



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
réseaux électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Herihiri nadjiballah

Le : samedi 23 juin 2018

Conception d'une éolienne à axe horizontal avec MCC à champ Axial

Jury :

Titre	Khilili fatiha	MAA		Président
Titre	Mimoune souri mohamed	Pr	Université d'appartenance	Encadreure
Titre	Rezig Mohamed	MAA	Université d'appartenance	Examineur

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 à axe
horizontal avec MSAP à champ Axial***

**Présenté par :
Herihiri nadjiballah
Soutenu le : 23 juin 2018**

Devant le jury compose de :

Khlili Fatiha

Mimoune souri Mohamed

Rezig Mohamed

MAA

Pr

MAA

Présidente

Encadreur

Examinatrice

Année universitaire : 2017 / 2018

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 à axe horizontal avec
MSAP à champ Axial*

Présenté par :

Herihiri nadjiballah

Avis favorable de l'encadreur :

Pr : Mimoune souri Mohamed

Avis favorable du Président du Jury

MAA : Khlili fatiha

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 à axe horizontal avec MSAP à champ Axial

Proposé par : Prof Mimoune 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 30w pour alimentation réduite, cette éolienne utilise une génératrice synchrone à champ axial qu'on a réalisé avec des aimants permanents.

الملخص:

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 30 واط .

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.

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 Eoliennes21

Chapitre II : Types d'éoliennes

Tableau II-1 : Les Avantages Et Inconvénients Des Différentes Eoliennes.....35

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

Tableau III-1 :L'effet De L'angle Sur La Nature De Terrain.40

Chapitre IV : Conception d'une éolienne à axe horizontal avec MSAP à champ Axial

Tableau IV-1 : représente les dimensions de turbine.....58

Tableau IV-2 : les valeurs de mesure.....59

Tableau IV-3 : les valeurs de mesure.....59

Tableau IV-4 : les valeurs de mesure en régime moteur.....63

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'Algérie 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: éoliennes à axe vertical de type SAVONIUS.....	11
Figure I-7: éoliennes à axe vertical de type DARRIEUS.....	12
Figure I-8 : différent type d'éolienne à axe horizontale.....	13
Figure I-9: éolienne sous le vent, tripale flexible.....	14
Figure I-10 : Eolienne Face Au Vent (A mont)	15
Figure I-11: Composante d'une éolienne de forte puissance.....	16
Figure I-12 : Différents types de tours.....	17
Figure I-13: classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale.....	18
Figure I-14 : Eléments d'une nacelle.....	18
Figure I-15 : Le Multiplicateur	19
Figure I-16 : Type De L'anémomètre.....	15
Figure I-17 : Les Fondations De Grandes Eoliennes.....	20
Figure I-18: Parc éolien de Macho Springs aux États-Unis.....	22
Figure I-19: Évolution des capacités installées dans le monde de 2001 à 2016 (©Connaissance des Énergies, d'après données du GWEC).....	23

Chapitre II : Types d'éoliennes

Figure II-1 : Système Eolien Basé Sur Une Machine Asynchrone A Cage A Vitesse Fixe.	25
Figure II-2 : Système Eolien Basé Sur Une Machine Synchrone A Aimants Permanents A Fréquence Variable.....	27

Figure II-3 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.....	29
Figure II-4 : Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	29
Figure II-5 : Machine Synchrone Avec Convertisseur A Diodes Et Hacheur En Pont...30	
Figure II-6 : Machine Synchrone Connectée A Un Redresseur A Mli.....	30
Figure II-7 : Les Types De Génératrice Synchrone A Aimant Permanant.....	31
Figure II-8 : Msap Discoïde Avec Deux Stators Et Un Rotor.....	32
Figure II-9 : Msap Discoïde Avec Stator Et Deux Rotors.	32

Figure II-10 : MSAP Discoïde Unilatérale Avec Contrepoids Du Côté Rotor.	33
Figure II-12 : Courbe B (H) Des Différents Types Des Aimants Permanents.....	34
Figure II-13 : Estimation D'une Evolution Possible Des Couts (€/Kw).....	37

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

Figure III-1 : La Hauteur En Fonctionne Avec La Vitesse De Vent.....	39
Figure III-2 : Distribution De Vitesse Du Vent.....	41
Figure III-3 :L'exploitation De Puissance En Fonctionne La Vitesse De Vent.....	44
Figure III-4 : Coefficient Puissance Pour Différents Types D'éoliennes	45
Figure III-5 : Schéma Simplifié De La Turbine Eolienne	46
Figure III-6 : Schéma Simplifié De La Turbine Eolienne Avec Multiplicateur.....	46
Figure III-7 : Zones De Fonctionnement D'une Eolienne	48
Figure III-8 : Bilan De Puissance D'une Eolienne.....	51

Chapitre IV : Conception d'une éolienne à axe horizontal avec MSAP à champ Axial

Figure IV-1 : l'arbre utilisé pour l'éolienne MSAPH.....	52
Figure IV-2 : l'arbre utilisé pour l'éolienne.....	53
Figure IV-3 : représente le support du système ou Mat.....	54
Figure IV-4 : le roulement de l'arbre.....	54
Figure IV-5 : Plaque de support.....	55
Figure IV-6 : les pales utilisées.....	55
Figure IV-7 : le disque utilisé.....	56
Figure IV-8 : l'entrefer de la génératrice.....	56
Figure IV-9 : tension en fonction de l'entrefer.....	57
Figure IV-10 : la turbine de l'éolienne.....	58
Figure IV-11 : vitesse de rotation en fonction de vitesse de vent.....	60
Figure IV-12 : tension en fonction de vitesse de rotation.....	61
Figure IV-13 : Génératrice MSAP d'un ventilateur.....	62
Figure IV-14 : Génératrice MSAP d'une pompe DIAPHRAGM PUMP LF-30L.....	63
Figure IV-15 : vitesse de rotation en fonction de la tension.....	64
Figure IV-16 : Vitesse de rotation en fonction du courant absorbé en régime moteur...64	
Figure IV-17 : Croie dentée d'alternateur.....	65

Figure IV-18 : Poulie à gauche est fixée sur l'arbre et la poulie à droite est fixé à la génératrice.....	66
Figure IV-19: Génératrice MSAP couplée à la turbine.....	67
Figure IV-20 : L'ensemble : génératrice, croie, poulies arbre, disque et pales sont assemblés pour donner l'éolienne.....	68
Figure IV-21 : La tension en fonction de la vitesse de rotation dans la nouvelle éolienne et l'ancienne éolienne.....	69

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 30 w 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 30 واط .

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité Sur Les Éoliennes	
I-1- Introduction.....	3
I-2- Historique.....	3
I-3-Le Gisement De Vent.....	4
I-3-1-1 D'ou Vient Le Vent	5
I-3-1-2 Variation Temporelle De Vitesse Moyenne Du Vent.....	5
I-3-2-3 Les Critères De Choix Du Site.....	5
I-4 Principe De La Conversion De L'énergie Eolienne.....	7
I-5 Avantages Et Inconvénients De L'énergie Éolienne.....	8
I-5-1 Les Avantages.....	8
I-5-2 Les Inconvénients.....	9
I-6 Types Des Turbines Éoliennes.....	10
I-6-1 Éolienne A Axe Vertical.....	10
I-6-1-1 Le Rotor de savonius.....	11
I-6-1-2 Le Rotor De Darrieus.....	11
I-6-2 Éoliennes A Axe Horizontal	12
I-6-2-1 Éoliennes Sous Le Vent (Aval).....	14
I-6-2-2Éoliennes Face Au Vent (Amont).....	14
I-7- Composantes D'une Éolienne.....	15
I-7-1 Le Mat Ou La Tour.....	16
I-7-2 Le Rotor et les pales.....	17
I-7-3 La Nacelle.....	18
I-7-3-1 Le Multiplicateur.....	19
I-7-3-2 Le Système De Refroidissement	19

I-7-3-3 La Génératrice Électrique.....	19
I-7-3-4 Le Système De Commande.....	19
I-7-3-5 Système D'orientation Des Pales	19
I-7-3-6 Le Frein.....	20
I-7-3-7L'anémomètre.....	20
I-7-4Le Moyeu	20
I-7-5 La Fondation	20
I-8 La Taille D'éolienne	21
I-9 Principe De Fonctionnement	21
I-10 Les Conditions Qui Doivent Respecter Avant L'installation De L'éolienne	21
I-11 État des lieux du développement de l'éolien dans le monde.....	22
I-12 CONCLUSION.....	23

Chapitre II : types d'éoliennes

II-1 Introduction.....	24
II-2 Les Éoliennes Connectées Au Réseau Électrique	24
II-2-1 Les Éoliennes A Vitesse Fixe	24
II-2-2 Les Éoliennes A Vitesse Variable	25
II-2-2-1 La Machine Synchrone.....	26
II-3 Les Éoliennes En Fonctionnement Isolé Et Autonome	27
II-4 Machine Synchrone.....	28
II-4-1 Machine Synchrone À Rotor Bobiné.....	28
II-4-2 Machines Synchrones A Aimants Permanents.....	28
A. Structure avec redresseur à diodes.....	28
B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	29
C. Structure Avec Redresseur A Diodes Et Hacheur En Pont	29
D. Structure Avec Redresseur A MLI	30
II-4-3 Construction De La Génératrice Synchrone A Aimant Permanent	30
II-4-3-1 Les Types De Machines Synchrones A Aimants Permanents A Flux Axial.....	31
II-4-3-2 Les Aimants Permanents.....	33
II-4-3-2-1 Les Différentes Familles Des Aimants	34
II-5 Les Avantages Et Les Inconvénients De Types D'éolienne	35
II-6 Économique	36
II-6-1 Le Cout D'éolienne	36
II-6-2 Estimation De L'évolution Possible Des Coûts.....	37

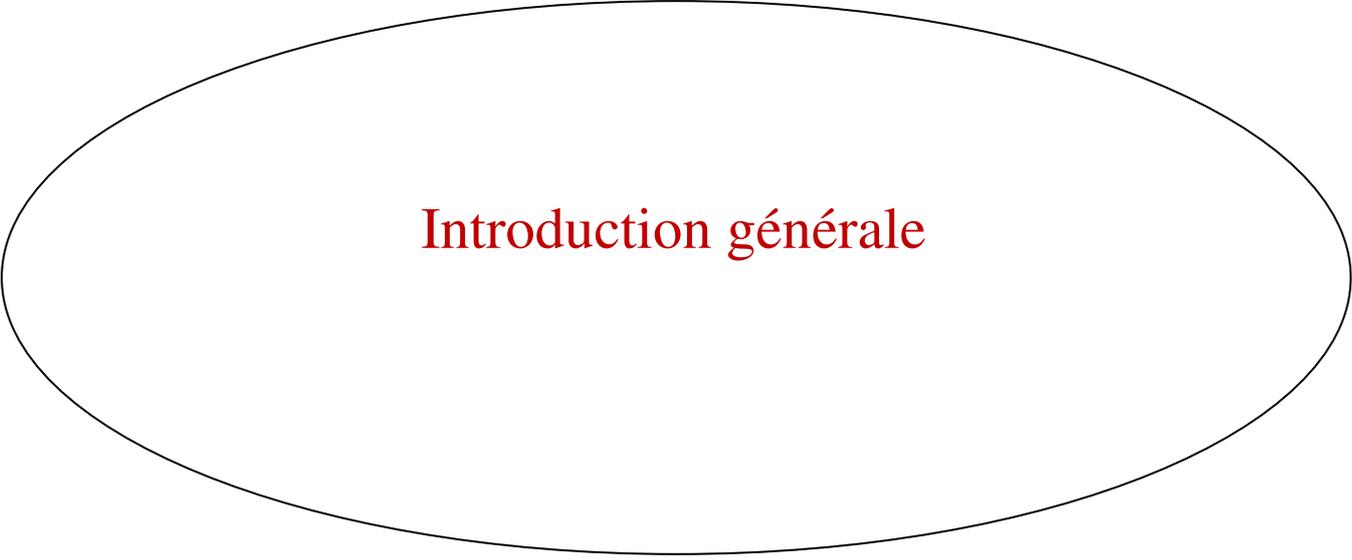
II-7 CONCLUSION	38
-----------------------	----

