 et 2002. [16]

II-8 -a- Potentiel du vent en Algérie

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.2 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune). On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour

d'Oran, In Amenas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni- Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s).

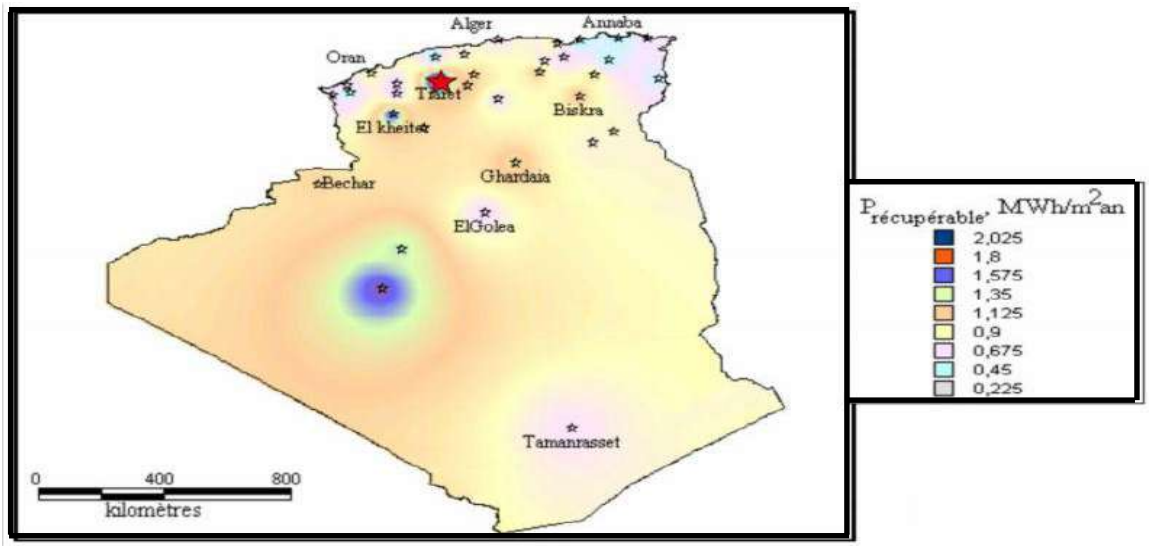


Figure(II-5): Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol. [17]

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses du vent variantes de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.2 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tindouf et Oran. [17]

II-8 -b- L'Atlas de la puissance en Algérie

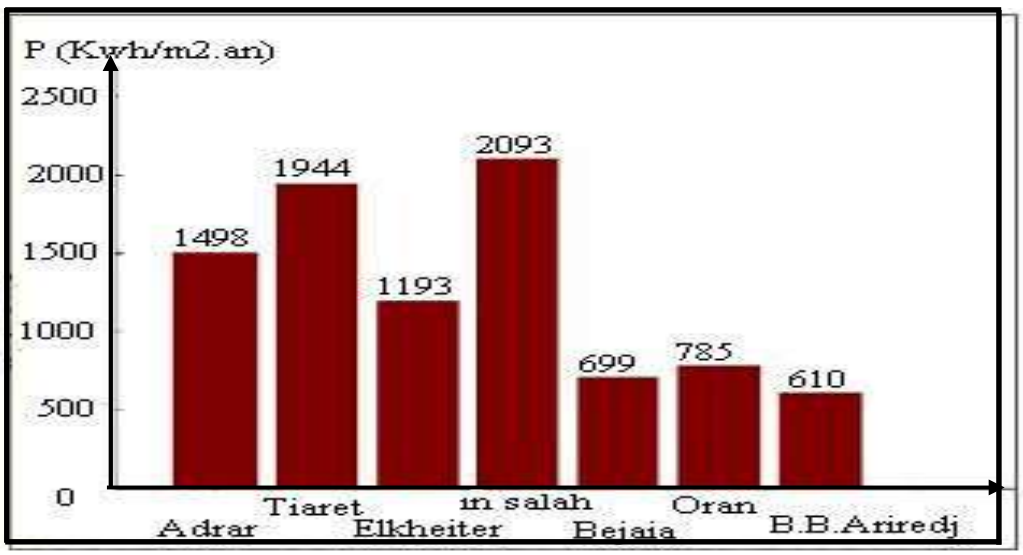
La figure ci-dessous (Figure II-6) représente l'atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m d'altitude en Algérie. [18]



Figure(II-6): Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie. [18]

La figure suivante représente une comparaison des puissances entres les sites ventés en Algérie

.



Figure(II-7): Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés[18]

II-9-Aspects économiques de l'éolienne

Vu les effets négatifs des carburants conventionnels sur l'environnement et leur disponibilité limitée ainsi que les questions de sûreté se sont associées à l'utilisation de l'énergie nucléaire, Les énergies renouvelables ne doivent pas être regardées d'un point de vue économique seulement. Cependant, ceci ne signifie nullement l'utilisation des sources d'énergies renouvelables "à tout prix".

En effet, les prix de exorbitants de l'énergie ne sont pas acceptables pour l'industrie ou à l'économie en général. La profitabilité pour l'entreprise industrielle et pour l'économie nationale sont des aspects déterminants dans l'adoption d'une stratégie énergétique.

Concernant l'énergie éolienne, deux aspects sont à prendre en considération. D'une part, il y' a l'application directe (individuelle) de l'énergie éolienne par le consommateur où le prix à la consommation reviens moins chère en comparaison aux autres formes de génération de l'énergie électrique fournies par les distributeurs traditionnels de la puissance. Ceci est d'autant plus vrai si l'emplacement est approprié pour justifier l'investissement dans l'installation du système éolien. D'autre part, il y'a la génération et la distribution de l'énergie électrique par les grandes compagnies (SONELGAZ par exemple). Dans ce cas, beaucoup de paramètres et de contraintes économiques influencent les coûts de production de l'électricité. Ce sont ces contraintes économiques 'dures' qui ne permettent pas encore une utilisation profitable d'énergie éolienne à grande échelle.

Cependant, le potentiel de développement des turbines à vent indique que les chances pour la production d'électricité à partir des ressources éolienne pour devenir concurrentielles avec les centrales conventionnelles sont tout à fait bonnes.

II-10 -Impacts environnementaux des éoliennes

Ce paragraphe passera en revue les aspects environnementaux liés au déploiement d'une simple turbine à vent ou d'une ferme éolienne. En effet, le développement de l'énergie éolienne a des incidences tant positives que négatives sur l'environnement.

Du côté positif, l'énergie éolienne est généralement considérée comme amicale à l'environnement, particulièrement quand les effets sur l'environnement des émissions à grandes échelles des centrales électriques conventionnelles à grande échelle sont considérés. Par exemple, des évaluations des émissions (des oxydes de soufre et d'azote, des substances particulaires, et anhydride carbonique) des centrales à charbon et des centrales à gaz par

rapport à ceux des systèmes éoliens (zéro dans tous les cas) sont montrées dans le tableau(II-2) ci-dessous. [19]

Polluant	Charbon conventionnel Kg/MWh	Gaz conventionnel Kg/MWh	Vent
Oxydes de soufre	**1.2**	**0.004**	**0**
Oxydes d'azote	**2.3**	**0.002**	**0**
Particules	**0.8**	**0.0**	**0**
Anhydride carbonique	**865**	**650**	**0**

Tableau(II-2) : Comparaison des émissions des centrales à charbon et à gaz avec les centrales éoliennes[19]

Les émissions produits par les systèmes éoliens sont essentiellement zéro, bien qu'il y ait des émissions indirectes liées à la production réelle des turbines à vent et à la construction des systèmes éoliens en générale. Des évaluations des émissions indirectes des systèmes éoliens (en Allemagne) sont présentées dans l'exposé synoptique d'Ackerman et de Soder [19], où les valeurs d'émissions s'avèrent généralement petites (un ou deux ordres de grandeur moins que ceux des centrales conventionnelles).

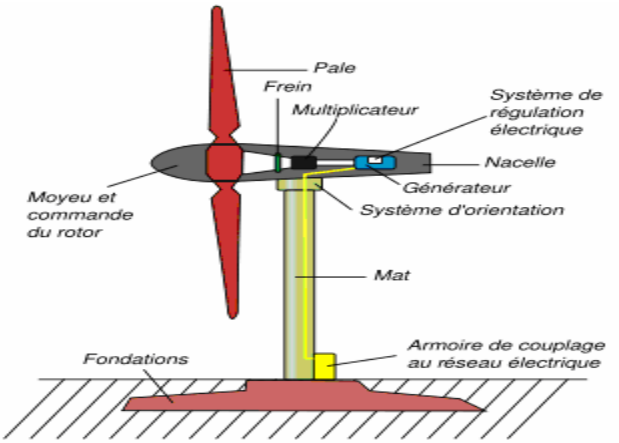
Sachant qu'il est difficile de mesurer le coût global à la société des divers polluants émis par les centrales conventionnelles, les avantages environnementaux de la puissance éolienne sont, généralement, calculés par les émissions évitées.

Les impacts négatifs potentiels de l'énergie éolienne peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

- Impact visuel des turbines éoliennes.
- Bruit des turbines éoliennes (non-négligeable).
- Effets d'interférences électromagnétiques des turbines.
- Impacts d'utilisation du territoire pour l'implantation des systèmes éoliens.

II-11 –définition et description d'une éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique [20].



Figure(II-8): Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur[20].

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le Phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol. s'agissant du mât , il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine , des Fondations, Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur…
Pour qu'une éolienne produise, quelques notions importantes diapositives plusieurs éléments doivent être pris avant l'installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins, il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet.

L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation…) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps.

