

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة بادجي مختار - عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

*Analyse Pour Le Choix Technique D'une
Machine Electrique Associée à un
Aérogénérateur.*

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromécanique

Spécialité: Electromécanique

Par : Bouguessir Abdelkarim

DEVANT LE JURY

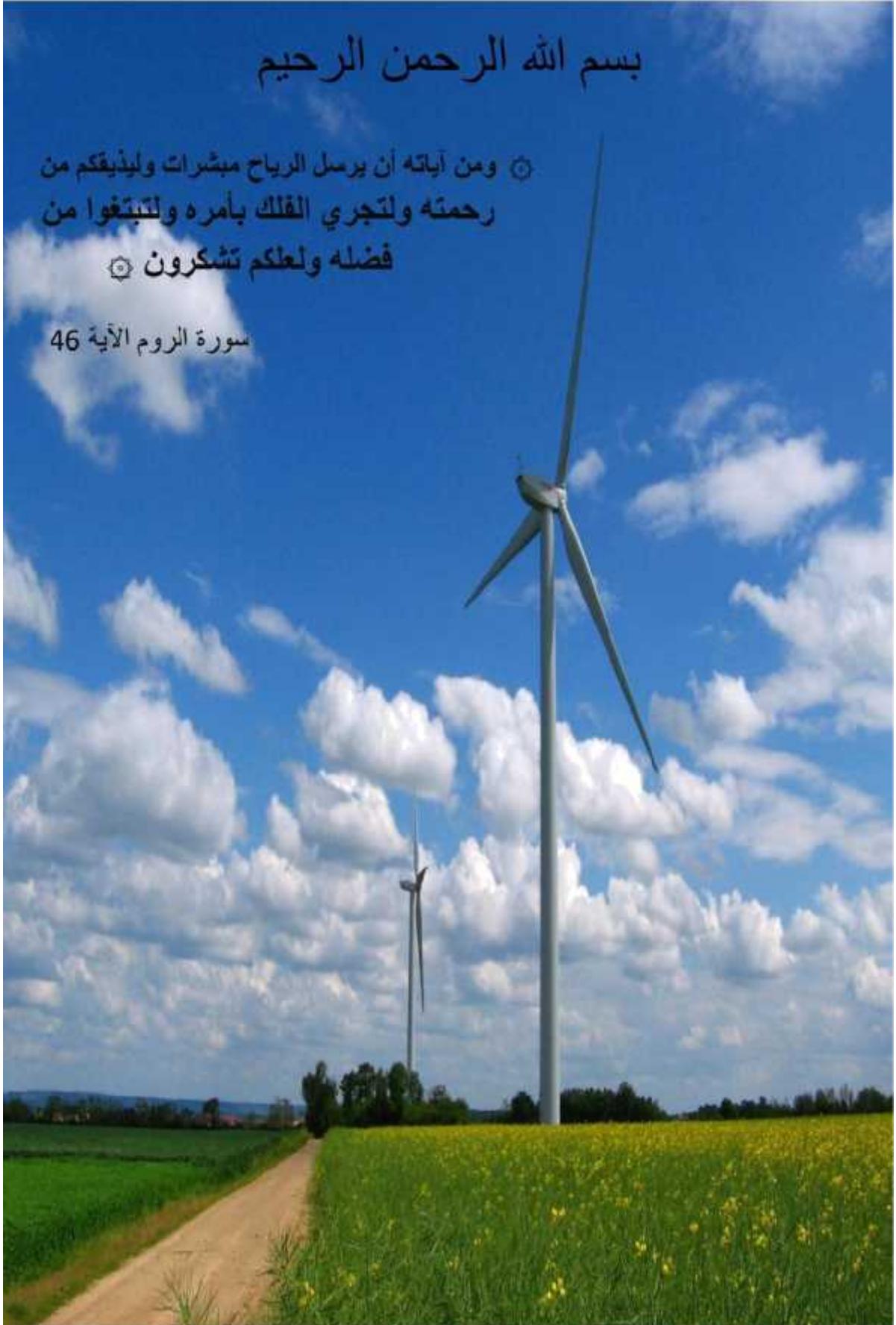
Président :	M. BELHAMRA A.	U.B.M. Annaba
Directeur de mémoire :	M. HAMDAOUI R.	U.B.M. Annaba
Examineurs :	M. BOUAKAZ M.	U.B.M. Annaba
	M. BOUGHABA M.	U.B.M. Annaba

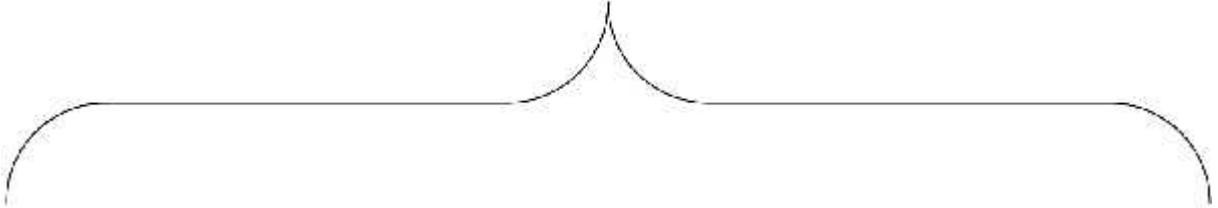
Année : 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ومن آياته أن يرسل الرياح مبشرات وليذيقكم من
رحمته ولتجري الفلك بأمره ولتبتغوا من
فضله ولعلكم تشكرون

سورة الروم الآية 46





REMERCIEMENTS

Grace à dieu, nous avons terminé ce modeste Travail, qu'absolument à remercier :

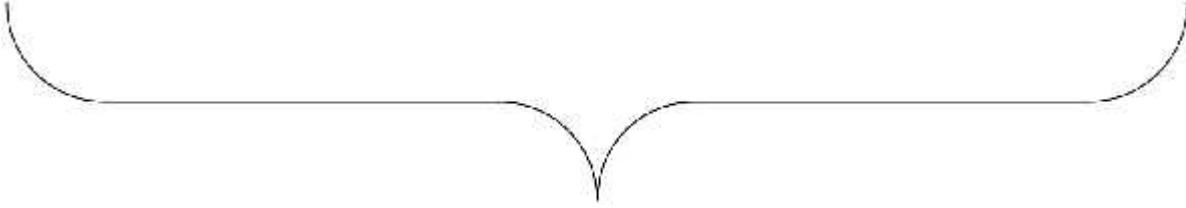
Tous ceux qui ont participé, aidé et encourager à l'élaboration de près ou de loin.

Nos remerciement les plus vifs sont adressés au

M. HAMDAOUI RAOUF

Pour avoir accepté de diriger ce travail par esprit ouvert, sa disponibilité et ses conseils précieux,

Nous tenons également à exprimer de membres de jurys Qui nous ont honorés par leurs présences en tant que membres de jury. En fin, sans oublier de remercier tous ceux qui nous ont encouragés.





- *Je dédie ce modeste travail à ma source de bonheur*
- *Mes plus chères parents ma mère et mon père.*
 - *A mes sœurs.*
 - *A toute ma grande famille.*
 - *A mes chères amies.*
- *Mes collègues de promotion de master 02 électromécanique.*

Bouguessir Abdelkarim

Résumé :

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques : météorologie pour l'étude du comportement du vent, mécanique et chimie pour les contraintes et la composition des divers matériaux utilisés dans l'aérogénérateur, mécanique des fluides pour l'effet des masses d'air en mouvement sur les pales, électrotechnique pour la conversion électromécanique et l'adaptation de l'énergie électrique et automatique pour la commande de la turbine et de génératrice liée à cette dernière.

Le travail présenté dans ce mémoire présente une analyse de différents types de machines électriques afin d'aboutir à la génératrice asynchrone à double alimentation comme le choix technique le plus judicieux à associer dans un aérogénérateur étant donné qu'elle offre plusieurs avantages et des capacités de puissances actives et réactives dans les quatre quadrants. Elle entraîne également des coûts de conversion de puissance faibles et des pertes d'énergie minimales.

Mots-clés : Eolienne, Analyse, Machine asynchrone à double alimentation, Dimensionnement d'une chaîne, Choix technique.

Liste des figures :

Figure 1.1. Premier moulins à vent aux Pays-Bas.....	2
Figure 1.2. Moulin à vent de Vrines à Sainte-Radegonde (photo Père Igor).....	2
Figure 1.3. La puissance installée du parc éolien mondial a augmenté de 9,6% en 2018. Ici, le parc de Turkana au Kenya.....	3
Figure 1.4. Puissance éolienne cumulée dans le monde en GW.....	4
Figure 1.5. Puissance installée éolienne entre 2000 et 2018.....	4
Figure 1.6. Les vitesses moyennes des sites les plus ventés en Algérie.....	5
Figure 1.7. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	5
Figure 1.8. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps).....	7
Figure 1.9. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	9
Figure 1.10. Principaux organes du système de conversion éolien.....	9
Figure 1.11. Applications des petites éoliennes.....	10
Figure 1.12. Applications des grandes éoliennes (parcs éoliens).....	10
Figure 1.13. Rotor de Savonius.....	11
Figure 1.14. Rotor de Darrieus.....	11
Figure 1.15. Les éoliennes à axe horizontal.....	12
Figure 1.16. Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	13
Figure 1.17. Structure d'une éolienne plus détaillée.....	14
Figure 2.1. Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	16
Figure 2.2. Un moyeu.....	17
Figure 2.3. Une nacelle.....	17
Figure 2.4. Un multiplicateur.....	18
Figure 2.5. Une génératrice.....	19
Figure 2.6. Système de contrôle-commande.....	19
Figure 2.7. Système d'orientation.....	20
Figure 2.8. Un anémomètre associé à une girouette.....	20
Figure 2.9. Eoliennes à tour en treillis et à tour tubulaire.....	21
Figure 2.10. Principe de la Conversion de l'énergie.....	22
Figure 2.11. Portance en fonction de l'angle d'attaque et décrochage.....	22
Figure 2.12. Diagrammes de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	23
Figure 2.13. Evolution de la puissance du parc éolienne 2001-2018.....	25
Figure 2.14. Les composants d'un parc éolien.....	25
Figure 2.15. Installation d'un parc éolien.....	26
Figure 3.1. Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.....	27

Figure 3.2. Interface d'électronique de puissance.....	28
Figure 3.3. Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.....	29
Figure 3.4. Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	30
Figure 3.5. Machine asynchrone à double alimentation.....	31
Figure 3.6. Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur– onduleur.....	32
Figure 3.7. Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless".....	32
Figure 3.8. Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	33
Figure 3.9. Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement").....	34
Figure 3.10. MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	34
Figure 3.11. Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique.....	35
Figure 3.12. MADA, structure Kramer.....	35
Figure 3.13. Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.....	36
Figure 3.14. Principe de fonctionnement du cyclo convertisseur.....	36
Figure 3.15. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	37
Figure 3.16. Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – Onduleur MLI.....	38
Figure 3.17. Machine à champ radial classique et machine discoïde à champ axial.....	39
Figure 3.18. Etage d'une machine synchrone à aimants permanents discoïde.....	40
Figure 3.19. Machine synchrone Vernier à aimants.....	41
Figure 3.20. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique Et la vitesse du vent.....	42
Figure 4.1. Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	43
Figure 4.2. Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.....	44
Figure 4.3. Structure de la MADA sans balais.....	44
Figure 4.4. Structure en cascade de deux machines asynchrones.....	45
Figure 4.5. Classification des machines électriques à double alimentation.....	45
Figure 4.6. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	47
Figure 4.7. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	48
Figure 4.8. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	48
Figure 4.9. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	49
Figure 4.10. Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.....	50
Figure 4.11. Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cyclo convertisseur.....	50
Figure 4.12. Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cyclo convertisseurs.....	51
Figure 4.13. Représentation schématique de la machine asynchrone double alimentée.....	53
Figure 4.14. MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances.....	53

Figure 5.1. Description d'une pale d'éolienne.57

Figure 5.2. Exemples de structures de pale.....59

Figure 5.3. Tube de courant autour d'une éolienne.....62

Figure 5.4. Coefficient de puissance en fonction de rapport de vitesse.....63

Figure 5.5. Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne.....64

Figure 5.6. Structure d'un multiplicateur.....66

Liste des tableaux :

Tableau 1.1. Evoluton de la production d'électricité éolienne (TWh)4

Tableau 1.2. Classification des turbines éoliennes9

Tableau 1.3. Avantages et inconvénients d'éolienne à axe vertical.....11

Tableau 1.4. Avantages et inconvénients d'éolienne à axe horizontal..... 12

Tableau 1.5. Noms des composants d'une éolienne.....14

*Tableau 4.1. Les conditions mathématiques pour chaque mode de fonctionnement de la
MADA..... 49*

Tableau 5.1. La vitesse spécifique à partir de nombre de vitesse.....66

SOMMAIRE

Résumé

Liste des figures et des tableaux

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1. Approche théorique et de l'art.

1.1. Introduction	1
1.2. Energie éolienne	1
1.3. L'éolienne en Algérie	5
1.4. Gisement éolien en Algérie	6
1.5. Conversion de l'énergie dans un système éolien	8
1.6. Classification en puissances des éoliennes	9
1.7. Les différents types d'éoliennes	10
1.8. Descriptif éolienne	13
1.9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	15

Chapitre 2. Constitution et fonctionnement des aérogénérateurs.

2.1. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :.....	16
2.2. Principe de fonctionnement :.....	21
2.3. Dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :.....	24
2.4. Principaux critères de choix d'une éolienne :.....	24
2.5. Emplacement des parcs éoliens :.....	25

Chapitre 3. Analyse de différentes génératrices et des convertisseurs.

3.1. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	27
3.2. Types de machines électriques	27
3.3. La Production optimale d'énergie :.....	27
3.4. Etat de l'art sur les déférant systèmes utilisant les machines asynchrones et synchrone :.....	28
3.5. L'intérêt de la vitesse variable :.....	41

Chapitre 4. La machine asynchrone à double alimentation.

4.1. Introduction :.....43
4.2. Machine asynchrone à double alimentation:.....43
4.3. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :.....47
4.4. Aperçus sur les configurations de la MADA à rotor bobiné :.....49
4.5. Domaines d’application de la MADA :.....52
4.6. Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA :.....52
4.7. Les différents travaux réalisés sur MADA :.....53
4.8. Avantages et inconvénients de la MADA :.....54
4.9. Conclusion.....55

Chapitre 5. Dimensionnement d’une chaîne éolienne.

5.1. Introduction.....57
5.2. Description de l’aérodynamique d’une pale.....57
5.3. Etude du multiplicateur.....66
5.4. Dimensionnement de la génératrice.....

Conclusion Générale

Bibliographie

INTRODUCTION GENERALE

Le rayonnement solaire et la rotation de notre planète produisent des différences de températures et de pression sur la surface du globe qui se traduisent localement par la mise en mouvement de masses d'air, formant ainsi les vents.

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Ce n'est qu'au moyen âge qu'ils font leur apparition en Europe et leur utilisation se répond rapidement.

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur est basée sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie.

Les recherches en cours pourraient lui laisser pendant encore de nombreuses années cette confortable avancée. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique a mené des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

C'est dans ce contexte que je présente aujourd'hui ce modeste mémoire structuré en cinq chapitres dans le but de traiter une problématique imputée directement à la conception, le choix et le dimensionnement de ces systèmes de conversion d'énergie.

Il s'agit de faire le bon choix du bon générateur électrique à associer avec la bonne turbine éolienne dans le bon site géographique de bon potentiel de vent.

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques notions des turbines éoliennes, la perspective de cette énergie au monde, ainsi que le gisement éolien en Algérie.

Le deuxième chapitre est consacré à la constitution et fonctionnement des aérogénérateurs.

Au cours du troisième chapitre nous procédons à une étude comparative des machines électriques et des convertisseurs impliqués dans la production de l'énergie éolienne.

Le quatrième chapitre présente la description et la structure de la machine asynchrone à double alimentation ainsi que le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients de ce type de machine.

Le dernier chapitre traite un cas concret de turbine éolienne afin de valider l'analyse technique réalisée en dimensionnant et calculant une installation réelle.

Le mémoire s'achève automatiquement par une conclusion générale.