Chapitre III : Modélisation d'un système éolien

III-1 Introduction.....	39
III-2 Les Variations Dues A L'altitude.....	39
III-3 Potentiel Énergétique	40
III-3-1 Le Potentiel De Force D'aire.....	40
III-3-2 Distribution De Wei Bull.....	40
III-4 Conversion De L'énergie Cinétique En Mécanique.....	41
III-4-1 Énergie Cinétique.....	41
III-4-2 La masse de l'air.....	42
III-4-2-1 Variation de la masse volumique de l'air.....	42
III-4-3 Énergie théoriquement récupérable.....	43
III-4-4 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur.....	43
III-4-5 La puissance aérodynamique.....	43
III-4-6Modélisation De La Turbine Sans Multiplicateur.....	46
III-4-7Modélisation De La Turbine Avec Multiplicateur.....	46
III-4-8Équation Dynamique De L'arbre.....	47
III-4-9 Équation mécanique de l'arbre.....	47
III-5 Zones de fonctionnement.....	48
III-6Conversion Énergie Mécanique En Énergie Électrique.....	49
III-6-1 Hypothèses simplificatrices.....	49
III-6-2Le modèle théorique de La loi de Faraday.....	50
III-7 Rendement De L'éolienne.....	50
III-8 Conclusion.....	51

Chapitre VI : Conception d'une éolienne à axe horizontal avec MSAP à champ Axial

IV-1 Introduction.....	52
IV-2 L'ancienne éolienne intégrant la MSAPH et ses défauts de fabrication.....	52
IV-2-1 Défaut du choix de l'arbre.....	52
IV-2-2 Le support du poids du système(Mat)	53
IV-2-3 Les roulements supports.....	54
IV-2-4 La plaque support.....	55
IV-2-5 Assemblage des pales avec le disque.....	55
IV-2-6 La génératrice MSAPH et ses défauts de construction.....	56
IV-2-7 Problème de l'entrefer.....	57
IV-3 La turbine.....	58
IV-4 Les avantages de l'éolienne.....	61
IV-5 La nouvelle éolienne à MSAPC.....	62
IV-5-1 Préambule.....	62
IV-6 Conclusion.....	70



Introduction générale

Aujourd'hui, nous voyons de plus en plus d'éoliennes intégrées dans le paysage. Ceci s'explique car les réserves en énergies traditionnelles s'épuisent. L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

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.

Le procédé de transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique ou électrique par une éolienne dépend de trois paramètres : la forme et la longueur des pâles, la vitesse du vent et enfin la température qui influe sur la densité de l'air. L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

Dans ce travail, on a procédé à la réalisation d'une nouvelle éolienne à petite échelle de 30W qui se base sur une génératrice synchrone à aimants permanents commerciale. L'ancienne éolienne qu'on a réalisée, intègre une génératrice synchrone à aimants permanents type 'home made' MSAPH. Cette éolienne a présenté quelques difficultés de fonctionnement que la nouvelle génératrice synchrone à aimants permanents commerciale MSAPC.

Le mémoire rédigé, relatif à ce travail, est architecturé en trois chapitres ;

Dans le premier chapitre : nous avons représenté une généralité sur les éoliennes en particulier avec une généralité sur le système éolien, la génératrice synchrone à aimant permanent et à la fin une partie techno- économique.

Le deuxième chapitre concerne les types d'éoliennes à vitesse fixe ou variable et son mode de fonctionnement et couplage aux réseaux. Ces éoliennes utilisent différents types de génératrices qu'on va donner une description élémentaire.

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

Le quatrième chapitre est donc une étude comparative entre la génératrice MSAPH réalisée auparavant au laboratoire de recherche LMSE et celle qu'on a pu récupérer du commerce MSAPC destinée au pompage fluide. Ainsi que les améliorations mécaniques apportées à cette nouvelle éolienne ont été décrites.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

Chapitre I : généralité sur les éoliennes

I-1- Introduction

Aujourd'hui, nous voyons de plus en plus d'éoliennes intégrées dans le paysage. Ceci s'explique car les réserves en énergies traditionnelles s'épuisent. L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

I-2- Historique

Depuis l'Antiquité, les moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre 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 pût être redécouverte et de nouveau utilisé (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 [4].



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

I-3- Le Gisement De Vent

Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaia et Oran), du Tassili et de Ben 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].

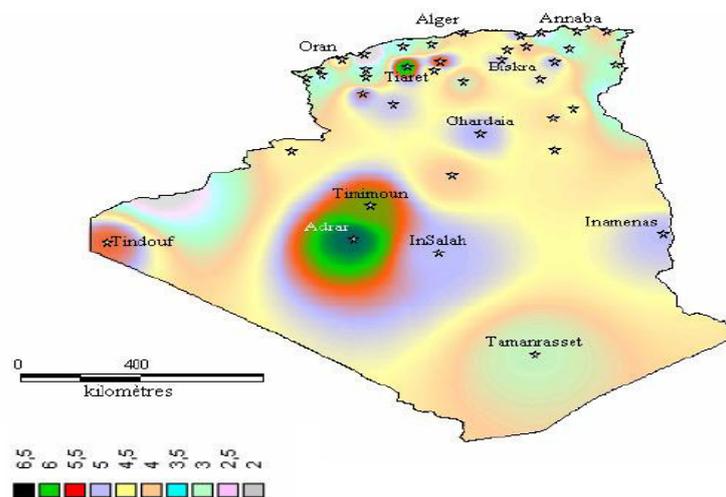


Figure I-2: la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

I-3-1-1 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-3-1-2 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.

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

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

I-3-1-3 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.

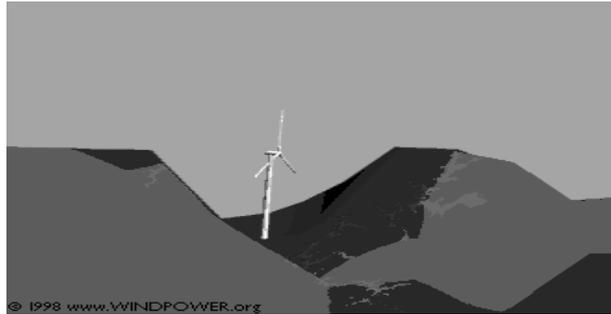


Figure I-3 : L'effet venturi.

➤ **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-4- 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].

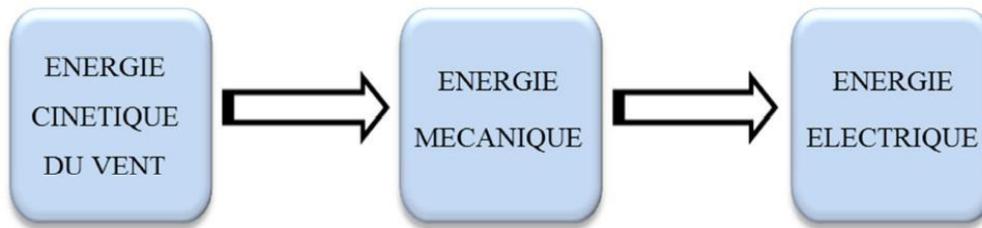


Figure I-5: Conversion de l'énergie cinétique du vent. [2]

I-5 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-5-1 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 supprime 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-5-2 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-6 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-6-1 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-6-1-1 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-6-1-2 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-6-2 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 aérodynamique ment. 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 sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. 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-6-2-1 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-6-2-2 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-7- 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.

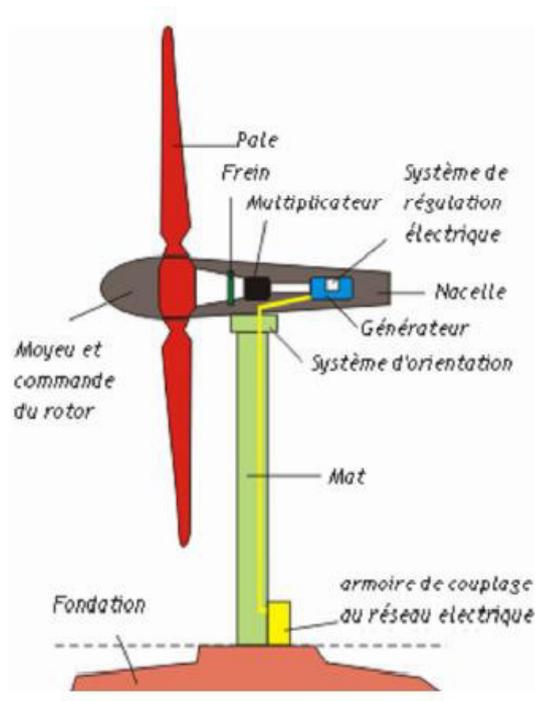


Figure I-11: Composante d'une éolienne de forte puissance.[4]

I-7-1 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.

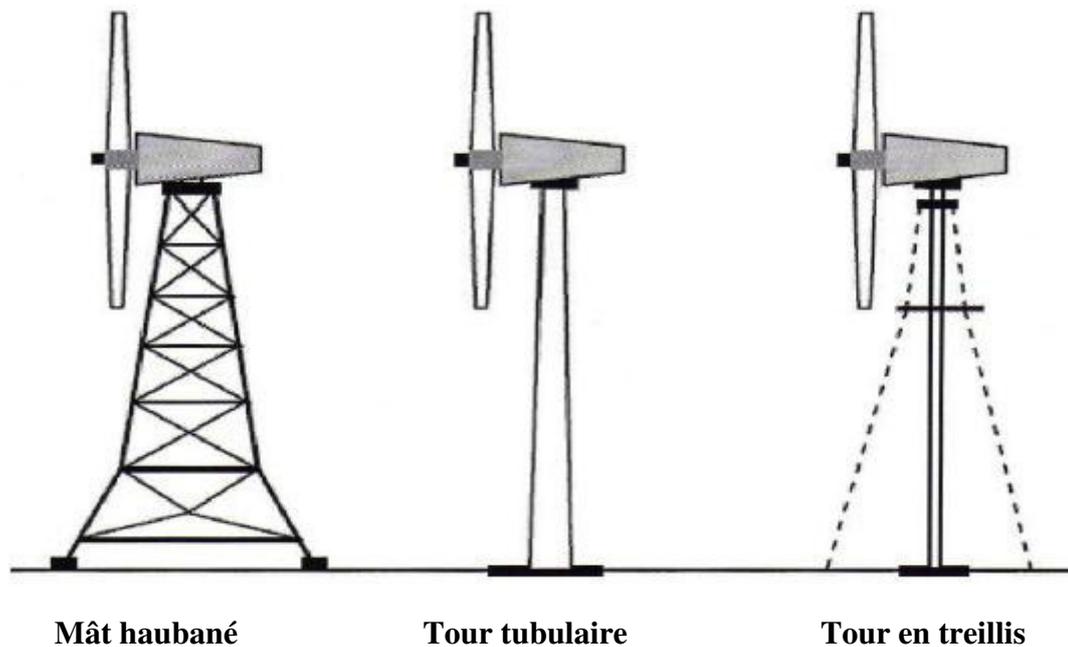


Figure I-12 : Différents types de tours.[3]

I-7-2 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.

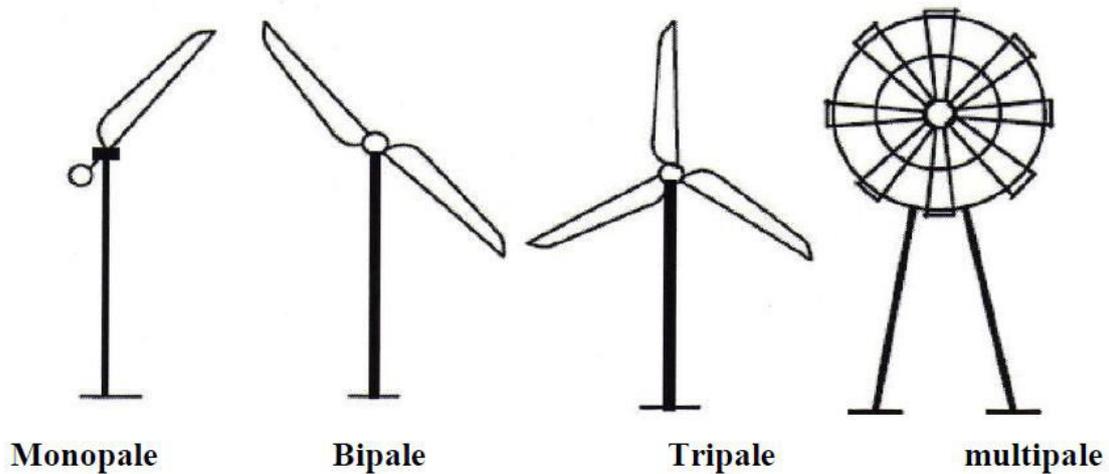


Figure I-13: classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale. [3]

I-7-3 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].

