

17/621.856

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

**Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UNE MADA UTILISEE DANS UN SYSTEME EOLIEN

Présenté par : FISLI ISMAIL & KACI RAHIMA

Sous la direction de : Dr. BOULOUH M.

Juin 2015

Remerciements



Au terme de notre travail on remercie **Dieu** le
puissant créateur qui nous a guidés vers
l'achèvement de ce travail.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à
mon encadreur **Dr. BOULOUEH M** : docteur au
département de Génie électrotechnique et
automatique de l'université 08 mai 1945 à Guelma
pour son aide et ses encouragements, aussi ses
orientations et surtout son soutien moral.

Je remercie tous les enseignants et tous ceux à qui
nous devons notre formation.

Cordialement.

A decorative border of yellow flowers and a pink rose surrounds the text. The yellow flowers are small and bell-shaped, arranged in a dense border. A single pink rose is positioned in the lower right quadrant of the page.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère,

Mes frères et mes sœurs,

Tous mes proches,

Tous mes amis,

Toute la promotion 2015 de l'électrotechnique,

Tous ceux qui me sont chers.

Ismail.



Dédicace :

Je dédie ce modeste travail a :

Ma très chère mère, et mon très cher père, à
leur grand sacrifice et le dévouement pour mon
bonheur.

Mes sœurs, KARIMA, HANAN, WIDED et toute
ma famille sans exception.

A mes amis et toute personne qui ma aidée de
loin ou de prés.

Rahma.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Les différentes ressources d'énergie	
Introduction	2
I.1. Les énergies non renouvelables, d'origines fossiles ou fissiles	3
I.2. Les énergies renouvelables	4
I.2.1. Les différents types d'énergies renouvelables	4
I.2.1.1. L'énergie solaire	4
I.2.1.2. L'énergie éolienne	5
I.2.1.3. L'énergie hydraulique - Hydroélectricité	5
I.2.1.4. La biomasse	6
I.2.1.5. La Géothermie	7
I.3. Utilisation d'une éolienne pour la production d'énergie électrique	9
I.3.1. Description d'une éolienne	9
I.3.2. Différents types d'aérogénérateurs	13
I.3.3. Principe de fonctionnement	14
I.3.4. Puissance extraite du vent	14
I.3.5. Zones de fonctionnement	16
I.3.6. Systèmes de conversion électromécanique	17
I.3.6.1. Système à vitesse constante	18
I.3.6.2. Système à vitesse variable	19
I.3.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	19
I.3.8. Programme des énergies renouvelables en Algérie	20

Conclusion	23
-------------------------	-----------

Chapitre II : La MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation)

Introduction	24
---------------------------	-----------

II.1. Définition	24
-------------------------------	-----------

II.2. Composition de la MADA	25
---	-----------

II.3. Machine asynchrone	26
---------------------------------------	-----------

II.4. Principe de fonctionnement	30
---	-----------

II.5. Modélisation	32
---------------------------------	-----------

II.5.1.Modélisation de la MADA	32
---	-----------

II.5.1.1.Equations électriques	33
---	-----------

II.5.1.2.Equations magnétiques	33
---	-----------

II.5.1.3.Equation du couple	33
--	-----------

II.5.2.Modélisation des convertisseurs d'électronique de puissance	34
---	-----------

II.6. Convertisseurs de puissances	34
---	-----------

II.7. Méthode de contrôle des convertisseurs	36
---	-----------

Conclusion	37
-------------------------	-----------

Chapitre III : Simulation et résultats

Introduction	38
---------------------------	-----------

III.1.Commande vectorielle par orientation du flux statorique	39
--	-----------

III.2.Commande vectorielle indirecte	39
---	-----------

III.3.Modalisation de la turbine éolienne	39
--	-----------

III.3.1.Modèle du multiplicateur	40
---	-----------

III.3.2.Modèle de l'arbre	41
III.4.Simulation de la turbine	41
III.5.Modèle de simulation	42
III.6.Tableau des données	45
III.7.Résultats de Simulation du système de production d'éolienne	45
III.8.Interprétation des résultats obtenus	47
Conclusion	48
Conclusion générale	49
Bibliographie	50

Introduction générale :

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne; la lumière solaire excitant les photopiles; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie. L'aérogénérateur est basé 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 à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien.

Le premier chapitre est consacré aux différentes ressources d'énergie.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Dans le troisième chapitre on va simuler un système de conversion d'énergie éolienne utilisant une MADA, avec le logiciel Matlab.

CHAPITRE I

Les différentes ressources d'énergie

Introduction :

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation énergétique mondiale va augmenter en moyenne de 2 % par an. La consommation énergétique va donc doubler dans 35 ans.

Aujourd'hui l'énergie est essentielle dans le mode de vie des pays développés et industrialisés. Actuellement, les ressources en énergie dans le monde font débat et à l'heure du réchauffement climatique. Les énergies sont utilisées dans tout les domaines, et à toute les échelles: industrielles, transports, électricité, chauffage... Chaque individu les utilise dans la vie quotidienne.

Actuellement les énergies primaire les plus utilisées sont d'origines fossiles: comme le pétrole, le gaz, l'uranium, qui est ensuite utilisé pour le nucléaire, le charbon Elles émettent une grande quantité de gaz à effet de serre responsables du changement climatiques, se sont des sources d'énergie épuisables. Chaque année leurs ressources sur la planète diminuent. Le nucléaire est aujourd'hui l'une des principales sources énergétique dans le monde, pour répondre aux besoins en électricité.

Les énergies renouvelables représentent une alternative intéressante aux sources actuelles en énergie. Ces dernière, certains types d'énergie renouvelable se sont fortement développés, et ont augmenté notamment la production de l'énergie. Néanmoins la production est toujours inférieure au besoin énergétique, et les énergies renouvelables occupent une place minime, par rapport aux autres ressources énergétiques. Les énergies renouvelables sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux. Les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales.

Le meilleur moyen de réduire les dégâts que subit notre planète est de mettre en œuvre des mesures pour développer les énergies renouvelables et améliorer les rendements énergétiques. Ces mesures sont importantes pour notre quotidien mais également pour le secteur industriel et les entreprises. Le rendement énergétique dans le secteur industriel, ou l'autosuffisance complète grâce aux énergies renouvelables, ne vont pas seulement améliorer notre environnement mais vont également permettre

d'augmenter la rentabilité des entreprises. Cette augmentation de la rentabilité sera obtenue grâce à une réduction des coûts énergétiques et à un accroissement général de l'efficacité des processus.

I.1. Les énergies non renouvelables, d'origines fossiles ou fissiles :

Les énergies non renouvelables dans la mesure où elles sont incapables de se renouveler. Certaines des énergies non renouvelables sont appelées des énergies Fossiles ou Fissiles.

Le Pétrole est une matière organique. Elle est composée de minuscules fragments d'animaux et plantes qui se mêlent aux sédiments. Pour que la roche en vienne à produire du pétrole, la sédimentation doit être riche en matière organique ainsi qu'en oxydation. Puis il se transformera en gaz, en huile ou en pétrole durant l'enfouissement. Le produit transformé sera différent selon la profondeur, la durée du séjour et la température à laquelle la matière organique aura été soumise. Les mouvements des sols entraînent une migration des hydrocarbures jusqu'à ce qu'elle soit retenue par des roches (ou encore remonté jusqu'à la surface de la terre). Malheureusement il est très difficile de déterminer les endroits où il y a la présence d'huile et de gaz. Lorsque l'on arrive à trouver un endroit en présence de pétrole on installe un cheval de pompage qui consiste à puisé le pétrole enfuit sous terre.

Le gaz naturel est une énergie primaire, considérée comme étant la plus propre des énergies fossile de notre époque. Elle est composée d'un mélange d'hydrocarbure ainsi que de méthane. C'est une énergie naturellement connue sous la forme gazeuse étant incolore et inodore étant plus légère que l'air. On la trouve dans les gisements secs ou dans les gisements mixtes. "La formation du gaz naturel provient de la lente métamorphose de micro-organismes (animaux et végétaux microscopiques) qui constituent le plancton. Ces organismes, déposés au fond des océans en bordure des continents, se sont lentement incorporés aux sédiments pour constituer la roche-mère (ensemble de couches géologiques dans lesquelles se sont formés des hydrocarbures).

L'énergie thermique à flamme, elle dépend des éléments contenue dans les sous-sols (pétrole, gaz..) c'est une énergie qui utilise la chaleur pour produire de l'énergie:

I.2. Les énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

I.2.1. Les différents types d'énergies renouvelables :

I.2.1.1.L'énergie solaire :

L'énergie solaire provient des réactions thermonucléaires qui se produisent au cœur du soleil. Cette énergie est émise sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'ondes dans toutes les directions. Quand le rayonnement rencontre un obstacle, l'énergie est réfléchi, transmise ou bien absorbée (sous forme de chaleur). La quantité d'énergie solaire diminue plus on s'éloigne du soleil, ce qui signifie que la quantité d'énergie disponible varie à différentes époques de l'année.

- **L'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque – à distinguer de l'énergie solaire thermique – provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux "semi-conducteurs", qui ont comme propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. Dans le cas du photovoltaïque, cette énergie est apportée par les photons, les composants de la lumière, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant le courant électrique.

- **Le solaire thermique basse température :**

L'énergie solaire peut servir à chauffer votre eau sanitaire grâce à un chauffe-eau solaire individuel, mais aussi alimenter un système ayant la double fonction de chauffage et de production d'eau chaude : le système solaire combiné (SSC), aussi appelé "combi". D'une façon générale, un chauffe-eau solaire couvre entre 40 et 80 % des besoins en eau chaude, et un SSC de 25 à 60 % des besoins en chauffage et en eau chaude.

- **Le solaire thermique haute température :**

La concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. Selon les différentes technologies de captage, la chaleur produite est généralement comprise entre 400 °C et 1000 °C. On distingue deux usages principaux : la production de chaleur (thermique), la production d'électricité (thermodynamique). Dans leur principe, les concentrateurs optiques superposent en un même point des rayons solaires collectés sur une surface de captage, le plus souvent formée de miroirs. Différentes géométries de concentrateurs ont été expérimentées. Ils sont dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur ou en hauteur et en azimut.

I.2.1.2. L'énergie éolienne :

Une éolienne est constituée d'un rotor à 2 ou 3 pales, d'un système de transmission mécanique directe ou à multiplicateur et de circuits de gestion du courant (régulateur, onduleur, etc., selon le type de machine). L'ensemble se trouve dans la nacelle posée sur le mât, ou la tour, de l'éolienne. Le vent fait tourner les pales qui entraînent le générateur électrique, d'où l'appellation aérogénérateur pour désigner les éoliennes qui fabriquent de l'électricité. Le courant produit est rendu compatible avec le réseau de distribution qui le reçoit. Tous les éléments d'un aérogénérateur font appel à ce que la technologie d'aujourd'hui offre de mieux. Ainsi les pales ont-elles des profils et des matériaux issus de l'aéronautique. Quant aux parties électriques, leur rendement avoisine souvent 100 %, les pertes étant plutôt d'origine mécanique (frottements, rendements des engrenages, etc.). Globalement, les aérogénérateurs sont des machines qui affichent un bon rendement, puisqu'elles sont en mesure de transformer en électricité 30 à 50 % de l'énergie du vent.

I.2.1.3. L'énergie hydraulique - Hydroélectricité :

L'hydraulique est une des premières énergies domestiquée par l'homme (moulins au fil de l'eau, bateaux à aubes,...). L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIXe siècle. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très important.

Une petite centrale hydroélectrique exploite la force de l'eau pour générer de l'électricité. Son principe est de capter l'eau et la forcer à entraîner une turbine reliée à une génératrice. Pour les faibles dénivellations, une petite digue oriente une fraction du débit

vers les turbines. Pour les grandes dénivellations, des conduites suivent la pente de la montagne pour amener l'eau vers les turbines. Selon le débit et la vitesse de la veine d'eau, la turbine sera différente. Pour les faibles hauteurs d'eau avec des débits importants (une rivière de plaine alluviale), on fera appel à des turbines à axe vertical de type Kaplan ou Francis. Pour les chutes de grande hauteur et de faible débit (cascade ou torrent déviés en conduites forcées), des turbines à axe horizontal de type Pelton ou Francis donnent les meilleurs résultats.

- **Les énergies marines :**

Les mers et océans recouvrant 70 % de la surface de la planète, il n'est donc pas surprenant que l'homme redouble d'inventivité pour capter les énergies marines, encore appelées thalasso-énergies. Elles se conjuguent au pluriel car la filière comprend l'exploitation énergétique de tous les flux d'énergie spécifiquement fournis par les mers et les océans :

- la houle : l'énergie des vagues
- les courants de marée
- les courants océaniques
- le gradient thermique
- la pression osmotique : le différentiel de salinité de l'eau peut créer un flux utilisé pour produire de l'électricité.

I.2.1.4. La biomasse :

- **La biomasse solide :**

La biomasse solide représente les matériaux d'origine biologique qui peuvent être employés comme combustible pour la production de chaleur ou d'électricité. Ce sont principalement les ressources ligneuses (à base de lignine) d'origine forestière, agricole ou urbaine, aussi appelées bois-énergie : le bois bûche, les granulés de bois, les déchets de bois sous forme de plaquette ou de sciure... Ce sont aussi les matières organiques telles que la paille, les résidus de récoltes et les matières animales. Enfin, les liqueurs noires, issues de

l'industrie papetière, et les déchets urbains solides renouvelables sont aussi considérés comme biomasse solide.