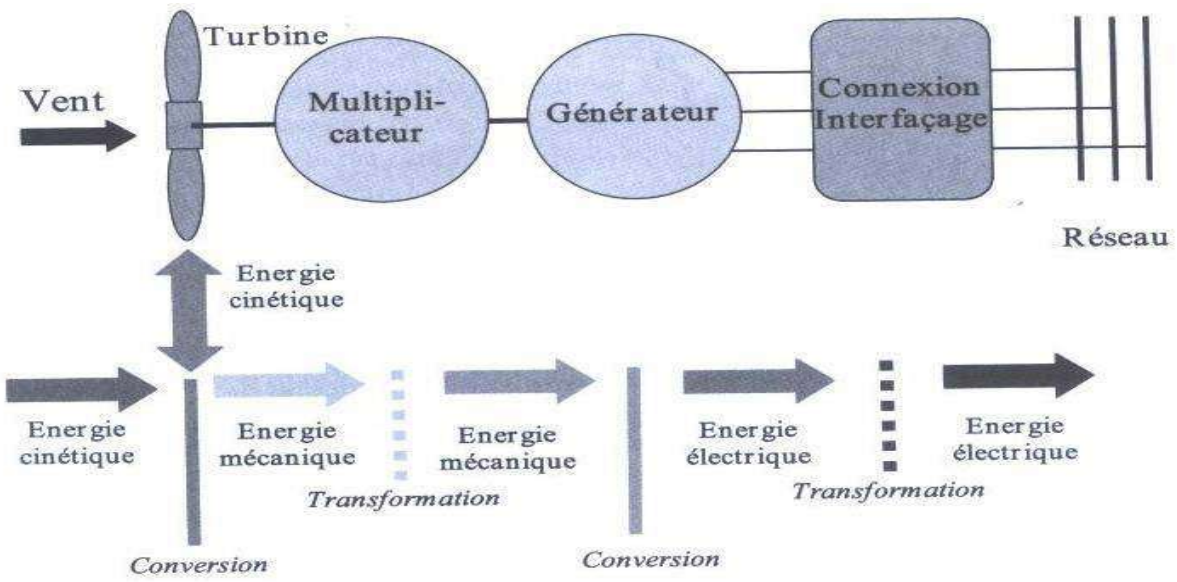
Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée.
Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques.
Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de

nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [21]

II-11 -a- Le principe de fonctionnement d'éolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor: celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être: soit direct, si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. [22].

Et la figure ci-dessous montre la conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique.



Figure(II-9): Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique[22].

Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique.

II-11 –b- Principaux composants d'une Eolienne

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

Le mât : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons…Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [23].



Figure(II-10) : Tour d'une turbine. [23].

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

Un rotor : composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre du rotor [23].



Figure(II-11) : Rotor d'une turbine[23].

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface **A** d'un disque circulaire est égale à:

$$A = \pi r^2 \qquad \text{(II.1)}$$

Où **r** est le rayon du disque circulaire, et π est (***pi* = 3,1415**...).

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu**,** elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

- Les rotors à vitesse fixe :

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

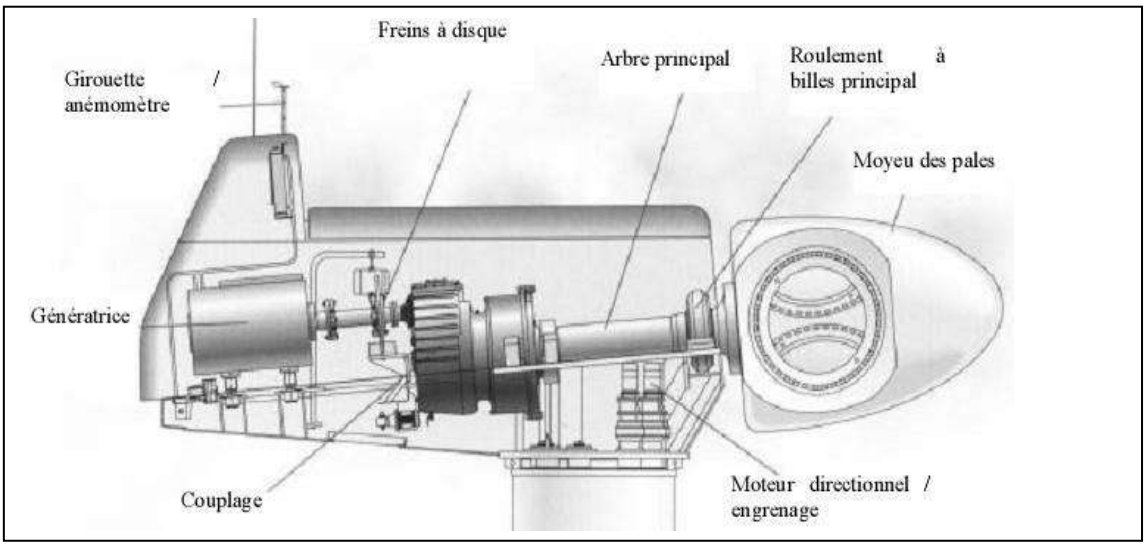
Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

- Les rotors à vitesse variable :

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

une nacelle : montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne [23].



Figure(II-12) : Constitution d'une nacelle[23].

Les différents composants d'une nacelle :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre Primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet D'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter L'emballement de la machine.
- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il S'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage De la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de Manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes Tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles Pouvant survenir.

- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, Radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.
- Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter L'intégralité de l'énergie produite. [23].

II-11 –c- Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

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

Les avantages

- L'énergie éolienne est une énergie propre, fiable, économique, écologique, gratuite et inépuisable.
- on ne peut pas envisager de remplacer totalement les ressources traditionnelles d'énergie.
- L'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO2, etc. ….
- Parmi toutes les sources de la production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ils ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable aux nombreuses d'autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables, le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant. [24]

Les inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :

- L'impact visuel : Cela reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les études réalisées montrent une réelle acceptation par les populations voisines ou visitant d'un site éolien.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas donc toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [24].

II-12 – Les différents types d'éoliennes

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique. Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître des groupes, des noms et des formes de ces capteurs. Généralement, on classe les capteurs éoliens selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière deux types d'éolienne :

- les éoliennes à l'axe horizontal.
- les éoliennes à l'axe vertical.

II-12–a- Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à l'axe horizontal sont des machines actuellement les plus répandues à cause de leur bon rendement. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, des hélices multiples pour le pompage de l'eau. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent. Ce type d'éolienne nécessite un gouvernail qui lui permettra de suivre la direction du vent, ce qui va alourdir la machine et augmente son encombrement. [25]



Figure(II-13): technologie éolienne à axe horizontale [25] .

Les avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à l'axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc il est plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Les inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

II-12 –b- Les éoliennes à l'axe vertical

Ce type d'éolienne se caractérise par leur axe de rotation qui est perpendiculaire à la

direction d'incidence du vent. Les éoliennes à axe vertical présentent des qualités particulièrement intéressantes pour des échelles de production d'énergie plus modestes. D'autre part, ce type d'éolienne permet l'emplacement des générateurs sur terre, ce qui facilite fortement les opérations de maintenance et procure une souplesse de fonctionnement.

➢ **Les avantages:**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

➢ **Les inconvénients:**

- Elles sont moins performantes que celles à l'axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour. [25]

Il existe deux familles d'éoliennes à l'axe vertical :

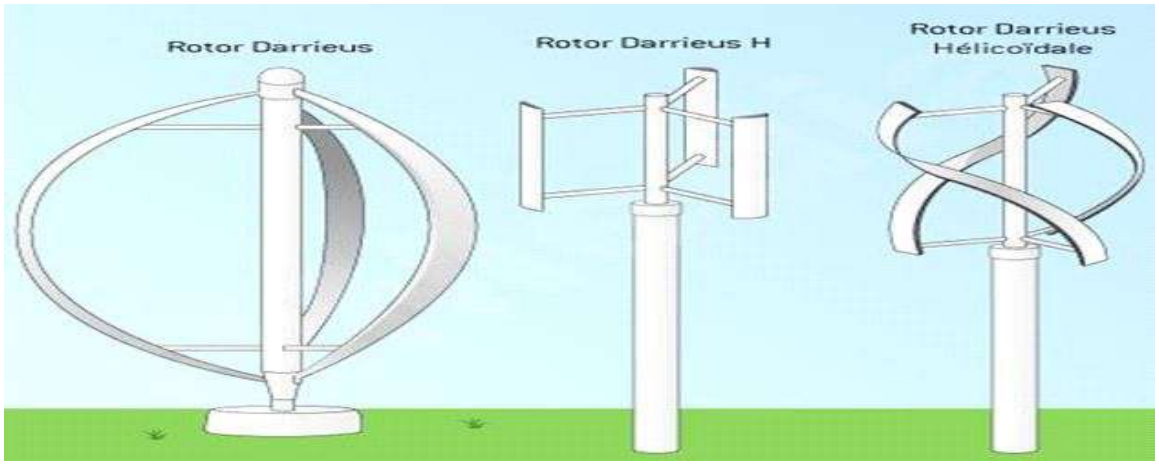
II-13 - L'éolienne Darrieus

L'éolienne de Darrieus, du nom de l'ingénieur français Georges Darrieus qui breveta sa conception en 1931, est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Il se présente sous deux formes principales, qui fonctionnent selon le principe de la différence des forces de portance produites par les efforts aérodynamiques agissant sur les aubes. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer qu'à vitesse du vent assez grande. Lorsqu'elle démarre sa vitesse de rotation peut être importante puisque la vitesse du vent apparent s'ajoute à la vitesse de bout de pale pour des configurations déterminées. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances importantes, n'a pas connu de développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée ce qui incite à le prendre en considération dans ses futures recherches. Toutefois, ce type d'éoliennes permet de fournir une grande quantité d'énergie.

Ainsi, la vitesse de rotation obtenue peut être importante pour ce type, puisque la vitesse

du vent apparent s'ajoute à la vitesse de bout de pale pour des configurations déterminées.