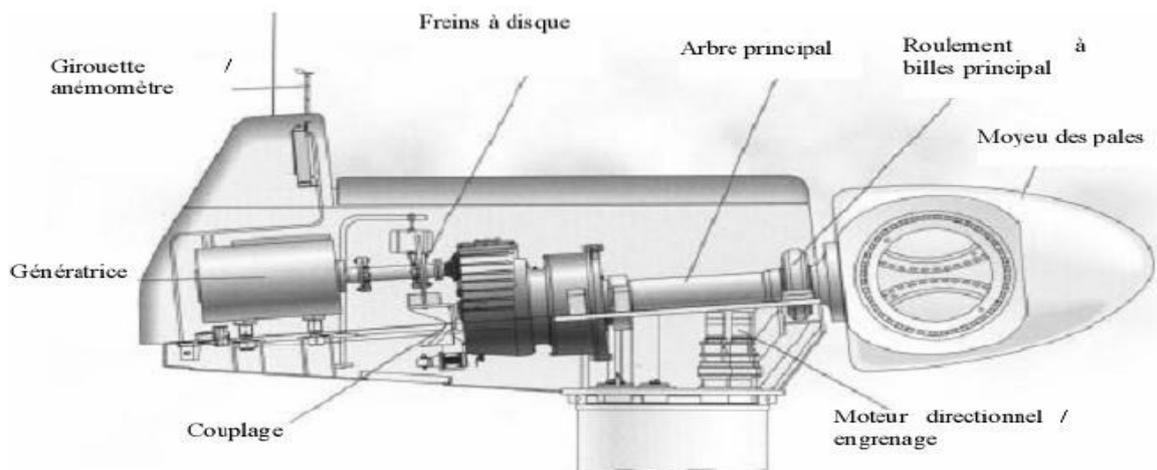


Figure I-14 : Eléments d'une nacelle [4].

Les équipements abrités par la nacelle sont :

I-7-3-1 Le Multiplicateur

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

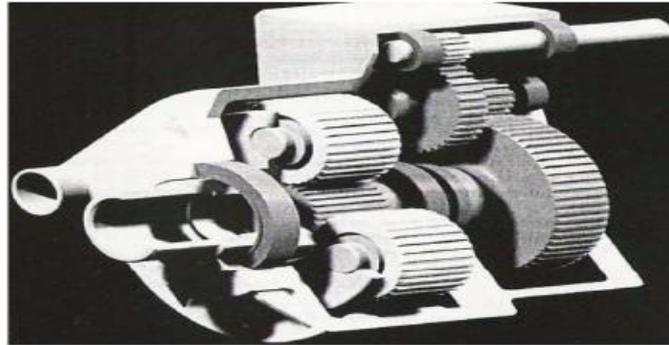


Figure I-15 : Le multiplicateur. [1]

I-7-3-2 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-7-3-3 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-7-3-4 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-7-3-5 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-7-3-6 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-7-3-7L'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-7-4Le 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-7-5 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-8 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 :

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

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	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

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-9 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-10 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-11 État des lieux du développement de l'éolien dans le monde



Figure I-18: Parc éolien de Macho Springs aux États-Unis

Le GWEC (Global Wind Energie Council) a publié hier sa synthèse annuelle sur le développement du marché éolien mondial en 2016, en présentant ses perspectives pour la filière d'ici à 2021.

Évolution des capacités éoliennes installées dans le monde depuis 2001

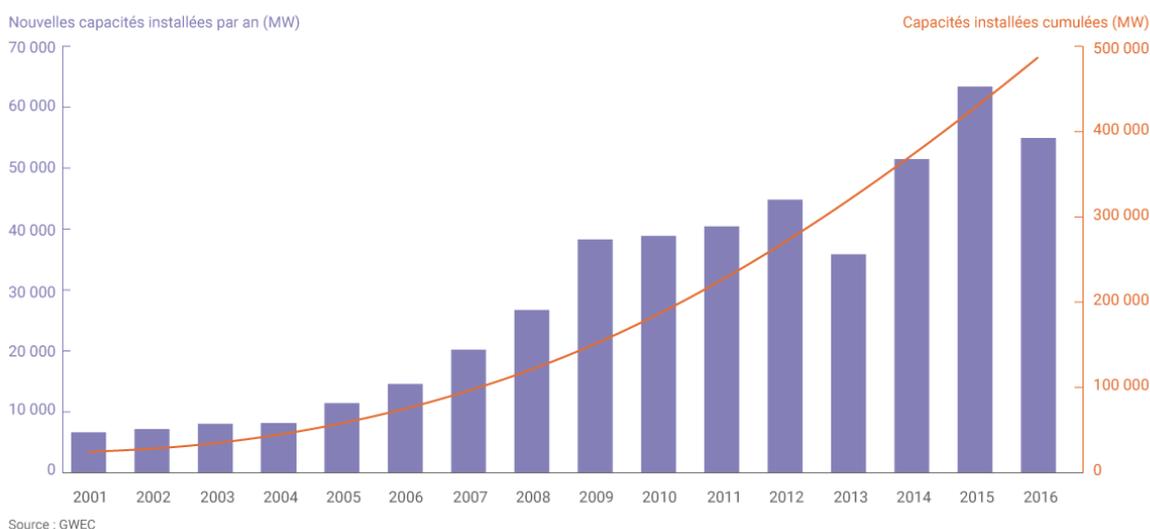


Figure I-19: Évolution des capacités installées dans le monde de 2001 à 2016 (©Connaissance des Énergies, d'après données du GWEC)[26]

I-12 CONCLUSION

L'énergie éolienne peut s'intégrer facilement dans les pays dont le mix électrique repose en grande partie sur les énergies fossiles. Son caractère variable est bien compensé par la grande disponibilité des centrales à gaz ou à charbon (ces dernières présentant toutefois un bilan environnemental très défavorable).

En revanche dans les pays dont la structure de production énergétique repose sur des sources moins aisées à contrôler, donc moins à même à répondre aux variations brutales de la demande d'électricité, l'intégration de l'énergie éolienne présente de plus grandes contraintes.

De surcroît, tous les pays ne bénéficient pas du même potentiel éolien. A l'avenir, les innovations technologiques, le développement des réseaux intelligents et les solutions de stockage de l'électricité pourraient également faire évoluer la distribution.

Chapitre II : Types d'éoliennes

II. 1 Introduction

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.

Ce chapitre concerne les types d'éoliennes à vitesse fixe ou variable et son mode de fonctionnement et couplage aux réseaux. Ces éoliennes utilisent différents types de génératrices qu'on va donner une description élémentaire.

II-2- 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].

II-2-1 Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée 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 (II-1) [14].

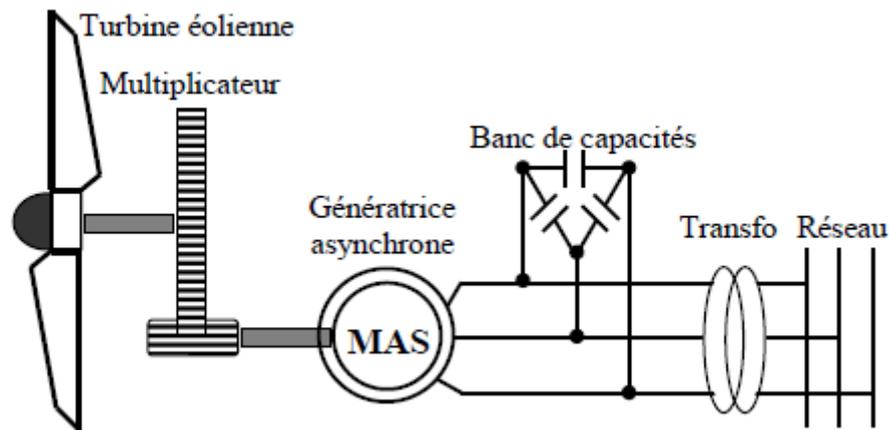


Figure II-1 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.

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.

II-2 -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

II-2 -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 (II-2))[6][8].

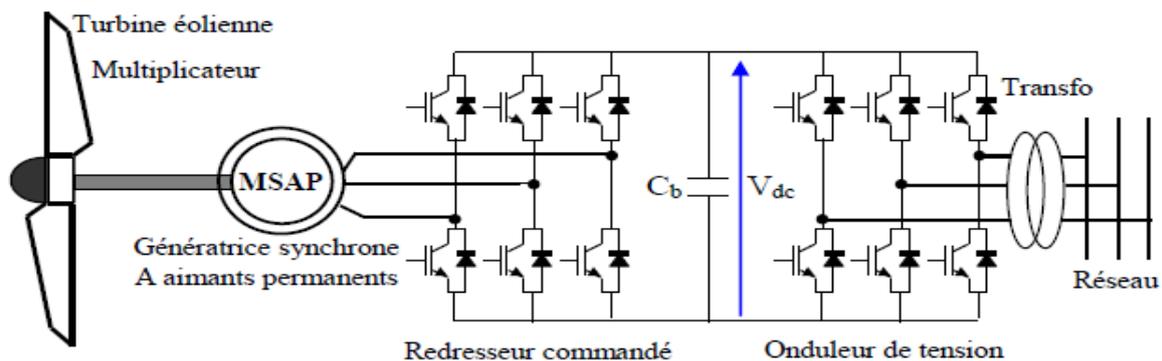


Figure II-2: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.

II-3 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.

II-4 Machine synchrone

II-4-1 Machine synchrone a 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.

II-4-2 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 existent [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 (II-3). 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.

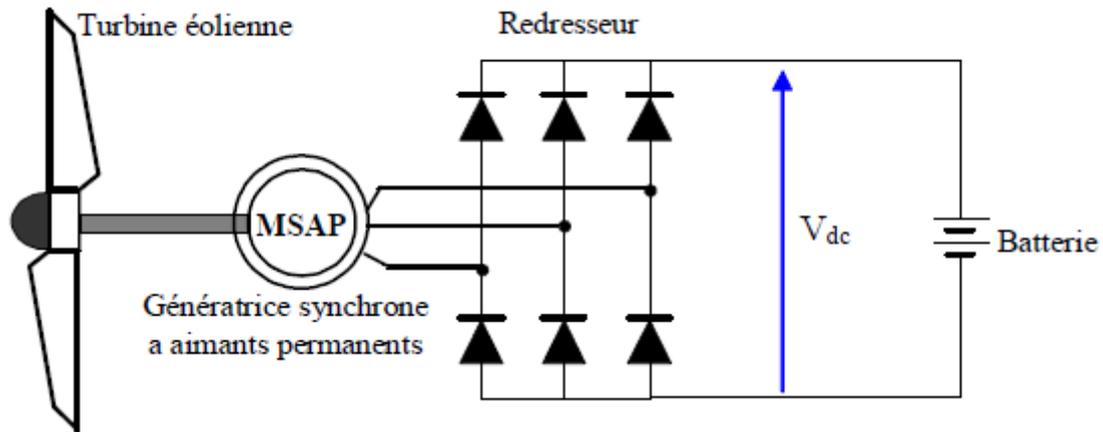


Figure II-3 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.

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 (II-4)).