1.1. Introduction:

Pendant des siècles, les éoliennes ont été utilisées pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent. En 1888, Charles F. Brush construisait une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries. La première éolienne industrielle couplée à un générateur d'électricité a été développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour la production l'hydrogène par électrolyse. Quelques années plus tard, il créa l'éolienne Lykkegard, dont 72 exemplaires étaient en production en 1908.

En raison de la nature fluctuante du vent, l'éolienne ne peut être considérée que comme une source d'énergie complémentaire ou d'appoint à celles dites classiques.

Actuellement, plusieurs pays se sont résolument engagés dans l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique. En Algérie, le régime de vent étant modéré (2 à 6 m/s), ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau et l'alimentation en électricité des petits regroupements domestiques, particulièrement dans les Hauts Plateaux [1].

Dans ce chapitre on va aborder, d'une manière générale, les différents types d'éoliennes et les éléments composants d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, et leur principe de fonctionnement.

1.2. Energie éolienne :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès.

Actuellement, plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (Capteurs à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Ils existent de nombreux dispositifs, qui pour la plupart, sont à base de machines synchrones ou asynchrones.

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

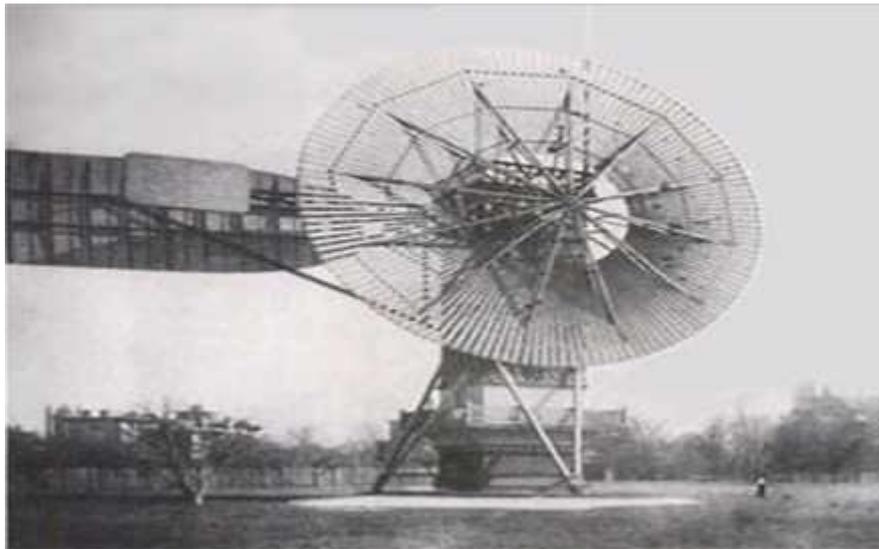


Figure 1.1. Premier moulins à vent aux Pays-Bas.



Figure 1.2. Moulin à vent de Vrines à Sainte-Radegonde (photo Père Igor).

1.2.1. Contexte historique :

Très tôt, dans l'histoire des techniques [2], le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...).

La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de

machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [3].

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 kW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé) [2].

Ainsi l'histoire de l'énergie éolienne a pour une grande partie été influencée par des facteurs extérieurs, tels l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée d'électricité, la crise énergétique de 1973. Enfin plus récemment, les accords de Kyoto devraient être le moteur principal du développement des éoliennes [4].

1.2.2. Perspectives de l'énergie éolienne dans le monde (au terre et au mer) :



Figure 1.3. La puissance installée du parc éolien mondial a augmenté de 9,6% en 2018. Ici, le parc de Turkana au Kenya.

Au niveau mondial, les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) prévoient le maintien d'une croissance de l'éolienne, conduisant à un parc installé de près de 63,8 GW en 2015 contre 38,5 GW en 2009.

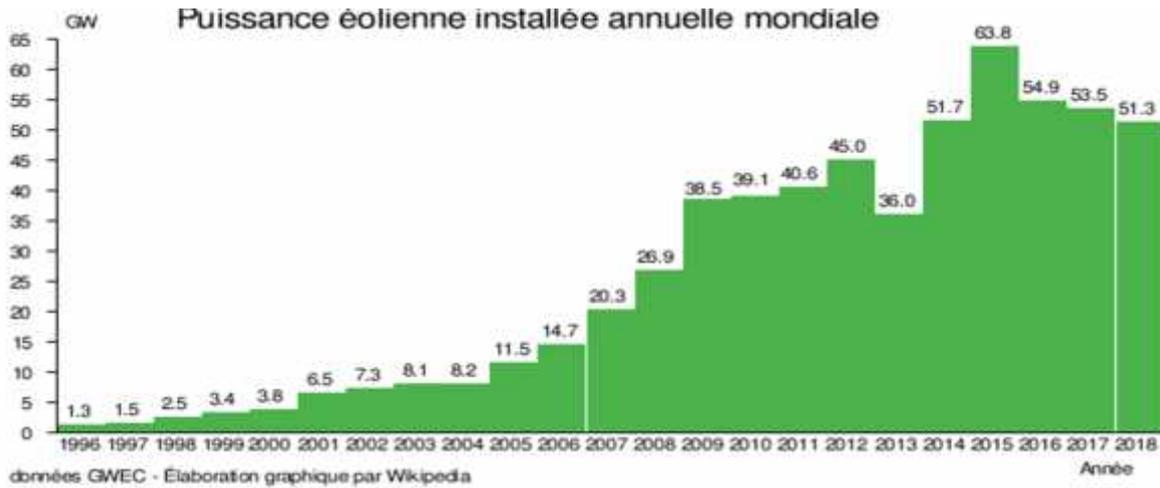


Figure 1.4. Puissance éolienne cumulée dans le monde en GW.

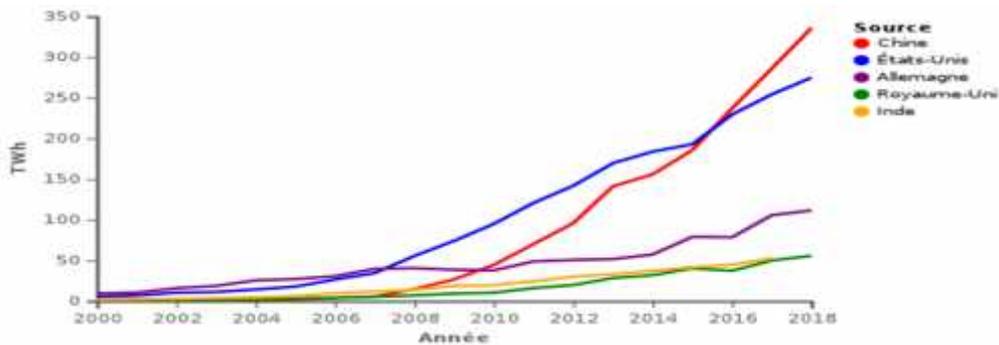


Figure 1.5. Puissance installée éolienne entre 2000 et 2018.

Année	1990	2000	2010	2015	2016	2016 (%)	2017	2018
<u>Chine</u>	0,002	0,6	44,6	185,8	237,1	24,8	286,1	366
<u>États-Unis</u>	3,1	5,6	95,1	193,0	229,5	24,0	254,3	274,95
<u>Allemagne</u>	0,07	9,4	37,8	79,2	78,6	8,2	105,7	111,6
<u>Espagne</u>	0,014	4,7	44,3	49,3	48,9	5,1	49,1	50,8
<u>Brésil</u>	-	0,002	2,2	21,6	33,5	3,5	42,7	-
<u>Canada</u>	-	0,3	8,7	26,4	30,8	3,2	32,5	-
<u>France</u>	-	0,08	9,9	21,2	21,4	2,2	24,7	27,9
<u>Suède</u>	0,006	0,5	3,5	16,3	15,5	1,6	17,6	16,7
<u>Danemark</u>	0,6	4,2	7,8	14,1	12,8	1,3	14,8	13,9
<u>Australie</u>	0	0,06	5,1	11,5	12,2	1,3	12,7	-

Tableau 1.1. Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh).

1.3. L'éolienne en Algérie :

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar.



Figure 1.6. Les vitesses moyennes des sites les plus ventés en Algérie [5].

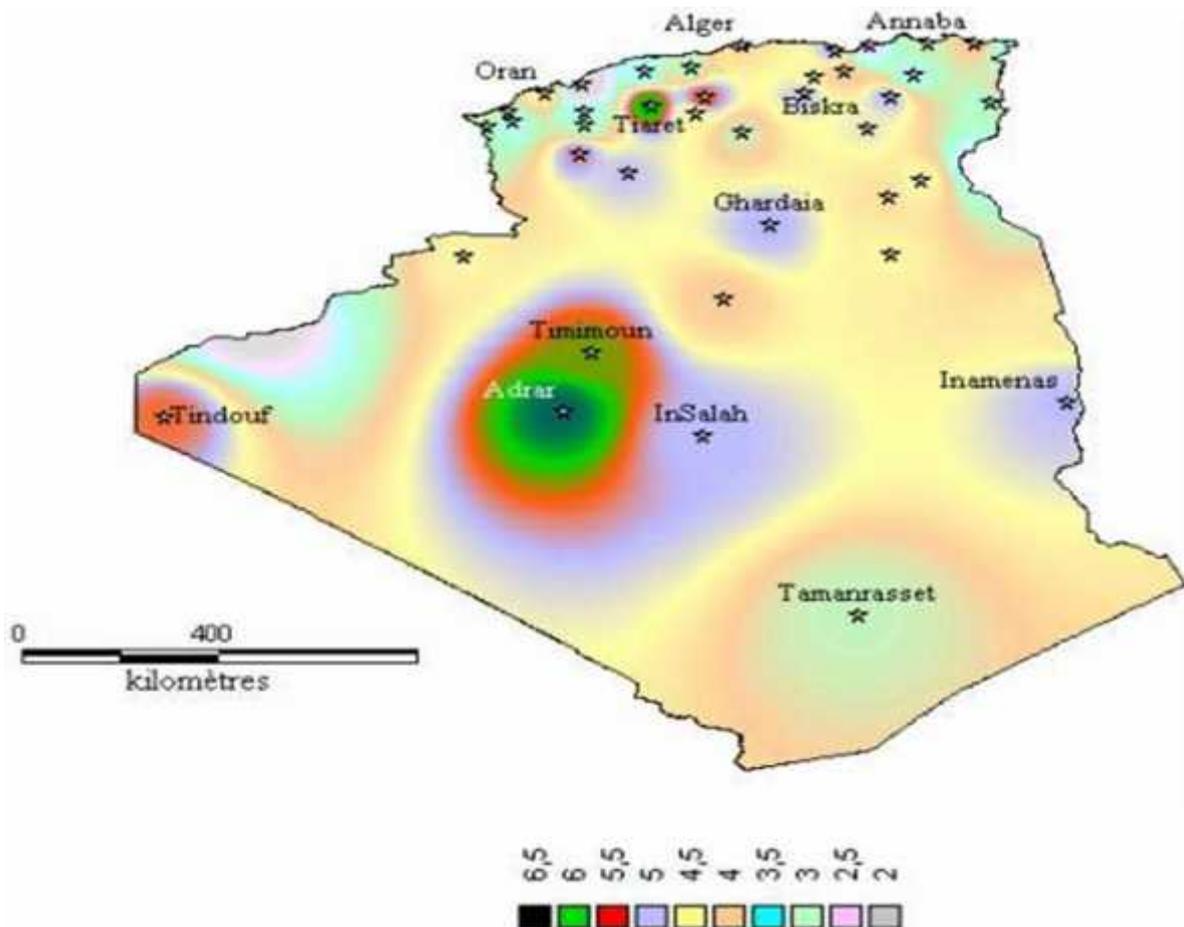


Figure 1.7. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie. Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes:

- ◇ deux zones sur le littoral
- ◇ trois zones sur les hauts plateaux
- ◇ quatre zones en sites sahariens.

1.4. Gisement éolien en Algérie :

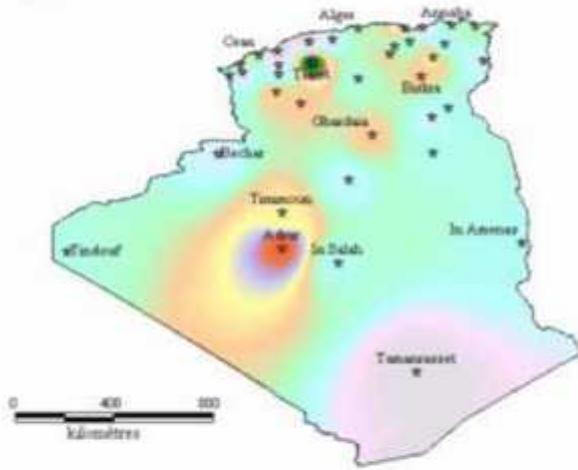
En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes.

Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peut élever. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran, Bejaia et Annaba sur les hauts plateaux de Tiaret ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud.

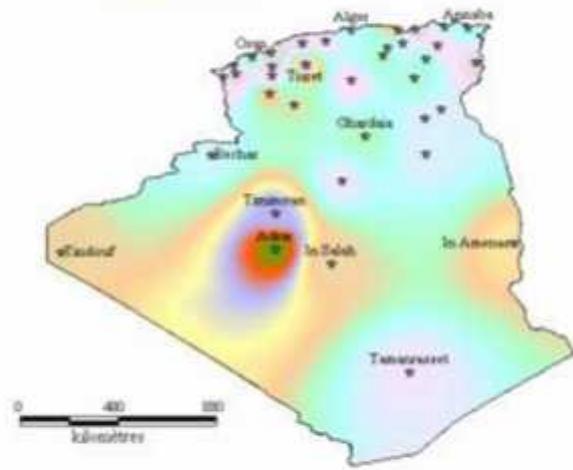
Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en **figure 1.8.** (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l'année.

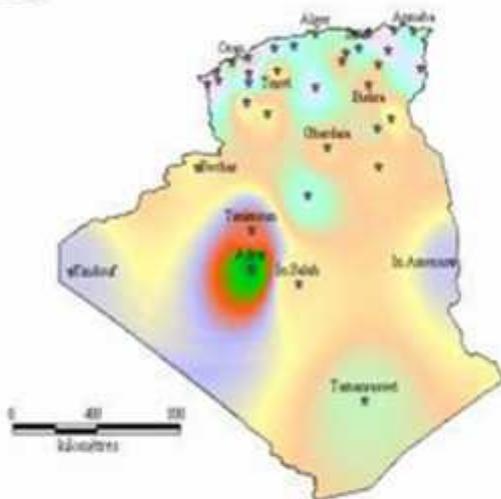
Hivers



Automne



Eté



Printemps

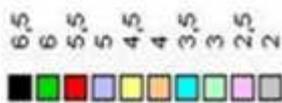
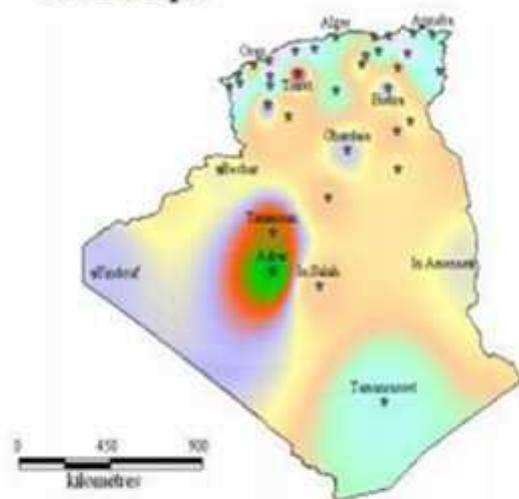


Figure 1.8. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps)[6].

1.5. Conversion de l'énergie dans un système éolien :

Un aérogénérateur (éolienne), est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice **figure 1.9**.