- Exploite la force de portance.
- Coefficient de puissance max = 35-40%.
- Vitesse spécifique optimale = 4 à 6.
- Vitesse de démarrage = 4-5m/s. [26]

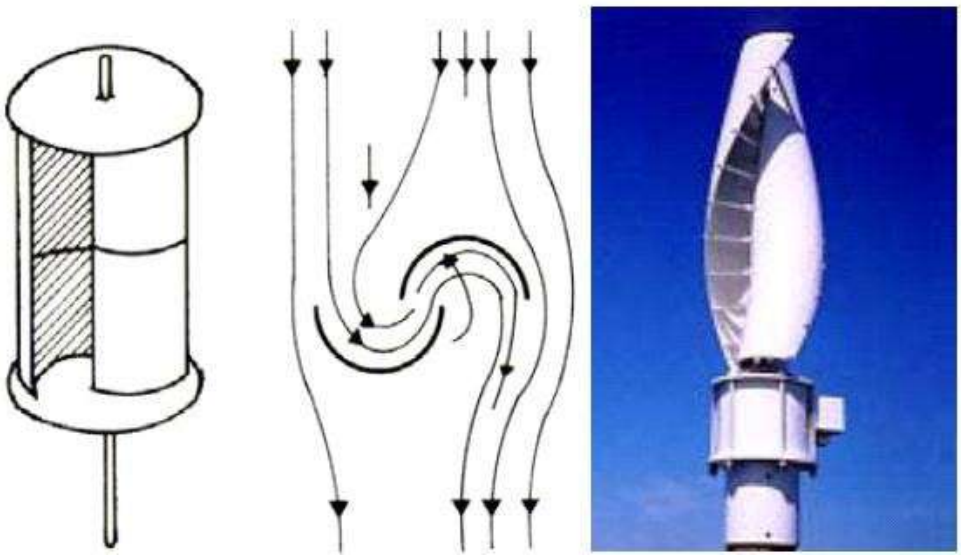


Figure(II-14): présente Différentes formes du rotor de Darrieus. [26]

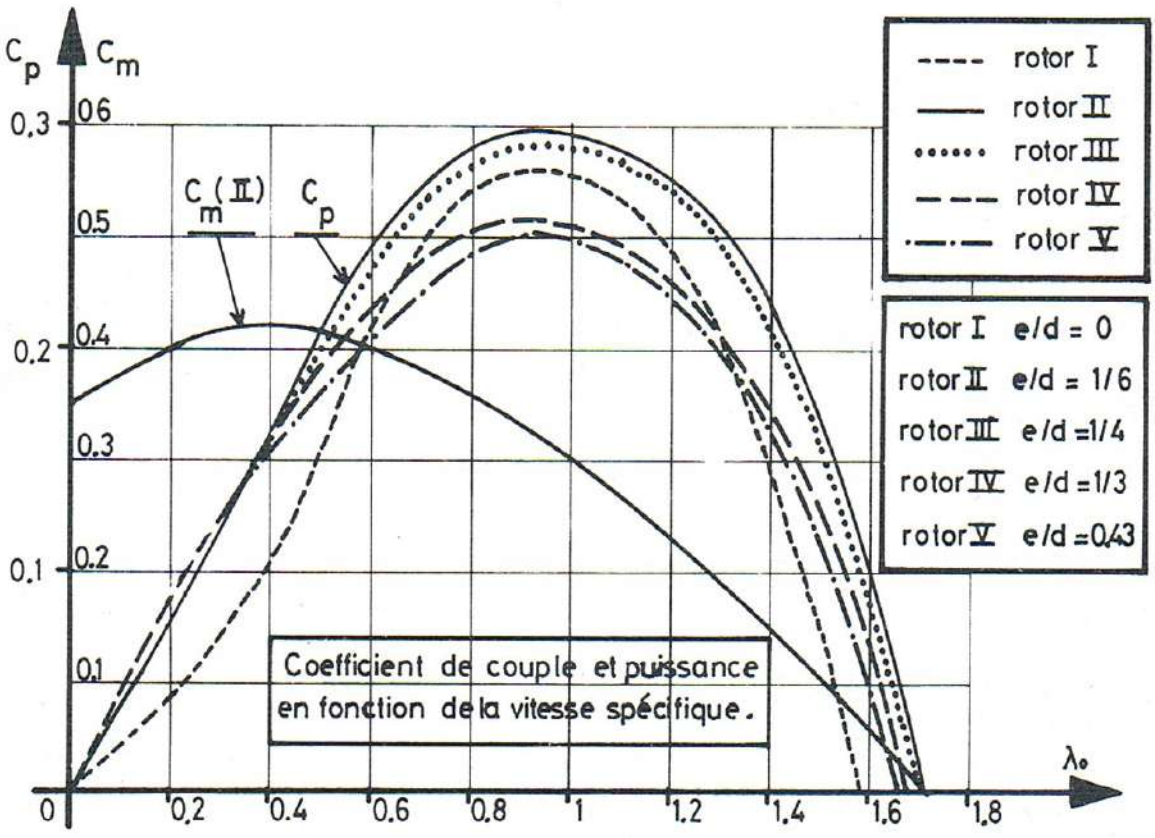
II-14 - L'éolienne Savonius

Le rotor Savonius est simplement constitué de deux demi cylindres verticaux décalés l'un par rapport à l'autre d'un décalage e, l'ensemble tourne autour d'un axe vertical. Le principe de fonctionnement est basé sur les forces de traînée, résultantes des forces aérodynamiques, qui sont différentes sur les deux pales. Cette différente engendre un couple mécanique qui génère le mouvement, Cette machine a été inventée par l'ingénieur S. J. Savonius en 1925 et a été brevetée en 1929. Le modèle original a été conçu avec un espacement e entre les pales tel que e/d=1/3, où d représente le diamètre du rotor. Les différentes recherches ont montré que ses performances optimales correspondent à e/d = 1/6. [26] .

- Exploite la force de trainée .
- Coefficient de puissance max = 15-25%.
- Vitesse spécifique optimale = 0.8 à 1.
- Vitesse de démarrage = 2-3m/s.[26]



Figure(II-15): l'éolienne Savonius. [26]



Figure(II-16): Performances du rotor savonius pour diverses valeurs du rapport e/d . [27]

II-15- Eoliennes lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer, en fonction du diamètre D et de la vitesse du vent V, par l'expression suivante :

$$p=0.15D^2V^2 \qquad \text{(II-2)}$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

II-16 - Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

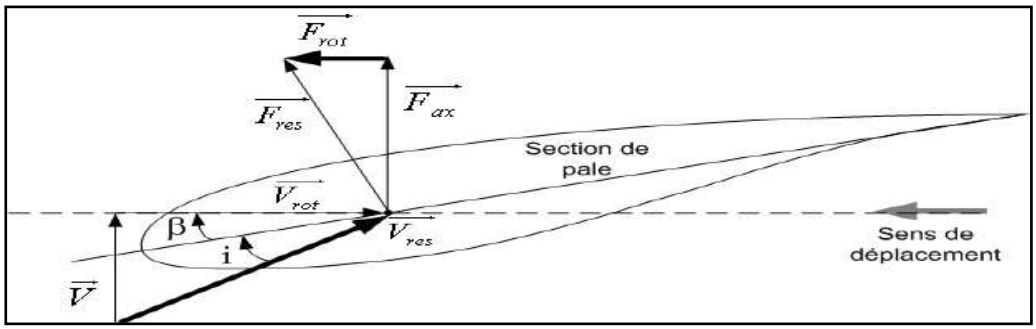
Le tableau (II.3) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. [28] [29]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivée
Petite	Moins de12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	Plus de 1MW

Tableau (II.3): Classification des turbines éoliennes. [29]

II-17– Stratégie de fonctionnement d'une éolienne

Bilan des forces sur une pale :



Figure(II-17): Bilan des forces sur une pale. [30]

La Figure (II-17) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur.

La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur $\vec{V}$.

Le vecteur $\overrightarrow{V_{rot}}$ Représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur.

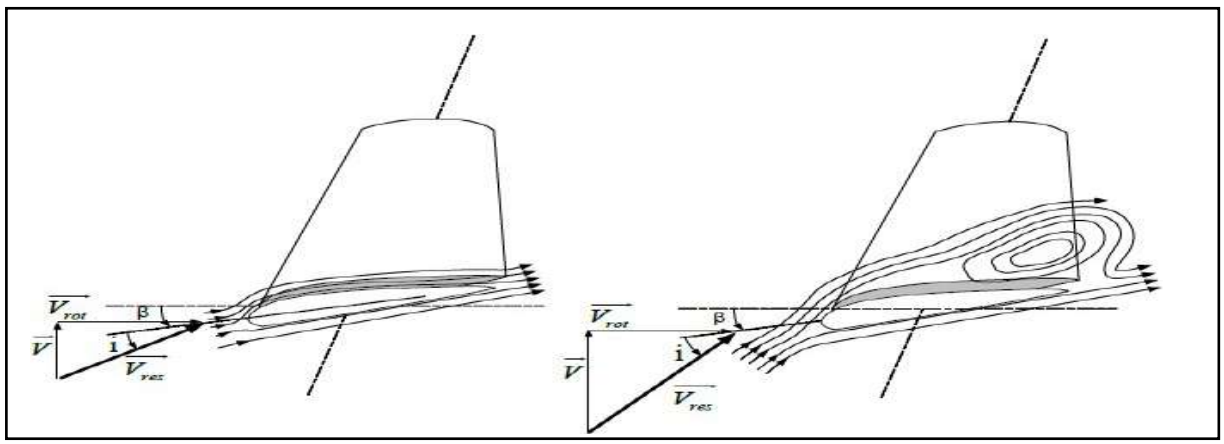
La résultante de ces deux vecteurs est appelés $\overrightarrow{V_{res}}$.

L'action du vent sur la pale produit une force $\overrightarrow{F_{res}}$ qui se décompose en une poussée axiale $\overrightarrow{F_{ax}}$ directement compensée par la résistance mécanique du Mat et une poussée en direction de la rotation $\overrightarrow{F_{rot}}$ qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur Nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par L'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [30].

II-18- Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

II-18- a- Système à décrochage aérodynamique "stall"



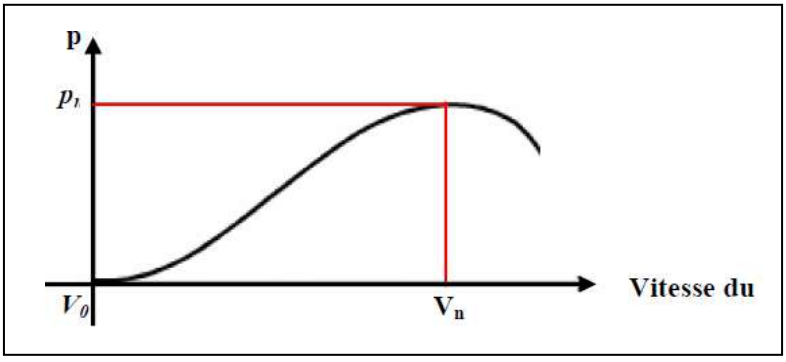
Figure(II-18): Flux d'air sur un profil de pale " stall "[30]

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de Limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (Intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage Aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominaleV_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure II-18) [30]

Une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle- même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [30].