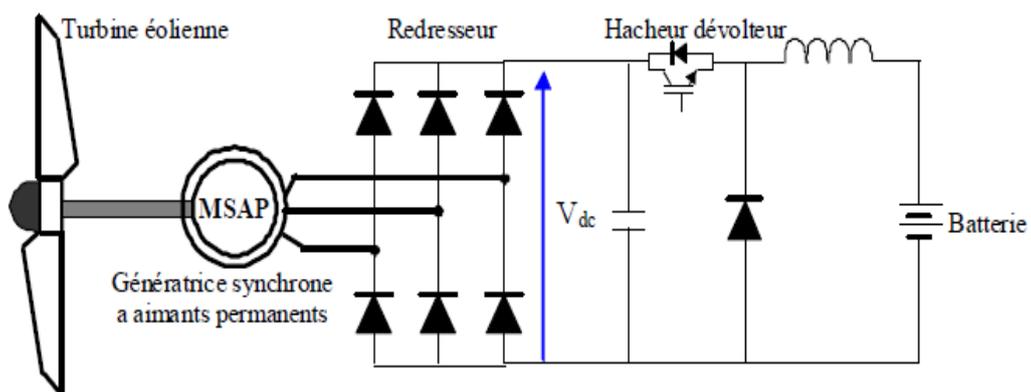


Figure II-4 : Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

C. Structure avec redresseur à 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].

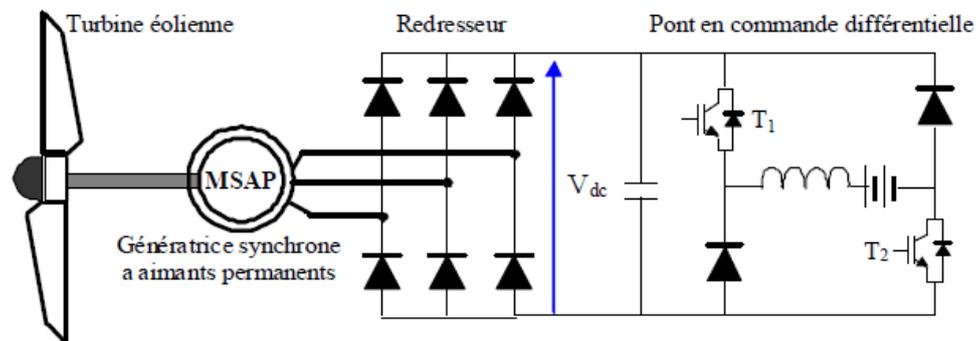


Figure II-5 : Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

D. Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (II-6), 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 [8].

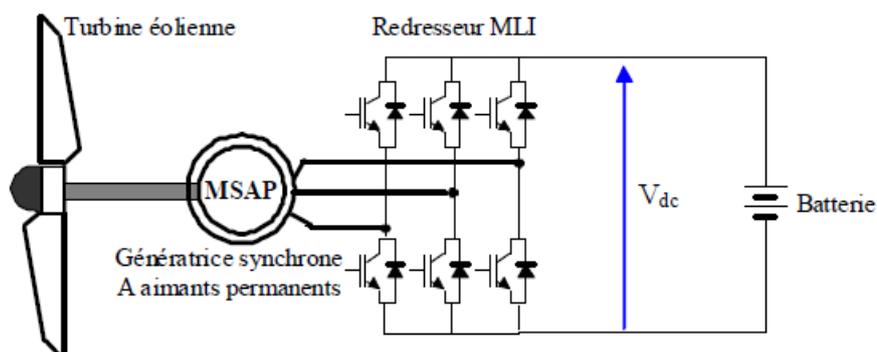


Figure II-6: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.

II-4-3 Construction de la génératrice synchrone à 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 :

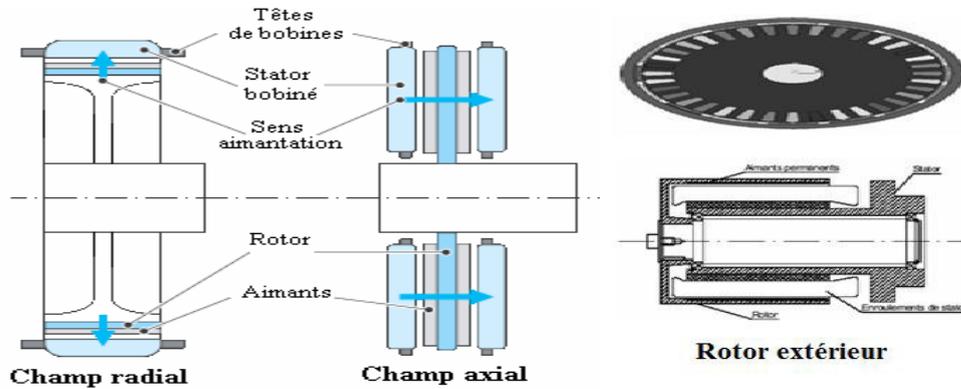


Figure II-7: les types de génératrice synchrone à aimant permanent. [17]

II-4-3-1 Les types de machines synchrones à aimants permanents à 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 (II-8). 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.

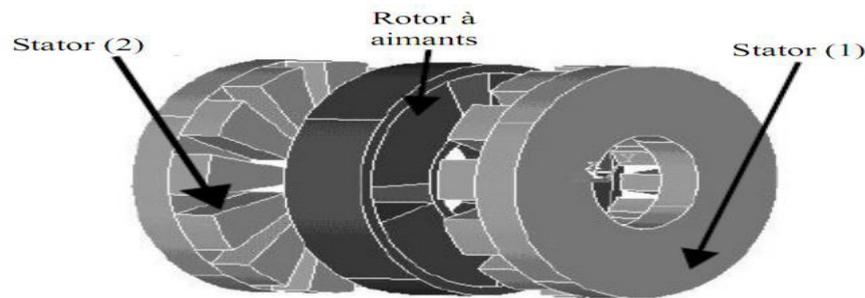


Figure II-8 : MSAP discoïde avec deux stators et un rotor [2].

➤ **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 (II-9):

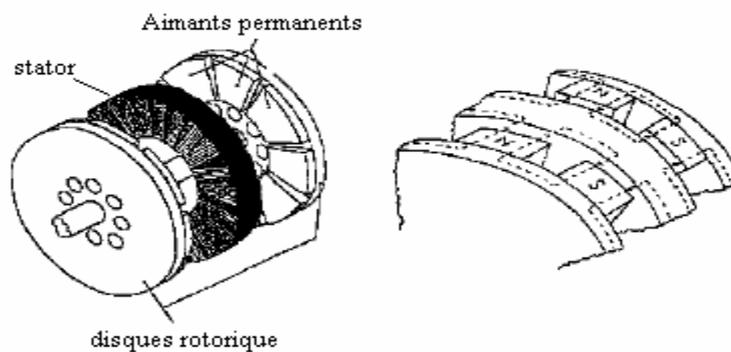


Figure II-9 : MSAP discoïde avec stator et deux rotors.

➤ **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 II-10).

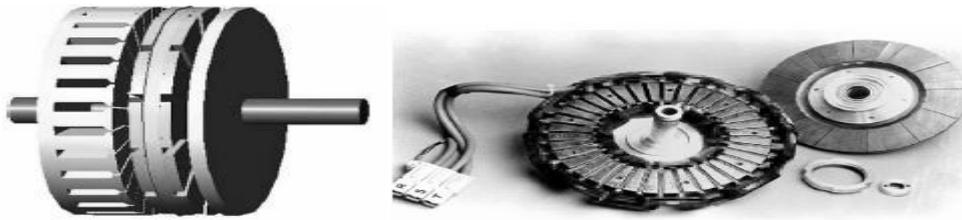


Figure II-10 : MSAP discoïde unilatérale avec contreponds du côté rotor.

➤ **Machine synchrone a aimants permanents a rotor extérieur :**

Comme illustré sur la figure (II-11), 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]

II-4-3-2 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]

II-4-3-2-1 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 (II.12) illustre ces trois types.

Les aimants ont beaucoup évolué ces cinquante 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]

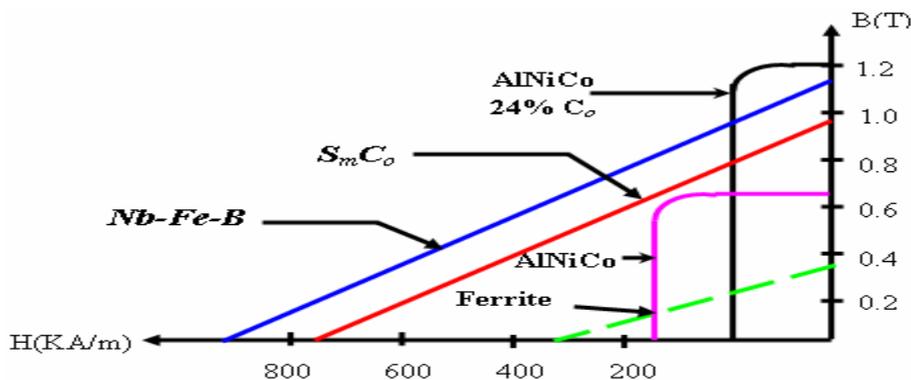


Figure II-12 : Courbe B (H) des différents types des aimants permanents.

- ✚ **Alnico** : 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 paston-néodymes. 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]

II-5 Les avantages et les inconvénients de types d'éolienne

Tableau II-1: les Avantages et inconvénients des différentes éoliennes. [18]

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	*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 boîte de vitesse *en peut fonctionne dans un site isolé et autonome	*Prix de l'électronique de puissance *Machine spécifique *Grand diamètre de machine *Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice
--	---	---

II-6 Économique

II-6-1 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 appelé 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.

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%. | |

II-6-2 Estimation de l'évolution possible des couts

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

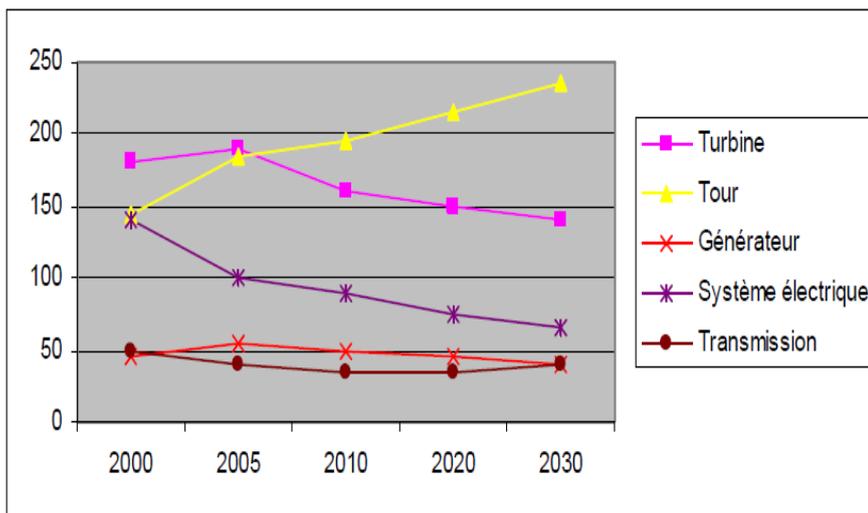


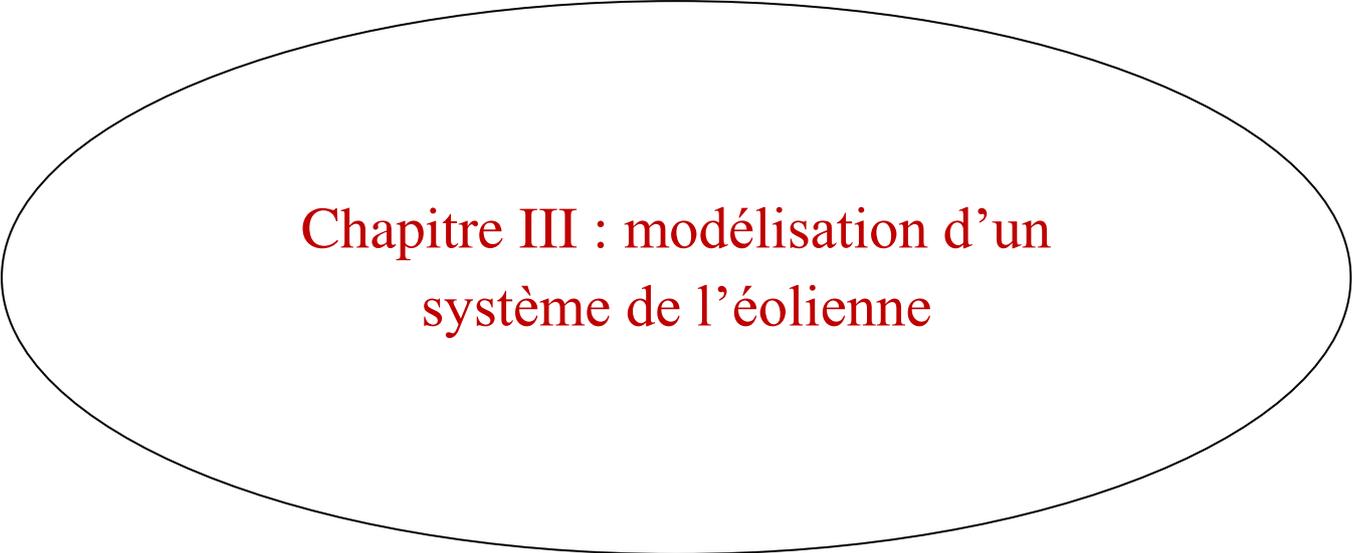
Figure II-13: Estimation d'une évolution possible des couts (€/kW).

