

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2017

Faculté: Sciences de l'Ingéniorat
Département: Electronique

MEMOIRE

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

**Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne
basée sur une machine synchrone à aimant permanent**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité: Automatique industrielle

Par : KAROUI ATTEF

DEVANT Le JURY

Président: MANSOURI.K

Directeur de mémoire: DEBBACHE.N

Examineur: LAKEL.R

DÉDICASE

Je dédie ce travail

- À mes parents et à toute ma famille.
- À mes amis et tous mes camarades de la promotion 2017, mes fidèles compagnons de route.

REMERCIEMENTS

Mon plus grand remerciement, et gratitude va de plus profond de mon cœur à Dieu devant qui nous nous inclinons et nous nous prosternons Dieu tout puissant qui nous a armé de courage, de patience, de volonté chaque jour durant, pour avoir la force de mener ce modeste travail jusqu'au bout.

Je remercie mon encadreur Monsieur **Bekaik Mounir** pour son aide et ses conseils qui m' étaient essentiellement utiles lors de la réalisation de ce travail.

Je remercie également le **Président** ainsi que les membres du Jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre résultat.

Je tiens à saluer tous les enseignants qui nous ont prodigués tout au long de ce parcours pour leur savoir-faire, leurs attitudes et leurs soutiens.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement dans ce travail.

ملخص

أصبحت طاقة الرياح الآن لا بد منها في العالم لتوليد الطاقة. ويرجع ذلك إلى الخصائص الجوهرية لهذا المصدر للطاقة. دمج مولدات الرياح في شبكات التوزيع تطرح مشاكل حقيقية من حيث الآثار. الهدف الرئيسي من البحوث التي أجريت في هذه المذكرة هو نموذج تكنولوجيا استغلال طاقة الرياح المختلفة التي أدخلت في شبكات الجهد المتوسط الكهربائية. تقوم التكنولوجيات المعتبرة على آلات متزامنة تعتمد على مع المغناطيس الدائم والدوار الملفوف.

Résumé

L'énergie éolienne est aujourd'hui devenue incontournable dans le monde de la production d'électricité. Du fait des caractéristiques intrinsèques de cette source d'énergie. L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux de distribution pose de réels problèmes en termes d'impacts.

L'objectif principal des recherches réalisées dans ce mémoire est de modéliser différentes Technologies d'éolienne introduites dans les réseaux électriques de moyenne tension. Les technologies considérées sont basées sur des machines synchrones à aimant permanent.

Abstract

Wind energy has now become a must in the world of power generation. Due to the intrinsic characteristics of this energy source. The integration of wind generators in the distribution networks pose real problems in terms of impacts. The main objective of the research conducted in this paper is to model different wind technologies introduced in electrical medium voltage networks. The technologies considered are based on synchronous machines with permanent magnet and wound rotor.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le système éolien	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les différents types des centrales électriques.....	3
I.2.1 Les centrales non renouvelables.....	3
I.2.2 Les centrales renouvelables.....	4
I.3 Définition de l'énergie éolienne.....	5
I.4 Généralités.....	5
I.4.1 Historique.....	5
I.4.2 Les petites éoliennes.....	6
I.4.3 Les grandes éoliennes.....	7
I.4.4 Les différents types d'éoliennes.....	7
I.4.4.1 Eolienne à axe vertical.....	7
I.4.4.2 Eoliennes à axe horizontal.....	8
I.4.5 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	9
I.4.5.1 Le rotor.....	10
I.4.5.2 La nacelle.....	10
I.4.5.3 Le mât (la tour).....	14
I.4.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	15
I.4.6.1 Avantages.....	15
I.4.6.2 Inconvénients.....	15
I.5 Principe de conversion de l'énergie.....	16
I.5.1 La puissance du vent.....	16
I.5.2 La limite de Betz.....	19

I.5.3 Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	21
I.5.4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	22
I.6 Conclusion.....	24
Chapitre II : Génératrices et convertisseurs utilisés dans les éoliennes	
II.1 Introduction.....	25
II.2 Les systèmes éoliens connectés au réseau électrique.....	25
II.2.1 Système à vitesse fixe-Machine asynchrone à cage (MAS).....	25
II.2.2 Système à vitesse variable-Machine asynchrone à cage (MAS).....	27
II.2.3 Système à vitesse variable-Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	28
II.2.4 Système à vitesse variable-Machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	30
II.3 L'intérêt de la vitesse variable.....	32
II.4 Conclusion.....	33
Chapitre III : Modélisation d'un système éolien basé sur une GSAP	
III.1 Introduction.....	34
III.2 Modélisation et simulation du générateur éolien.....	34
III.2.1 Modèle du vent.....	35
III.2.1.1 Résultat de la simulation du vent.....	35
III.2.2 Modèle de la turbine (voilure).....	36
III.2.3 Modèle de la génératrice synchrone à aimant permanent.....	38
III.2.3.1 Equations électriques dans le repère (abc).....	40
III.2.3.2 Equations électriques dans le repère de Park (d q).....	41
III.2.3.3 Equations du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique.....	43
III.2.4 Modèle du redresseur à diodes.....	44
III.2.5 Modèle de l'onduleur de tension et de bus continu.....	45
III.2.5.1 Contrôle du courant par MLI.....	48
III.3 Conclusion.....	49