- **Le biogaz :**

Le biogaz est un gaz combustible, mélange de méthane et de gaz carbonique, additionné de quelques autres composants. Le préfixe bio (vivant) indique sa provenance : les matières organiques, qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation. On l'appelle aussi gaz naturel "renouvelable", par opposition au gaz naturel d'origine fossile. Le biogaz se nomme encore "gaz de marais", au fond duquel se décomposent des matières végétales et animales. C'est également du biogaz qui est à l'origine des feux follets des cimetières ou de l'embrasement spontané des décharges non contrôlées.

- **Les biocarburants :**

Les biocarburants, parfois appelés agrocarburants, sont issus de la biomasse. Il existe principalement deux filières industrielles : l'éthanol et le biodiesel. Ils peuvent être utilisés purs comme au Brésil (éthanol) ou en Allemagne (biodiesel), ou comme additifs aux carburants classiques. La France a d'abord opté pour cette dernière solution, mais autorise depuis 2006 un pourcentage plus élevé d'éthanol en mélange (E85 = jusque 85 % d'éthanol dans le réservoir).

L'éthanol est le premier carburant d'origine végétale à avoir été utilisé. Il s'agit d'un alcool éthylique résultant de la fermentation de sucre ou hydrolyse de l'amidon, et d'une distillation. Il est produit en France à 70 % à partir de la betterave, et à 30 % à partir de céréales.

I.2.1.5. La Géothermie :

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

- **La géothermie très basse énergie :**

S'applique aux nappes d'une profondeur inférieure à 100 m et à faible niveau de température (moins de 30°C). La chaleur extraite est utilisée généralement pour assurer le chauffage et le rafraîchissement des locaux après élévation de la température au moyen d'une pompe à chaleur.

- **La géothermie basse énergie :**

Appelée aussi basse température ou basse enthalpie, explore des aquifères situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. La température atteint entre 30°C et 90°C : trop faible pour produire de l'électricité mais idéal pour produire de la chaleur. Les applications vont du chauffage urbain au thermalisme, en passant par le chauffage des serres et le séchage des produits agricoles.

- **La géothermie moyenne énergie :**

Aussi appelée moyenne enthalpie, explore le plus souvent des gisements d'eau chaude ou de vapeur humide compris entre 90 et 150°C. Dans les bassins sédimentaires, il faut atteindre des profondeurs de 2 000 à 4 000 mètres pour obtenir ces températures. Dans des zones plus propices, la géothermie moyenne énergie pourra être exploitée à moins de 1 000 mètres. Cette voie est utilisée pour produire de la chaleur, valorisée notamment dans des processus industriels, et éventuellement de l'électricité.

- **La géothermie haute température :**

Ou haute enthalpie, exploite des fluides atteignant des températures supérieures à 150°C, pour produire de l'électricité. Les réservoirs sont localisés entre 1 500 à 3 000 mètres de profondeur, généralement dans les zones de volcanisme ou de tectonique active.

- **La géothermie profonde assistée :**

Est une voie de recherche qui consiste à extraire la chaleur des roches chaudes fissurées situées entre 3 et 5 kilomètres de profondeur. Contrairement à la géothermie haute température classique qui exploite des réservoirs capables de fournir des débits de fluides élevés, la géothermie profonde assistée nécessite de stimuler les roches peu perméables en injectant de l'eau sous forte pression dans le sol.

I.3. Utilisation d'une éolienne pour la production d'énergie électrique :

I.3.1. Description d'une éolienne :

L'énergie éolienne est exploitée par l'homme depuis des millénaires: il suffit d'évoquer les premiers Égyptiens remontant le Nil à la voile, les moulins à vent verticaux permettant de pomper l'eau et de moudre le grain et plus proches de nous, la production d'électricité raccordée au réseau, les applications hors-réseaux destinées à l'électrification des campagnes ou des zones reculées ou encore la production d'électricité pour les stations de base des téléphones portables. Les dernières décennies ont vu la technologie de l'éolien connaître un développement fulgurant, en particulier en ce qui concerne la production d'électricité. En 1980, la puissance nominale des éoliennes n'était que de quelques watts. Aujourd'hui, celle des plus grandes structures peut atteindre 7 500 kW (voir Fig.1.1). Les plus grandes éoliennes possèdent actuellement un rotor de 126 mètres de diamètre et des machines aux dimensions encore plus élevées sont en cours de développement. [1]

La croissance exponentielle de la taille des éoliennes fut motivée par un certain nombre de facteurs, et principalement par des avantages économiques : la proportion que représentent les frais de surveillance, les frais de raccordement au réseau et les frais de maintenance sur la valeur du système diminue si la taille augmente.[3] Les premières éoliennes présentaient une puissance nominale pouvant atteindre 60 kW.

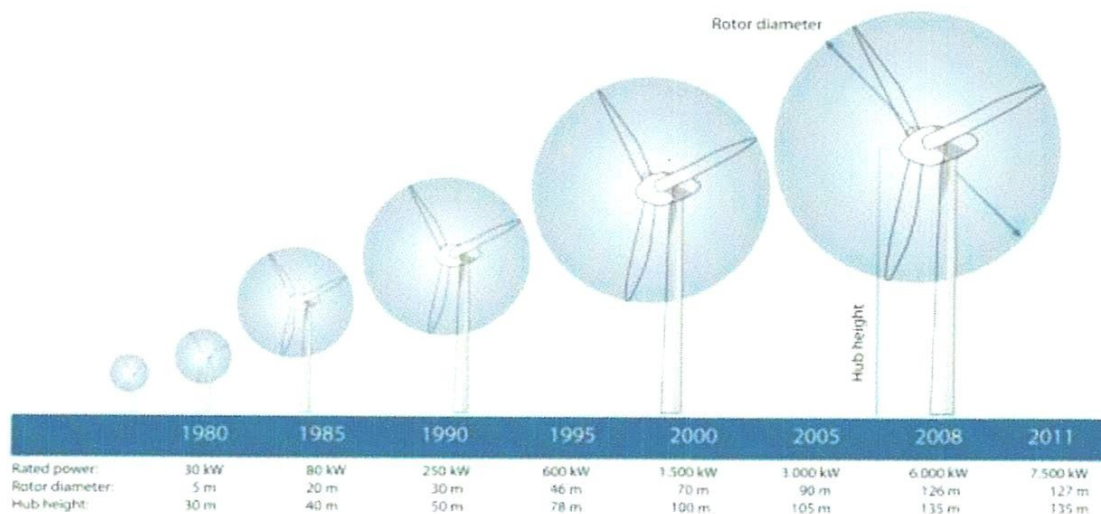


Fig.1.1.Évolution de la puissance nominale, du diamètre du rotor et de la hauteur du moyeu des éoliennes de 1980 à 2011.[2]

En comparaison avec des grandes installations d'aujourd'hui, le coût des petites éoliennes était et reste encore beaucoup plus élevé. Cela s'explique en partie par le fait que, proportionnellement au diamètre du rotor, il est nécessaire d'accroître la hauteur des mâts pour éviter tout obstacle au passage du vent et échapper aux conditions défavorables que représentent les turbulences et le cisaillement du vent à proximité du sol. et échapper aux conditions défavorables que représentent les turbulences et le cisaillement du vent à proximité du sol. À la fin de l'année 2010, quelques 194 GW de puissance éolienne étaient installés à travers le globe. Si l'on regarde 20 ans en arrière, la capacité installée a été multipliée par plus de vingt (Fig.1.2).

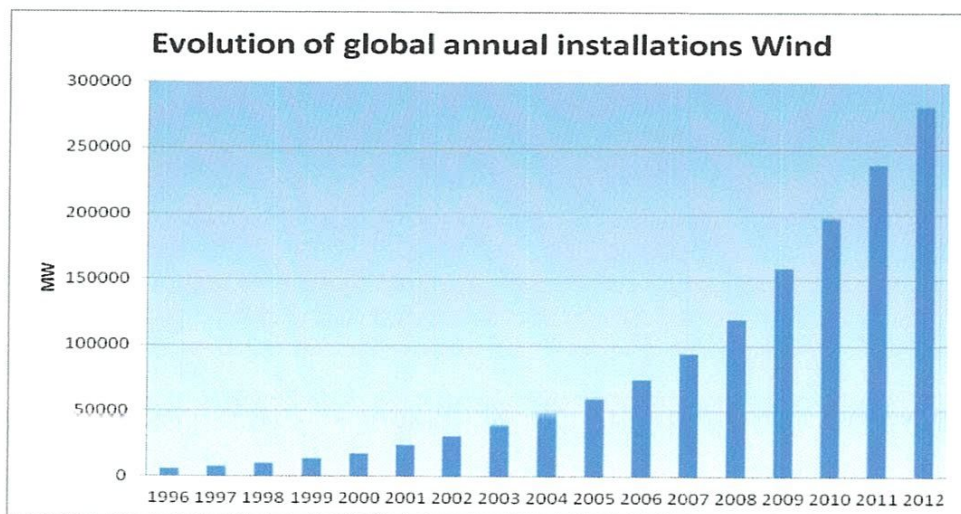


Fig.1.2.Évolution de la capacité éolienne installée dans le monde jusque 2012.[3]

- **Le mât :**

Le mât d'une éolienne est en béton, en métal ou en bois ; il peut également être fabriqué dans une combinaison de ces matériaux. Les plus grandes éoliennes possèdent une tour tubulaire en acier construite par sections. La plupart de ces mâts sont généralement constitués de deux à quatre sections de 20 à 30 mètres chacune et munies d'une bride aux deux extrémités. Elles sont assemblées par des boulons sur le site même. Des tours en béton peuvent être dressées avec des tronçons tout spécialement conçus assemblés directement dans le parc éolien. La fabrication des tronçons a, quant à elle, entièrement lieu dans une usine de préfabrication du béton. Il est également possible de construire la tour entièrement sur le site en ayant recours à un coffrage grimpeur (la

technique du «béton coulé sur place »). Les travaux sont cependant fréquemment interrompus lorsque la température est trop basse (en hiver). La construction des tours en treillis consiste à utiliser le matériau uniquement là où il est nécessaire pour supporter la structure. Cette méthode permet de réduire le poids du mât. Par ailleurs, le coût des matériaux est bien moindre que pour les tours tubulaires et les profils en acier sont aisément transportables, en particulier en terrains complexes. Les besoins de maintenance et d'entretien peuvent s'avérer relativement élevés car les nombreux profils en acier nécessitent des contrôles réguliers.

La fondation doit garantir la stabilité de l'éolienne. En fonction de la consistance du sol, il existe différents modes de construction. Sur la terre ferme, le type de fondation le plus fréquent est une vaste dalle de béton sous terre constituant le socle de l'éolienne (dalle de fondation ou fondation superficielle).

- **La nacelle :**

- 1 principal transporteur
- 2 moteur lacets
- 3 générateur annulaire
- 4 adaptateur lame
- 5 moyeu de rotor
- 6 pales de rotor



Fig.1.3.Éolienne sans multiplicateur

La nacelle abrite toute la machinerie permettant le fonctionnement de l'éolienne. Devant être à même de pivoter pour suivre la direction du vent, elle est fixée au mât par des roulements (voir le chapitre sur le système d'orientation). La nacelle comporte le système de transmission constitué des éléments suivants. L'arbre du rotor avec roulement, le multiplicateur (absent sur les éoliennes à entraînement direct), [4] le ou les freins, l'accouplement, la génératrice, l'électronique de puissance, le système de refroidissement/de réchauffement et une petite grue.

- **Le rotor :**

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les dimensions d'une éolienne sont beaucoup plus grandes qu'on l'imagine. La tour peut atteindre jusqu'à 80 mètres avec une nacelle qui peut avoir des longueurs énormes selon la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année. La figure 1.4 nous montre la puissance suivant le diamètre de l'éolienne, [6].

- | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|
| 1 refroidisseur d'huile | 2 refroidisseur d'eau | 3 transformateur | 4 capteur de vent |
| 5 convertisseur | 6 grue | 7 génératrice | 8 accouplement à disques |
| 9 dispositifs d'orientation | 10 multiplicateur | 11 frein | 12 fondation |
| 13 roulement des pales | 14 moyeu | 15 pale | 16 cylindre de calage |
| 17 contrôleur du moyeu | | | |

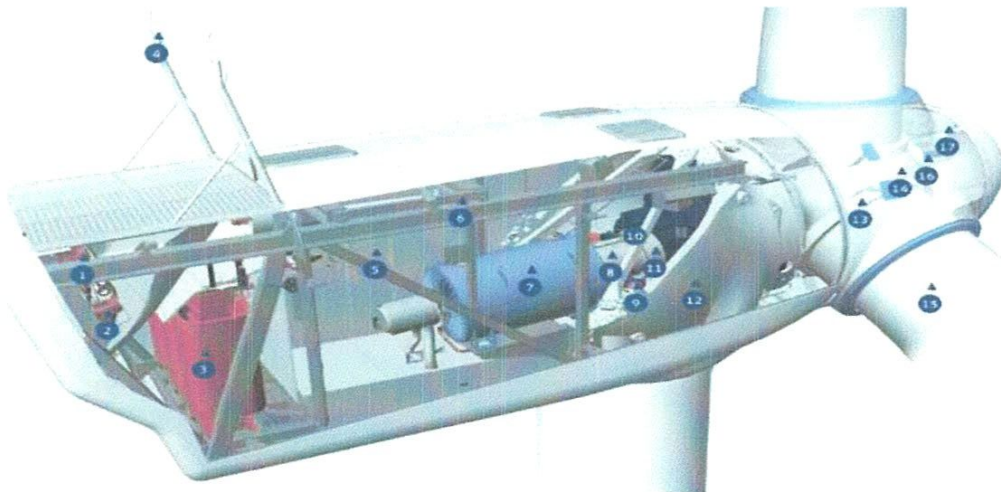


Fig.1.4.Éolienne avec multiplicateur.[5]

I.3.2. Différents types d'aérogénérateurs :

La puissance aérodynamique capturée par une turbine s'exprime par :

$$P_{aere} = \frac{1}{2} \rho S C_p V v^3 \quad (1.1)$$

Où C_p est le coefficient de puissance aérodynamique, ρ la masse volumique de l'air (environ $1,2 \text{ kg/m}^3$), S la surface active de l'éolienne et $V v$ la vitesse du vent.

