

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : G.M. Energétique
Domaine : Science et technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème

Analyse d'un générateur à induction d'un équipement d'énergie éolienne

Présenté Par :

- M. MEDJAHED Abdesslam El Hadej

Devant le jury composé de :

Pr. BOUAFIA F.	Pr.	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. DORBANE A.	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur
Dr. BERREZOUG H.I.	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. SARI HASSOUN Z.	M C A	U.A.B.B.T (Tlemcen)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Louange à Dieu et grâce à Lui, en premier lieu, qui nous a donné la force et nous a inspiré avec patience et détermination pour mener à bien cet humble travail.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire

Imane Berrezoug, professeur de physique à l'université d'Ain Temouchent, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail. Nous tenons à remercier nos chers parents pour leurs soutiens au long de nos études.

Aussi les professeurs de laboratoire : Moussa boudjema fethi,

Hadj said nasser djammel edine qui m'a beaucoup aidé et m'a donné des bons conseils sur ce projet

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université d'Ain Temouchent.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitude et respects.

Dédicace

Ce modeste travail est dédié :

*Aux personnes les plus chères de ma vie, mon père et ma mère Rabi yarhmha ,
ce sont les bougies qui illuminent mon chemin vers la réussite ; ils
m'ont tout donné, leur amour, et leurs sacrifices pour que je
puisse étudier dans de bonnes conditions, Et ils n'arrêtaient pas
de m'encourager et attention à mes intérêts.*

A mes soeurs : Mejda et Nariman .

A Dr Imane Berrezoug

A tous les enseignants de Génie mécanique.

A tous mes amis.

*A toutes la promo de Génie mécanique Option énergétique de
l'année d'étude 2021-2022*

A tous ceux qui sèment le bonheur dans mon chemin

Résumé :

L'un des processus d'amélioration des performances des éoliennes est d'étudier et d'analyser le type de pales utilisées, en mesurant leur efficacité en production de l'électricité. Le but de cette étude est de connaître et d'atteindre des résultats afin d'offrir une grande productivité à bas prix. Les graphiques ont été exécutés à l'aide d'un (modèle d'éolienne miniature). Les résultats ont permis d'obtenir des différences nettes en sachant combien de lames conviennent.

Abstract :

One of the processes of improving wind turbine performance is to study and analyze the type of blades used, by measuring their efficiency in production of electricity. The aim of this study is to know and reach results in order to provide great productivity at low prices. The graphs were executed using a (miniature wind turbine model). The results made it possible to obtain clear differences Knowing how many blades are suitable.

ملخص:

من عمليات تحسين اداء التوربين الرياح هو دراسة وتحليل نوع الشفرات المستعمل , وذلك من خلال قياس نسبة كفاءتها في انتاج الطاقة الكهربائية. الهدف من هذه الدراسة هو معرفة والوصول الى نتائج من أجل توفير انتاجية كبيرة باثمان ضئيلة. الرسومات البيانية نفذت باستعمال (نموذج مصغر لتربين الرياح) . النتائج مكنت من الحصول على فروقات واضحة في معرفة عدد شفرات مناسبة.

Sommaire

Liste des figures :.....	vii
Liste des tableaux :.....	v
Introduction Générale:.....	1
Chapitre I: généralités sur les énergies renouvelables.....	2
I.1-Introduction :.....	3
I.2- Définition de l'énergie:.....	3
I.2.1- Energie non renouvelable :.....	3
I.2.2-Energie renouvelable :.....	3
I.2.3-propriétés des énergies renouvelables :.....	4
I.2.4-Les différents types d'énergie renouvelable:.....	4
I.3-Énergie solaire :.....	5
I.3.1-Énergie solaire thermique :.....	5
I.3.2-L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :.....	5
I.3.3-Principe de fonctionnement :.....	5
I.3.4 -l'énergie solaire Photovoltaïque :.....	6
I.3.5 -les applications de l'énergie solaire photovoltaïque:.....	6
I.3.6 -Le principe de fonctionnement :.....	7
I.3.7-Caractéristiques de l'énergie solaire solaire :.....	8
I.3.8-Inconvénients de l'énergie solaire :.....	8
I.4- L'énergie éolienne :.....	8
I.4.1-Avantages de l'énergie éolienne:.....	9
I.4.2-Inconvénients de l'énergie aérodynamique :.....	10

I.5-L'énergie hydraulique :	10
I.5.1-Avantages:	11
I.5.2-Inconvénients:	11
I.6-La géothermie:	11
I.6.1-Les avantages de la géothermie :	12
I.6.2-Inconvénients de la puissance des tractors souterrains :	12
I.7-La bioénergie :	13
I.7.1-Avantages de l'utilisation de la bioénergie :	14
I.7.2- Inconvénients de la bioénergie :	14
I.8-L'importance des sources d'énergie renouvelables:	15
I.8.1-Zones d'exploitation des énergies renouvelables:	16
I.8.2-Utilisation industrielle :	16
I.8.3-Utilisation militaire ::	17
I.9-L'énergies renouvelables en Algérie :	17
I.9.1.-Motifs d'intérêt pour les énergies renouvelables en Algérie:	18
I.9.1.1-Énergie conventionnelle :	18
I.9.1.2-Considérations environnementales :	18
I.9.2-prix du pétrole :	18
I.9.3-Politiques qui entravent la consommation d'énergie traditionnelle :	19
I.11-conclusion :	19
Chapitre II: L'énergie éolienne.....	20
II.1-Introduction :	21
II.2-Histoire de l'énergie éolienne :	22

II.2.1- Les moulins à vent :.....	22
II.2.2- Les premières éoliennes électriques:.....	22
II.2.3- Le mouvement est relancé ? :.....	23
II.3- Approche globale du gisement éolien:.....	24
II.4- L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu:.....	26
II.4.1- premières applications de l'énergie éolienne (pompage de l'eau) de l'eau :.....	26
II.4.2- composants d'éoliennes:.....	29
II.4.3- Principe de fonctionnement des turbines dans la production d'électricité	32
II.4.4- Les opposants aux éoliennes :.....	34
II.5- Les différents types d'éoliennes:.....	34
II.5.1- Avantages des types éoliennes (horizontale et verticales)	37
II.5.1.1- L'éolienne à axe horizontal.....	37
II.5.1.2- L'éolienne à axe verticale :.....	38
II.5.2- Inconvénients des types éoliennes (horizontale et verticales) :.....	38
II.5.2.1- L'éolienne à axe horizontal :.....	38
II.5.2.2- L'éolienne à axe verticale :.....	38
II.6- Bases de la conversion de l'énergie éolienne:.....	39
II.6.1- L'aérodynamique des éoliennes:.....	39
II.6.2- Énergie disponible dans le spectre du vent:.....	42
II.6.3- La puissance instantanée du vent:.....	43
II.6.4- Le Coefficient de l'énergie de rotor :.....	46
II.7- Limite de Betz :.....	47
II.7.1. Remarque :	50

II.8-rapport du vitesse λ :.....	51
II.9-Conclusion:.....	51
Chapitre III: Étude Et Résultats de l'effet du nombre de pales de l'éolien dans un mini-modèle	52
<i>III.1-Introduction :.....</i>	<i>53</i>
<i>III.2-Description de la mini éolienne :.....</i>	<i>53</i>
<i>III.3-Les Composants :</i>	<i>55</i>
<i>III.4- Instruments et méthode de fonctionnement :</i>	<i>56</i>
<i>III.5-méthode d'installation :</i>	<i>59</i>
<i>III.6-Résultats et discussion</i>	<i>60</i>
<i>III.6.1- Mini-éolienne à 3 pales :</i>	<i>60</i>
<i>III.6.2- Mini-éolienne à 5 pales : :</i>	<i>62</i>
<i>III.7-Différence entre l'éolienne de 5 pales et l'éolienne de 3 pales :.. ..</i>	<i>64</i>
<i>III.8-conclusion :.....</i>	<i>65</i>
<i>III.9-conclusion générale :.....</i>	<i>66</i>

Liste des figures

<i>Figure. I.1 Un capteur plan vitré.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure.I.2 Principe de la cellule photovoltaïque.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure.I.3 éolienne à voile</i>	<i>9</i>
<i>Figure.I.4 barrage de L'énergie hydraulique :.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure.I.5 Une source d'énergie géothermique</i>	<i>13</i>
<i>Figure.I.6 La biomasse est une énergie renouvelable</i>	<i>15</i>
<i>Figure. I.7 Une capture sur l'énergie renouvelable dans la carte d'algérie</i>	<i>17</i>
<i>Figure.II.1 Les moulins à vent:.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure.II.2 Les premières éoliennes électriques</i>	<i>23</i>
<i>Figure.II.3 sa turbine de Gedser</i>	<i>24</i>
<i>Figure. II.4 Modélisation du vent. Carte globale de la vitesse moyenne du vent à 80m de hauteur publiée par World Wind Energy Association</i>	<i>25</i>
<i>Figure.II.5 Eolienne de 100 KW de Grand Vent</i>	<i>26</i>
<i>Figure.II.6 Eolienne d'Adrar</i>	<i>27</i>
<i>Figure.II.7.1 Carte des vitesses de vent à10 m de hauteur</i>	<i>28</i>
<i>Figure.II.7.2 Les composants d'éoliennes.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure.II.7.3 Principe de fonctionnement des turbines dans la production d'électricité</i>	<i>33</i>
<i>Figure.II.8 Exemple d'éolienne à axe horizontal</i>	<i>35</i>
<i>Figure.II.9 Exemples d'éoliennes à axe vertical</i>	<i>35</i>
<i>Figure.II.10 les trois catégories des éoliennes</i>	<i>36</i>
<i>Figure.II.11 parc des éoliennes</i>	<i>37</i>
<i>Figure.II.12 VUE 3D D'UNE AILE D'UNE PALE D'EOLIENNE</i>	<i>40</i>
<i>Figure .II.13. VUE DE PROFIL D'UNE AILE D'UNE TURBINE EOLIENNE</i>	<i>40</i>
<i>Figure.II.14 ECOULEMENT DE L'AIR AUTOUR DU PROFIL</i>	<i>41</i>
<i>Figure.II.15 Le processus d'effet de force dans la rotation de pales</i>	<i>42</i>
<i>Figure.II.16 Un colis aérien se dirigeant vers une éolienne.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure.II.17. La surface produite par rotation du pales.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure.II.18 Effet de l'altitude et de la (température, hauteur) sur la densité de l'air</i>	<i>46</i>
<i>Figure.II.19 La section transversale de la rafale de vent augmente et la vitesse du vent diminue après avoir traversé l'éolienne</i>	<i>47</i>
<i>Figure.II.20. montrent la relation entre la vitesse du vent et l'énergie.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure II.21. Énergie absorbée et perdue côté d'éoliennes</i>	<i>50</i>
<i>Figure.. III.1-un mini-modèle À propos d'un éolien horizontal.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure.III.2. appareil d'étude du séchag.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure.III.3. anémomètre :.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure.III.4 pont de diod:.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure.III.5 LED:.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure.III.6. multimètre:.....</i>	<i>59</i>

**Figure.III.7- a) Puissance récupérée et puissance du vent , b) Courant,
c) Puissance électrique, d) Efficacité en fonction de rapport de vitesse.....61**

**Figure.III.8- e) Puissance récupérée et puissance du vent , f) Courant, g) Puissance électrique
en fonction de vitesse de vent, h) Efficacité en fonction de rapport de vitesse..... 63**

**Figure.III.9- la différence entre : k) Puissance récupérée et puissance du vent , l) Courant, s)
Puissance électrique en fonction de vitesse de vent, R) Efficacité en fonction de rapport de
vitesse pour les (3 et 5 pales).....64**

Liste des tableaux

<i>III.6.1- Mini-éolienne à 3 pales</i>	60
<i>III.6.2- Mini-éolienne à 5 pales</i>	62

Introduction Générale

Récemment les énergies renouvelables sont un moyen important et nécessaire pour parvenir au développement durable. Actuellement, aucun aspect du développement ne peut être atteint sans la disponibilité des services énergétiques, en particulier avec les derniers développements sur la scène internationale concernant la baisse de la production pétrolière et le changement climatique. Cela a conduit à la nécessité de reconsidérer la consommation croissante d'énergies traditionnelles et les dommages qu'elles causent à l'environnement.

Cela a incité l'humanité à rechercher une énergie renouvelable alternative qui soit respectueuse de l'environnement et assure l'avenir des générations futures. Il y a un intérêt croissant pour les énergies renouvelables car c'est une énergie propre et est considérée comme la meilleure alternative à l'énergie conventionnelle en raison de ses ressources naturelles continues.

L'énergie éolienne a été une des premières énergies renouvelables à être maîtrisée par l'Homme; c'est aussi actuellement l'une des plus utilisées. En effet, parmi toutes les ressources possibles (biomasse, Soleil, vent, etc...), elle est aujourd'hui la plus accessible en termes de technologie et de coût. Elle est donc tout naturellement appelée à prendre une place importante dans le « mix énergétique » mondial.

C'est ce que nous aborderons dans notre projet, en calculant ces performances par l'utilisation de deux différents types de pale, le premier type à cinq pales et le deuxième type à trois pales dans le but de savoir l'effet du nombre de pales sur l'efficacité d'un générateur dans la production d'énergie électrique.

Pour répondre à notre objectif nous avons organisé notre manuscrit comme suite :

Dans La première partie du travail comprenait des généralisations sur les énergies renouvelables et un aperçu de l'énergie éolienne Les étapes de son développement et définition simple des éoliennes et l'Avantages et les Inconvénients.

La deuxième partie de l'ouvrage a porté sur un aperçu historique des éoliennes, leur première apparition en Algérie, leurs types, l'étude de leurs pièces et le principe de leur travail.

La troisième partie de l'étude nous a permis d'étudier l'effet du changement de Nombre des pales sur les performances d'une éolienne .

Chapitre I : **généralités sur les énergies** **renouvelables**

I.1-Introduction

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie et biomasse) se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Une caractéristique distinctive de l'énergie renouvelable, contrairement à d'autres énergies, il s'agit d'une source locale, très adaptée aux sites éloignés et aux centres de population éloignés des réseaux électriques, en plus d'être une opération économique et un investissement réussi. Ses vastes ressources constituent la sécurité de l'humanité si nous les utilisons bien.

I.2- Définition de l'énergie

L'énergie est le moteur de tous les phénomènes naturels : la croissance des plantes, le vent, les courants des rivières, les vagues, la chute d'objets... En physique, on la définit comme la capacité d'un système à produire un travail. Elle se présente sous de multiples facettes (thermique, cinétique, électrique...), et l'une de ses propriétés majeures est de pouvoir être convertie d'une forme en une autre [1]

Les énergies ont été divisées en deux types selon l'étendue de la possibilité de renouvellement et de continuation de cette énergie, l'énergie non renouvelable et l'énergie renouvelable.

I.2.1- Energie non renouvelable

C'est l'énergie conventionnelle ou l'énergie qui est épuisée et comprend le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les produits chimiques, c'est-à-dire une énergie qui ne peut pas être reconstruite ou compensée rapidement [2].

I.2.2-Energie renouvelable

L'Energie renouvelable est connue aussi sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ; ressources naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau [3].

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs. De la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, "ENR". En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [4].

I.2.3-Propriétés des énergies renouvelables

-Les énergies renouvelables jouent un rôle important dans la vie humaine, car elles peuvent aider à répondre à un pourcentage élevé de ses besoins, en tant que sources d'énergie à long terme.

-L'énergie renouvelable n'est pas un stock prêt dans lequel nous pouvons utiliser ce que nous voulons parce que les sources d'énergie renouvelables sont disponibles et disparaissent au-delà du contrôle humain.

- L'énergie renouvelable est un stock inépuisable dans lequel nous pouvons utiliser ce que nous voulons car les sources d'énergie renouvelables sont disponibles naturellement

-Les différentes sources d'énergie renouvelables, nécessite l'utilisation d'une technologie appropriée pour chaque source d'énergie. [5]

I.2.4-Les différents types d'énergie renouvelables

Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, sont :

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)
- La géothermie. [6]

I.3-Énergie solaire

L'énergie solaire se divise en deux grandes parties : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque.

I.3.1-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) ou, 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. [7]

I.3.2-L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :

- La production d'eau chaude,
- Le chauffage des maisons,
- Le chauffage de l'eau des piscines,
- Le séchage des récoltes,
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- La production de très haute température. [7]

I.3.3-Principe de fonctionnement

Les capteurs solaires de type plan sont le plus couramment utilisés. Ils se composent d'un absorbeur situé dans un coffrage isolé en face arrière et constitué d'un vitrage en face avant. Cet absorbeur possède une couche sélective qui augmente la captation de l'énergie solaire tout en limitant les pertes par rayonnement. Le vitrage quant à lui évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent et crée un effet de serre qui augmente. [7]



Figure. I.1 Un capteur plan vitré [46]

I.3.4 -L'énergie Solaire Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible.