Chapitre IV : Simulation et interprétation

IV.1 Introduction50

IV.2 comportement du vent.....50

IV.3 couple électromagnétique.....51

IV.4 courant statorique.....51

IV.5 Evolution la vitesse spécifique.....52

IV.6 Evolution du coefficient de puissance.....52

IV.7 Evolution les puissance active et réactive.....53

IV.8 Conclusion.....54

Conclusion générale.....55

Bibliographie.....56

Annexe.....59

Introduction générale

La consommation d'énergie, dans le courant 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 confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en terme de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

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 augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Néanmoins, longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches plus approfondies visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique [1].

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois et la vitesse du vent est très importante qui dépasse 5m/s dans plusieurs régions de l'Algérie surtout dans le sud, notre pays peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire et éolienne [2].

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude à travers les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables et non renouvelables existantes, un rappel sur les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et les équations qui s'y rapportent ainsi que les différents types d'aérogénérateurs est présenté. Les zones de fonctionnement d'une éolienne et les systèmes de régulation de la vitesse sont également décrites.

Le deuxième chapitre, est un résumé des différentes génératrices et convertisseurs utilisées dans le système éolien.

Le troisième et le quatrième chapitre portent sur la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, qui est constituée d'un redresseur, un bus continu, l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à commande MLI.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale et des perspectives de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur le système éolien

I.1 Introduction

Actuellement, la plus grande part de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. En revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [3]. En troisième place on trouve le nucléaire. Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle on le trouve avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie. Les autres énergies sont surtout représentées par les énergies renouvelables, l'hydroélectricité en tête. Certains pays produisent l'essentiel de leur électricité grâce aux barrages et aux cours d'eau.

Dans le monde entier les chercheurs demandent en urgence de faire changer la vision ancienne pour la production d'électricité, ils appellent aux ressources d'énergies renouvelables qui vont prendre la base d'autres ressources fossiles afin de répondre aux exigences actuelles. Une alternative intéressante et puissante comme celle de l'énergie solaire et l'éolienne ont attirées l'attention au niveau de la production de l'électricité à grande échelle [4]. Dans ce chapitre on va exposer les différents types des centrales électriques non renouvelables et renouvelables, Sachant que nous allons allouer le reste du chapitre à l'étude de l'énergie éolienne.

I.2 Les différents types des centrales électriques

I.2.1 Les centrales non renouvelables

Les énergies non renouvelables sont des formes d'énergie massivement employées pour répondre aux besoins de production et de consommation des humains. Parmi celles-ci, les plus

utilisées au niveau mondial sont l'énergie nucléaire et l'énergie tirée des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel...).

Les sources d'énergie non renouvelables ne peuvent se régénérer par elles-mêmes à un rythme plus rapide que la consommation qui en est faite par les humains. De plus, les impacts de l'utilisation de ces sources d'énergie sont souvent des plus néfastes pour l'homme et l'environnement.

I.2.2 Les centrales renouvelables

Les énergies renouvelables proviennent de ressources que la nature renouvelle sans cesse. Elles sont inépuisables à notre échelle par opposition aux énergies non renouvelables dont les stocks s'épuisent. Les énergies renouvelables sont non polluantes.

On distingue plusieurs types d'énergie renouvelable :

- ❖ L'énergie solaire: thermodynamique et photovoltaïque
- ❖ L'énergie éolienne
- ❖ L'énergie hydraulique
- ❖ La biomasse
- ❖ La géothermie

Et autres, la figure I.1 représente quelques types les plus connus [5].