Et pour fixer la vitesse de rotation de l'éolienne il y a le réglage a décrochage aérodynamique comme suit :

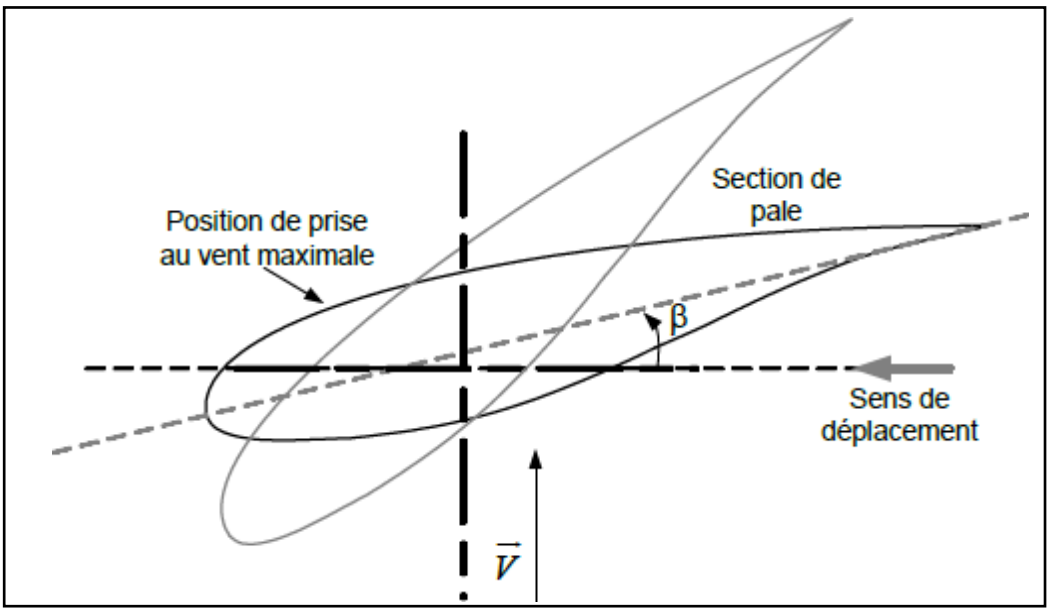
Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine [31]



Figure(II-19) : La génération à puissance électrique Variable (pales fixe décrochage aérodynamique). [31]

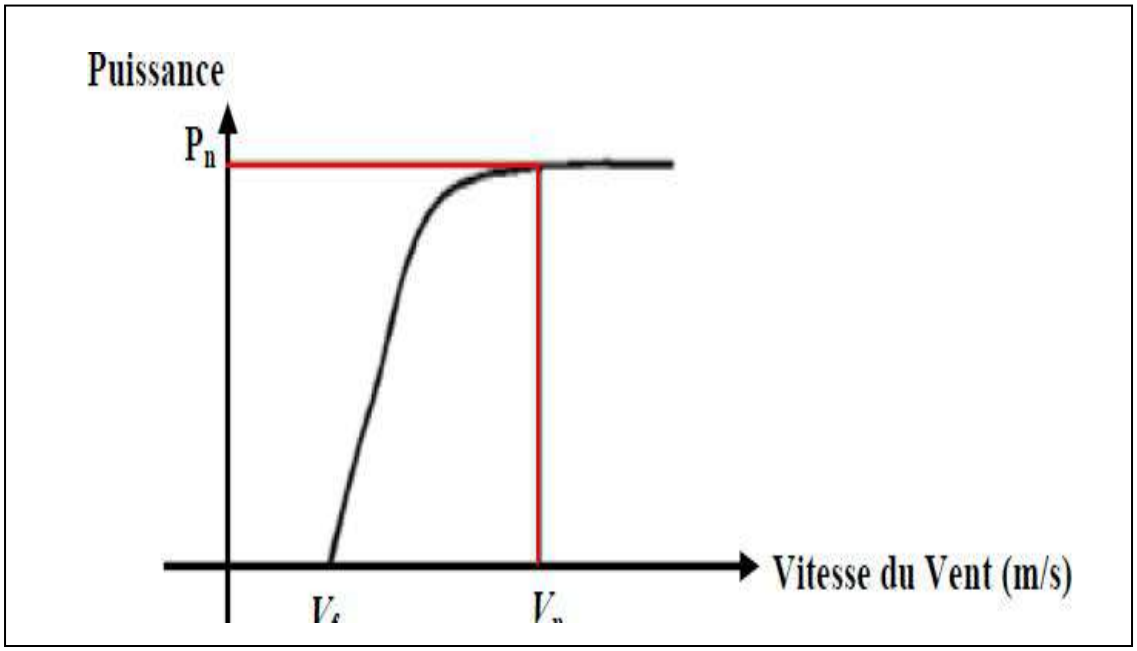
Le système de limitation le plus simple et le moins cher est un système de limitation naturel. Lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil des pales n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface des pales et par conséquent empêche tout augmentation de la vitesse de rotation. Ce système certes est fiable mais peu précis car il dépend de la masse volumique de l'air et de l'état de propreté des pales. Pour les machines de fortes puissances, on trouve également le système " Stall actif ". Le décrochage aérodynamique est alors obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent [31] .

II-18- b- Système d'orientation des pales "pitch"



Figure(II-20) : Variation de l'angle de calage d'une pale [31].

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à V_n [31].



Figure(II-21) Génération à puissance électrique constante (pâles orientables). [31]

V_S : Vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

Vn: la vitesse ou l'éolienne produite une énergie maximale.

II-19- Paramètres de classification des capteurs éoliens

Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs. Nous distinguons trois principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité [32].

-La vitesse périphérique.

- le coefficient de puissance.

- Le coefficient du couple.

II-19- a- La vitesse périphérique

Le premier paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou la vitesse en bout de pale) $V=\Omega.R$ (avec Ω la vitesse de rotation de la machine éolienne et R le rayon d'extrémité de la pale), ce paramètre de rapidité ou vitesse spécifique noté λ [32]

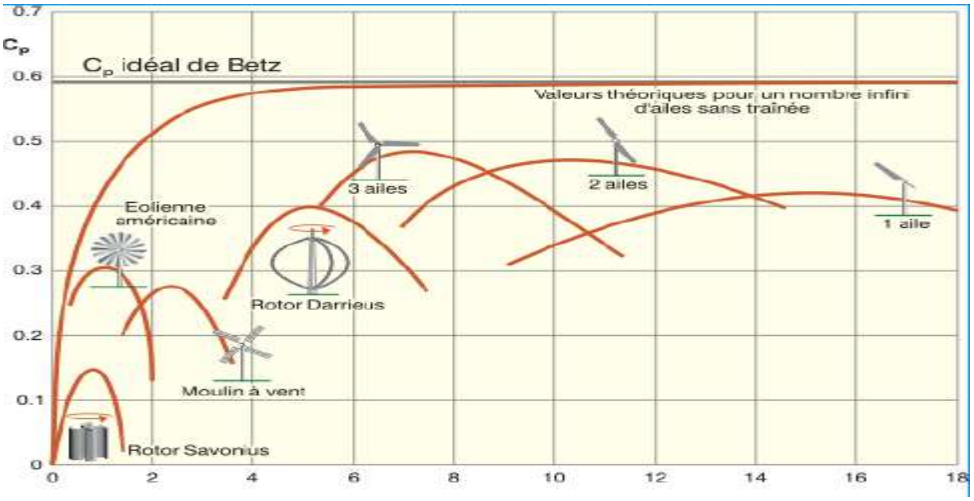
Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

• Si $\lambda < 3$, l'éolienne est dite lente .

• Si $\lambda > 3$, l'éolienne est dite rapide.

II-19- b- Le coefficient de puissance

Le second paramètre qui caractérise le capteur éolien est le coefficient de puissance noté C_p. Il est défini par le rapport de la puissance P recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor , Le coefficient de puissance C_p caractérise le niveau du rendement d'une turbine éolienne, la valeur maximale du CP définie par Betz, est égale à 0.592 [24], Le plus souvent le rotor d'éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance et la vitesse spécifique λ comme nous l'indique la figure (II-25).



Figure(II-22) : Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents types de turbines [32].

Une éolienne à 3 pales (ou plus) tourne plus régulièrement qu'une éolienne à 1 ou 2 pales, nous avons donc un meilleur équilibre du rotor, un bon rendement aérodynamique, c'est-à-dire la capacité de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique, un faible coût, une vitesse de rotation élevée du capteur éolien et un meilleur aspect esthétique par rapport à une éolienne à deux pales. Les paramètres C_p et C_T caractérisent les performances du capteur sont habituellement représentés en fonction de λ.

II-19- c- Le coefficient du couple

Le troisième paramètre est le coefficient du couple C_T , un paramètre très important qui défini le rapport du coefficient de puissance C_p et la vitesse spécifique λ [31].

II-20- Efficacité énergétique des éoliennes

L'énergie éolienne consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au moyen de la résistance offerte par les aubes d'éoliennes, lorsque déplacé par le flux d'air, transférez l'impulsion à un rotor qui tourne. Cette rotation est transférée à un générateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité.

L'expression bien connue donne la puissance P d'une éolienne:

$$p=\frac{1}{2}\rho S V^2 C_P$$

où ρ: est la densité de l'air, S : est la zone balayée par le rotor, V est la vitesse du vent et C_p est le coefficient de puissance. Ce coefficient de puissance décrit cette fraction de la puissance dans le vent qui peut être converti par la turbine en travail mécanique. Le C_p a un valeur maximale théorique de 0.59 connue sous le nom de limite de Betz.

II-21- Conclusion

L'énergie éolienne est une énergie qui est en expansion et les capacités de production sont en augmentation importante en particulier en Europe et aux États-Unis et on assiste actuellement à de vastes programmes d'implantation d'énergie éolienne dans de nombreux pays. Les recherches effectuées ont permis d'accroître considérablement le rendement des éoliennes(rendements approchant les 50 %), et de plus les éoliennes sont de plus en plus puissantes. Aujourd'hui, les progrès techniques font que l'énergie éolienne est de moins en moins coûteuse et presque aussi compétitive que l'énergie du réseau national en prenant en compte le coût d'installation des lignes électriques. En particulier les éoliennes offshore (en pleine mer) paraissent très prometteuses. Le grand intérêt de l'énergie éolienne, est que c'est une énergie propre sans déchets et sans effet sur le réchauffement climatique (pas de gaz à effet de serre), de plus c'est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines. Le principe de fonctionnement de l'éolien est assez simple par rapport à d'autre énergie, toutefois, des études de développement sont en cours pour augmenter la puissance des éoliennes et augmenter leur rendement. L'énergie éolienne a un bilan environnemental très positif, en particulier elle ne produit pas de gaz à effet se serre ni de déchets et c'est une énergie renouvelable. Au niveau économique elle a un bilan plutôt positif par rapport aux autres énergies. [33].

On conclura qu'il parait très intéressant voire indispensable d'augmenter la part de l'énergie éolienne dans le monde même si celle-ci ne peut couvrir pour tous les besoins en électricité.

Modèle mathématique

III-1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Le développement de la théorie des éléments de pale (BEMT) a été choisi comme base l'alternative la plus appropriée pour étudier les performances des éoliennes à partir d'un point de vue aérodynamique.

III-2 Energie cinétique du vent– conversion en énergie mécanique

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. 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 [34].

