

REFERENCE

- [1] ZERROUKI.F, and GANA.A, “Etude et analyse de la pertinence de l’implantation des éoliennes dans la région de tiziouzou,” département de génie mécanique, université de Tizi-Ouzou, 2010.
- [2] Université Ferhat Abbas de Sétif, Mémoire de Magister, Présenté par : Mr : LATRECHE Mohammed Tahar, Sujet « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien»,Mémoire soutenu le: 24 /06 /2012.
- [3] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006.
- [4] UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE. Mémoire de Magister, Présenté par : REDJEM Radia, Sujet « Étude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne», Soutenu le : 04 /07/2009.
- [5] Université Mohamed Khider – Biskra. Mémoire de Magister .Présenté par : Hamza Soumia, Sujet « Conception par la CAO des parties fixes d’une éolienne et les solutions technologiques de liaisons de l’installation».
- [6] Université du haver, thèse de doctorat spécialité : génie électrique, Présenté par : Jaouad Azzouzi, Sujet « contribution à la modélisation et à l’optimisation des machines synchrone à aimant permanent à flux axial .application au cas de l’aérogénérateur » le 08/03/2007.
- [7] institut national polytechnique de grenoble. Thèse de doctorat, Présenter par : nicolas lavedure, Sujet « sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Soutenu :le 9 décembre 2005.
- [8] université abderrahmane mira – béjaia. Thèse présentée par m. Kassa idjdarene .pour l’obtention du grade de docteur en scienc sujet « contribution à l’etude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales electriques eoliennes autonomes». Soutenu le 23 mai 2010.

[9] universite ferhat abbas — setif. Mémoire de magister présenté par bencherif bilel. Sujet « etude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone à aimants permanents » soutenu le 2011.

[10] université de batna, mémoire de magister option machine électrique, Présenté par : toual belkacem, sujet « modélisation et commande floue, optimisée d'une génératrice à double alimentation application à un système éolienne à vitesse variable» soutenu le 17/10/2010.

[11] <http://eolienne.comprendrechoisir.com>

[12] metatla samir «optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'alger, 2009.

[13] <http://www.ufc-quechoisir-ain.org>

[14] A. Davigny – « participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », thèse de doctorat, université des sciences et technologies de lille, lille, france, 2007.

[15] L. Chang – « systèmes de conversion de l'énergie éolienne », iee canadian review - summer / été 2002, pp. 1-5.

[16] thèse de doctorat polytechnique de toulouse, spécialité génie électrique, présenté par adam mirecki, Sujet « étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petit puissance » setenu le 5/4/2005.

[17] université de tizi-ouzou thèse de doctorat spécialité électrotechnique, présenté par : mr booukais boussad, Sujet « contribution à la modélisation de système couples machine convertisseur : application sur machine à aimant permanant » setenu le 21/02/2012

[18] université des sciences et technologies de lille, Présenté par : arnard davigny, Sujet « participation au service système de ferme d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie» le 11/12/2007.

[19] <http://www.eoliennesatoutprix.be>

[20] université de batna, mémoire de magister option énergie renouvelable,Présenté par : mayouf massoud, Sujet« contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent » soutenu le 13/02/2008.

[21] <http://tpe.aerostats.pagesperso-orange.fr>

[22] université de tizi-ouzou .mémoire de magister présenté par mme hamecha samira, Sujet« etude et commande d'une eolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents » le 25/06/2013.

A travers les différentes parties de ce mémoire, on a pu sortir avec des conclusions permettant de perfectionner nos connaissances théoriques et techniques acquises pendant notre cycle de formation.

Parmi les énergies non polluantes, l'énergie éolienne a été identifiée comme une des plus prometteuses des énergies renouvelables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais son intégration au réseau conventionnel rencontre plusieurs, notamment en ce qui concerne la qualité de l'électricité et la sécurité du réseau.

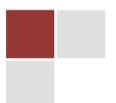
Parmi les énergies renouvelables on distingue le type d'énergie éolienne qui subit une grande révolution dans notre monde contemporain, toutefois l'installation de celle-ci doit remplir certaines conditions indispensables telles que la vitesse de vent, le type de génératrice...

On conclut que La quantité d'énergie disponible varie avec la saison, l'heure du jour et la région de l'installation, une fois cette énergie est produite par la rotation de rotor, le système de conversion est assuré d'une façon significative des caractéristiques. Pour déterminer le rendement de l'énergie éolienne on doit faire connaissance aux rendements de chaque élément.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans le cadre de la réalisation d'une éolienne à une échelle réduite pour la production de l'énergie électrique à faible puissance. La puissance ainsi obtenu à travers cette expérience est de 15 W et la tension est de 10 V à savoir que cette valeur peut être améliorée en fonction du vent et aussi l'entrefer.

Notre prototype a la capacité de charger une batterie à condition que le vent soit disponible, par conséquent il peut être utilisé dans les zones enclavées et isolées pour aider les habitants dans leurs vies quotidiennes.

Notons ici que les matériaux utilisés pour la construction de notre prototype sont moins couteux et disponibles dans le marché.



Dédicaces

Avant tout, je remercie le Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

À ceux que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination

Ma mère, mon père mes frères, sans eux je n'aurais pas aboutie à ce
stade d'étude,

À tous mes amis(es),

À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce
mémoire.

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

À vous...

Remerciement

Je dois tout d'abord remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux,
qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Je tiens à remercier très sincèrement le Professeur Minoune
souri Mohamed de l'université de Biskra, mon encadreur.

Je remercie également les membres de jury qui me fait
L'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Sans oublier de remercier mes amis, mes collègues et tous ceux qui
m'ont aidé de près ou de loin à élaborer ce mémoire.

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique [9][22].

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme. Portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde.

Cependant, la technologie des turbines éoliennes semble avoir atteint la limite en matière de taille des hélices. En effet, les plus grandes éoliennes actuellement sur le marché, ont une hélice de plus 120 m de diamètre et une tour qui dépasse les 100 m de haut, pour produire une puissance électrique de 6 MW environ, ce qui l'équivalent d'un immeuble d'environ 50 étages ! Cette contrainte mécanique a poussé les chercheurs à mener une nouvelle voie de recherche qui s'intéresse à l'optimisation et l'amélioration du rendement et des performances des systèmes éoliennes.

La présentation de mémoire :

Pour le premier chapitre : nous avons représenté une généralité sur les éoliennes en particulière avec une généralité sur le système, la génératrice synchrone à aimant permanent et à la fin une partie économique.

Pour le deuxième chapitre : nous avons représenté la modélisation de ce système par des équations mathématiques et le rendement.

Pour la troisième chapitre : nous avons représenté la partie pratique qui contient les étapes de construction d'un système éolienne expérimentale, le type de génératrice est synchrone à aimant permanent avec turbine à axe horizontal.



LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité Sur Les Éoliennes

Figure I-1 : Photographie De Deux Moulins A Vent.....	4
Figure I-2 : La Vitesse Moyenne Du Vent De L'algerie Estimée A 10 M Du Sol.	4
Figure I-3 : L'effet Venturi.....	6
Figure I-4 : Installation De L'éolien Offshore.	7
Figure I-5 : Conversion De L'énergie Cinétique Du Vent.....	8
Figure I-6 : Composante D'une Eolienne De Forte Puissance.....	11
Figure I-7 : Différents Types De Tours.....	12
Figure I-8 : Classification Des Eoliennes A Axe Horizontal Selon Le Nombre De Pale	
Figure I-9 : Eléments D'une Nacelle	13
Figure I-10 : Le Multiplicateur	14
Figure I-11 : Type De L'anémomètre.....	15
Figure I-12 : Les Fondations De Grandes Eoliennes.....	15
Figure I-13 : Eoliennes A Axe Vertical De Type Savonius.	17
Figure I-14 : Eoliennes A Axe Vertical De Type Darrius	18
Figure I-15 : Différent Type D'éolienne A Axe Horizontale.	19
Figure I-16 : Eolienne Sous Le Vent, Tripale Flexible	20
Figure I-17 : Eolienne Face Au Vent (Amont)	21
Figure I-18 : Système Eolien Basé Sur Une Machine Asynchrone A Cage A Vitesse Fixe.	23
Figure I-19 : Système Eolien Basé Sur Une Machine Synchrone A Aimants Permanents A Fréquence Variable.....	26
Figure I-21 : Machine Synchrone Connectée A Un Redresseur A Diodes Et Hacheur Dévolteur.....	28
Figure I-22 : Machine Synchrone Avec Convertisseur A Diodes Et Hacheur En Pont...28	
Figure I-23 : Machine Synchrone Connectée A Un Redresseur A Mli.....	28
Figure I-24 : Les Types De Génératrice Synchrone A Aimant Permanant.....	30
Figure I-25 : Msap Discoïde Avec Deux Stators Et Un Rotor.....	31
Figure I-26 : Msap Discoïde Avec Stator Et Deux Rotors.	31

Figure I-27 : MSAP Discoïde Unilatérale Avec Contrepoids Du Côté Rotor.	31
Figure I-28 : Courbe B (H) Des Différents Types Des Aimants Permanents.....	33
Figure I-29 : Estimation D'une Evolution Possible Des Coûts (€/Kw).....	36
Figure I-28 : Evolution De La Puissance Eolienne Installée Dans Le Monde	37

Chapitre II : Modélisation D'un Système De L'éolienne

Figure (II-1) : La Hauteur En Fonctionne Avec La Vitesse De Vent.....	38
Figure (II-2) : Distribution De Vitesse Du Vent.....	40
Figure (II-3) :L'exploitation De Puissance En Fonctionne La Vitesse De Vent.....	43
Figure (II-4) : Coefficient Puissance Pour Différents Types D'éoliennes	44
Figure (II-5) : Schéma Simplifié De La Turbine Eolienne	45
Figure (II-6) : Schéma Simplifié De La Turbine Eolienne Avec Multiplicateur.....	45
Figure (II-6) : Zones De Fonctionnement D'une Eolienne	47
Figure (II-8) : Bilan De Puissance D'une Eolienne.....	50

Chapitre III : Conception D'une Eolienne A Axe Horizontale Avec GSAP A Champ Axial

Figure (III-1) : l'arbre utilisé pour l'éolienne.....	51
Figure (III-2) : diamètre du disque du rotor 230 mm.....	52
Figure (III-3) : Le diamètre extérieur 210 mm.	53
Figure (III-4) : Le diamètre intérieur 160 mm.	54
Figure (III-5) : Le diamètre de l'arbre 14 mm.	54
Figure (III-6) : la distance entre les deux axes (A, B).....	55
Figure (III-7) : la distance entre les deux axes (A1, B1).	55
Figure (III-8) : la distribution sur le plan	56
Figure (III-9) : placement des aimants permanents sur le disque de rotor.	57
Figure (III-10) : placement d'écrou dans le disc de rotor.....	57
Figure (III-11) : représente le cercle de bois.....	58

Figure (III-14) : model du gabarit utilisé.	59
Figure (III-15) : placement de bobine dans le stator.....	60
Figure (III-16) : représente le support du système.	61
Figure (III-17) : représente la pièce complémentaire.	62
Figure (III-18) : Plaque de support.....	63
Figure (III-19) : l'entrefer de la génératrice.	63
Figure (III-20) : les pales utilisées.	64
Figure (III-21) : le disque utilisé.	65
Figure (III-22) : la turbine de l'éolienne.	66
Figure (III-23) : vitesse de rotation en fonction de vitesse de vent.....	67
Figure (III-24) : tension en fonction de vitesse de rotation.....	68
Figure (III-20) : tension en fonction de l'entrefer.....	69

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité Sur Les Éoliennes

Tableau I-1 : Classement De Vitesse De Vent Moyenne.....	5
Tableau I-2 : Classification Des Turbines Eoliennes	21
Tableau I-3 : Les Avantages Et Inconvénients Des Différentes Eoliennes.....	34

Chapitre II : Modélisation D'un Système De L'éolienne

Tableau (II-1) :L'effet De L'angle Sur La Nature De Terrain.	39
--	-----------

Chapitre III : Conception D'une Eolienne A Axe Horizontale Avec GSAP A Champ Axial

Tableau (III-1) : Dimensions des aimants.....	52
Tableau (III-2) : représente Les dimensions des bobines.....	59
Tableau (III-3) : représente les valeurs de mesure.....	63
Tableau (III-4) : représente les dimensions de turbine.....	65
Tableau (III-5) : représente les valeurs mesure.....	67
Tableau (III-6) : représente les valeurs mesure.....	68

I-1- Introduction

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées.

I-2- Historique

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moulin du grain (Figure I-1). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « Poul La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes.

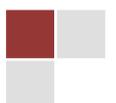




Figure I-1: Photographie de deux moulins à vent. [4]

I-3-2 Le Gisement De Vent

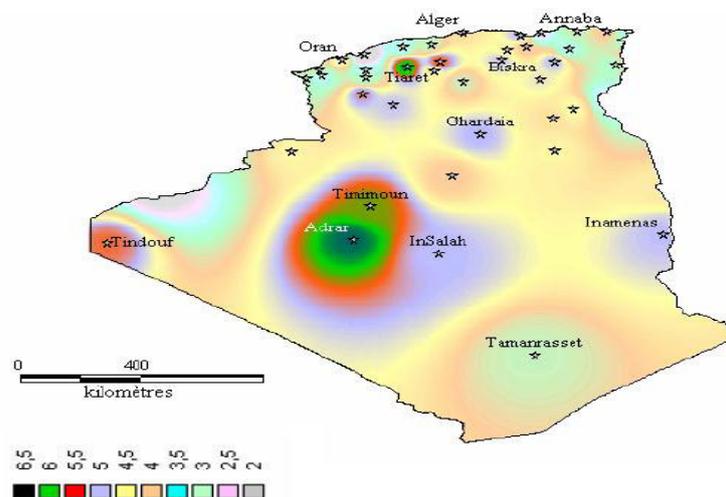


Figure I-2 : la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran [10].

I-3-2-1 D'où Vient Le Vent

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.

I-3-2-2 Variation Temporelle De Vitesse Moyenne Du Vent

Pour connaître l'importance du vent en un point donné, il suffit de déterminer la vitesse moyenne arithmétique annuelle pondérée, calculée sur un échantillon de 10 années minimum. Cette dernière donne un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur un site donné. Par ailleurs, les vents varient différemment selon la saison, la journée et l'année. Cette variation doit être déterminée puisqu'elle permet d'adapter le dimensionnement des systèmes éoliens aux besoins énergétiques qui peuvent varier suivant les saisons. [11]

Il existe trois niveaux de vent: valeur moyenne, faible, et fort.

Le vent	Faible	Moyen	Fort
Vitesse moyenne (m/s)	2-6	6-14	14-plus

Tableau I-1 : classement de vitesse de vent moyenne.

I-3-2-3 Les Critères De Choix Du Site [11]

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Le rendement d'une éolienne dépendant de la régularité et de la puissance du vent. Les sites les plus intéressants sont généralement situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Elle peut être aussi une solution dans les pays où les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population même si les vents ne sont pas optimums.

Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :



➤ **L'effet Venturi**

Lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles comme deux montagnes ou deux grands bâtiments, il est accéléré par effet venturi. De même, lorsqu'il rencontre une colline, l'air est accéléré au niveau du sommet. Ils sont cependant le plus souvent de surface restreinte.