Une turbine est typiquement caractérisée par sa courbe $C_p = f(\lambda)$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V v} \text{ coefficient de vitesse réduite} \quad (1.2)$$

Où Ω est la vitesse angulaire de rotation et λ est le rapport de la vitesse (linéaire) périphérique en bout de pale sur la composante normale de la vitesse du vent.

Les turbines sont généralement placées face au vent (par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel), $V v$ est la vitesse du vent supposée constante (hors turbulences). [13]

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre :

- les turbines éoliennes à axe horizontal.
- les turbines éoliennes à axe vertical.



Fig.1.5.technologies éoliennes

I.3.3. Principe de fonctionnement :

Le principe de base de l'éolienne est de capter l'énergie mécanique du vent en vue de la transformer en énergie électrique et pour cela il faut lever bien haut l'éolienne pour qu'elle puisse profiter au maximum du vent. Ceci nécessite une tour toujours élevée par rapport à la taille de l'éolienne.

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.[6]

I.3.4. Puissance extraite du vent :

La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de [11 l'expression suivante] [12] :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad (1.3)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air en kilogrammes par mètre cube ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$), R_t est le rayon de la turbine (ou longueur d'une pale) en mètre (m), v la vitesse du vent en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) et C_p , le coefficient de puissance. Ce coefficient, correspondant au rendement aérodynamique de la turbine, a une évolution non linéaire en fonction du ratio de vitesse, λ :

$$\lambda = (R_t \cdot \Omega_t) / V \quad (1.4)$$

Où Ω_t est la vitesse mécanique de la turbine en radians par seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ). La relation (1.1) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent induit (v) une grande variation de la puissance générée (P_t).

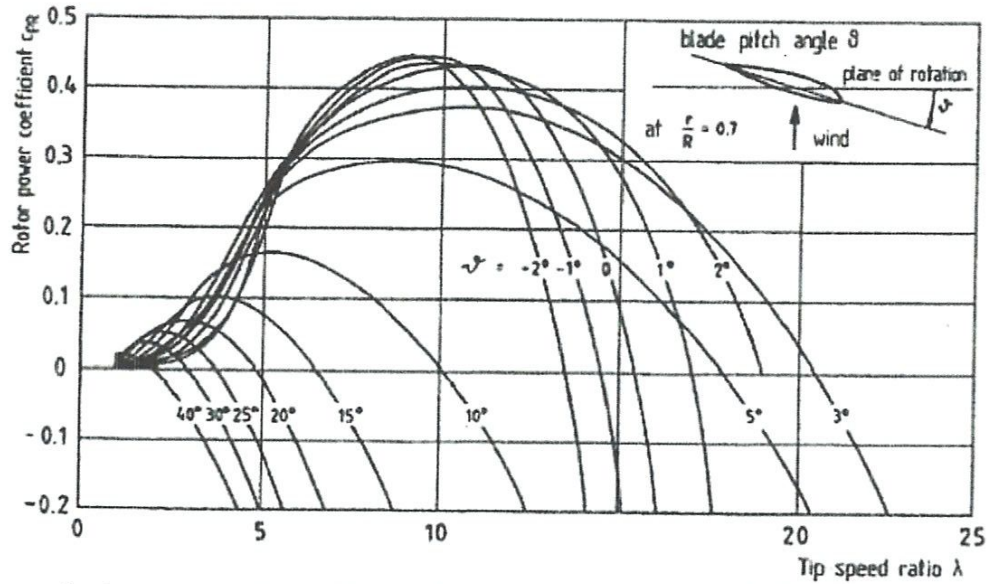


Fig.1.6.Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et du ratio de vitesse.[7]

On peut remarquer sur la (fig.1.6) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour un angle de calage égale à -2° et une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle λ_{opt} . Pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales, il existe une valeur de λ appelée λ_{opt} pour laquelle on a coefficient de puissance C_p maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur.[8]

Dans la littérature, des expressions approchées du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes à vitesse fixe (1.3) et à vitesse variable (1.4) sont proposées [9] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,44\left(\frac{125}{\lambda i} - 6,94\right)e^{-\frac{16,5}{\lambda i}} \quad (1.5)$$

$$\text{Avec} \quad \lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + \frac{0,002}{\beta^3 + 1}} \quad (1.6)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,73\left(\frac{151}{\lambda i} - 0,58 \cdot \beta - 0,002 \cdot \beta^{2,14} - 13,2\right)e^{-\frac{18,4}{\lambda i}} \quad (1.7)$$

$$\text{Avec} \quad \lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0,02 \cdot \beta} + \frac{0,003}{\beta^3 + 1}} \quad (1.8)$$

Cependant, pour la modélisation des turbines éoliennes, il est plus aisé d'utiliser le coefficient de couple C_m afin d'avoir un générateur de couple mécanique et non plus de puissance qui sera couplé à un générateur électrique (utilisation de l'équation mécanique des couples pour la modélisation). Le couple mécanique produit par la turbine s'exprime de la façon suivante [10]:

$$Tt = \frac{Pt}{\Omega t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R t^3 \cdot V^2 \cdot C_m(\lambda, \beta) \quad (1.9)$$

On appelle coefficient de couple :

$$C_m = \frac{cp}{\lambda} \quad (1.10)$$

Son évolution est non linéaire comme illustré. Il peut être explicité à partir du coefficient de puissance :

$$C_m = \frac{Cp}{\lambda} = \frac{Tt}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot R t \cdot V^2} \quad (1.11)$$

S : Surface balayée par les pales [m²].

I.3.5. Zones de fonctionnement :

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale à partir d'une vitesse de vent nominale (fig1.7). Pour des vitesses de vent supérieures à , 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 pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnant : la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [14].

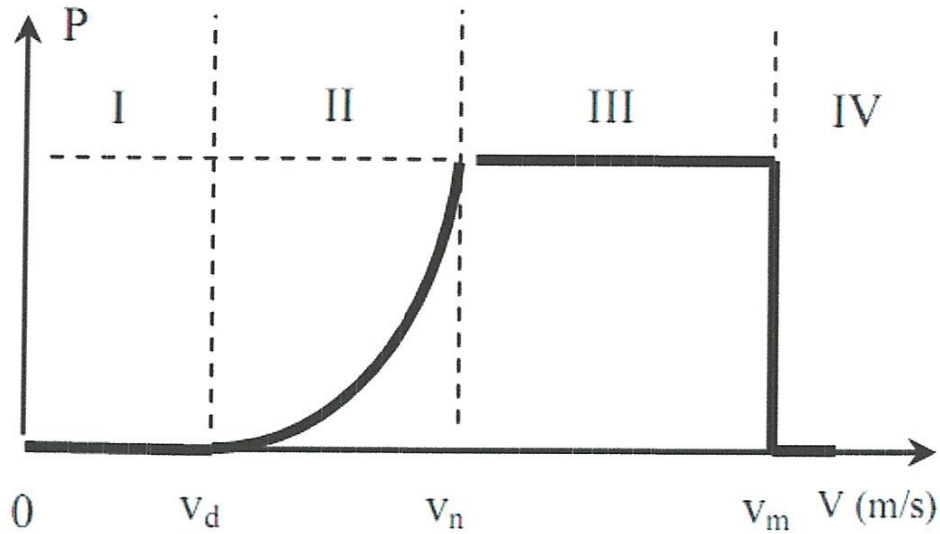


Fig.1.7.Zones de fonctionnement d'une éolienne

Les vitesses, V_d et V_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas), vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_d varie entre 2.5 m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du Vent V_r , Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Suivant les constructeurs, V_r varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n . V_m vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour les grandes majorités des éoliennes, V_m vaut 25m/s.
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie. [15, 16]

1.3.6. Systèmes de conversion électromécanique :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse

variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants : [6]

- **Fonctionnement à vitesse fixe :**
 - Système électrique plus simple.
 - Plus grande fiabilité.
 - Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
 - Pas besoin de système électronique de commande.
 - Moins cher.
- **Fonctionnement à vitesse variable :**
 - Augmentation du rendement énergétique.
 - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
 - Réduction des efforts subis par le train de puissance.
 - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité : Types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les MS et les MAS sous leurs diverses variantes.

I.3.6.1. Système à vitesse constante :

La GAS à cage, (fig.1.8), est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Son principal intérêt réside dans l'absence de contacts électriques par balais-collecteurs, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire. Puisque la fréquence du réseau est fixe, la vitesse du rotor est déterminée par le rapport du multiplicateur et du nombre de pôle de la génératrice. Ici la connexion est raccordée directement au réseau. Elle l'est effectivement en fonctionnement normal. Pour limiter le fort appel de courant dû à la magnétisation brutale au moment du couplage, un convertisseur statique de type gradateur est mis en œuvre pour permettre un établissement progressif de la tension aux bornes de la machine. Il est ensuite court-circuité.

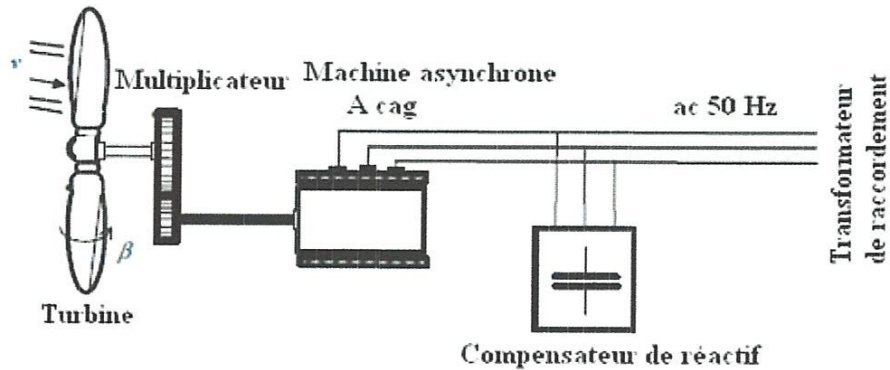


Fig.1.8. Éolienne à vitesse fixe.

I.3.6.2. Système à vitesse variable :

Les systèmes à vitesse variable se sont récemment développés grâce à l'évolution de l'électronique de puissance. L'obtention de la vitesse variable est souvent réalisée en utilisant trois solutions technologiques :

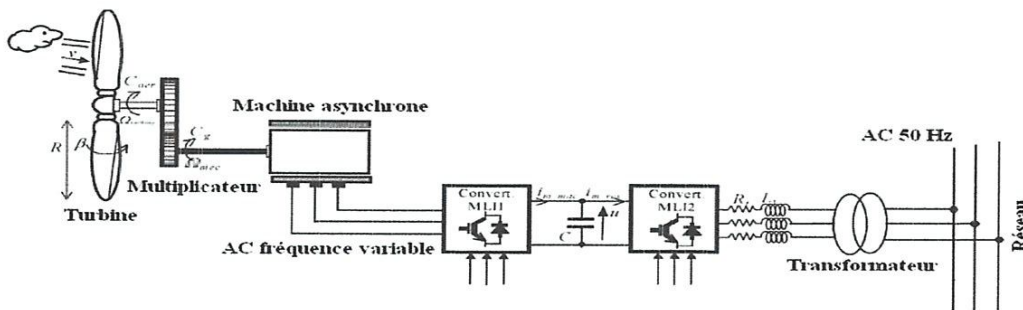


Fig.1.9. Éolienne basée sur une GAS à cage alimentée au stator
par deux convertisseurs MLI

I.3.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

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 inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.[6]

- **Avantages :**

Les principaux avantages de l'éolien sont :

- 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, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, après celle de l'hydraulique.

- les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laisse pas de trace.

- C'est une énergie décentralisée (source d'énergie locale) plus proche des consommateurs et qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.

- l'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.

- **Inconvénients :**

L'éolienne a quelques inconvénients :

- L'impact visuel.

- L'impact sonore, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.

- Le bruit aérodynamique qui a principalement pour origine le glissement de l'air sur les pales.

- L'impact sur des oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les éoliens.

D'autres études disent qu'il faut éloigner les sites éoliens sur les parcours migratoires des oiseaux.