III-3 Limite de Betz

La limite de Betz est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. Cette résultat fut découvert par l'allemand Albert Betz en 1919 et fut publié dans son livre Wind Energie en 1926[34]. Cette loi s'applique à tous types d'éoliennes à pales, que l'on désigne par le nom générique de capteur éolien.

Betz calcule que :

- la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne.
- cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air[35]. On peut regrouper ces résultats selon ces formules :

D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$p_{vent} = \frac{1}{2} . s_{éolienne} . \rho . v^3 \qquad \text{(III-1)}$$

Avec :

$s_{éolienne}$: La surface balayée par l'éolienne.

ρ: La masse volumique de l'air(1.25kg / m^3).

v : La vitesse du vent.

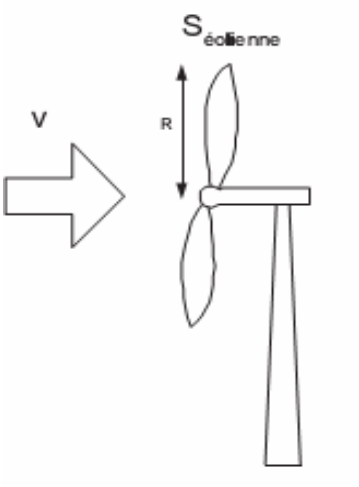


Figure (III-1) : Eolienne simplifiée

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent(P_{vent})

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance c_p :

$$P_{éolienne} = c_p . p_{vent} \quad \text{(III-2)}$$

$$P_{éolienne} = \frac{1}{2} . \rho . c_p . s_{éolienne} . v^3 \quad \text{(III-3)}$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27.

Le coefficient C_p est diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad \text{(III-4)}$$

Avec,

R : Le rayon des pales de l'éolienne.

Ω : La vitesse de rotation de l'éolienne.

V :La vitesse du vent. [35]

Le coefficient de puissance C_p a été calculé en utilisant la relation empirique suivante :

$$C_p(\lambda\ ,\ \beta_i) = (0.44 - 0.0167\ \beta_i) sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\ \beta_i}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\ \beta_i \quad \text{(III-5)}$$

III-4 Performance de l'éolien

La performance d'une éolienne peut être caractérisée par trois types de l'efficacité :

L'efficacité mécanique : $\eta_{mecanique} = \frac{P_{mécanique}}{p_{éolienne}}$ (III-6)

Tel que : $P_{mécanique} = C_p \cdot p_{éolienne}$ (III-7)

L'efficacité électrique : $\eta_{électrique} = \frac{P_{éléctrique}}{p_{mécanique}}$ (III-8)

L'efficacité totale : $\eta_{totale} = \frac{P_{éléctrique}}{p_{éolienne}}$ (III-9)

Et

$$\eta_{totale} = \eta_{mecanique} \cdot \eta_{électrique} \quad \text{(III-10)}$$

III-5 Le couple aérodynamique

Le couple sur l'arbre de la machine assure les parties mécaniques de l'éolienne. L équation du couple est donner par:

$$Q = \frac{P_{vent}}{\Omega} \quad \text{(III-11)}$$

III-6-La fonction de distribution de Wei bull

La distribution de Weibull, donnée par l'équation (III-12), est une distribution à deux paramètres (C et K), qui permet de se rendre en compte quelques propriétés importantes de la distribution du vent en fonction de ces deux paramètres [36, 37]:

$$f(V)=\left(\frac{K}{C}\right).\left(\frac{V}{C}\right)^{K-1}.exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)\right]^{K} \quad \text{(III-12)}$$

C : facteur d'échelle [m/s], et k : est le facteur de forme, sans dimension.

III-7 Puissance d'une éolienne

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse [38],[39].

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{(III-13)}$$

m: Masse du volume d'air (kg)

V: Vitesse instantanée du vent (m/s)

E_C: Energie cinétique (joules)

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

$$P_{théorique} = \frac{1}{2}\rho S V^3 \quad \text{(III-14)}$$

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

S: Surface balayée par le rotor éolien (m^2)

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

III-7-a La puissance maximale récupérable

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59.3% la limite de Betz [38]

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$p_{récup érable} = \frac{16}{27} P_{théor ique} \quad \text{(III-15)}$$

III-7-b Courbe de puissance d'une éolienne :

Pour commencer à produire de l'énergie, une éolienne exige une vitesse de vent minimale, dite vitesse de démarrage. Pour la plupart des éoliennes modernes, cette vitesse de vent est de 3 m/s**.** Quand le vent augmente, la production augmente avec le cube de la vitesse du vent. Pour une certaine vitesse de vent (dite vitesse nominale), la puissance qui arrive sur la génératrice est égale à la puissance maximale de cette génératrice. Il faut donc limiter la puissance pour éviter que la génératrice ne soit détruite, quand le vent est trop violent (tempête), l'éolienne doit être arrêtée : c'est la vitesse d'arrêt. Pour les vitesses de vent comprises entre la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt, la production est constante, égale à la puissance de la génératrice. La puissance est régulière au niveau du rotor. Alors chaque éolienne admet trois paramètres techniques donnés par le constructeur qui sont les vitesses essentielles pour son exploitation (Figure (III.2)) :

- **La vitesse de démarrage V_D** : la vitesse ou l'éolienne commence a produire l'énergie.

- **La vitesse moyenne nominale V_N :** la vitesse ou l'éolienne produite une énergie maximale.

- **La vitesse seuil V_M** : vitesse ou l'éolienne s'arrête.

La courbe dans la figure(III.2) montre que la puissance énergétique récupérable par une éolienne varie très rapidement avec la vitesse du vent. En effet, une éolienne ne délivre sa puissance nominale que dans un intervalle de vitesses du vent restreint.

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

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

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

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

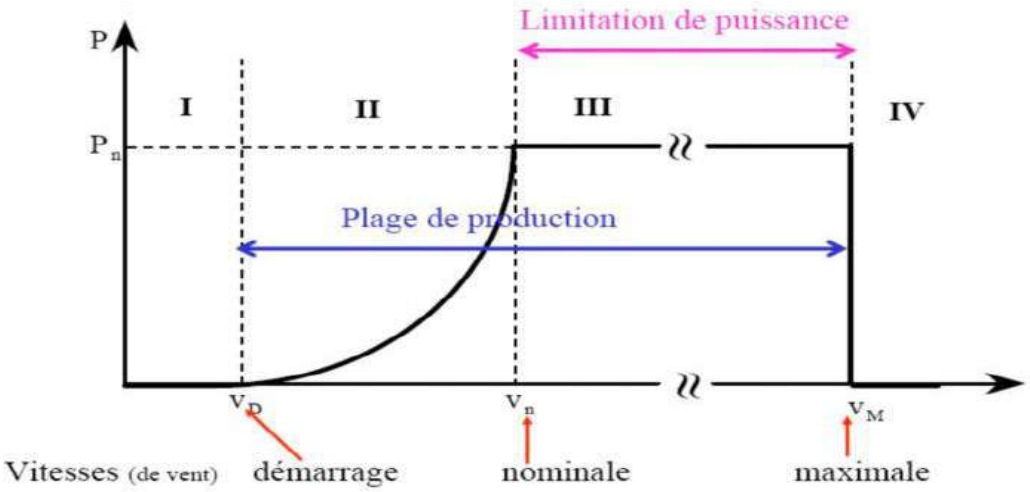


Figure (III.2) : Courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction des vitesses du vent . [38]

$$P_n = \frac{1}{2}\rho S V_n^3 \qquad \text{(III-16)}$$

III- 7 –c Puissance utilisable

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

Le rendement d'une éolienne est :

$$\eta = \frac{P_n}{P_{théorique}} \qquad \text{(III-17)}$$

La puissance nominale P_n sera :

$$P_n = \frac{1}{2}\rho s V_n^3 \quad \text{(III-18)}$$

Partant de l'équation (II-7) la vitesse nominale est :

$$V_n = \sqrt[3]{\eta}.V \quad \text{(III-19)}$$

P_u: La puissance utilisable par une éolienne

$$P_U \begin{cases} 0 & V < V_D \\ \frac{1}{2}\rho S V^3 & V_D \leq V < V_n \\ \frac{1}{2}\rho s V_n^3 & V_n \leq V < V_M \\ 0 & V \geq V_M \end{cases}$$

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

$$P_{utilisable} = \frac{1}{2}\rho s V_n^3 \quad \text{(III-20)}$$

III-7-d La puissance utile d'une éolienne

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

$$P_{Utile} = \eta P_{Récup érable} \quad \text{(III-21)}$$

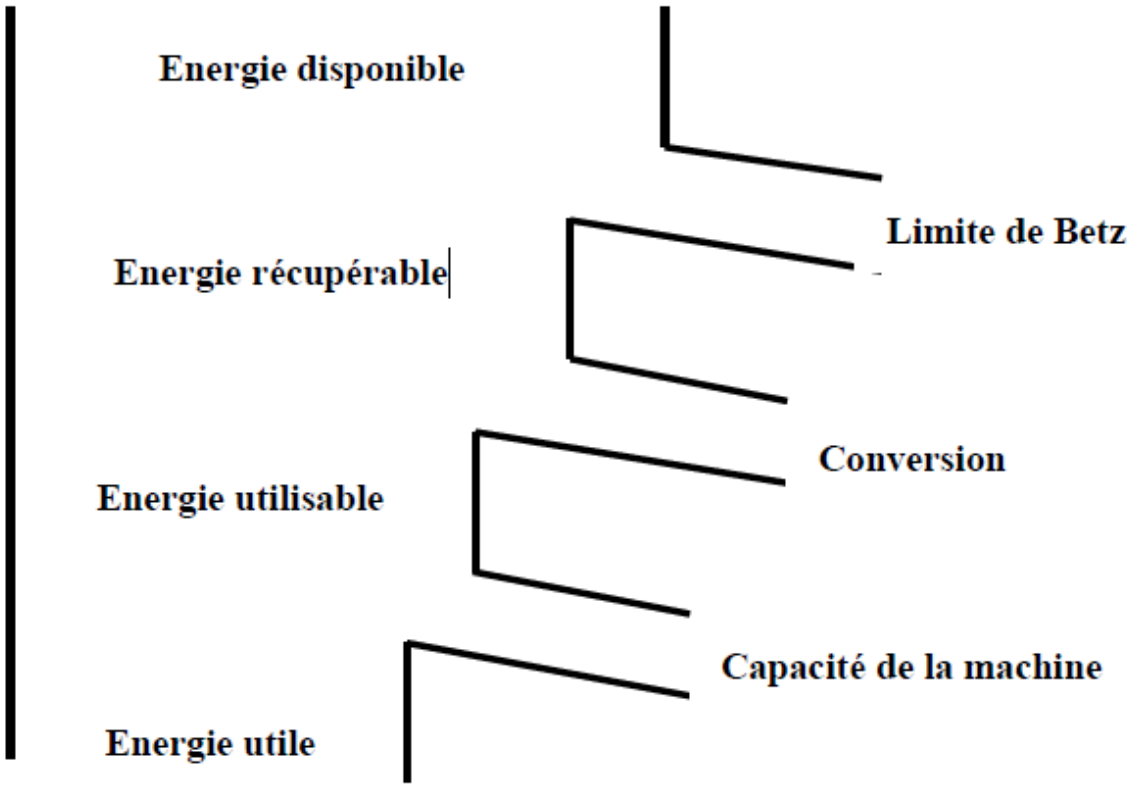


Figure (III.3) : Représentation schématique des pertes successive de puissance éolienne[38]

III-8 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté et analysé quelques paramètres des grandeurs physiques qui contribue a la transformation de l'énergie du vent en énergie mécanique en utilisant des relations mathématiques reposant sur des facteurs influant sur la production d'électricité qui détermineront la vitesse spécifique , la vitesse du vent, la vitesse de rotation du rotor , l'angle de calage et le couple aérodynamique a pour objectif d'amélioration des performances des turbines.