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

- Évolution vers les systèmes a entrainement direct et émergence des machines à aimants dont le cout décroît avec l'accroissement de la production.
- Diminution régulière des couts 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]

II-7 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.



**Chapitre III : modélisation d'un
système de l'éolienne**

III-1 Introduction

Le procédé de transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique ou électrique par une éolienne dépend de trois paramètres : la forme et la longueur des pâles, la vitesse du vent et enfin la température qui influe sur la densité de l'air. L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

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

II-2 Les variations dues a l'altitude [20]

Les cartes de vent donnent le vent à des hauteurs a 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.

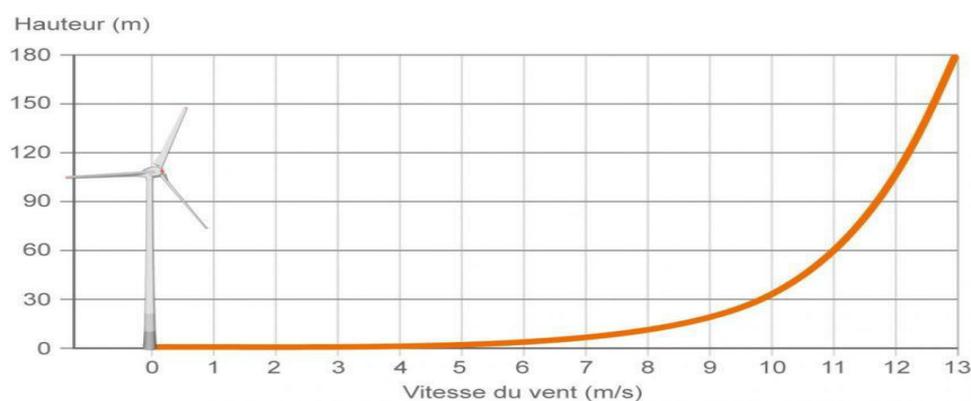


Figure III-1 : la hauteur en fonctionne avec la vitesse de vent

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 III-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 :

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

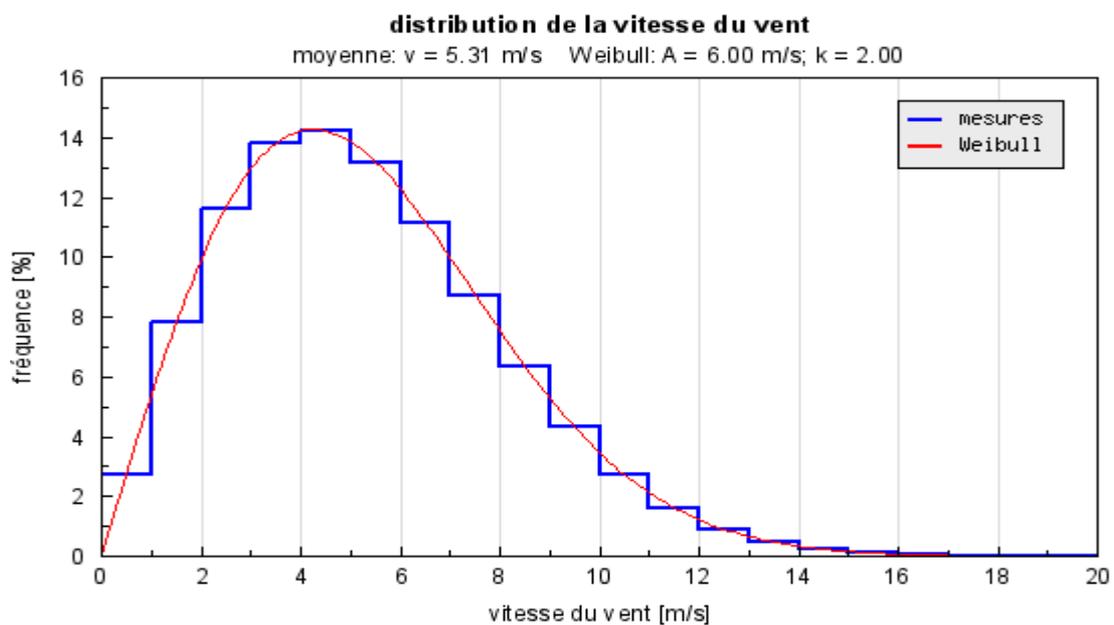


Figure III-2 : distribution de vitesse du vent.

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 limité de Betz :

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

En peut écrire aussi :

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

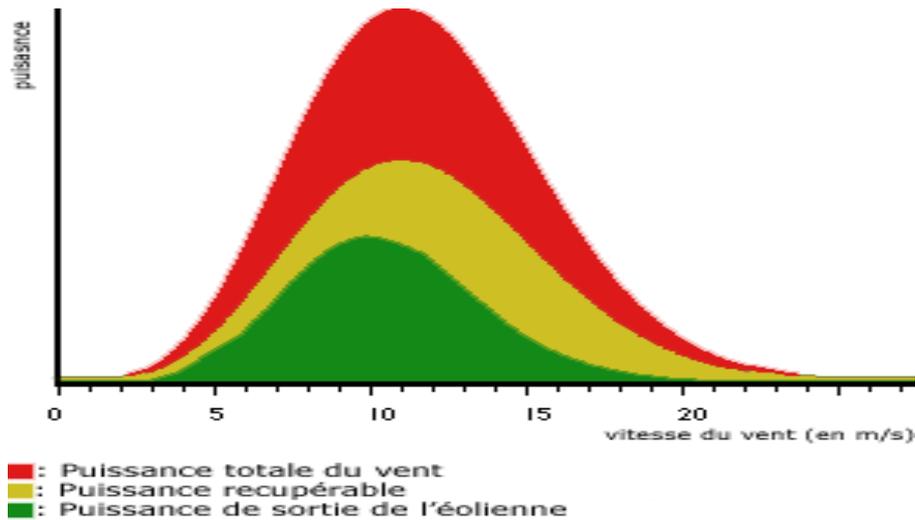


Figure III-3 : l'exploitation de puissance en fonction de la vitesse de vent.

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 :

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

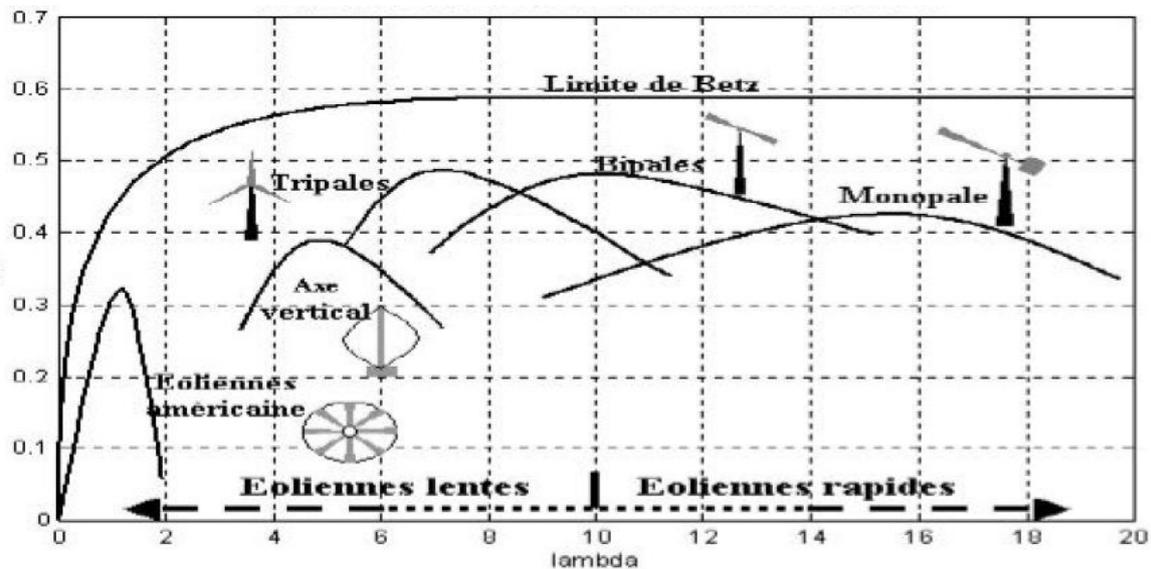


Figure III-4 : coefficient puissance pour différents types d'éoliennes [4].

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 :

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

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) :

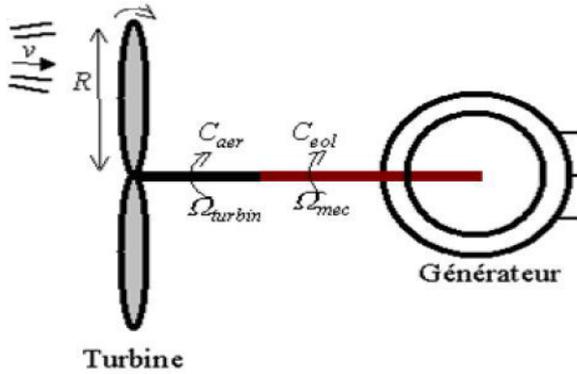


Figure III-5 : schéma simplifié de la turbine éolienne [22].

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) :

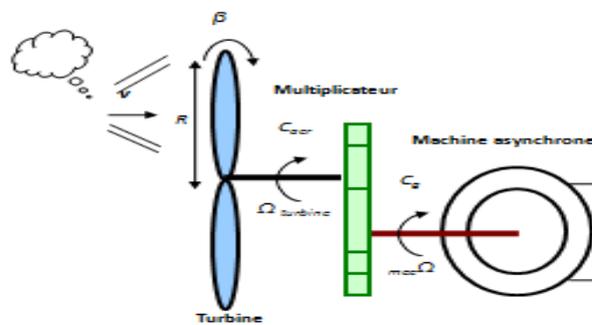


Figure III-6 : schéma simplifié de la turbine éolienne avec multiplicateur.

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{turbine} \quad (II-14)$$

Et donc l'expression du couple mécanique est :

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

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 voilure. C'est pour cela que dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure 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 :

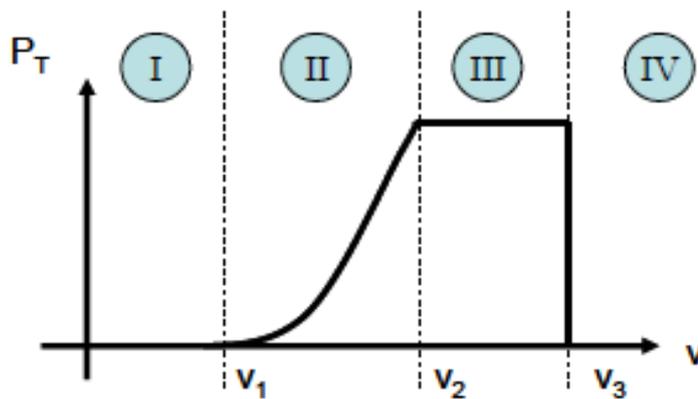


Figure III-7 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

v1: 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.

v2: 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.

v3: 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 sinusoidalement 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 la 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 dehors 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 :

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

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 :

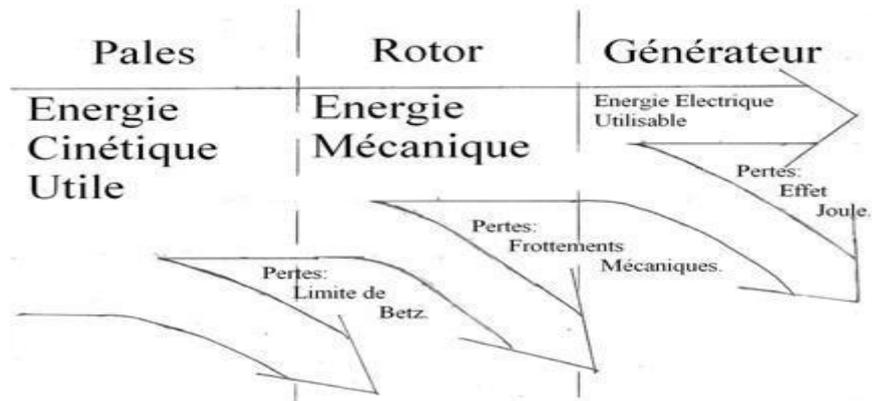


Figure III-8 : bilan de puissance d'une éolienne

II-8 Conclusion :

La conception de 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 mais on trouve aussi des systèmes éoliens utilisant des génératrice à tension continue.