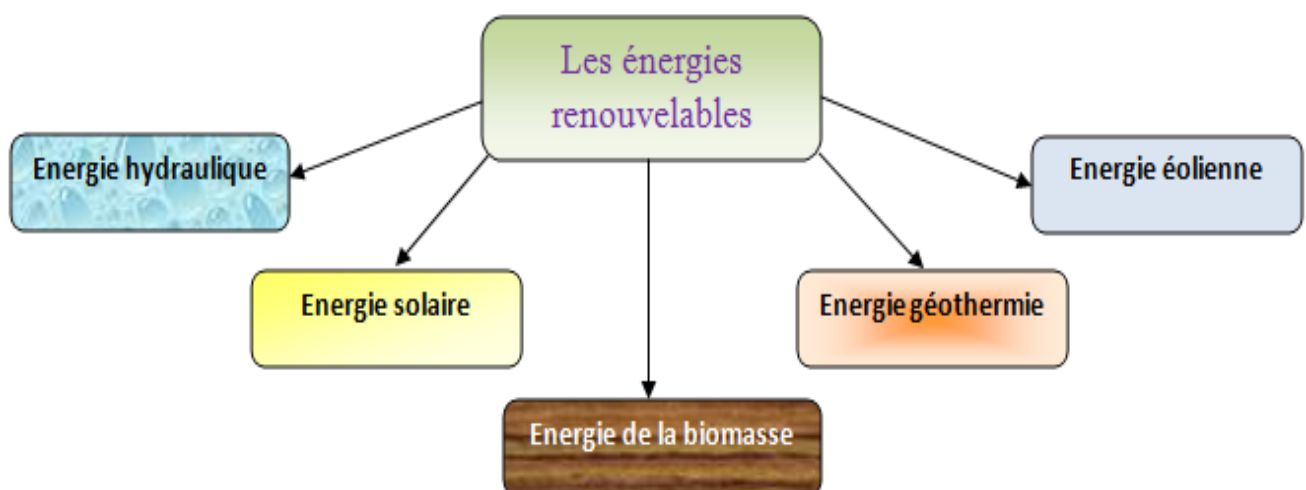


Figure I.1: Différents types des énergies renouvelables

I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, 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 I.2.

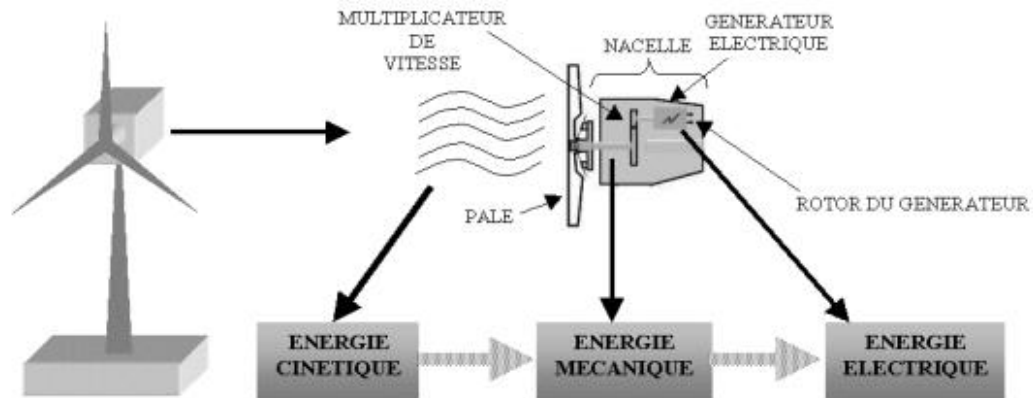


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 100m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

I.4 Généralités

I.4.1 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau.

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.-C environ Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C.

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moulinier le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pû être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [1].

I.4.2 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 20 W à 500 W.
- ❖ Mini-éoliennes : gamme de puissance nominale de 500 W à 1 kW.
- ❖ Petites éoliennes : de 1 kW à 100 kW.

Ces éoliennes sont installées à des hauteurs de 10 à 35 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 puissance. Ces applications représentent un marché non négligeable appelé à se développer [7] figure I.3.



Figure I.3 : Applications des petites éoliennes

I.4.3 Les grandes éoliennes

La grande éolienne est celle 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 I.4. Ces éoliennes sont montées avec un système de régulation de la fréquence et après ça avec le réseau.



Figure I.4 : Applications des grandes éoliennes (parcs éoliens)

I.4.4 Les différents types d'éoliennes

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

I.4.4.1 Eolienne 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 I.5 et le rotor de Darrieus figure I.6.



Figure I.5 : rotor de Savonius



Figure I.6 : 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 I.1 [8-9]:

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 I.1 : Avantages et inconvénients d'éolienne à axe vertical

I.4.4.2 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 I.7. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales 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 [6,10].



Figure I.7 : Les éoliennes à axe horizontal

Le tableau I.2 présente les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal [9-10] :

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 I.2 : 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 répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales [9].

I.4.5 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 I.8.