Dans le chapitre suivant, Nous nous appuyons sur des relations mathématiques pour extraire les courbes indiquant les effets des facteurs intervenant dans la production d'électricité.

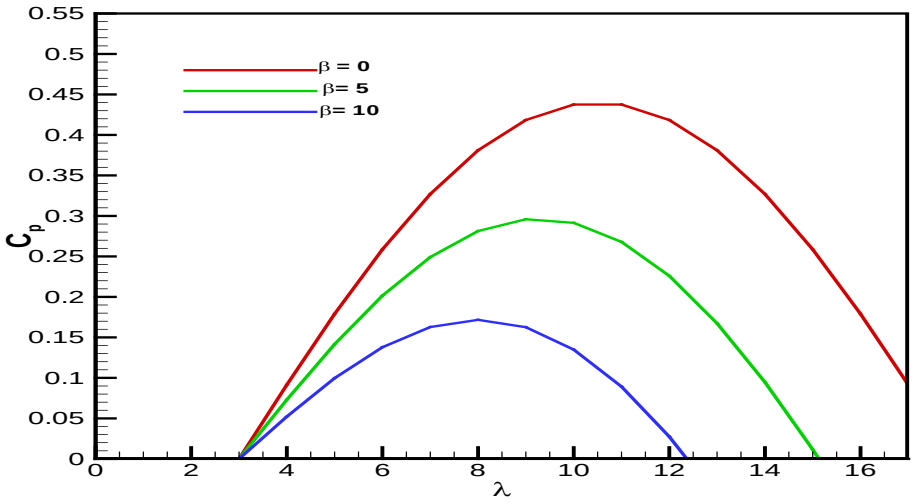
Résultat et interprétations

IV-1 Introduction

Après la modélisation mathématique du phénomène de conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique, puis en énergie électrique, un code FORTRAN a été écrit pour obtenir les résultats , nous avons extrait quelques courbes relatives à l'effet de la vitesse spécifique**,** la vitesse de rotation de la turbine**,** le rayon de la pale et l'angle de calage sur la production d'énergie électrique on basant sur le code fortran.

IV-2 Coefficient de puissance et la puissance mécanique

(a)



(b)

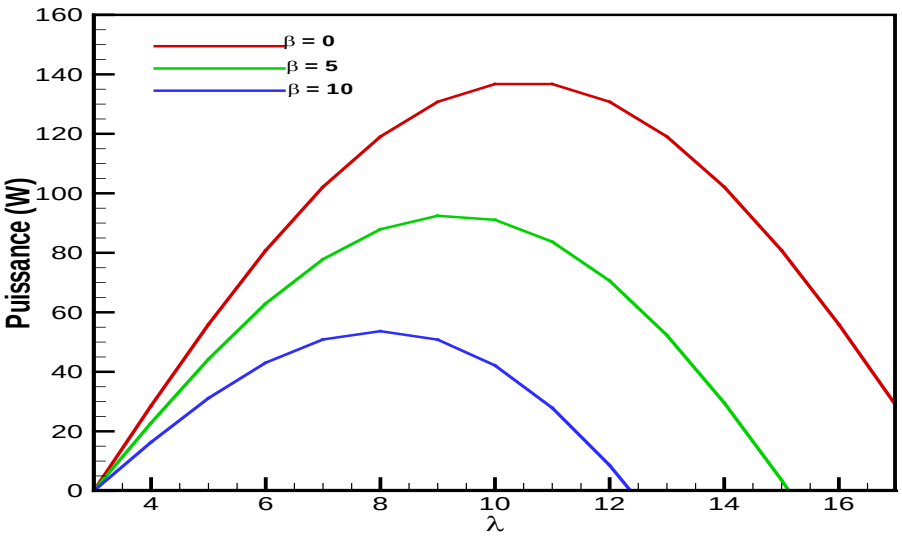
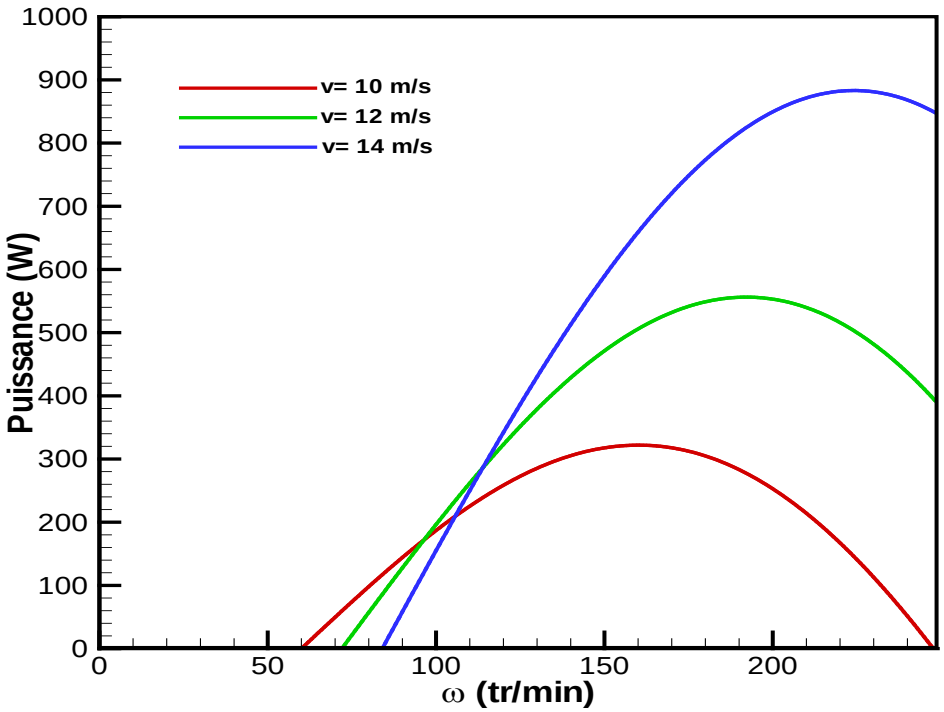


Figure (IV -1) (a, b): Variation du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse spécifique pour différentes valeurs de l'angle de calage.

La figure (IV-1) (a,b) montre la variation du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse spécifique pour différentes valeurs de l'angle de calage. On peut voir sur la figure (IV-1)(a) que le coefficient de puissance est variable en fonction de la vitesse et de l'angle de calage. D'après la courbe du coefficient de puissance obtenue on peut statuer que cette courbe possède un point optimal (λ_{opt} = 11,Cp_{max} = 0.45) correspondant au rendement maximal de la turbine. Sur ce point, le maximum de la puissance mécanique peut être récupéré à partir de la puissance disponible dans le vent puisque le vent que voit la pale a un angle d'attaque idéal, amenant une capture d'énergie maximale. Cependant, il faut noter que la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance(limite de Betz) n'est en réalité jamais atteinte et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, ne dépasse pas 60-65% de la puissance maximale calculée par la formule de Betz.

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure de coefficient changeant donc pour chaque angle de calage β comme représenté à la figure (IV-1)(a). On remarque sur la figure (IV-1)(b) que la puissance diminue avec l'augmentation de l'angle de calage. Cette diminution de puissance s'explique par le fait que l'écoulement va aborder la pale avec des grands angles d'incidence, ce qui a pour conséquence le décollement des lignes de courant sur ses parois. Ce phénomène agit négativement sur la puissance du rotor.

(a)



(b)

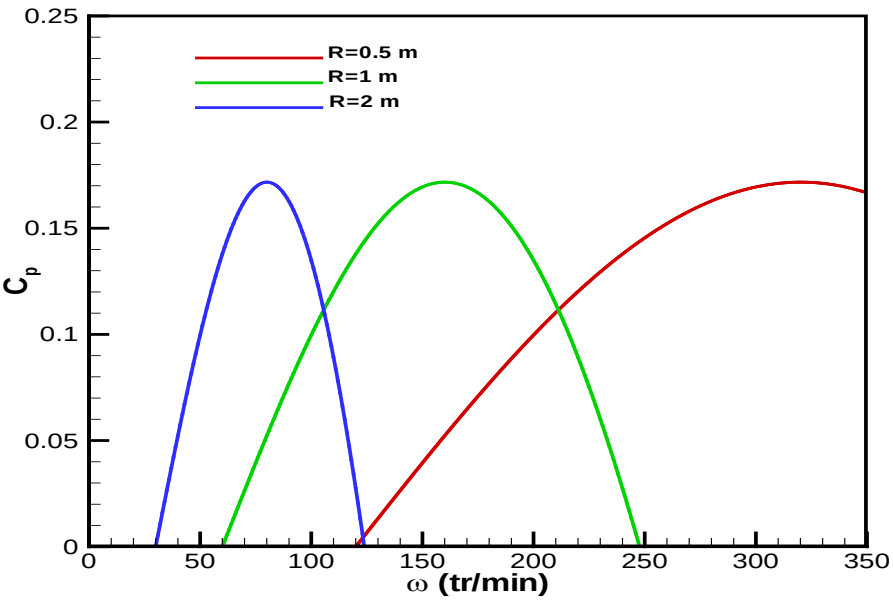


Figure (IV-2) (a, b) : Variation du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de vitesse et de rayon .