- La qualité de la puissance électrique : l'énergie éolienne reste par nature, une énergie fluctuante ou à disponibilité aléatoire suivant les conditions météorologiques donc n'est pas toujours bonne.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : L'énergie issue des éoliennes implantées dans des sites suffisamment ventés s'accompagne d'une baisse du coût, et ainsi concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques. Son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

1.3.8. Programme des énergies renouvelables en Algérie :

D'ici 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

Près de quatre années après le lancement du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, adopté en février 2011 par le Gouvernement, il est apparu dans sa phase expérimentale et de veille technologique, des éléments nouveaux et pertinents sur la scène énergétique, aussi bien nationale qu'internationale, nécessitant la révision du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Parmi ces éléments, il convient de citer:

- Une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables à travers les études engagées, lors de cette première phase, notamment les potentiels solaire et éolien;

- La baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer (maturité technologique, coûts compétitifs ...);

- Les coûts de la filière CSP (solaire thermique) qui restent élevés associés à une technologie non encore mature notamment en termes de stockage avec une croissance très lente du développement de son marché.

Ainsi, le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes:

Première phase 2015 - 2020 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4000 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 500 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

Deuxième phase 2021 - 2030 : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoun et Bécharr et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

Le tableau suivant (tab.1) donne les capacités cumulées du programme EnR, par type et phase, sur la période 2015 - 2030:

	1ère phase 2015-2020	2ème phase 2021-2030	TOTAL
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4 525	17 475	22000

Tab.1. Capacités cumulées du programme EnR, par type et phase.[23]

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. La carte représentée à la (fig1.10), montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, il est à noter que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Cependant, les sites côtiers d'Oran, Béjaïa et Annaba, et les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que la région délimitée par Béjaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en terme de production si la hauteur des éoliennes choisies est élevée.

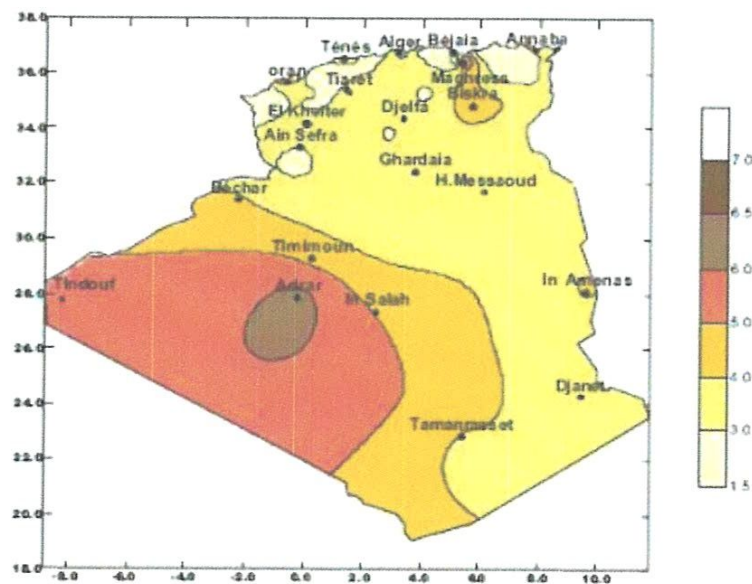


Fig.1.10. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).[23]

Il y a lieu de signaler que l'intérêt qu'a donné le gouvernement algérien au secteur des énergies renouvelables fait que plusieurs universités algériennes orientent leurs recherches vers cet axe. C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre mémoire qui porte sur l'une de ces énergies renouvelables qui est l'énergie éolienne.

Conclusion :

Dans le monde, l'utilisation de l'énergie éolienne reste encore un cas plutôt rare. Ceci est dû en particulier aux pollutions visuelles et sonores qui engendrent de nombreuses oppositions. De plus, les lieux où l'exploitation à grande échelle de l'énergie éolienne pourrait être rentable sont rares. L'énergie éolienne est pourtant en forte progression dans le monde. Le Danemark est mondialement le pays qui possède le plus d'éoliennes. La production d'énergie électrique y est assurée à 40% par des parcs éoliens. Il serait pourtant utopique de penser que l'éolien pourrait remplacer toutes les sources d'énergie et alimenter à lui seul l'humanité. Mais cette énergie a un fort potentiel localement. Dans les régions propices, elle est une bonne source d'énergie renouvelable non pas principale mais complémentaire. Car, en ce qui concerne les énergies non renouvelables, l'homme avait privilégié l'énergie la plus rentable à court terme, au détriment de toutes les autres. Les énergies renouvelables se feront une place progressivement, en diversifiant la production: utiliser le solaire sur des lieux particulièrement ensoleillés, le géothermique, quand les sources de chaleur sont proches de la surface du sol, l'hydraulique à proximité des fleuves ou la marémotrice aux endroits propices à des fortes marées. Dans ce contexte, l'éolien trouvera toute sa place.

CHAPITRE II

La Machine Asynchrone à Double Alimentation

Introduction :

La consommation d'énergie, au cours du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que le confirmer. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et d'augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité.

Dans ce contexte, notre étude s'intéresse à la filière éolienne où plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent chapitre décrit une exploitation d'une éolienne à base d'une 'MADA', vue de ses avantages par rapport aux autres machines surtout dans le dimensionnement du convertisseur.

II.2. Composition de la MADA :

re'petit'ble. Au 2^e paragraphe p.24

La MADA est une génératrice permettant le fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne en ajustant la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent. La MADA est composée d'une machine asynchrone, de deux convertisseurs de puissance et en général d'un transformateur pour adapter la tension au réseau. On observe sur la (fig2.1) que le rotor est branché au redresseur alors que le stator est directement branché au réseau. Les grandeurs alternatives au stator (courants et tensions) ont la même fréquence que celle du réseau. C'est pourquoi elles n'ont pas besoin de passer par des convertisseurs de puissance pour transférer la puissance électrique statorique au réseau. En revanche, les grandeurs alternatives à la sortie du rotor n'ont pas la même fréquence que les grandeurs alternatives du réseau. Elles dépendent de la vitesse du rotor et donc de la vitesse du vent. On utilise alors des convertisseurs de puissance pour adapter leur fréquence à celle du réseau. On utilise un convertisseur statique back-to-back. Il est composé d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur. La MADA pouvant fonctionner en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone, la chaîne de conversion électronique doit être bidirectionnelle.

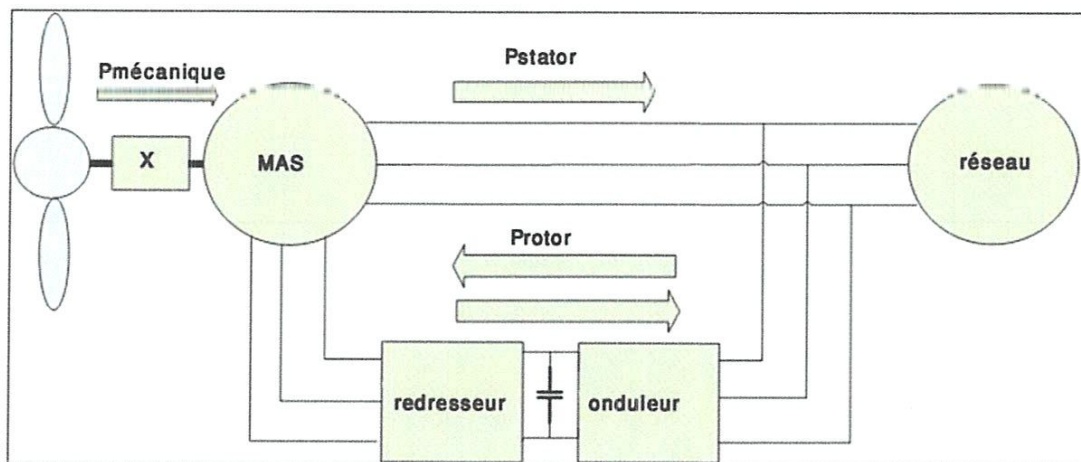


Figure 2.1 Schéma de la MADA

La majeure partie de la puissance transmise de l'éolienne au réseau passe par le stator. La MADA fonctionne à vitesse variable, si la variation de la vitesse ne dépasse pas 30% au-dessus ou en dessous de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de fournir une puissance allant de 0.7 à 1.3 fois la puissance nominale de cette machine. La quantité de puissance électrique fournie ou consommée par le rotor correspond à $\pm 30\%$ de la puissance nominale de la machine. Les convertisseurs de puissances (redresseur et

onduleur) ne sont donc traversés que par 30% de la puissance nominale de la machine. La MADA utilise donc des convertisseurs sous dimensionnés et donc moins coûteux. Cette technologie est mûre, solide et très fiable. On peut l'utiliser pour des applications à grande puissance et à vitesse variable. Elle possède actuellement un meilleur rendement que les nouvelles machines synchrones à aimants permanents. [17]

II.3. Machine asynchrone :

Initialement on utilisait principalement la machine à courant continu car elle proposait des asservissements de position précis. Actuellement, grâce à l'évolution des technologies d'électronique de puissance, la machine à courant continu est devenue moins avantageuse, car limitée en puissance, en vitesse de rotation et cher. On utilise de plus en plus la machine asynchrone. Celle-ci est robuste, elle est moins lourde (masse légère) et est plus simple à fabriquer et à entretenir. La machine asynchrone est composée d'un rotor et d'un stator. Ils sont constitués de tôles magnétiques empilées munies d'encoches pour y insérer les différents enroulements. Le stator est similaire dans les différentes machines asynchrones. Il ne tourne pas, il est fixe et est directement relié au réseau. Le rotor tourne, il est entraîné par l'arbre mécanique de l'éolienne, lui-même entraîné par les pales de l'éolienne. Il n'y a pas de connexion entre le stator et le rotor. Le rotor entraîné tourne et crée ainsi un champ magnétique tournant dans le stator. Le stator absorbe de la puissance réactive du réseau et impose ainsi la fréquence de rotation de son champ magnétique tournant. La vitesse de ce champ magnétique est appelée vitesse de synchronisme de la machine asynchrone et est notée Ω_s . L'objectif de la machine asynchrone est d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer. Voici une modélisation de la machine asynchrone:[17]

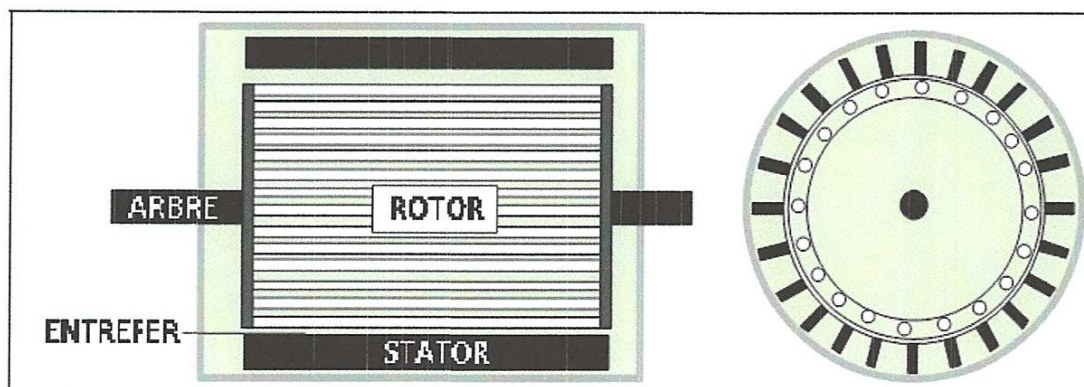


Figure 2.2 Schéma de la machine asynchrone

On utilise principalement deux types de machines asynchrones :

- **La machine asynchrone à cage d'écureuil :**

Son rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements du rotor ne sont donc pas accessibles. Elle était conçue pour les applications à vitesse fixe, elle est devenue la machine la plus utilisée pour les entraînements à vitesse variable grâce à l'apparition des thyristors GTO et des transistors IGBT. Ensuite ont été créés des onduleurs à MLI performants. Les stratégies de commandes vectorielle et directe ont été développées par la suite. Cette machine est simple et utilisée depuis longtemps. Elle est économiquement plus intéressante.

Pour une éolienne à vitesse fixe :

Cette machine présente l'avantage d'être plus robuste et moins coûteuse que les autres machines. Pour assurer le bon fonctionnement de cette machine, la génératrice doit fonctionner à une vitesse proche de sa vitesse de synchronisme (glissement $g = 0$) car la fréquence du réseau est imposée et si le glissement devient trop grand ($g > 0.02$) les courants statoriques vont augmenter et peuvent détériorer le matériel. Le dispositif généralement utilisé consiste à coupler l'arbre lent de l'éolienne avec la génératrice par le biais d'un multiplicateur de vitesse, on connecte ensuite directement le stator de la machine asynchrone au réseau. Ce dispositif n'utilise donc pas d'électronique de puissance, il est simple. Son coût est faible et demande une maintenance peu fréquente. La machine consomme de la puissance réactive pour magnétiser son rotor et détériore ainsi son facteur de puissance. Pour contrer cette imperfection, on utilise des condensateurs que l'on introduit en parallèle au dispositif comme sur la (fig2.3). Ils deviennent alors la seule source de puissance réactive.