Le but est qu'ils soient exposés un maximum aux rayonnements du soleil, pour récolter les photons du soleil, et en faire ensuite de l'électricité. [8]

I.3.5 -Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque

- Générer de l'électricité pour la vendre au réseau électrique.
- Systemes d'éclairage autonomes.
- Signalisation par énergie photovoltaïque, par exemple dans les phares.
- Électrification rurale, villages éloignés des principaux réseaux électriques.
- Systemes photovoltaïques liés aux télécommunications, répéteurs, etc.
- Fermes agricoles et d'élevage [9]

I.3.6 -Le principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. [10]

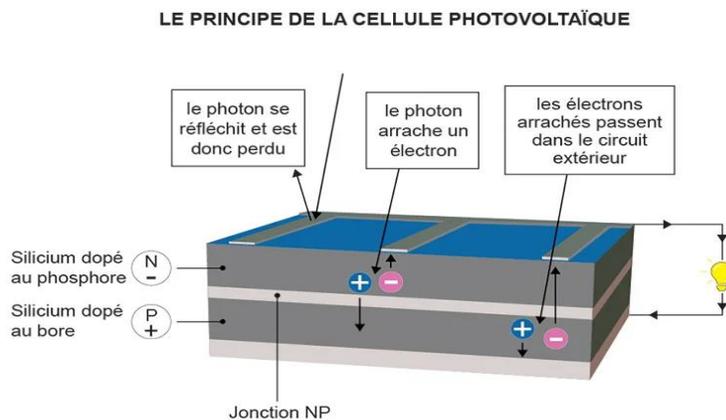


Figure.I.2 Principe de la cellule photovoltaïque [10]

I.3.7-Caractéristiques de l'énergie solaire

L'énergie solaire a de nombreuses caractéristiques :

- Elle est considérée comme une source inépuisable gratuitement, ce qui facilite la possibilité d'établir des projets durables, pour répondre à leurs besoins énergétiques. [11]
- Pas d'émission de gaz à effet de serre.
- Une énergie verte et renouvelable qui peut couvrir les besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- Une source d'énergie disponible et silencieuse.
- Une opportunité de faire des économies tout en préservant la planète grâce aux panneaux solaires thermiques.
- Des installations à des prix abordables, avec des frais de maintenance bas. [8]

I.3.8-Inconvénients de l'énergie solaire

- L'implantation de champs d'énergie solaire nécessite de grandes surfaces, ce qui ne convient pas à l'intimité de certains pays Petits et moyens espaces.
- Les coûts de construction des centrales solaires sont élevés et non stockables.
- Manque d'électricité provenant de l'énergie solaire pendant la nuit et lors de conditions météorologiques instables.
- La surface de la Terre ne reçoit qu'une petite quantité de cette énergie. [12]

I.4- L'énergie éolienne

Une éolienne est une machine permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle-même convertie en électricité. Lorsque plusieurs éoliennes sont installées sur un même site, on parle de « parc » ou de « ferme » d'éoliennes.

Les premières éoliennes servant à produire de l'électricité datent des années 1970.

Aujourd'hui, en France, l'éolien est la 2e source d'électricité renouvelable la plus utilisée après l'énergie hydraulique.

Il fournit près de 5 % de la consommation nationale d'électricité. [13]



Figure.I.3 éolienne à voile [13].

I.4.1-Avantages de l'énergie éolienne

Parmi les caractéristiques de l'énergie éolienne figurent :

-L'éolien est une énergie renouvelable locale qui ne produit aucun gaz polluant de par son exploitation 95% du territoire utilisés comme champs de vent, ils peuvent être utilisés à d'autres fins, telles que la culture et le pâturage turbines au sommet des bâtiments.

-L'énergie éolienne bénéficie de la possibilité de l'utiliser avec certains moyens de stockage d'énergie Tels que : batteries, réseaux de production d'énergie électrique et pompes à eau. [11]

I.4.2-Inconvénients de l'énergie aérodynamique

- L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente et faible.
- L'énergie éolienne couvre des zones de 1 kilomètres carrés par mégawatt et pas par tout au monde car il existe des petits pays.
- La rotation rapide des pales géantes de la tige contribue à la tuerie des oiseaux, de plus, dans la plupart des cas, une grande surface doit être isolée, ce qui rend la logique de production d'énergie éolienne loin d'être idéale. [14]

I.5-L'énergie hydraulique

Découverte au XIXe siècle, l'énergie hydraulique provient de la force motrice des chutes et cours d'eau. L'installation de barrages sur des lacs ou des rivières permet de retenir l'eau et de l'acheminer jusqu'à une centrale, où une turbine transforme l'énergie de la gravité de l'eau en électricité. L'énergie hydraulique est l'énergie renouvelable la plus exploitée aujourd'hui au niveau mondial. [15]



Figure.I.4 barrage de L'énergie hydraulique [15]

I.5.1-Avantages

- L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable. Sa production n'entraîne pas d'émissions de CO₂ et ne génère pas de déchets toxiques.
- L'énergie hydraulique est modulable : en cas de panne générale d'électricité, il est possible d'augmenter très rapidement sa puissance électrique. [15]

I.5.2-Inconvénients

- La construction de barrages peut bouleverser, voire détruire, certains écosystèmes.
- L'installation de centrales hydroélectriques entraîne souvent d'importants déplacements de population ainsi que la disparition de surfaces agricoles.
- L'installation d'une centrale hydroélectrique est très coûteuse et doit répondre à un cahier des charges très contraignant (résistance aux crues et aux séismes, études d'impact environnemental...). [15]

I.6-La géothermie

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques.

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. [16]

L'énergie géothermique contrairement aux énergies solaire et éolienne, elle est disponible sur de grandes surfaces et partout, contrairement à d'autres sources d'énergie qui appartiennent à certains pays. Cela le rend accessible à tous et non limité à quiconque. La consommation d'énergie mondiale actuelle est d'environ 15 TWh, ce qui est incomparable à ce que l'énergie géothermique peut produire comme mentionner précédemment, mais néanmoins, les centrales géothermiques d'aujourd'hui sont peu nombreuses par rapport à ce qu'elles peuvent produire en quantités énormes.

L'utilisation efficace de l'énergie géothermique pour produire de l'électricité nécessite que la température de l'eau dépasse 150 ° C pour alimenter les turbines, mais à la place, la différence de

température entre la surface et le sol peut être utilisée, car la terre est plus résistante aux changements d'air saisonniers que l'air, et même la société suédoise IKEA a adopté la méthode de refroidissement Ce chauffage.

Une fois la centrale construite - et elle coûte cher - il devient très peu coûteux de produire de l'énergie géothermique par rapport à d'autres sources de ressources. Il est facile de calculer l'énergie géothermique avec précision, car ce n'est pas comme les autres sources d'énergie qui fluctuent avec le temps, comme le soleil et le vent, nous pouvons donc prédire la quantité d'énergie géothermique extraite avec un haut degré de précision avant le processus d'extraction.

, cela peut nous aider à extraire les bonnes quantités au besoin. [17]

I.6.1-Les avantages de la géothermie

L'énergie géothermique est relativement respectueuse de l'environnement. La pollution sous forme de fumées n'existe pas même s'il y a forage de la surface de la terre. L'environnement n'est pas endommagé, à l'exception du terrain nécessaire pour la centrale électrique et les liaisons de transport.

1. Contrairement à l'énergie éolienne, l'énergie géothermique est fiable, car elle fournit une puissance constante.
2. L'utilisation de combustibles conventionnels polluants tels que le pétrole et le charbon peuvent être réduits si l'on utilise la géothermie et d'autres formes d'énergie alternative. Il y a donc, encore une fois, une réduction de la pollution.
3. L'énergie géothermique peut prendre différentes formes. Par exemple, elle peut être utilisée pour produire de l'électricité ou de l'eau chaude. Elle peut aussi être utilisée directement pour chauffer les maisons et les entreprises. [18]

I.6.2-Inconvénients de la puissance des tracteres souterrains

L'énergie géothermique ne libère aucun gaz à effet de serre lorsqu'elle est extraite, mais certains gaz à effet de serre sont stockés sous la surface de la terre, tels que le sulfure d'hydrogène et le dioxyde De carbone. Ils sont rejetés dans l'atmosphère lors du processus d'extraction. [17]

-L'un des plus gros inconvénients de l'énergie géothermique lors de son extraction est de respecter les emplacements des stations, et donc nous devons construire plus de stations pour travailler sur de grandes surfaces, ce qui nous coûte cher.

-La structure du sol change en raison du processus de forage lorsque l'énergie géothermique est extraite à proximité des centrales électriques. Ces changements provoquent des tremblements de terre, mais la plupart des stations sont éloignées des zones résidentielles, elles ne causent donc aucun dommage.

-L'affaissement progressif du terrain ne se produit que dans les zones où des centrales électriques sont en cours de construction, entraînant des dommages aux routes, aux bâtiments résidentiels, etc. [17]

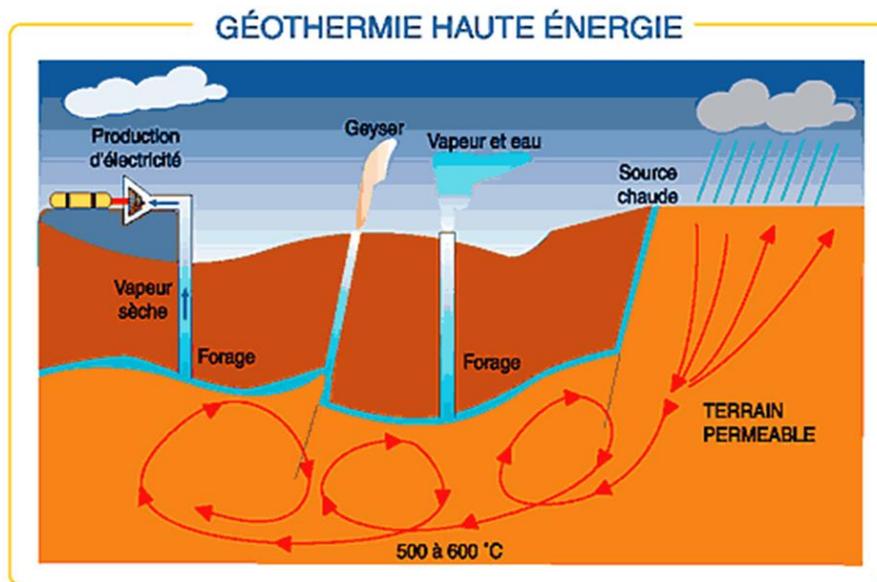


Figure.I.5 Une source d'énergie géothermique [47]

I.7-La bioénergie

La bioénergie est un type d'énergie renouvelable dérivée de **la biomasse** ; Qui comprend la matière organique des plantes et des animaux. Quant à la méthode de conversion des matières premières biologiques en bioénergie, elle consiste à convertir les glucides complexes de la matière organique en énergie, [19]

En d'autres termes, l'extraction de la bioénergie dépend de sources végétales et animales telles que ; Canne à sucre, paille et soja. [20]

La bioénergie diffère des combustibles fossiles en ce que les combustibles fossiles sont des énergies non renouvelables dont la production prend des millions d'années, comme le pétrole brut et le charbon.

Quant à la bioénergie, c'est une énergie renouvelable et peut être produite facilement. [20]

I.7.1-Avantages de l'utilisation de la bioénergie

Les avantages et les bénéfices de la bioénergie sont nombreux, notamment les suivants :

-Réduire la production de dioxyde de carbone en raison de son absorption de l'atmosphère lors de la fabrication de bioénergie par le processus de photosynthèse, contrairement aux combustibles fossiles, qui nuisent à l'environnement en libérant du dioxyde de carbone.

-Réduire les gaz à effet de serre qui contribuent à l'augmentation des effets du réchauffement Climatique.

-Améliorer la qualité de l'air en éliminant les déchets de biomasse grâce à des usines de bioénergie qui contrôlent la quantité d'émissions de gaz toxiques dans l'air.

-Moins toxique pour l'environnement, et sa capacité à se décomposer est très grand par rapport à d'autres matériaux industriels qui nuisent à l'environnement.

-Accroître le développement économique du pays, et donc la capacité d'ouvrir de nombreux projets Compétents Dans la bioénergie, qui affecte positivement les opportunités d'emploi pour de nombreux de personnes. [21]

I.7.2- Inconvénients de la bioénergie

-La production de biocarburants peut être complètement inefficace bien que les biocarburants présentent de nombreux avantages, certains inconvénients leur sont associés. Un inconvénient est que la production de biocarburants peut être assez inefficace, selon les matières premières et la composition de l'installation de production de biocarburants.

-En fonction de la génération de production de biocarburants, les carburants conventionnels peuvent être plus efficaces en termes d'intrants matériels et de production d'énergie.

-De grandes quantités de matières premières doivent être utilisées pour produire et découvrir des biocarburants, de grandes quantités de matières premières doivent être converties, ce qui peut entraîner une pénurie de ces matières premières dans d'autres branches de l'industrie.

Ainsi, la manipulation de gros volumes de marchandises peut exercer une forte pression sur les machines, ce qui peut entraîner des coûts de réparation plus élevés.

-Émissions importantes de gaz à effet de serre dans la chaîne de production bien que le processus de production lié aux biocarburants lui-même puisse être considéré comme respectueux de l'environnement car cela signifie seulement que des niveaux relativement faibles de gaz à effet de serre sont émis.

-Utilisation d'engrais chimiques et de pesticides afin de faire pousser de grandes quantités de cultures, de grandes quantités d'engrais chimiques et de pesticides sont utilisées, cependant, ces substances sont très nocives pour notre environnement car elles polluent le sol et peuvent polluer les eaux souterraines ainsi que l'appauvrissement de la couche d'ozone, donc la production de biocarburants n'est pas aussi verte qu'on pourrait le croire.

-La production de biocarburants peut également augmenter les prix des denrées alimentaires sur le marché mondial.

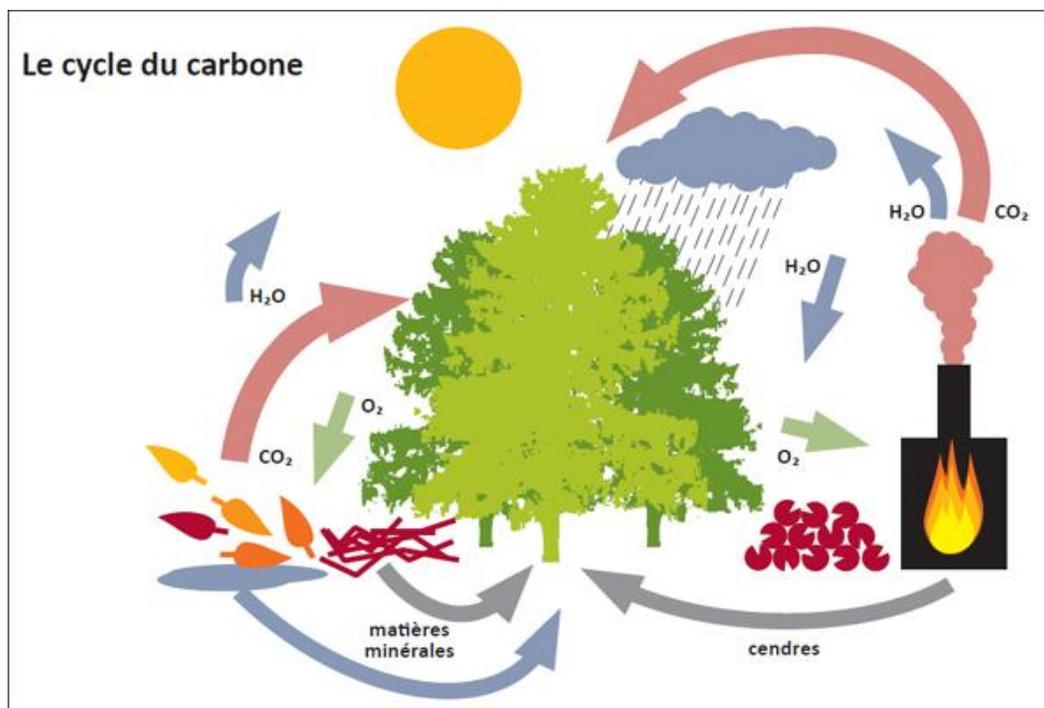


Figure.I.6 La biomasse est une énergie renouvelable [48]

I.8-L'importance des sources d'énergie renouvelables

Les énergies renouvelables revêtent une grande importance, notamment :

Disponible dans la plupart des pays du monde, c'est une alternative efficace aux sources d'énergie Traditionnelles Se déplacer et s'adapter à la réalité du développement et aux besoins des régions éloignées et rurales.

Il est propre et ne pollue pas gravement l'environnement et préserve la santé publique.

Économique dans de nombreuses utilisations, et a un grand retour économique assure une disponibilité continue, un prix raisonnable et une régularité.

Ne pas faire de bruit ni laisser de résidus nocifs qui polluent l'environnement.

Réaliser le développement environnemental, social, industriel et agricole.

Utilise des techniques simples qui peuvent être fabriquées localement en développant les activités du soleil, du vent, des marées et de la géothermie ont également des ressources gratuites et renouvelables.

I.8.1-Zones d'exploitation des énergies renouvelables

Les sources renouvelables ont des domaines d'utilisation multiples et bénéfiques, qui sont représentés dans les finalités suivantes.

