



ROYAUME DU MAROC
UNIVERSITÉ MOHAMMED V-AGDAL
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES
Filière : SCIENCES DE LA MATIERE PHYSIQUE
SEMESTRE : S6

*Titre : **ETUDE D'UNE EOLIENNE A AXE VERTICAL***

Réalisé par : Mohamed BOUHAOULI

Encadré par : Pr.Najem HASSANAIN

Date de soutenance : 19/06/2014

*Jury : Pr.Boubker FARES
: Pr.Fouad CHRAIBI*

Année Universitaire : 2013 /2014

Remerciements

Mon travail a été effectué dans le cadre du projet de fin d'étude du semestre 6 de la licence SMP , au Département de Physique de la Faculté des Sciences de Rabat .

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, pour la réalisation ce projet.

Je remercie mon encadreur pour les informations, l'explication, et ses aides.

Je ne vais pas oublier les membres du jury qui ont bien accepté de juger mon travail.

En fin, je veux dire merci et merci, pour tous les professeurs de FSR pour la formation qui m'ont transmis .

Sommaire

<i>Introduction.....</i>	<i>4</i>
<i>Chapitre I :Généralités sur les types des énergie renouvelables.....</i>	<i>5</i>
<i>I-Introduction.....</i>	<i>6</i>
<i>II-Définition.....</i>	<i>6</i>
<i>III-Différentes types d'énergie renouvelable.....</i>	<i>7</i>
<i>III-1 Energie solaire.....</i>	<i>7</i>
<i>III-2 Energie hydrolique.....</i>	<i>10</i>
<i>III-3 Biomasse.....</i>	<i>11</i>
<i>III-4 Energie géothermique.....</i>	<i>12</i>
<i>IV-Conclusion.....</i>	<i>13</i>
<i>Chapitre II :Généralités sur les éoliennes.....</i>	<i>14</i>
<i>I-Introduction.....</i>	<i>15</i>
<i>II-L'énergie éolienne :une étude générale.....</i>	<i>16</i>
<i>II-1 Eolienne à axe vertical</i>	<i>16</i>
<i>II-2 Eolienne à axe horizontal.....</i>	<i>17</i>
<i>II-3 Principe de l'aérogénérateur.....</i>	<i>19</i>
<i>III- L'éolienne au niveau mondial.....</i>	<i>20</i>
<i>III-1 La production de l'énergie éolienne mondaile.....</i>	<i>20</i>
<i>III-2 Le cout et la valeur economique de l'énergie éolienne.....</i>	<i>21</i>
<i>IV-L'éolienne au niveau Maroc.....</i>	<i>24</i>
<i>IV-1 Le parc éolien de Tarfaya.....</i>	<i>25</i>
<i>IV-2 Le parc éolien de Koudia al Baida à Tétouan</i>	<i>27</i>
<i>Chapitre III :Eolienne à axe vertical.....</i>	<i>28</i>
<i>I-Introduction.....</i>	<i>29</i>
<i>II-Les types des éolienne à axe vertical.....</i>	<i>30</i>
<i>II-1 Darrieus.....</i>	<i>30</i>
<i>II-2 Savonius.....</i>	<i>33</i>
<i>III-Quelle différence entre éolienne horieontale et verticale ?.....</i>	<i>35</i>
<i>III-1 L'éolienne horizontale : la plus répandue.....</i>	<i>35</i>
<i>III-2 L'olienne verticale :la moins répandue.....</i>	<i>36</i>
<i>IV-Conclusion.....</i>	<i>37</i>
<i>Chapitre IV :Réalisation d'une éolienne à axe vertical.....</i>	<i>38</i>
<i>IV-1 Introduction.....</i>	<i>39</i>
<i>IV-2 Application.....</i>	<i>39</i>
<i>IV-3 Conclusion générale.....</i>	<i>41</i>

Introduction

Jusqu'au xixe siècle, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique.

La plus ancienne utilisation de l'énergie éolienne est la marine à voile : des indices permettent de penser qu'elle aurait été employée en Mer Égée dès le XIe millénaire avant Jésus-Christ (voir Navigation dans l'Antiquité). Le peuplement de l'Océanie s'est vraisemblablement fait par des déplacements à la voile, pour les longues traversées de centaines ou milliers de kilomètres en pleine mer [1].

L'autre utilisation principale de cette énergie était le moulin à vent utilisé par le meunier pour transformer les céréales en farine ou pour écraser les olives afin d'en extraire l'huile ; on peut aussi citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande. Le moulin à vent est apparu sur le territoire de l'Afghanistan d'aujourd'hui ; il est utilisé en Perse pour l'irrigation dès l'an 600.

Au xviii^e siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était assurée par des énergies renouvelables et l'énergie éolienne avait une part fort importante dans le bilan énergétique, assurant l'essentiel des besoins des transports internationaux (marine à voile) et une partie des transports intérieurs (cabotage et navigation fluviale) ainsi que des besoins de l'industrie alimentaire (moulins à vent). L'éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders).

Chapitre I :

Généralités sur les

types des énergies

renouvelables

I -Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables . Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. contribuent à l'importance du rôle qui ne produit pas de gaz dangereux.

Il existe cinq familles des énergies renouvelables :

- *Energie éolienne*
- *Energie solaire*
- *Les hydrauliques*
- *Géothermique*
- *La biomasse .*

II- Définition

Toutes formes d'énergies présentant un taux de régénération équivalent ou supérieur au taux de consommation, est une énergie renouvelable qui est considérée pratiquement inépuisable à l'échelle de plusieurs générations humaines.

Le soleil est la source de différentes formes d'énergies renouvelables (figure1) : éolienne, biomasse, photovoltaïque thermique, hydraulique, géothermique.

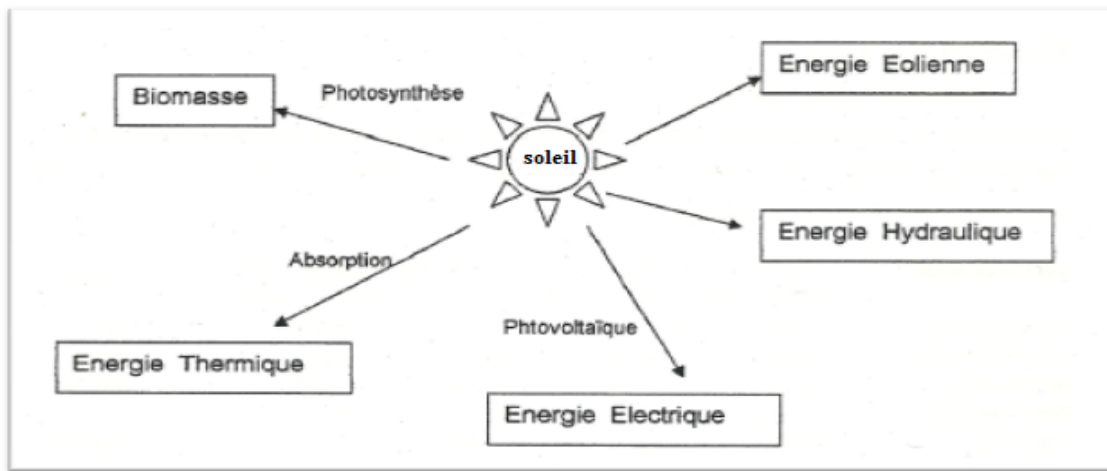


Figure 1 : Filières de transformation de l'énergie solaire [2].