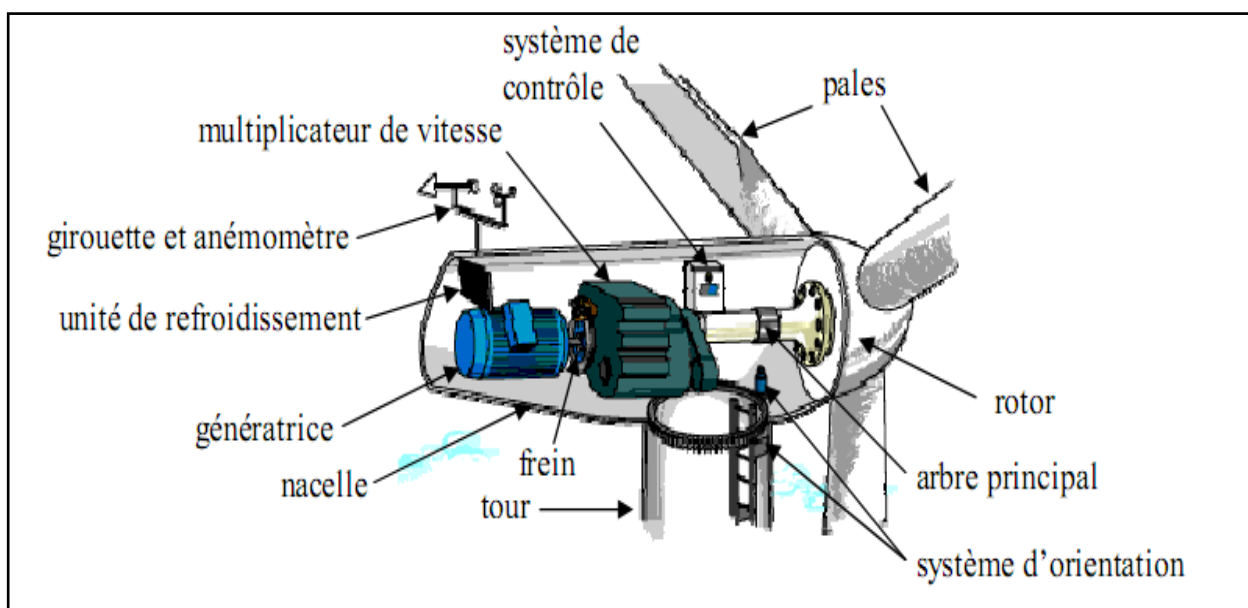


Figure I.8 : Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

I.4.5.1 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 monopale 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 [10].

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 I.9, 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 I.9 : Un moyeu

I.4.5.2 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 I.10.

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 [6,11].

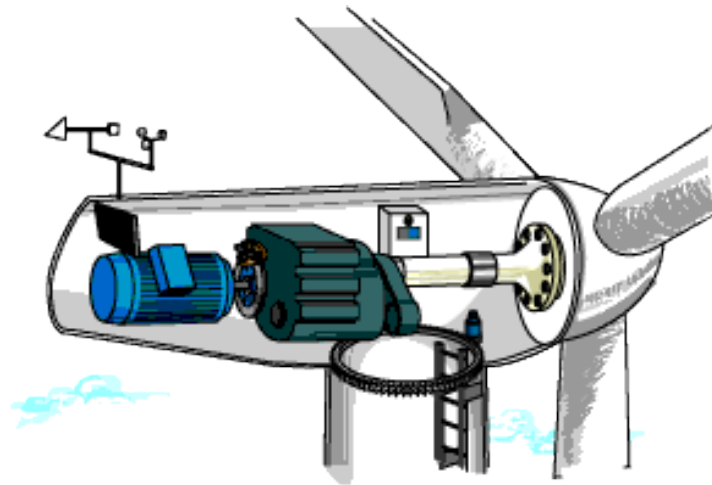


Figure I.10 : Une nacelle

Les différents composants d'une nacelle :

- Le 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 I.11 induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [10,12].

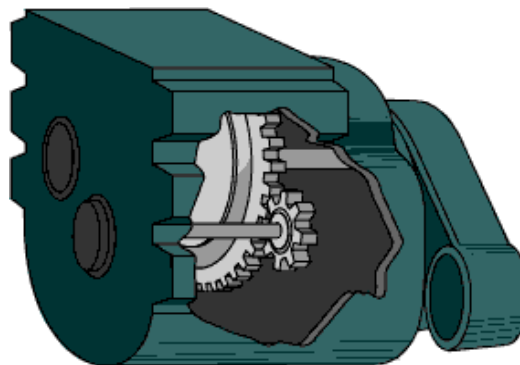


Figure I.11 : Un multiplicateur

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 [10].

➤ 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 [8,13].

➤ La génératrice

Elle peut être un générateur à courant continu ou un alternateur [12], dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique [11] figure I.12.



Figure I.12 : 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 [14].

➤ 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 [14] figure I.13.



Figure I.13 : 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 [10] figure I.14.



Figure I.14 : 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 [10] figure I.15. 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 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne [14].

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 I.15 : un anémomètre associé à une girouette

I.4.5.3 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 I.16. 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 [10].



Figure I.16 : éoliennes à tour en treillis et à tour tubulaire

I.4.6 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 désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.4.6.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [8].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [15].
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [9].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation [11].

I.4.6.2 Inconvénients

- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Dégradation de l'aspect visuel des sites concernés [8].
- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées [15].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger [11].

I.5 Principe de conversion de l'énergie

I.5.1 La puissance du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre. L'énergie cinétique des particules d'air d'une masse m et qui se déplacent à une vitesse V est donnée par [16] :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{I.1})$$

D'où :

E_c C'est l'énergie cinétique en (joule)

V C'est la vitesse du vent en (m/s)

m C'est la masse de l'air en (Kg)

Si on applique cette relation sur les éoliennes donc on doit préciser sur la masse qui tourne les pâles de l'éolienne, cette masse est donner par la formule $m = \rho V_{ol}$

Avec :

ρ Est la masse volumique de l'air en général elle est égale à 1,25 (Kg/m³).