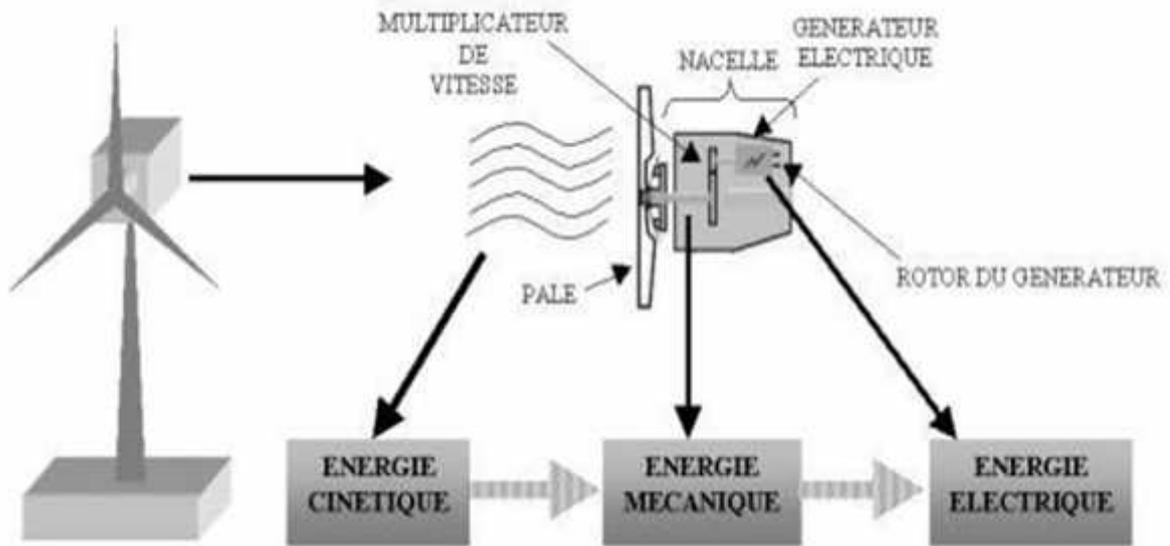


Figure 1.9. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

La production de l'énergie éolienne (travers l'aérogénérateur) est basée sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées au rotor d'un générateur. Lorsque le vent est suffisamment fort, environs 3m/s, les pales tournent et entraînent à travers un multiplicateur un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable, ce qui explique l'engouement fort pour cette nouvelle technologie. Les recherches en cours pourraient lui laisser encore, pendant de nombreuses années, cette confortable avancée.

Le Système de Conversion Eolien (SCE) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et d'un réseau électrique voir figure **Figure.1.10**.

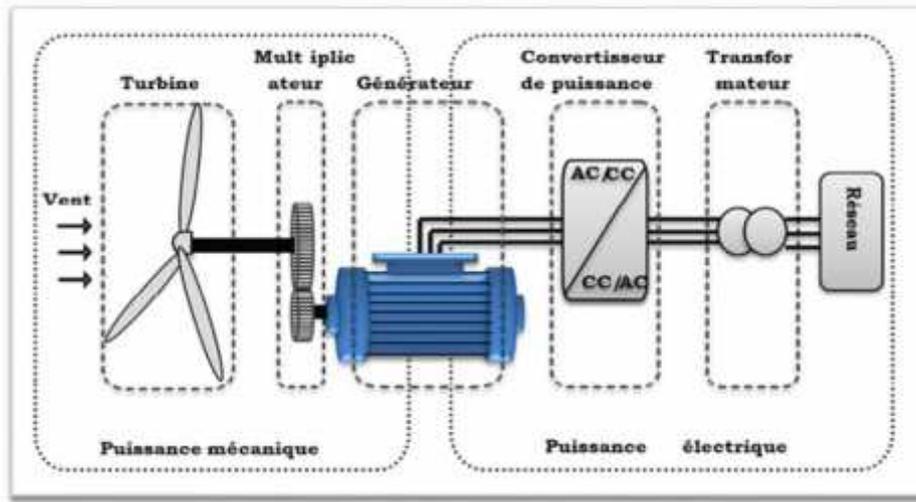


Figure 1.10. Principaux organes du système de conversion éolien [7].

1.6. Classification en puissances des éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau 1-2 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIAMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	2 m à 12 m	1 KW à 36 KW
Moyenne	12 m à 35 m	De 36 KW à 350 KW
Grande	35 m et plus	350 KW à 5 MW

Tableau 1.2. Classification des turbines éoliennes [8].

Les éoliennes sont classées selon leur taille en deux catégories :

1.6.1. Les petites éoliennes :

Sur l'ensemble de la gamme, le petit éolien ou éolien individuel, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances réparties en trois gammes :

- ❖ Micro-éoliennes : gamme de puissance nominale de 100 W à 1 KW.
- ❖ Mini-éoliennes : gamme de puissance nominale de 1 K W à 1.5 kW.
- ❖ Petites éoliennes : de 1.5 kW à 36 kW.

Ces éoliennes sont installées à des hauteurs de 10 à 36 mètres, raccordées ou non au réseau. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Les applications vont du tourisme de plaisance (camping-cars, bateaux,...) à l'électrification de sites isolés, distants du réseau, de même qu'au traitement de l'eau (pompage, dessalement) pour des unités de petites

puissances. Ces applications représentent un marché non négligeable appelé à se développer [8] **figure 1.11.**



Figure 1.11. Applications des petites éoliennes.

1.6.2. Les éoliennes grandes:

La grande éolienne est celui qu'elle est installée pour produire l'électricité avec des grande puissances puisque on peut aller vers une puissance supérieure à 5MW mais certainement avec des éoliennes très grandes de rayon peut aller plus que 100m. D'une manière générale on les installe dans des parcs peut être en terre ou en mer (offshore) **figure 1.12.** Ces éoliennes sont montées avec un système de régulation de la fréquence et après ça avec le réseau [8].



Figure 1.12. Applications des grandes éoliennes (parcs éoliens).

1.7. Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles, celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

1.7.1 Eoliennes à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius **figure 1.13** et le rotor de Darrieus **figure 1.14**.



Figure 1.13. Rotor de Savonius



Figure 1.14. Rotor de Darrieus

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue, Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer dans le **tableau 1.3 [9][10]**:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. ➤ Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent. ➤ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. ➤ L'éolienne ne démarre pas automatiquement donc il faut utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne. ➤ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

Tableau 1.3. Avantages et inconvénients d'éolienne à axe vertical.

1.7.2 Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus utilisées, car on peut avoir un très bon rendement. Elles sont à deux, trois ou à plusieurs pâles voir **figure 1.15**. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pâles.

Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pâles sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent.

Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [9] [10].



Figure 1.15 Les éoliennes à axe horizontal.

Le **tableau 1.4** présente les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal [9] :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical. ➤ 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. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bruit conséquent. ➤ Vibrations non négligeables. ➤ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Tableau 1.4. Avantages et inconvénients d'éolienne à axe horizontal.

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 répondeuse et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales [10].

1.8. Descriptif d'une éolienne :

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique [11].

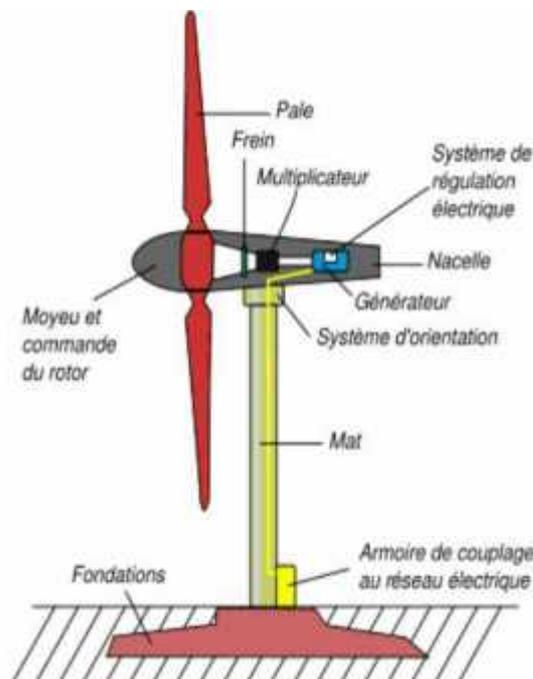


Figure 1.16 Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

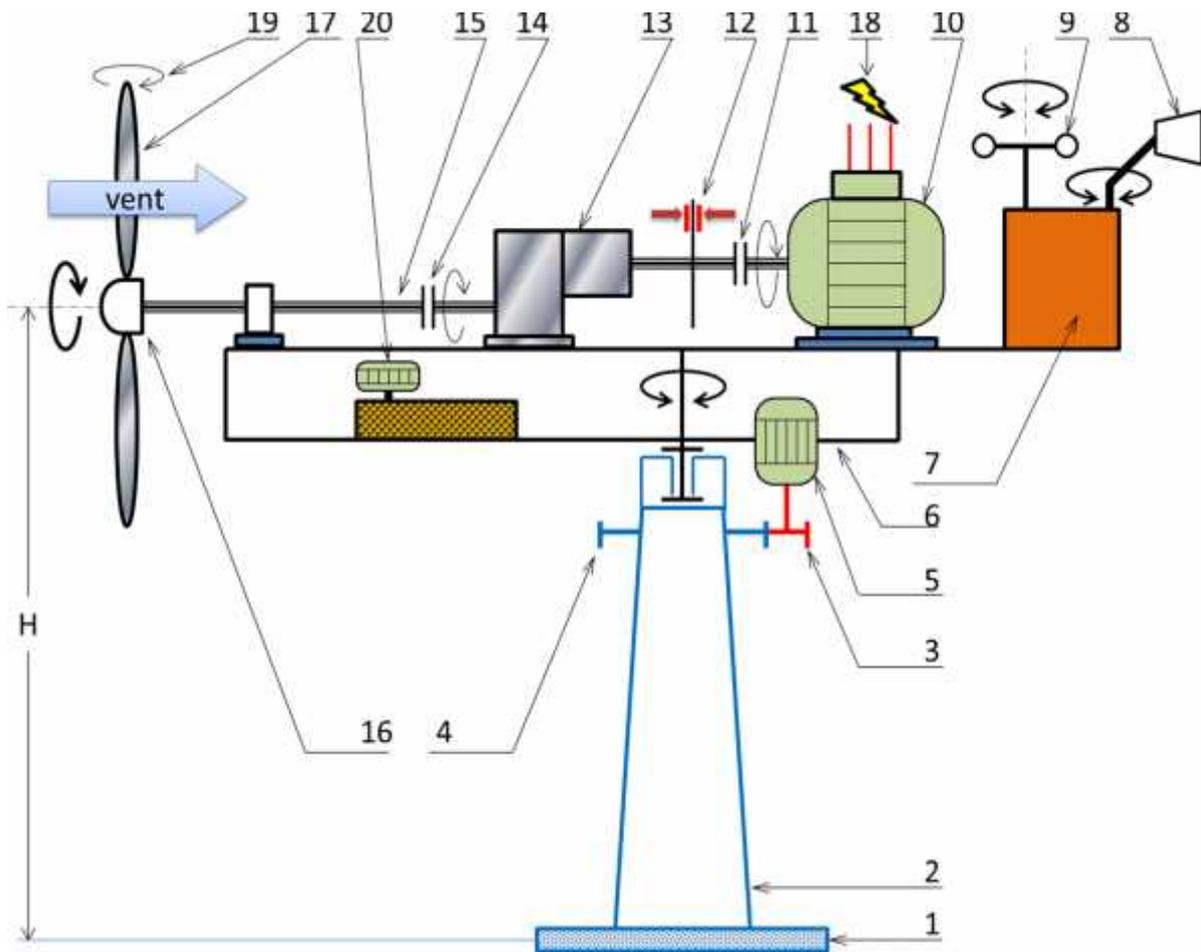


Figure 1.17 Structure d'une éolienne plus détaillé.

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

Tableau 1.5. Noms des composants d'une éolienne.

1.9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [12] :

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

Les avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne n'est plus non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc 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.
- Les parcs éoliens se démontent facilement.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie, 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 quelles sources d'énergie traditionnelle.

Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a des certains inconvénients :

- L'impact visuel. ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit: 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 évitent les aérogénérateurs.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

2.1. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :

On peut considérer trois composantes essentielles dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour.

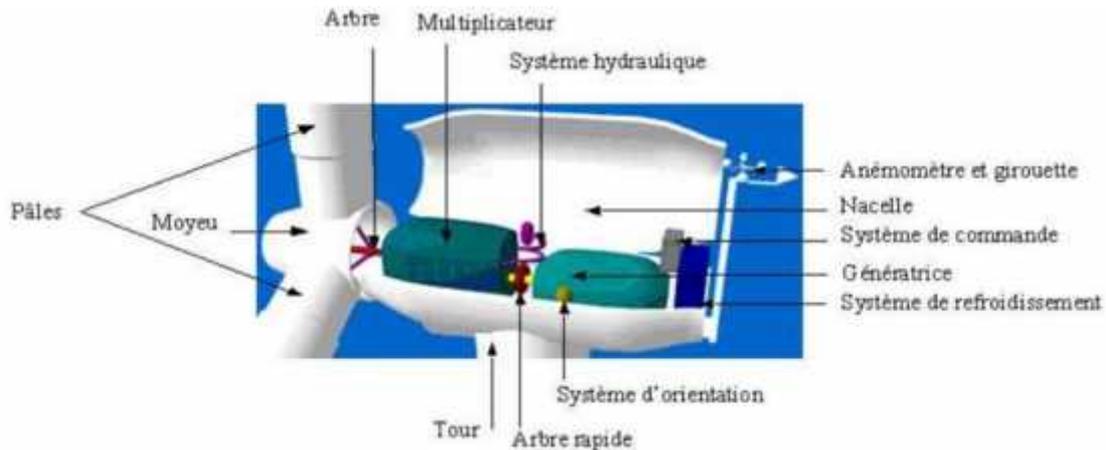


Figure 2.1. Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.

2.1.1. Le rotor :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

Les pales sont généralement réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopole et d'améliorer le coefficient de puissance.

Ainsi, ce dernier augmente de 10 % en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires [8].

L'arbre primaire est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 et 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur mécanique de vitesse.

Le moyeu est la partie mécanique qui supporte les pales **figure 2.3**. Il est pourvu d'un système passif (aérodynamique), actif (vérins hydrauliques) ou mixte (active stall) qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent).



Figure 2.2. Un moyeu.

2.1.2. La nacelle :

C'est le coffret qui se trouve en haut de la tour, elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. On peut introduire la nacelle comme une petite usine de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique **figure 2.3.**

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

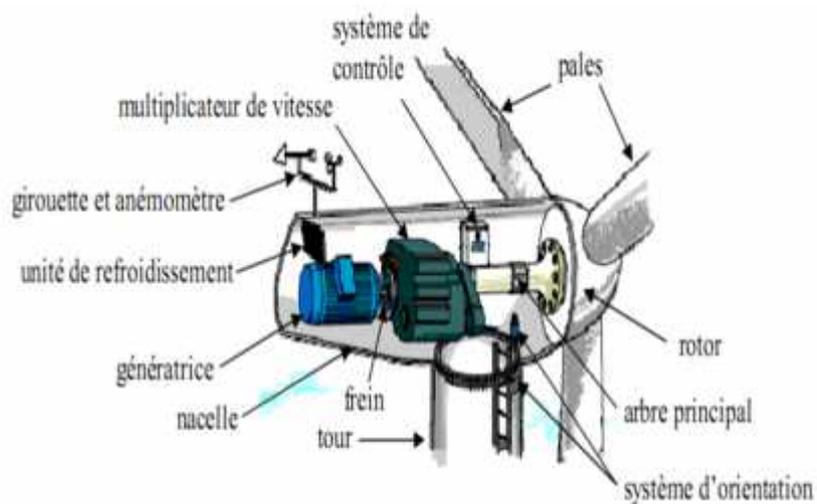


Figure 2.3. Une nacelle.

Les différents composants d'une nacelle :

➤ *multiplicateur de vitesse*

La vitesse de la turbine est très classiquement inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice.

Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. Le multiplicateur relie donc l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. La présence de ces multiplicateurs **figure 1.15** induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [8] [13].