Chapitre IV :

**Conception d'une éolienne à axe
horizontal avec MCC à champ Axial**

IV-1 Introduction

Dans ce travail, on a procédé à la réalisation d'une nouvelle éolienne à petite échelle de 30W qui se base sur une génératrice synchrone à aimants permanents commerciale. L'ancienne éolienne qu'on a réalisée, intègre une génératrice synchrone à aimants permanents type 'home made' MSAPH. Cette éolienne a présenté quelques difficultés de fonctionnement que l'autre génératrice synchrone à aimants permanents commerciale MCCC.

Ce chapitre est donc une étude comparative entre la machine MSAPH réalisé auparavant au laboratoire de recherche LMSE et celle qu'on a pu récupérer du commerce MCCC destinée au pompage fluidique.

Malgré qu'ils existent plusieurs types de génératrices dans le commerce c'est la seule qu'on a pu procurer. L'ancienne génératrice MSAPH qui a été réalisé il y'a deux ans a prouvé quelques performances a été construite selon les motivations suivantes :

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 allons décrire les deux génératrices qui sont utilisées dans la production de l'énergie électrique. Nous allons décrire l'ancienne éolienne et présenter les défauts de fabrication sur la conception mécanique et aussi les défauts de fabrication de la génératrice MSAPH.

IV-2 L'ancienne éolienne intégrant la MSAPH et ses défauts de fabrication :

IV-2-1 Défaut du choix de l'arbre

L'ancienne éolienne à MSAPH repose sur un arbre fileté avec une longueur de 104cm et de diamètre de 1.4 cm. Le but assigné est de faciliter le réglage de l'entrefer du disque du rotor.



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

L'arbre doit être installé avec la génératrice et les pales. Le processus de fixation pour l'installation se fait par des écrous. L'objectif de cet arbre est qu'il devrait permettre de faciliter le processus de changement en cas d'endommagement de la génératrice. Mais malheureusement, on a rencontré des difficultés de fonctionnement.

Parmi les défauts de cet arbre est sa longueur qui est très importante. Le poids des pâles sur une extrémité engendre une courbure de l'arbre suivi d'une déformation engendrant des efforts importants sur les roulements.

Pour remédier à ce problème, nous avons choisi un arbre court de forme lisse avec une longueur de 36 cm et de diamètre de 2.5 cm. Cet arbre a montré une grande rigidité mécanique contre les déformations mécanique et courbure.



Figure IV-2 : 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 sur les deux roulements par des écrous du côté du disque et des pales. Cela permet de faciliter le processus de changement en cas d'endommagement de la génératrice.

IV-2-2 Le support du poids du système(Mat)

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 IV-3 : représente le support du système ou Mat.

IV-2-3 Les roulements supports

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 (24mm), 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. Cette pièce complémentaire a présenté des difficultés de fixation qu'on a enlevée par la suite.



Figure IV-4 : le roulement de l'arbre.

IV-2-4 La plaque support

Pour réaliser une bonne fixation et un meilleur emplacement permettant l'équilibre de la génératrice sur le support, on a utilisé une plaque dont les dimensions ont une longueur de 50cm et une largeur de 23 cm. Cette plaque a été renforcée par des tubes carrés soudés sur la plaque pour éviter les vibrations mécaniques.



Figure IV-5 : Plaque de support.

IV-2-5 Assemblage des pales avec le disque

Les pales ont été procurées d'un ancien ventilateur domestique. Comme nous savons, la plupart des éoliennes horizontales disposent de trois pales (figure IV-6) qui donne le maximum de rendement, de ce fait on a pris le même nombre des pâles pour rassembler notre turbine.

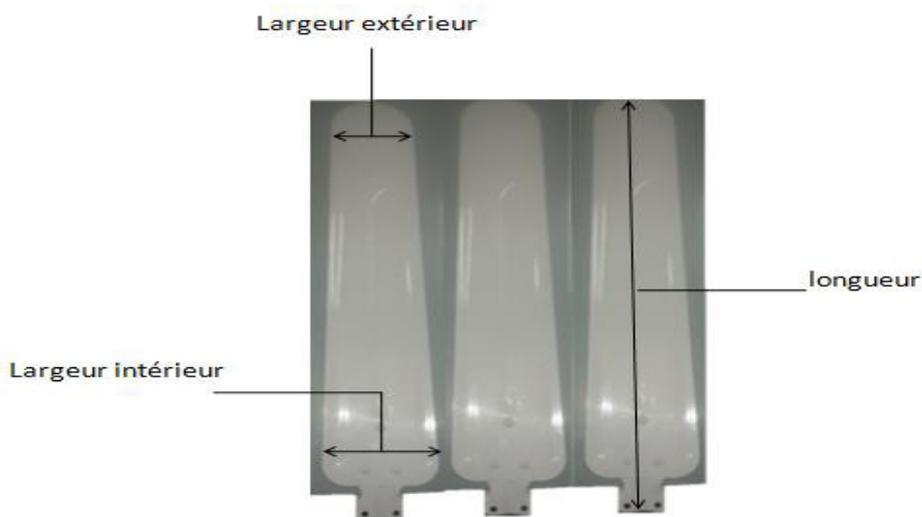


Figure IV-6 : les pales utilisées.

Pour accomplir notre turbine il faut prendre un disque permettant l'assemblage des pâles et possédant les mêmes caractéristiques du disque de génératrice. Ce disque est celui d'une tronçonneuse.

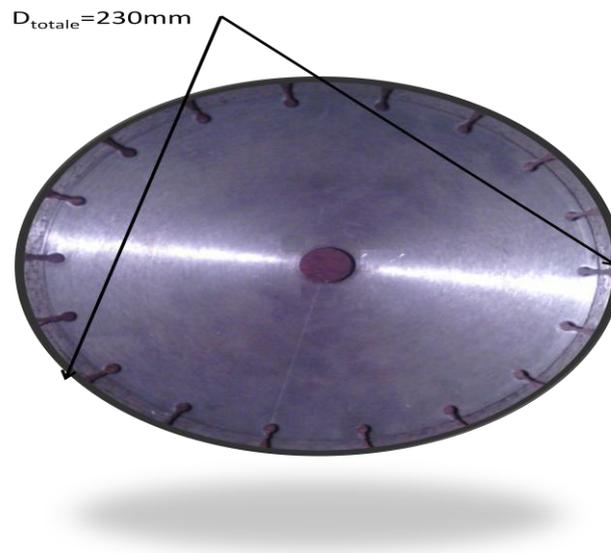


Figure IV-7 : le disque utilisé.

IV-2-6 La génératrice MSAPH et ses défauts de construction

La MSAPH est réalisée par un rotor formé par un disque comportant 12 aimants et un stator formé par un autre disque en bois supportant les 12 bobines :

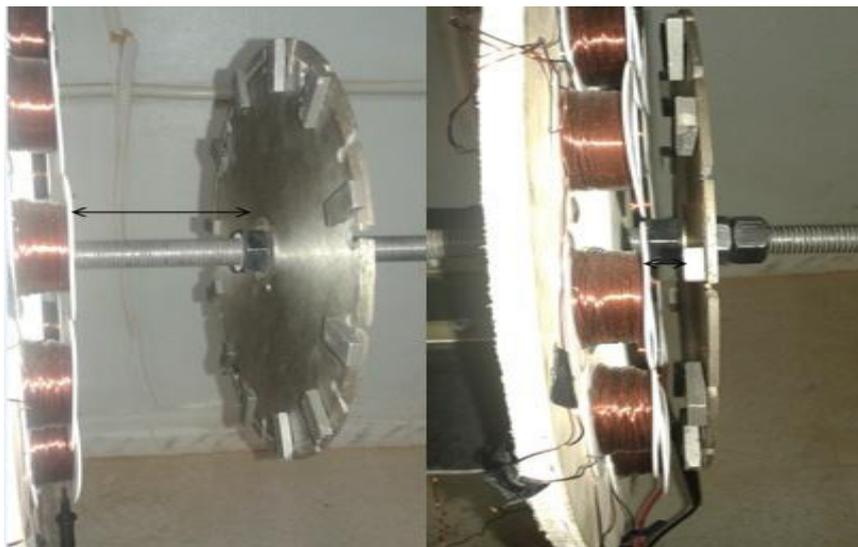


Figure IV-8 : l'entrefer de la génératrice.

IV-2-7 Problème de l'entrefer

L'entrefer 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 1mm pour avoir le maximum de champs. Pour l'ancienne éolienne l'entrefer de la génératrice MSAPH présente des changements d'entrefer lors du fonctionnement de l'éolienne dû à la courbure de l'arbre . Le choix d'une distance de 3 mm pour l'entrefer est un grand handicap pour cette génératrice afin d'éviter toute possibilité de frottement. Dans cet essai, on a fixé le vent pour pouvoir examiner l'effet de l'entrefer sur la tension.

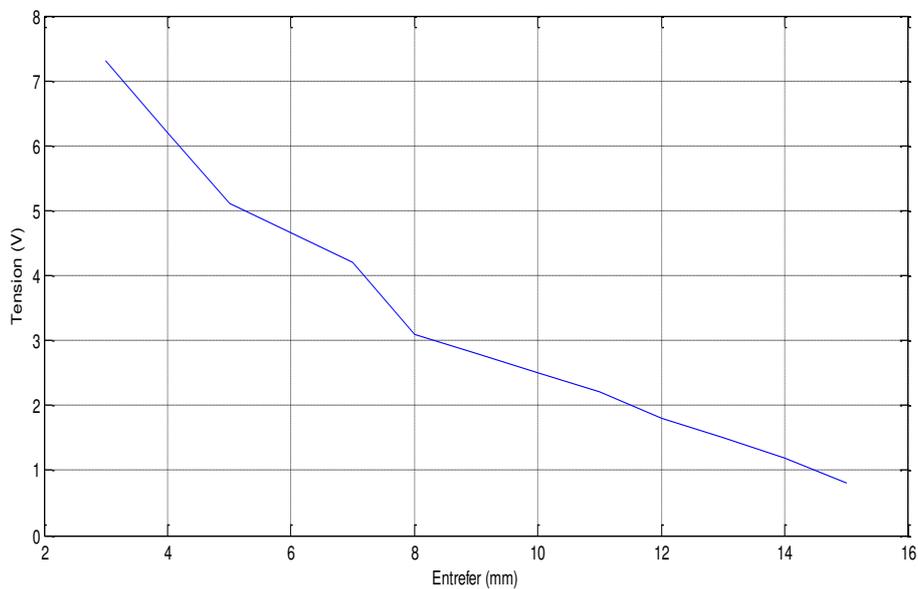


Figure IV-9 : tension en fonction de l'entrefer

On voit que le choix de l'entrefer de 3 mm est un handicap pour l'ancienne génératrice MSAPH .

IV-3 La turbine

Les dimensions de la turbine sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau IV-1 : représente les dimensions de turbine.

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

Le figure (IV-10) représente la turbine :



Figure IV-10 : la turbine de l'éolienne.