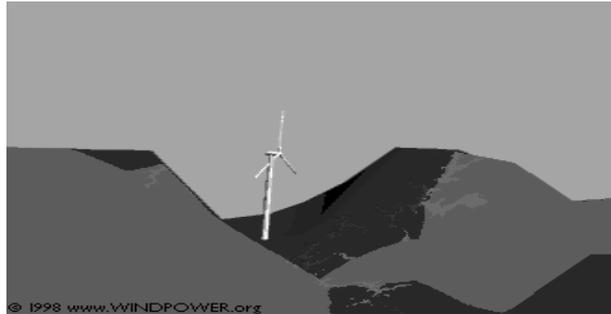


Figure I-3 : L'effet venturi.

➤ **L'altitude**

Le vent est engendré par une différence de température ou de pression. Il est ralenti par les obstacles, et la rugosité du sol, et est généralement plus fort en altitude. Les plaines ont des vents forts parce qu'il y a peu d'obstacles. Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants.

➤ **La mer (offshore) et les lacs**

Sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents.

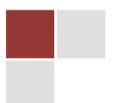




Figure I-4 : Installation de l'éolien offshore.

Nous constatons aussi que cette structure est destinée à la grande exploitation de la mer, car le vent n'a pas de barrières où que l'énergie éolienne peut fonctionner à 97 % du temps. Les installations de l'éolien offshore sont plus chers que sur le terrain, parce qu'elle demande une conception exacte de l'interconnexion électrique de câbles sous-marins doit également être conçu pour résister à la puissance des vagues et doit donc être renforcé la protection contre la corrosion et l'entretien.

Trouvez un parc éolien en mer, à 10 km de la côte, avec une profondeur de 20 m à 30 m.

➤ **Linéarité du vent** (qui dépend des obstacles (habitat, arbres,...))

Quand le vent rencontre un obstacle isolé donc le vent est plus irrégulier et turbulent et donc de moins bonne qualité. Ce phénomène arrive aussi quand on place plusieurs éoliennes sur un même site : les éoliennes se gênent les unes les autres si elles ne sont pas suffisamment écartées entre elles (en général, une distance de 8 fois leur diamètre est à respecter entre plusieurs éoliennes). [11]

I-3 PRINCIPE DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une Partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de Transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I-5) [1].



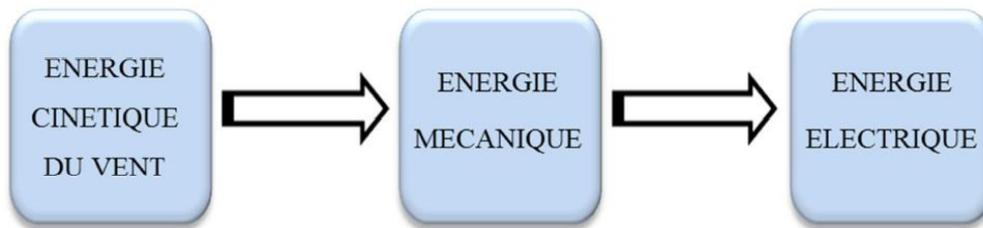


Figure I-5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent. [2]

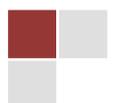
I-4 Avantages Et Inconvénients De L'énergie Éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après :

I-4-1 Les Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100. « L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂ ».
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de



tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de Nox . Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [2].

I-4-2 Les Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée.



- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés

Sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.

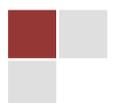
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de Ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [2].

I-5 Types Des Turbines Éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [2].

I-5-1 Éolienne A Axe Vertical

Elles ont été conçues pour s'adapter au mieux avec les contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins sensibles à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments. Leurs faiblesses résident principalement dans la faible maturité du marché (coûts d'investissement élevés). En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible mais s'adapte bien aux besoins des consommateurs d'un logement social. Elles trouvent donc leur place dans le milieu urbain. Les principaux aérogénérateurs à axe vertical sont le rotor de SAVONIUS et le rotor de DARRIEUS [5].



I-5-1-1 Le Rotor De Savonius

Ce type d'aérogénérateur utilise la traînée et est constituée de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence. De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbain Figure I-13 [5].



Figure I-6 : éoliennes à axe vertical de type SAVONIUS. [5]

➤ Les Avantages

- Peu encombrante.
- Peu bruyante.
- Démarre à de faibles vitesses de vent.
- Couple élevé au démarrage.
- Pas de contraintes sur la direction du vent.
- Moine chère.
- Elle ne demande pas une grande altitude ($h < 30\text{m}$).

➤ Les Inconvénients

- Faible rendement.
- Masse non négligeable.
- Couple sinusoïdal non constant.

I-5-1-2 Le Rotor De Darrieus

Inventé par l'académicien français DARRIEUS au cours des années 1920- 1935 repose sur l'effet de traînée d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre Sortes de rotors de DARRIEUS: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.





Figure I-7: éoliennes à axe vertical de type DARRIEUS [5].

➤ **Les Avantages**

- Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles).
- Moins d'espace qu'une éolienne "conventionnelle".
- Intégrable au bâtiment.

➤ **Les Inconvénients**

- Démarrage difficile par rapport à l' éolienne de type Savonius.
- Faible rendement. [6]

I-5-2 Éoliennes A Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripales, 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 d'équilibrage de la machine par rapport au 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. Deux types de configurations peuvent être rencontrés :





Figure I-8 : différent type d'éolienne à axe horizontale.

➤ **Les Avantages**

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

➤ **Les Inconvénients**

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. [12]

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple. Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [12].



I-5-2-1 Éoliennes Sous Le Vent (Aval)

Dans ce type d'éoliennes le vent souffle derrière les pales comme le montre la figure (I-16). L'avantage de ce montage réside dans le fait que les pales de rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône ; par fort vent la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Ces éoliennes ont donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent, cependant, le pylône bien qu'il soit plus petit constitue un obstacle au vent ce qui augmente le risque de rupture de la pale et génère une production fluctuante d'électricité.



Figure I-9 : éolienne sous le vent, tripale flexible [1].

I-5-2-2 Éoliennes Face Au Vent (Amont)

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône (figure (I-17)). A l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône. Il en est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours face au vent [1].

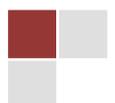
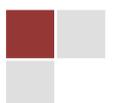




Figure I-10 : éolienne face au vent (amont) [1].

I-6 Composantes D'une Éolienne

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. La figure (I-6) présente les composantes d'une éolienne.



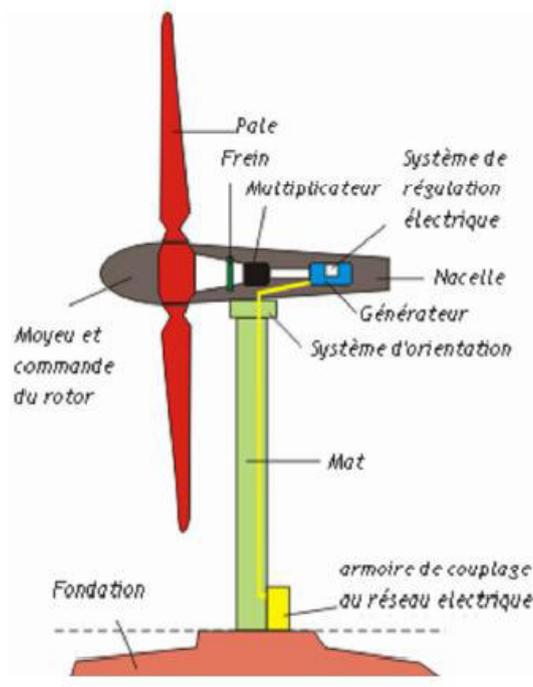


Figure I-11 : Composante d'une éolienne de forte puissance. [4]

I-5-1 Le Mat Ou La Tour

Solidement implanté dans le sol, c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent, et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation (Figure I-7).

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

- **Tour mât haubané** : de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- **Tour en treillis** : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.
- **Tour tubulaire** : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané.



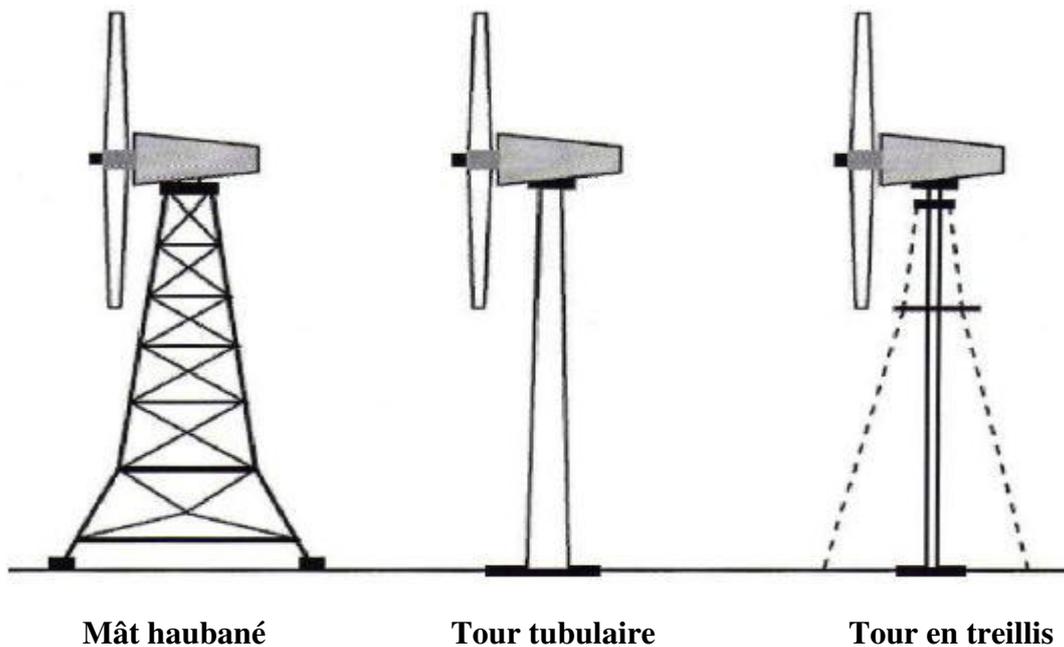


Figure I-12 : Différents types de tours. [3]

I-6-2 Le Rotor Et Les Pales

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante.



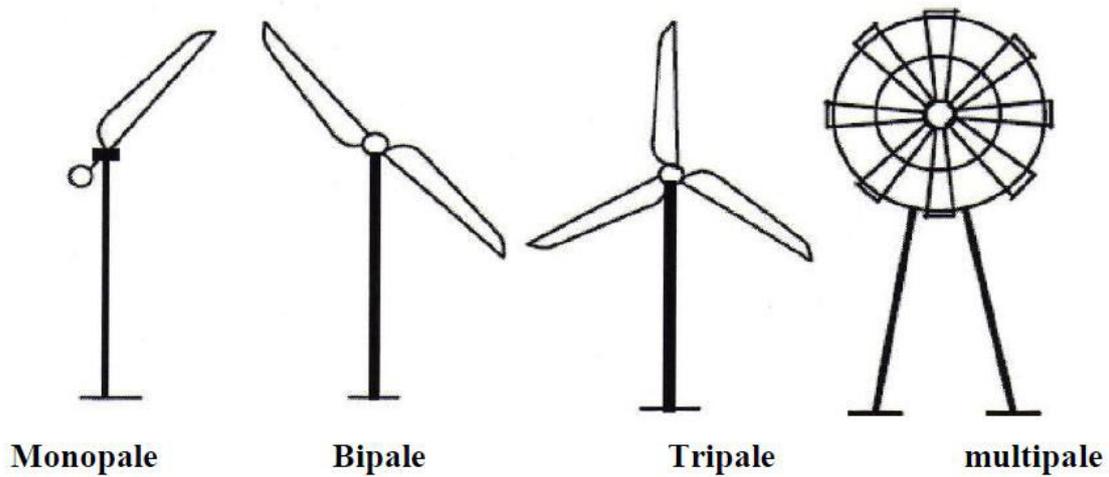


Figure I-13 : classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale. [3]

I-6-3 La Nacelle

Située en haut du mât, elle regroupe les équipements mécaniques permettant de produire l'électricité en couplant la génératrice électrique à l'arbre du rotor, elle est représentée par la figure I-9[1].

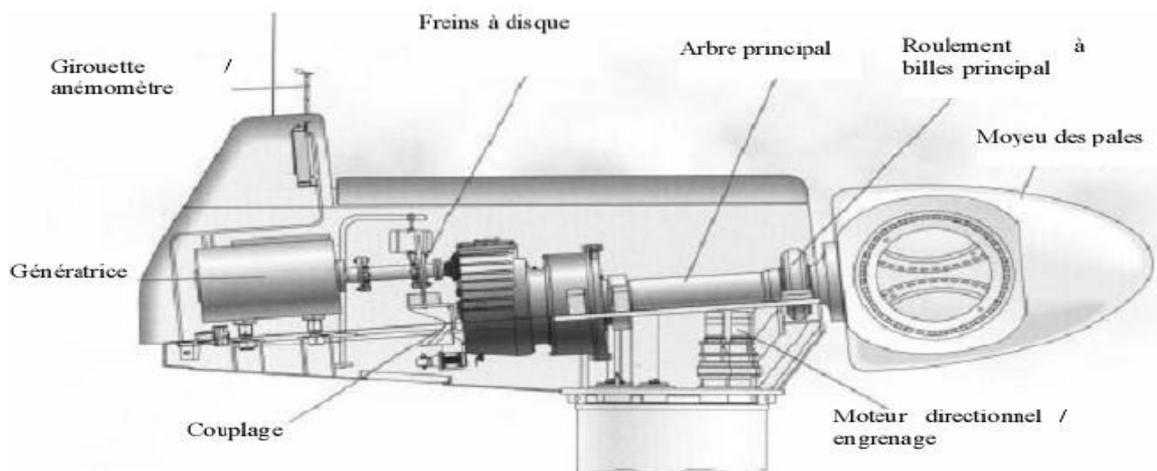


Figure I-14 : Eléments d'une nacelle [4].

Les équipements abrités par la nacelle sont :



I-6-3-1 Le Multiplicateur

Il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne (arbre lent) à celle de la génératrice électrique (arbre rapide).

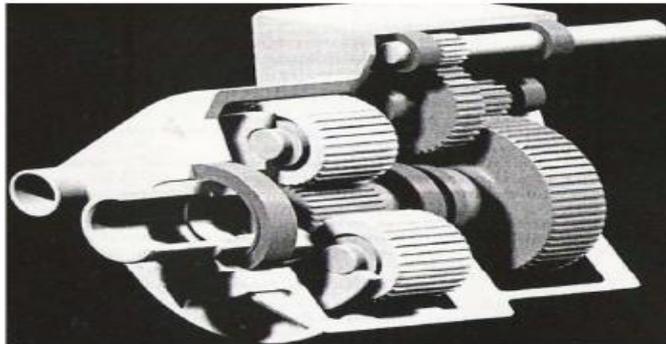


Figure I-15 : Le multiplicateur. [1]

I-6-3-2 Le Système De Refroidissement

Il se compose en général d'un ventilateur électrique pour la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

I-6-3-3 La Génératrice Électrique

C'est l'élément principal qui permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est en général une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné.

I-6-3-4 Le Système De Commande

Permet de contrôler et assurer le bon fonctionnement de l'éolienne. Grâce à ce système de supervision et de contrôle, l'éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité de fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

I-5-3-5 Système D'orientation Des Pales

Il est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la girouette et l'anémomètre. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne. [1]



I-6-3-6 Le Frein

Permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

I-6-3-7 L'anémomètre

Mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.