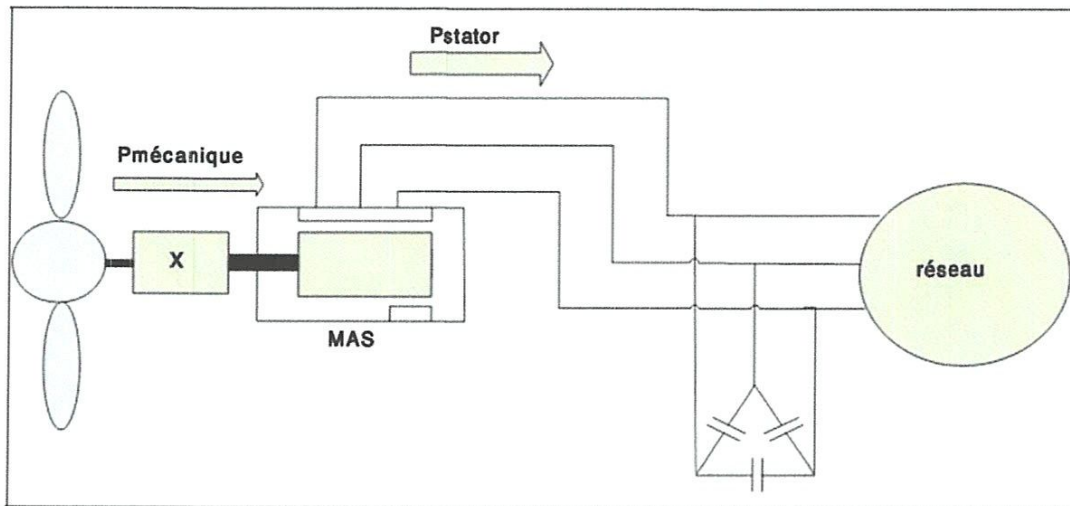


Figure 2.3 Connexion de machine asynchrone à cage d'écureuil reliée
au réseau avec condensateur

Pour une éolienne à vitesse variable :

On utilise un dispositif d'électronique de puissance pour adapter la fréquence (variable) de la machine asynchrone à la fréquence du réseau. Les enroulements du stator sont connectés aux convertisseurs de puissance. Les deux convertisseurs, par le biais du bus continu permettent de découpler la fréquence du réseau de la fréquence du stator de la machine asynchrone. Ce dispositif est composé d'un redresseur, d'un bus DC continu et d'un onduleur comme sur la (fig2.4). Les variations de puissance produites par l'éolienne sont filtrées par le condensateur du bus DC. Ce dispositif coûte cher (convertisseurs de puissance performants) et les pertes dans les convertisseurs de puissance sont grandes.[17]

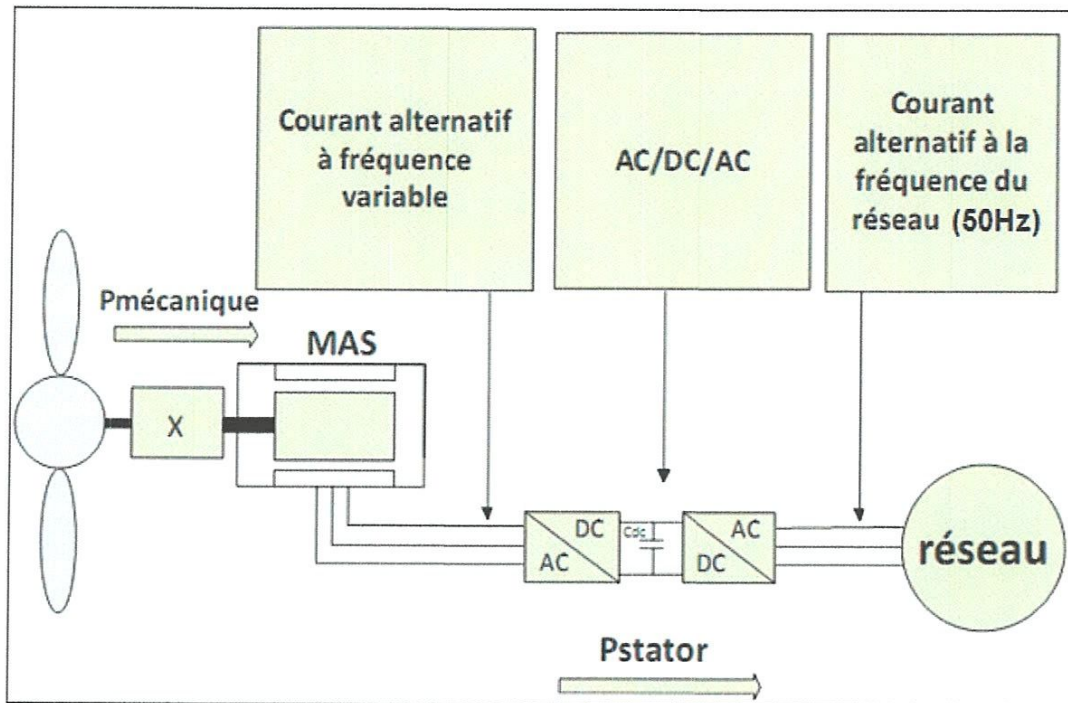


Figure 2.4 Connexion de machine asynchrone à cage d'écureuil au réseau avec convertisseurs de puissance

- **La machine asynchrone à rotor bobiné :**

On utilise cette machine asynchrone pour la MADA. Le rotor est différent des autres machines, les enroulements du rotor sont couplés en étoile et les extrémités sont connectées à des bagues conductrices. Des balais viennent frotter les bagues lorsque la machine fonctionne. Les enroulements du stator sont directement connectés au réseau alors que les enroulements du rotor passent par les convertisseurs de puissance bidirectionnels pour assurer la variation du glissement. Les grandeurs électriques sortant des convertisseurs sont connectées au réseau comme sur la (fig2.5). La majeure partie de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du stator. Une faible partie (environ 30% de la puissance nominale) de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du rotor. La puissance active passant par les convertisseurs de puissance est donc faible et on peut donc utiliser des convertisseurs de puissance ayant un faible coût. Le rendement de cette machine est élevé. Cette machine présente donc l'avantage d'être mieux adaptée à la variation de vitesse.[17]

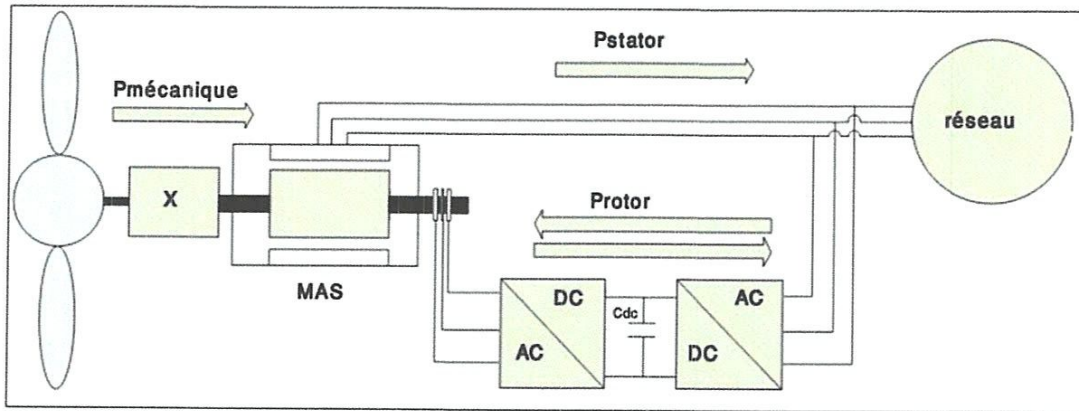


Figure 2.5 Machine asynchrone à rotor bobiné, dispositif de la MADA

II.4. Principe de fonctionnement :

La MADA fonctionne à vitesse variable du vent. La vitesse du champ magnétique au stator est appelée vitesse de synchronisme de la machine asynchrone et est notée Ω_s . Le rotor tourne à une vitesse angulaire notée Ω_r . Elle est proportionnelle à la vitesse du vent, elle peut être soit inférieure ou soit supérieure à la vitesse de synchronisme. On distingue deux modes de fonctionnement : le mode hypo-synchrone lorsque la vitesse de rotation du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme de la machine. Le mode hyper-synchrone lorsque la vitesse de rotation du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme de la machine. Pendant la rotation du rotor, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromagnétiques dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les forces électromagnétiques créées au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.1)$$

ω_r : La vitesse de rotation du rotor,

ω_s : La vitesse de rotation du champ du stator,

E_r : La force électromagnétique dans le rotor,

E_s : La force électromagnétique dans le stator,

N_r : Le nombre de spires des bobinages au rotor,

N_s : Le nombre de spires des bobinages au stator.

On note g le glissement tel que :
$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (2.2)$$

Le glissement est la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse du rotor. Le glissement peut être négatif, nul ou positif. S'il est positif, la machine fonctionne en mode hypo-synchrone : la vitesse angulaire du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme de la machine asynchrone (vent faible). Si le glissement est négatif, alors la machine fonctionne en mode hyper-synchrone : la vitesse angulaire du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme de la machine (vent fort).

La puissance électrique produite par la machine asynchrone est :

$$(1 - g) \cdot P_{stator} = P_{stator} - g \cdot P_{stator} \quad (2.3)$$

La puissance P_{stator} est directement fournie au réseau par le biais du stator. Le reste de la puissance produite $-g \cdot P_{stator}$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique dans la machine. Cette puissance, de fréquence variable (le glissement varie selon la vitesse rotorique donc selon la vitesse du vent) sort par les balais du rotor sous forme de grandeur alternative de fréquence $f_r = g \cdot f_s$. Ces grandeurs de fréquences variables (courants et tensions au rotor) passent par les convertisseurs de puissance et adaptent leur fréquence à celle du réseau.

La machine asynchrone, en mode générateur fournit donc la puissance P par le stator et la puissance $g \cdot P$ par le rotor au réseau.

La MADA possède donc deux modes de fonctionnement qui dépendent de la vitesse du vent :

- mode hypo-synchrone;

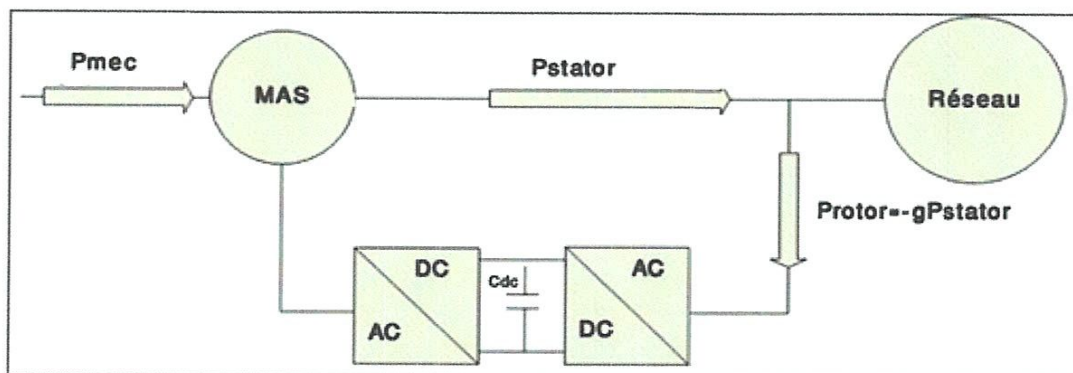


Figure 2.6 Mode hypo-synchrone de la MADA

La valeur absolue de g est inférieure à 1. Si le glissement $g > 0$, la machine fonctionne en mode hypo-synchrone. La puissance rotorique P_{rotor} sera alors absorbée par l'éolienne.

L'éolienne produit peu de puissance active.

- mode hyper-synchrone.

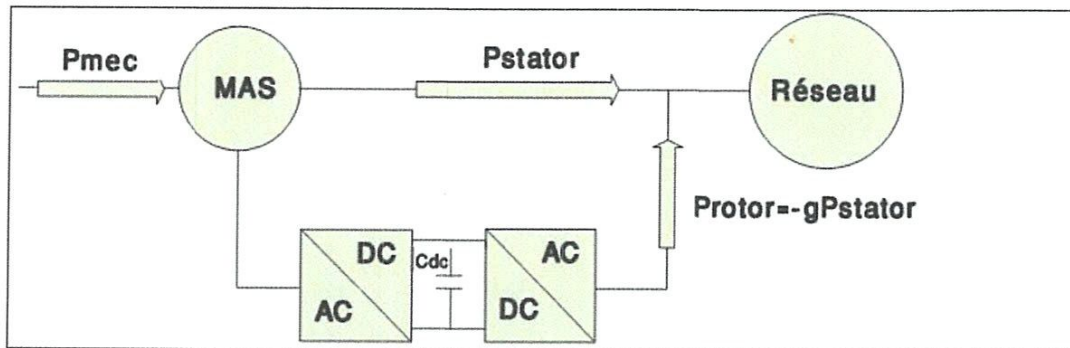


Figure 2.7 Mode hyper-synchrone de la MADA

Si le glissement $g < 0$, la machine fonctionne en mode hyper-synchrone. La puissance rotorique P_{rotor} sera alors générée par l'éolienne et sera envoyée au réseau à travers les convertisseurs. C'est dans ce mode de fonctionnement que l'éolienne produit le maximum de puissance active. Ces schémas montrent que pour une puissance P_{stator} constante, plus on transmet de la puissance au rotor, plus on augmente le glissement. La fréquence au stator imposée par le réseau est supposée constante. De ce fait on peut contrôler la vitesse de la génératrice en agissant sur la puissance transmise au rotor grâce au glissement g .