III-Différents types d'énergies renouvelables

III-1Energie solaire

Le Soleil est une étoile de 1 392 000 km de diamètre (109 fois le diamètre de la Terre) . Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le Système solaire, ce qui a permis la vie sur Terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température (15 000 000 °C) et la pression (340 milliards de fois la pression terrestre au niveau de la mer) est si intense que des réactions nucléaires ont lieu. Elle se propage dans le Système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.

a) Energie solaire passif

L'énergie solaire passive est plus utilisée , elle consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire.par exemple pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du

soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire dont il va bénéficier. ce travail s'effectue lors de sa conception architectural) orientation vers le sud ,surfaces vitrées, etc) [3].

ce qui va avoir une incidence sur le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment. dans une maison solaire passive, l'apport solaire passif permet de faire des économies d'énergie importantes.

b) Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Les installations photovoltaïques se présentant sous forme de panneaux rectangulaires. Leurs performances dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils sont implantés.

□ Caractéristiques particulières

Avantages

- *L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.*
- *Le photovoltaïque est une technologie sûre et sans risque. En général, les panneaux photovoltaïques sont garantis 25 ans (et peuvent fonctionner 40 ans quasiment sans diminuer leur rendement).*

Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau.

Inconvénients

- *La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit.*
- *Les usines de production de cellules photovoltaïques émettent un grand taux de Dioxyde de Carbone.*
- *Le coût du photovoltaïque est élevé car il est issu de la haute technologie.*

c) Energie solaire thermique

Les panneaux solaires thermiques transmettent la chaleur émise par le soleil à un circuit secondaire, à partir de deux types de températures :

a)Le solaire thermique à basse température : dans les conditions terrestres, le rayonnement thermique se situe entre 0.1 et 100 micromètre. Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0.4 et 0.8 micromètre. Donc en rentrant en contact avec un corps le rayonnement solaire augmente sa température. On distingue deux possibilités d'utilisation de l'énergie thermique :

- *Directement pour chauffer des locaux, de l'eau sanitaire (panneaux solaires chauffants), des aliments (fours solaires)*
- *Indirectement pour la production de la vapeur d'un fluide caloporteur pour entrainer des turbines et ainsi obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique)*

b)Energie solaire thermique haute température : la concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. La chaleur produite est d'une température comprise entre 400°C et 1000 °C. On distingue deux usages principaux :

- *La production de chaleur (thermique)*
- *La production d'électricités (thermodynamique).*

III-2 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique utilise l'énergie des cours d'eau, des chutes, voire des marées, pour transformer la force motrice en électricité[3].

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique lié au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

l'énergie cinétique des cours d'eau est transformée en énergie électrique dans une centrale.

On distingue :

***la petite hydroélectricité** (PHE) désigne les centrales ne dépassent pas 10 MW de puissance des turbines installées sur les cours d'eau et utilisent la force motrice des chutes pour générer de l'électricité.*

***La grande hydraulique** est une production d'énergie essentielle, car elle peut s'adapter aux besoins, grâce au stockage. L'eau restée dans les barrages est utilisée en fonction des besoins.*



Figure 2 : Le barrage d'Itaipu , la plus grande centrale électrique au monde [4] .

III-3 biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale.

Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux. La biomasse comprend trois familles principales :

- ***a) Les bois énergie ou biomasse solide :***

Représente les matériaux d'origine biologique qui peuvent être employés comme combustible pour la production de chaleur ou d'électricité.

▪ **b) Le biogaz :**

Ce sont les matières qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). On l'appelle aussi « gaz naturel renouvelable » ou encore « gaz de marais », par opposition au gaz d'origine fossile.

▪ **c) Les biocarburants :**

Ce sont des carburants obtenus à partir d'une matière première végétale, animale ou de déchets, qui sont en général mélangés à des carburants d'origine fossile.

La biomasse est donc une énergie renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie notamment pour le bois et les biocarburants.

III-4 Energie géothermique

La géothermie utilise la température la plus élevée du sous-sol de la terre pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

La géothermie consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. On caractérise quatre types d'énergie : haute énergie, moyen énergie, basse énergie, et très basse énergie.

Le groupe EDF exploite ainsi, depuis 1996, la première et unique centrale géothermique qui produise industriellement de l'électricité dans le monde, Cette centrale est située à Bouillante en Guadeloupe.



Figure 3 : centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe [5].

IV-Conclusion

Nous vivons dans une société de consommation dont nos besoins des énergies pour se fournir, se chauffer, s'éclairer, se déplacer, se nourrir tout cela entre dans le domaine des énergies renouvelables. Mais il faut économiser cette énergie pour éviter de porter atteinte à l'environnement.

L'utilisation des sources d'énergies renouvelable, semble être une solution adéquate car, c'est surtout l'usage des énergies fossiles (énergie fossile et énergie nucléaire) qui renforce le phénomène d'effet de serre et donc le réchauffement de la planète. Encourager le développement de ces énergies, c'est parvenir à une indépendance énergétique qui ne peut être que positive à notre développement.

chapitre II :

Généralités sur les

éoliennes

I-Intoduction

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le plus souvent cette énergie est elle-même transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage, dont un type particulier est l'éolienne Bollée. Ernest Sylvain Bollée a utilisé ce mot « éolienne » pour la première fois (1885) comme nom commun et nom plus comme un adjectif (énergie éolienne). Le mot se retrouve dans le Larousse quelques années plus tard en 1907.

Il y a longtemps, on pouvait voir à l'horizon de nombreux moulins, aujourd'hui on y voit plutôt quelques éoliennes. Les premières éoliennes servaient à pomper l'eau. Nous avons tous l'image de l'éolienne en ferraille qui grince. Les éoliennes d'aujourd'hui produisent de l'électricité et ne ressemblent plus du tout à leurs ancêtres.