I.8.2-Utilisation industrielle

Certaines usines ont eu recours à l'énergie solaire dans certains processus de chauffage et la fumigation, en particulier dans les usines alimentaires, plastiques et de teinture, en plus des oratoires mécaniques et de nombreuses Autres industries nécessitant une température moyenne ou basse.

Distillation de l'eau.

Chargement des batteries et des stations TV et sans fil.

Illumination des voies de navigation.

Dispositifs d'avertissement de navigation.

Système d'entraînement des haut-parleurs.

Réfrigérateurs pour le stockage des médicaments dans les formations sanitaires.

Chargement des batteries électriques.

Exploitation d'unités de dessalement d'eau.

- Électrification des villages reculés.
- Faire fonctionner les télévisions sur les places publique. [49]

I.8.3-Utilisation militaire

- Système de chauffage solaire pour les collèges militaires à l'usage des étudiants.
- Utilisations de chauffe-eau solaires de terrain pour fournir de l'eau chaude aux soldats.
- Alimentation des zones résidentielles et des villes militaires en chauffe-eau solaires.
- Dessalement de l'eau.
- Alimentation des stations sans fil fixes.

I.9-L'énergies renouvelables en Algérie

Avec la demande croissante d'énergie, les approvisionnements limités et l'épuisement des combustibles Fossiles Et l'émergence du problème de la pollution de l'environnement est devenue nécessaire pour avancer vers le développement et l'exploitation des énergies renouvelables en Algérie.

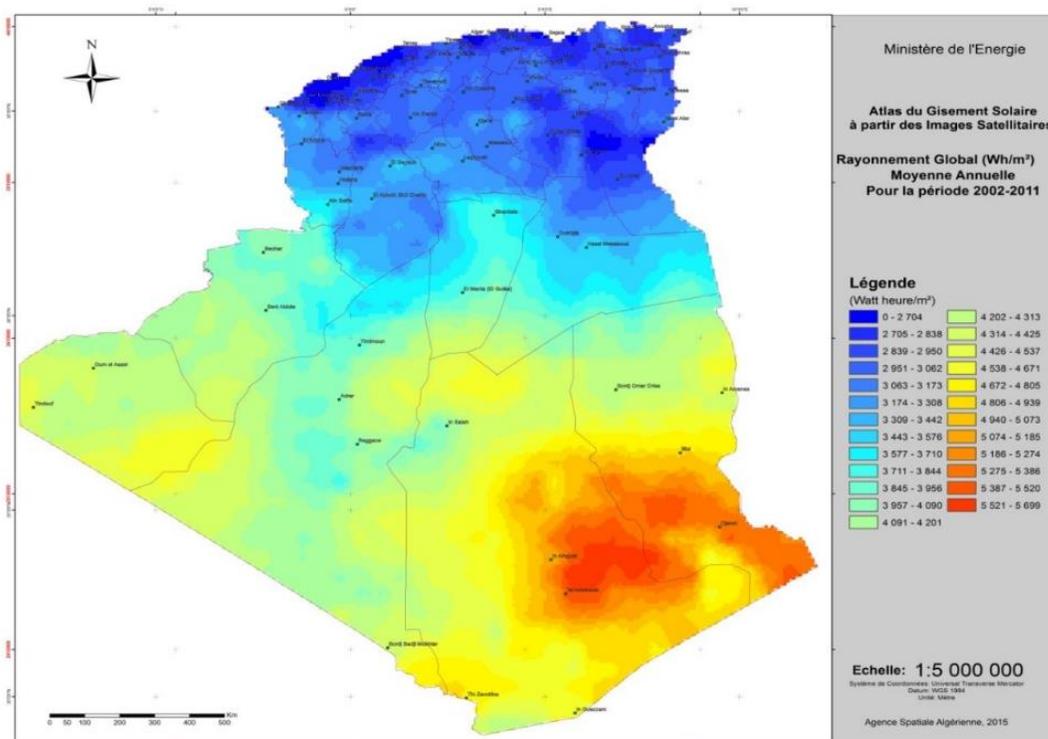


Figure. I.7 Une capture sur l'énergie renouvelable dans la carte d'Algérie [41]

I.9.1-Motifs d'intérêt pour les énergies renouvelables en Algérie

L'inquiétude suscitée par l'épuisement des ressources énergétiques traditionnelles ainsi que le problème de la pollution ont poussé l'Algérie à rechercher de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes pour l'atmosphère. Malgré Les sources d'énergie renouvelables ne sont pas aussi disponibles que les sources d'énergie conventionnelles, mais il existe L'Algérie dispose d'un large champ d'investissement dans les énergies renouvelables, et l'un des facteurs les plus importants qui a poussé En Algérie, l'intérêt pour les énergies renouvelables se retrouve : [22].

I.9.1.1-Énergie conventionnelle

De nombreuses études et prévisions indiquent l'épuisement de l'énergie conventionnelle à l'avenir. Cette question constitue un axe important pour les économistes qui tentent de trouver une alternative à l'énergie traditionnelle pour répondre à la demande énergétique.

Cela a conduit l'Algérie à renforcer sa position dans les énergies renouvelables, non seulement pour la diversification énergétique, mais aussi pour constituer une garantie pour la sécurité et l'approvisionnement énergétiques futurs. Encouragement par la recherche et le développement [22].

I.9.1.2-Considérations environnementales

La prise de conscience des enjeux environnementaux s'est accrue car chacun prend conscience qu'il est nécessaire de préserver la nature et l'environnement dans lequel nous vivons, Avec l'intervention humaine dans cet écosystème équilibré et sa consommation massive d'énergie traditionnelle provoquant des gaz et des polluants atmosphériques. Le processus de transport et d'extraction de carburants de toutes sortes a pollué la terre Dans de nombreux domaines. Outre-la pollution de l'eau, tout cela a poussé l'Algérie à chercher À propos des sources d'énergie propres et respectueuses de l'environnement. [22].

I.9.2-prix du pétrole

Avec les fluctuations ponctuelles des prix du pétrole et la dépendance de l'Algérie principalement au pétrole pour ses exportations, elle l'a poussée à rechercher des sources d'énergie afin de diversifier ses exportations, ainsi que pour l'utiliser la population.

I.9.3-Politiques qui entravent la consommation d'énergie traditionnelle

Il encourage les énergies renouvelables en développant plusieurs méthodes et est généralement motivé pour le faire diversifier les sources d'énergie et réduire la dépendance aux énergies traditionnelles l'une des méthodes utilisées à cet égard est la taxation et la diffusion Les énergies renouvelables parce que ce sont ces méthodes et ces motivations qui maintiennent les énergies renouvelables au centre de l'attention du monde dans nombreux pays, dont l'Algérie. [23]

I.10-conclusion

Enfin, l'énergie renouvelable est considérée comme une bouée de sauvetage pour le monde à l'avenir, car elle est inépuisable, surtout après que le monde se soit largement tourné vers l'utilisation de l'électricité, Il n'est pas possible de compter sur le pétrole pour produire de l'électricité pendant de longues périodes, car il est sur le point de s'épuiser, On sait que le pétrole a besoin de millions d'années pour se former.

Quant aux sources d'énergie renouvelables, elles sont continuées tant qu'il reste de la vie.

L'électricité peut être produite à partir d'elles pendant des périodes presque infinies, et elles sont devenues une chose de base et disponible dans la plupart des foyers. Surtout dans les villes civilisées, cela ne présente aucun danger pour l'environnement et les énergies renouvelables sont la voie vers un avenir radieux sans pollution.

Chapitre II :

L'énergie éolienne

II.1-Introduction

L'énergie éolienne est l'utilisation du flux d'air à travers les éoliennes pour faire fonctionner mécaniquement les générateurs afin de produire de l'électricité.

Comme les champs solaires, les champs éoliens connectent plusieurs turbines directement au réseau électrique, remplaçant les centrales électriques conventionnelles. L'énergie éolienne change considérablement au cours de l'année et est souvent complétée par d'autres sources d'électricité pour assurer une production d'électricité continue.

Et Que ce soit à l'échelle individuelle avec les petites éoliennes ou à l'échelle nationale avec les grandes éoliennes, l'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production électrique de façon décentralisée, ne produit directement aucun polluant sans utiliser de dioxyde de carbone et sans crainte fuite des ressources. Comme le soi-disant éolien "marin », Avec ses installations offshores, elle tend également à se développer. Dans ce chapitre, nous discuterons de l'étude des éoliennes et de leur fonctionnement pour produire de l'énergie électrique.

II.2-Histoire de l'énergie éolienne

Les éoliennes sont en tout point positives pour la société et l'environnement : moins de pollution, pas de gaz à effet de serre, pas de déchets toxiques ou radioactifs notamment ! Cependant, si l'on remonte à son origine, on peut voir que cette forme d'énergie durable efficace sur le long terme a malheureusement souffert au début du XXème siècle de l'essor des énergies fossiles [24]

II.2.1-Les moulins à vent

Dès l'antiquité, les moulins à vent se développent. Apparus à l'an 600 au Moyen Orient, ils se sont ensuite implantés en Egypte. Les moulins à vent sont apparus en Europe (Grande Bretagne d'abord) un peu avant l'an 1000 puis ils se sont généralisés au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.



Figure.II.1 Les moulins à vent [24]

II.2.2-Les premières éoliennes électriques

L'apparition des premières éoliennes électriques se fait à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush à Cleveland (Etats-Unis) qui met en place ce dispositif pour

alimenter sa maison en électricité. C'est le coup d'envoi de 20 ans d'autonomie assurée grâce à ce dispositif de 18 mètres de haut et de 17 mètres de diamètre.

La première éolienne automatique destinée à la production de la « fée verte » vient de voir le jour. A peu près au même moment, Poul La Cour établit un prototype bâti sur le terrain de l'école d'Askov en présentant un nombre moindre de pales afin de produire davantage d'électricité en tournant plus vite. C'est la première éolienne dite industrielle. En 1918, dix ans après la mort de celui qu'on surnomme « L'Edison danois », 3 % de l'énergie produite au Danemark provient déjà de l'éolien.

Au fil des progrès de la mécanique et de l'aérodynamique, la productivité des éoliennes ne cesse de s'améliorer. Pourtant, des vents contraires soufflent sur son développement, la faute au charbon puis au pétrole bon marché, et enfin à la fission de l'uranium.

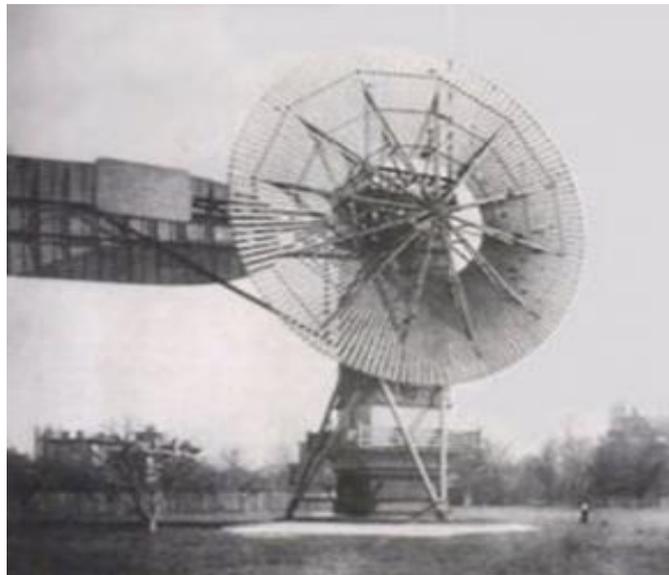


Figure.II.2 Les premières éoliennes électriques [24]

II.2.3-Le mouvement est relancé ?

Le progrès n'attend pas. En 1957, c'est encore un Danois, Johannes Juul qui conçoit sa turbine de Gedser d'une puissance de 200 kW. Ce modèle qui est le premier à produire du courant alternatif a largement inspiré la conception des éoliennes actuelles. Les énergies renouvelables ont de nouveau le vent en poupe après les deux chocs pétroliers et les parcs éoliens ne cessent de s'étendre. Entre 2000 et 2012, la production mondiale d'électricité d'origine éolienne est

multipliée par 28 (la production mondiale d'éolien étant de 1 039 Twh). Le mouvement est véritablement lancé. Ces machines partent également à la conquête de la mer, éolien offshore ou éoliennes flottantes, attraper des vents puissants, ce qui est prometteur pour la productivité énergétique. Le groupe EDF expérimentera d'ailleurs en 2016 un parc de 13 éoliennes flottantes en méditerranée.



Figure.II.3 sa turbine de Gedser [24]

II.3- Approche globale du gisement éolien

Le rayonnement du soleil et la rotation de la terre (hémisphère irradié, hémisphère dans l'obscurité) sont à l'origine d'écarts de pression atmosphérique qui s'établissent à proximité de la surface ou en basse altitude. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus au moins élevée, des régions ou zones de forte pression vers les zones de plus faible pression. Ces masses d'air emportent avec elles une énergie cinétique qui peut être considérable, proportionnelle à la masse volumique de l'air, aux volumes échangés et au carré de la vitesse du vent. La vitesse du vent, sa direction, ses fluctuations, son aléa, etc. au cours d'une période (par exemple, un jour, un mois, une année) sont des informations essentielles qui caractérisent le gisement éolien.

Le gisement éolien est globalement bien réparti à la surface des différents continents et des océans. On estime que son exploitation maximum par des turbines relevant de la technologie actuelle permettrait la production d'électricité d'un minimum de **100 000 TWh/an** au plan mondial, de quoi couvrir, en théorie, plusieurs fois la consommation annuelle d'électricité, sous réserve que la production d'électricité éolienne soit au fil des heures synchronisée avec la demande d'électricité, aux capacités d'interconnexion des réseaux et de stockage d'énergie près. Des laboratoires internationaux s'attachent à modéliser le vent à faible altitude (80m, par exemple) au-dessus de grandes régions.

Il apparaît que le vent en moyenne annuelle est, modéré dans la région du Pôle Nord et dans les régions intertropicales. Il est plus fort autour des régions comprises entre 50° et 60° de latitude. En mer, le vent est plus fort (par exemple : Atlantique Nord, zone des 40^{ème} rugissants dans l'hémisphère Sud) et régulier (les Alizés). Il faut cependant distinguer le gisement brut du gisement électrique qui dépend fortement des caractéristiques des éoliennes, comme nous le verrons plus loin. Par exemple, le potentiel éolien terrestre de l'Allemagne a été récemment évalué de façon réaliste à hauteur de 2 900 TWh en exploitant des aérogénérateurs de nouvelle technologie à haut facteur de charge au lieu de quelques centaines de TWh dans les années 1990. [50]

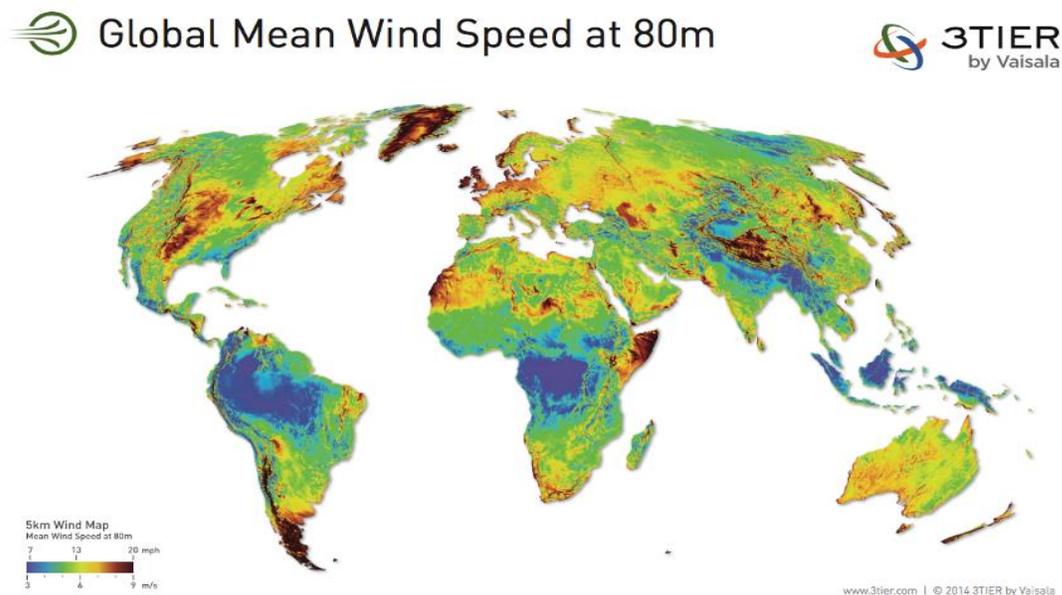


Figure. II.4 Modélisation du vent. Carte globale de la vitesse moyenne du vent à 80m de hauteur publiée par World Wind Energie Association [26]

II.4-L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site de Grand Vent (Alger). Conçue par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-ALBAN en Angleterre. Cette bipale de type pneumatique, à pas variable, de 30 m de haut et avec un diamètre de 25 m (figure 2.5) fut rachetée par Electricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. [27]



Figure.II.5 Eolienne de 100 KW de Grand Vent [27]

II.4.1-premières applications de l'énergie éolienne (pompage de l'eau)

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 7 mètres de diamètre (fig.2.6) a fonctionné pendant près de 10 ans.