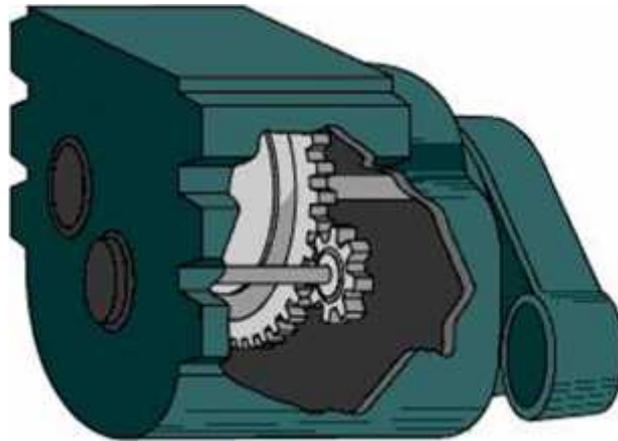


Figure 2.4. Un multiplicateur.

Il existe des possibilités d'entraînement direct sans multiplicateur. Les éoliennes à attaque directe sont constituées d'une génératrice directement connectée à l'axe de la turbine. Cela permet alors de réduire le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du multiplicateur de vitesse. Toutefois, cette solution nécessite l'utilisation de machines électriques non conventionnelles et demeure, à l'heure actuelle, relativement peu répandue.

➤ *L'arbre secondaire ou arbre rapide*

Elle tourne avec une vitesse environ 1500 tours par minute et entraîne la génératrice électrique, comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

➤ *La génératrice*

Elle peut être un générateur à courant continu ou un alternateur, dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique [14]. **figure 2.5.**



Figure 2.5. Une génératrice.

➤ *Le système de refroidissement*

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

➤ *Le système contrôle-commande*

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur de l'éolienne via un modem téléphonique, Il peut être placé aussi dans le mât

Figure 2.6.



Figure 2.6. Système de contrôle-commande.

➤ *Le système d'orientation*

Le système d'orientation de la nacelle est constitué d'une couronne dentée (crémaillère), utilise des moteurs électriques pour pivoter la nacelle avec le rotor de sorte que celui-ci soit toujours orienté face au vent [8] **figure 2.7.**



Figure 2.7. Système d'orientation.

➤ *Les capteurs des caractéristiques du vent*

Deux capteurs des caractéristiques du vent équipent généralement une éolienne :

Une girouette pour en évaluer la direction et un anémomètre pour en mesurer la vitesse habituellement situés à l'arrière de la nacelle [8] **figure 2.8.**

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

Le système contrôle-commande utilise les signaux de la girouette pour orienter l'éolienne dans le vent à l'aide du dispositif d'orientation.



Figure 2.8. Un anémomètre associé à une girouette.

2.1.3. Le mât (la tour) :

Généralement, le mât est un tube en acier ou une tour en treillis qui supporte le rotor et la nacelle **figure 2.9**. Il renferme également les câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition souhaitée au vent. En effet, plus le mât est haut, plus la vitesse du vent, et donc la puissance captée, augmentent mais cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la structure. Généralement, la taille du mât est prise très légèrement supérieure au diamètre des pales [8].



Figure 2.9. Eoliennes à tour en treillis et à tour tubulaire.

2.2. Principe de fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [11] :

- Au niveau de la turbine (rotor)

Qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, En utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air créé autour du profil une poussée qui entraine le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

- Au niveau de la génératrice

Qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise ensuite au réseau électrique.

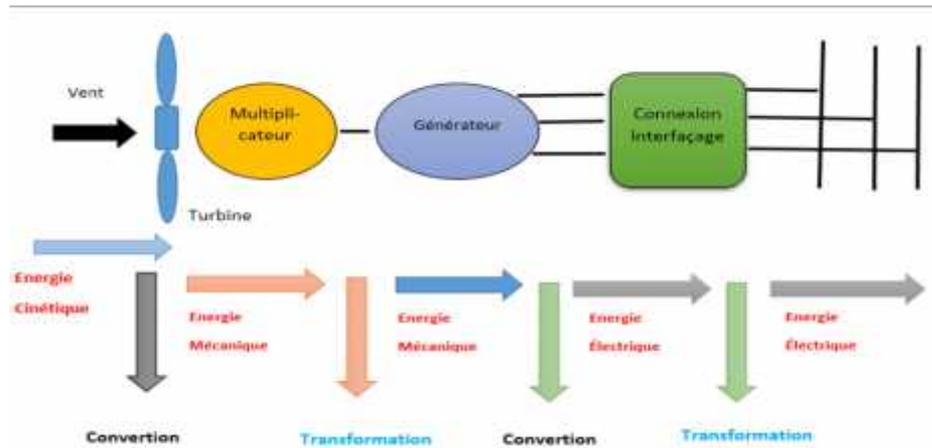


Figure 2.10. Principe de la Conversion de l'énergie.

2.2.1. Le décrochage aérodynamique :

Le décrochage aérodynamique est phénomène de diminution brutale de la portance. Ce phénomène est utilisé pour réguler la puissance que le rotor capte dans le vent et limiter ainsi la puissance électrique produite. **La figure 2.11.** Présente la courbe « portance / traînée » ou « C_z / C_x » en fonction de l'angle d'attaque, « i ». Nous voyons que, passé un certain angle, la portance diminue puis s'écroule. Le rapport portance / traînée devient faible. On observe alors le décrochage.

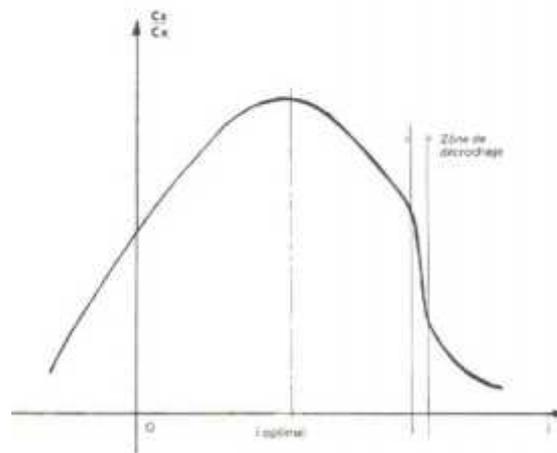


Figure 2.11. Portance en fonction de l'angle d'attaque et décrochage [15].

2.2.2. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Pour des vitesses de vents supérieures à la vitesse de vent nominale V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale P_n pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnements : V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir

de l'énergie et V_c la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

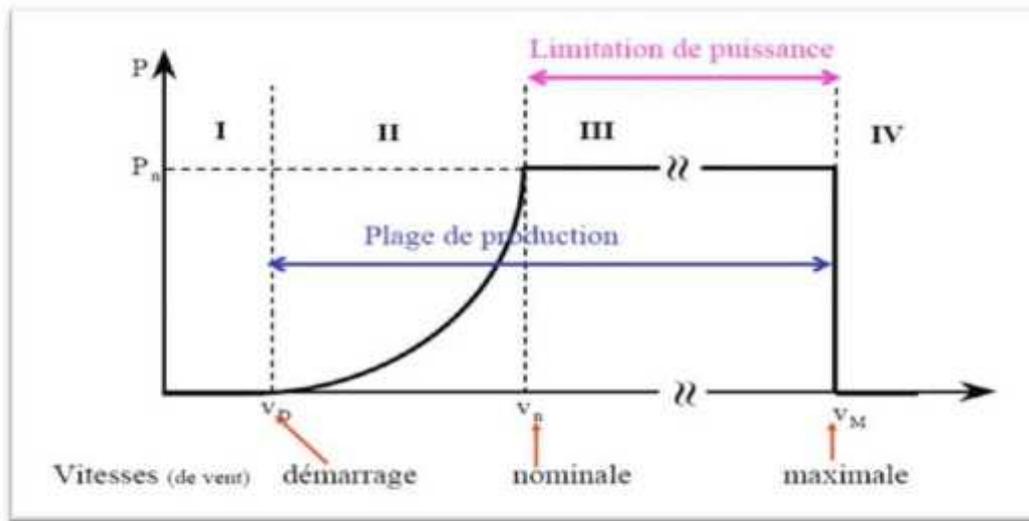


Figure 2.12. Diagrammes de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones:

LA ZONE I, où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance).

LA ZONE II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.

LA ZONE III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n .

LA ZONE IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

1. Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses;

2. Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). [16]

2.3. Dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme. Il existe différentes possibilités de stockage :

- Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par batterie d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus.
- Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé.[17]

2.4. Principaux critères de choix d'une éolienne :

- Le choix et l'installation des éoliennes doivent répondre aux besoins spécifiques de la population.

Les paramètres économiques sont très importants pour le choix des éoliennes. Une éolienne de grande puissance produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite éolienne de faible puissance. Par contre les coûts d'investissements et d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

- Dans les zones, où il est difficile d'installer plus qu'une éolienne, une grande éolienne est plus commode à utiliser pour obtenir un maximum de puissance.
- Le choix de l'utilisation de plusieurs éoliennes de moindres puissances, assure la continuité de l'alimentation en énergie électrique en cas de défaillance temporaire d'une éolienne.
- Des considérations d'ordre esthétique du paysage peuvent parfois dicter le choix de l'utilisation de petites éoliennes.

2.5. Emplacement des parcs éoliens :



Figure 2.13. Evolution de la puissance du parc éolienne 2001-2018.

Un parc éolien est une installation de production d'électricité pour le réseau électrique national par l'exploitation de la force du vent. Il s'agit d'une production au fil du vent, analogue à la production au fil de l'eau des centrales hydrauliques. Il n'y a donc pas de stockage d'électricité.

Un parc éolien est composé principalement :

- d'un ensemble d'éoliennes.
- d'une voie d'accès.
- d'un réseau d'évacuation de l'électricité



Figure 2.14. Les composants d'un parc éolien.

Les parcs éoliens se situent là où il y'a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens sont construits, ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur **la figure 2.15**.



Figure 2.15. Installation d'un parc éolien.

3.1. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne :

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de Génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

3.2. Types de machines électriques :

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les Machins synchrones et asynchrones.

3.3. La Production optimale d'énergie :

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal, ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de donnée appelée ' λ_{opt} '. La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \times V$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la **figure 3.1.** [18]. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

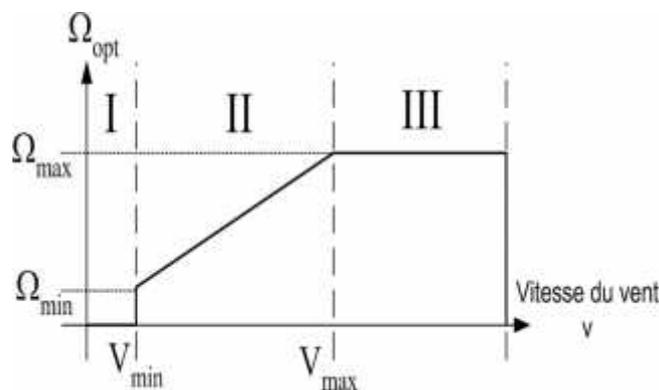


Figure 3.1. Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau **figure 3.2**. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau.

En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

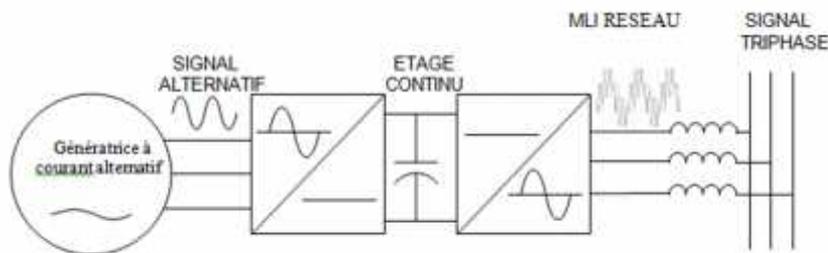


Figure 3.2. Interface d'électronique de puissance.

3.4. Etat de l'art sur les déférant systèmes utilisant les machines asynchrones et synchrone :

3.4.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

A/ Machine asynchrone à cage d'écureuil.

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la **figure 3.3** [19].

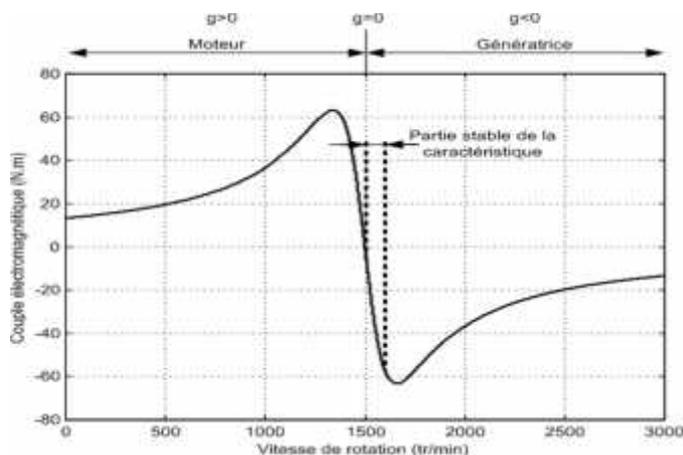


Figure 3.3. Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau **figure 3.4**.

La machine à un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine .

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance représentées sur la **figure 3.4**, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

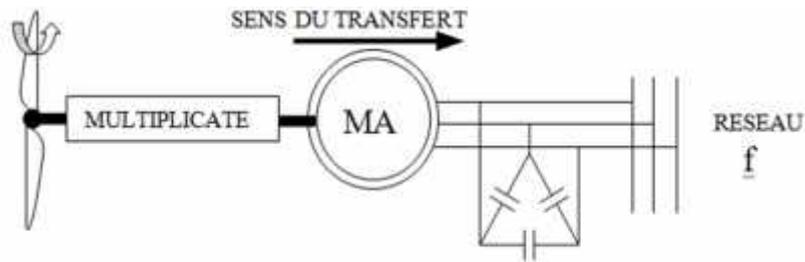


Figure 3.4. Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

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 il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite.

De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

B/ Machine asynchrone à double stator.

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator **Figure 3.5** :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [20].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

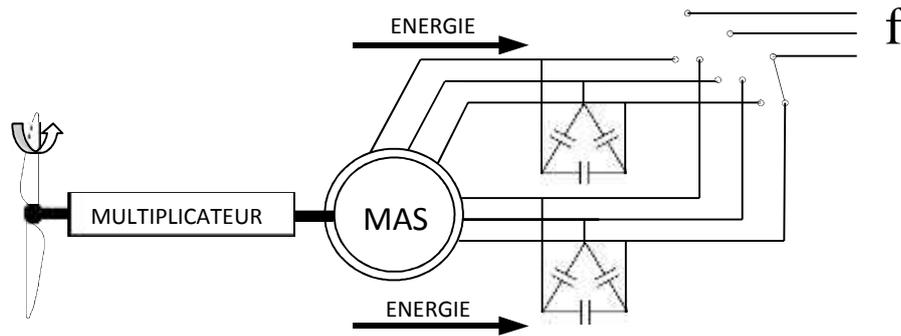


Figure 3.5. Machine asynchrone à double alimentation.

C/ Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.

Le dispositif de base est représenté sur la **figure 3.6**. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue.

Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire.

La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau.

Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine.

Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple.

Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie [21]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont

pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

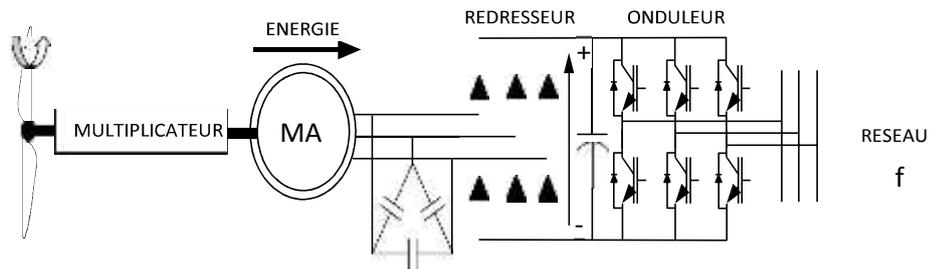


Figure 3.6. Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur–onduleur.

D/ Machine asynchrone à double alimentation type "brushless".

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques **figure 3.7**.



Figure 3.7. Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la **figure 3.6**. En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau [22] **Figure 3.8**.