Il existe 2 types d'éoliennes. Les plus connues et les plus utilisées sont les grandes éoliennes qu'on voit dans les parcs et qui fournissent de l'énergie à des villes entières. Les autres sont de petites éoliennes adaptées aux besoins d'une habitation isolée du réseau électrique.

Une éolienne est constituée des éléments suivants :

- une tour cylindrique aussi appelée mat*
- une nacelle située en haut de la tour et qui comporte toute l'installation de production d'électricité*
- le rotor constitué de trois pales*

II- L'énergie éolienne: une étude générale

l'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent [6]. éolienne est divisé en deux catégories.

II.1 - éolienne à axe vertical

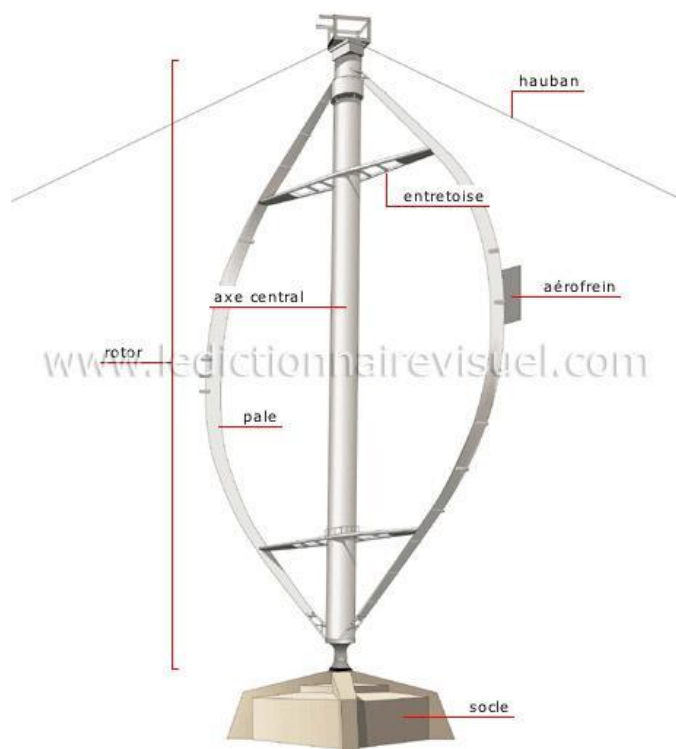


Figure 4 : éolienne à axe vertical [7] .

Nous allons décrire en détail l'éolienne à axe vertical dans le chapitre3, on se contentera dans cette partie de la structure externe d'éolienne.

II.2 - éolienne à axe horizontal

Type d'éolienne le plus répandu, dont l'axe s'oriente en fonction de la direction du vent. La hauteur est généralement de 20 m pour les petites éoliennes, et supérieure au double de la longueur d'une pale pour les modèles de grande envergure.

Aujourd'hui les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180 m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6 MW.

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

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

.



Figure 5 : éolienne à axe horizontal [8].

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

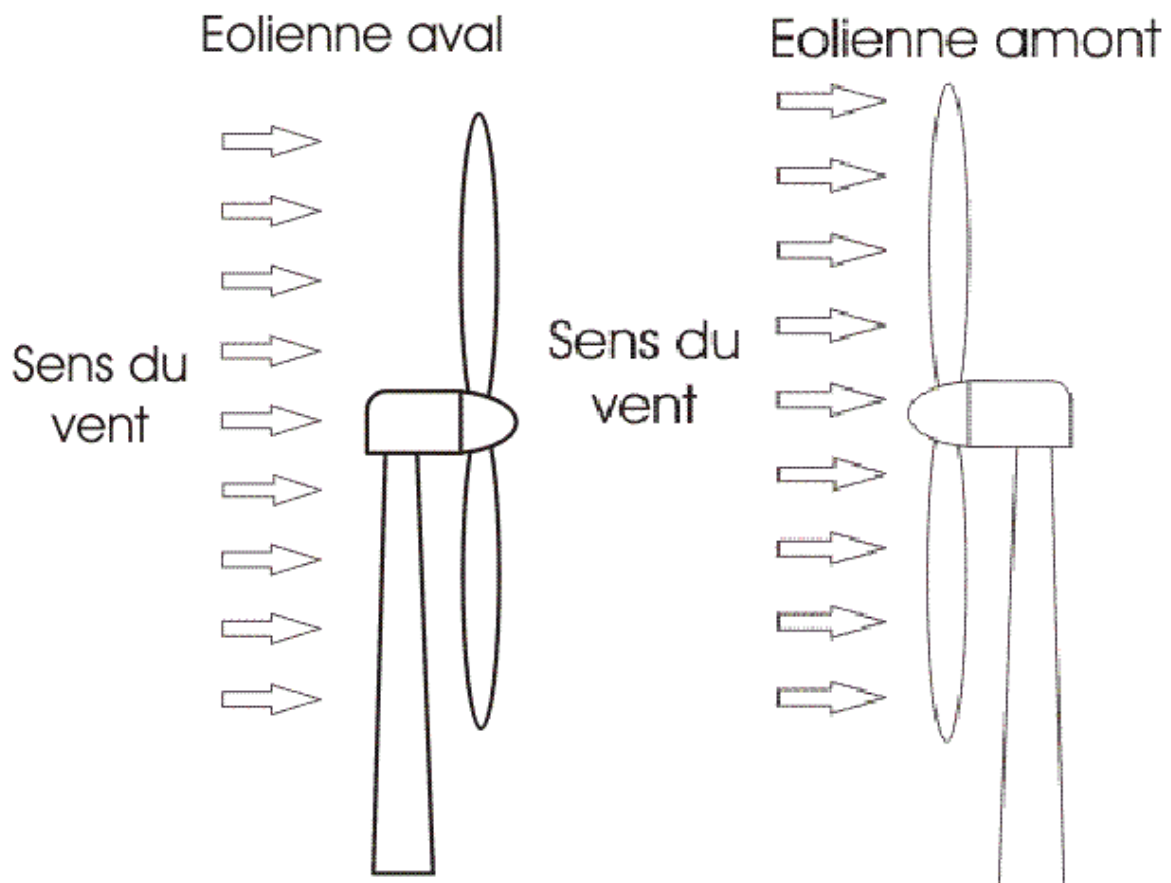
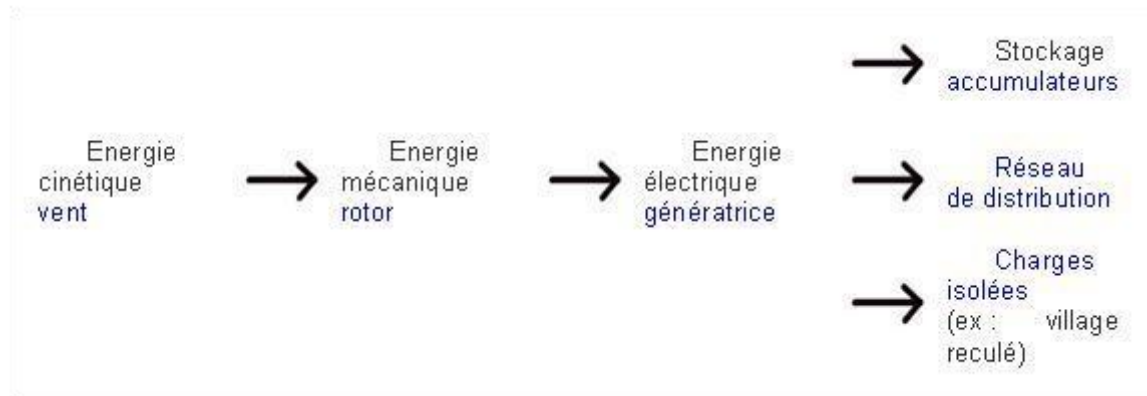