La figure (IV-2) représente la variation du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de vitesse et de rayon. On observe sur la figure (IV-2) (a) que la puissance mécanique de l'éolienne est la plus élevée (environ 900 kW) pour une vitesse de vent de 14 m/s. A des vitesses de vent faibles, la puissance a moins d'importance car il y a peu d'énergie à récupérer. Cependant, à des vitesses de vent élevées, l'éolienne est mise en drapeau afin de ne pas la détériorer, l'énergie n'est donc pas récupérable. Il est donc plus intéressant d'avoir une bonne puissance à des vitesses de vent où la plus grande partie de l'énergie est récupérable.
Le diamètre du rotor détermine la puissance éolienne qui pourra être récupérée par l'éolienne.

on observe sur la figure (IV-2) (b) que la valeur maximale du c_p égale à 0,18 dans les trois valeurs des rayon mais à différentes valeurs de la vitesse de rotation ω= 70 tr/ min pour un diamètre égal à 2 m , ω= 160 tr / min pour un diamètre égal à 1m et ω= 330 tr / min pour un diamètre égal à 0,5 m ,Nous notons également que les valeurs de $c_p$sont obtenues à partir de petites valeurs de vitesse de rotation ω lorsque la longueur du diamètre est supérieure. La valeur de c_p commence à augmenter lorsque la vitesse de rotation est d'environ ω=30 tr / min dans le cas où la longueur du diamètre est égale à 2m , et augmenter a partir de la valeur de ω=30 tr / min dans le cas de la longueur du diamètre égal à 1m, et augmente également à partir de la valeur de la vitesse de rotation égale à 120 tr / min dans le cas de la longueur du diamètre 0,5m.

IV-3 L'efficacité mécanique

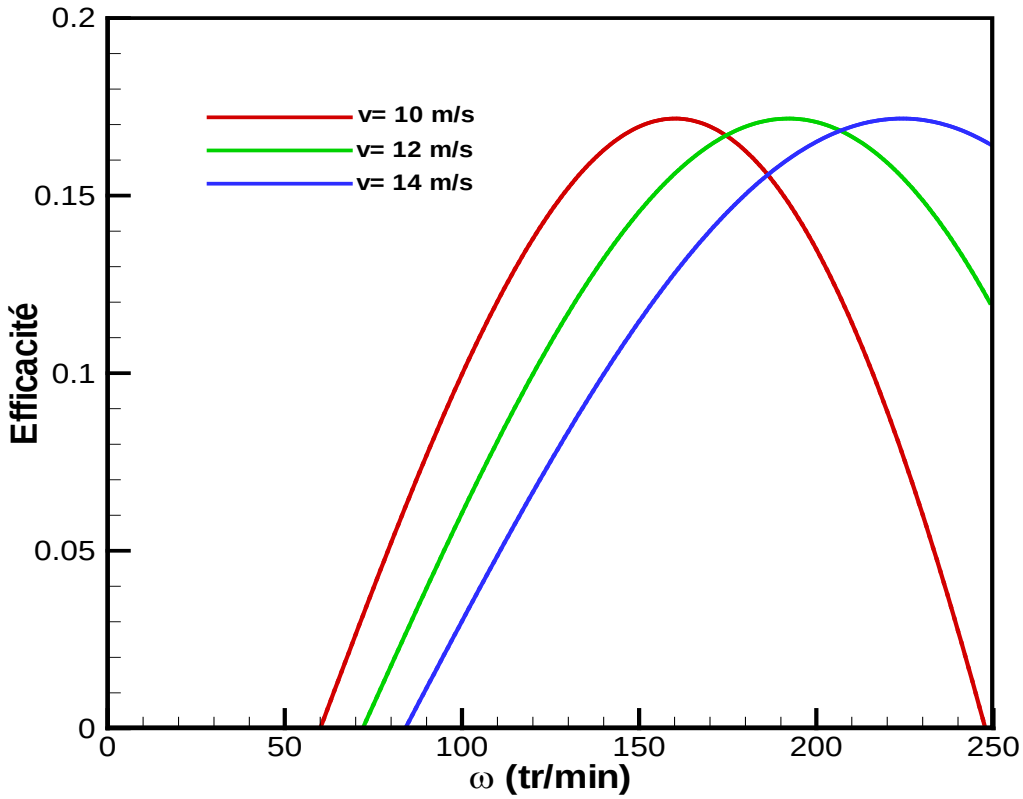


Figure (IV- 3): Variation de l'efficacité mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de vitesse

La figure (**IV**- 3) représente la variation de l'efficacité mécanique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de vitesse. Sur ce graphe, l'efficacité mécanique de l'éolienne est la plus élevée (17 %) pour déférents vitesse de rotation de la tirbune d'environ ω = 150 tr/ min , ω =200 tr/ min et ω =230 tr/ min a des valeurs des vitesses v= 10 m /s , v= 12 m /s , v= 14 m /s . Donc a des vitesses de rotation de la tirbune faibles, l'efficacité a moins d'importance car il y a peu d'énergie à récupérer. Il est donc plus intéressant d'avoir une bonne efficacité à des vitesses de vent où la plus grande partie de l'énergie est récupérable.

IV-4 Le couple aérodynamique :

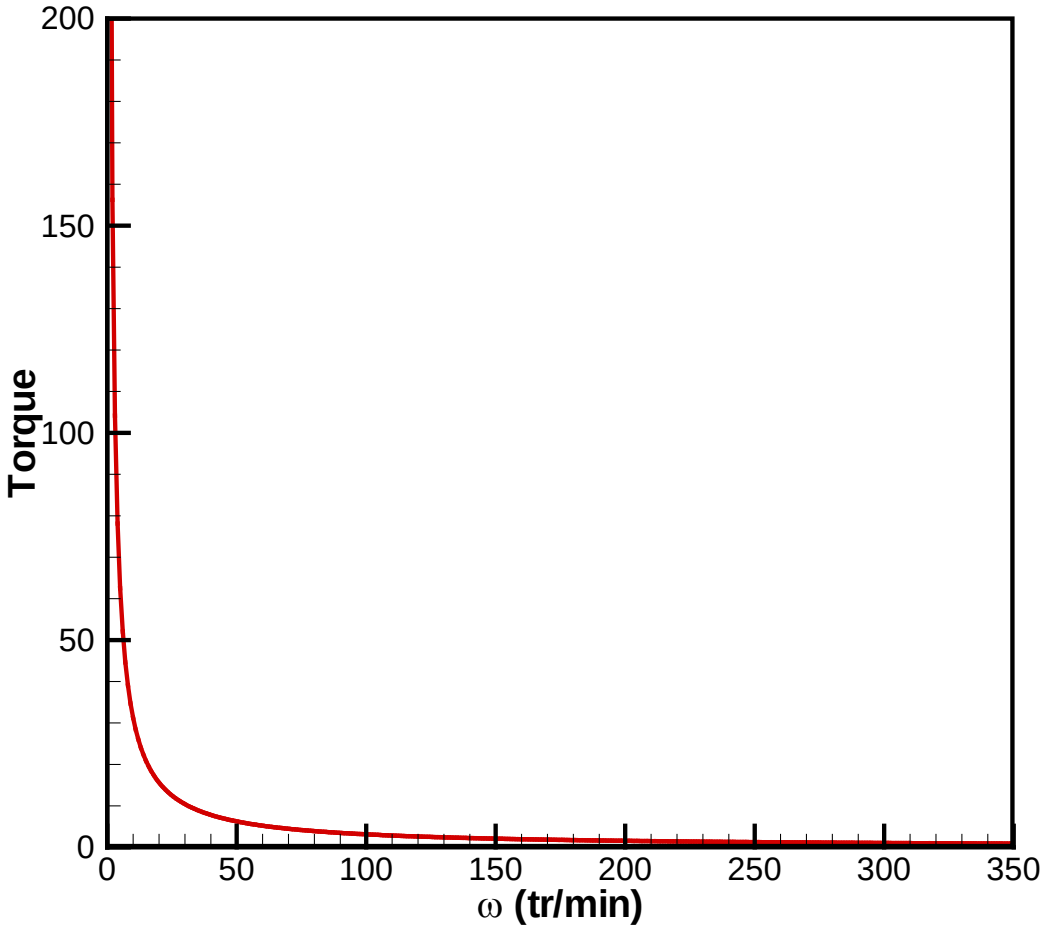


Figure (IV- 4): Variation du couple aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

La figure (IV- 4) représente la variation du couple aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour une puissance mécanique fixe. A partir de cette figure, on peut constater que le couple diminue non linéairement avec la vitesse de rotation pour une puissance constante. Pour des faibles vitesses, nous avons besoin d'un couple élevé, donc nous avons une vitesse lente à couple élevé. Au fur et à mesure que la nécessité de couple diminue, nous continuons à augmenter les vitesses. Le couple sera nul si la vitesse de rotation est augmentée. Il faut noter que si l'éolienne a une vitesse de rotation fixe, il y aura de grandes variations de couple sur l'arbre de la machine en rapport avec la vitesse du vent qui se traduisent par la présence de contraintes mécaniques importantes et favorisent l'usure des parties mécaniques de l'éolienne.

IV-5 La distribution de Weibull

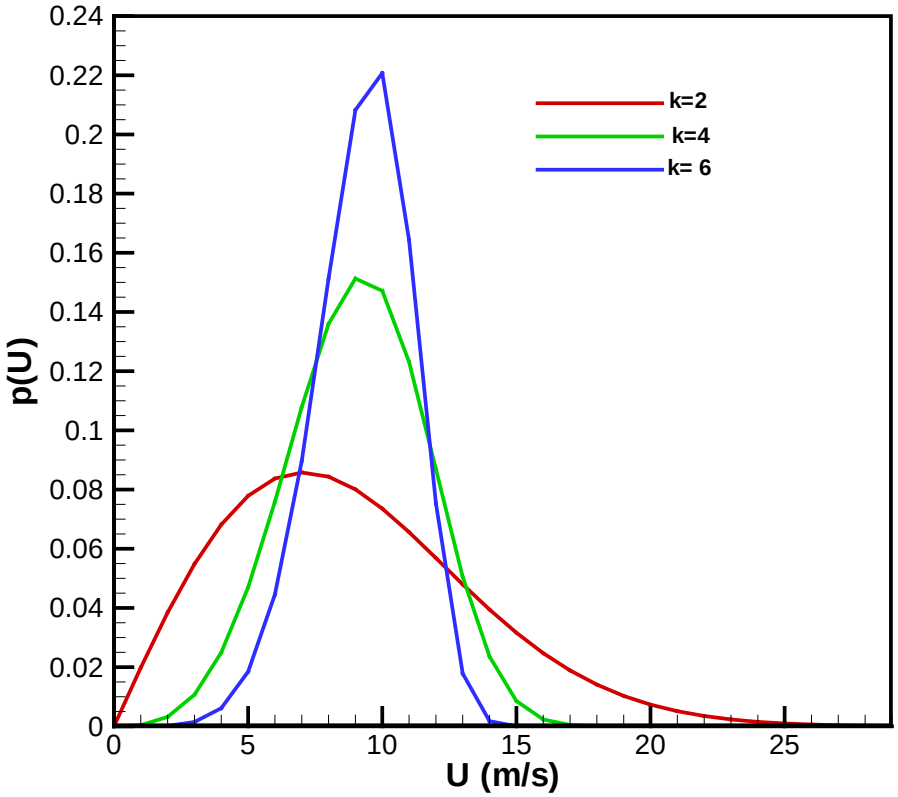


Figure (IV- 5):Fonction de densité de probabilité de Weibull pour différentes valeurs du facteur de forme.