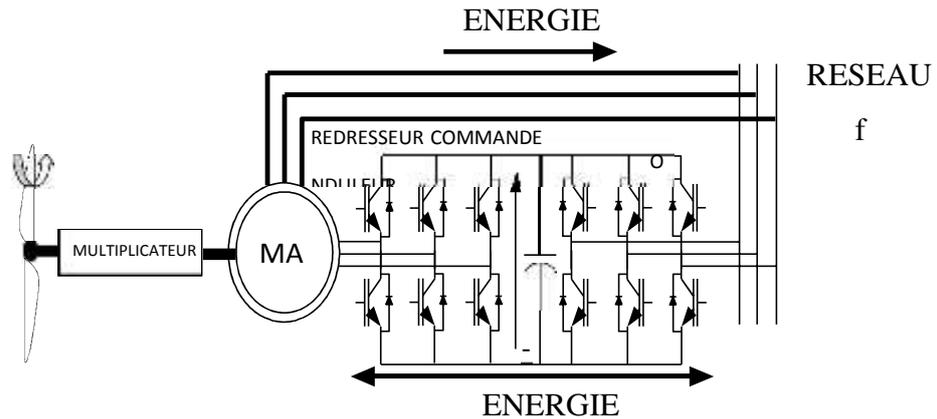


Figure 3.8. Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

Dans ce cas, le convertisseur est dimensionné uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et est donc moins coûteux que dans le cas de la **figure 3.6**. La machine n'a pas de contacts glissants mais possède deux stators à nombre de paires de pôles différent ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication.

En faisant varier la puissance réactive absorbée, le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance et d'augmenter ou diminuer les courants rotoriques. Le flux et le glissement de la machine en sont alors modifiés. La machine peut ainsi délivrer une tension à fréquence fixe tout en ayant une vitesse de rotation variable. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum, les études montrent que si le glissement dépasse 30%, le coût du convertisseur et la diminution du rendement due aux pertes dans le rotor qui augmentent avec le glissement rendent le système peu attractif. Ce système n'est pas exploité industriellement mais existe à l'état de prototype.

E/ Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur. Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans la seconde partie de ce mémoire.

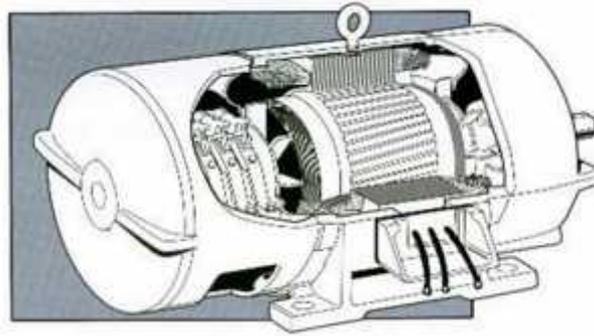


Figure 3.9. Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement").

E/ 1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la **figure 3.10**. le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [23].

Le contrôle de l' IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

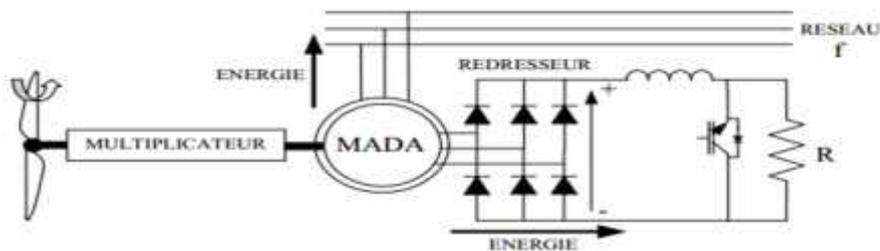


Figure 3.10. MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

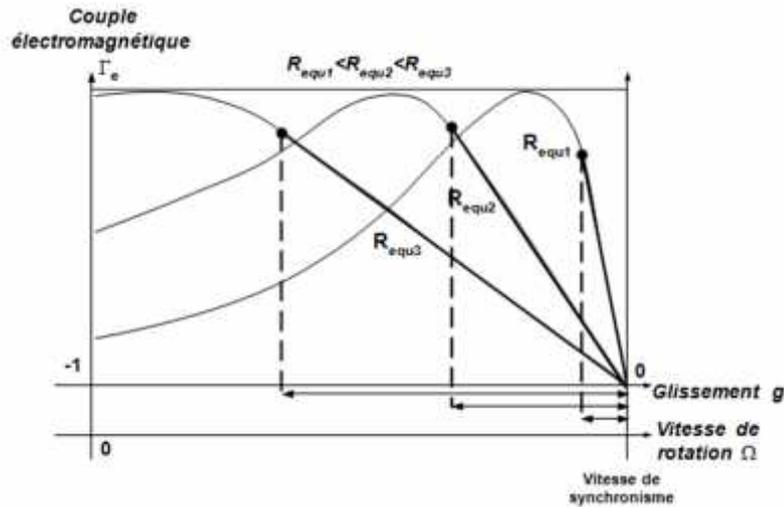


Figure 3.11. Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique.

E/ 2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, **figure 3.12.** [24].

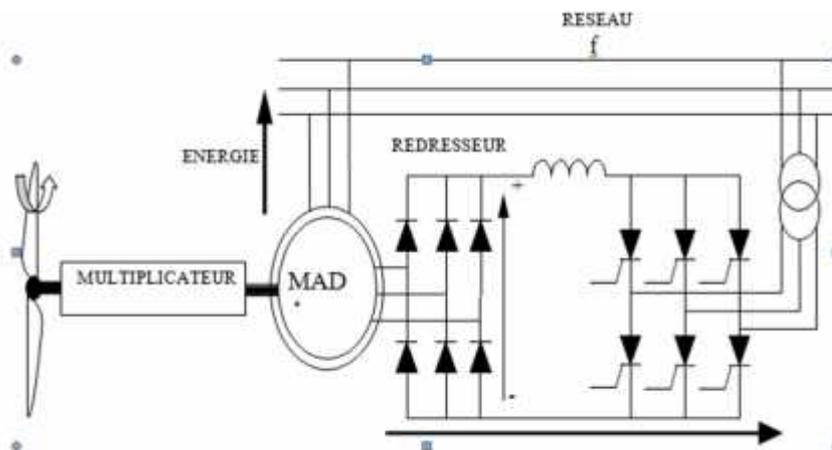


Figure 3.12. MADA, structure Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine brushless présentée au paragraphe D/, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%.

L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc

le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT (E/4.).

E/3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur **figure 3.13**, l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [25].

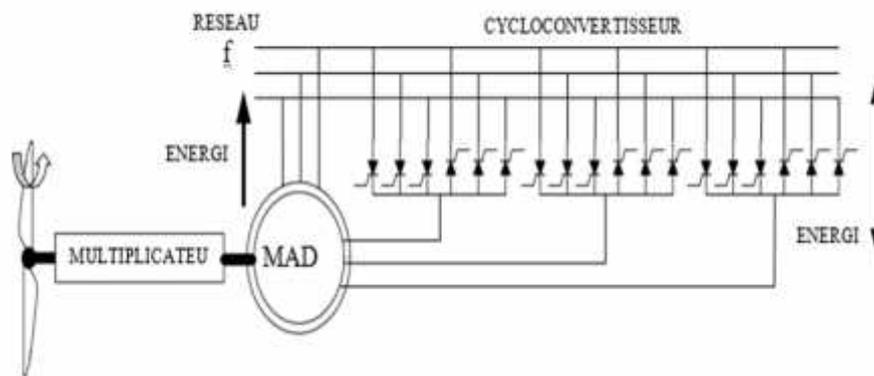


Figure 3.13. Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la **figure 3.12**. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

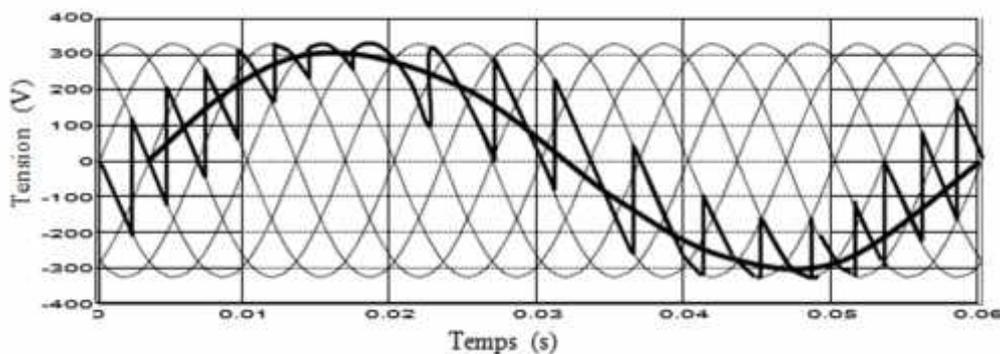


Figure 3.14. Principe de fonctionnement du cyclo convertisseur .

Le principe du cyclo convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure **figure 3.14**. Son utilisation génère

par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI (E/4.).

E/ 4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Cette configuration **figure 3.15.** a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius celle des GTO [26]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

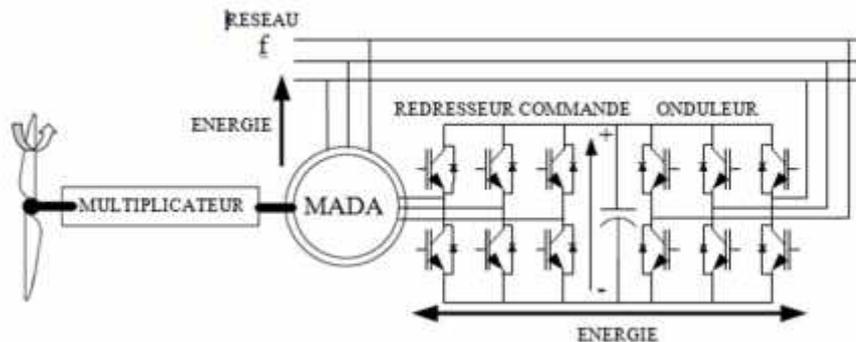


Figure 3.15. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless" **figure 3.8.** Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [27].[28]. [29].

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

3.4.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

A / Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants :

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau **figure 3.14**. ce qui permet d'autoriser une fonctionnement a vitesse variable dans une large plage de variation [30], [31].

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents.

Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [32].

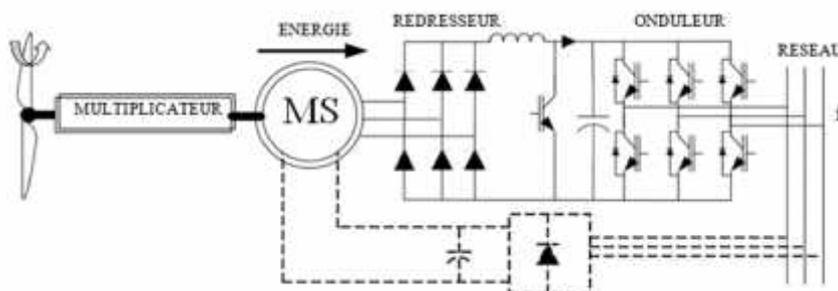


Figure 3.16. Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI.

L'exemple de la **figure 3.16**. Présente une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau.

Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les dv/dt importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation.

La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. Notons que l'utilisation de machines synchrones à faible vitesse (grand nombre de paires de pôles) permet de supprimer le multiplicateur de vitesse, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes mais l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent.

B / Machine synchrone à aimants permanents discoïde :

La société "Jeumont " a récemment développé une machine de 750 kW à attaque directe destinée à la production d'électricité par éoliennes. Cette machine possède la particularité d'avoir un champ magnétique axial contrairement aux machines synchrones classiques où le champ est radial **figure 3.15**. [33].

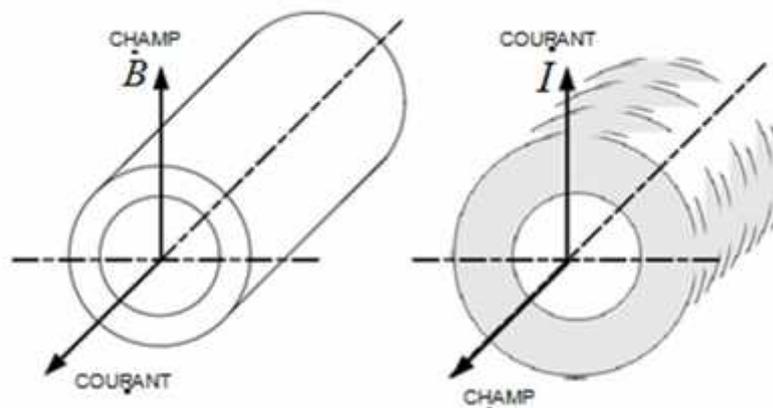


Figure 3.17. Machine à champ radial classique et machine discoïde à champ axial.

La machine synchrone à aimants permanents et à entrefer axial dite "discoïde" peut être constituée, dans sa structure élémentaire (étage), soit d'un disque rotorique entouré par deux

disques statoriques, soit de deux disques rotoriques entourant le disque statorique comme le montre la **figure 3.18**.

Un 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 statoriques. 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 [34].

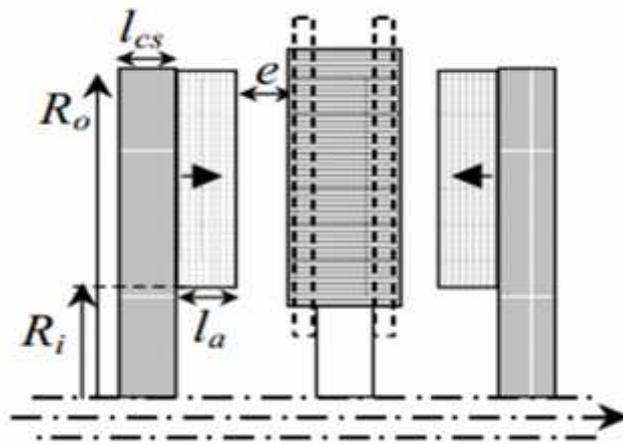


Figure 3.18. Etage d'une machine synchrone à aimants permanents discoïde.

C / Machine synchrone vernier à aimants :

Cette structure fait usage de motifs dérivés de ceux utilisés dans les machines à réluctance variable à double denture **figure 3.19**. Des paires de petits aimants alternés, à la périphérie du rotor, constituent l'inducteur, interagissent sous l'effet du champ d'induit avec des petites dents statoriques. L'induit, encoché, reçoit un bobinage polyphasé à champ tournant.

La dimension des pôles (ou le nombre) et celles des aimants sont deux paramètres essentiels dans le dimensionnement et les performances, mais ils sont totalement découplés dans la structure vernier [35].

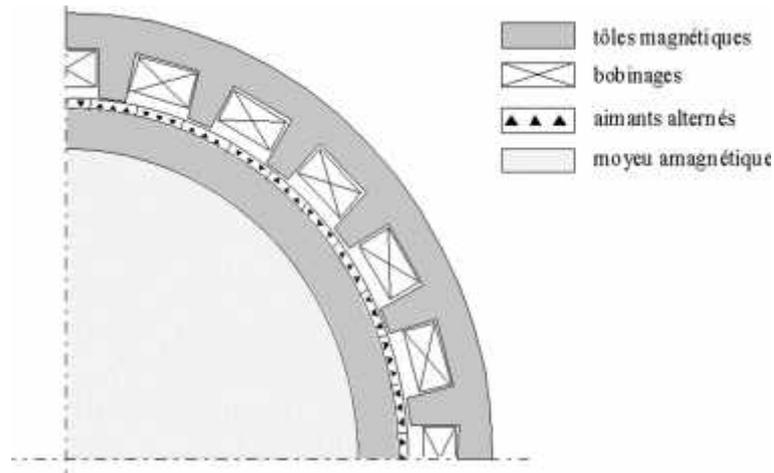


Figure 3.19. Machine synchrone Vernier à aimants.