Figure 6:éolienne à axe horizontal en amont et aval [9].

II.3 Principe de l'aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor: cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées.



Principe de l'aérogénérateur

III- l' éolienne au niveau mondial

L'énergie éolienne est maintenant utilisée comme source d'énergie dans plus de 50 pays du monde.

Fin 2010, 193 GW d'éolien étaient installés dans le monde. En 2011, la puissance mondiale installée était de 200 GW. En 2009 , on a installé dans le monde une puissance de 37.500 mégawatts (MW) d'éoliennes. Selon The Global wind energy council, à la fin de 2008, la puissance installée des parcs éoliens à l'échelle du globe totalisait plus de 120 798 MW.

De 1997 à 2007, la puissance éolienne installée dans le monde est passée de 7584 à 93 678 MW, soit la consommation d'électricité spécifique d'environ 180 millions de personnes.

L'Europe possède 61% des moyens de production mondiale d'énergie éolienne. La France compte 4.3% de la puissance installée en Europe avec les 340 centrales .

III.1-la production de l'énergie éolienne mondiale

En cinq ans, la puissance éolienne installée a été multipliée par trois dans le monde, passant de 94 GW à 281 GW. La capacité installée a presque doublé en Europe, passant de 56,6 GW à 105,6 GW entre 2007 et 2012. Les pays précurseurs dans le monde ont été le Danemark, l'Allemagne et l'Espagne. Récemment, la Chine et les Etats-Unis sont devenus les pays possédant la plus grande capacité éolienne installée, précédant Allemagne et Espagne

qui restent cependant les pays disposant de la plus grande puissance éolienne par habitant avec le Danemark[10].

Cumul	EU 27	Etats-Unis	Canada	Chine	Inde	Maroc	Monde
2000	12 950	2 500	150	340	1 200	94	17 700
2005	40 500	9 150	650	1 250	4 400	752	59 200
2007	56 600	16 820	1 850	5 900	7 850	2250	93 900
2008	65 170	25 240	2 360	12 100	9 600	3327	124 000
2009	75 100	35 100	3 300	25 800	10 900	4574	158 900
2010	84 300	40 200	4 000	42 300	13 000	5764	194 500
2011	94 040	46 920	5 260	62 360	16 080	6692	237 200
2012	105 630	60 010	6 200	75 560	18 420	7449	281 100

Tableau 2 : Puissance éolienne installée : Europe et principaux pays du monde (en MW) [10].

III.2- le coût et la valeur économique de l'énergie éolienne

a/ Coût

L'EWEA (Association Européenne de l'Energie Eolienne), qui regroupe les producteurs d'éoliennes européens, a publié en 2009 un rapport sur l'économie de l'énergie éolienne, dont voici les principaux résultats :

- structure du coût d'investissement d'une éolienne de 2 MW en 2006 : 1227 €/kW dont 75,6 % pour la turbine, 9 % pour le raccordement au réseau, 6,5 % pour les fondations, etc ;
- comparaison avec les prix tirés des données de l'IEA pour divers pays : 1000 à 1350 €/kW, le moins cher étant le Danemark ; la part de la turbine est de 68 % à 84 % du total ; les autres coûts sont très faibles au Danemark (16 %) ;
- évolution de ce coût : prévue en baisse de 1300 €/kW à environ 800 €/kW en 2020 ;

- *coûts d'exploitation (entretien ,assurance, loyer du terrain, frais généraux, etc) : estimés à 1,2 à 1,5 c€/kWh ; ils baissent fortement en fonction de la taille des éoliennes ;*
- *coût total de production (actualisé sur 20 ans) : 11 c€/kWh à 5 €/kWh selon le coût d'investissement et les caractéristiques du site (vitesse moyenne du vent) ;*
- *part du coût d'investissement initial : 75 à 80 % du coût de production ;*
- *pour les sites de vent moyen (cas français), la fourchette de coût est de 6 à 8 c€/kWh, nettement inférieure au tarif d'achat français ;*
- *le coût décroît avec l'accroissement de la taille des éoliennes : pour un site côtier, de 9,2 c€/kWh pour les éoliennes de 95 kW des années 1980 à 5,3 c€/kWh pour les éoliennes récentes de 2 MW ; mais il a connu une hausse de 2006 à 2008 du fait de la saturation du marché (explosion des commandes)*
- *coût d'investissement des éoliennes offshore : 2000-2200 €/kW (près du rivage, en eaux peu profondes) ;*
- *part de la turbine : 49 % du total, station de transformation et câble sous-marin jusqu'à la côte : 16 %, fondations : 21 %, etc ;*
- *coût de production : 6 à 9 c€/kWh.*

b/ la valeur économique

La valeur économique d'un bien découle de l'utilité que les consommateurs en retirent (valeur d'usage). Dans le cas de l'énergie éolienne, en l'absence de marché, la valeur de cette énergie ne peut être évaluée qu'en étudiant les coûts qu'elle permet d'éviter.

La valeur d'usage de l'électricité éolienne découle pour l'essentiel de trois services rendus :

- contribution à la satisfaction de la demande d'électricité, valorisée sur la base de l'économie de combustibles fossiles qu'elle permet, qui dépend du coût de ces combustibles, voué à augmenter avec la raréfaction des ressources ;*
- contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui dépend de l'estimation des coûts de réparation des dégâts causés par le changement climatique ; c'est probablement la composante la plus importante de la valeur de l'éolien, mais elle est très mal connue et sujette à controverses ;*
- contribution à la réduction des émissions de polluants : particules fines (centrales à charbon), oxydes d'azote et de soufre, etc.*

Ces deux dernières composantes de la valeur de l'électricité éolienne constituent des externalités (dommages causés à autrui sans compensation) : en effet, ces coûts ne sont que très partiellement intégrés dans la formation des prix de marché : les coûts des polluants sont en partie pris en compte par les normes d'émissions de plus en plus sévères qui obligent les producteurs à dépolluer leurs effluents, mais les émissions de GES ne sont quasiment pas prises en compte ; des tentatives ont été faites pour corriger ce biais du marché, en particulier par le marché du carbone où s'échangent des droits d'émission de GES, mais les résultats du marché du carbone européen n'ont guère été convaincants jusqu'ici. La taxe carbone s'est montrée plus efficace dans les pays où elle a été mise en place (Suède, Finland).