Par ailleurs, selon des archives du Ministère de l'hydraulique, deux autres éoliennes ont été installées à Mecheria, pour l'alimentation en eau potable de la ville et à Naama, pour le pompage de l'eau. Les deux machines étaient couplées à une génératrice à courant continu et entraînaient une pompe électrique à courant continu. Une autre éolienne du même type a été installée pour la protection cathodique des tubages du Chott Chergui. [27]

Plus récemment, le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe a installé 77 éoliennes de pompage de l'eau sur les Hauts plateaux. Les éoliennes de pompage de l'eau sont mécaniques et électriques aussi. Mais suite aux nombreux incidents mécaniques rencontrés avec les éoliennes de pompage mécanique, il est généralement admis que pour les forages de grandes profondeurs, l'option aérogénérateur couplé à une pompe électrique est plus fiable. Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4 m/s. [27]



Figure.II.6 Eolienne d'Adrar. [27]

Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence étant de 10 mètres. Cependant, avoir de grandes vitesses ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être importante.

En d'autres termes, le nombre d'heures pendant lequel la vitesse du vent est élevée doit être important sur l'année.

Selon une étude effectuée par l'Européen Wind Energie Association, le coût de l'électricité produite par une ferme éolienne en Europe varie de 5 à 6.5 c€ si la disponibilité de l'énergie éolienne est de l'ordre de 2900 H/an. Dans les sites où la disponibilité est faible, de l'ordre de

1700 H/an, le coût de cette électricité produite varie de 7 à 10 c€ Selon le premier Atlas Vent de l'Algérie établi par l'ONM en 1990 les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées. Dans la région d'Adrar. Ces résultats, qui avaient été obtenus à partir d'un traitement statistique des données vent couvrant jusqu'à 10 années de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER (figure .2.7). Récemment, dans le nouvel Atlas éolien établi par l'ONM l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud a été mise en évidence. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et Ain Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable, noter que lors de l'élaboration du premier Atlas, seules 36 stations météorologiques existaient alors que pour le dernier Atlas, le nombre de points de mesures est passé à 74 stations. Cependant, étant donnée la superficie du territoire algérien, ce dernier chiffre reste faible. Des stations de mesures éoliennes complémentaires sont en cours d'installation. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation. [27]

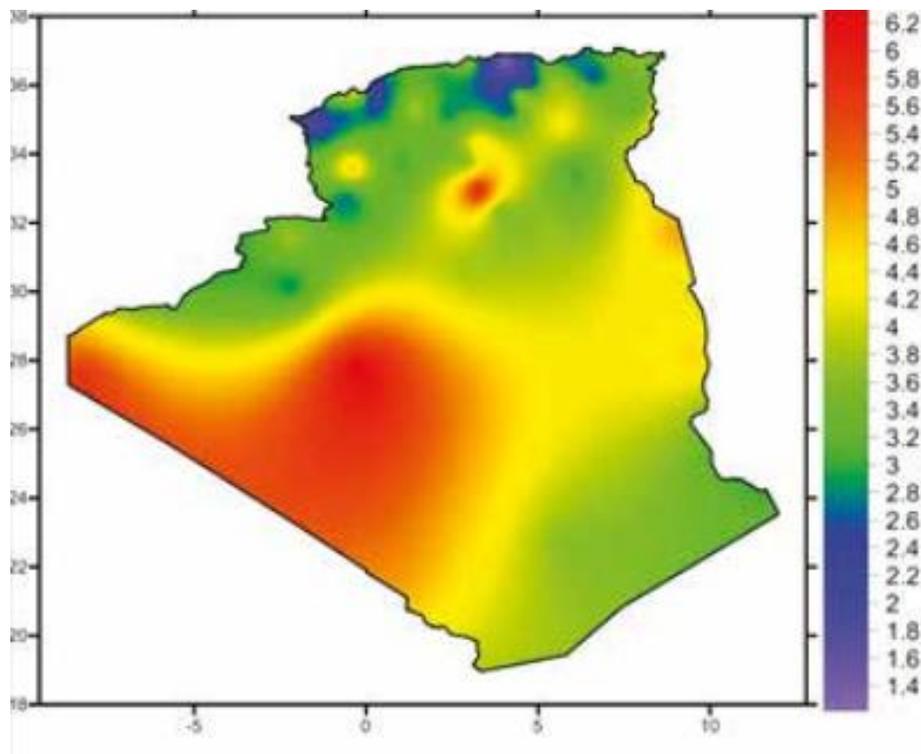


Figure.II.7.1 Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur [27]

II.4.2-composants d'éoliennes

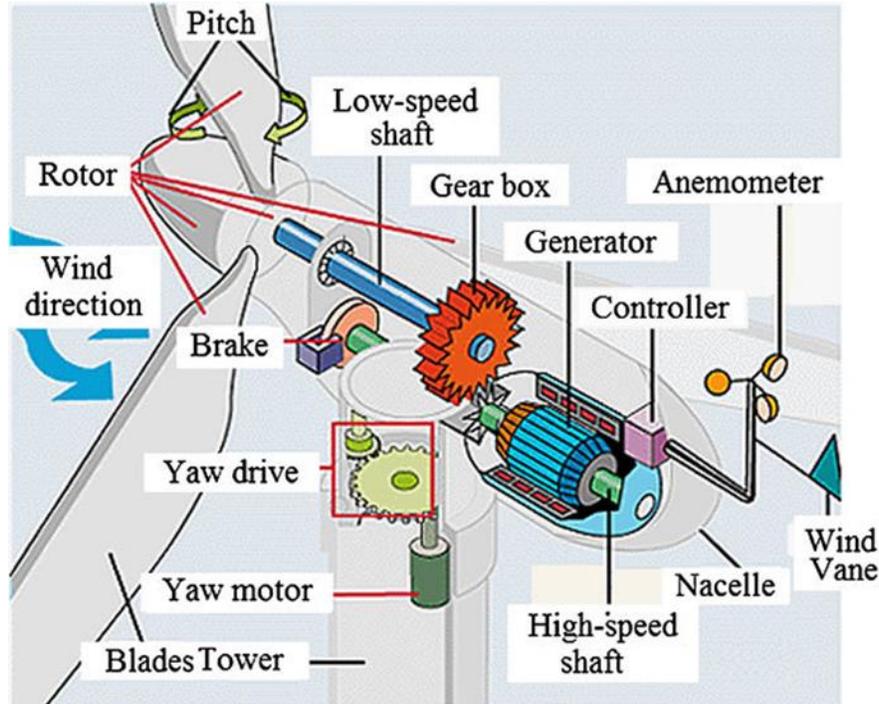


Figure.II.7.2 Les composants d'éoliennes [28]

Les éoliennes modernes sont de tailles variées, mais tous les types sont généralement constitués de plusieurs composants principaux : [29]

1)-Tower

Les pales et la nacelle sont montées au sommet d'une tour. La tour est construite pour maintenir les pales du rotor au-dessus du sol et à une vitesse de vent idéale. Les tours sont généralement entre 50 et 100 m au-dessus de la surface du sol ou de l'eau. Les tours offshore sont généralement fixées au fond du plan d'eau, bien que des recherches soient en cours pour développer une tour qui flotte à la surface. [30]

2)-Wind Vane

La girouette mesure la direction du vent et communique avec le moteur de lacet pour orienter correctement la turbine par rapport au vent [31]

3)-Anémomètre

L'anémomètre mesure la vitesse du vent et transmet les données de vitesse du vent au contrôleur [31]

4)-Blades

La plupart des turbines ont trois pales qui sont faites principalement de fibre de verre. Les pales des turbines varient en taille, mais une éolienne terrestre moderne typique a des pales de plus de 170 pieds (52 mètres). La plus grande éolienne est l'éolienne offshore Haliade-X de GE, avec des pales de 351 pieds de long (107 mètres) - à peu près la même longueur qu'un terrain de football. Lorsque le vent traverse la pale, la pression de l'air d'un côté de la pale diminue. La différence de pression d'air entre les deux côtés de la lame crée à la fois de la portance et de la traînée. La force de portance est plus forte que la traînée, ce qui fait tourner le rotor. [31]

5)-Land-Based Gearbox Turbine

La transmission d'une turbine avec une boîte de vitesses comprend le rotor, le palier principal, l'arbre principal, la boîte de vitesses et le générateur. La transmission convertit la rotation à basse vitesse et à couple élevé du rotor de la turbine (pales et moyeu) en énergie électrique. [31]

6)-Nacelle

La nacelle se trouve au sommet de la tour et contient la boîte de vitesses, les arbres à basse et haute vitesse, le générateur et le frein. Certaines nacelles sont plus grandes qu'une maison et pour une turbine à engrenages de 1,5 MW, peuvent peser plus de 4,5 tonnes. Yaw System [31].

7)-Yaw System

L'entraînement en lacet fait tourner la nacelle sur les éoliennes au vent pour les maintenir face au vent lorsque la direction du vent change. Les moteurs de lacet alimentent l'entraînement de lacet pour que cela se produise.

Les éoliennes sous le vent ne nécessitent pas d'entraînement en lacet car le vent éloigne manuellement le rotor de celui-ci. [31]

8)-Pitch System

Le système de pas ajuste l'angle des pales de l'éolienne par rapport au vent, en contrôlant la vitesse du rotor. En ajustant l'angle des pales d'une turbine, le système de pas contrôle la quantité d'énergie que les pales peuvent extraire. Le système de pas peut également "mettre en drapeau" les pales, en ajustant leur angle afin qu'elles ne produisent pas de force qui ferait tourner le rotor.

La mise en drapeau des pales ralentit le rotor de la turbine pour éviter d'endommager la machine lorsque la vitesse du vent est trop élevée pour un fonctionnement en toute sécurité. [31]

9)-Hub

Faisant partie de la transmission de la turbine, les aubes de turbine s'insèrent dans le moyeu qui est relié à l'arbre principal de la turbine. [31]

10)-Gearbox

La transmission comprend le rotor, le palier principal, l'arbre principal, la boîte de vitesses et le générateur. Le groupe motopulseur convertit la rotation à faible vitesse et à couple élevé du rotor de la turbine (ensemble pales et moyeu) en énergie électrique. [31]

11)-Rotor

Les pales et le moyeu forment ensemble le rotor de la turbine [31]

12)-Low-Speed Shaft

Faisant partie de la transmission de la turbine, l'arbre à basse vitesse est relié au rotor et tourne entre 8 et 20 rotations par minute [31]

13)-Main Shaft Bearing

Faisant partie de la transmission de la turbine, le palier principal supporte l'arbre tournant à basse vitesse et réduit la friction entre les pièces mobiles afin que les forces du rotor n'endommagent pas l'arbre [31]

14)-High-Speed Shaft

Faisant partie de la transmission de la turbine, l'arbre à grande vitesse se connecte à la boîte de vitesses et entraîne le générateur [31]

15)-Generator

Le générateur est entraîné par l'arbre à grande vitesse. Les enroulements de cuivre tournent à travers un champ magnétique dans le générateur pour produire de l'électricité. Certains générateurs sont entraînés par des boîtes de vitesses (illustrées ici) et d'autres sont des entraînements directs où le rotor se fixe directement au générateur [31]

16)-Controller

Le contrôleur permet à la machine de démarrer à des vitesses de vent d'environ 7 à 11 miles par heure (mph) et éteint la machine lorsque la vitesse du vent dépasse 55 à 65 mph. Le contrôleur éteint la turbine à des vitesses de vent plus élevées pour éviter d'endommager les différentes parties de la turbine. Considérez le contrôleur comme le système nerveux de la turbine. [31]

17)-Brake

Les freins à turbine ne sont pas comme les freins d'une voiture. Un frein à turbine empêche le rotor de tourner après qu'il a été arrêté par le système de pas. Une fois les aubes de turbine arrêtées par le contrôleur, le frein empêche les aubes de turbine de bouger, ce qui est nécessaire pour la maintenance. [31]

II.4.3-Principe de fonctionnement des turbines dans la production d'électricité

Les turbines de production d'électricité sont utilisées par étapes séquentielles qui dépendent de l'intensité du vent, afin de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique. Le principe de fonctionnement de ces turbines peut être résumé comme suit

- ❖ **Premièrement** : Le vent fait tourner les pales de la turbine en leur donnant une partie de leur énergie cinétique.
- ❖ **Deuxièmement** : à l'intérieur du couvercle de la turbine, la transmission déplace la rotation lente de l'arbre relié aux pales à des vitesses plus élevées, afin d'obtenir une production d'énergie électrique efficace dans le générateur.
- ❖ **Troisièmement**, l'alternateur directement derrière la transmission convertit l'énergie cinétique en énergie électrique.
- ❖ **Quatrièmement** : La turbine et certains appareils mesurent également la vitesse et la direction du vent, et sur la base de ces mesures, la turbine peut déplacer toute la partie supérieure de

celle-ci (le capot et les pales) à l'aide d'un moteur situé entre la tour de la turbine et sa partie supérieure ; Pour que l'air frappe directement la turbine pour générer la plus grande quantité d'énergie. [32]

- ❖ **Cinquièmement** : Le courant électrique est ensuite transmis par des fils situés à l'intérieur de la tour jusqu'au bas, où se trouve un transformateur électrique qui convertit l'électricité en une tension environ 50 fois plus élevée pour être transférée avec un rendement élevé au réseau électrique. Plus le vent est fort, plus la production d'énergie électrique est importante, et pour exploiter les endroits où le vent atteint beaucoup, plus d'une éolienne est placée l'une à côté de l'autre dans les parcs dits éoliens, et plus d'un parc éolien est connecté au réseau électrique [33]. Le diamètre moyen des pales de l'éolienne est de 70 mètres. , tandis que la hauteur du générateur est d'environ 85 mètres au-dessus de la surface de la terre. La raison de cette hauteur est que la vitesse du vent est directement proportionnel à la hauteur ; Comme doubler la hauteur de la turbine augmentera la capacité de production d'un tiers [32]

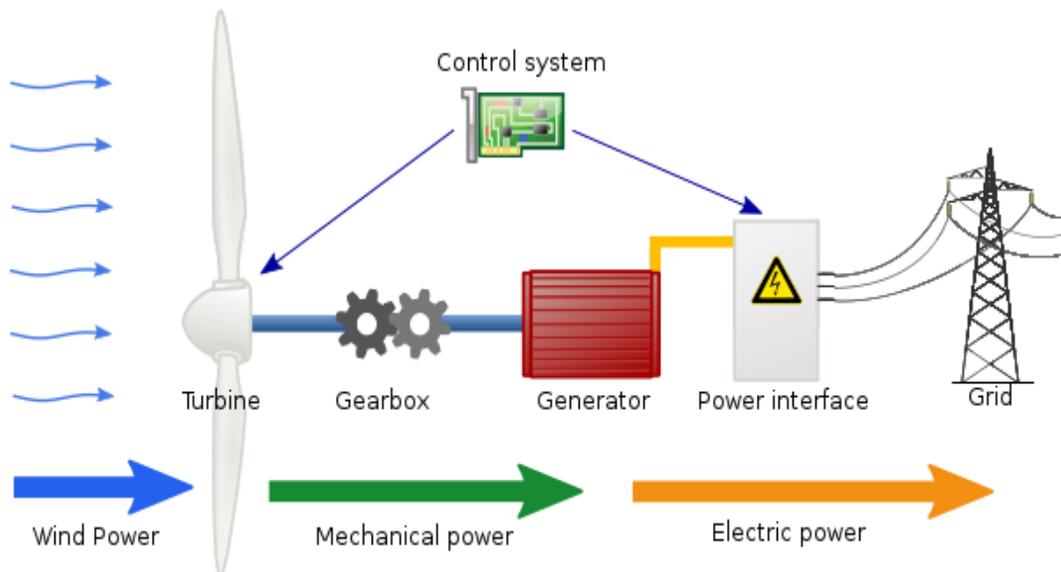


Figure.II.7.3 Principe de fonctionnement des turbines dans la production d'électricité [33]

II.4.4-Les opposants aux éoliennes

Les opposants aux éoliennes affirment avec véhémence qu'elles sont peu pratiques, inefficaces, dommageables pour le paysage et trop chères, et donc insensées de s'y fier.

Étonnamment, ils ont critiqué l'efficacité des turbines car le carburant utilisé - le vent - est gratuit. Bien que l'électricité produite à partir du vent puisse être actuellement plus chère que celle de certains combustibles fossiles, les coûts chutent très rapidement.

Quant à ce que l'on dit être un vilain spectacle, c'est une question d'opinion. Mais une nouvelle vague de technologie éolienne cherche à mettre fin à ce débat pour de bon, rendant l'énergie éolienne moins chère, plus flexible et, dans de nombreux cas, moins d'impact rural.

Certains ne veulent pas s'appuyer sur ces mécanismes du marché, mais ceux qui en dépendent pourraient révolutionner l'énergie éolienne.

II.5-Les différents types d'éoliennes

Depuis les débuts de la technologie éolienne il y avait de nombreux types de conceptions différentes réparties dans le monde entier afin de tirer parti de l'énergie éolienne. Cependant, certains d'entre eux n'ont pas été acceptés commercialement en raison de leur coût élevé, de leur complexité, etc.