Figure I-16 : type de L'anémomètre. [1]

I-6-4 Le Moyeu

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I-6-5 La Fondation

La fondation est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne. Le diamètre de la fondation se situe entre 14 et 18 m de diamètre et le diamètre des tours varie entre 7 et 9 m.



Figure I-17 : Les fondations de grandes éoliennes.[1]



I-7 La Taille D'éolienne

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-2 présente une classification des turbines éoliennes :

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

Tableau I-2 : classification des turbines éoliennes [4].

Dans ce qui suit, nous donnons un bref état de l'art des éoliennes de grande et moyenne puissance (éoliennes connectées au réseau) puis nous aborderons avec les éoliennes de petite puissance (éolienne autonome) qui font l'objet de cette thèse.

I-8 Principe De Fonctionnement

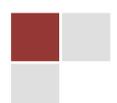
Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- **Au niveau de la turbine (rotor) :** qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- **Au niveau de la génératrice:** qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique ou une charge.

I-9 Les Conditions Qui Doivent Respecter Avant L'installation De L'éolienne

Avant de décider de l'installation d'un parc éolien, plusieurs études sont menées. La première étape consiste à s'assurer que le site d'implantation envisagé convient à un tel projet.

Il doit en particulier :



- ✓ être suffisamment venté. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences, tout au long de l'année. Des études de vent sur le site sont donc indispensables.
- ✓ être facile à relier au réseau électrique haut ou moyen tension.
- ✓ être facile d'accès.
- ✓ ne pas être soumis à certaines contraintes (aéronautiques, radars, etc....).
- ✓ ne pas prendre place dans des secteurs architecturaux ou paysagers sensibles (site inscrits et classés, paysages remarquables...).
- ✓ être d'une taille suffisante pour accueillir le projet.

Cependant, il n'est pas interdit d'installer une éolienne hors de ces zones. Mais ces éoliennes ne seront pas forcément reliées au réseau électrique. Elles serviront par exemple à fournir de l'électricité à une exploitation agricole. [13]

I-10 Les Éoliennes Connectées Au Réseau Électrique

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [14].

I-10 -1 Les Éoliennes A Vitesse Fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est réglée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%.

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande



quantité et dans une très grande échelle de puissances. Par ailleurs, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes comme représenté sur la figure (I-18) [14].

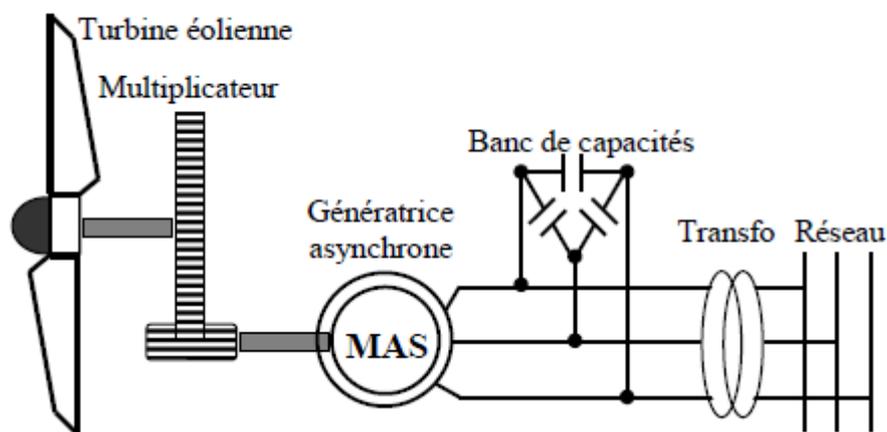


Figure I-18 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des MAS à cage d'écureuil peuvent se résumer alors dans les points suivants :

- ✓ Système électrique simple;
- ✓ Grande fiabilité;
- ✓ Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.



I-10 -2 Les Éoliennes A Vitesse Variable

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [15]. Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- ✓ Augmentation du rendement énergétique;
- ✓ Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance;
- ✓ Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques;
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient. Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement

des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques [15].

Les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.

- ✓ Machine asynchrone à cage
- ✓ Machine asynchrone à double alimentation
- ✓ Machine synchrone



I-10 -2-1 La Machine Synchrone

Les machines asynchrones sont bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple limité, insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. La présence d'un multiplicateur de vitesse est donc indispensable. En revanche, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles). Dans ce cas, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau.

L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement. Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone à rotor bobiné sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé au travers de l'onduleur souvent à MLI. Toutefois, elles requièrent un système de bagues et de balais qui nécessite un entretien régulier. Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles.

Le développement des aimants permanents en terres rares permet de s'affranchir de ces inconvénients et de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables. Comme dans le cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constituée d'un redresseur et un onduleur. De plus, le redresseur peut être non commandé (à diodes) ou commandé. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure (I-19)) [6][8].

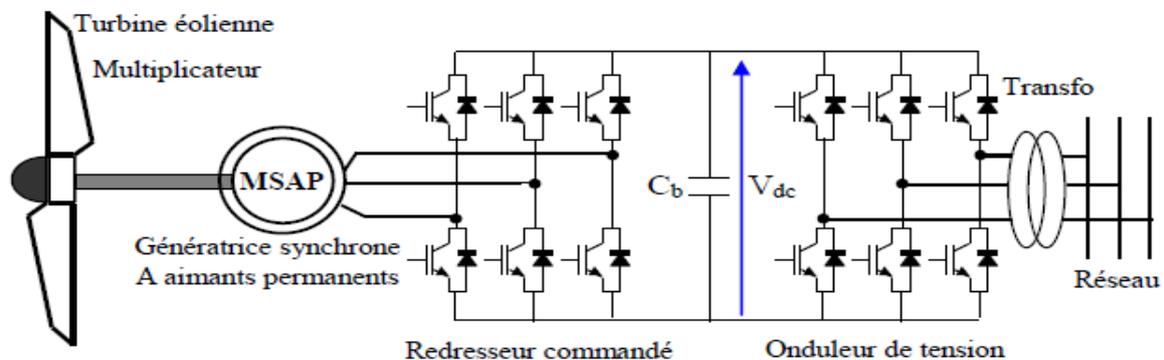


Figure I-19: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.

I-11 Les Éoliennes En Fonctionnement Isolé Et Autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large.

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de part leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation [8].

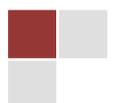
I-12 Machine Synchrone

I-12-1 Machine Synchrone À Rotor Bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante.

I-12-2 Machines Synchrones A Aimants Permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents



alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existents [16] [8]. Nous allons en donner une présentation succincte ci-dessous.

A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I-19). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée.

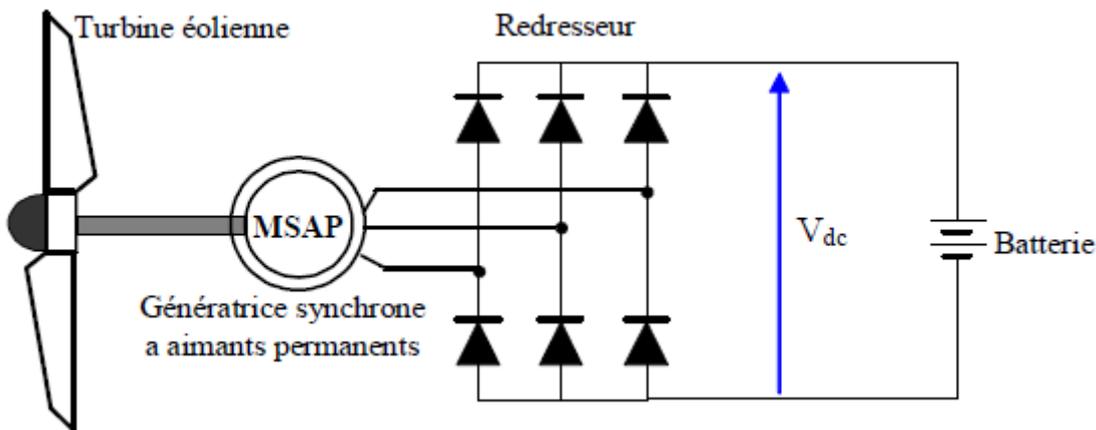


Figure I-20 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.

B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure (I-21)).



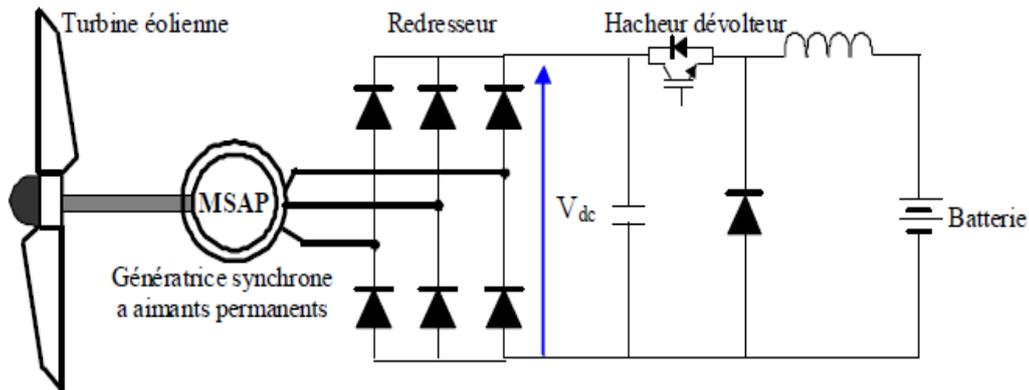


Figure I-21 : Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

C. Structure Avec Redresseur A Diodes Et Hacheur En Pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [16][8].

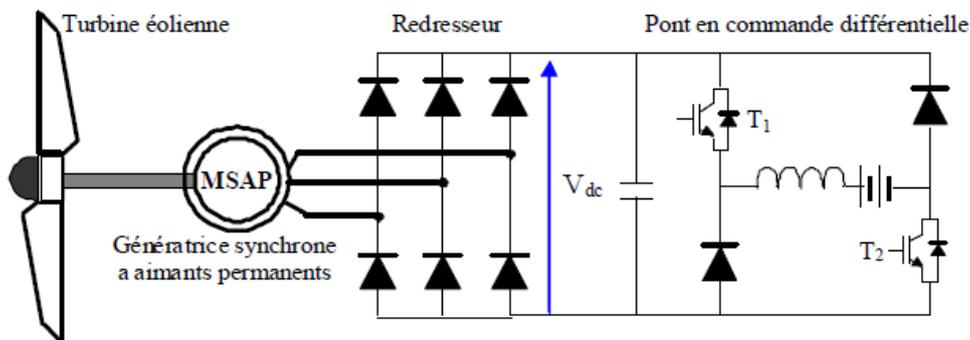


Figure I-22 : Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

D. Structure Avec Redresseur A MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (I-23), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse où en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.



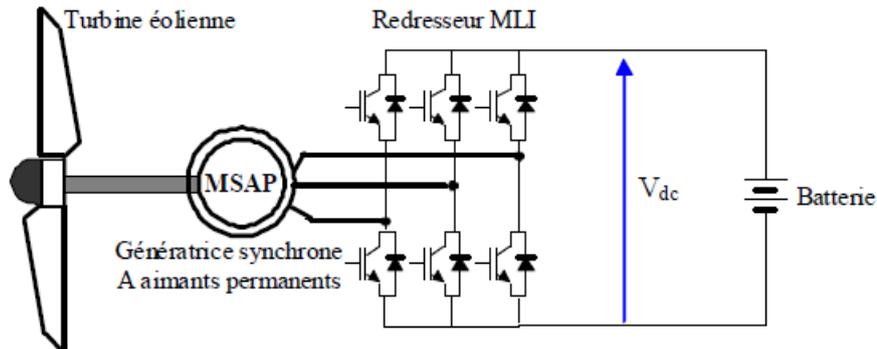


Figure I-23: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.

I-12-3 Construction De La Génératrice Synchrone A Aimant Permanent

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur :

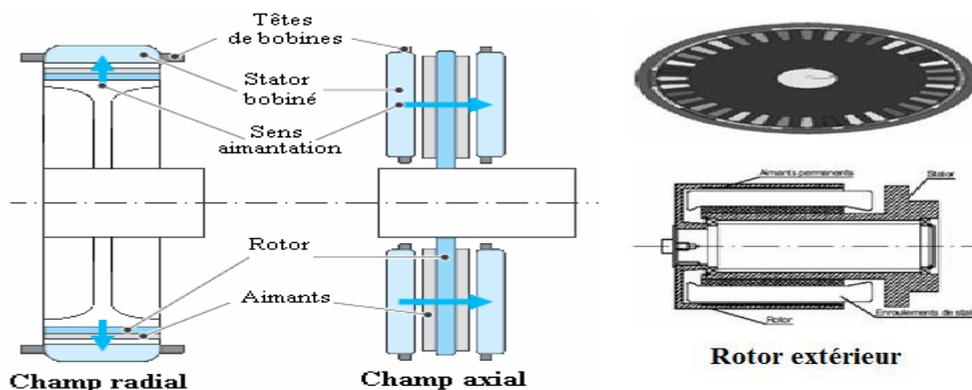


Figure I-24: les types de génératrice synchrone à aimant permanent. [17]

I-12-3-1 Les Types De Machines Synchrones A Aimants Permanents A Flux Axial

Parmi les machines synchrones à aimants permanents à flux axial, on trouve :



➤ MSAP Discoïde Avec Deux Stators Et Un Rotor

La structure de cette machine est illustrée sur la figure (I-23). Elle est composée d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques. Le disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statorique. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle.

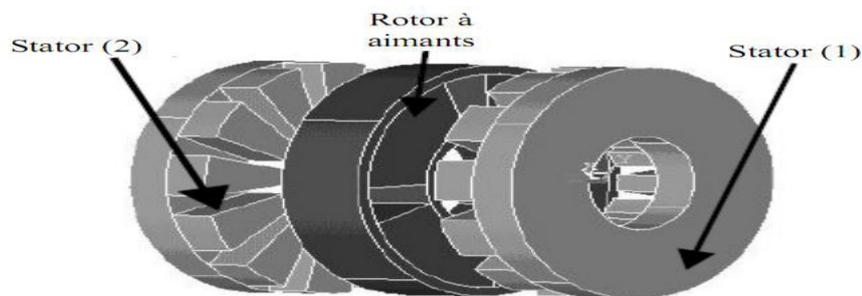


Figure I-25 : MSAP discoïde avec deux stators et un rotor [2].

➤ MSAP Discoïde Avec Deux Rotors Et Un Stator :

Cette configuration consiste à un disque statorique entouré par deux disques rotoriques comme la montre la Figure (I-26):

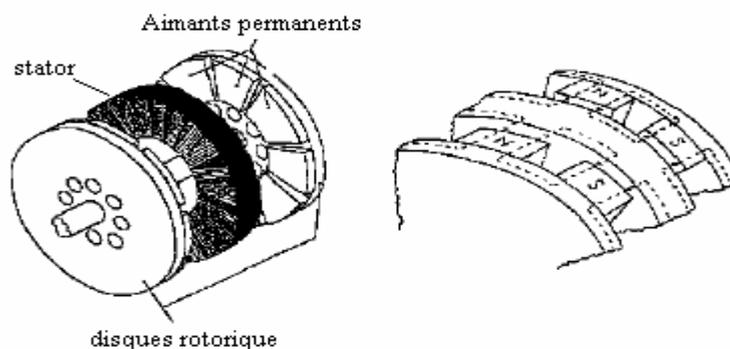


Figure I-26 : MSAP discoïde avec stator et deux rotors.