On reporte sur les tableaux et les figures suivantes les tensions en fonction de la vitesse du vent et vitesse de rotation de l'ancienne éolienne avec MSAPH.

Tableau IV-2 : les valeurs de mesure.

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 IV-3 : les valeurs de mesure.

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

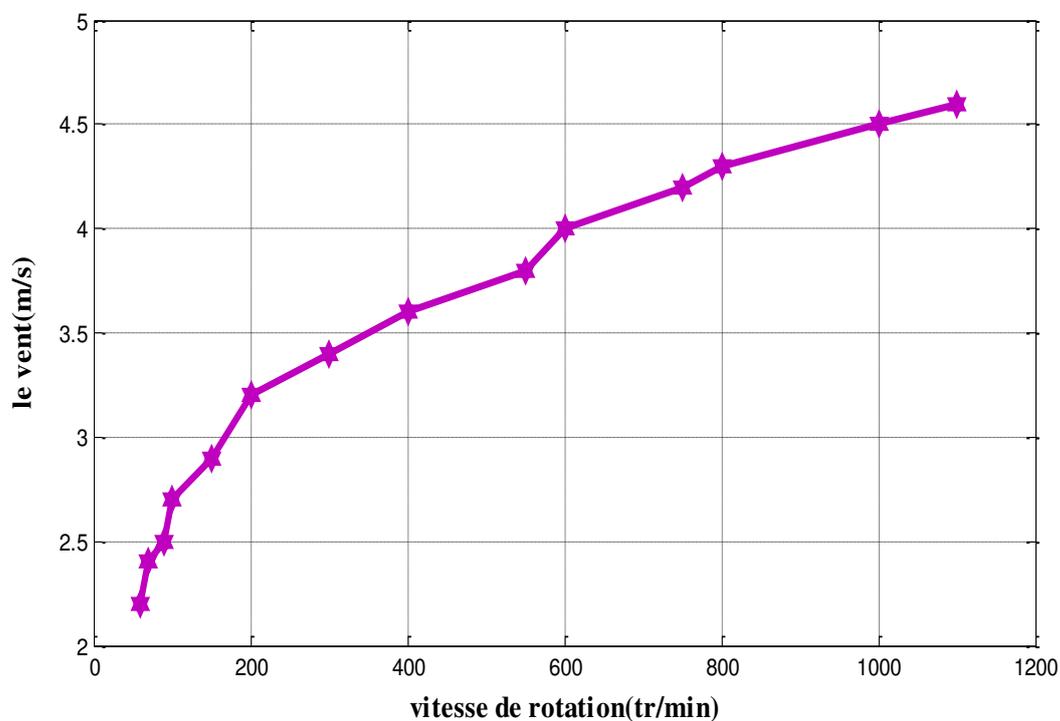


Figure IV-11 : vitesse de rotation en fonction de vitesse de vent.

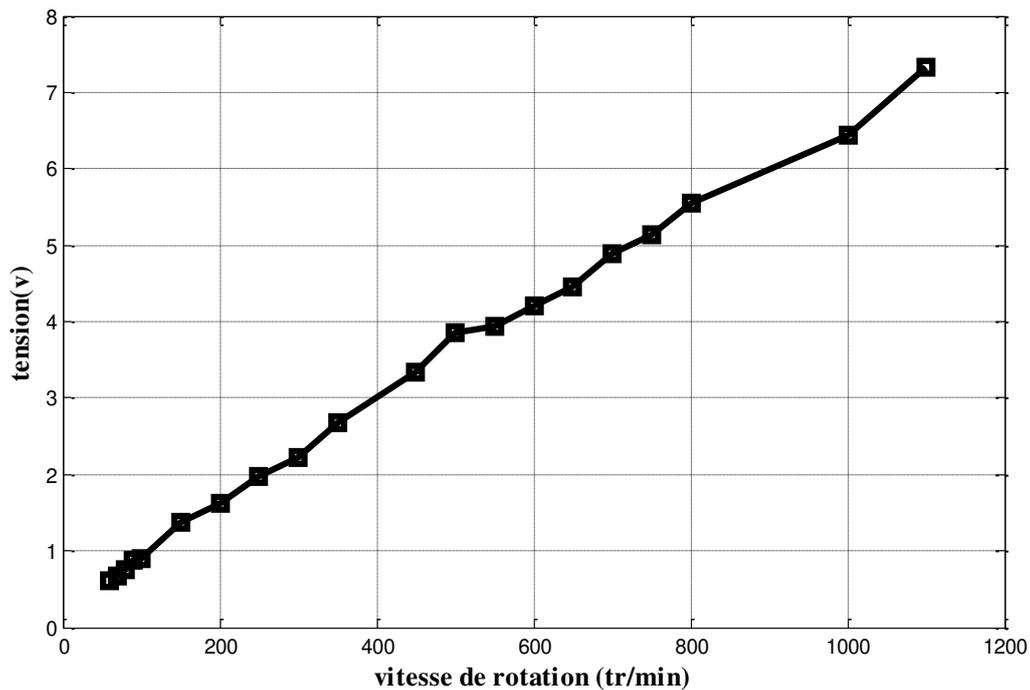


Figure IV-12 : tension en fonction de vitesse de rotation.

IV-4 Les avantages de l'éolienne

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

- Sa taille est modulable selon le projet.
- Il est de conception simple, donc facile à entretenir.
- Il ne demande pas d'excitation.
- Peut être installé dans n'importe quel lieu.

IV-5 La nouvelle éolienne à MCCC

IV-5-1 Préambule

La plus grande contrainte rencontrée dans la fabrication d'un prototype d'éolienne industrielle de petite puissance est la génératrice. Dans ce travail, on a procédé à la réalisation d'une nouvelle éolienne à petite échelle de 30W qui se base sur une génératrice synchrone à aimants permanents commerciale. En premier temps, on a pu récupérer une génératrice d'un ventilateur d'une station de calcul endommagé Figure (IV-13). Cette génératrice de 24V à 1500 tr/mn a été directement soudée à l'une de l'extrémité de l'arbre dont l'autre extrémité contenant le disque et les pales.



Figure IV-13 : Génératrice MSAP d'un ventilateur

Malheureusement la fixation directe de cette génératrice à l'arbre a présenté de grands problèmes durant le fonctionnement. Parmi ces problèmes est premièrement : la courbure de l'arbre qui a finis par endommager le rotor de la génératrice et deuxièmement : la soudure a fini par lâcher. Pour surmonter ces problèmes, on a pensé à un système plus souple et qui est très répandu dans le processus de distribution de mouvement dans les voitures : une croie et des poulies.

Pour surmonter les défauts de l'ancienne génératrice exposée précédemment, on a pu récupérer du commerce une génératrice synchrone à aimant permanent MCCC destinée au pompage fluïdique de marque 'DIAPHRAGM PUMP LF-30L Figure (IV-14).



Figure IV-14 : Génératrice MCC d'une pompe DIAPHRAGM PUMP LF-30L

On a pu relever la caractéristique vitesse de rotation-tension de cette génératrice MCC en mode moteur (Fig. IV-15). Cette caractéristique est linéaire décrivant correctement le comportement de la MCC. La caractéristique en mode génératrice diffère légèrement de cette caractéristique par le passage par zéro (Fig IV-15). Cette génératrice peut atteindre à 3500 tr/mn les 56V. Le tableau III-6 montre les valeurs de mesure de la caractéristique tension vitesse de rotation en régime moteur.

Tableau IV-4 : les valeurs de mesure en régime moteur.

La vitesse de rotation (tr/mn)	Tension (v)
350	10
670	15
1000	20
1300	25
1600	30
1900	35
2200	40
2550	45
2850	50
3150	55
3500	60

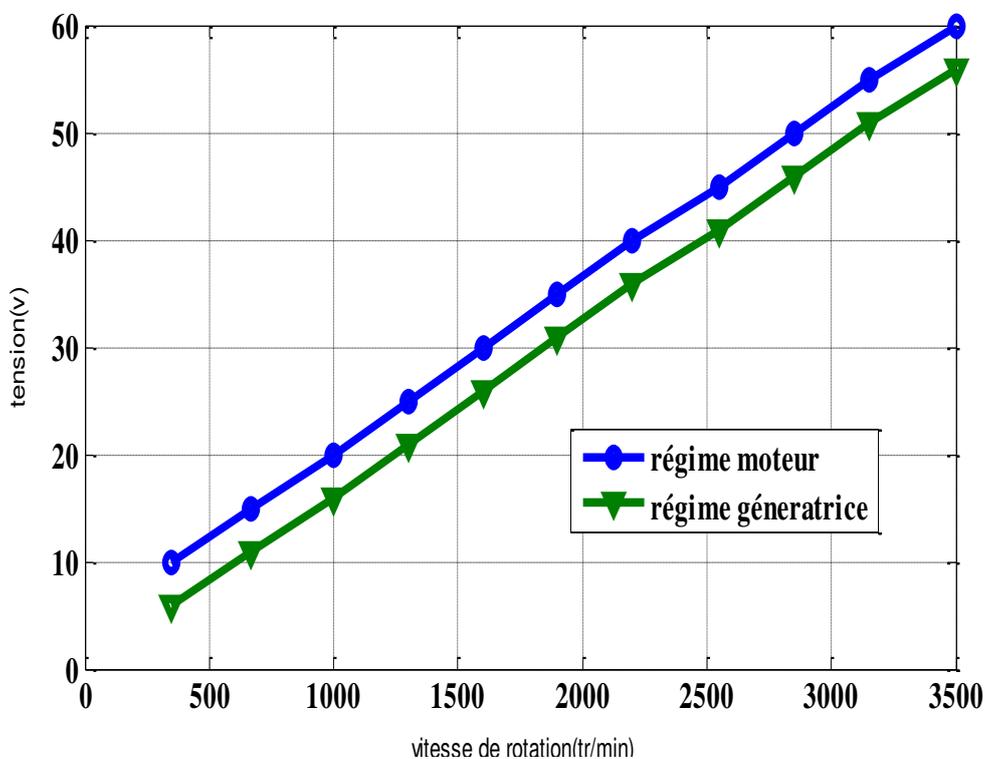


Figure IV-15 : vitesse de rotation en fonction de la tension.

La figure (IV-16) montre la vitesse de rotation en fonction du courant absorbé à vide en régime moteur. Ce courant ne dépasse pas le 0.1A dans le cas à vide et en régime nominal elle peut atteindre les 0.5A donnant une puissance de 30W.

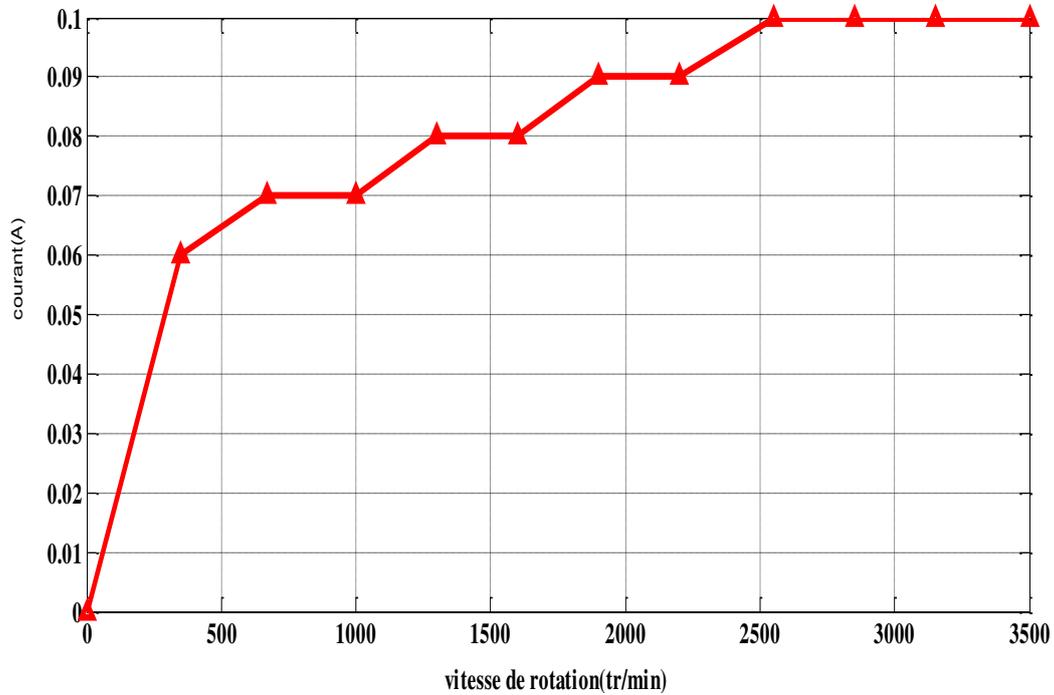


Figure IV-16 : Vitesse de rotation en fonction du courant absorbé en régime moteur.