IV- l' éolienne au niveau Maroc

Le Maroc dispose d'un potentiel considérable en énergie éolienne estimée à 25.000 MW dont 6.000 MW sont réalisables dans des sites identifiés dans les régions d'Essaouira, Tanger et Tétouan avec des vitesses de vent variant de 9,5 à 11 mètres/seconde et dans les régions de Dakhla, Laâyoune et Taza (entre 7,5 et 9,5 m/s).

Le gouvernement ambitionne de porter à 14% la contribution de l'éolien à la production nationale de l'électricité à l'horizon 2020. Ainsi, un investissement estimé à 31,5 milliards de DH a été mobilisé avec comme objectif d'augmenter la puissance éolienne installée à 2.000 MW en 2020 contre 280 MW actuellement.

Cinq nouveaux sites à grand potentiel ont été choisis pour accueillir des centrales éoliennes d'une puissance totale de 1.000 MW, à savoir les sites de Tanger II, Koudia El Baida à Tétouan, Taza, Laâyoune et Haouma à Tétouan.

Ces centrales éoliennes s'ajoutent aux parcs d'Abdelkhalek Torres d'Essaouira et de Tanger avec 280 MW de puissance éolienne, ainsi qu'à ceux de Tarfaya, Akhfenir, Bab El Oued à Laâyoune et Haouma à Tétouan (720 MW en développement).

EOLIEN : projets réalisés ou en cours *

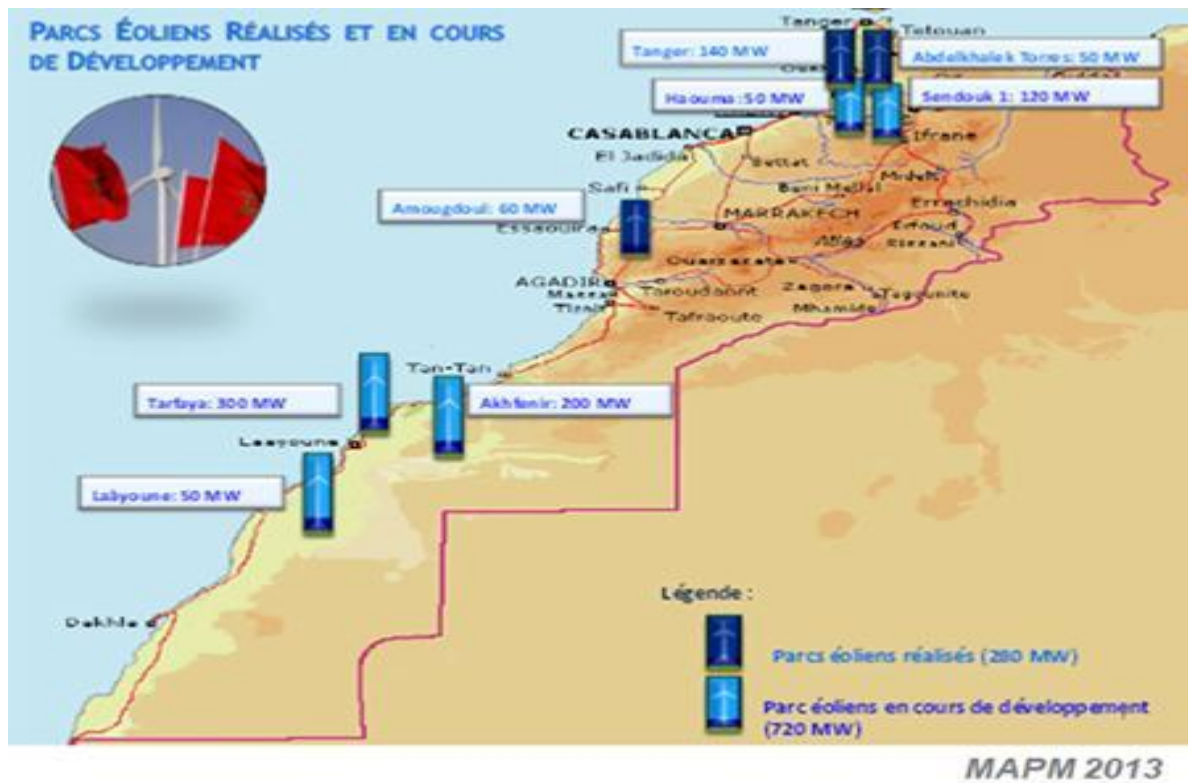


Figure 7 :les parcs éoliens réalisés au maroc.

IV.1- le parc éolien de Tarfaya

Le futur parc éolien de Tarfaya, qui devrait déjà être mis en service courant 2011, sera bâti à 2 kilomètres au sud de la ville. Il aura une puissance de 200 MW qui pourra être étendue à 300 MW.

La construction d'une centrale éolienne à Tarfaya s'inscrit dans le cadre du récent programme marocain integre de l'énergie éolienne , rendu public le 28 juin dernier. Ce programme a un coût total estimé à 31,5 milliards de dirhams. Son premier parc a été inauguré le même jour. Avec ses 165 aérogénérateurs, il a une capacité de production de 140 Mégawatts (MW). De même, la mise en service de cette centrale, a fait augmenter de 136%, la production d'électricité d'origine éolienne [11].

Le parc éolien de Tarfaya (2014) avec une puissance initiale de 50 mégawatts au départ. Considéré comme étant le plus grand parc d'énergie éolien en Afrique, il sera équipé de 131 éoliennes de 80 mètres de haut et d'une puissance unitaire de 2,3 mégawatts fabriquées par le groupe allemand Siemens. Rappelons que le Maroc prévoit de réaliser d'ici 2020 un programme d'au moins 2 Gigawatts d'énergie éolienne et 2 Gigawatts d'énergie solaire.



Figure 8 : le parc éolien de Tarfaya [12] .

IV.2- le parc éolien de Koudia al Baïda à Tétouan.