V_{ol} C'est le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne en (m³) et ce volume est donner par la formule suivante $V_{ol} = S e$

D'où :

S C'est la surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m²)

e Est l'épaisseur des pales en (m)

Donc on peut introduire l'énergie théoriquement récupérable par les éoliennes est donnée par la formule :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho S e V^2 \quad (\text{I.2})$$

Mais on sait que la puissance P est donnée par la relation suivante $P = \frac{E}{t}$

Avec :

P La puissance en watts (W)

E L'énergie en joule (j)

t Le temps en seconde (s)

Donc si on remplace la formule (I.2) on obtient la formule suivante $P = \frac{\frac{1}{2} \rho S e V^2}{t}$
avec $\frac{e}{t} = V$ donc la formule sera

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{I.3})$$

Avec :

P C'est la puissance en Watts (W)

ρ La masse volumique de l'air en (Kg/m³)

S La surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m²)

V La vitesse du vent primaire en (m/s)

S Peut être donné par la formule $S = \pi R^2$ avec R c'est le rayon de rotor en (m), donc la formule sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{I.4})$$

Ce qui nous montre que la puissance absorbée de l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [17] et de carrée de rayon de rotor (la longueur de la pale) [11].

Une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent donc il y a un coefficient que nous sommes obligés d'en tenir compte dans notre formule c'est le coefficient de puissance C_p . Donc la formule (I.4) sera :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{I.5})$$

Ce coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines car il est proportionnel à la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β (l'angle du vent par rapport à l'axe de pale) [11,18].

La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [19]. La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne est donnée par la formule $v = R \Omega$

Avec :

v C'est la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

R La longueur des pales en (m)

Ω La vitesse angulaire des pales en (rad/s)

Et comme que les éoliennes ont différents longueurs de pales donc chaque éolienne est caractérisée par sa vitesse résultante de déplacement des pales. On peut introduire maintenant le rapport entre cette vitesse v et la vitesse du vent primaire par la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V_1} \quad (\text{I.6})$$

Cette vitesse est une caractéristique importante pour les éoliennes, chaque éolienne a son vitesse spécifique nominale λ_{nom} et d'après cette vitesse on peut classer les éoliennes. Dans la pratique il ya des rotors avec $0,9 < \lambda < 15$, dans des cas exceptionnels $\lambda = 20$. La vitesse spécifique nominale λ_{nom} permet cataloguer les rotors de la suivante façon : ceux qui avec λ jusqu'à les environs de 3 on les appelle éoliennes lents et ceux qui avec λ supérieur à 4 on les appelle éoliennes rapides figure I.17 [20].