➤ **MSAP Discoïde Unilatérale Avec Contrepoids Du Côté Rotor :**

Dans cette configuration simple, on ne trouve qu'un seul stator et un seul rotor. Cependant, une grande force d'attraction est appliquée entre le stator et le rotor. Pour créer une force de contre réaction et éviter ainsi le déplacement axial du rotor, il est nécessaire de placer un contrepoids de l'autre coté du rotor (Figure I-27).

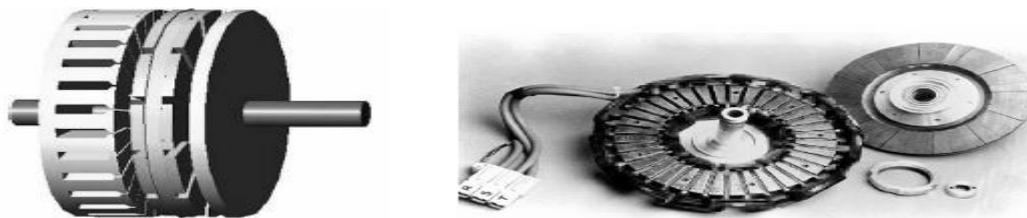
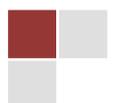


Figure I-27 : MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor.

➤ **Machine Synchrone A Aimants Permanents A Rotor Extérieur :**

Comme illustré sur la figure (I-24), le bobinage statorique est fixé dans le centre de la machine, tandis que les aimants du rotor sont placés régulièrement le long de la circonférence interne du tambour rotatif, et sont ainsi exposés directement au vent, ce qui améliore leur refroidissement. Les pales de la turbine éolienne sont bien boulonnées sur le tambour, ce qui réalise un accouplement direct entre la turbine et la génératrice. La périphérie étendue du rotor, offre la possibilité de prévoir des structures multi pôles.

Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques et d'augmenter la durée de vie du système. La génératrice est conçue pour un fonctionnement vertical; elle est équipée d'un jeu de roulements internes adaptés. [17]



I-12-3-2 Les Aimants Permanents :

Les performances de plus en plus élevées et les avantages que présentent les aimants permanents font que ces derniers sont des éléments de base dans l'industrie moderne. Leurs utilisations dans les machines électriques sont de plus en plus fréquentes. Cependant, les

Performances des machines utilisant des aimants permanents dépendent des propriétés magnétiques de ceux-ci. Les critères de l'aimant sont à la fois techniques et économique. [17]

I-12-3-2-1 Les Différentes Familles Des Aimants

Il existe trois types d'aimants permanents utilisés dans l'excitation des machines ; actuellement ceux qu'on trouve sur le marché sont les Alnicos, les ferrites et les terres rares. La figure (I.28) illustre ces trois types.

Les aimants ont beaucoup évolué ces cinquantes dernières années ; de nouveaux matériaux sont apparus, comme par exemple les terres rares (NdFeB, Sm-Co). Ces nouveaux matériaux ont de très bonnes caractéristiques magnétiques, mais restent relativement coûteux. C'est pourquoi, de nombreuses applications industrielles sont encore réalisées avec des ferrites. [17]

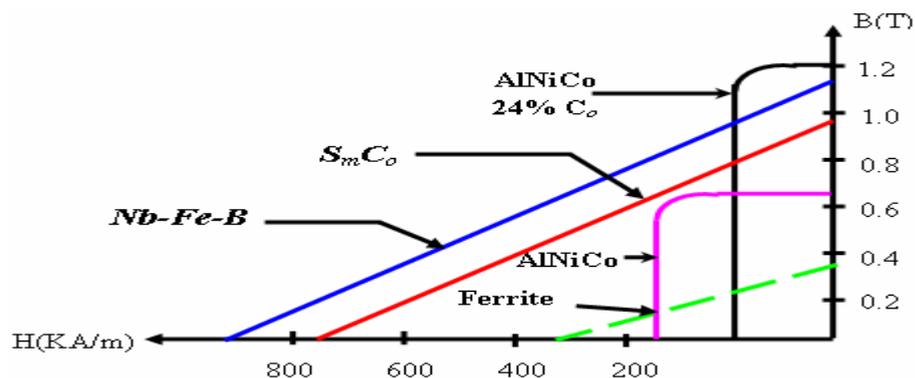


Figure I-28 : Courbe B (H) des différents types des aimants permanents.



- ✚ **Alinco** : ont un champ rémanent très élevé, mais un champ coercitif très faible, ce qui pose de gros problèmes de démagnétisation. Ces aimants ne peuvent être sortis de leur circuit magnétique, sous peine de les désaimanter.

- ✚ **Ferrite** sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux. Ils résistent bien à la température.

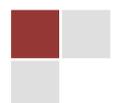
- ✚ **Terre-Rares** (Nd-Fe-B, Sm-Co) : sont très puissants et paraissent très bien appropriés pour les machines électriques. Leur coût encore élevé freine l'extension de ces nouveaux aimants. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les plasto-neodymes. C'est un mélange de néodyme fer bore avec un liant plastique. Cette matière permet de réaliser des pièces moulées, ce qui facilite l'assemblage et diminue le nombre de pièces mécaniques. [17]



I-13 Les Avantages Et Les Inconvénients De Types D'éolienne

Type d'éolienne	Les avantages	Les inconvénients
MAS Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> *Machine robuste *Faible cout *Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> *Puissance extraite non optimisée *Maintenance boite de vitesse *Pas de contrôle de Q *Magnétisation de la machine imposée par le réseau
MADA Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> *Puissance extraite optimisée *Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur réseau *Fonctionnement à vitesse variable *Electronique de puissance dimensionnée à 30%de la puissance nominal 	<ul style="list-style-type: none"> *Maintenance boite de vitesse *Prix de l'électronique de puissance *Contrôle –commande complexe *Contact glissant bague-balais
MSAP Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> *Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse *Puissance extraite optimisée pour les vents faibles *Connexion de la machine facile à gérer *Possibilité d'absence de boite de vitesse *en peut fonctionne dans un site isolé et autonome 	<ul style="list-style-type: none"> *Prix de l'électronique de puissance *Machine spécifique *Grand diamètre de machine *Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

Tableau I-3: les Avantages et inconvénients des différentes éoliennes. [18]



I-14 Économique

I-14-1 Le Cout D'éolienne

➤ En Mer

Off-shore n'équivaut qu'à 50% du coût total alors que les coûts engagés pour installer les éoliennes et les raccorder au réseau terrestre couvre jusqu'à 40% du coût total.

Cette différence entre éolienne terrestre et offshore s'explique par les difficultés techniques supplémentaires rencontrées lors d'une installation en mer.

Le prix d'une éolienne offshore varie de 2 à 4 millions d'euros par MW installé.

Les caractéristiques du site d'installation, comme la puissance des vagues et du vent, la profondeur de la mer, la distance avec les côtes, concourent aux difficultés techniques et définissent le prix de l'éolienne.

➤ En Domestique

On appelle le « petit éolien » correspond à l'installation d'une éolienne chez soi. La puissance de ces éoliennes ne dépasse le 36kW. Le prix de ces éoliennes varie de 10.000€ à 90.000€.

➤ En Terrestre

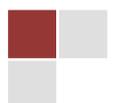
Le coût de fabrication et d'installation d'une éolienne terrestre est estimé à 1.000 € par kilowatt installé, soit 1 million d'euros le mégawatt.

Dans la construction d'un parc éolien, l'achat des éoliennes représente 80% de l'investissement. Les coûts supplémentaires sont les coûts de recherche et de raccordement au réseau.

Les prix de fabrication des éoliennes est en baisse depuis quelques années. D'après le ministère du Développement durable, « les perspectives de progrès permettent d'envisager pour l'éolien une baisse de coût de 15 à 20% » à l'horizon 2020.

Nous savons que ce genre de machine se compose de plusieurs éléments de l'autorisation, nous pouvons déterminer la valeur de chaque composante du prix total en pourcentage:

- | | |
|---------------------------|--|
| ✓ Les pales 12%. | ✓ Assemblage 2%. |
| ✓ Moyeu 2%. | ✓ Divers ou système de refroidissement 5%. |
| ✓ Multiplicateur 15%. | ✓ Mat 21%. |
| ✓ Générateur 13%. | ✓ Électricité 8% |
| ✓ Roulement 3%. | ✓ Nacelle 9%. |
| ✓ Groupe hydraulique 10%. | |



I-14-2 Estimation De L'évolution Possible Des Coûts

Nous voulons préciser les coûts de changement grâce à des développements est présentée par la Figure :

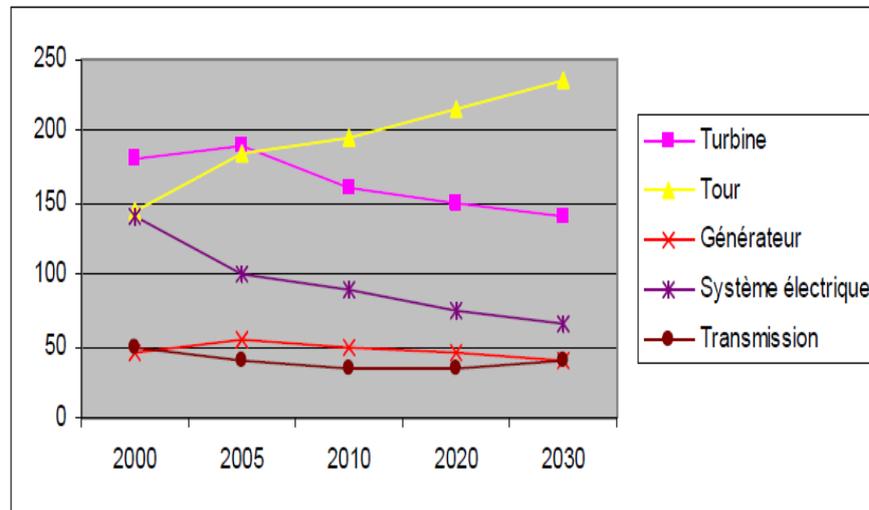


Figure I-29: Estimation d'une évolution possible des coûts (€/kW).

Les principales remarques sur les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Évolution vers les systèmes à entraînement direct et émergence des machines à aimants dont le coût décroît avec l'accroissement de la production.
- Diminution régulière des coûts de l'électronique de puissance avec l'évolution des technologies.
- Accroissement des fonctionnalités des commandes.
- Réduction de la masse des turbines.
- Accroissement des hauteurs des tours et évolution technologique. [7]

I-14-3 Développement D'installation De L'éolienne Dans Le Monde

En 2015, l'énergie éolienne a ouvert 3% de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 432000 MW.



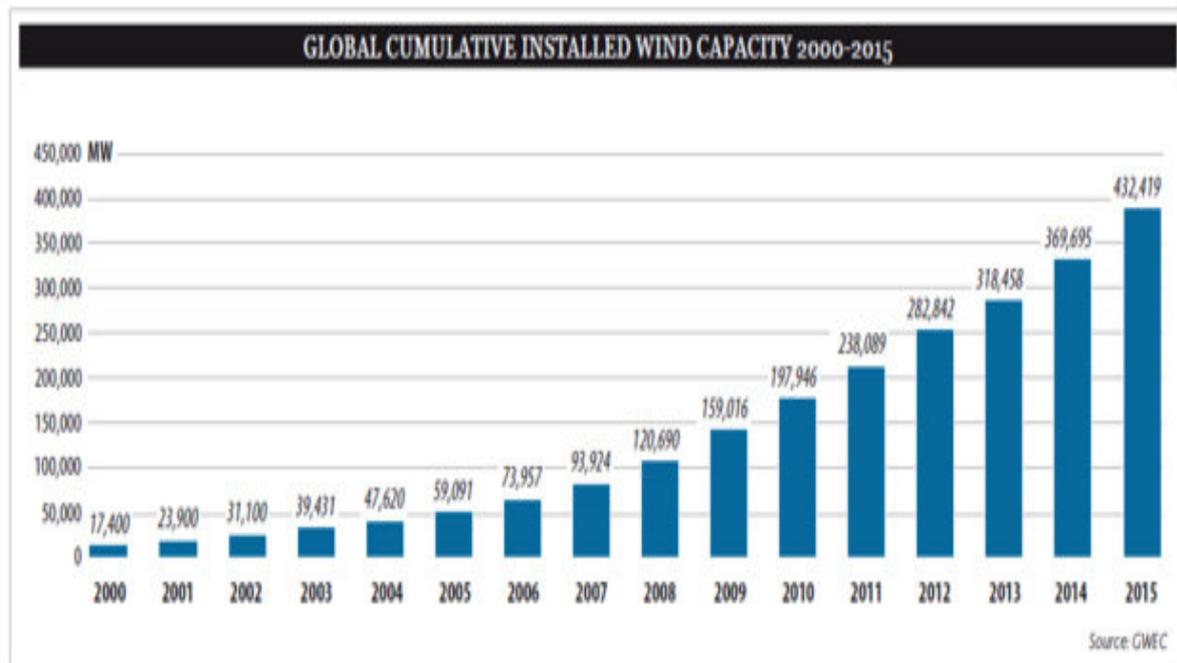


Figure I-28 : Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde (en MW).

Début 2000 la puissance mondiale de l'éolien était de pris de 17400 MW soit, en terme d'énergie produite, l'équivalent d'environ 6 tranches de centre nucléaire.

L'utilisation de l'énergie éolienne à des fins de production d'électricité est née en Californie au début des années 80, consécutivement à la mise en place d'incitations fiscales.

I-15 CONCLUSION

Après ces concepts dite que ce type d'énergie a un grand rôle, mais il quelques-unes des conditions qui doivent être disponibles pour chaque type d'énergie éolienne et avec ce qu'on a dit que toute la qualité du générateur a à voir avec le domaine de l'utilisation, nous constatons que la génératrice synchrone peut être utilisé dans tous les domaines, mais il peut dispenser de le multiplicateur de vitesse.

Lié au réseau, dans ce cas, nous devons fournir l'énergie nécessaire et par le vent seul ne peut pas fournir ce parce que le vent aléatoire. Donc il faut ajouter un adaptateur de prouver et d'améliorer l'énergie quelle que soit la vitesse du vent. Endroit isolé, la façon d'améliorer l'énergie en quantité suffisante pour être utilisé uniquement.

II-1 Introduction

L'énergie cinétique est l'une des solutions pour faire ressortir la puissance électrique en sachant que cette idée était connue dans le passé, et est extrait par un générateur d'énergie électrique et l'ajout de ce système est approprié et sans danger pour l'environnement et économiquement bien.

Dans ce chapitre, nous voulons donner des points les plus importants concernant la modélisation du système de l'énergie éolienne et le potentiel énergétique et la conversion de l'énergie cinétique en mécanique avec la puissance récupérable, la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, et le rendement de l'éolienne.

II-2 Les Variations Dues A L'altitude [20]

Les cartes de vent donnent le vent à des hauteurs à partir de 10 mètres. La variation de la vitesse du vent avec l'altitude dépend essentiellement de la nature du terrain. Ces variations peuvent être représentées par une loi simple de forme:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (\text{II-1})$$

Avec :

v : vitesse du vent à la hauteur h à laquelle sera implantée l'éolienne.

h_0 : Hauteur pour laquelle la vitesse du vent est connue.

v_0 : vitesse à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol.

α : coefficient caractéristique du lieu.