Bien qu'il existe de nombreuses façons de classer ces éoliennes, la plus courante consiste à les classer selon l'axe de rotation :

-Axe vertical

- Axe horizontal

Dont **l'axe horizontal**, est le plus courant et répandu, donc cet axe est parallèle à la surface de la terre et également parallèle au courant du vent, au générateur et à la boîte de vitesses au sommet de la tour qui porte l'éolienne, qui rend sa conception quelque peu compliquée et cher.

Il peut être classé selon le nombre de ses pales soit il est simple, double, triple ou multi-pale

Mais le plus répandu est la triple pale.

❖ Pourquoi triple pales ?

Il s'agit de faciliter la pénétration du vent des pales pour réduire les frottements et faciliter leur rotation, contrairement aux pales multiples qui s'enroulent et rendent la rotation difficile.



Figure.II.8 Exemple d'éolienne à axe horizontal [34]



Figure.II.9 Exemples d'éoliennes à axe vertical [34]

Et Fondamentalement, le secteur actuel de l'énergie éolienne peut être globalement réparti en trois catégories, en fonction du lieu d'implantation de l'éolienne et de la conception de sa fixation au sol. Ces trois catégories sont les suivantes : Les éoliennes terrestres (avec une fixation à terre), les éoliennes fixes offshore (avec une fixation au fond marin) et les éoliennes flottantes (montées sur une plateforme flottante) – voir Figure 2.10 :

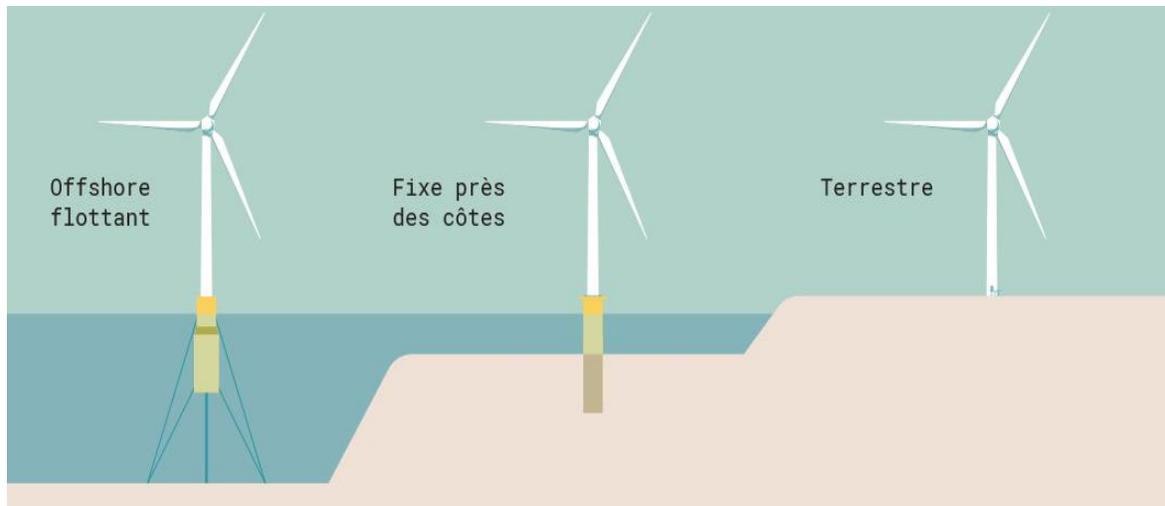


Figure.II.10 les trois catégories des éoliennes [35]

Et Malgré son potentiel écologique, l'éolienne est une construction qui représente des dangers si l'emplacement est mal choisi. Sa position fait l'objet de nombreuses études qui étudient 4 paramètres :

- 1)-Le vent doit être régulier et suffisamment puissant (entre 14 et 90 km/h. Au-delà, l'éolienne s'arrête pour des questions de sécurité).
- 2)-L'éolienne ne doit pas avoir d'impact sur le patrimoine naturel, la faune (animale, oiseau, marine) et éviter les zones protégées. Autrement dit, afin d'éviter de représenter un danger pour les volatiles, les éoliennes ne doivent pas être situées dans les couloirs de migration des oiseaux et encore moins dans des régions comprenant des espèces menacées.
- 3)-Être installée loin des radars et des zones aéronautiques pour éviter d'interférer avec les ondes électromagnétiques (télévision, radio et télécommunications). Et enfin, l'éolienne ne doit pas être installée sur des sites protégés, classés ou des paysages considérés comme remarquables Lorsque le bon endroit est trouvé, les parcs éoliens sont construits pour en tirer le meilleur parti.



Figure.II.11 parc des éoliennes [35]

II.5.1- Avantages des types éoliennes (horizontale et verticale)

II.5.1.1. L'éolienne à axe horizontal :

- ✓ Comme vous l'aurez compris, ce type d'installation est le plus répandu chez les particuliers... Et cela constitue son premier atout. Pourquoi ?
Tout simplement, car cela démontre que ce type d'éolienne est fiable et qu'il a fait ses preuves. Par ailleurs, il est également plus facile de trouver des revendeurs pour ces installations, car il existe de nombreux modèles.

- ✓ Bien évidemment son rendement, Car cette installation a une puissance importante et s'oriente de façon à capter à bien capter les vents. Ainsi, l'éolienne horizontale est reconnue pour avoir un meilleur rendement que l'éolienne verticale... Et cela est certainement le point positif le plus important, car le principal but d'une éolienne est de produire de l'énergie pour l'utiliser ou pour la revendre !

- ✓ Son prix raisonnable ou on trouve des éoliennes horizontales à différents budgets.

II.5.1.2- L'éolienne à axe verticale :

- ✓ Ce type d'éolienne peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Elle est capable de capter des très faibles mouvements du vent et peut ainsi être exploitée plus fréquemment que l'éolienne horizontale. Elle peut également capter des vents violents tout en continuant de fonctionner, elle n'a pas besoin de protection .
- ✓ Sa taille et son adaptabilité. En effet, l'éolienne verticale prend beaucoup moins de place que l'éolienne horizontale et peut ainsi être installée dans le milieu urbain, sur les toits d'une maison... Elle s'intègre parfaitement en ville comme à la campagne. [36].

II.5.2-Inconvénients des types éoliennes (horizontale et verticales)**II.5.2.1- L'éolienne à axe horizontal :**

- ✓ Lorsque l'éolienne est confrontée à des vents forts et puissants, cette dernière ne peut pas fonctionner. En effet, lorsque les mouvements de vent sont trop intenses, l'éolienne, et plus particulièrement les pales, cessent alors de tourner par mesure de sécurité. L'éolienne horizontale ne peut donc pas produire d'électricité durant certaines périodes. Ce point négatif peut devenir réellement handicapant si l'éolienne est installée dans des régions où les vents sont très puissants... Dans ce cas de figure, il sera préférable d'opter pour une éolienne à axe vertical. [36]
- ✓ Le temps de déclenchement de cette installation ! En effet, contrairement à l'éolienne à axe vertical, l'éolienne à axe horizontal met plus de temps à s'orienter par rapport au vent. [36]

II.5.2.2- L'éolienne à axe verticale :

- ✓ Le principal inconvénient de l'éolienne verticale par rapport à l'éolienne horizontale, c'est son faible rendement. En effet, même si cette dernière s'adapte mieux et même si elle est capable de fonctionner avec des vents faibles ou des vents forts, elle produit moins d'électricité que l'éolienne horizontale... Et cela est un point à ne pas négliger, notamment pour les particuliers qui désirent investir et obtenir un bon rendement ! Pour parer à cela,

certaines consommateurs décident de coupler les équipements. En effet, certains particuliers optent pour l'éolienne verticale et le panneau solaire photovoltaïque. Cela permet de bénéficier de la puissance de ces deux équipements qui peuvent fonctionner en alternance.

[36]

- ✓ Enfin, il faut également savoir qu'il est aujourd'hui plus difficile de se procurer une éolienne verticale, car le marché est encore assez restreint... L'éolienne horizontale est bien plus commercialisée. Mais ce dernier point devrait évoluer dans les années à venir
- ![36]

II.6-Bases de la conversion de l'énergie éolienne

L'énergie disponible dans le vent est essentiellement l'énergie cinétique de grandes masses d'air se déplaçant à la surface de la terre. Les pales de l'éolienne reçoivent cette énergie cinétique, qui est ensuite transformée en formes mécaniques ou électriques, selon notre utilisation finale.

L'efficacité de la conversion du vent en d'autres formes d'énergie utiles dépend en grande partie de l'efficacité avec laquelle le rotor interagit avec le vent.

II.6.1-L'aérodynamique des éoliennes

Pour comprendre le mode de fonctionnement d'une éolienne, il faut introduire quelques concepts d'aérodynamique. Parmi ceux-ci, les notions de trainée et de portance jouent un rôle majeur.

La **Figure.2.7** représente une illustration du concept d'aile en trois dimensions avec une cambrure (direction « y »), une envergure L (direction "z") et une corde (direction "x"). Le profil d'aile (surface grisée) est obtenu en "découpant" une section de l'aile en un point le long de l'envergure.

[37]

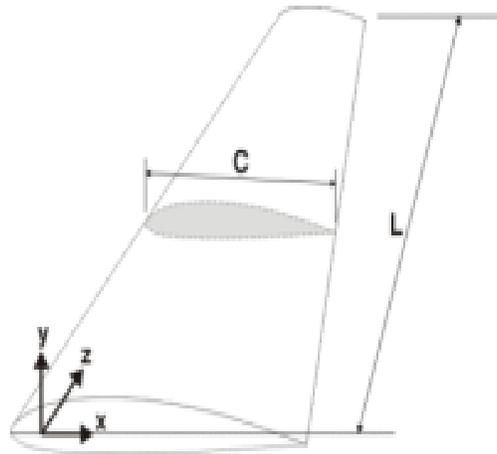


Figure.II.12 Vue 3D d'une ail d'une pale eolienne [37]

Ce profil est constitué, d'une part, d'un bord d'attaque et d'un bord de fuite, et d'autre part, d'une corde qui relie ces deux extrémités (voir Figure 2-13). Dans le cas d'une aile complète en trois dimensions, la corde, c , varie généralement en fonction de la position de long de l'envergure. En outre, la forme du profil peut varier avec cette distance

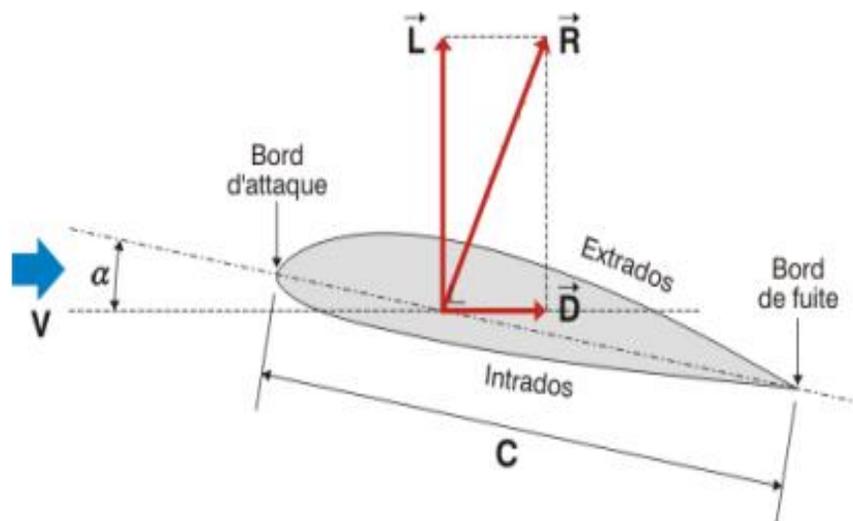


Figure .II.13. Vue de profil d'une aile turbine éolienne [37]

De manière générale, la corde présente un certain angle avec la vitesse de l'air en amont, V .

Cet angle α s'appelle l'angle d'attaque. Plus cet angle est important, plus les filets d'air sont déviés par le profil. En d'autres termes, la présence de l'aile réorganise localement l'écoulement de l'air (autour du profil) Figure.2.14, Du côté de l'extrados, l'aile a fait accélérer l'écoulement.

Par contre, il a ralenti l'écoulement côté intrados. Une telle accélération est accompagnée d'une diminution de pression alors que la décélération engendre une augmentation de la pression.

Comme la pression est différente au-dessus et en dessous de l'aile, les forces de pression sur l'aile ne sont pas identiques au-dessus et en dessous. Il en résulte une force globalement orientée vers le haut. Elle est d'autant plus importante que l'angle d'attaque est important. Il y a une limite à ce raisonnement que nous introduirons plus tard (notion de décrochage).

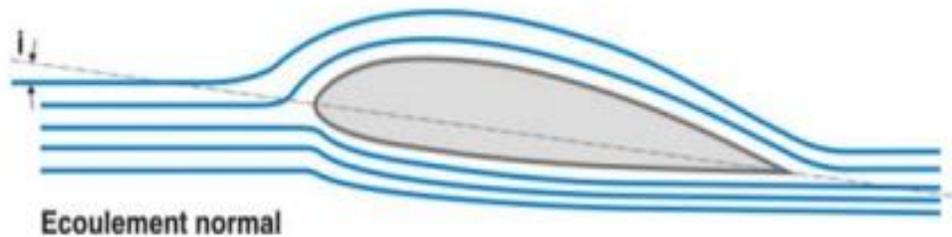


Figure.II.14 Ecoulement de l'air autour du profil [37]

La force sur l'aile peut, comme toute force, se décomposer en plusieurs composantes. Dans notre cas, on considère la composante dans la direction de l'écoulement, la force de trainée (D comme "drag"), et la force dans la direction perpendiculaire à l'écoulement, la force de portance (L comme "lift")

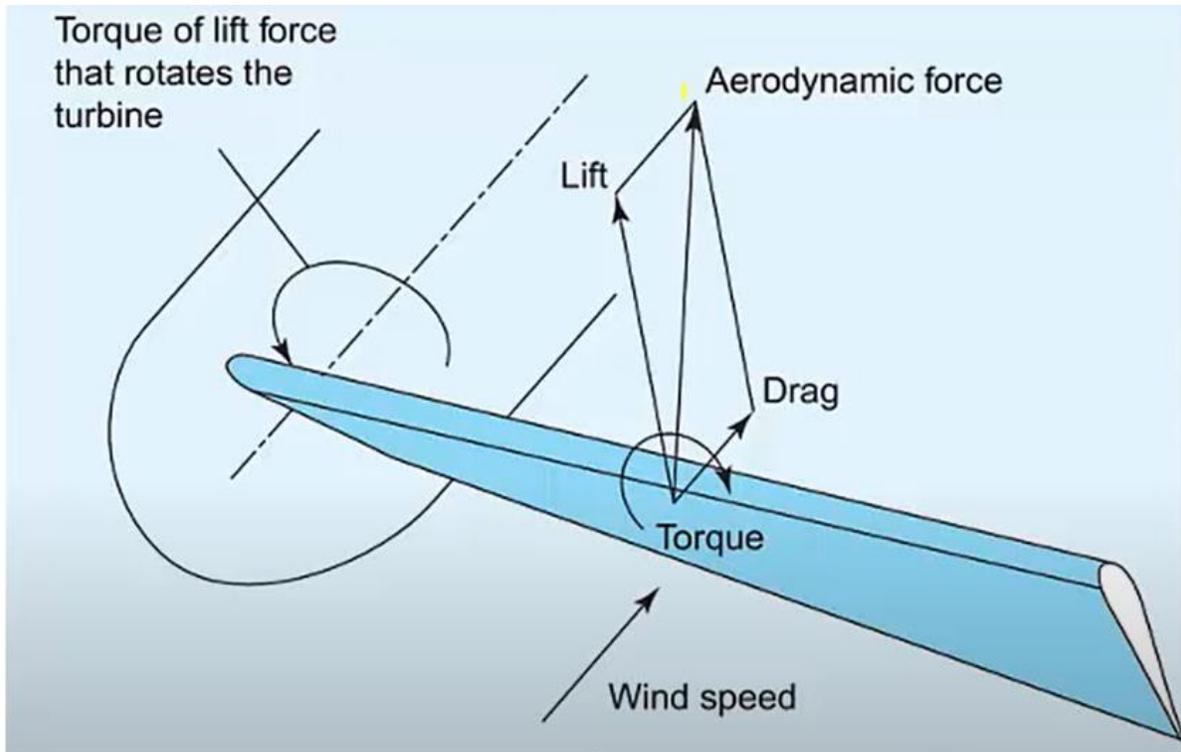


Figure.II.15 Le processus d'effet de force dans la rotation de pales [38]

II.6.2-Énergie disponible dans le spectre du vent

L'énergie cinétique d'un courant d'air de masse m se déplaçant à la vitesse V est donné par l'énergie cinétique du vent :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{II. 1})$$

m : masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_c : énergie cinétique (en joules)

Où

$$m = \rho \cdot V \quad (\text{II.2})$$

ρ : La masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m^3 à au niveau de la mer.