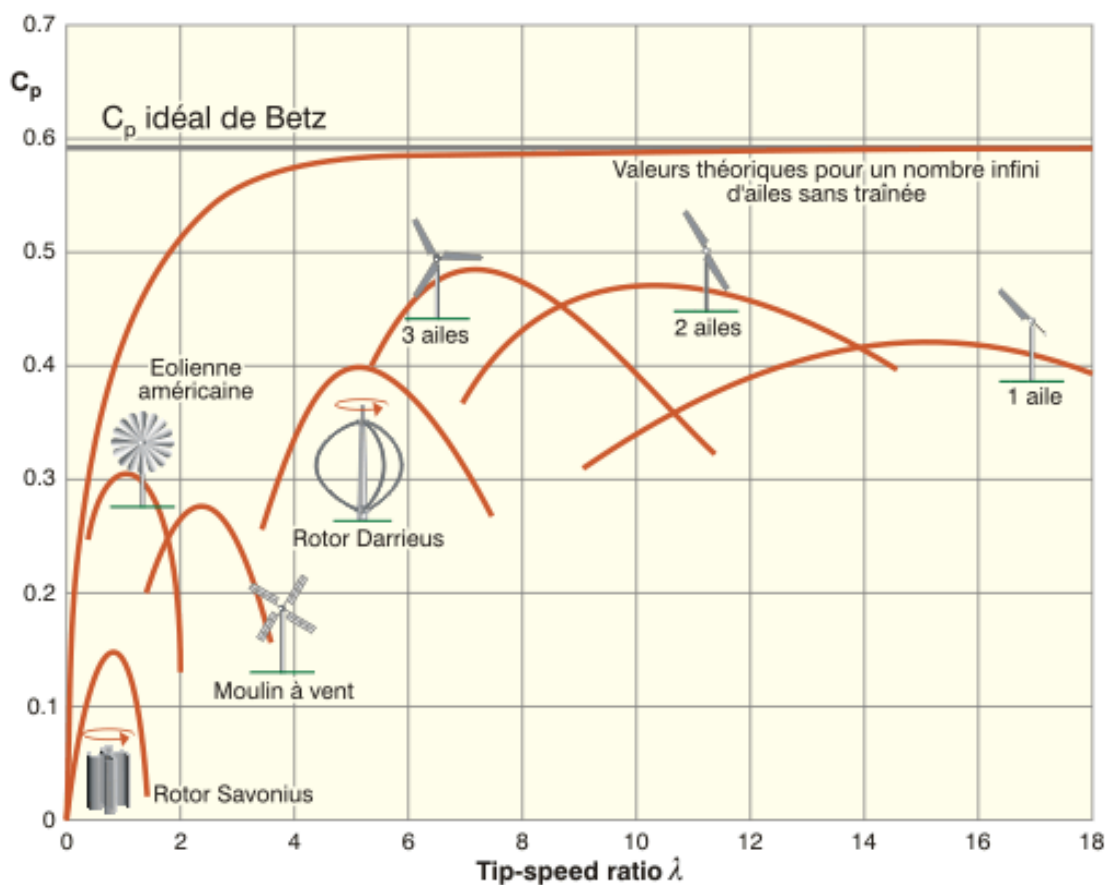


Figure I.17 : Caractéristiques coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique

L'autre paramètre qui influe sur le coefficient de puissance est l'angle de calage β . La figure I.18 illustre la variation du C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de β [21].

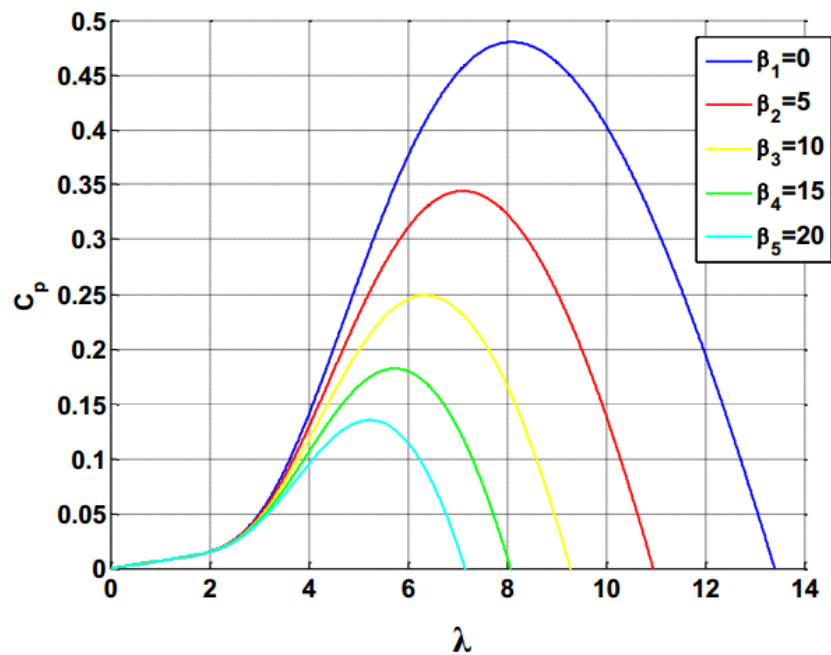


Figure I.18 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

I.5.2 La limite de Betz



Figure I.19 : Variation de la vitesse du vent

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure I.19 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $v = \frac{V_1+V_2}{2}$ [6].

La masse d'air en mouvement m_t (Kg/s) de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est $m_t = \rho S V$

Avec V c'est la vitesse moyenne du vent traversant le rotor en (m/s) donc la formule sera :

$$m_t = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I.7})$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton $P = \frac{E_{en} - E_{sort}}{2}$)

$$P_m = \frac{1}{2} m_t (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.8})$$

Avec :

P_m La puissance extraite par le rotor en (W)

m_t Est la masse par seconde (Kg/s)

V_1 La vitesse avant le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

V_2 La vitesse après le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

Soit en remplaçant m_t par son expression dans (I.7) nous obtenons

$$P_m = \frac{\rho S}{4} (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.9})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_0 correspondante serait alors :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (\text{I.10})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$C_p = \left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \quad (\text{I.11})$$

D'où P_0 est la puissance totale d'un flux d'air non perturbé en watts (W)

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus figure I.20, on s'aperçoit que le ratio P_m / P_0 appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16 / 27$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le

rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent et de l'angle de l'orientation de la pale β [6,8].