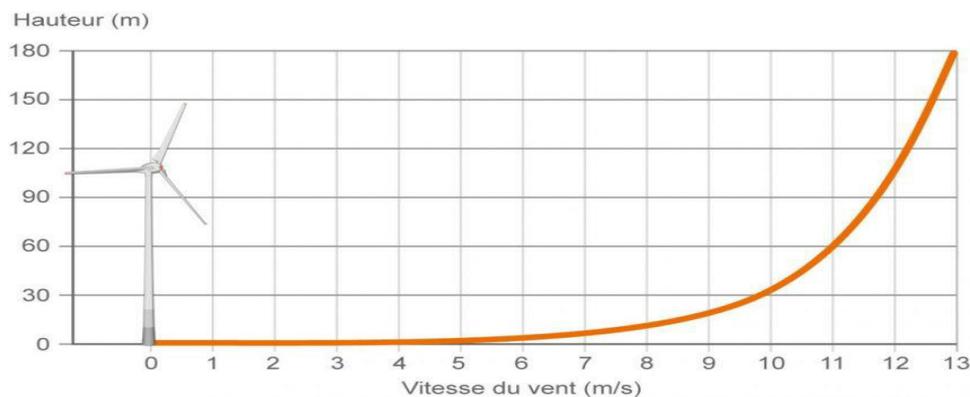


Figure (II-1) : la hauteur en fonction de la vitesse de vent

La valeur de l'exposant α est donnée suivant la nature du terrain dans le tableau (II-1) :

Lieu	Valeurs de α
En mer	0,13
Sur un rivage	0,16
En plaine	0,2
En plaine boisée	0,24
En ville	0,3

Tableau (II-1) : l'effet de l'angle (α) sur la nature de terrain.

II-3 Potentiel Énergétique

II-3-1 Le Potentiel De Force D'aire

La force d'aire est définie par :

$$f(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II-2})$$

II-3-2 Distribution De Wei Bull

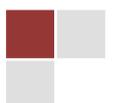
La vitesse du vent naturel varie en permanence. Pour prévoir la production d'énergie d'une éolienne, il faut connaître la force et la fréquence exactes du vent. On mesure en outre la vitesse moyenne du vent toutes les 10 minutes au moyen d'un anémomètre. Les valeurs obtenues peuvent être réparties en différentes classes variant de 1 m/s. On peut alors exprimer le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse. [17]

La distribution de Wei bull permet souvent une bonne approximation de la distribution de la vitesse du vent:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (\text{II-3})$$

A : coefficient constant appelé facteur d'échelle (ce facteur est égal en première approximation à la vitesse moyenne du vent sur le site considéré).

K : coefficient constant appelé facteur de forme.



V : vitesse du vent.

- **Le cas de K=2**

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

Sa densité de probabilité est donnée par :

$$F(v) = 2 \frac{v}{A^2} \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^2\right) \quad (\text{II-4})$$

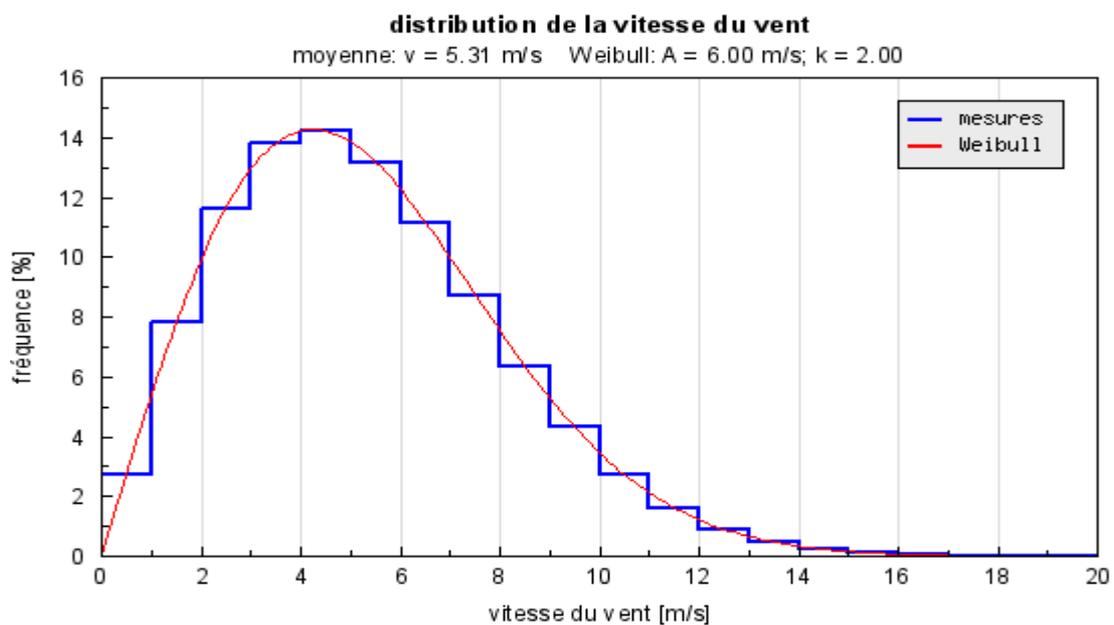


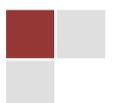
Figure (II-2) : distribution de vitesse du vent.

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites. [17]

II-4 Conversion De L'énergie Cinétique En Mécanique

II-4-1 Énergie Cinétique

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si



on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II-5})$$

Tel que :

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

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

E_c : L'énergie cinétique (en joule).

II-4-2 La masse de l'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

$$\text{Masse d'air :} \quad m = \rho v \quad (\text{II-6})$$

Tel que:

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

v : volume d'air occupé(en m^3)

ρ : masse volumique (en kg/m^3)

II-4-2-1 Variation de la masse volumique de l'air

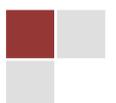
La masse volumique (ρ) varie avec différents paramètres :

✓ L'altitude (pression de l'air)

Plus l'altitude est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une même éolienne produira plus en bord de mer qu'en haute montagne avec la même vitesse de vent.

✓ La température

Plus la température est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible, une éolienne produira plus lorsque la température ambiante sera faible.



✓ L'humidité relative de l'air

Plus l'air sera humide et plus la masse volumique sera élevée mais l'influence de l'humidité relative de l'air sur la masse volumique reste relativement faible. [21]

II-4-3 Énergie théoriquement récupérable

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II-7})$$

Où

ρ : représente la masse volumique de l'air (air atmosphérique, environ : 1.23 kg/m^3 à 25°C et à pression atmosphérique 1,0132 bar),

V : la vitesse du vent (m/s),

II-4-4 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur

La puissance moyenne produite par un aérogénérateur peut être évaluée en combinant sa courbe de puissance avec la distribution de la vitesse du vent sélectionnée. Elle est donnée par :

$$\bar{P} = \int_0^{inf} P(v)F(v)dv \quad (\text{II-8})$$

$P(v)$: Fonction de puissance de l'aérogénérateur.

$F(v)$: Fonction de distribution de la vitesse du vent.

II-4-5 La puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur s'exprime par l'équation :

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda) \quad (\text{II-9})$$

ρ : représente la masse volumique de l'air (en kg/m^3).

S : la surface balayée par l'hélice (en m^2).

v_1 : La vitesse de vent (en m/s).

$P_{aéro}$: La puissance aérodynamique (en watt).

C_p : Le coefficient de puissance en fonctionne (λ).

Ω : La vitesse angulaire de rotation



Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être dans sa totalité, la puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est à limite de Betz :

$$P_{aéro\ max} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p (\lambda) \max \quad (II-10)$$

En peut écrire aussi :

$$P_{aéro\ max} = \frac{1}{2} \rho S \left(\frac{R\Omega}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_p (\lambda) \max$$

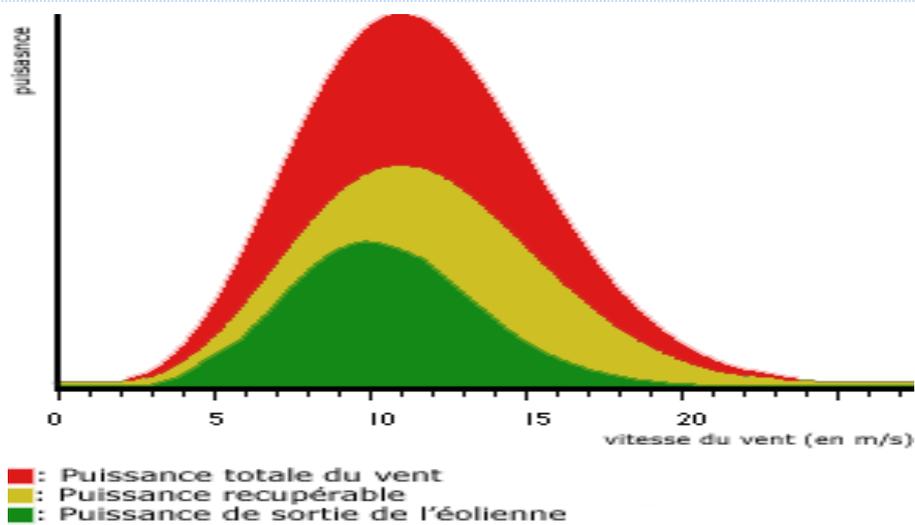
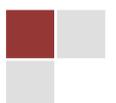


Figure (II-3) : l'exploitation de puissance en fonction de la vitesse de vent.

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_{p\ max} = \frac{P_{aéro\ max}}{P_v} = 0.59 \quad (II-11)$$



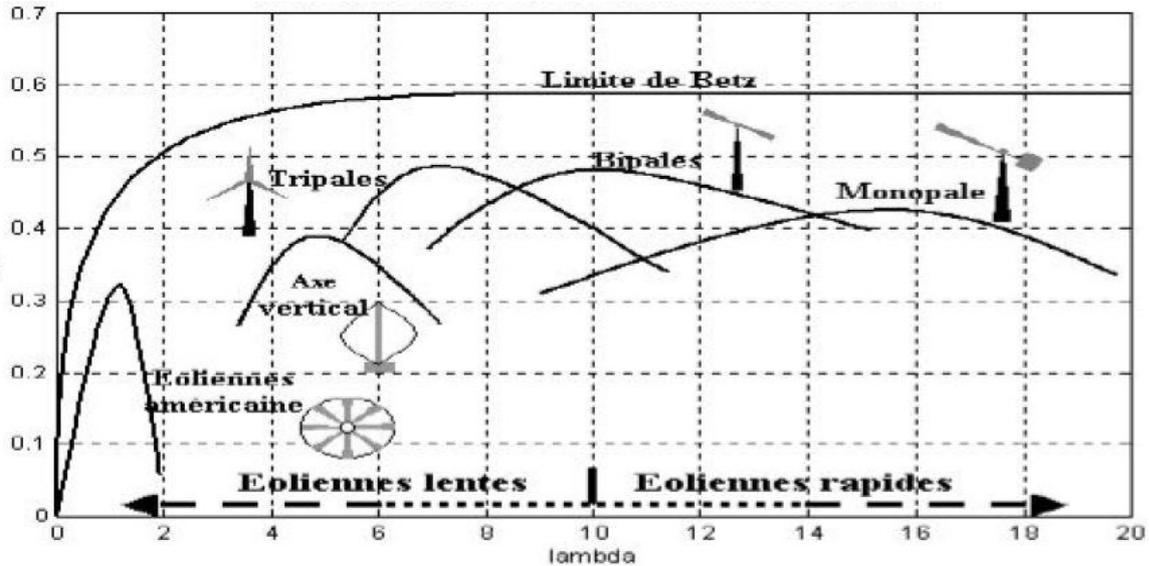


Figure (II-4) : coefficient puissance pour différents types d'éoliennes [4].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur, de plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s. [17]

La vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{R \Omega}{v} \quad (\text{II-12})$$

L'expression du couple aérodynamique est alors :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro \max}}{\Omega t} = \frac{1}{2 \Omega t} \rho S v^3 C_p(\lambda). \quad (\text{II-13})$$



II-4-6 Modélisation De La Turbine Sans Multiplicateur

La turbine considérée est à axe horizontal, elle ne comporte pas de multiplicateur de vitesse (figure II-5) :

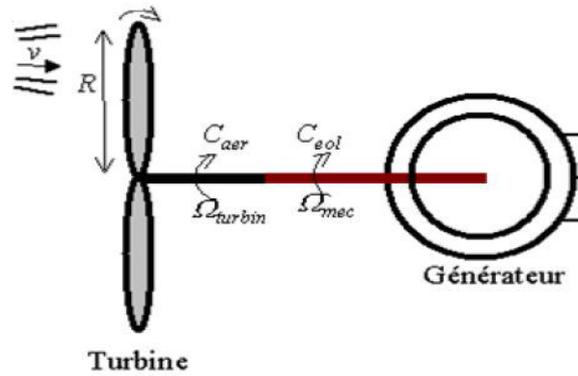


Figure (II-5) : schéma simplifié de la turbine éolienne [22].

II-4-7 Modélisation De La Turbine Avec Multiplicateur

Si l'on tient compte du multiplicateur qui possède un gain G, l'expression de la puissance mécanique, disponible au niveau de l'arbre rapide (après le multiplicateur) :

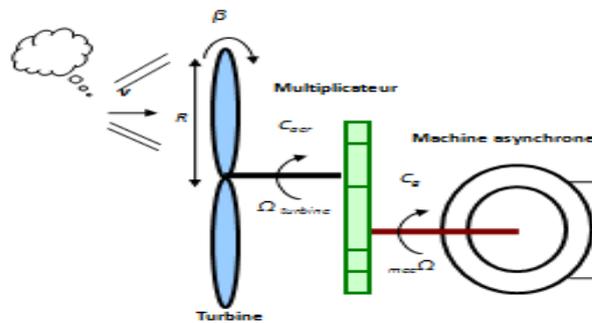
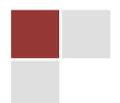


Figure (II-6) : schéma simplifié de la turbine éolienne avec multiplicateur.

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{turbine} \tag{II-14}$$

Et donc l'expression du couple mécanique est :

$$\Omega_{mec} = \frac{C_{aéro}}{G} = \frac{1}{2\Omega_{mec}} \rho S v^3 C_p(\lambda) \tag{II-15}$$



II-4-8 Équation Dynamique De L'arbre

La masse de la turbine est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie notée $J = J_{\text{turbine}}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la g génératrice et de l'inertie de cette dernière.

$$J = J_{\text{turbine}} + J_{\text{génératrice}} \quad (\text{II-16})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

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

$$J \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} \quad (\text{II-17})$$

$$C_{\text{mec}} = -C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{II-18})$$

J : L'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

C_{mec} : Le couple mécanique,

C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice,

C_{vis} : Le couple des frottements visqueux.

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux

f_m Tel que $C_{\text{vis}} = f_m \Omega_{\text{mec}}$. [22]

II-4-9 Équation mécanique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

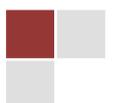
L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{éol}} - C_{\text{em}} - (f_m + f_t) \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II-19})$$

Avec

J_m : Inertie de la machine.

f_m : Coefficient de frottement de la machine.



J_t : Inertie de la turbine.

f_t : Frottement des pâles.

C_{eol} : Le couple statique fournie par l'éolienne.

Nous disposons uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voileure. C'est pour cela que dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voileure n'est pas pris en compte).

[9]

II-5 Zones de fonctionnement

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

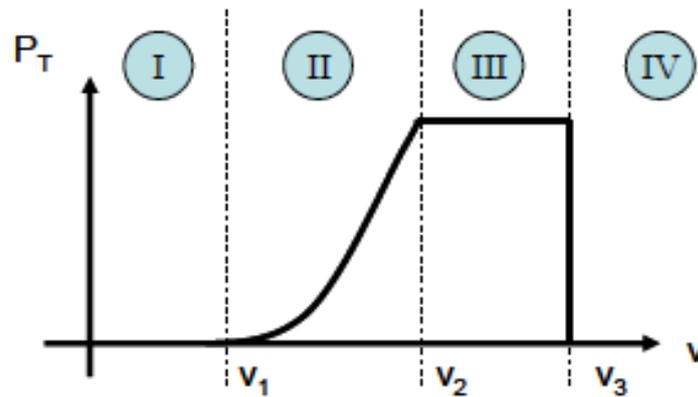


Figure (II-6) : Zones de fonctionnement d'une éolienne

v_1 : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, v_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

v_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, v_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

v_3 : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, v_3 vaut 25m/s.