V : volume (m³)

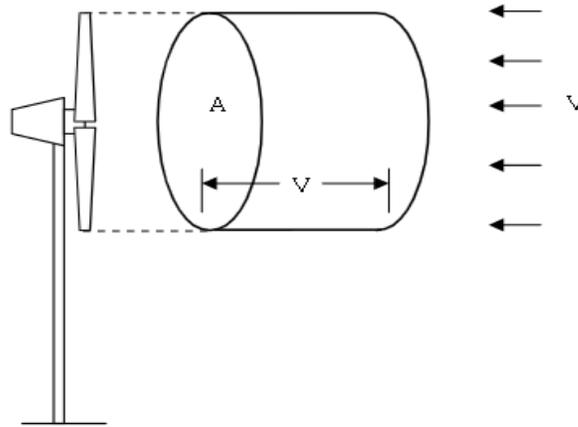


Figure.II.16 Un colis aérien se dirigeant vers une éolienne [39]

II.6.3-La puissance instantanée du vent

Une éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "v" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \tag{II.3}$$

Où

$$m = \rho \cdot v$$

$$P_C = \frac{E_C}{t} \tag{II.4}$$

$$P_C = (\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2) / t \tag{II.5}$$

$$P_C = \frac{1}{2} \cdot (m/t) \cdot v^2 \tag{II.6}$$

Avec :

$$\frac{m}{t} = \rho \cdot A \cdot v \tag{II.7}$$

A : La surface (m²)

$$P_C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot v^2 \quad (\text{II.8})$$

$$P_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{II.9})$$

Où

Néanmoins, cette relation met clairement en évidence :

- Que la puissance disponible du vent à un instant donné dépend **du cube** du vent. En conclusion, si vous avez un vent 2 fois plus rapide, vous avez 8 fois plus de puissance. On comprend dès lors tout l'intérêt de placer des éoliennes dans des sites venteux. Ce n'est donc pas un caprice de technicien puriste, on voit que le potentiel d'énergie dépend fortement de la vitesse du vent. C'est une condition nécessaire et non une option. [40]
- Que la puissance disponible dépend directement de la surface traversée par le vent. Si on la considère équivalente à la surface balayée par le rotor d'une éolienne, la puissance instantanée du vent (telle qu'évaluée par la relation ci-dessus) représente le maximum de puissance disponible que l'éolienne peut convertir. On sait que la surface balayée par une éolienne dépend du rayon de son rotor ($\pi \cdot R^2$). Du coup, la puissance disponible dépend **du carré** du rayon de l'éolienne. En conclusion, si vous avez un rotor 2 fois plus long, vous avez 4 fois plus de puissance. [40]

$$A = \pi \times r^2.$$

(II.10)

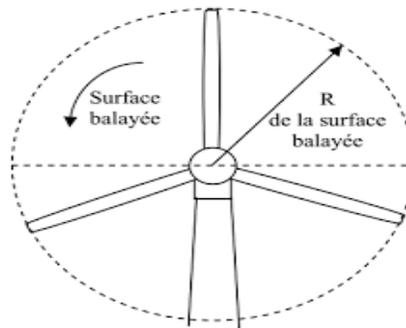


Figure.II.17 La surface produite par rotation du pales [41]

Ce vent forme un tube avec la surface A dans la région ombrée comme indiqué sur la **Fig.II.17**

La masse m est donc donnée par la relation suivante :

$$m = \rho \cdot V \cdot s \quad (\text{II.11})$$

Ainsi, il nous semble clair que la puissance qui travaille sur une éolienne dépend de la surface A produite par les pales lors de leur rotation, ainsi que de la densité et de la vitesse de l'air. et Ce dernier facteur est le plus efficace

En plus d'autres facteurs tels que la température T , la pression P et les composants de l'air, ils affectent tous à la densité selon différents endroits, L'air sec peut donc être considéré comme un gaz parfait :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{II.12})$$

La masse volumique de l'air est donnée par :

$$\rho = m/VG \quad (\text{II.13})$$

On obtient

$$\rho = m \cdot P / R \cdot T \quad (\text{II.14})$$

Par conséquent, si nous connaissons la valeur de la hauteur Z et de la température T à l'emplacement des ventilateurs d'air, alors la densité de l'air à cet emplacement est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{353.049}{T} e^{-0.034 \frac{Z}{T}} \quad (\text{II.15})$$

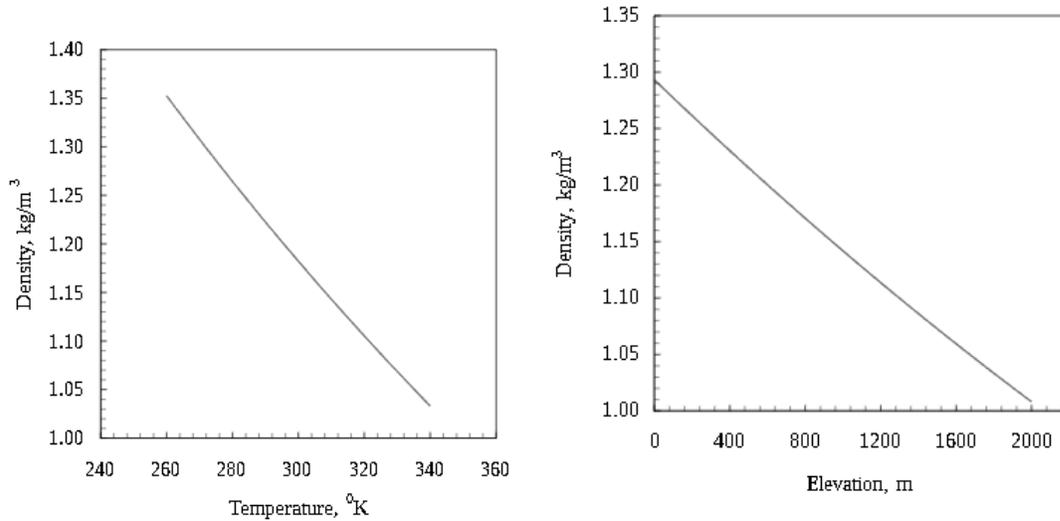


Figure.II.18 Effet de l'altitude et de la (température, hauteur) sur la densité de l'air [39]

La densité de l'air diminue avec l'augmentation de la hauteur et de la température du ventilateur, comme le montre la Figure.II.18

Il faut donc prendre la masse volumique de l'air pour convenir à la plupart des cas pratiques, elle est donc de 1,225 kg/m³ En raison de cette densité relativement faible, nous avons dû installer de grands systèmes pour produire la puissance requise.

Mais comme nous l'avons dit plus tôt, le facteur qui influence le plus la quantité d'énergie éolienne est sa vitesse. Ainsi, lorsque la vitesse du vent double deux fois, cela signifie que la puissance éolienne a doublé huit fois Par conséquent, la sélection de sites appropriés joue un rôle important dans l'augmentation de l'efficacité de la production.

II.6.4-Le Coefficient de l'énergie de rotor

La force théorique disponible dans le courant de vent est donnée par :

$$P_r = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (\text{II.16})$$

Cependant, les turbines ne peuvent pas extraire entièrement cette énergie du vent.

Lorsque le courant traverse la turbine, seule une partie de son énergie cinétique est transmise au rotor.

Ce facteur est ce qui détermine l'efficacité des éoliennes dans la production d'énergie électrique

L'efficacité énergétique est généralement déterminée par l'énergie qu'une éolienne tire de l'énergie fournie par le vent.

Ainsi, le Coefficient de l'énergie du rotor peut être défini comme le rapport réel entre la puissance générée par le rotor et la puissance théorique disponible dans le vent.

$$c_p = P_r / P_c \quad (\text{II.17})$$

Sachant que le facteur de puissance du rotor est influencé par de nombreux facteurs, dont les plus importants sont les pales, Ainsi, dans le processus de conception ces facteurs sont pris en considération pour améliorer le coefficient de l'énergie du rotor C_p

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (\text{II.18})$$

II.7-Limite de Betz

Dans ce modèle simple, à travers lequel on peut appliquer les lois de Newton en mécanique, en supposant que le flux d'air est axial et le centre de la direction du ventilateur d'air est non dispersif

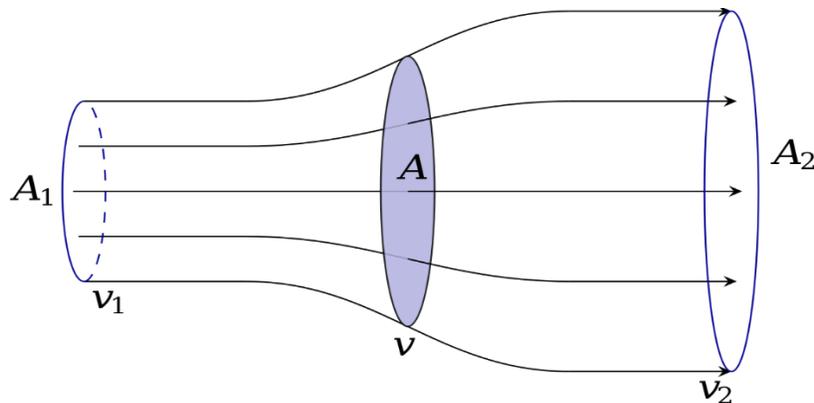


Figure.II.19 La section transversale de la rafale de vent augmente et la vitesse du vent diminue après avoir traversé l'éolienne [42]

La puissance produite par la turbine dans ce cas est donnée par :

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot v^2 \quad (\text{II.19})$$

Où

$$V = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$$

Et

$$V^2 = (v_1^2 - v_2^2)$$

Donc la puissance de l'éolienne :

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)) \quad (\text{II.20})$$

Lorsque $v_2 = \frac{v_1}{3}$ La puissance de l'éolienne atteint sa valeur la plus élevée $P_{r \max}$

Et en compensation, on trouve La puissance max récupérable [42]

$$p_{r \max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (\text{II.21})$$

Nous connaissons la puissance éolienne

$$P_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (\text{II.22})$$

En divisant

$$\frac{P_{r \max}}{P_c}$$

On obtient le coefficient de Betz :

$$c_{p \max} = \frac{16}{27} = \% 59,26 \quad (\text{limite de Betz})$$

Par conséquent, il est impossible d'utiliser pleinement l'énergie cinétique du vent pour faire tourner la turbine, mais plutôt un pourcentage de celle-ci, et nous notons le pourcentage d'utilisation de

l'énergie cinétique du vent avec le symbole (C_{pmax}), et le maximum le pourcentage qui peut être atteint est de %59,26 et on l'appelle la limite de Betz d'après le scientifique allemand Albert Betz qui l'a inventé, et pour savoir combien d'énergie éolienne produit une éolienne, l'énergie éolienne est multipliée par C_{pmax}

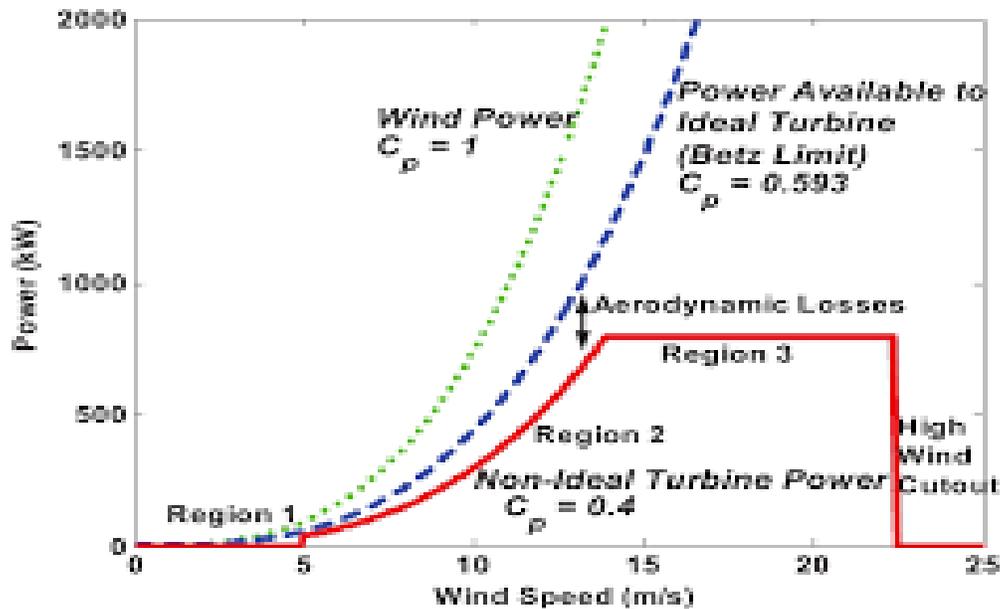


Figure.II.20. La relation entre la vitesse du vent et l'énergie [43]

Les courbes de la **figure.II.20** montre la relation entre la vitesse du vent et l'énergie qui en résulte, où chaque courbe représente :

- La courbe verte représente toute l'énergie éolienne qui, est impossible à utiliser totalement.
- La courbe bleue représente la quantité maximale d'énergie éolienne pouvant être utilisée (éolienne idéale), ce qui est en fait considéré comme impossible à atteindre en raison de certains inconvénients.
- La courbe rouge représente la réelle courbe de l'éolienne, qui présente certaines pertes qui la rendent imparfaite comme les pertes d'air (friction, etc.).

Chaque conception d'éolienne a une vitesse de démarrage, une vitesse de vent nominale et une vitesse de démarrage. [43]

À la vitesse du vent de démarrage, les pales commencent à tourner et un filet d'électricité commence à être produit. Autour du démarrage, le générateur peut être utilisé comme moteur pour aider le vent à vaincre l'inertie et faire tourner les pales.

La vitesse de démarrage est généralement de 7 à 9 mph. À la vitesse nominale du vent, la turbine est capable de produire de l'électricité à sa capacité maximale ou nominale. La vitesse nominale est généralement comprise entre 25 et 35 mph.

À la vitesse de vent de coupure, la turbine s'arrête pour éviter tout dommage. Les contrôleurs de pas mettent les pales en drapeau pour laisser passer le vent et le moyeu du rotor est freiné.

Le vent doit généralement revenir à une vitesse beaucoup plus faible, appelée vitesse de vent de réduction, pendant un certain temps avant que la turbine ne redémarre.

La vitesse de coupure est généralement d'environ 55 mph. La vitesse de coupure est d'environ 45 mph. [44]

II.7.1. Remarque

Environ 60% de l'énergie possédée par le vent interagissant avec les éoliennes est perdue et seulement 40% est absorbée. [44]

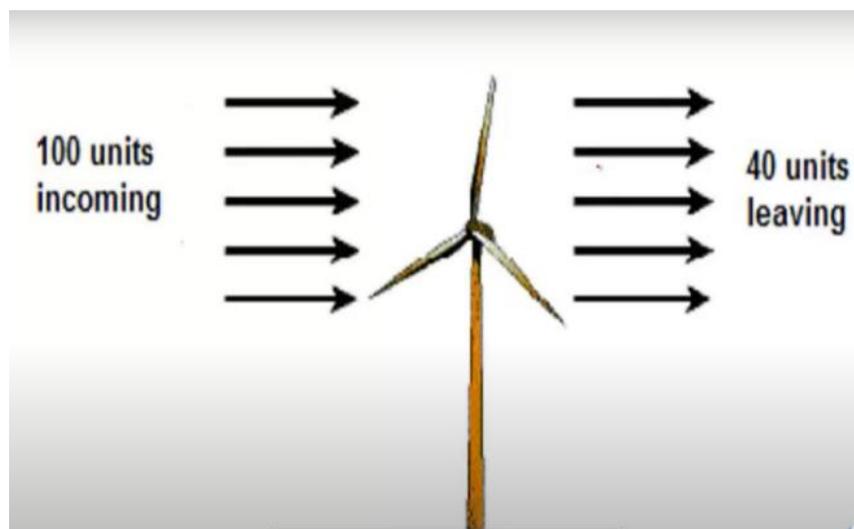


Figure II.21. Énergie absorbée et perdue côté d'éoliennes [45]

II.8-rapport du vitesse λ

On définit λ le rapport d'avance, dit aussi paramètre de rapidité ou vitesse spécifique, Ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio) comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R^2 \Omega}{v} \quad (\text{II.23})$$

R : rayon de la pale en m

Ω : vitesse de pales en tr/min

v : vitesse du vent m/s

Pour un ordre de grandeur : Si $\lambda < 3$, l'éolienne est dite lente si $\lambda > 3$, la courbe $C_p(\lambda)$ spécifique a chaque éolienne permet de classer les différents types d'éoliennes.

Outre les efforts aérodynamiques du vent il faut aussi tenir compte des efforts inertiels et élastiques

Dus au mouvement des pales mouvement de battement mouvements de trainée en torsion y a aussi les effets de la vitesse du vent de l'écoulement du vent du gardent du vert tous ces effort sont exercés sur les pales ils sont ensuite transmis au noyau et à la tour. . [44]

II.9-Conclusion

La production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes fait appel à des compétences poussées dans des domaines multiples : aérodynamique, mécanique, résistance des matériaux, génie électrique et électronique, BTP, auxquels s'ajoutent bien évidemment les aspects environnementaux et réglementaires. L'évolution spectaculaire des machines jusqu'au début des années 2000 a abouti à la réalisation d'éoliennes de très grande taille qui représentaient alors la limite de notre savoir-faire. Une brève description du secteur de l'énergie éolienne est fournie dans ce chapitre. A Dans ce contexte, certains concepts clés sur la technologie éolienne ont été introduits Comme l'équation de la puissance des éoliennes, la limite de Betz, et son fonctionnement, et ses types.