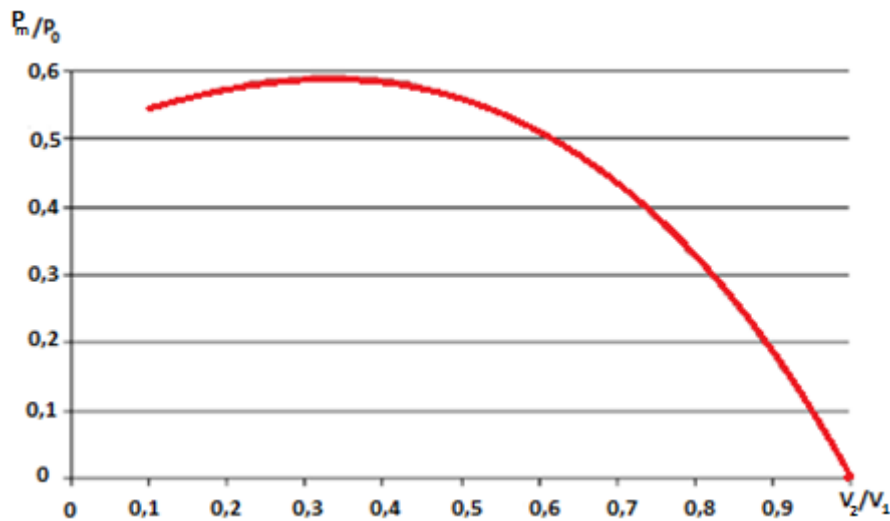


Figure I.20 : Variation du coefficient de puissance en fonction de différence de vitesse

On peut voir que la fonction atteint son maximum pour $v_2/v_1 = 1/3$, (freinage du vent à 1/3 de sa vitesse originale) la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant de 0,59 ou $16/27$ de la puissance totale contenue dans le vent [22].

Il est important de souligner que le coefficient de puissance peut être en fonction de la vitesse relative $C_p(\lambda)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système à décrochage aérodynamique "stall" ou en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage β , $C_p(\lambda, \beta)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système d'orientation des pales "pitch" [8].

I.5.3 Zones de fonctionnement d'une éolienne

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent figure I.21

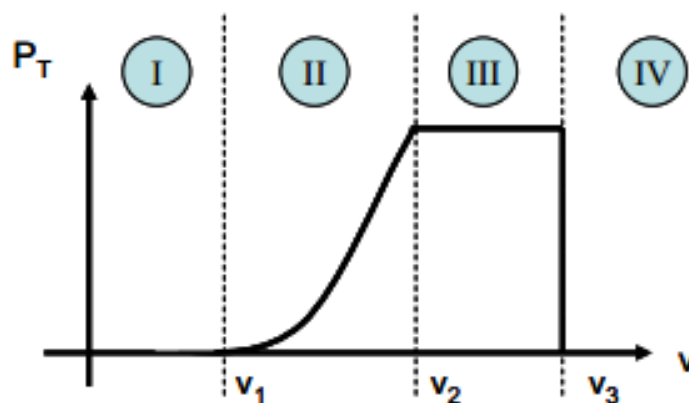


Figure I.21 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

V_1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V_3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s [23].

Zone I : $V < V_1$

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

Zone II : $V_1 < V < V_2$

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

Zone III : $V_2 < V < V_3$

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : $V > V_3$

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée (les pales de la turbine sont mises en drapeaux $\beta = 90^\circ$). Donc la puissance extraite est nulle [23].

I.5.4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale V_{\max} qui pourrait endommager la turbine.

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir [24] :

❖ Le système « pitch »

La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "pitch control", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort [10].

❖ Le système « stall »

Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "stall control", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique [10]. En comparaison avec le pitch, le stall a pour avantage l'absence des pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor (système de contrôle d'angle de calage). La construction est donc plus simple et moins coûteuse. Par contre la puissance active n'est pas contrôlable [24].

❖ Le système « stall actif »

Le système "stall actif" est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux [24].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation des différentes sources d'énergies qui existent, renouvelables et non renouvelables. Par la suite on a présenté les éoliennes, leurs composants, leurs classifications, et leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous avons aussi défini les paramètres qui sont utilisés pour leur classification, notamment, le coefficient de puissance.

L'aspect aérodynamique de la conversion de l'énergie éolienne est aussi détaillé dans ce chapitre, ainsi on peut distinguer trois techniques utilisées dans le contrôle de la turbine éolienne se basant sur le profil des pales (décrochage aérodynamique passif et actif) et contrôle par variation de l'angle de calage (pitch).

Dans le prochain chapitre nous allons étudier les différentes chaînes de conversion de l'énergie éolienne (les machines électriques et leurs convertisseurs associés).

Chapitre II

Génératrices et convertisseurs utilisés dans les éoliennes

II.1 Introduction

Une éolienne a pour le rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à l'électronique de puissance) [14].

Dans ce chapitre on s'intéresse au système de contrôle électrique, pour faire une comparaison entre les deux grandes familles d'éoliennes existantes, les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) directement couplée sur le réseau électrique et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [25]. Même la génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance. Et enfin, nous choisissons une de ces machines pour fonctionner notre système.

II.2 Les systèmes éoliens connectés au réseau électrique

II.2.1 Système à vitesse fixe-Machine asynchrone à cage (MAS)

Ces systèmes éoliens sont constitués d'une turbine éventuellement équipée d'un système de contrôle de l'angle de calage des pales, d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur électrique. Ce générateur est principalement une machine asynchrone à cage directement couplée au réseau et fonctionnant en hypersynchronisme à la vitesse $\Omega_{sync}(1-g)$, où g est le glissement de la machine ($g < 0$ dans ce cas). La variation de la vitesse reste très faible, à titre d'exemple, le glissement nominal d'une génératrice asynchrone de 1.5MW est de l'ordre de 1%.