Zone I : $v < v_1$:

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.



Zone II : $v_1 < v < v_2$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $v_2 < v < v_3$:

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de (P) n. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : $v > v_3$:

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle. [17]

II-6 Conversion Énergie Mécanique En Énergie Électrique

Ce processus se fait par le générateur comme nous savons que présente les caractéristiques et les équations par lesquelles il peut faciliter cette étude.

II-6-1 Hypothèses simplificatrices

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. [9]

Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle. Cela permet une étude et une exploitation plus aisées.

Dans ce but, on adopte les suppositions suivantes :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- Les fmm sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine.
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable.
- On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.



II-6-2 Le modèle théorique de La loi de Faraday

La loi de Faraday énonce que le force électromotrice induite dans un circuit fermé baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit.

Le fem induite dans le circuit est la dérivée négative par rapport au temps du flux du champ magnétique à travers les circuits :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II-20})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-21})$$

Tel que

\vec{E} : Champ électrique

\vec{B} : Induction magnétique

e : induite

Φ : flux induit

II-7 Rendement De L'éolienne

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant convertit d'une forme à une autre cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- Hélice : $0.2 < \eta < 0.85$.
- Le multiplicateur ou le réducteur : $0.7 < \eta < 0.98$.
- L'alternateur : $0.80 < \eta < 0.98$.
- Le transformateur : $0.85 < \eta < 0.98$.

Les rendements de chaque élément variant avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de rotor (l'hélice), ce qui en de hors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépassé 70% de limite de Betz, l'expression de rendement global comme suit :

$$\eta_G = \eta_h * \eta_t * \eta_m * \eta_{al} \quad (\text{II-22})$$

Pour éolienne à axe horizontal le rendement varie entre 45% et 65%.

Pour éolienne à axe vertical le rendement varie entre 20% et 65%.



Ce schéma exprime des pertes :

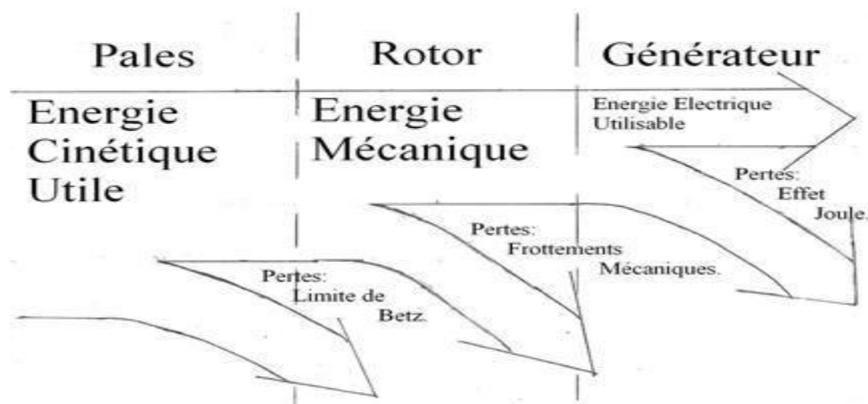
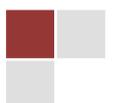


Figure (II-8) : bilan de puissance d'une éolienne

II-8 Conclusion :

On conclut que La quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour. La quantité totale d'énergie éolienne convertible sur un territoire, c'est à la quantité d'énergie qui peut être réellement produite par la mise en œuvre à l'échelle d'une région, des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, dépend de façon significative des caractéristiques, Pour déterminer le rendement de l'énergie éolienne doit savoir le rendement de chaque élément.



III-1 Introduction

Dans ce travail, nous voulons créer de l'énergie électrique par la réalisation d'un prototype de générateur de type générateur synchrone. Nous savons qu'il existe plusieurs types de générateurs mais ce choix a été pris par plusieurs motivations qui vont être détaillées par la suite :

1. La possibilité d'acquisition d'un nombre suffisant d'aimants permanents (12 éléments) de haute qualité de l'université de Sheffield en Angleterre.
2. La possibilité de réalisation de bobines à l'université de Biskra.
3. La possibilité de réalisation de l'éolienne à axe horizontal

A travers cette incitation, nous avons concentré nos efforts sur la réalisation de cette génératrice synchrone à aimants permanents. Cela va nous permettre de créer de l'énergie électrique par moindre coût. Cette génératrice est réalisée pour être intégrée dans une petite éolienne à axe horizontal.

III-2 La Génératrice Synchrone A Aimant Permanent A Flux Axial (12 Aimants)

III-2-1 Conception du rotor

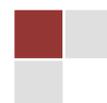
III-2-1-1 Le Choix De L'arbre

Nous avons choisi la forme de l'arbre fileté avec une longueur de 104 cm et de diamètre de 1.4 cm. Le but est de faciliter le réglage de l'entrefer du disque du rotor.



Figure (III-1) : l'arbre utilisé pour l'éolienne.

Nous savons que l'arbre doit être installé avec la génératrice et les pales. Le processus de fixation pour l'installation se fait par des écrous. Cela permet de faciliter le processus de changement en cas d'endommagement de la turbine ou dans le cas d'une déformation de l'arbre (démontable).



III-2-1-2 Le diamètre du disque du rotor

Pour la détermination du diamètre du disque du rotor, un choix approprié a été pris. Ce choix était égal à 230 mm pour minimiser l'inertie et cela permet aussi le refroidissement naturel des composants.

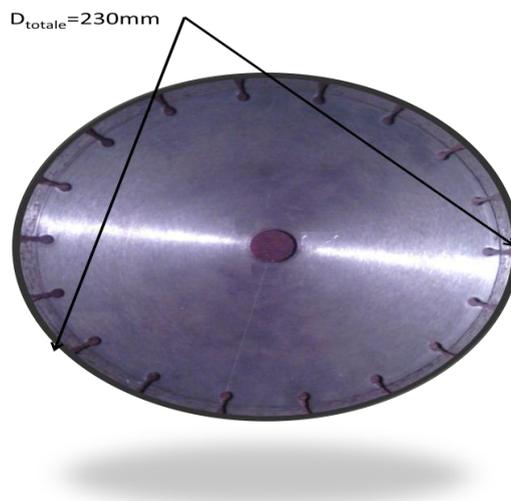


Figure (III-2) : diamètre du disque du rotor 230 mm

III-2-1-3 Etude géométrique du rotor

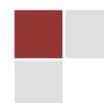
Avant de procéder au design du rotor, il faut connaître les dimensions et le nombre des aimants sachant que l'induction rémanente de cet aimant est de $B = 0.3 \text{ T}$.

III-2-1-3-1-a Les dimensions de l'aimant

Les dimensions	(mm)
Longueur	25
Largueur	10
épaisseur	5

Tableau (III-1) : Dimensions des aimants.

A partir de ces dimensions, nous allons procéder au prototypage du rotor. Pour cela nous devons respecter une distribution correcte des aimants afin d'obtenir le maximum du champ magnétique. Après de nombreuses tentatives et manipulations des grandeurs sur



croquis, nous avons trouvé que le rayon extérieur optimal de la distribution des aimants est de 105 mm inférieur au rayon du disque qui est de 115 mm

Après sélection de ce rayon extérieur (105 mm), nous sommes en mesure de déterminer la valeur du rayon interne réduit de 25 mm de la longueur de l'aimant. Cela nous donne un rayon intérieur de 80 mm

III-2-1-3-1-b Définition de l'étiquette de chaque cercle des aimants

Sachant que le nombre des aimants permanents est de 12 éléments. Une bonne distribution des aimants permanents qui ne devront pas être éloignés les uns des autres permet avec la vitesse de rotation d'obtenir des tensions considérables tout en respectant une distance égale entre les pôles magnétiques. Nous avons choisi un choix ordonné de placement des aimants dans une représentation alternée N-S-N-S ...

- Rayon du cercle extérieur est de 105 mm, ce que fait un diamètre extérieur égale à $D_{ext}=210$ mm.

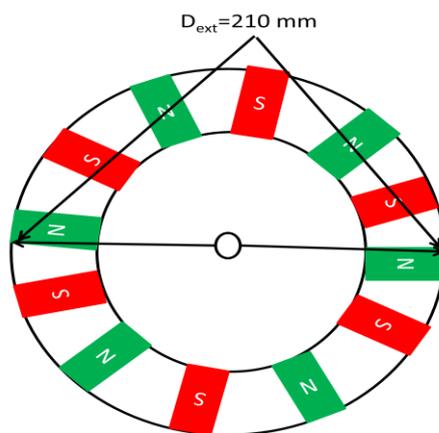
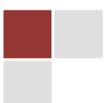


Figure (III-3) : Le diamètre extérieur 210 mm

- Rayon du cercle intérieur de 80 mm, ce que fait un diamètre intérieur égale à $D_{int}=160$ mm



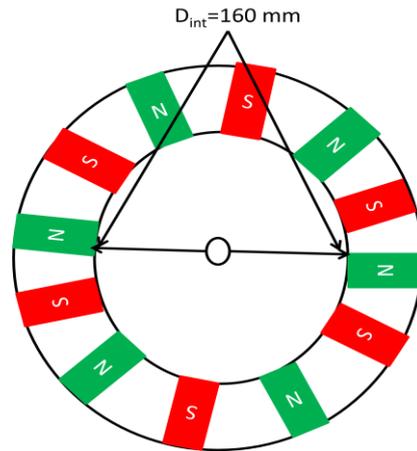


Figure (III-4) : Le diamètre intérieur 160 mm

- Rayon du trou permettant la rentrée de l'arbre du rotor est de 14 mm

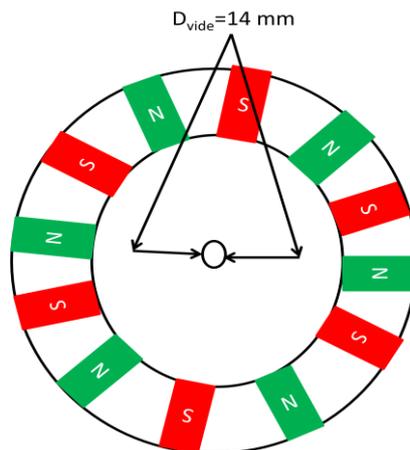


Figure (III-5) : Le diamètre de l'arbre 14 mm.

III-2-1-3-2 Comment Défini Les Lieux Des Aimants

III-2-1-3-2-a La Division Du Cercle

Premièrement, on définit le centre de ce cercle, puis diviser le cercle en quatre parties égales et tirer les axes perpendiculaires semblables. Puis on divise le cercle en 12 parts égales (des deux côtés (A, B)). Nous avons une loi de la mécanique géométrique qui nous permet de déterminer la distance entre deux côtés A et B par la loi suivante :



$$L(A, B) = R \cdot \sin \theta \quad (III-1)$$

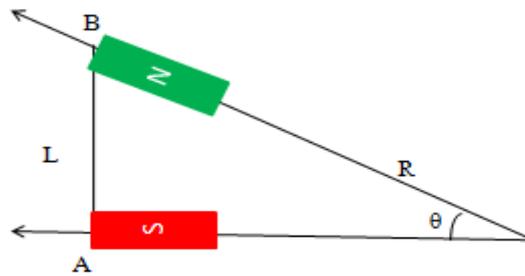


Figure (III-6) : la distance entre les deux axes (A, B).

Où :

L : la distance entre A et B (en mm).

R : le rayon de cercle (en mm).

θ : l'angle entre A et B (en degré)

III-2-1-3-2-b Pour Le Diamètre Extérieur

Diamètre extérieur (D_{ext}) = 210 mm donc $R = 210 / 2 = 105$ mm. $\theta = 30^\circ$ donc $\sin \theta = 0.5$. $L(A, B) = R \cdot \sin \theta = 52.5$ mm.

Après avoir pris l'axe de référence, nous prenons une dimension circulaire calculée (52.5 mm) et tirons l'arc afin de définir la place de l'élément avant, et sur la circonférence d'un cercle on fait une identification complète de tous les éléments (en relation avec le cercle extérieur) et après nous obtenons les axes de tous les éléments.

III-2-1-3-2-c Pour Le Diamètre Intérieur

Pour ce cercle on suppose que :

- B1 et B sur la même axe.
- A1 et A sur la même axe.

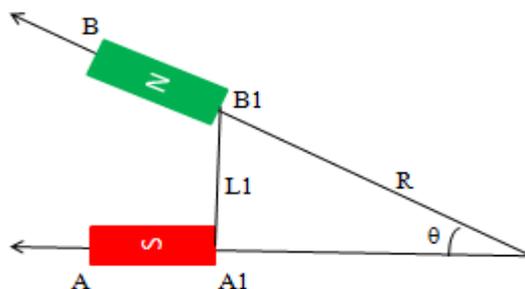


Figure (III-7) : la distance entre les deux axes (A1, B1).



Diamètre intérieur (D_{int}) = 160 mm donc $R1 = 160 / 2 = 80$ mm

$\theta = 30^\circ$ donc $\sin \theta = 0.5$

$L1(A1, B1) = R1 * \sin \theta = 40$ mm.

Après l'obtention de la distance entre les côtés (A1, B1) de la même manière, nous prenons l'axe (A1, A) comme référence et on complète comme dans la méthode précédente. Après avoir sélectionné les axes de tous les éléments, on peut également dire que nous avons bien distribué ces éléments (12 aimants) de mêmes dimensions. Et après toutes ces étapes, nous pouvons déterminer l'emplacement de chaque aimant permanent.

III-2-1-3-2-d L'emplacement expérimental d'aimants

Après avoir dessiné le plan et localisé les éléments et préparé le rotor du disque, le plan est de coller sur le disque et le mettre dans le centre avec une grande précision. On place les aimants permanents chacun à sa place et ensuite on découpe les lieux de chaque élément qui sont placés par ordre Nord-Sud.

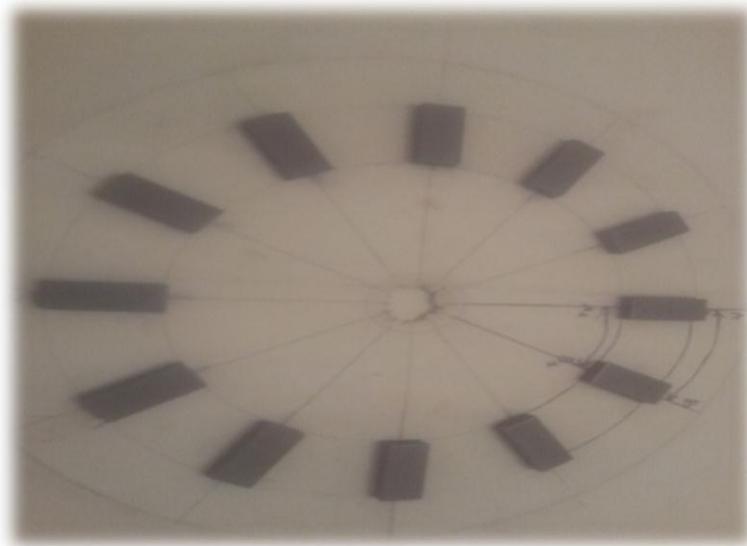
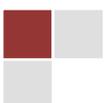


Figure (III-8) : la distribution sur le plan.