Chapitre III :

Étude Et Résultats de l'effet du nombre de pales de l'éolien dans un mini-modèle

III.1-Introduction

Dans ce chapitre, nous avons produit un mini modèle d'éolienne horizontale pour l'étude l'effet du nombre de pales d'éoliennes sur l'efficacité du générateur.

Par conséquent, nous avons mesuré le courant, la tension, la vitesse du vent et tous les paramètres de l'éolienne afin de calculer la puissance récupérable et la puissance électrique et la vitesse spécifique pour les trois pales et les cinq pales, nous avons comparé les résultats obtenus pour connaissances le type de production d'électricité le plus efficace et le plus efficient.

C'est pourquoi nous avons mené une expérience en direct dans un laboratoire de mécanique De l'Université Ain Temouchent en utilisant des équipements existants.

Objectifs

Mesure et comparaison de la puissance de sortie de différentes éoliennes par nombre de pales.

III.2-Description de la mini éolienne

Ceci est un modèle miniature c'est Un exemple simplifié de l'idée d'une éolienne horizontale Pour qu'il fonctionne sur le même principe qu'une grande éolienne réaliste mais avec très peu d'efficacité donc Il se compose de tous les éléments de base nécessaires à la production d'énergie électrique et chaque composant joue un rôle d'un élément important par rapport d'une vraie grande éolienne.



**Figure. III.1- les deux mini-modèle d'éoliennes horizontal
a (trois et cinq pales)**

III.3-Les Composants

1- les pales :

Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Avec $R= 0.097m$

2- dynamo (générateur) :

La dynamo désigne une machine électrique, qui fonctionne en générateur électrique. Elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique en utilisant l'induction électromagnétique.

3- tube en plastique (Nacelle) :

C'est un support qui contient des pales et une dynamo et queue dirigée Pour qu'il joue un rôle

4- queue dirigée (Wind Vane) :

Elle dirige éolienne être en face vent direct Pour tirer le meilleur parti de sa puissance

5- tube en plastique (Tower) :

Il est essentiel car il permet de placer l'éolien en hauteur, et donc de capter le plus de vent possible. Plus la hauteur du mât d'une éolien est importante, plus celle-ci captera le vent et sera productive.

6- fils de connexion électrique :

C'est pour Transférer l'énergie électrique générée par la dynamo

7- moule en métal (La fondation) :

La fondation, qui permet de fixer l'ensemble de la structure

8- coude de liaison (Yaw System) :

Le système de lacet des éoliennes est le composant responsable de l'orientation du rotor de l'éolienne vers le vent.

III.4- Instruments et méthode de fonctionnement

Les instruments que nous avons utilisés dans cette étude expérimentale de notre mini éolienne sont :

1) Appareil d'étude du séchage :

Ce séchoir a été conçu pour étudier les applications industrielles les plus courantes procédé de séchage de solides consistant à souffler un flux d'air chaud sur certains plateaux où le matériel humide est disposé. L'unité se compose d'un tunnel équipé d'un ventilateur axial à un de ses extrémités. Une batterie de résistances électriques installée après le ventilateur chauffera le flux d'air entrant dans la chambre de séchage. La chambre avec porte d'entrée transparente contient un ensemble de plateaux suspendus sur le plateau d'une balance montée au-dessus du séchoir.

Le total la capacité de ces barquettes est d'environ 3,5 kg de solide. Faire varier la vitesse de l'air par un onduleur et la puissance des résistances par un thyristor permettra de faire varier la température de l'air en entrée. La température et l'humidité relative sont mesurées avant et après la chambre de séchage grâce à deux émetteurs de température/humidité. Les éléments chauffants sont entièrement protégés contre surchauffe par un interrupteur de sécurité et ils peuvent être allumés uniquement si le ventilateur tourne. De plus, une vitesse minimale pour le ventilateur a été pré-réglé. Un anémomètre numérique mesurera le débit d'air.



Figure.III.2. Appareil d'étude du séchage

2) Anémomètre :

Un anémomètre numérique est un appareil inventé pour mesurer la vitesse et la direction du vent. Il est également appelé instrument de station météorologique mutuelle. Un mot anémomètre est dérivé du mot grec "anemos" qui signifie vent. Pour détecter le temps de coulée cet instrument de mesure de la vitesse du vent est utilisé en météorologie ou en aérodynamique. Il a été inventé par Leon Battista Alberti vers 1450.



Figure.III.3. Anémomètre

3) Pont de diode :

Un pont de diodes, aussi appelé pont de Graetz, ou redresseur double alternance, est un assemblage en pont de 4 diodes permettant de redresser le courant alternatif en courant continu. Bien qu'il y ai d'autres montages pour redresser le courant, ce montage reste le moyen le plus répandu pour réaliser cette fonction.

Les diodes sont placées astucieusement afin que le courant d'entrée qui est tantôt positif et tantôt négatif ne passent que dans un seul sens dans les fils de sortie. Pour faire simple, le courant de sortie n'est autre que la valeur absolue du courant d'entrée.



Figure.III.4 pont de diod

4) LED :

LED, ça veut dire Light-Emitting Diode en anglais. La LED est un composant électronique qui émet de la lumière lorsqu'il est traversé par de l'électricité

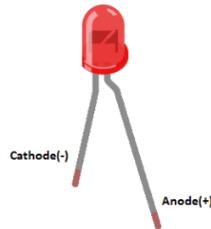


Figure.III.5 LED

5) Multimètre :

Un multimètre est un appareil électrique permettant d'effectuer des mesures électriques, comme des intensités, des tensions ou des résistances électriques. Il regroupe un voltmètre, un ampèremètre et un ohmmètre.

Nous avons utilisé cet appareil pour générer différentes vitesses de vent afin de fournir l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le modèle miniature et prendre les mesures nécessaires



Figure.III.6. Multimètre

III.5-méthode d'installation

Nous avons installé les instruments avec certains d'entre eux comme suit :

- 1) Placer la mini éolienne en face de l'appareil séchage.
- 2) Raccorder les fils sortant du générateur au diode.
- 3) Raccorder le multimètre en parallèle pour relever la tension.
- 4) Raccorder le multimètre en série en ajoutant le LED pour relever l'intensité.
- 5) Mettre le disjoncteur de l'appareil séchage position ON.
- 6) Augmenter la vitesse du vent de l'appareil séchage.
- 7) Mesurer la vitesse du vent avec l'anémomètre.
- 8) Enregistrer les valeurs des paramètres obtenues.

III.6-Résultats et discussion

III.6.1- Mini-éolienne à 3 pales :

On met la mini-éolienne en face du vent en augmentant la vitesse de ce dernier, par la suite on enregistre la valeur du courant I (A) et U (V) lue par le multimètre. On répète le processus en changeant la vitesse du vent.

Pour chaque vitesse du vent, l'opération sera répétée intégralement et les valeurs de I et U sont enregistrées dans le tableau 1.

Tableau 1 :

Valeurs de vitesse de vent V , puissance récupérable du vent P_c , La puissance max récupérable P_{rmax} , puissance électrique P_e , l'intensité I , la tension U , le nombre de rotations par seconde N , vitesse spécifique λ , et l'efficacité η .

V (m/s)	P_c (w)	P_{rmax} (w)	U (V)	I (A)	P_e (w)	N (tour/s)	λ (m/s)	η
3.5	0.69	0.40	0.1	0.2	0.02	1.5	0.24	0.02
4	1.03	0.60	0.2	0.4	0.08	1.7	0.25	0.07
4.5	1.40	0.82	0.33	0.6	0.217	2.2	0.27	0.15
5	2.02	1.19	0.4	0.8	0.32	2.5	0.28	0.158
5.5	2.69	1.5	20.5	1	0.5	3	0.30	0.19
6	3.49	2.05	0.8	1.6	1.28	3.5	0.32	0.36
6.5	4.44	2.61	1	2	2	4	0.34	0.45

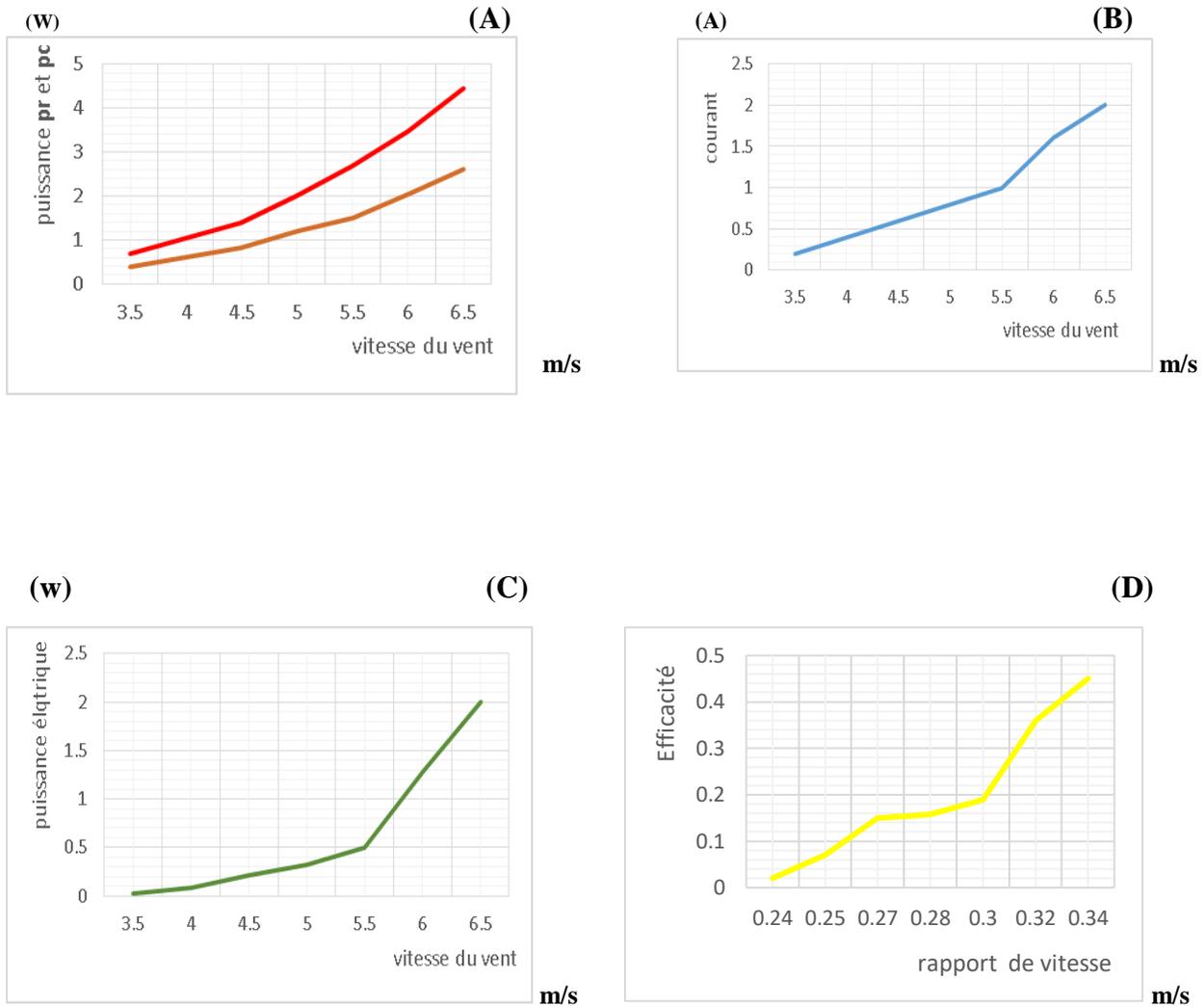


Figure.III.7- A) Puissance récupérée et puissance du vent , B) Courant, C) Puissance électrique, D) Efficacité en fonction de rapport de vitesse pour Mini-éolienne à 3 pales .

En figures (III.7 a et b), on constate qu'à la vitesse de vent 3.5 m/s qui présente la vitesse minimale ou notre éolienne a démarré le fonctionnement, on a eu une puissance récupérable de 0.4 watt et un courant de 0.2 A, et on arrivant à la vitesse 6.5m/s on a obtenu une puissance récupérable de 2.61 watt et un courant de 2A, donc on peut dire que la puissance récupérable ainsi que le courant augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Quant au figure (III.7 c), on remarque l'augmentation de la puissance électrique de notre éolienne (3pales) avec l'augmentation de la vitesse du vent entre 3.5 et 5.5 m/s, ou cette augmentation croit rapidement entre la zone 5.5 et 6.5 m/s, ce qui signifie qu'à une certaine vitesse du vent zone >5.5

m/s notre puissance électrique commence à augmenter plus rapidement par rapport à la zone < 5.5m/s, donc le rendement de cette puissance est plus important à des grandes vitesses.

Par contre la figure (III.7 d) on remarque que l'augmentation de l' Efficacité avec l'augmentation de rapport de vitesse entre 0.24 et 0.3 m/s, ou cette augmentation croit rapidement entre la zone 0.3 et 0.34 ce qui signifie qu'à une certaine rapport de vitesse zone >0.3 m/s notre Efficacité commence à augmenter plus rapidement par rapport à la zone < 0.3 m/s, donc le rendement de cette Efficacité est plus important à des grandes rapport de vitesse.

III.6.2- Mini-éolienne à 5 pales :

On met la mini-éolienne en face du vent en augmentant la vitesse de ce dernier, par la suite on enregistre la valeur du courant I (A) et U (V) lue par le multimètre. On répète le processus en changeant la vitesse du vent.

Pour chaque vitesse du vent, l'opération sera répétée intégralement et les valeurs de I et U sont enregistrées dans le tableau 2.

Tableau 2 :

Valeurs de vitesse de vent V, puissance récupéré du vent P_c , la puissance max récupérable P_{rmax} , puissance électrique P_e , l'intensité I, la tension U, et le nombre de rotations par seconde N, vitesse spécifique λ , et l'efficacité η .

V (m/s)	P_c (W)	P_{rmax} (W)	U (V)	I (A)	P_e (W)	N (tour /s)	λ (m/s)	η
3.5	0.69	0.40	0.15	0.3	0.04	2	0.32	0.05
4	1.03	0.60	0.25	0.5	0.12	2.5	0.35	0.11
4.5	1.40	0.82	0.37	0.74	0.27	3	0.37	0.19
5	2.02	1.19	0.5	1	0.5	3.5	0.39	0.24
5.5	2.69	1.5	0.7	1.4	0.98	4	0.41	0.36
6	3.49	2.05	0.9	1.9	1.71	4.5	0.42	0.48
6.5	4.44	2.61	1.3	2.6	2.38	5	0.43	0.53

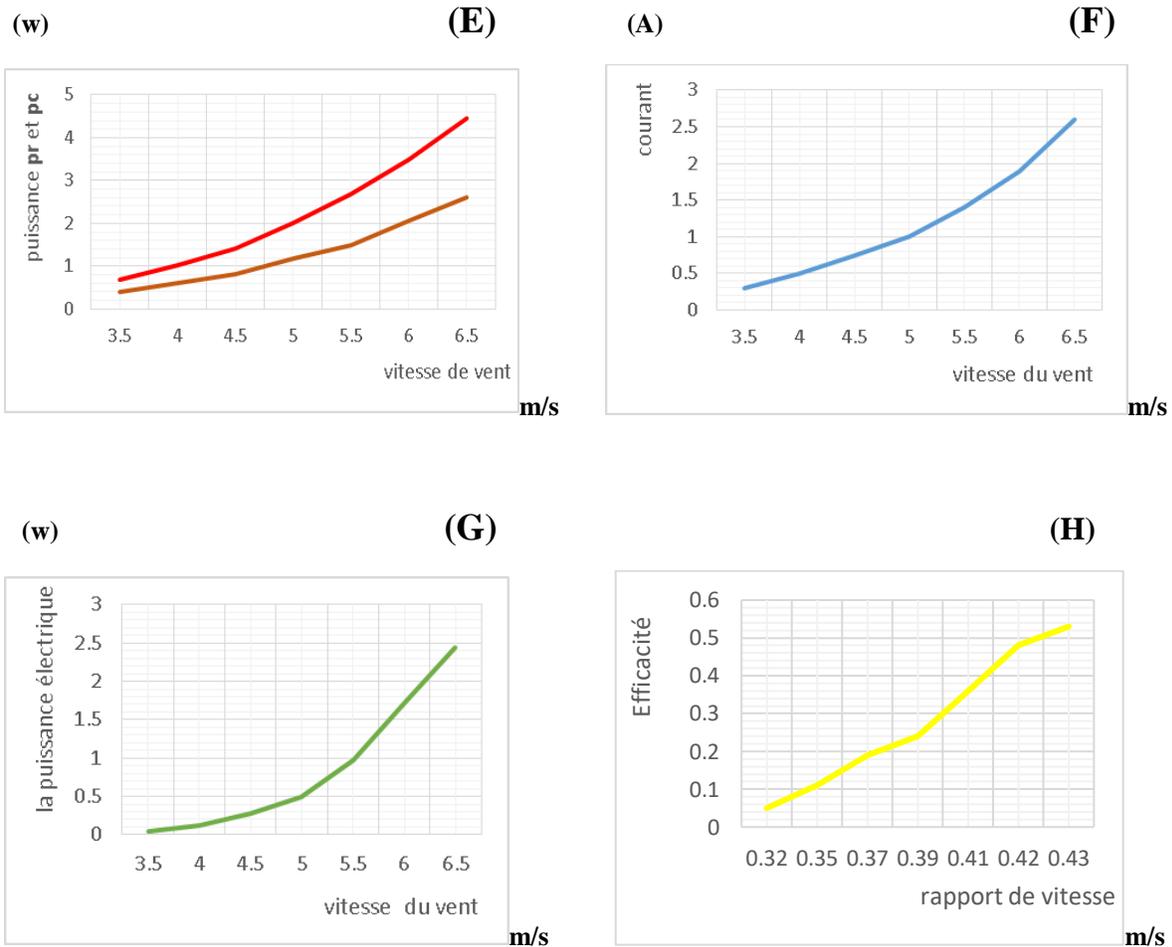


Figure.III.8- E) Puissance récupérée et puissance du vent , F) Courant, G) Puissance électrique en fonction de vitesse de vent, H) Efficacité en fonction de rapport de vitesse pour Mini-éolienne à 5 pales .