MAROC Theolia et l'Office National de l'Electricité Marocain (ONE) ont signé, mardi 31 mai 2011, un protocole d'accord pour le développement et la réalisation d'un parc de 300 MW à Tétouan, près de Tanger à l'occasion des 2èmes Assises de l'énergie, organisées par le ministère marocain de l'Energie, de l'Eau et de l'Environnement.

Le Groupe Theolia, présent au Maroc depuis de nombreuses années au travers de la Compagnie Eolienne du Détroit, exploite le parc de Koudia al Baïda, à Tétouan.

Une augmentation de la production d'électricité évaluée à 3 640 mégawatts à l'horizon 2015, le projet débutera sa première phase, juin 2012. Le coût de ce projet s'élèvera à 6,6 mrdDH. Theolia sera, dans ce projet, l'investisseur majoritaire de la structure et l'ONE en détiendra 20%. Le parc existant de Koudia al Baïda sera amélioré dans son efficacité (remplacement des turbines existantes par des turbines plus puissantes). et par l'addition de sites adjacents au parc grâce à l'énergie éolienne.



Figure 9 : Le parc de Koudia al Baïda au Maroc détenu par Theolia [13].

chapitre III :

Eolienne à axe

vertical

I.Introduction

Ce type d'éolienne a été inventé par Sigurd SAVONIUS en 1924. Ses avantages sont l'esthétisme, la faible perturbation sonore, la capacité de démarrer par vent faible, de plus, elles sont très peu encombrantes.

Par contre, ce type de rotor a l'inconvénient de ne fournir que de faibles puissances. Elle peut donc très bien s'intégrer sur un bâtiment et servir d'alimentation pour un refuge de montagne par exemple. Leur fonctionnement est assez simple: les pales font tourner l'axe central qui lui-même entraîne la génératrice.

La génératrice est tout simplement un moteur électrique qui fonctionne dans le sens inverse: la plupart du temps on fournit de l'électricité au moteur pour qu'il tourne, la c'est l'inverse, on fait tourner le moteur pour qu'il fournisse de l'électricité.

L'éolienne à axe vertical, peu puissante mais très résistante aux vents forts, se compose d'un axe sur monté d'une roue. L'éolienne verticale est plus commode à installer et coûte généralement moins cher. Elle est notamment indiquée pour les zones urbaines. De plus, les éoliennes verticales sont pour la plupart esthétiques, ce qui leur permet de s'intégrer avec harmonie dans le paysage domestique.

II. Les types des éolienne sur axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble par exemple.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus.

II.1 darrieus

Le type Darrieus repose sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif ; effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion. On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor cylindrique - deux profils disposés de part et d'autre de l'axe jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical. Une éolienne de ce type a fonctionné au Québec (au Parc Éole) de 1983 à 1992. De grandes dimensions (110 m de haut), le prototype s'est détérioré lors d'un coup de vent, il était conçu pour fournir 4 MW avec un générateur au sol.

Le rotor de ces éoliennes peut être cylindrique ou parabolique. Une éolienne Darrieus a fonctionné au Canada de 1983 à 1992, mais le prototype s'est détérioré lors d'un coup de vent, c'est pourquoi ce modèle n'est plus commercialisé à ce jour.

Eolienne Darrieus

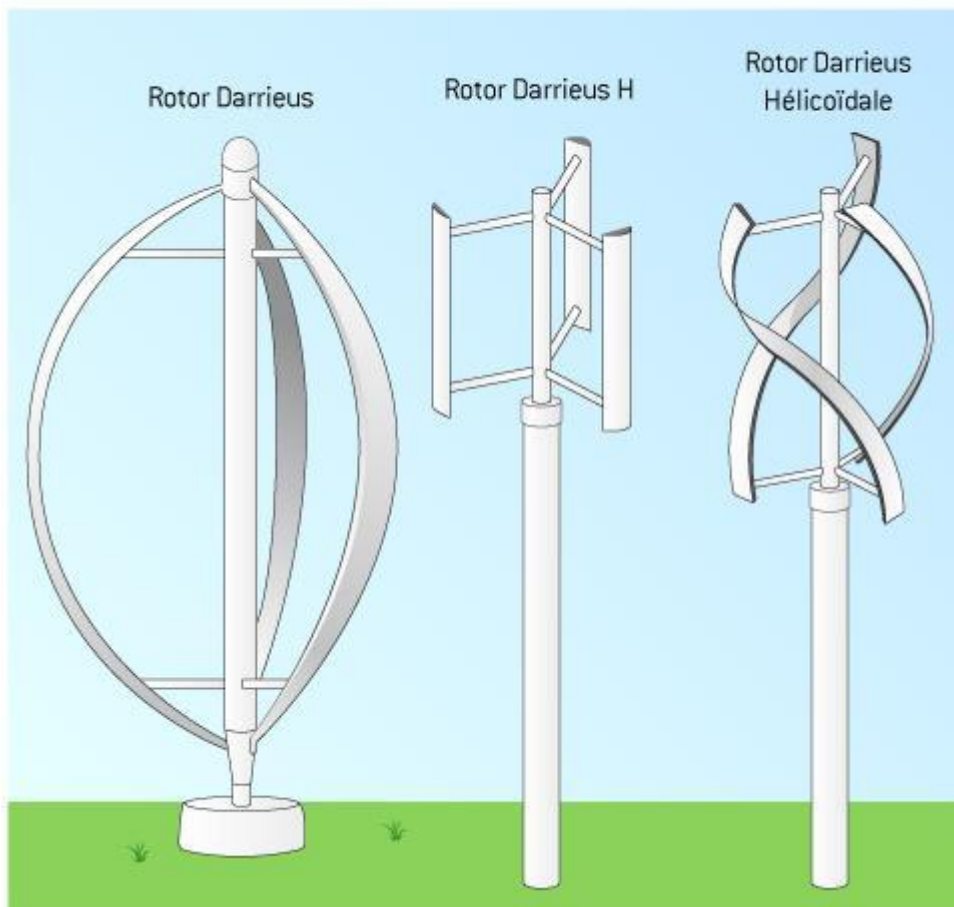


Figure 10 : Les éoliennes verticales Darrieus [14].

a) Les avantages de ce type

- Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 220 km/h.
- En outre, cette éolienne émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place. De plus, vous pouvez l'installer directement sur le toit.
- Autre aspect pratique, son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci. Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement.

b) Principe de fonctionnement de ce type

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables (traînée et portance). Ceci explique qu'une étude doit être réalisée sur le profil utilisé afin d'obtenir le rendement maximum. La combinaison de ces forces sur les divers profils du rotor génère alors un couple moteur (figure 8). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent incident.