La distribution de Weibull est illustrée dans figure (IV- 5) pour différentes valeurs du facteur de forme (k). Les courbes de cette figure diffèrent essentiellement par leurs modes respectifs qui passent de 7 m/s pour k = 2 vers 10 m/s pour k = 6. De la même manière on peut voir que le régime du vent pour k = 2 se prolongent jusqu'à 25 m/s tandis que pour k = 6 le régime n'excède pas 15 m/s. Cette distribution montre que les vitesses moyennes de vent élevées correspondent généralement à des grandes valeurs de facteur de forme (k). Des faibles valeurs de k impliquent que les données tendent à êtres distribuées sur un large intervalle de vent.

IV-6 La puissance mécanique de l'éolienne

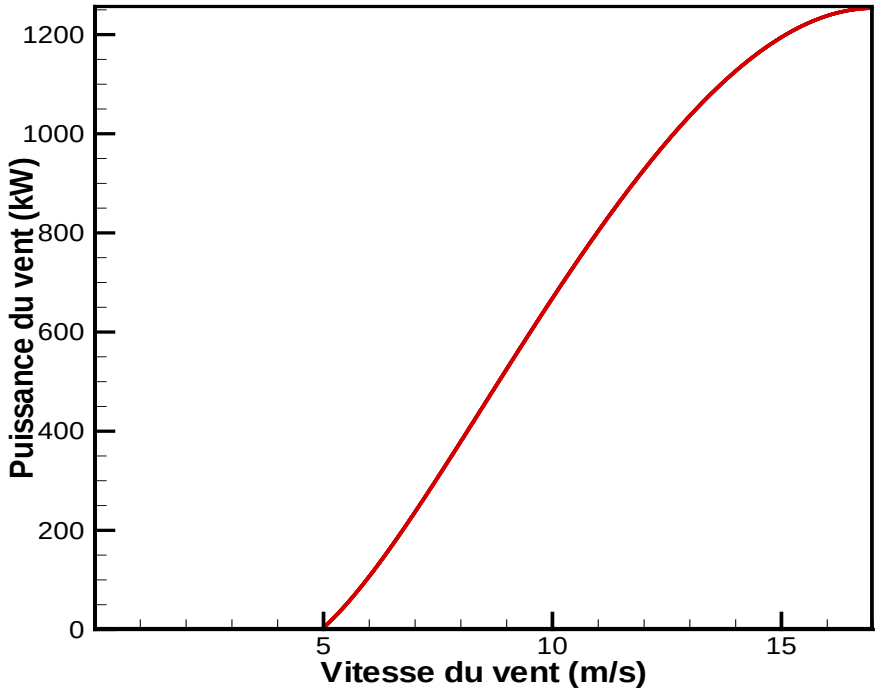


Figure (IV- 6):Evolution de la puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent

Nous choisissons la vitesse de démarrage du vent V_D = 5 m/s . La figure (IV- 6) montre la variation de la puissance mécanique de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. On remarque qu'à une vitesse de vent de 8 m/s, la puissance fournie (quantité d'énergie par seconde) sera de 400 kW, si le vent souffle d'une direction perpendiculaire à la surface balayée par le rotor à 16 m/s, nous obtiendrons une puissance augmentée de 3 fois, soit 1200Kw. La puissance maximale possible (1250 kW) est obtenue avec une vitesse de vent de 17 m/s environ. En effet, une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Un doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage de deux fois plus de disques d'air à travers le rotor par seconde, soit trois fois plus d'énergie.

Conclusion générale

L'énergie éolienne est une énergie qui est en expansion et les capacités de production sont en augmentation importante en particulier en Europe et aux États-Unis et on assiste actuellement à de vastes programmes d'implantation d'énergie éolienne dans de nombreux pays. Les recherches effectuées ont permis d'accroître considérablement le rendement des éoliennes (rendements approchant les 50 %), et de plus les éoliennes sont de plus en plus puissantes. Aujourd'hui, les progrès techniques font que l'énergie éolienne est de moins en moins coûteuse et presque aussi compétitive que l'énergie du réseau national en prenant en compte le coût d'installation des lignes électriques. Le grand intérêt de l'énergie éolienne, est que c'est une énergie propre sans déchets et sans effet sur le réchauffement climatique (pas de gaz à effet de serre), de plus c'est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines. Le principe de fonctionnement de l'éolien est assez simple par rapport à d'autre énergie, toutefois, des études de développement sont en cours pour augmenter la puissance des éoliennes et augmenter leur rendement. L'énergie éolienne a un bilan environnemental très positif, en particulier elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de déchets et c'est une énergie renouvelable. Au niveau économique elle a un bilan plutôt positif par rapport aux autres énergies. [40]

A travers notre étude du sujet et après l'extraction des courbes indiquées les variations de la puissance mécanique , coefficient de puissance ,le couple aérodynamique et l'efficacité mécanique en fonction de la vitesse de vent ,la vitesse spécifique ,vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs des rayons des pales et d'angle de calage Nous concluons que chacun de ces facteurs a un impact important sur la détermination de la rentabilité et la performance des éoliennes et l'amélioration de leur efficacité dans la production d'énergie.

L'approche numérique de certains phénomènes physiques permettant de prédire l'efficacité mécanique du système éolien, mais il existe d'autres facteurs qui jouent un rôle important dans la rentabilité des turbines, tels que la masse volumétrique de l'air qui varie avec différents paramètres : l'altitude (pression de l'air) , la température ,l'humidité relative de l'air …etc

Référence bibliographique :

[1] : https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-d-électricité-en-2016-10537.

[2]:Khelfat lotfi ≪ Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée≫,mémoire de master de l'université de badji mokhtar- annaba option: électronique de puissance ,2017.

[3]: Meklid M.T « éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides »Université de Biskra, 2010.

[4] : http://www.jybaudot.fr

[5] :http://www.economiesolidaire.com/2015/02/07/avantages-et-inconvenients-de l'hydrolienne.

[6] : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice.

[7] : http://ats.energies.free.fr/spip.php.article24

[8]: http://www.éolienne , « Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre » Article de Scientific American sur l'invention de Brush (1890).

[9] :Adam MIRECKI , « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance »,Thèse de doctorat , L'institut National Polytechnique de Toulouse avril 2005

[10]:Telli Abderrahim≪ Etude Et Commande D'une Eolienne A Vitesse Variable Intégrée Au réseau mt ≫,mémoire de magister de l'université de Mohamed Boudiaf Oran option: réseaux électriques ,2012

[11] :https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-vent-14560

[12] :Hassad Mohamed Amine≪ Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques≫.mémoire de magister de l'université setif, option commande électrique 2012.

[13]: Mazouz Farida ≪Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents≫ mémoire de magister de l'Université de Batna 2013.

[14]: DEBBACHE. M « De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites » université de Biskra, 2012.

[15]: M. JOURIEH « développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien », 2007

[16] :Nachida KASBADJI MERZOUK , « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » ,Thèse de doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2006

[17]: nouvelle carte du gisement éolien en Algérie par le CDER - 2014

[18] :Khaled FERKOUS , «Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne ». Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009

[19]: J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, « Wind Energy Explained : Theory,Design and Application » , University of Massachusetts, Amherst, USA 2002.

[20] :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).

[21] :R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.

[22]: Meklid M.T « éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides »Université de Biskra, 2010

[23]: Redjem Radia ≪étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne≫ ,mémoire de magistère de l'université mentouri de Constantine, option modélisation et commande des machines électriques 2009

[24]: Hamza Soumia. « Conception par la CAO des parties fixes d'une éolienne et les solutions technologiques de liaisons de l'installation »

[25]: ABDOU AMEL « étude numérique d'une couche limite turbulente autour d'un profil bidimensionnel » 2010

[26]: LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien » 24 /06 /2012 .

[27]: énergie éolienne - l'Université de Dakar. Paris 1982

[28]: Bernard MULTON[1], Olivier GERGAUD[1], Hamid BEN AHMED[1], Xavier ROBOAM[2], Stéphan ASTIER[2], Brayima DAKYO[3], Cristian NICHITA[3] [1]LÉSiR , «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan Campus de Ker Lann 35170 BRUZ 2LEEI ENSEIIHT Toulouse, [3]GREAH Université du Havre

[29]: Vincent COURTECUISSE, «Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat, L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2008

[30]: Frederic Poitiers≪ étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne≫ mémoire de doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
[31]: H.Fatmaoui, « Eléments de base de l'aérodynamique des pâles d'éoliennes » Université Ibn Zohr Faculté des sciences, Maroc.
[32]:Hassad Mohamed Amine≪ Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques≫.mémoire de magister de l'université setif, option commande électrique 2012.
[33]:http://texsud.e-monsite.com/pages/conclusion/conclusion.html
[34] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.
[35] C. Haritza, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération
[36] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, and Ervin Bossanyi. Wind Énergie Handbook. John Wiley & Sons, 2011.
[37] d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Doctorat, E.N.S.A.M Paris, décembre 2003. [4] Extrait du rapport de synthèse ECRIN, L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energie Renouvelables, paru mai en 2002. Paris.
[38] K.Ameur, « le pompage éolien » ; Recherche et développement, Le Centre de Développement Des Energies Renouvelables, Bulletin des énergies renouvelables. Décembre 2002.
[39] CDER Bouzareah, « Le Centre de Développement Des Energies Renouvelables, La Division d'Energie Eolienne », Bulletin des énergies renouvelables - Juin 2002.
[40] N. Kasbadji Merzouk, De l'estimation du potentiel énergétique éolien application au pompage. 1er séminaire sur la contribution de l'énergie solaire et éolienne dans le développement durable. Octobre 2001.