II.5. Modélisation :

II.5.1. Modélisation de la MADA :

La modélisation de la MADA est décrite dans le référentiel de Park. Le système d'équations suivant décrit la modélisation globale de la machine [18,19]:

II.5.1.1. Equations électriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \end{array} \right. \quad (2.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

II.5.1.2. Equations magnétiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{array} \right. \quad (2.11)$$

II.5.1.3. Equation du couple :

Le couple électromagnétique s'exprime quant à lui en fonction des courants et des flux par :

$$\Gamma_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (I_{qr} \cdot \varphi_{ds} - I_{dr} \cdot \varphi_{qs}) \quad (2.12)$$

Avec respectivement :

V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} et V_{qr} : Les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadratures du système diphasé ;

I_{ds} , I_{qs} , I_{dr} et I_{qr} : Les courants statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système diphasé ;

φ_{ds} , φ_{qs} , φ_{dr} et φ_{qr} : Les flux statoriques et rotoriques direct et en quadrature du système diphasé ;

ω_s , ω_r : Les pulsations électriques statorique et rotorique ;

P : Le nombre de paires de pôles de la MADA.

II.5.2. Modélisation des convertisseurs d'électronique de puissance :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture Figure 2.8. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

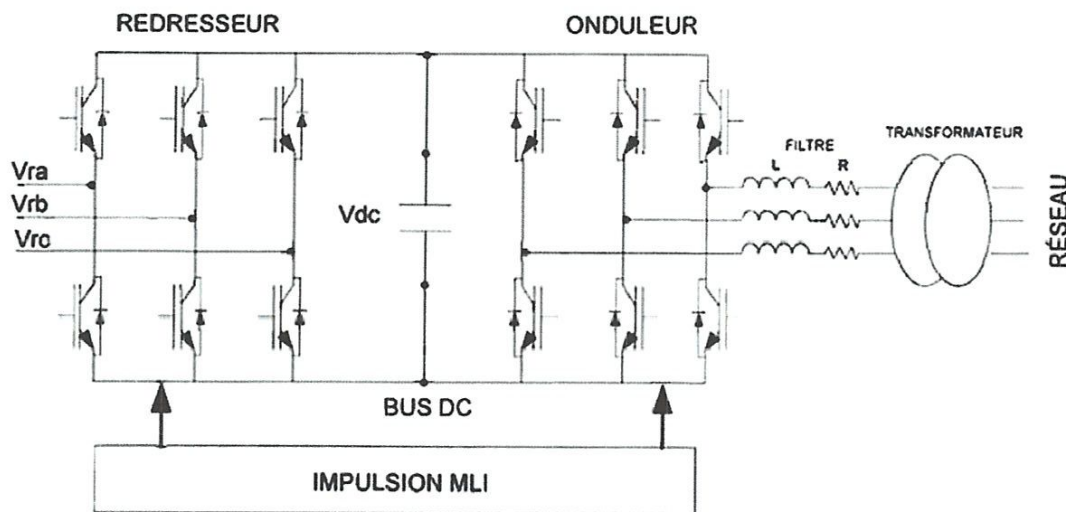


Figure 2.8 Convertisseur statique

II.6. Convertisseurs de puissances :

L'électronique de puissance donne la possibilité de générer des fréquences, des tensions ou des courants variables tout en assurant un rendement élevé. Ces convertisseurs de puissance sont commandés par des algorithmes numériques qui permettent un contrôle précis en temps réel. Dans la MADA, les courants sortant du rotor ont une fréquence variable. En effet en fonction de la vitesse du vent, le rotor tourne à différentes vitesses et crée donc un courant au rotor dont la fréquence varie. L'intérêt de la MADA est qu'elle peut fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Le courant passant au stator à la même fréquence que le courant au réseau. Il nous faut donc adapter la fréquence du courant du rotor à celle du réseau pour que le rotor fournisse de la puissance active au réseau. La stratégie utilisée pour cela est l'introduction de deux convertisseurs de puissance entre le rotor et le réseau selon la structure de Scherbius, voir Figure 2.9. On choisit d'abord un convertisseur alternatif/continu : le redresseur. Le redresseur transforme les courants et les tensions alternatifs délivrés par la

MADA (de fréquence variable) en courant et tension quasi continus. Le redresseur est commandé par la technique MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion ou PWM en anglais. On introduit un condensateur entre le redresseur et l'onduleur. Ce condensateur est le bus continu DC. Ce bus a une tension référence imposée. On introduit ensuite un convertisseur continu/alternatif : l'onduleur. L'onduleur récupère le courant et la tension continus et il permet de créer un système triphasé de courant et tension alternatifs ayant la même fréquence que ceux du réseau.

Le passage par le bus continu est nécessaire pour adapter la fréquence de la MADA à celle du réseau. On introduit ensuite un transformateur pour augmenter la tension et l'adapter à celle du réseau. On utilise les transistors IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) comme interrupteurs. Ils peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des thyristors (GTO : Gate Turn Off). La machine asynchrone peut fonctionner en mode hypo-synchrone et en mode hyper-synchrone. Ce qui signifie que la puissance passant par le rotor peut être fournie ou consommée par le réseau, P_{rotor} change de signe. Il faut donc avoir des convertisseurs de puissance bidirectionnels. Le facteur de puissance côté réseau est contrôlé. Le fonctionnement de ce dispositif est réversible en courant. Le redresseur devient onduleur et l'onduleur redresseur.

On désire fournir une puissance réactive nulle au réseau. Les deux convertisseurs ont la possibilité de contrôler cette puissance réactive grâce à la production ou l'absorption de la puissance réactive du rotor. Le rotor absorbe par exemple de la puissance réactive pour compenser les inductances de fuites et les inductances mutuelles de la machine asynchrone.

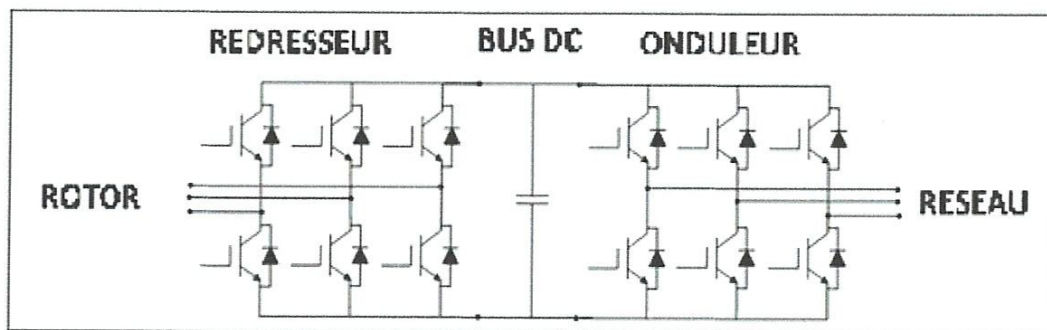


Figure 2.9 Convertisseurs orientés tête-bêche à IGBT de la MADA

II.7. Méthode de contrôle des convertisseurs :

Il existe principalement trois types de commande pour la machine asynchrone :

- **Commande scalaire :**

La commande scalaire contrôle le couple en régime permanent avec le maintien du flux dans la machine à une valeur fixe. Elle fonctionne pour des éoliennes à vitesse variable. Cette commande est basée sur le régime permanent de la machine pour calculer le couple et prévoir les points de fonctionnement. Les relations obtenues sont plus simples que pour les commandes vectorielles donc son coût est moindre mais les performances en régime dynamique sont nettement moins bonnes.

- **Commande vectorielle :**

La commande vectorielle est basée sur le régime dynamique de la machine. Elle a été introduite par Blaschke (1972). Depuis son invention, elle a beaucoup évolué et présente actuellement des résultats très intéressants. L'avantage de cette commande est que le couple et le flux sont contrôlés indépendamment, comme dans une machine à courant continu. Elle permet d'avoir une réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle du couple. Elle peut s'appliquer dans plusieurs référentiels (référentiel du flux, référentiel du réseau etc.) et peut dépendre de différentes variables (courant, tension, flux, vitesse etc.). Il existe donc une multitude de commandes vectorielles. Cependant cette commande présente plusieurs inconvénients : elle est plus difficile à implémenter puisqu'elle requiert plus de puissance de calcul en temps réel. Elle est très sensible aux variations des paramètres de la machine. De plus, elle utilise beaucoup de capteurs, ce qui augmente le coût et complique la réalisation de la MADA. La littérature propose, afin de contrer l'augmentation du nombre de capteurs, d'utiliser des estimateurs de paramètres ou d'utiliser des observateurs à ordres multiples.

- **Commande directe :**

La commande directe du couple est relativement récente (fin des années 1980), elle peut contrôler directement le flux et le couple de la machine asynchrone à condition qu'elle ait ses estimations. Elle a été inventée pour simplifier la commande vectorielle, l'algorithme qu'elle utilise dépend de moins de paramètres. Elle est créée à partir de comparateurs hystérésis qui comparent les valeurs de références aux valeurs estimées. Cette commande

n'effectue pas de calcul de changement de repère, elle possède moins de correcteurs PI. La réponse est donc plus rapide que celle de la commande vectorielle à flux orienté. Afin d'utiliser cette commande pour la MADA, il faut changer de référentiel pour calculer et/ou estimer les variables à contrôler.

Conclusion :

Au cours de notre prospection bibliographique nous avons balayé un grand nombre d'études et de travaux effectués sur la MADA. Ces études portent principalement sur son fonctionnement en génératrice, pour des applications éoliennes et hydroélectriques, ou sur son fonctionnement en moteur avec une grande variété de modes d'alimentation et de contrôle. La simplicité de sa commande et sa souplesse de reconfiguration lui ont associée le surnom d'une « Machine Généralisée ».

Dans ce chapitre, nous avons décrit, en premier, le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (stator-rotor) en fonctionnement génératrice, ainsi que les différents types de MADA qu'on peut rencontrer. Par ailleurs, pour l'application de celle-ci dans un système éolien, nous avons par la suite, établi le modèle de la machine à l'aide de ses équations électriques et de flux dans le système d'axe d-q lié au synchronisme.

Nous avons aussi présenté les trois méthodes de commande de la machine asynchrone : scalaire, vectorielle, et directe. Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante.

CHAPITRE III

Simulation et résultats

Introduction :

Les chercheurs, les ingénieurs, les militaires et bien d'autres professionnels se posent souvent la question : quel est le résultat que j'obtiens si j'exerce telle action sur un élément ?

Le moyen le plus simple serait de tenter l'expérience, c'est-à-dire d'exercer l'action souhaitée sur l'élément en cause pour pouvoir observer ou mesurer le résultat. Dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, trop chère ou contraire à l'éthique. On a alors recours à la simulation: rechercher un élément qui réagit d'une manière semblable à celui que l'on veut étudier et qui permettra de déduire les résultats.

Pour réaliser le travail de simulation envisagé dans ce mémoire on a utilisé le logiciel Matlab de la société MathWorks ainsi qu'avec les bibliothèques associées à Matlab: SimPowerSystems et Simulink. SimPowerSystems fournit des bibliothèques de composants et des outils d'analyse pour la modélisation et la simulation de systèmes électrotechniques et d'électronique de puissance. Les bibliothèques proposent des modèles de machines triphasées, des commandes électriques et des composants d'applications.

Les modèles SimPowerSystems peuvent être utilisés pour développer des systèmes de contrôle et tester les performances au niveau système. On peut paramétrer des modèles à l'aide des variables et des expressions MATLAB et concevoir des systèmes de contrôle pour le système électrique désiré dans Simulink.

Simulink est un environnement de diagramme fonctionnel destiné à la simulation multidomaine et à l'approche de conception par modélisation Model-Based Design. Il prend en charge la conception et la simulation au niveau système, la génération automatique de code, ainsi que le test et la vérification en continu des systèmes embarqués. Simulink propose un éditeur graphique, un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB, ce qui vous permet d'incorporer les algorithmes MATLAB dans les modèles et d'exporter le résultat des simulations vers MATLAB pour compléter les analyses.

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique du modèle Simulink d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) triphasée. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, puis le modèle mathématique de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) à vitesse variable a été présenté, ainsi que les grandeurs de commande utilisées lorsqu'elle est intégrée à un système éolien.

Une modélisation dans un repère diphasé lié au champ statorique et une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive sont proposées avec une technique MLI.

III.1. Commande vectorielle par orientation du flux statorique :

La machine asynchrone est un système multivariable régit par des équations différentielles. L'utilisation de la transformation de Park par le changement des repères, sous certaines hypothèses, permet de simplifier ces équations et donc d'appréhender une meilleure compréhension du comportements physique de la machine.

Un choix adéquat du référentiel (d-q) est fait de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l'axe (d) permettant d'obtenir une expression de couple dans laquelle deux courants orthogonaux (i_{rd} , i_{rq}) interviennent, le premier en tant que générateur de flux et l'autre générateur de couple.

III.2. Commande vectorielle indirecte :

Comme la vitesse est mesurée, il est donc aisé de faire sa régulation par contre-réaction en utilisant un régulateur PI. La méthode indirecte est plus facile à implanter, mais elle est fortement dépendante des variations des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et à la variation de température surtout pour la constante de temps rotorique.

III.3. Modalisation de la turbine éolienne :

La puissance maximale susceptible d'être recueillie par les pales :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{\text{vent}}^3 \quad (3.1)$$

ρ : Densité de l'air, environ 1.225 (Kg/m³).

V_{vent} : Vitesse du vent (m/s),

P_{\max} : Puissance maximale en watts,

R : Rayon de l'aérogénérateur.

$$P_{\max} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_{\text{vent}}^3 \quad (3.2)$$

C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance,

Avec :

$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$ vitesse spécifique.

Ω_1 : Vitesse angulaire de rotation.