L'effet vernier provient de ce que le nombre de paires d'aimants alternés, N_r est différent du nombre de dents, N_s . Il s'ensuit que l'onde d'induction due aux aimants a une périodicité égale à $2\pi/|N_s - N_r|$. Une condition de bon fonctionnement est alors d'avoir une périodicité des pôles de bobinage identique, ce qui implique $|N_s - N_r| = p$, alors établir la relation entre la vitesse de rotation, Ω , et la pulsation d'alimentation ω :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r}$$

Nous voyons que seule N_r impose la fréquence d'alimentation. Ceci est un avantage considérable pour le dimensionnement des machines très lentes, le niveau de performance étant intrinsèquement plus élevé que pour la machine classique à grand nombre de pôles, sachant qu'il est plus facile, pour des raisons de faisabilité mécanique, de diminuer la taille des dents que des pôles.

3.5. L'intérêt de la vitesse variable :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la **figure 3.20**.

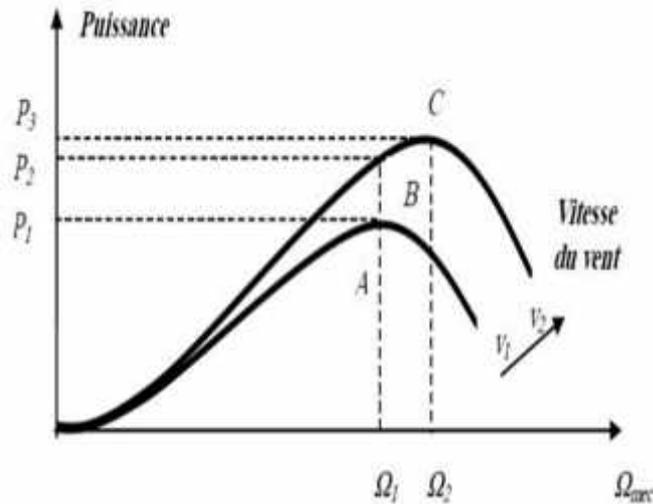


Figure 3.20. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique
Et la vitesse du vent.

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale p_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance p_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale p_3 se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C).

Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

On a vu déjà les avantages et les inconvénients de différentes machines utilisées dans les systèmes éoliens, et que les éoliennes à vitesse fixe ont tendance à disparaître devant les éoliennes à vitesse variable.

On remarque que les machines asynchrones à double alimentation avec les machines synchrones à aimant permanent, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable,

Aujourd'hui la tendance va vers des structures entièrement interfacées sans multiplicateur de vitesse, et avec les grandes avancées technologiques en matière d'électronique de puissance et le prix en constante diminution, les solutions à base de MADA seront progressivement remplacées par des solutions entièrement interfacées à base de MSAP.

4.1. Introduction :

La machine à double alimentation (MADA) ou doubly-fed induction machine (DFIM) est, comme son nom l'indique, une machine triphasé à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessible, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements.

Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principale surtout dans les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et ou le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois.



Figure 4.1. Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

4.2. Machine asynchrone à double alimentation :

4.2.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La MADA à une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor.

Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone excitation alternative [36].

4.2.2. Structure de la MADA [37] :

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

A/ MADA à rotor bobiné :

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique.

Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants.

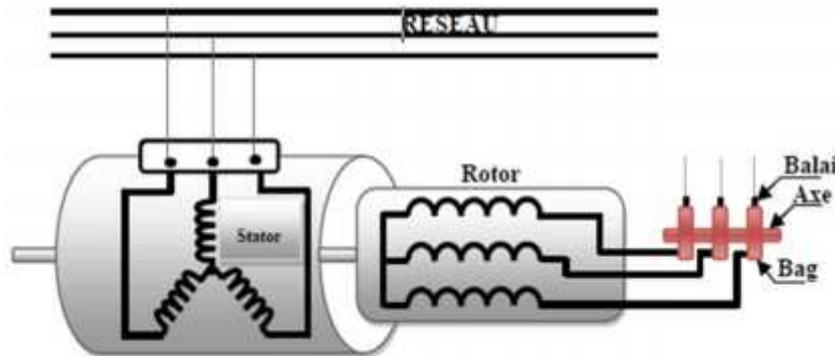


Figure 4.2. Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

B/ MADA sans balais :

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

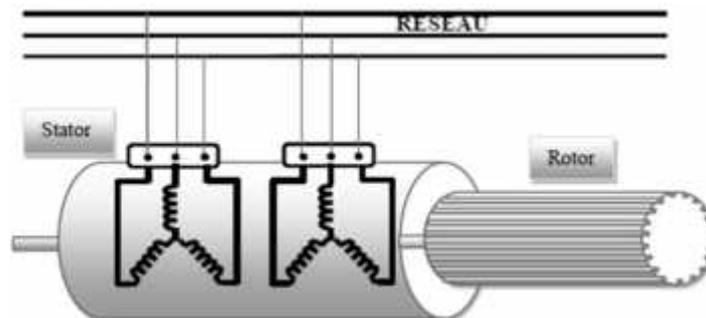


Figure 4.3. Structure de la MADA sans balais.

Il existe d'autres types comme la MADA à réluctance qui utilise le principe d'un moteur à réluctance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

C/ MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement.

Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées.

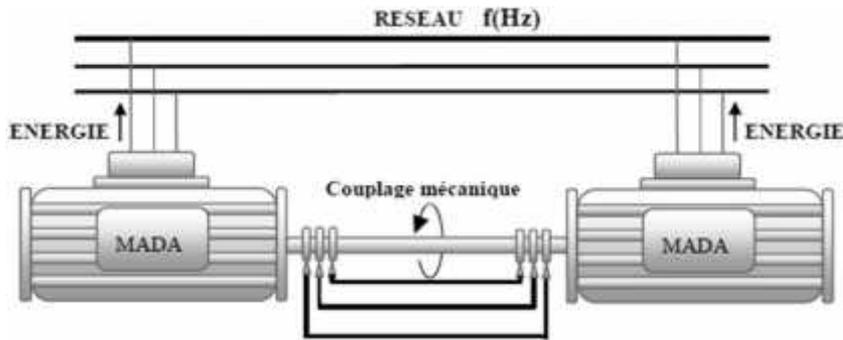


Figure 4.4. Structure en cascade de deux machines asynchrones.

4.2.3. Classification des machines à double alimentation (MADA) :

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives sont développées comme présenté ci-dessous. [38]

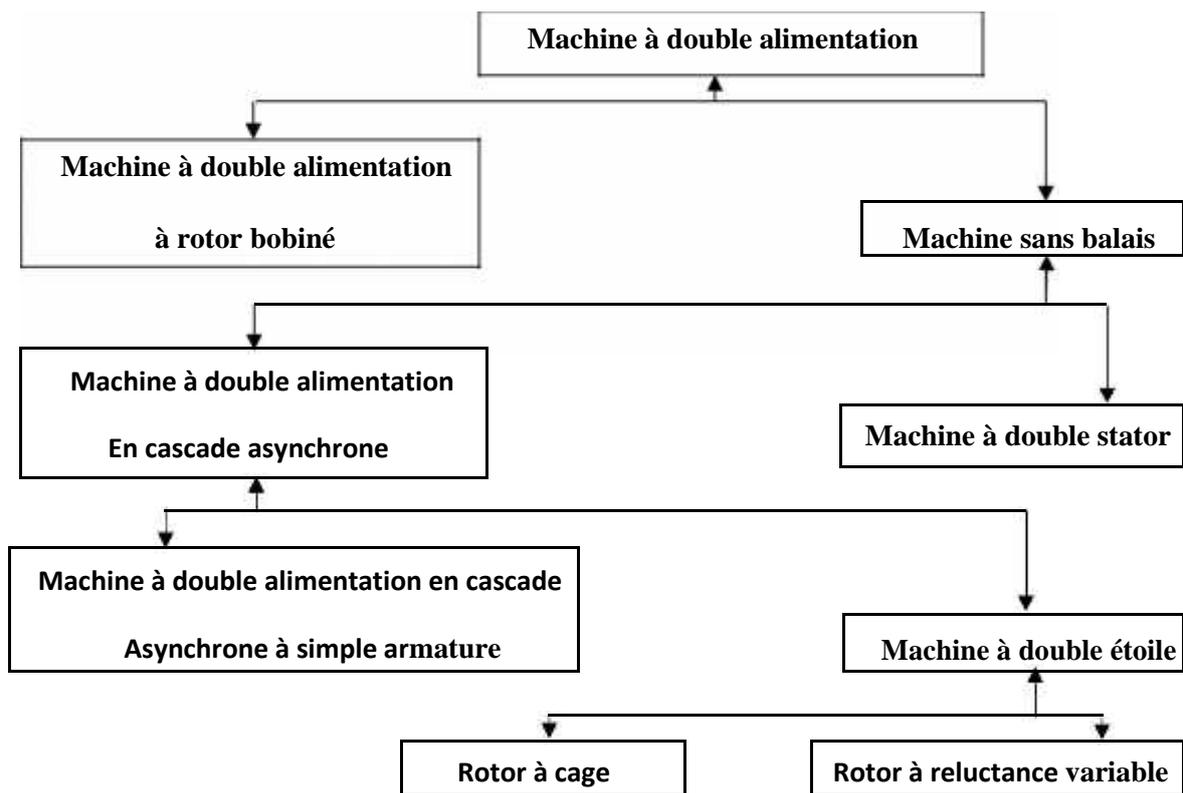


Figure 4.5. Classification des machines électriques à double alimentation.

4.2.4. Le principe de fonctionnement de la MADA :

En admettant que l'enroulement statorique de la machine à double alimentation est connecté directement au réseau, que l'enroulement rotorique triphasé est relié à un convertisseur de

puissance bidirectionnel à travers un système balais-bagues et que les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor sera définie par :

$$\check{S}_m = \check{S}_s \pm \check{S}_r = p \cdot \Omega_m \quad (4.1)$$

Avec :

Ω : la vitesse mécanique du rotor ;

\check{S}_m et \check{S}_r : les pulsation statoriques et rotoriques respectivement ;

P : le nombre de paires de pole.

Le signe positive (+) dans l'équation (4.1) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor ($\check{S}_m > \check{S}_s$), (en régime hypo-synchrone).

Le signe négative (-) signifie que le champ tournant créés par les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor tournent dans des sens opposés et que la machine fonctionne en régime hyper-synchrone.

D' autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par :

$$f_s = f_r + p \cdot f_m$$

Avec f_m : fréquence de rotation du rotor

Dans ce cas le glissement est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\check{S}_s - \omega_r}{\omega_s}$$

D'après cette équation on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA [Den 10]

Ñ **Stationnaire** ($g=1$) : le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence. Le circuit rotorique est siège d'une force électromotrice induite avec une fréquence f_r identique à f_s . Dans ce cas, la MADA se comporte simplement comme un transformateur ;

Ñ **Hypo-synchrone** ($0 < g < 1$): En tournant le rotor dans la direction du flux statorique, la fréquence du rotor va commencer à décroître. Plus la vitesse du rotor s'approche de celle de

synchronisme, plus tend vers 0, de même la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse du synchronisme ;

- **Synchrone ($g=0$)** : Lorsque la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence du rotor s'annule. Dans ce cas, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique, donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements rotoriques ;

- **Hyper-synchrone ($g < 0$)**: Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape G' le flux G , statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations et. Cette valeur négative signifie que l'ordre de succession de phase du rotor « a_r, b_r, c_r » s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

4.3. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au-dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

4.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement" est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [39].

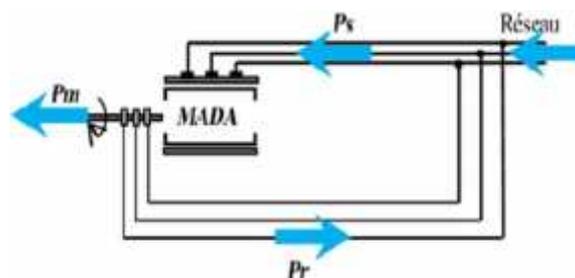


Figure 4.6. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

4.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [40].

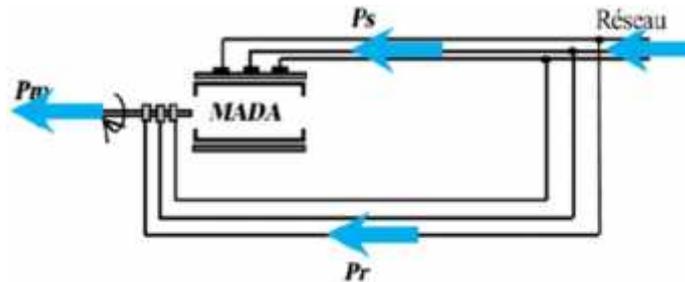


Figure 4.7. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.

4.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [39].

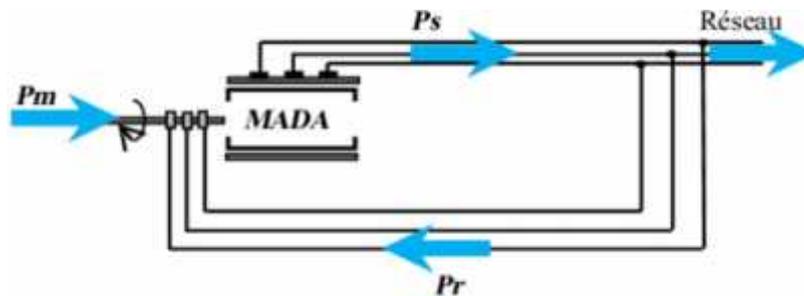


Figure 4.8. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.

4.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [41].

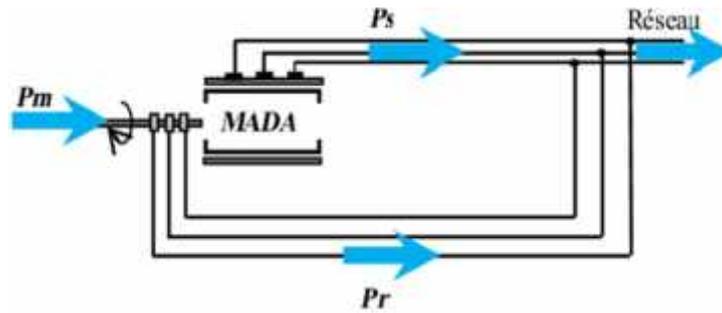


Figure 4.9. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.

Glissement g	Moteur hypo synchrone	Génératrice hypo synchrone
$g > 0$	$P_s > 0$ $P_{méc} > 0$ $Pr = g \cdot P_s > 0$ $P_s > 0$	$P_s < 0$ $P_{méc} < 0$ $Pr = g \cdot P_s < 0$ $P_s < 0$
	Moteur hyper synchrone	Génératrice hyper synchrone
$g < 0$	$P_s > 0$ $P_{méc} > 0$ $Pr = g \cdot P_s < 0$ $P_s > 0$	$P_s < 0$ $P_{méc} < 0$ $Pr = g \cdot P_s > 0$ $P_s < 0$

Tableau 4.1. Les conditions mathématiques pour chaque mode de fonctionnement de la MADA [42]

4.4. Aperçus sur les configurations de la MADA à rotor bobiné :

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement.

4.4.1. Configuration pour application moteur :

La variation de la vitesse des machines synchrones et asynchrones classiques nécessitent la variation de la fréquence des courants statoriques par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur. Généralement, ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter

la totalité de la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70%, en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques [43].

A/ Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est relié à son propre onduleur (Single Doubly Fed Induction Machine).

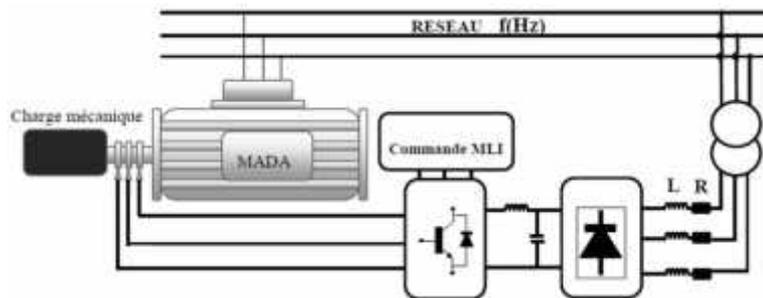


Figure 4.10. Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotoriques mais le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur permet de dimensionner le convertisseur coté rotor à 30% de la puissance mécanique maximale [44].

B/ Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cyclo convertisseur :

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cyclo convertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau.