III-2-1-3-2-e L'emplacement réel d'aimants



La Figure (III-9) montre le placement des aimants permanents sur le disque du rotor et nous obtenons la distribution dans le mode de disque comme suit :



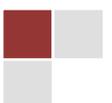
Figure (III-9) : placement des aimants permanents sur le disque de rotor.

III-2-1-4 Comment commander l'entrefer

A la face supérieure et inférieure du disque de rotor, nous disposons de deux écrous vissés. Le but est de faciliter le contrôle de processus dans l'entrefer connaissant que l'arbre est fileté.



Figure (III-10) : placement d'écrou dans le disc de rotor.



III-2-2 Pour le stator

Nous avons procuré un morceau cercle en bois de diamètre (230 mm) comme il est montré si dessous :

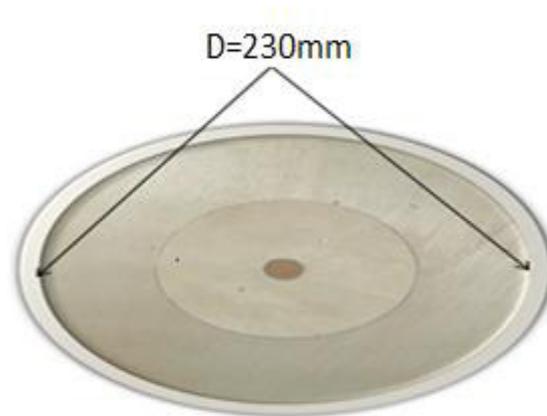


Figure (III-11) : représente le cercle de bois.

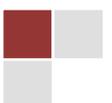
Pour définir la position, on tire l'axe passant par le centre. Nous prenons le même rayon pour le cercle extérieur ($R=105$ mm) et dessinez un cercle par le centre. On fait la même chose pour le cercle intérieur, en prenant le rayon ($R=80$ mm). On localise le bobinage de la même manière par rapport au disque de rotor.

III-2-2-1 pour le bobinage

III-2-2-1-a Propriétés de fil de cuivre

Si nous voulons avoir un bobinage requis, on doit respecter les propriétés suivantes :

- ✓ Longueur de fil (en nombre de tours), qui représente la valeur de la tension et par lequel on contrôle la tension. Plus grand le nombre de spires plus grande tension.
- ✓ En ce qui concerne l'épaisseur du fil (diamètre) qui représente la valeur de l'intensité du courant. Plus grand le diamètre du fil, plus grande l'intensité du courant.
- ✓ Nous devons donc tenir compte de ces conditions.



III-2-2-1-b Les dimensions de bobine

Diamètre	30 mm
Nombre de tours	150 tours
Diamètre de fil	0,5 mm

Tableau (III-2) : représente Les dimensions des bobines.

III-2-2-1-c Le gabarit

Pour trouver un gabarit qui correspond aux dimensions de l'aimant permanent, nous constatons qu'il est difficile de trouver des petites dimensions et par la suite nous avons opté pour une solution bien adaptée.

Nous savons aussi que nous devons respecter les dimensions de l'aimant permanent à exploiter le champ magnétique en quantité suffisante.

✓ Remarque

Le type de bobinage a été choisi d'une manière à donner un maximum de flux :

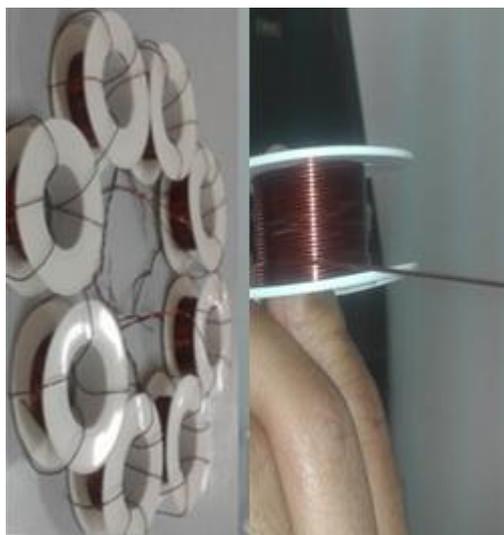
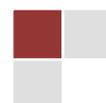


Figure (III-12) : model du gabarit utilisé.

Pour assurer une bonne protection à notre bobinage contre le frottement avec les aimants qui pourrait avoir lieu, on l'a mis dans des enveloppes en plastiques. Pour montrer que la



valeur de l'entrefer a un impact important dans l'évolution de la valeur de tension par rapport à une certaine vitesse pour les aimants permanents installés. L'entrefer optimal qui a été déterminé entre les aimants permanent et les bobines pour avoir un maximum de champ est de 2 mm. Une fois cette valeur est dépassée, il y aura un risque de collision entre les aimants et les bobinages, car cette valeur représente une distance minimale de sécurité.

III-2-2-1-d placement de bobine

Après avoir réalisé 12 bobines et respecter le sens et direction des enroulements des bobines qui ont été installés et fixées dans la même face. Le type de connexion a été sélectionné de type monophasé. On pouvait faire des connexions triphasées. La vérification des liens est vérifiée par multimètre.

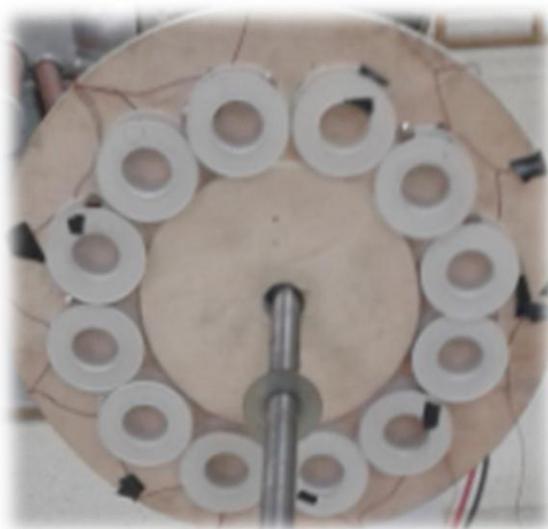


Figure (III-13) : placement de bobine dans le stator.

III-3 Le Support De Poids De Ce Système

Pour réaliser notre support on a exploité une chaise solide dont la hauteur est de 760 mm, permettant de supporter le poids de ce système, et mobile qui facilite les déplacements de l'éolien dans toutes les directions, cette chaise possède un système qui permet à la plaque de tourner 360° au tour de l'axe.

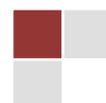




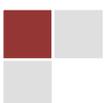
Figure (III-14) : représente le support du système.

- **Les Roulement**

Afin de supporter le poids de l'arbre et équilibrer le système de rotation, on a utilisé deux roulements de véhicule Peugeot 205. Vu que le diamètre de notre roulement est extensif (24 mm) on a placé à l'intérieur de ce dernier une pièce complémentaire possédant un diamètre de 14 mm pour remplir l'espace entre le roulement et l'arbre.



Figure (III-15) : représente le roulement de l'arbre.



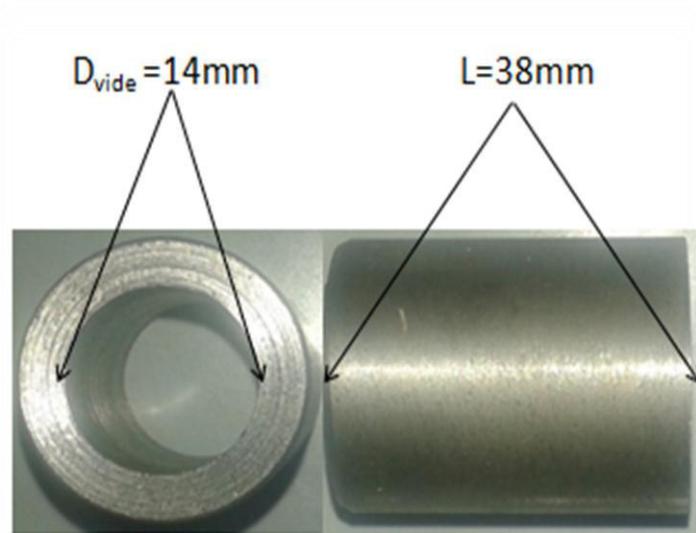


Figure (III-16) : représente la pièce complémentaire.

- **La fixation des roulements**

Pour réaliser une bonne fixation et un meilleur emplacement permettant l'équilibre de la turbine sur le support, on utilise une plaque dont les dimensions sont une longueur de 50 mm et largeur de 23 mm.



Figure (III-17) : Plaque de support.

III-4 L'assemblage de la génératrice

Après la préparation de tous les éléments du générateur, on peut monter que ces éléments peuvent former un générateur que nous devons respecter la valeur de l'entrefer de la façon dont nous obtenons la valeur considérable.



III-4-1 C'est Quoi L'entrefer

Il représente la distance entre les aimants permanents et le bobinage, que l'on retrouve dans la plupart des machines électriques. Il est estimé à un minimum de 1 mm pour avoir le maximum de champs. Pour notre cas dû à quelques défauts de fabrication, nous avons choisi un entrefer de 3 mm pour minimiser des éventuels dégâts.

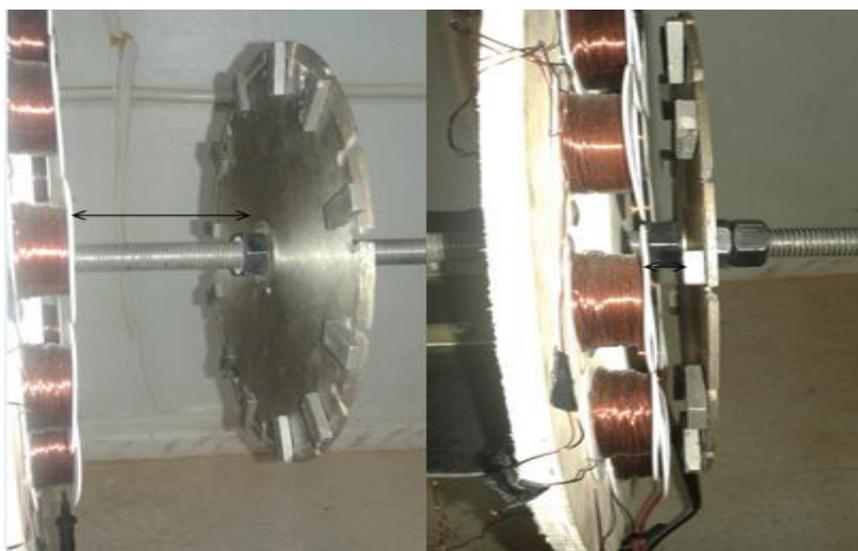


Figure (III-18) : l'entrefer de la génératrice.

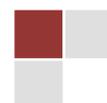
❖ Pour le premier essai

Avant d'installer la turbine, le processus de la rotation a été réalisé manuellement pour expérimenter notre génératrice, avec une valeur de l'entrefer de 3 mm.

Grâce à cette expérience, nous avons obtenue des données qui sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les résultats représentent la tension en fonction de la vitesse de rotation.

La vitesse de rotation en (tr/min)	La tension en (volte)
150	1.3
200	1.5
330	1.8
350	2
400	2.5
480	2.9
540	3.5

Tableau (III-3) : représente les valeurs de mesure.



III-5 La Turbine

Pour concevoir la turbine de l'éolienne, nous devons suivre la méthodologie pour une sélection du type de la turbine. Dans notre travail, une étude détaillée avec une recherche bibliographique a été faite vers le milieu de l'année 2016 qui nous permet de choisir le type d'éolienne à axe horizontale qui s'adapte à l'environnement de Biskra.

✓ Les pales

On a choisi des pales d'un ventilateur à usage domestique. Comme nous savons, la plupart des éoliennes horizontales disposent trois pales figure (III-20), de ce fait on a pris le même nombre des pales pour rassembler notre turbine.

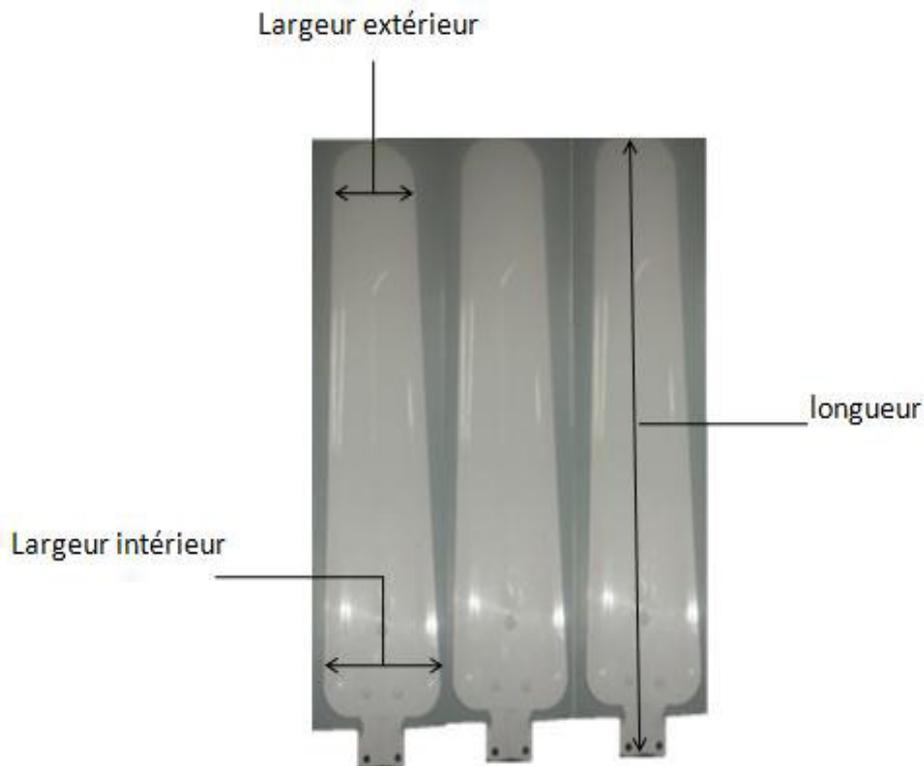


Figure (III-19) : les pales utilisées.

✓ Le disque

Pour accomplir notre turbine il faut prendre un disque permettant la liaison les pales et possédant les mêmes caractéristiques du disque de génératrice.



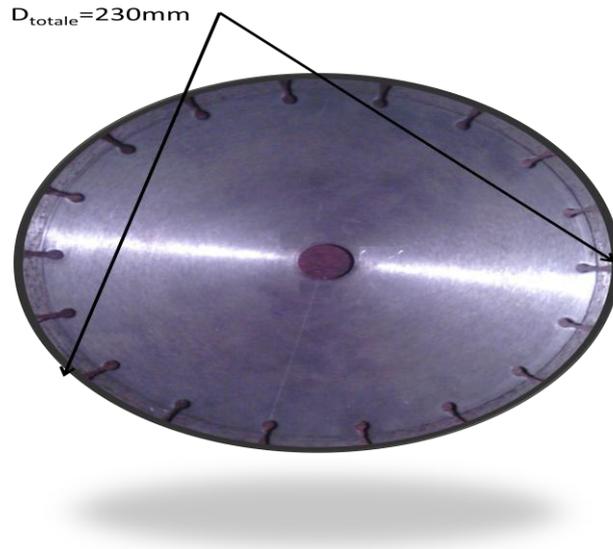


Figure (III-20) : le disque utilisé.