C_p : Est donné par la relation suivante : [3]

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_1}} + C_6 \lambda \quad (3.3)$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$C_1 = 0.5176, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 21, C_6 = 0.0068$$

$$C_{\text{turbine}} = \frac{P_m}{\Omega_1} = \frac{1}{2C_1} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (3.4)$$

C_{turbine} : Couple de la turbine en (N.m).

$$P_{\text{mg}} = C_p P_{\text{mt}} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{R \Omega_2}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (3.5)$$

P_{mg} : Puissance mécanique en (Watts)

Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur en (rd/s).

III.3.1. Modèle du multiplicateur :

$$C_{\text{mec}} = \frac{C_{\text{turbine}}}{G} \quad (3.6)$$

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m),

G : Rapport de multiplicateur.

$$\Omega_{\text{mec}} = G \Omega_{\text{turbine}} \quad (3.7)$$

Ω_{mec} : Vitesse angulaire mécanique du générateur en (rad/s).

III.3.2. Modèle de l'arbre :

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{turbine} - f\Omega_{mec} \quad (3.8)$$

f : Coefficient de frottement visqueux N. m. s/rad.

$C_{turbine} = C_{mec} + C_{em}$: Couple total de l'éolienne.

C_{em} : Couple électromagnétique du générateur.

J : Inertie en (kg. m²)

III.4 . Simulation de la turbine :

Pour mieux comprendre le comportement de la turbine en fonction de la variation de la vitesse de rotation, une simulation du système turbine a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK, où les paramètres sont données comme suit : $P_n = 7.5kW$, nombre de pales = 2, $R = 3.5m$, $G = 5.4$, $J = 0.0017kg/m^2$.

Les résultats obtenus dans la (fig3.1) illustre la variation du coefficient aérodynamique de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour plusieurs valeurs de β . Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8.1, C_{pmax} = 0.48, \beta = 0^\circ$).

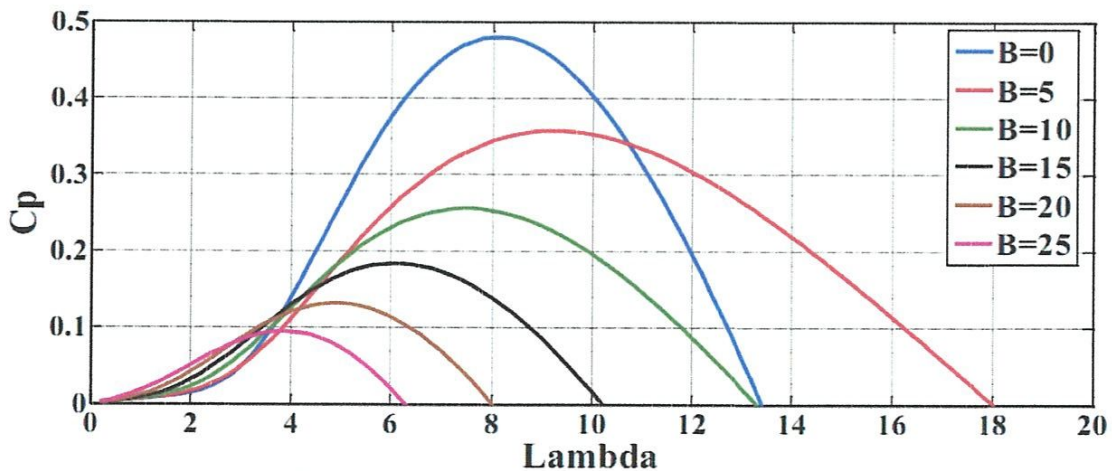


Figure 3.1. Courbes du coefficient $C_p(\lambda, \beta)$

C_p est donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

Les courbes de puissance en fonction de la vitesse de vent et la vitesse de rotation mécanique (fig3.2), montrent que il y a des points de puissance maximale qui correspondent à des vitesses différentes, il est facile de constater, alors, que faire fonctionner l'éolienne à ces points de fonctionnement permet de maximiser la puissance extraite du vent lors de la variation de ce dernier.

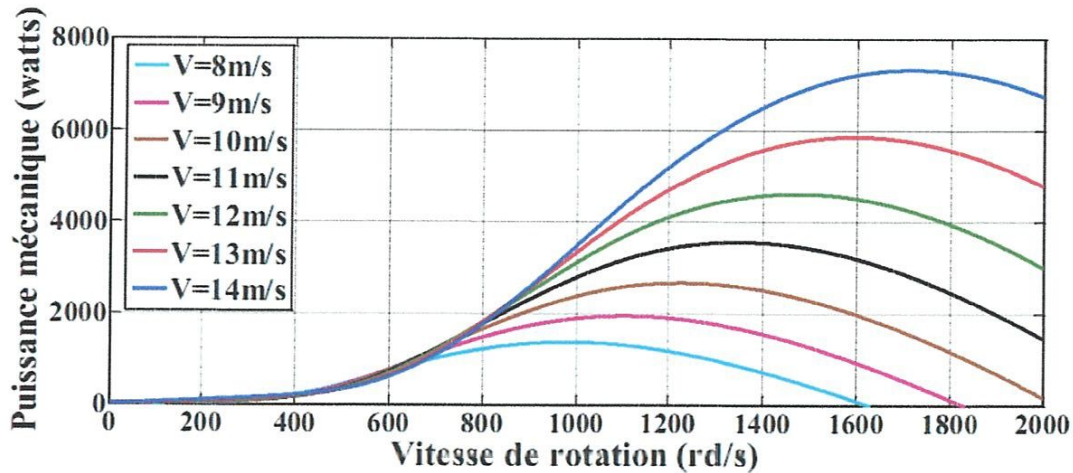


Figure 3.2. Courbes de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation. [20]

III.5.Modèle de simulation :

La (fig3.3) représente la structure sous MATLAB SIMULINK de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique d'une MADA avec l'onduleur alimentant le rotor.

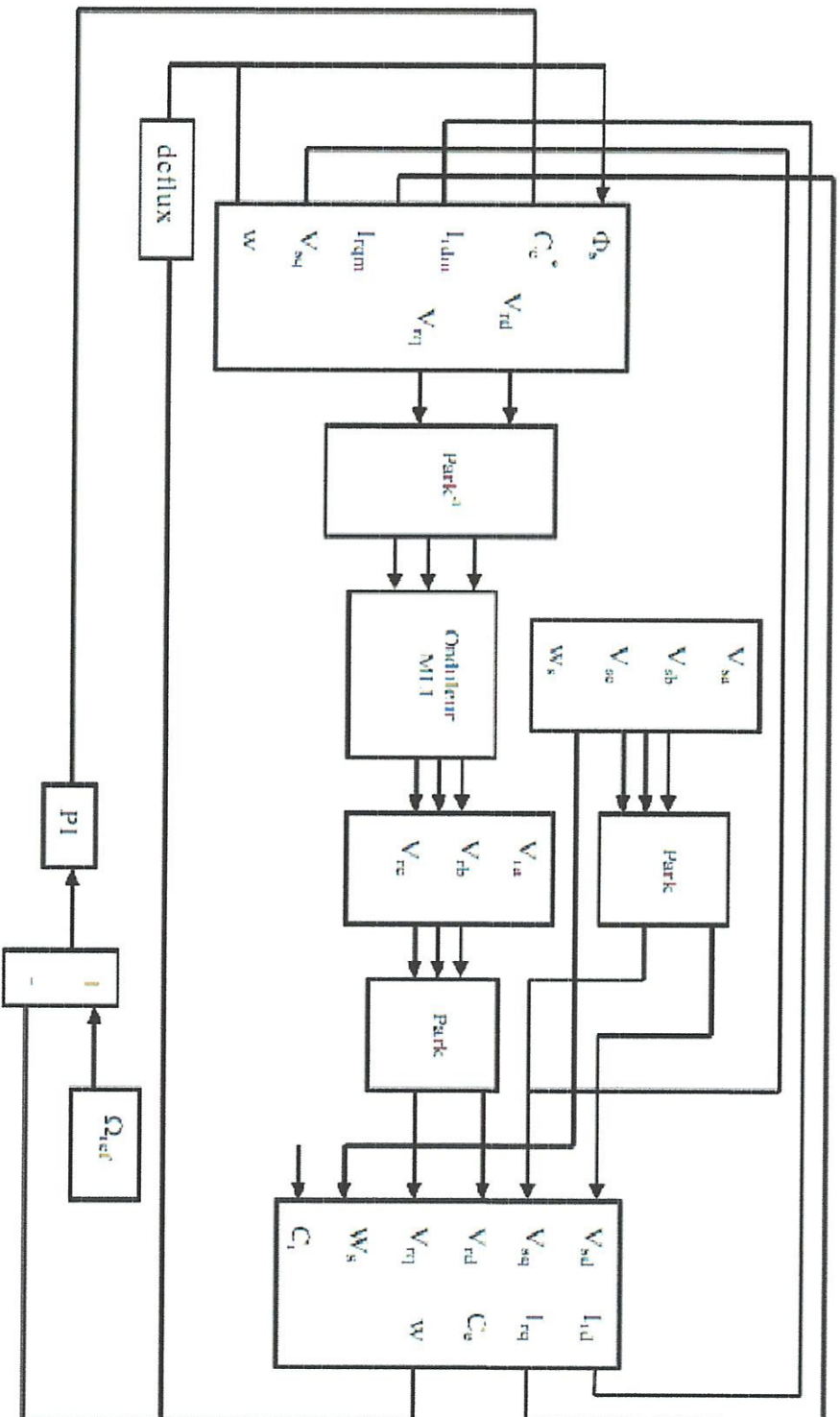


Figure 3.3. Structure sous MATLAB SIMULINK de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique [21].

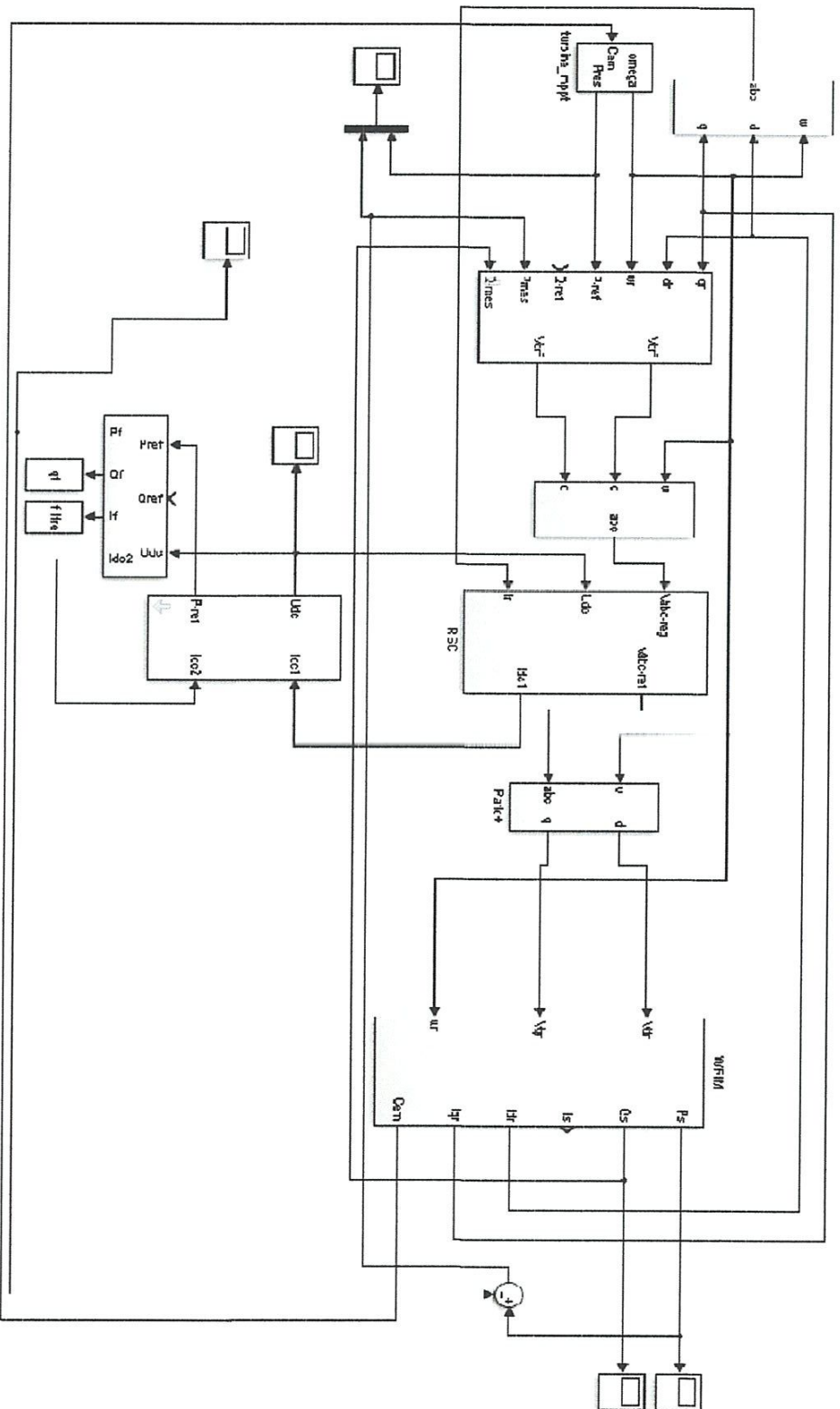


Figure 3.4. Modèle d'une ferme éolienne [22]

III.6. Tableau des données :

Les paramètres utilisés durant la simulation de la turbine et de la MADA sont données dans le tableau suivant :

Paramètres de la turbine	Paramètres de la MADA
R=36	Vs=1.1951e+003
J=50	Inductance M=0.013528
F=0.0071	Inductance Ls= 0.013732
G=90	Inductance Lr= 0.013703
lamda-opt=8	Rs= 0.012
Cp-max=0.5	Rr= 0.021
	fréquence =50

Tab. 3.1. Paramètres de la turbine et de la MADA

III.7 .Résultats de Simulation du système de production d'éolienne :

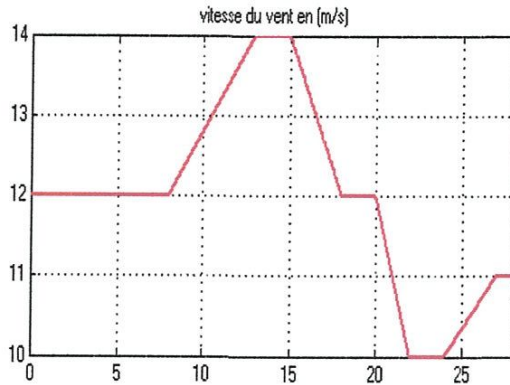


Fig.3.5. Vitesse du vent.