On se rend alors compte que certains profils génèreront une traînée plus importante que la portance et se sera l'inverse pour d'autres. La traînée empêchera la rotation alors que la portance la favorisera. De plus, la combinaison entre le vent incident et la rotation donne un vent relatif sur les profils supérieur au vent incident. Au final, la force de portance globale est supérieure à la force de traînée entraînant ainsi le rotor.

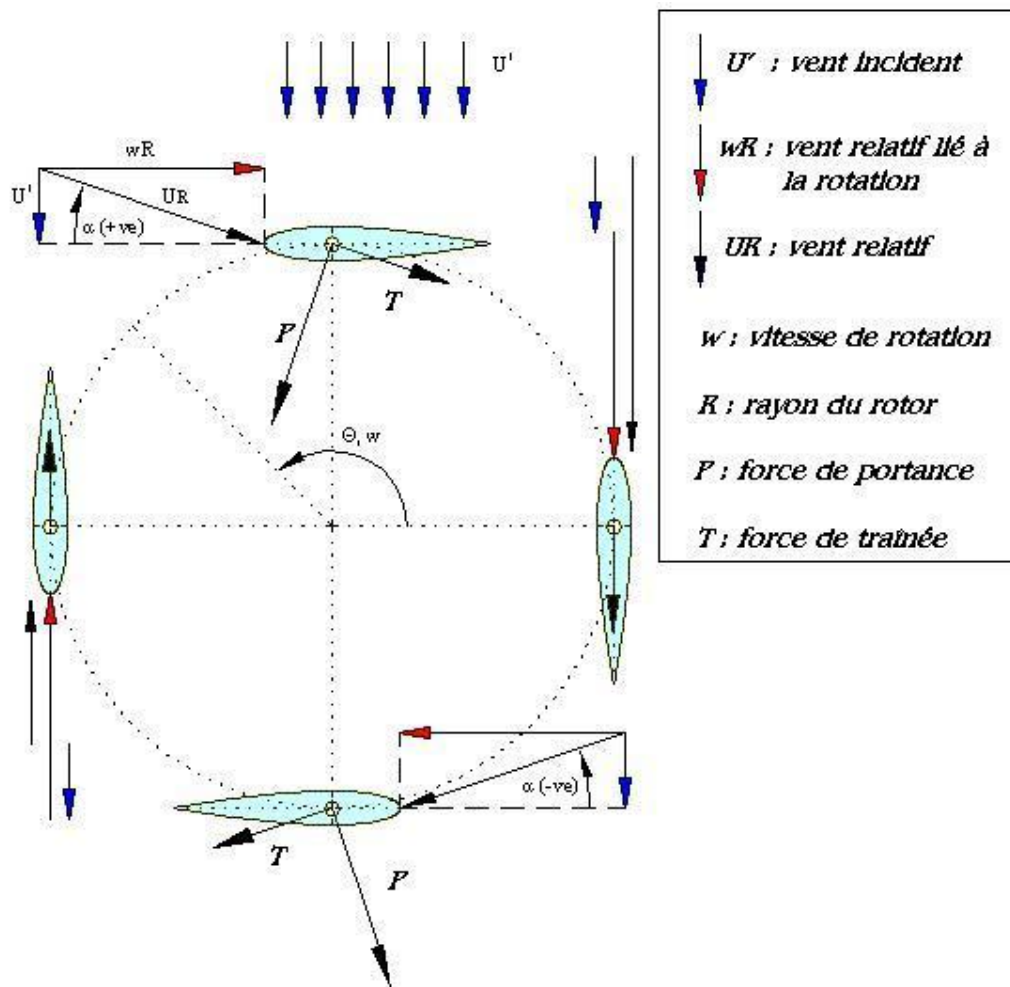


Figure 11 : force et rotation de l'éolienne

II.2-Savonius

Le type d'éolienne Savonius, inventé en 1924 par l'ingénieur finnois Sigurd Savonius, possède de nombreux avantages comme celui d'être peu encombrant, peu bruyant, de démarrer à de faibles vitesses ainsi que d'être plus économique et esthétique pour faciliter l'intégration aux bâtiments. Les principaux défauts de ce type sont celui du rendement qui est faible comparé aux autres, le fait que le couple ne soit pas constant et le problème imposé par sa masse, très importante

car les pales sont pleines. Dans la plupart des cas les pales demies cylindriques de l'éolienne sont légèrement désaxées pour récupérer au maximum la force du vent qui s'y engouffre.



Figure 12 : Rotor de Savonius

a) Les avantages de ce type

Les avantages de cette éolienne sont :

- *d'une part, son esthétisme et la possibilité de l'installer sur une toiture,*
- *d'autre part, le fait qu'elle fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction.*

b) Principe de fonctionnement de ce type

Le type Savonius, constitué schématiquement de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques légèrement désaxés présente un grand nombre d'avantages. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, il est peu bruyant. Il démarre à de faibles vitesses de vent et présente un couple élevé quoique variant de façon sinusoïdale au cours de la rotation. Il existe une variante, appelée Savonius hélicoïdal (ou twisted Savonius en anglais), qui permet d'augmenter le rendement en proposant de

façon continue une surface d'accroche au vent. Au lieu d'avoir des demi-cylindres verticaux, ceux-ci sont tordus de façon hélicoïdale autour de l'axe de rotation. Du fait de leur faible encombrement au sol, de leur bon rendement et du besoin d'un très faible vent, ils sont utilisés en ville sur les toits des maisons, sur des bateaux, comme le Hornblower Hybrid, ou encore dans la tour à énergie positive Pearl River Tower. Elles sont également adaptées à une position horizontale, l'axe de rotation restant face au vent et non dans le profil du vent, comme les éoliennes dites à axe horizontal.

III- Quelle différence entre éolienne verticale et horizontale?

III-1 L'éolienne horizontale: la plus répandue

a) Les avantages

- *L'avantage indéniable de ce type d'éolienne est son rendement. Elles parviennent en fait à s'adapter aux vents et à les capter au maximum.*
- *Le coût d'achat de l'éolienne horizontale est inférieur au coût d'achat de l'éolienne verticale*

b) les inconvénients

- *Confrontée à des vents forts, l'éolienne horizontale est moins résistante que l'éolienne verticale.*
- *Le déclenchement de la machine est long : en effet, elle prend un certain temps pour s'adapter aux vents.*

III-2 L'éolienne verticale : Moins répandue

a) Les avantages

- *Cette éolienne présente un atout indéniable : elle parvient à très bien capter les vents faibles. Elle fonctionne donc en tout temps.*
- *Elle s'adapte aussi très bien aux différents sens du vent.*
- *L'éolienne verticale exige par ailleurs beaucoup moins d'espace que l'éolienne horizontale.*

b) Les inconvénients

- *Le rendement de cette éolienne est moins élevé que celui de l'éolienne horizontale. Elle produit donc beaucoup moins d'électricité.*