Les dimensions sont montrées dans le tableau suivant :

La hauteur(H)	760mm
La longueur(R) pour une pale	600mm
La largeur (L_{ext}) pour une pale	95mm
La largeur (L_{int}) pour une pale	120mm
Diamètre le disque de la turbine	230mm
Diamètre de la turbine	1400mm

Tableau (III-4) : représente les dimensions de turbine.

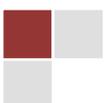


Schéma suivant représente la turbine de notre prototype :



Figure (III-21) : la turbine de l'éolienne.

Pour définir la surface de cette turbine on a :

$$S = \pi R^2 \quad (\text{II-2})$$

$$S = 1.13\text{m}^2$$

➤ **Pour le deuxième essai :**

La vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent.

Le jour : mardi 10/05/2016. A l'heure 15 :00 afin 17 :30, Avec la température 27°C, on a fait sortir notre prototype en fixant l'entrefer à une distance de 3 mm, par la suite on a obtenu les résultats ci-dessous :



Le vent (m/s)	La vitesse de rotation (tour/min)
2.2	60
2.4	70
2.5	90
2.7	100
2.9	150
3.2	200
3.4	300
3.6	400
3.8	550
4	600
4.2	750
4.3	800
4.5	1000
4.6	1100

Tableau (III-5) : les valeurs de mesure.

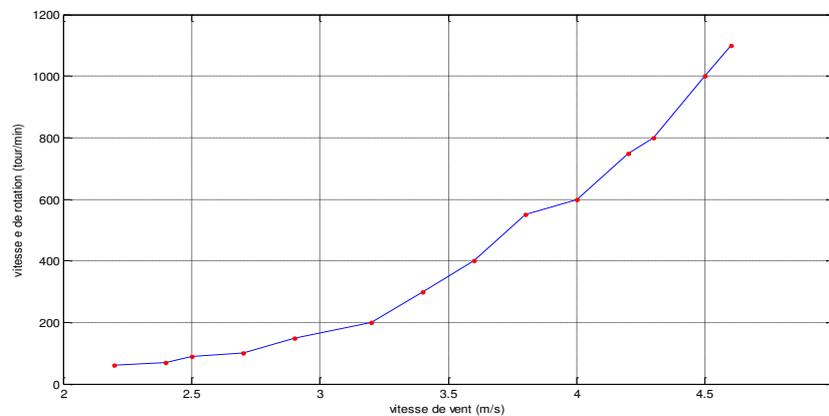
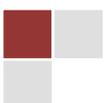


Figure (III-22) : vitesse de rotation en fonction de vitesse de vent.

✓ **Remarque :**

A chaque valeur croissante du vent on remarque que la vitesse de rotation augmente.

A prés on a fait mesurer la tension en fonction de la vitesse de rotation :



La vitesse de rotation (tr/mn)	Tension (v)
60	0.6
70	0.68
80	0.76
90	0.87
100	0.9
150	1.38
200	1.62
250	1.97
300	2.23
350	2.68
400	2.97
450	3.33
500	3.85
550	3.93
600	4.21
650	4.46
700	4.89
750	5.14
800	5.56
1000	6.43
1100	7.33

Tableau (III-6) : les valeurs de mesure.

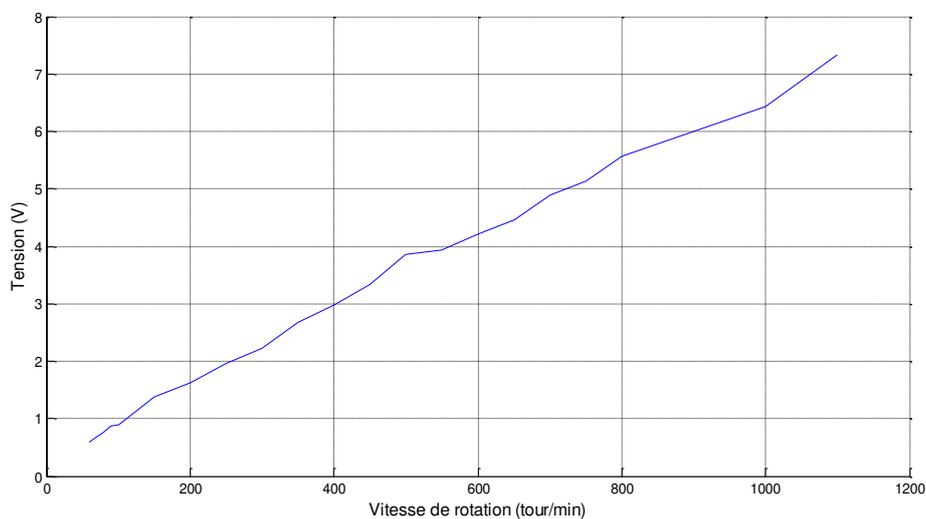


Figure (III-23) : tension en fonction de vitesse de rotation.

✓ **Remarque**

On a observé que si la vitesse de rotation augmente, la tension croit.



➤ Pour le troisième essai

Dans cet essai on a fixé le vent pour pouvoir examiner l'effet de l'entrefer sur la tension.

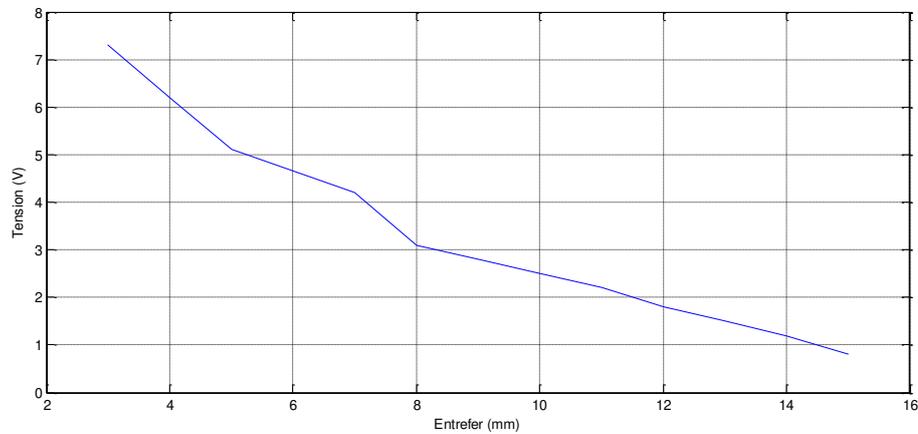


Figure (III-24) : tension en fonction de l'entrefer

✓ Remarque

On a constaté que si l'entrefer s'élargit la tension se diminue.

III-6 Les Avantages et Les Inconvénients De Cette Génératrice et de turbine

✓ Les avantages

Ce type de génératrice est idéal pour l'éolien. Ses atouts sont vraiment très nombreux:

- Il produit un courant de charge à bas régime.
- Il a un bon rendement général.
- Sa taille est modulable selon votre projet.
- Il est économique par rapport à l'achat d'un générateur neuf.
- Il est de conception simple, donc facile à entretenir.
- Il est très robuste s'il est conçu avec de bons matériaux.
- Il ne demande pas d'excitation.
- Peut installer dans n'importe quel lieu.

✓ Les inconvénients de cette génératrice

- Produire la même densité du flux magnétique.
- La plupart d'utilisation dans la petite puissance.



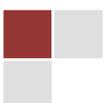
✓ Pour la turbine

En ce qui concerne la qualité de la turbine réalisée avec la connaissance que nous prenons en compte la diminution à la fois du coefficient de frottement et le poids, et après nous pouvons dire que la qualité du matériau a un effet sur la qualité de fonctionnement.

III-7 Conclusion

L'objectif de ce travail est de réaliser une éolienne à une échelle réduite pour la production de l'énergie électrique à faible puissance. La génératrice réalisée est de type synchrone à aimants permanents. La turbine de cette éolienne a un axe horizontal.

Les résultats obtenus par cette éolienne sont acceptables. Nous avons la maîtrise de conception et de réalisation de ce type d'éoliens. Ce travail peut être amélioré dans la future.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : réseaux électrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

Conception d'une éolienne horizontale

Présenté par :
Lemrabott ould mohamed
Soutenu le : 30 mai 2016

Devant le jury composé de :

Tkouti Nacira

Mimoune souri Mohamed

Rahoua naïma

MAA

Pr

MAA

Présidente

Encadreur

Examinatrice

Année universitaire : 2015 / 2016

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Conception d'une éolienne horizontale

Présenté par :

Lemrabott ould mohamed

Avis favorable de l'encadreur :

Pr : Mimoune souri Mohamed

Avis favorable du Président du Jury

MAA : Tkouti Nacira

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : réseaux électrique

Thème :

Conception d'une éolienne horizontale

Proposé par : Prof Minoune souri Mohamed
Dirigé par : Prof Mimoune souri Mohamed

Résumé :

Dans ce mémoire, on abordera un sujet très intéressant concernant les énergies renouvelables, c'est le cas de l'énergie éolienne. Nous nous sommes orientés vers l'étude, conception et réalisation d'une éolienne domestique de puissance 10w pour alimentation réduite, cette éolienne utilise une génératrice synchrone à champ axial qu'on a réalisé avec des aimants permanents.

المخلص:

في هذه المذكرة سوف نقوم بتصميم نموذج مصغر للاستعمالات المنزلية أو ما شبه يعمل بطاقة الرياح مزود بمولد متزامن ذو مغناطيس دائم مع حقل محوري ينتج استطاعة منخفضة حوالي 10 واط .

Résumé

Dans ce mémoire, on abordera un sujet très intéressant concernant les énergies renouvelables, c'est le cas de l'énergie éolienne. Nous nous sommes orientés vers l'étude, conception et réalisation d'une éolienne domestique de puissance 10w pour alimentation réduite, cette éolienne utilise une génératrice synchrone à champ axial qu'on a réalisé avec des aimants permanents.

المخلص:

في هذه المذكرة سوف نقوم بتصميم نموذج مصغر للاستعمالات المنزلية أو ما شبه يعمل بطاقة الرياح مزود بمولد متزامن ذو مغناطيس دائم مع حقل محوري ينتج إستطاعة منخفضة حوالي 10 واط .

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre I : Généralité Sur Les Éoliennes	
I-1- Introduction.....	3
I-2- Historique.....	3
I-3-2 Le Gisement De Vent.....	4
I-3-2-1 D’ou Vient Le Vent	5
I-3-2-2 Variation Temporelle De Vitesse Moyenne Du Vent.....	5
I-3-2-3 Les Critères De Choix Du Site.....	5
I-3 Principe De La Conversion Dde L’énergie Eolienne.....	7
I-4 Avantages Et Inconvénients De L’énergie Éolienne.....	8
I-4-1 Les Avantages.....	8
I-4-2 Les Inconvénients.....	9
I-5 Composantes D’une Éolienne.....	10
I-5-1 Le Mat Ou La Tour.....	11
I-5-2 Le Rotor Et Les Pales.....	12
I-5-3 La Nacelle.....	13
I-5-3-1 Le Multiplicateur.....	14
I-5-3-2 Le Système De Refroidissement.....	14
I-5-3-3 La Génératrice Électrique.....	14
I-5-3-4 Le Système De Commande.....	14
I-5-3-5 Système D’orientation Des Pales.....	14
I-5-4 Le Moyeu.....	15
I-5-5 L Fondation.....	15
I-6 Types Des Turbines Éoliennes.....	16
I-6-1 Éolienne A Axe Vertical.....	16

Chapitre II : Modélisation D'un Système De L'éolienne

II-1 Introduction.....	39
II-2 Les Variations Dues A L'altitude.....	39
II-3 Potentiel Énergétique.....	39
II-3-1 Le Potentiel De Force D'aire.....	39
II-3-2 Distribution De Wei Bull.....	39
II-4 Conversion De L'énergie Cinétique En Mécanique.....	40
II-4-1 Énergie Cinétique	40
II-4-2 La masse de l'air.....	41
II-4-2-1 Variation de la masse volumique de l'air	41
II-4-3 Énergie théoriquement récupérable.....	42
II-4-4 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur.....	42
II-4-5 La puissance aérodynamique	42
II-4-6 Modélisation De La Turbine Sans Multiplicateur.....	45
II-4-7 Modélisation De La Turbine Avec Multiplicateur.....	45
II-4-8 Équation Dynamique De L'arbre.....	46
II-4-9 Équation mécanique de l'arbre	46
II-5 Zones de fonctionnement	47
II-6 Conversion Énergie Mécanique En Énergie Électrique.....	48
II-6-1 Hypothèses simplificatrices	48
II-6-2 Le modèle théorique de La loi de Faraday	49
II-7 Rendement De L'éolienne	49
II-8 Conclusion	50

Chapitre III : Conception D'une Eolienne A Axe Horizontale Avec GSAP A Champ Axial

III-1 Introduction.....	51
III-2 La GSAP A Flux Axial (12Aimants).....	51
III-2-1 Conception du rotor.....	51
III-2-1-1 Le Choix De L'arbre.....	51
III-2-1-2 Le diamètre du disque du rotor.....	52
III-2-1-3 Etude géométrique du rotor.....	52
III-2-1-3-1-a Les dimensions de l'aimant.....	52
III-2-1-3-1-b Définition de l'étiquette de chaque cercle des aimants.....	53
III-2-1-3-2 Comment Défini Les Lieus Des Aimants.....	54

III-2-1-3-2-a La Division Du Cercle.....	54
III-2-1-3-2-b Pour Le Diamètre Extérieur.....	55
III-2-1-3-2-c Pour Le Diamètre Intérieur.....	55
III-2-1-3-2-d L'emplacement expérimental d'aimants.....	56
III-2-1-3-2- L'emplacement réel d'aimants.....	56
III-2-1-4 Comment commander l'entrefer.....	57
III-2-2 Pour le stator.....	57
III-2-2-1 pour le bobinage.....	58
III-2-2-1-a Propriétés de fil de cuivre...../.....	58
III-2-2-1-b Les dimensions de bobine.....	59
III-2-2-1-c Le gabarit.....	59
III-2-2-1-d placement de bobine.....	60
III-3 Le Support De Poids De Ce Système.....	60
III-4 L'assemblage de la génératrice.....	62
III-4-1 C'est Quoi L'entrefer.....	63
III-5 La Turbine.....	64
III-6 Les Avantages et Les Inconvénients De Cette Génératrice.....	69
III-7 Conclusion.....	70
Conclusion général.....	71

LES SYMBOLS

V : vitesse du vent à la hauteur h à laquelle sera implantée l'éolienne.

h_0 : Hauteur pour laquelle la vitesse du vent est connue.

V_0 : vitesse à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol.

α : coefficient caractéristique du lieu.

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

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

E_c : L'énergie cinétique (en joule).

v : volume d'air occupé(en m^3)

ρ : masse volumique (en kg/m^3)

V : la vitesse du vent (m/s),

ρ : représente la masse volumique de l'air(en kg/m^3).

S : la surface balayée par l'hélice (en m^2).

v_1 : La vitesse de vent (en m/s).

$P_{aéro}$: La puissance aérodynamique (en watt).

C_p : Le coefficient de puissance en fonctionne (λ).

Ω : La vitesse angulaire de rotation

J : L'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice.

C_{mec} : Le couple mécanique,

C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice,

C_{vis} : Le couple des frottements visqueux.

J_m : Inertie de la machine.

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

J_t : Inertie de la turbine.

f_t : Frottement des pâles.

C_{eol} : Le couple statique fournie par l'éolienne.

\vec{E} : Champ électrique

\vec{B} : Induction magnétique

e : induite

Φ : flux induit

R : le rayon de cercle (en mm).

θ : l'angle entre A et B (en degré).