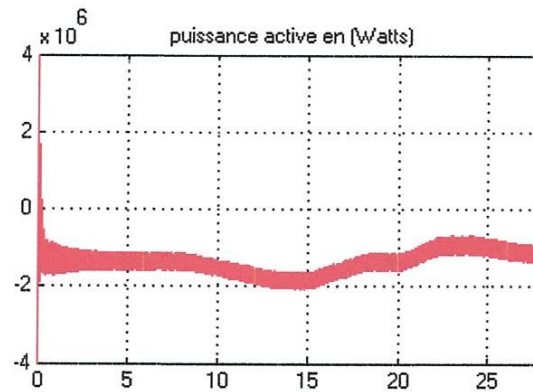


Fig.3.6. Résultat de contrôle de la puissance réactive du générateur.

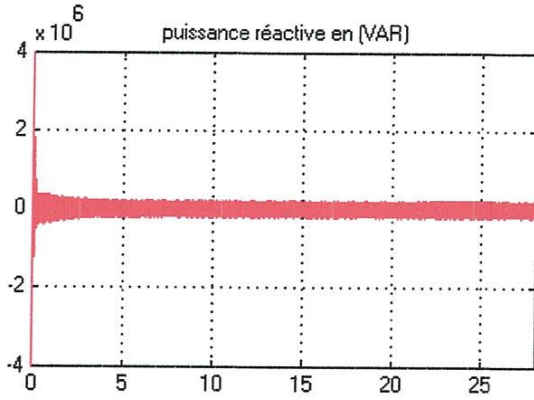


Fig.3.7. Résultat de contrôle de la puissance réactive du générateur.

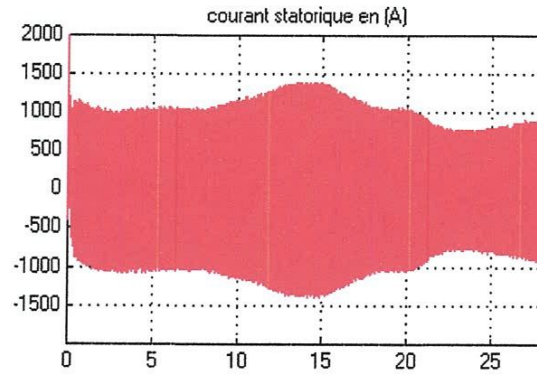


Fig.3.8. Courants mesurés dans le stator.

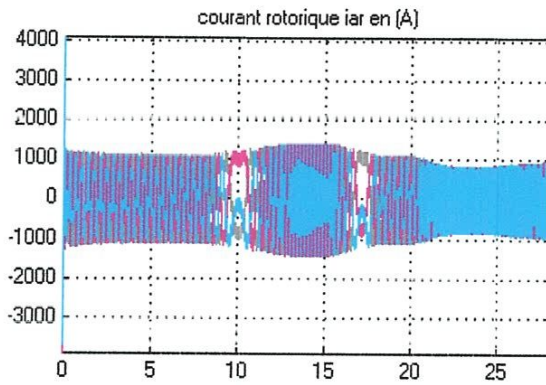


Fig.3.9. Courants mesurés dans le rotor.

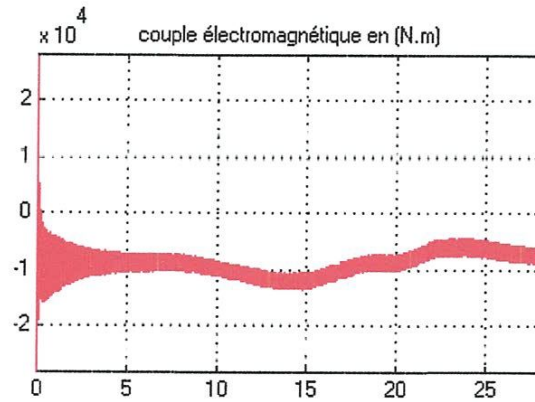


Fig.3.10. Couple électromagnétique de la turbine.

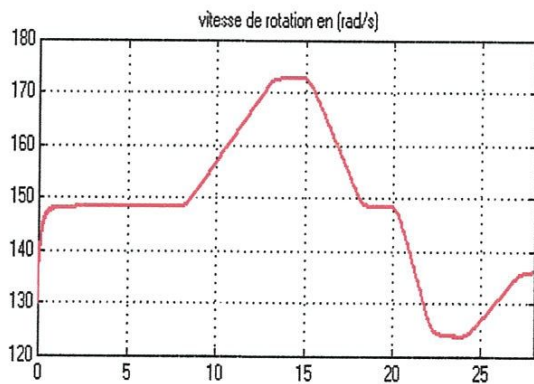


Fig.3.11. Vitesse de rotation de la MADA.

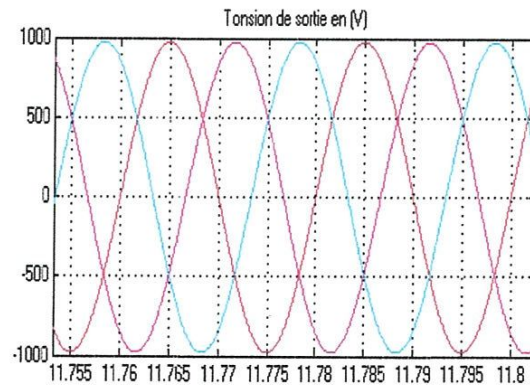


Fig.3.12. Tension mesurée dans le stator.

La simulation du système éolien muni d'une GADA est effectuée dans les conditions ci-après :

1. Le réseau électrique dans lequel est injectée la puissance produite par l'éolienne est supposé triphasé équilibré de puissance infinie.
2. Le profil de la vitesse de vent utilisé est identique à celui présenté par la (fig3.5).
3. Les paramètres utilisés dans les simulations sont donnés en tableau.

Le résultat de contrôle de la vitesse mécanique de l'éolienne est présenté par la Fig.11. Ces courbes montrent que la stratégie de contrôle proposée est satisfaisante.

La puissance active mesurée dans le stator de la MADA est présentée par la (fig3.6), elle montre une bonne concordance avec celle de 2 MWatts, avec une vitesse maximale (14 m/s) de vent. De plus, la (fig3.6) montre que la stratégie de contrôle prend en compte les variations de la vitesse du vent. La puissance réactive est fixée à 0 MVAR. Le résultat de contrôle de la puissance réactive est montré sur la Fig.3.7. Le courant statorique entre 250A jusqu' a 1400A présentée par la (fig3.8). Le courant rotorique entre 80A jusqu' a 150A présentée par la (fig3.9). La Fig.3.10 représente le couple électromagnétique de la turbine. La (fig3.11) montre la vitesse de rotation de la MADA.

Le résultat de contrôle de la tension de sortie est présenté sur la Fig.3.12, où la référence est respectivement fixée à 1KV.

III.8. Interprétation des résultats obtenus :

Sur la première courbe (fig3.5) nous avons présenté le profil du vent auquel est soumise cette éolienne pendant un temps $t=28s$ sachant que le coefficient de puissance C_p garde sa valeur maximale $C_{p-max} = 0.5$.

La puissance active débitée par le stator possède la même allure que la puissance mécanique de la turbine (sa référence) qui varie suivant la variation du vent (fig3.6).

La puissance réactive est nulle puisque nous désirons un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire (fig3.7).

Le courant du stator varie suivant la variation du vent (fig3.8), puisque nous avons considéré que l'alimentation du stator est une source de tension parfaite (1200V, 50Hz).

Le courant rotorique fonctionne à basse fréquence qui vérifie l'équation $f_r = g * f_s$ (fig3.9) qui nous assure un fonctionnement dans la zone de la stabilité de la MADA.

Le couple électromagnétique de la génératrice varie selon celle de la turbine qui est en fonction de la vitesse du vent (fig3.10).

Les modes de fonctionnement de la MADA (hypo ou hyper-synchrone) sont bien clairs sur la (fig.11) qui représente la vitesse de rotation.

CONCLUSIONS :

Dans ce chapitre une description succincte des bibliothèques associées à Matlab: SimPowerSystems et Simulink a été donné. Un système de production d'énergie éolienne, utilisant une MADA triphasée à vitesse variable, basé sur un profil réel de vitesse de vent a été simulé sous Matlab/Simulink.

Le choix de la MADA, comme génératrice dans l'éolienne, est justifié par ses avantages. En effet, la MADA permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent.

Les résultats des simulations montrent que le système proposé est intéressant pour les applications éoliennes.

Afin d'atténuer les fluctuations dues aux variations de l'énergie primaire, des dispositifs de stockage d'énergie peuvent être envisagés.

Conclusion générale :

Le moteur asynchrone à double alimentation est un système non linéaire, multi-variable, soumis à des variations paramétriques et à des perturbations inconnues. L'étude réalisée dans ce travail concerne la commande à vitesse variable d'un moteur asynchrone à double alimentation (MADA).

Le travail que nous avons présenté dans cette étude, est une contribution à l'étude d'une MADA utilisée dans un système éolien. Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on rappelle les différentes ressources d'énergie et les différents types d'énergies renouvelables. Ce qui nous a amené à choisir l'énergie éolienne pour la production d'énergie électrique.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau et fonctionnant à vitesse variable. Une commande vectorielle est utilisée afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau.

Dans la dernière partie de ce mémoire on a présenté les résultats de simulation du modèle [22] sous Matlab/Simulink, qui nous a servi dans notre étude. Notre contribution se résume dans l'étude du comportement de la MADA selon la variation de la vitesse du vent. Nous avons constaté que certains paramètres varient selon la variation de la vitesse du vent (puissance active, les courants statorique et rotorique etc).

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide grâce à ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Bibliographie

- [1]. www.renac.de/en/projects/regrid/
- [2]. Fédération allemande de l'énergie éolienne, 2010
- [3]. Conseil mondial de l'énergie éolienne (2012) « Rapport mondial 2011 sur l'énergie éolienne » et d'autres données, Bruxelles, 2012
- [4]. www.enercon.de
- [5]. www.vestas.com
- [6]. FTISSI Selwa et ZEDOURI Ilham <<étude et simulation de l'intégration d'une ferme éolienne dans un réseau électrique de distribution>> mémoire Master Académique 2012, Université de Guelma.
- [7]. E. Hau, Wind turbines, Springer, 2000.
- [8]. A. Tounzi, « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », La Revue 3EI n°20, mars 2000, pp. 24 – 38.
- [9]. J.G. Sloomweg, H. Polinder and W.L. Kling, « Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations », IEEE Transactions on Energy Conversion, December 2003, pp. 516-524.
- [10]. M. Crappe, « Contraintes techniques de l'intégration de la production décentralisée aux réseaux électriques », REE, N°11, Décembre 2002, pp. 69-79.
- [11]. J. Courault, « Production d'énergie sur ferme éolienne offshore », REE n°11,
- [12]. B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », Actes des journées 2006 de la section
- [13]. Abdenour ABDELLI <<Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive>> DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2007.
- [14] N. LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.
- [15] L. KHETTACHE « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » Thèse de Magister université de Batna, 2007.
- [16] A.PETERSSON « Analysis, Modeling and control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines » ISBN 91 -7291- 600-1 Chalmers bibliotheca, Reproservice Göteborg, Sweden 2005.

[17] M. Kamal AL-HADDAD et M. Abdelhamid HAMADI << ÉTUDE ET SIMULATION DE LA MADA >> MONTRÉAL, LE 22 JUIN 2012

[18] M. Adjoud J: <<Commande de la MADA pour la Production D'énergie Eolienne>>, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel-Abbes, Alger, 2011.

[19] S. Müller : <<Doubly fed induction generator systems>>, IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 8, n°3:26-33, May/June 2002.

[20] A. MEDJBER, A. MOUALDIA, A. MELLIT et M.A. GUESSOUM <<Commande vectorielle indirecte d'un générateur asynchrone double alimenté appliqué dans un système de conversion éolien>>

[21] Mme. AKKARI NADIA : <<Contribution a l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation>> doctorat en sciences en électrotechnique 2010.

[22] ABDOUNE Fateh <<Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné>> mémoire magister en électrotechnique 2011, Université de Bejaïa.

[23] <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&id=34>