Le système de fixation de cette génératrice se fait à travers une croie et deux poulies (figure IV-17). La croie utilisée est une croie dentée d'alternateur 'Peugeot 208' de longueur 20 cm.



Figure IV-17 : Croie dentée d'alternateur.

La figure (IV-18) montre les deux poulies utilisées pour le transfert de mouvement de l'arbre à la génératrice. La poulie à gauche est celle d'un nettoyeur à haute pression 'carcher' est fixée à l'arbre et la poulie à droite est fixé à la génératrice, elle a été fabriquée chez le tourneur puisque le diamètre interne est très petit.



Figure IV-18 : Poulie à gauche est fixée sur l'arbre et la poulie à droite est fixé à la génératrice.

La figure (IV- 19) montre la génératrice MCC couplée à la turbine. La génératrice peut se déplacer sur une glissière. Le transfert de mouvement a montré une grande souplesse.

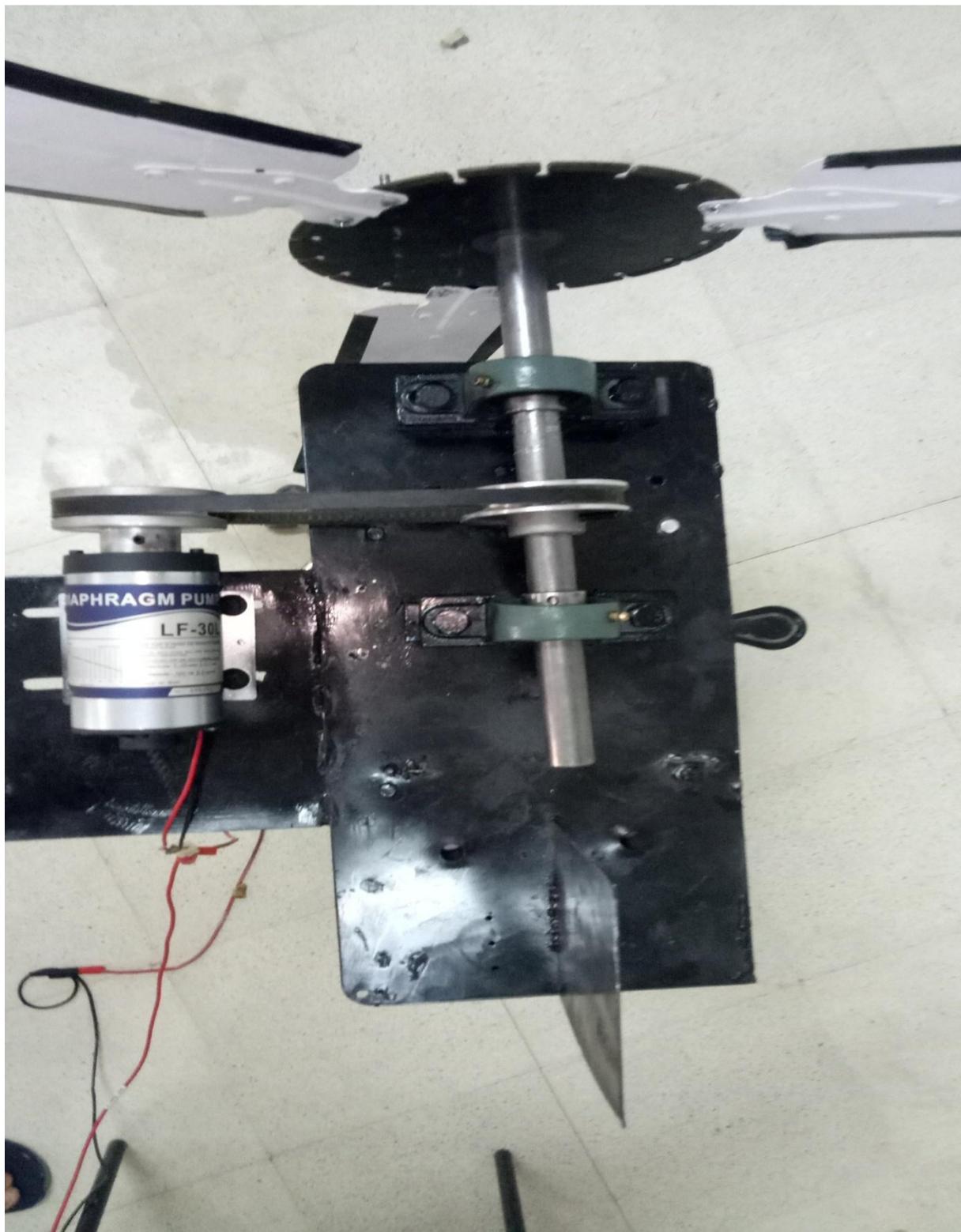


Figure IV-19: Génératrice MCC couplée à la turbine

L'ensemble : génératrice, croie, poulies arbre, disque et pales sont assemblés pour donner l'éolienne (figure IV-20).



Figure IV-20 : L'ensemble : génératrice, croie, poulies arbre, disque et pales sont assemblés pour donner l'éolienne.

Les résultats obtenus par cette éolienne sont acceptables et meilleur que l'ancienne éolienne puisque l'ancienne éolienne est handicapée par la grande distance de l'entrefer qui est de 3 mm (figure IV-21). Nous avons la maîtrise de conception et de réalisation de ce type d'éoliennes de faible puissance destiné à une utilisation domestique et de simple réglage.

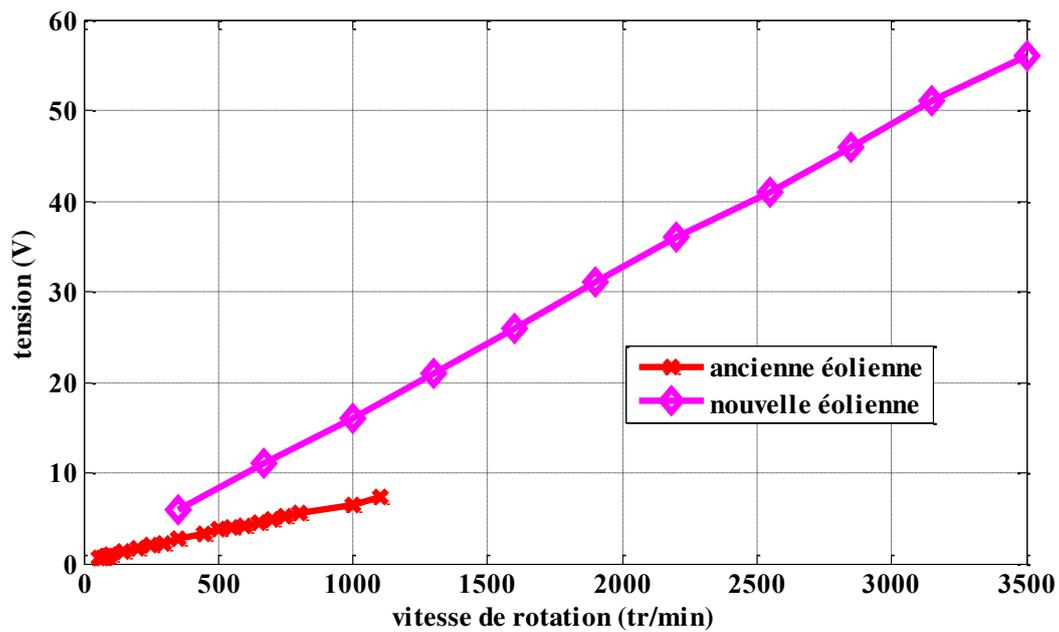
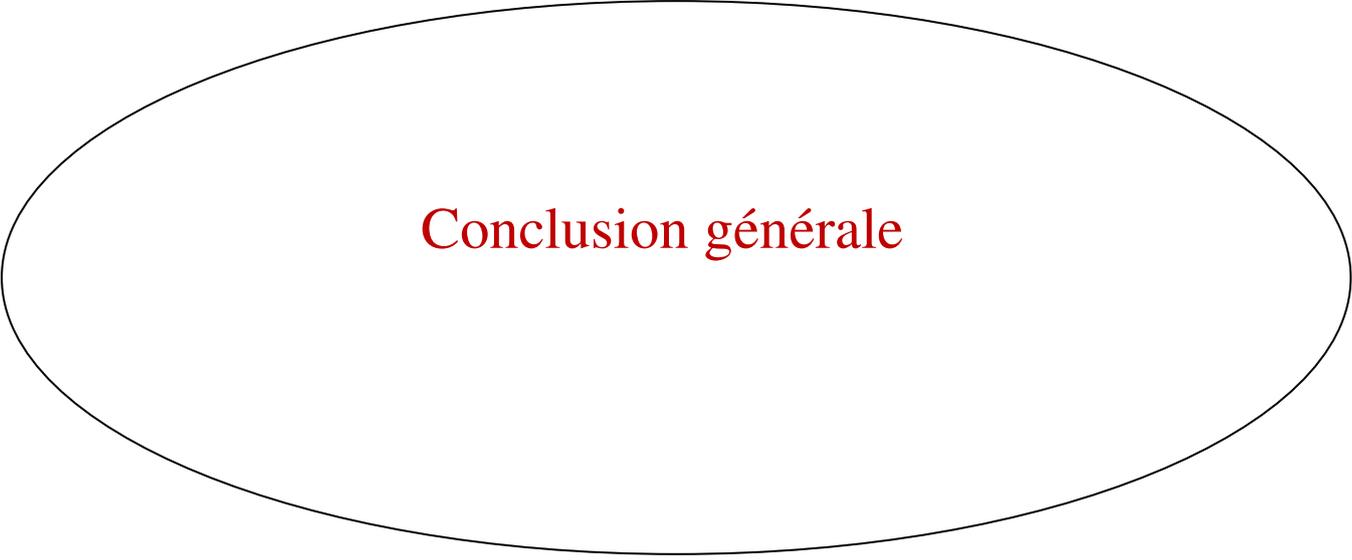


Figure IV-21 : La tension en fonction de la vitesse de rotation dans la nouvelle éolienne et l'ancienne éolienne.

IV-6 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 et de simple réglage.

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.



Conclusion générale

Tous les pays ne bénéficient pas du même potentiel éolien. A l'avenir, les innovations technologiques, le développement des réseaux intelligents et les solutions de stockage de l'électricité pourraient également faire évoluer la distribution.

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.

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 allée 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 mais on trouve aussi des systèmes éoliens utilisant des génératrice à tension continu.

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.

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

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

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’uneéolienne et les solutions technologiques deliaisons 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 :nicolaslaverdure, 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. Kassaidjdarene .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 electriqueeoliennes autonomes». Soutenu le 23 mai 2010.

[9] universiteferhatabbas — setif. Mémoire de magister présenté par bencherifbilel. 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 : toualbelkacem, 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]metatlasamir«optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à based'une mada » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique'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 », ieeecanadianreview - summer / été 2002, pp. 1-5.

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

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

[18] université des sciences et technologies de lille, Présenté par : arnanddavigny, 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 : mayoufmassoud, 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 mmehamechasamira, Sujet« etude et commande d'une eolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents » le 25/06/2013.

[23] Mayouf Massoud, Sujet« contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent »Université de Batna, mémoire de magister option énergie renouvelable, soutenu le 13/02/2008.

[24] OOREKA .guide de l'éolienne. Site : www.ooreka.com

[25] Cherfia Naim.Sujet « conversion d'énergie produit par générateur éolienne », Université de Constantine thèse de magister en électrotechnique Présentépar : le 7/6/2010.

[26]<https://www.connaissancedesenergies.org/etat-des-lieux-du-developpement-de-leolien-dans-le-monde-170426>