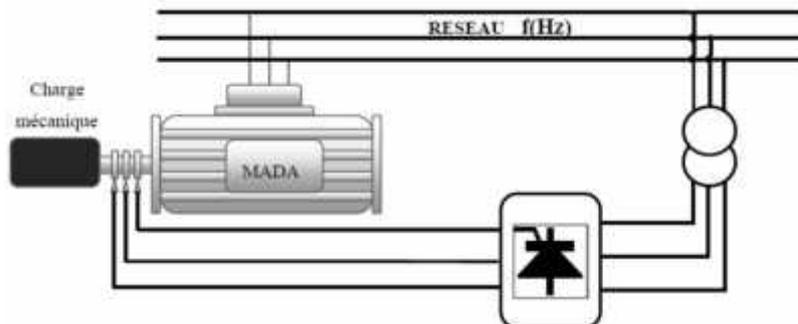


Figure 4.11. Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cyclo convertisseur.

Le principe du cyclo convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés [45].

C/MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants :

Dans cette structure on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit :

- Deux cyclo convertisseurs.
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

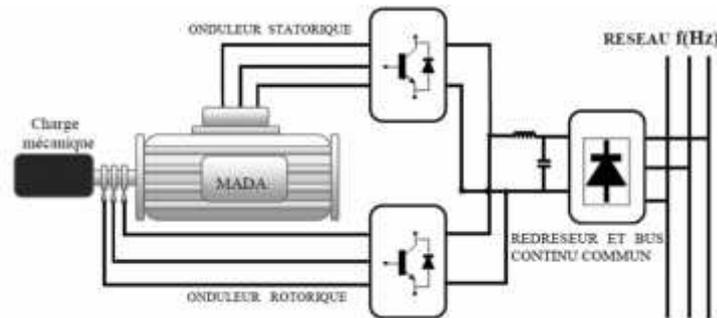


Figure 4.12. Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cyclo convertisseurs.

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de libertés ce qui rend son contrôle très souple. On peut donc réguler la vitesse (ou le couple), le flux (statorique, rotorique et d'entrefer), le glissement et le facteur de puissance [46].

4.4.2. Configuration pour application génératrice :

Dans cette partie, on s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

- * MADA à énergie rotorique dissipée ;
- * Structure de Kramer ;
- * Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur ;
- * Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

4.5. Domaines d'application de la MADA :

Actuellement, la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages.

En effet, la MADA peut être utilisée dans plusieurs applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que: [37]

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.

Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc...

4.6. Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA :

Pour la modélisation de la MADA, on adopte les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ;
 - Les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligeables ;
 - On se limite au premier harmonique d'espace de la distribution de force magnétomotrice créée par chacune phase du stator et du rotor, d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoidalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques et les inductances propres sont constantes ;
 - Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé ;
 - Les armatures magnétique du stator et du rotor sont cylindriques, séparée par un entrefer constant, et munies chacune d'un enroulement triphasé.
-
- Le stator comporte 3 enroulements dont les axes magnétiques OA, OB et OC sont décalés dans l'espace de 120° .
 - Le rotor (rotor bobiné) comporte 3 enroulements triphasés à même nombre de pôles que celui du stator. Ces 3 bobinages dont les axes magnétiques Oa, Ob et Oc sont décalés dans l'espace de 120° .

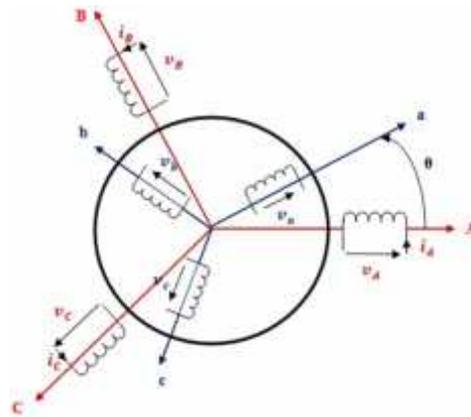


Figure 4.13. Représentation schématique de la machine asynchrone double alimentée.

4.7. Les différents travaux réalisés sur la MADA :

Parmi les travaux les plus significatifs, nous citons les suivants :

Dans le document [47], on propose l'étude d'une MADA dont le stator est relié à un réseau triphasé, alors que le rotor est alimenté par un onduleur MLI associé à un redresseur. Il s'intéresse au fonctionnement en mode moteur et vise des applications à vitesse variable.

Il adopte une commande vectorielle par l'orientation du flux statorique avec et sans capteur de position. Dans le cas de l'absence du capteur de position, il propose deux méthodes pour déterminer la position angulaire du repère lié au flux statorique : une première basée sur la mesure et l'expression des composantes du courant statorique dans le repère tournant considéré, la seconde nécessite la mesure des puissances active et réactive statoriques. Ensuite, cette étude est validée par des résultats expérimentaux.

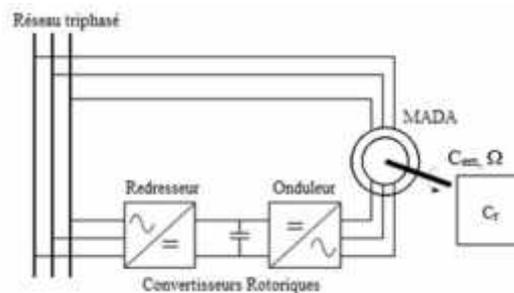


Figure 4.14. MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances.

Le document [46] pour son étude a proposé une loi de répartition de puissance entre le stator et le rotor afin d'optimiser le dimensionnement des convertisseurs de puissance. Cette loi de répartition de puissance a amené à une loi de commande en vitesse de la machine à double

alimentation en permettent un choix adéquat des pulsations rotorique et statorique. La loi de répartition de puissance a permis aussi d'avoir un fonctionnement en survitesse qui peut atteindre deux fois la vitesse de base.

Le document [48] traite du fonctionnement de la modélisation, du contrôle, d'une étude analytique et de l'optimisation des performances de la machine asynchrone à double alimentation. Il trouve des lois de commande par différentes façons et pour plusieurs fonctions objectives qui peuvent optimiser les performances de la machine (rendement, facteur de puissance, taille du convertisseur). Il montre aussi que le mode de fonctionnement de la machine dépend principalement des caractéristiques de la source extérieure (tension, déphasage et fréquence).

Dans Le document [49], le cas de la machine asynchrone à rotor bobiné a été étudié, avec la configuration où son stator est directement relié au réseau et son rotor est alimenté par des convertisseurs de puissance. Pour cette machine une technique de commande en régime permanent a été développée selon le mode moteur ou générateur, pour le fonctionnement hypo ou hyper synchrones et cela en dérivant les lois de commande de la MADA en régime permanent en termes de tension rotorique V_r et de déphasage entre le courant et la tension au rotor I/J . Pour cela une approche analytique basée sur le circuit équivalent de la MADA avec les paramètres réels d'une machine de Lab Volt a été réalisée. Enfin un simulateur a été développé sous l'environnement Simulink de MATLAB afin de réaliser cette commande, et ainsi valider les résultats analytiques obtenus.

4.8. Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation.

Avantages de la MADA :

Comme avantages de la MADA, on peut citer : [50]

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance ;
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements

rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.

Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants : [51]

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

4.9. Conclusion :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur.

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre.

Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.

5.1. Introduction :

Dans ce chapitre, dans le but de mettre en évidence notre analyse, nous devons procéder au calcul et dimensionnement d'une chaîne éolienne ce qui nous conduit à un choix de site pour l'implantation d'un tel système de conversion d'énergie.

Le traitement statistique des données publiées par les services météorologiques algériens a permis d'évaluer les caractéristiques du potentiel éolien de six sites parmi les plus ventés du nord du pays, autrement dit dans la zone de population et donc de consommation énergétique la plus concentrée : Oran, Bejaia, Annaba, Kasr- Chellala, M'sila et Tiaret.

La vitesse moyenne annuelle des trois sites côtiers : Oran, Bejaia et Annaba compte respectivement 4.4m/s ,4.2m/s et 3.8m/s.

La vitesse moyenne annuelle sur les sites des hauts plateaux : Kasr-chellala, M'sila et Tiaret sont respectivement 3.9m/s ,4.9m/s et 3.8m/s.

Au sud, c'est le site d'Adrar qui l'emporte avec une vitesse moyenne annuelle de 7m/s.

Pour lancer un aussi grand investissement afin d'atteindre un bon rendement et donc un prix de kilowattheure raisonnable, un site d'un potentiel éolien plus fort est souhaité.

L'analyse des ressources éoliennes dans quelques sites sur la bibliographie internationale, nous a permis d'opter pour un potentiel d'énergie éolienne qui peut être effectivement exploité avec une vitesse moyenne de vent de 12 m/s.

Pour une telle potentialité, nous considérons une éolienne avec les paramètres suivants :

- Rayon de l'éolienne : $R = 35 \text{ m}$;
- Le gain de multiplicateur : $K = 90$;
- Nombre de pales est : 3 pales.

5.2. Description de l'aérodynamique d'une pale :

5.2.1. Dimensionnement :

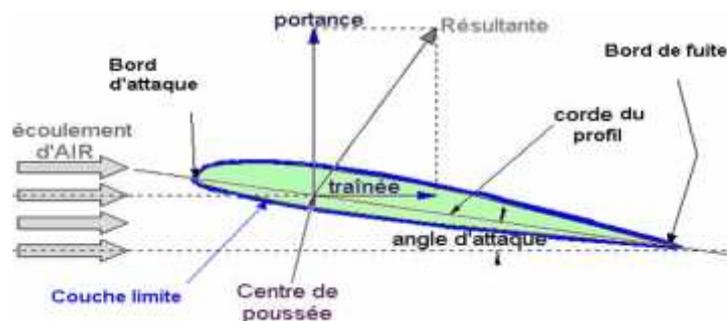


Figure 5.1. Description d'une pale d'éolienne.

La pale d'une éolienne est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimisations facilite grandement la tâche du concepteur. [51]

5.2.2. Construction et matériaux :

Les techniques de construction et les matériaux utilisés pour les pales sont relativement proches de l'aéronautique. On rencontre plusieurs types de matériaux [52] :

***Le bois :** il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

Les techniques de bois entoilé des moulins à vent est quasiment plus retenue de nos jours, ont fait place dans un premier temps à la construction métallique (alliages légers, inox), mis en œuvre par l'intermédiaire de structures à base de longeron et de nervures, recouverts par un revêtement de faible épaisseur. Outre l'inconvénient d'une masse structurale peu favorable, de telles pales sont sensibles aux sollicitations alternées (fatigue), particulièrement dans le cas d'assemblages par rivets. [51]

*** Le lamellé-collé :** c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue, mais cette technique n'est guère employée pour les éoliennes de grande taille. Les alliages d'aluminium pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

Les matériaux composites : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil. Assez rapidement, les matériaux composites à base de fibres de verre imprégnées de résines polyester ou époxyde se sont généralisés. Depuis quelques années, les fibres de carbone ont également fait leur apparition.

Les caractéristiques mécaniques de ces dernières sont bien sûr très intéressantes (rapport rigidité/masse très favorable), mais leur prix élevé comparé à celui de la fibre de verre tend à restreindre leur emploi aux machines à hautes performances. La **figure 5.2** présente quelques exemples de structures en fonction des matériaux utilisés.

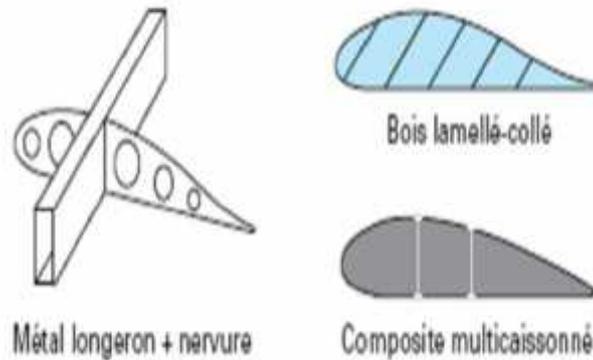


Figure 5.2. Exemples de structures de pale [51].

5.2.3. Force de poussée sur une pale d'éolienne : [53,54]

Une équation permet de calculer la force de poussée, F , ou la force résistive de l'air sur une pale.

Voici la force résistive de l'air :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot V^2 \quad (5.1)$$

Où :

C_x : coefficient de traînée ($C_x = 0.04$ pour un corps profilé (la pale)) ; [55]

A : surface projetée perpendiculairement à l'écoulement ;

ρ : masse volumique de l'air ;

V : vitesse relative de l'air par rapport à la pale.

$$A = D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (5.2)$$

Application numérique :

$$A = \frac{70^2 \times 3.14}{4} = 3846.5 \text{ m}^2$$

$$F = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 3846.5 \times 0.04 \times (12^2) = 13570.5 \text{ N}$$

4.2.4. Énergie fournie par le vent :

Le vent fournit une énergie cinétique. En effet, il s'agit d'une masse d'air qui se déplace.

L'énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (5.3)$$

Où :

m : masse du volume de vent ou d'air (kg) ;

v : vitesse du vent (m/s) ;

E_c : énergie cinétique (Joule).

5.2.5. Puissance dans un écoulement [54] :

Pour une conduite de section A , traversée par le vent soufflant à la vitesse v m/s, l'énergie récupérable chaque seconde, donc la puissance, peut s'écrire à l'aide de l'équation de l'énergie cinétique, la masse m est alors remplacée par le débit massique (kg/s) pour passer de l'énergie à la puissance.

- Pour un fluide incompressible, la masse m s'écrit :

$$m = \rho \cdot l \cdot A \quad (5.4)$$

Où :

ρ = la masse volumique de l'air ;

A = la section du tuyau ;

L : la longueur de tuyau parcourue chaque seconde par le vent.

L'énergie serait alors :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot n \cdot V^2 \quad (5.5)$$

D'où :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \dots \cdot l \cdot A \cdot V^2 \quad (5.5)$$

Ou encore :

Le débit massique s'écrit :

$$m = \dots \cdot V \cdot A \quad (5.6)$$

: la masse volumique de l'air ;

A : la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor ;

V : vitesse du vent.

AN:

$$m = 1.225 \times 12 \times 3846.5 = 56543.55 \text{ kg}$$

AN:

$$E_c = \frac{1}{2} \times 56543.55 \times (12^2) = 4071135.6 \text{ joule}$$

La puissance P_{vent} est :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dots \cdot V \cdot A \cdot V^2 \quad (5.7)$$

Ou Encore :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dots \cdot A \cdot V^3 \quad (5.8)$$

L'expression de la puissance en fonction du diamètre sera :

$$P = \frac{1}{2} \dots D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot V^3 \quad (5.9)$$

AN:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 3846.5 \times (12^3) = 4071135.6 \text{ W}$$

Si le système éolien à axe horizontal représenté sur la **figure 5.3.** sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval (lois de Abetz) [52]

$$P = \dots \frac{S}{4} \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (5.10)$$

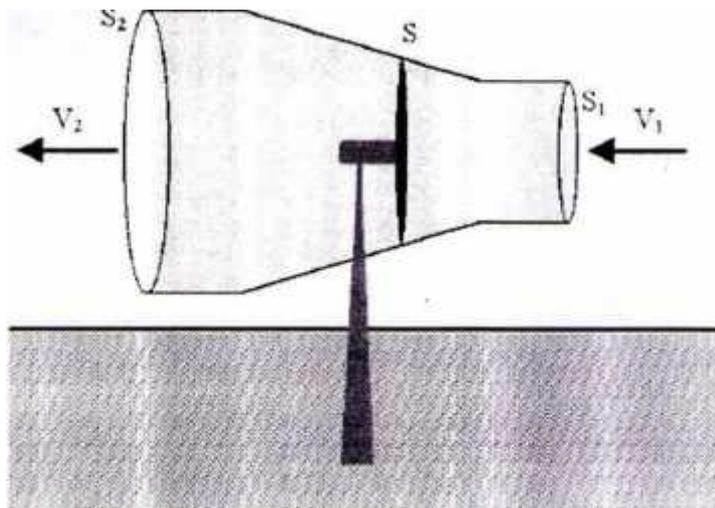


Figure 5.3. Tube de courant autour d'une éolienne [6]

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

5.2.6.Limite de Betz :



Albert Betz (1885-1968)

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée.