En figures (III.8 e et f), on constate qu'à la vitesse de vent 3.5 m/s qui présente la vitesse minimale ou notre éolienne a démarré le fonctionnement, on a eu une puissance récupérable de 0.4 watt et un courant de 0.2 A, et on arrivant à la vitesse 6.5m/s on a obtenu une puissance récupérable de 2.61 watt et un courant de 2A, donc on peut dire que la puissance récupérable ainsi que le courant augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Quant au figure (III.8 g), on remarque l'augmentation de la puissance électrique de notre éolienne (5pales) avec l'augmentation de la vitesse du vent entre 3.5 et 5.5 m/s, ou cette augmentation croît rapidement entre la zone 5 et 6.5 m/s, ce qui signifie qu'à une certaine vitesse du vent zone >5 m/s notre puissance électrique commence à augmenter plus rapidement par rapport à la zone < 5.5m/s, donc le rendement de cette puissance est plus important à des grandes vitesses.

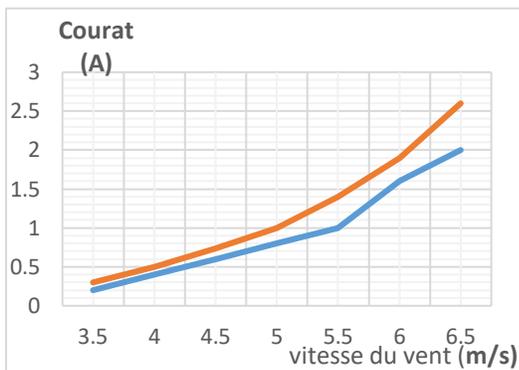
Par contre la figure (III.8 h) on remarque que l'augmentation de l' Efficacité avec l'augmentation de rapport de vitesse entre 0.32 et 0.39 m/s, ou cette augmentation croit rapidement entre la zone 0.39 et 0.43 ce qui signifie qu'à une certaine rapport de vitesse zone >0.39 m/s notre Efficacité commence à augmenter plus rapidement par rapport à la zone < 0.39 m/s, donc le rendement de cette Efficacité est plus important à des grandes rapport de vitesse .

III.7-Différence entre l'éolienne de 5 pales et l'éolienne de 3 pales :

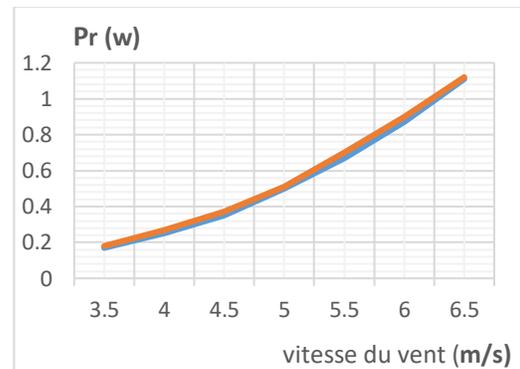
— 5 pales

— 3 pales

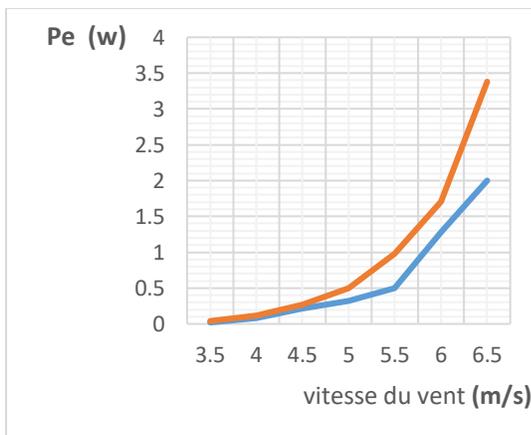
(I)



(k)



(S)



(R)

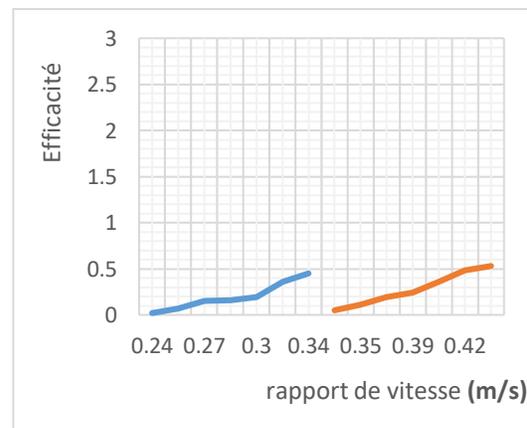


Figure.III.9- la différence entre : k) Puissance récupérée et puissance du vent , I) Courant, s) Puissance électrique en fonction de vitesse de vent, R) Efficacité en fonction de rapport de vitesse pour les (3 et 5 pales)

La comparaison des courbes de courant et de la puissance électrique en fonction de la vitesse de vent de nos éoliennes (3 et 5 pales) figures (III.9. I et S), montre une petite amélioration de l'énergie électrique. Cette amélioration se traduit par la différence entre la puissance d'une éolienne à 3 pales et d'une éolienne à 5 pales. On rappelle que cette puissance évolue en fonction de l'intensité. Le nombre élevé des pales entraîne l'amélioration de la performance.

Pour la puissance récupérable de nos éoliennes (3 et 5 pales) en fonction de la vitesse de vent figures (III.9. K), on constate que c'est presque la même puissance pour les deux cas et cela revient au même rayon des pales et au coefficient de Betz.

Enfin la comparaison de l'efficacité en fonction de rapport de vitesse de nos éoliennes (3 et 5 pales) figures (III.9. R), montre qu'il n'y a pas une grande différence d'efficacité entre les deux cas d'éoliennes (différence entre 0.03 et 0.08), donc on peut dire qu'elles sont proches. Cela signifie que le nombre de pales n'est pas parmi les facteurs principaux qui peuvent affecter positivement ou négativement sur l'efficacité d'une éolienne.

III.8-conclusion

Cette expérience consiste à étudier des paramètres d'une mini éolienne. Dans un premier temps la mini éolienne contient 5 pales, et dans un deuxième temps la mini-éolienne contient 3 pales.

Après l'étude de cette expérience, on constate une même puissance récupérable pour les deux cas et qui est proche à la puissance récupérable maximale, aussi bien une petite augmentation du courant à 5 pales par rapport à 3 pales qui nous ramène à une augmentation de la puissance électrique puisque cette dernière évolue en fonction de l'intensité. Et une approche d'efficacité entre les deux cas d'éoliennes, cela signifie que le nombre de pales n'est pas parmi les facteurs principaux qui peuvent affecter positivement ou négativement sur l'efficacité d'une éolienne.

Conclusion Générale

conclusion générale

Dans ce travail, nous avons présenté une analyse expérimentale d'un générateur à induction d'un équipement d'énergie éolienne en utilisant une mini-éolienne horizontale de cinq et de trois pales pour l'étude de l'effet du nombre de pales d'éoliennes sur l'efficacité du générateur. Par conséquent, nous avons mesuré le courant, la tension, la vitesse du vent et tous les paramètres de l'éolienne afin de calculer la puissance récupérable et la puissance électrique et la vitesse spécifique pour les trois pales et les cinq pales, nous avons comparé les résultats obtenus pour connaissances le type de production d'électricité le plus efficace et le plus efficient.

C'est pourquoi nous avons mené une expérience en direct dans un laboratoire de mécanique Université Ain-Temouchent utilisant les équipements existants. Les résultats montrent une même puissance récupérable pour les deux cas et qui est proche à la puissance récupérable maximale, aussi bien une petite augmentation du courant à 5 pales par rapport à 3 pales qui nous ramène à une augmentation de la puissance électrique puisque cette dernière évolue en fonction de l'intensité. Et une approche d'efficacité entre les deux cas d'éoliennes, cela signifie que les caractéristiques qui déterminent leur efficacité, sont la hauteur, la vitesse du vent, la masse volumétrique ainsi que la longueur des pales et leur capacité à recevoir l'énergie éolienne et que le nombre de pales n'est pas un contrôle clé de la quantité d'énergie éolienne pouvant être exploitée, mais plutôt la façon dont les pales sont fabriquées.

Au final, on résume que l'éolienne de trois pales est la meilleure vue qu'en réalité pour fabriquer une pale il faut des tonnes de matériel et des centaines de milliers d'euros, donc ça ne vaut pas la peine de construire une ou deux pales supplémentaires pour gagner quelques pourcentages d'efficacité.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1]. TOTAL SOLAR EXPERT : Construire un avenir énergétique durable, Juin 2013
- [2] Laurence Serra , "Barrières à l'implantation de projets d'énergie renouvelable dans les communautés hors réseau des régions Nordiques canadiennes", Mémoire de Magister, Université Sherbrooke, Canada, (2011).
- [3] Madahi Mohamed, « Les énergies renouvelables comme option stratégique à la lumière de la responsabilité de protéger l'environnement », une étude de cas de l'Algérie Mémoire de Master, Université de Chlef (2012)
- [4] Abu Bakr El-Gendy, « Étudier l'avenir de l'énergie solaire en Égypte », Agence centrale pour la mobilisation publique et la presse statistique (2015)
- [5] Ahmed Bahush, Zarara Battash, « Les énergies renouvelables comme alternative au secteur pétrolier : une étude de cas de la recherche appliquée d'Oujda dans le domaine des énergies renouvelables ARAER Ghardaia » Mémoire soumis pour remplir les exigences d'un baccalauréat en économie, Kasdi Université Merbah, Ouargla, p. 03-04
- [6] Énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) [archive] Driee Ile-de- France, consulté en mars
- [7] Données ADEME 2004 - Électricité, contenu moyen : Note ADEME/EDF 2005 - Électricité, contenu marginal : Note ADEME/RTE 2007
- [8] OPÉRA ÉNERGIE : Energie solaire : définition et différents types d'exploitation, écrit par **Léria Collaro**
- [9] Énergie solaire · lenergie-solaire.net: Auteur : Oriol Planas - Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique ,Date de publication : 9 juin 2017 ,Dernier examen : 28 mars 2020
- [10] site :planete energies PUBLIÉ LE 02 AVRIL. 2019
<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>
- [11] Salmi Rachid Fellaq sur les énergies renouvelables comme porte d'entrée pour parvenir au développement durable, en référence à l'Algérie et à certains pays arabes,
- [12] Zawaia Hallam, « The Role of Renewable Energy Economics in Achieving Sustainable Economic Development in the Maghreb - A Comparative Study between Algeria, Morocco and Tunisia » 2 Note présentée pour l'obtention d'un master dans le cadre de l'Ecole Doctorale en Sciences Economiques et de Gestion, Université Farhat Abbas, Sétif,
- [13] source web : Énergie éolienne : transformer le vent en électricité
- [14] Boudora Ramzi, Les énergies renouvelables et leur rôle dans la réalisation du développement durable, l'expérience de l'Allemagne comme modèle, Blida 2, Algérie, Milaf Journal of Research and Studies
- [15] source :GEO BLAISE MAO Publié le 04/08/2009 à 18h32 - Mis à jour le 01/06/2012
<https://www.geo.fr/environnement/energie-barrage-electricite-hydraulique-46223>

- [16] H. KANCHEV:«Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain » Thèse de Doctorat, PRES Université Lille Nord-de-France2014
- [17] WHAT ARE THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF GEOTHERMAL ENERGY TWI Ltd (Head Office)Granta Park, Great Abington, Cambridge, CB21 6AL, UK
- [18] Qu'est ce que la géothermie : fonctionnement, avantages, inconvénients ?"Puits Bernier ,juin 27, 2019 à 7:11 ,Permalien
- [19] Bioenergy", Sciencedirect, Retrieved 22/8/2021. Edited
- [20] Bioenergy Sources", Ohio 4-H Youth Development, Retrieved 22/8/2021. Edited.
- [21] Benefits of bioenergy", Victoria State Government, 9/6/2017, Retrieved 22/8/2021. Edited
- [22] Imad Takwacht, « La réalité et les perspectives des énergies renouvelables et leur rôle dans le développement durable en Algérie », (Mémoire de Master, Université Hadj Lakhdar Batna), Faculté des Sciences Economiques, Commerciales et de Gestion, Département des Sciences Economiques : 2011/2012.
- [23] Ghania Nazir, « Stratégie de gestion optimale de l'énergie pour le développement durable - Une étude de cas de certaines économies », (Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Faculté des sciences économiques, commerciales et de gestion, Département de gestion, 2015/2016
- [24] Source de l'article : Cette entrée a été publiée dans Vu sur le web et marquée avec économie, énergie, éolienne, moulin le 17 septembre 2016 par EdfPulseAndYou. <https://pulse.edf.com/fr/une-breve-histoire-de-leolienne/>
- [25] Source : Onshore Wind Energy Potential in Germany, I. Lütkehus, H. Salecker DEWI Magazine n°43, Aug. 2013, pp.18-23
- [26] Source: 3TIER, www.3tier.com
- [27] L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu ,Dr Ouahiba GUERRI Maitre de Recherche Classe A Directrice de la Division Energie Eolienne
- [28] author, Magdi S Mahmoud ,King Fahd University of Petroleum and Minerals,667 PUBLICATIONS 11,106 CITATIONS
- [29] Windustry (2012). *How Big are Wind Turbines?* [Online]
- [30] Wind Energy Technologies Office (Nov.29, 2018). *How Wind Turbines Work* [Online] Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>
- [31] How a Wind Turbine Works - Text Version , Wind Energy Technologies Office
- [32] Wind turbines" «www.explainthatstuff.com, Retrieved 8-5-2019. Edited.
- [33] Control Systems Design URL <https://www.graphitestore.com/wind-turbine-power-brushes>
- [34] LES ÉNERGIES RENOUVELABLES : ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES ,

URL <https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-2-0-introduction.html>

[35] Source LES ÉOLIENNES OFFSHORE FLOTTANTES PASSENT À PLEIN RÉGIME

[36] Source: Eolmienne <https://eolmienne.com/eolienne-horizontale-vs-eolienne-verticale/>

[37] Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents
Adnane Zaimi

[38] Dr. Mohamed Ahmed Abu Al-Tayeb.. Conférences sur les énergies renouvelables - 61
Analyse des forces affectant la pale de l'éolienne

[39] Source de l'article : <https://pulse.edf.com/fr/une-breve-histoire-de-leolienne?platform=hootsuite>
<https://www.edfpulseandyou.fr/blog/2016/09/17/petite-histoire-de-leolienne-dhier-a-aujourd'hui/>

[40] source : Energie+ Rendement des éoliennes : <https://www.printfriendly.com/p/g/eS2qKe>

[41] Wind Turbines – Components and Design Basics

[42] Wind Turbine Actuator Disc URL
https://openmdao.org/newdocs/versions/latest/examples/betz_limit.htm

[43] Wind Turbine Control [PDF]
https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl_Presentation.pdf

[44] Source: FAQ — Technology <https://www.wind-watch.org/faq-technology.php>

[45] ELEtorial: Conférence 4 : Énergie éolienne : théorie de l'éolienne

[46] Source novenergie formation solaire (Chauffagesolaire.net): <https://www.novenergie.fr/e-formation/solaire-1/les-capteurs-thermiques/>

[47] ARDJOUN Sid Ahmed El Meh Doctorat en Sciences Spécialité : Electrotechnique Convertisseurs électromécaniques Intitulé de la thèse command d'un système d'énergies renouvelables

[48] SOURCE PDF Descriptif du schéma « Le cycle du carbone » :
<https://www.mtaterre.fr/sites/default/files/descriptif-schema-cycle-carbone.pdf>

[49] DOCTORAT EN SCIENCE EN GÉNIE MÉCANIQUE :Option : Énergétique ,Sous le thème : ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA PHÉNOMÉNOLOGIE DE, DISTILLATION : APPLICATION À PLUSIEURS SYSTÈMES <<SOLAIRES Présentée par :BAIT OMAR.

[50] Source : Onshore Wind Energy Potential in Germany, I. Lütkehus, H. Salecker DEWI Magazine n°43, Aug. 2013, pp.18-23