IV-Conclusion

Eolienne à axe vertical est moins utilisé en générale dans le monde à cause plusieurs des facteurs économiques et logistiques :

□ Facteur économie

- Le coût d'achat de l'éolienne verticale est plus chère que les autres éoliennes*
- le matériel de ce type est en général peu disponible .*
- la demande du marché est très faible*

□ Facteur logistique

- absence du transport pour fournir le marché*
- absence les techniciens dans ce domaine*
- absence les parcs des éoliennes à axe vertical*

En général, l'énergie éolienne désignée notamment comme source de production d'énergie représente l'une des meilleures solutions adaptées, car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Chapitre IV :

Réalisation d'une

éolienne à axe vertical

I-Introduction

L'éolienne à axe verticale a été inventée en 1925 par l'ingénieur français Georges Darrieus, ce type d'éolienne n'a pas besoin d'être en face du vent, car elle est efficace quelle que soit la direction du vent. Les pales de l'éolienne à axe vertical, tournent dans un plan horizontal.

L'éolienne que j'ai réalisé, s'appelle Savonius , caractérisée par :

- *Faible encombrement*
- *Esthétique et Intégrable au bâtiment*
- *Démarre à de faible vitesse du vent*
- *peu bruyant.*

J'ai étudié la tension en fonction de la vitesse du vent de l'éolienne réalisée.

II – Application

Les composantes nécessaires pour la réalisation de notre éolienne sont :

- *Séchoir à cheveux (à 4 vitesse)*
- *Multimètre*
- *Tachymètre pour la mesure de la vitesse de rotation des pales*

Nous avons reporté dans le tableau 3, les résultats obtenus :

<i>V(volt)</i>	<i>Vitesse de rotation (tour/min)</i>
<i>0,7</i>	<i>150</i>
<i>1,06</i>	<i>250</i>
<i>1,33</i>	<i>300</i>
<i>1,42</i>	<i>350</i>

Tableau 3 :la tension (volt) en fonction de vitesse du vent(tour/min).

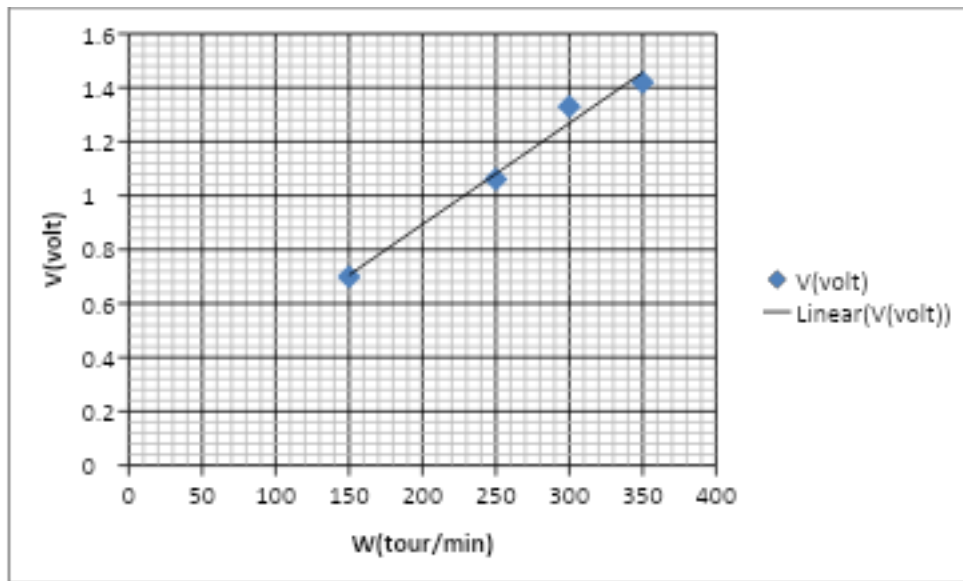


Figure 13 : la courbe de la tension en fonction de la vitesse de rotation des pales (tr/min)

Nous avons déduit à partir de la cette courbe (figure13) que la vitesse v est proportionnelle à la vitesse de rotation des hélices, ce qui veut dire cette vitesse de rotation varie linéairement avec la vitesse du vent . Et d'autre part, la valeur de la tension du courant varie linéairement avec la vitesse du vent.

III-Conclusion générale

L'énergie éolienne permet de contribuer de façon efficace à l'énergie électrique, particulièrement en hiver. Nous pouvons aussi dire que la rentabilité éolienne est plus importante dans des lieux isolés.

L'énergie éolienne sera effectivement un peu plus coûteuse que les sources nucléaires, fossiles ou hydroélectriques, mais cette énergie est très propre, et non polluante.

On peut donc dire que l'éolienne possède un système de fonctionnement assez simple, elle peut produire assez d'énergie.

Pour conclure nous pouvons dire que les éoliennes sont une perspective d'avenir. Elles sont composées de beaucoup d'éléments mais en réalité leur fonctionnement est simple. De plus elles sont très intéressantes par rapport aux autres sources d'énergie comme les centrales nucléaires ou à charbon qui rejettent du CO_2 ce qui est néfaste pour l'environnement.

Webographie

[1]- *[http : //www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)*

[2]- *cous des E.R Mr. TADILI,2012*

[3]-*http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_hydro_aulique.php4*

[4]-

<http://www.jolpress.com/article/itaipu-dam-une-des-plus-grandes-centrales-hydroelectriques-au-monde-bresil-paraguay-812827.html>

[5]- *<http://energie.edf.com/energies-nouvelles/geothermie-47909.html>*

[6]-

<http://www.mtaterre.fr/dossier-mois/archives/chap/682/Le-fonctionnement-de-l-energie-eolienne>

[7]-

<http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/energies/energie-eolienne/eoliennes-et-production-electricite/eolienne-a-axe-vertical.php>

[8]-

<http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/energies/energie-eolienne/eoliennes-et-production-electricite/eolienne-a-axe-horizontal.php>

[9]-

<http://e-lee.hei.fr/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/GeneralitesEolien2.htm>

[10]- *http://energeia.voila.net/eolien/eolien_monde.htm*

[11]-

<http://www.yabiladi.com/articles/details/3135/maroc-energies-eoliennes-nareva-s-adjuge.html>

[12]-

<http://www.aujourd'hui.ma/maroc-actualite/economie/tarfaya-le-nouveau-parc-eolien-bientot-operationnel-105830.html>

[13]-

http://www.econostrum.info/Theolia-va-developper-un-nouveau-parc-eolien-a-Tetouan_a5996.html

[14]- *<http://eolienne.comprendrechoisir.com/comprendre/eolienne-verticale>*.