Le théorème du physicien Allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à $16 / 27$, soit environ 62 % de l'énergie totale du vent.

La notion de coefficient de puissance C_p peut maintenant être présentée. Le Coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent.

$$C_P = \frac{\text{puissance}_{\text{rotor}}}{\text{puissance}_{\text{vent}}} \quad (5.11)$$

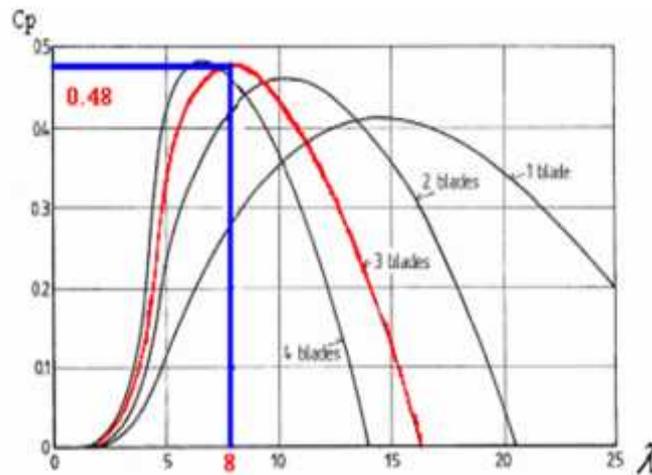


Figure 5.4. Coefficient de puissance en fonction de rapport de vitesse.

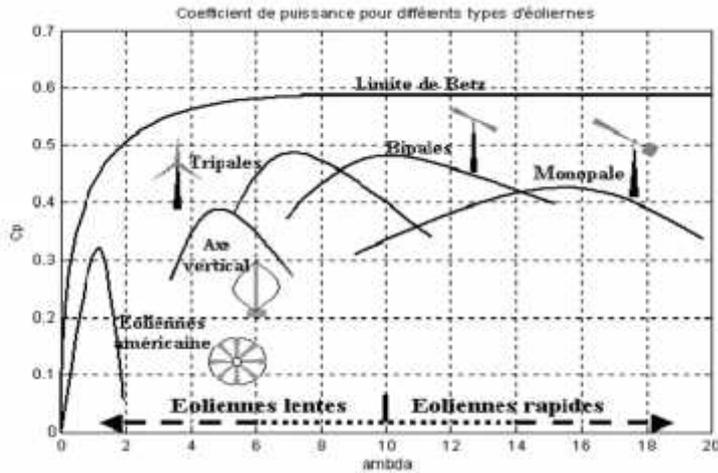


Figure 5.5 Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne.

En tenant compte de la limite de Betz, C_{pmax} vaut donc $16 / 27$ soit **0.5926**.

$$C_{pmax} = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}} = \frac{16}{27} = \mathbf{0.5926} \quad (5.12)$$

La puissance maximale du rotor vaut donc :

$$P_{maxrotor} = \mathbf{0.5926} \cdot \frac{1}{2} \cdot P_{vent} \quad (5.13)$$

En prenant tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50 % de la limite de Betz.

$$P_{réelle} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (5.14)$$

Pour conclure, dans bien des cas on a :

$$P_{réelle} = \mathbf{0.29} \cdot P_{vent} \quad (5.15)$$

AN:

$$P_{\text{réelle}} = 0.29 \times 4071135.6 = 1180629 \text{ W} = 1.18 \text{ MW}$$

$$C_p = \frac{1180629}{4071135.6} = 0.29$$

Rapport de la vitesse de turbine :

$$\lambda = \frac{R \cdot \tilde{\omega}}{V} \quad (5.16)$$

R : rayon de la pale ;

λ : Rapport de vitesse ;

V : Vitesse du vent ;

$\tilde{\omega}$: vitesse de la turbine (rad/ s).

Pour tout ordre de grandeur si $\lambda < 3$, l'éolienne est dite lente, et $\lambda > 3$, l'éolienne est dite rapide.

En pratique, le nombre de pales dépend de la vitesse spécifique comme rapporté dans le **tableau 5.1**.

Vitesse spécifique	Nombre des pales
$\lambda \in [1, 3]$	8 à 24
$\lambda \in]3, 6]$	6 à 12
$\lambda \in]6, 12]$	3 à 6
$\lambda \in]12, 24]$	2 à 4
$\lambda > 24$	2 à 3

Tableau 5.1. La vitesse spécifique à partir de nombre de vitesse.

La vitesse de l'arbre primaire de l'éolienne \dot{S} en rad/s, et en tr/min :

A partir de la **figure 5.4.** la vitesse spécifique $\lambda = 5$ (parce que le C_p dans ma cas est 0.29).

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \frac{\lambda \times V}{R} = \frac{5 \times 12}{35} = 1.71 \text{ rad/s} \\ &= \frac{1.71 \times 60}{2\pi} = 16.37 \text{ tr/min}\end{aligned}$$

Le Couple aérodynamique d'une éolienne :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} \quad (5.17)$$

$$C_{aéro} = \frac{1180629.3}{1.71} = 690426.5 \text{ N m}$$

5.3. Etude du multiplicateur :

5.3.1 Principe :

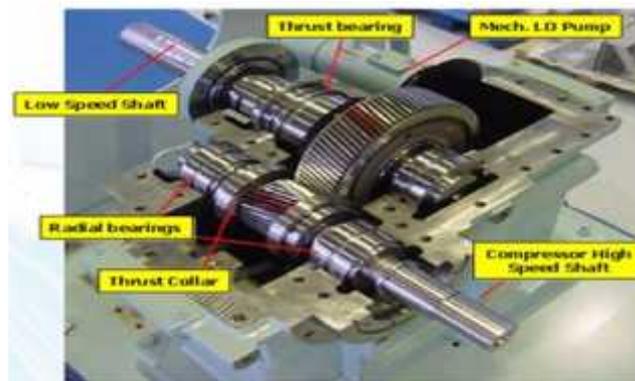


Figure 5.6. : Structure d'un multiplicateur.

Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice.

5.3.2 Fréquence de rotation :

La fréquence de rotation est liée au diamètre du rotor et elle diminue lorsque le diamètre augmente. Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande.

La plupart des générateurs ont besoin de tourner à une certaine vitesse (de 1000 à 3000 tours/min), pour garder un bon rendement au générateur électrique il est nécessaire d'augmenter la fréquence de rotation obtenue avec l'aéromoteur avant d'entraîner un générateur électrique classique. Cette augmentation est réalisée à l'aide du multiplicateur, aussi appelé boîte de vitesse qui est un train d'engrenages.

Dans le cas de la boîte de vitesse d'un aérogénérateur, on utilise généralement un système d'engrenages composé de roues dentées de différents diamètres avec un nombre de dents différents. Le rapport des vitesses de rotation () des arbres d'entrée et de sortie est égal au rapport des diamètres des roues.

Le rendement est variable suivant la puissance transmise mais en moyenne 97%, Il s'agit d'une composante lourde et coûteuse mais elle permet d'avoir un rotor relié par l'arbre lent au multiplicateur tournant lentement (30 à 40 tours/min) et de se coupler à un générateur donc peu cher, qui tourne 40 à 50 fois plus vite étant relié au multiplicateur par l'arbre rapide.

La transmission d'un mouvement à l'aide d'un engrenage permet d'assurer un rapport de multiplication fixe.

Le rapport de transmission :

$$R = \frac{n(\text{sortie})}{n(\text{entrée})} \quad (5.18)$$

Couple issu du multiplicateur :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (5.19)$$

$C_{aéro}$: couple aérodynamique ;

G : gain du multiplicateur.

$$C_g = \frac{690426.5}{90} = 7671.4 \text{ N m}$$

5.4. Dimensionnement de la génératrice :

Équation mécanique de l'arbre :

$$J_t \cdot \frac{d\omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{méc} \quad (5.20)$$

J_t : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice ;

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (5.21)$$

$C_{méc}$: c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte ;

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

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux;

C_g : le couple issu du multiplicateur.

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (5.22)$$

La vitesse du rotor de la génératrice en rad/s, et N en tr/min :

D'après la formule :

$$= k \times \check{S} \quad (5.23)$$

Avec :

$$k = 90$$

$$\check{S} = 1.71 \text{ rad/s}$$

On a :

$$= 153.9 \text{ rad. } S^{-1}$$

$$= \frac{153.9 \times 60}{2\pi} = 1470 \text{ tr / min}$$

On suppose que ce cas la transmission est parfait (en néglige les tous les pertes) :

Ça veut dire que la puissance de la génératrice elle est même que la puissance réelle du rotor:

$$P_{\text{génératrice}} = 1.18 \text{ MW}$$

Et :

$$C_1 \times \check{S}_1 = C_2 \times \check{S}_2 \quad (5.23)$$

C_1 : le couple la turbine ;

\check{S}_1 : la vitesse de la turbine en (rad/s) ;

C_2 : le couple de la génératrice ;

\check{S}_2 : la vitesse de la génératrice,

$$C_2 = \frac{C_1 \times \check{S}_1}{\check{S}_2} \quad (5.24)$$

Donc :

$$C_2 = \frac{690426.5 \times 1.71}{153.9} = 7671.4 \text{ N m}$$

Une fois notre dimensionnement achevé, nous pouvons passer au choix d'une machine asynchrone à double alimentation sur un catalogue technique d'un éventuel constructeur avec les données :

- $P = 1,18 \text{ MW}$;
- $n = 1470 \text{ tr/mn}$;
- $C = 7671.4 \text{ N.m}$.

Sur un éventuel catalogue de constructeur de machines électriques, nous faisons facilement le choix d'une MADA de deux (02) Paires de pôles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] . Site Internet : www.aie ;
- [2] . B. Melton, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002 ;
- [3] . P. Leconte, M. Rapin et E. Széchenyi, *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique*, Réf : BM 4 640 ;
- [4] . M. Ben medjaded, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008 ;
- [5] . N.KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », *Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger* 2008 ;
- [6] . nachida kasbadji Marzouk "évaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie " l'université Abou bekr belkaïd de Tlemcen 2006 ;
- [7] . ARMAND BOYETTE «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006 ;
- [8] . Site Internet : <http://éolienne.Ooreka.fr> ;
- [9] . METATLA SAMIR «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009;
- [10] . NICOLAS LAVERDURE «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005 ;
- [11] . Site Internet : <http://energie.demain.e-mon.site.com> ;
- [12] . S. El aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'Université de Lille, 2004 ;
- [13] . Site Internet : <http://www.windpower.org/fr/core.htrn> ;
- [14] . B. Denis, V. Paredes, « l'énergie éolienne », INSA, Lyon ;
- [15] . G. Cuntz, *Guide de l'énergie éolienne (Éolienne et aérogénérateurs)*. Edi sud Ed. (2001);
- [16] . A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005 ;
- [17] . Y. Djeriri, "Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien". Mémoire de magister, 2009, Université de Sidi Bel.Abbés, Algérie ;
- [18] . A.D. Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande enTemps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999;
- [19] . J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", *Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique*, D 451-9, D3II ;
- [20] . A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eoliennedans la Production de l'Electricité", *Revue 3EI*, Mars 2000, pp. 24-38 ;

- [21] . D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11th International symposium on power electronics – En 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings. - 138 - ;
- [22] . C. Colliex, A. Tounzi, F. Piriou, "Vector Control of an Autonomous Induction Generator Connected to a PWM Rectifier", Proceedings of EPE 97, vol. 2, pp. 711-716, Trondheim, Norvège, 8-10 Septembre 1997;
- [23] . S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998 ;
- [23] . L. Refoufi, B.A.T. Al Zabawi, A.G. Jack "Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume14, Issue 3, 1999, pp 333-339 ;
- [24] .G.A. Smith, K.A. Nigim, "Wind-energy Recovery by a Static Scherbius Induction Generator", Proc. IEE, 1981, 128, pp. 317-324 ;
- [25] . N. Mohan, T. M. Undeland, W.P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8 ;
- [26] . M. Machmoum, "Contribution à l'Etude et la Commande Numérique de l'Ensemble Cyclo convertisseur Triphasé - Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989 ;
- [27] . C. Kelber, W.Schumacher, "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines", VSSH 2000. European Conference Variable Speed in Small Hydro. Grenoble, France, 26-28 Jan. 2000 ;
- [28] . R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine - A Comparison With Alternative Schemes", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002, pp 414-421 ;
- [29] . B. Raison, A. Morales, M. Crappe, "L'Energie Electrique Eolienne, Partie I : Présentation Générale et Approche Probabilistique", Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 5/3-4 – 2002, pp. 405-484 ;
- [30] . A.S. Neris, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, "A Variable Speed Wind Energy Conversion Scheme for Connection to Weak AC Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, N° 1, March 1999, pp. 122;
- [31] . T. Weigel, "Demagnetization effect in synchronous machine with permanent magnets", Proceedings of the 33rd International Symposium on Electrical Machines, 1997, pp 99-104 ;
- [32] . B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la generation éolienne", JCGE'03, 5 et 6 juin 2003, Saint-Nazaire, pp. 141-145 ;
- [33] . R. Michaux, P. Letellier, "Les Machines Discoïdes à Champ Axial dans les Systèmes de Production Electrique", Revue de l'Electricité et de l'Electronique, N° 3, Mars 1997, pp. 37-42 ;
- [34] . M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaim, G. Barakat, N. Takorabet, Ch. Chillet, D. Matt, S. Taïbi, A. Tounzi, Ch. Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, "Comparaison de structures électromagnétiques pour une application en générateur à faible vitesse et fort couple, A paraître dans "Electrotechnique du Futur" - 9 & 10 Décembre 2003, Gif-sur-Yvette ;
- [35] . A. Toba, T. A. Lipo 'Generic Torque-Maximizing Design Methodology of Surface Permanent-Magnet Vernier Machine' IEEE Trans Ind. Appl., vol 36, n°6, Nov 2000, pp. 1539-1546 ;
- [36] . Belkacem, T. O. U. A. L. (2010). Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable (Doctoral dissertation, Université de Batna 2) ;

- [37] . Vidal, P. É. (2004). *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse) ;
- [38] . Dendouga, A. (2010). *Contrôle des puissances actives et réactive de la machine a doublé alimentation (DFIM)* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2) ;
- [39] . Youcef, B. (2010). *Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Lakhdar Ben Amara dit Hama Lakhdar d'El Oued);
- [40] . Mouloud, B. (2012). *Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable: application sur un site à Tindouf* (Doctoral dissertation, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès) ;
- [41] . Amine, H. M. (2012). *Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques* (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas de Sétif 1) ;
- [42] . Abderrahim, I. (2015). *Amélioration de la qualité d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation et connecté au réseau électrique* (École de technologie supérieure) ;
- [43] . Riyadh, R. O. U. A. B. H. I. (2012). *Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application: Energie éolienne* (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas de Sétif1);
- [44] . Salloum, G. (2007). *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Toulouse, INPT) ;
- [45] . Guy SEGUIER, Francis NOTELET, « *Electrotechnique industrielle* ». Edition Lavoisier, 2006 ;
- [46] . Khojet El Khil, S. (2006). *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA): optimisation des pertes dans les convertisseurs: reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé* (Doctoral dissertation, Toulouse, INPT) ;
- [47] . Hopfensperger, B., Atkinson, D. J., & Lakin, R. A. (2000). *Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder*. IEE Proceedings-Electric power applications, 147(4), 241-250 ;
- [48] . Bennani, H. (2011). *Machine asynchrone à double alimentation: les lois de commande en régime permanent* (Doctoral dissertation, Université Laval) ;
- [49] . Ayoub, T. (2013). *Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Université du Québec en AbitibiTémiscamingue) ;
- [50] . Houaria, A. (2011). *Commande par mode de glissement d'une machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran) ;
- [51] . P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique*, Réf : BM 4 640 ;
- [52] . Site Internet : <http://www.windpower.org/fr/core.htm> ;
- [53] . M. Ben medjaded, « *Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement* », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008 ;
- [54] . A. Mirecki. *Thèse Doctorat (Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance) de l'institut national polytechnique de Toulouse* (2005) ;
- [55] . Site Internet : fr.m.wikipedia.org ;