On peut noter, dans certain cas la présence d'un convertisseur statique de type gradateur entre le réseau et la génératrice. Ce convertisseur sert uniquement à limiter le fort appel de courant dû à la magnétisation au moment du couplage sur le réseau. Une fois le couplage effectué, ce convertisseur est court-circuité. La machine est alors directement raccordée au réseau [13]. On trouve aussi à ce niveau la compensation de l'énergie réactive consommée pour le maintien de la magnétisation de la machine. Le moyen le plus simple et le plus utilisé est une batterie de condensateurs placés en shunt figure II.1 [23].

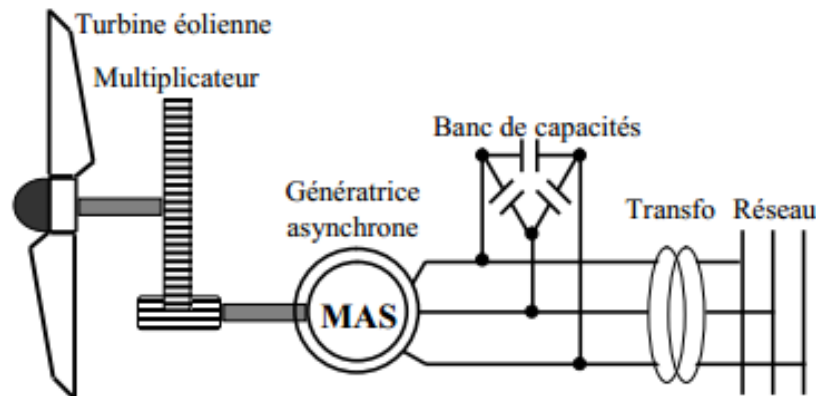


Figure II.1 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

Le tableau II.1 présente les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à cage à vitesse fixe [23] :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Machine standard et robuste ➤ Faible coût ➤ Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puissance extraite non optimisée ➤ Maintenance boîte de vitesse ➤ Pas de gestion de l'énergie réactive ➤ Magnétisation de la machine imposée par le réseau

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de la MAS à cage à vitesse fixe

II.2.2 Système à vitesse variable-Machine asynchrone à cage (MAS)

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent figure II.2 [8].

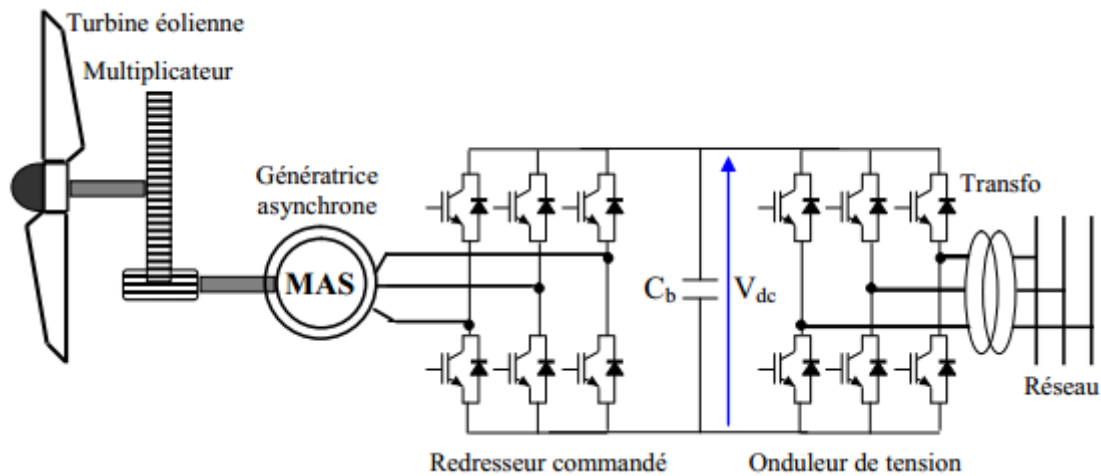


Figure II.2 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable

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. 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 [26]. Le tableau II.2 présente les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à cage à vitesse variable [8] :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Machine standard et robuste ➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale ➤ Le coût de l'installation élevé ➤ L'augmentation des pertes

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la MAS à cage à vitesse variable

II.2.3 Système à vitesse variable-Machine asynchrone à double alimentation

(MADA)

Dans ce cas là, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique triphasé bobiné avec bagues collectrices y est connecté par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance [23]. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement.

Le câblage du rotor (couplage du rotor et l'électronique de puissance associée) permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de celui-ci. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor [27].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse

variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa, Nordex...) utilisent ce type de machine [21] Figure II.3.

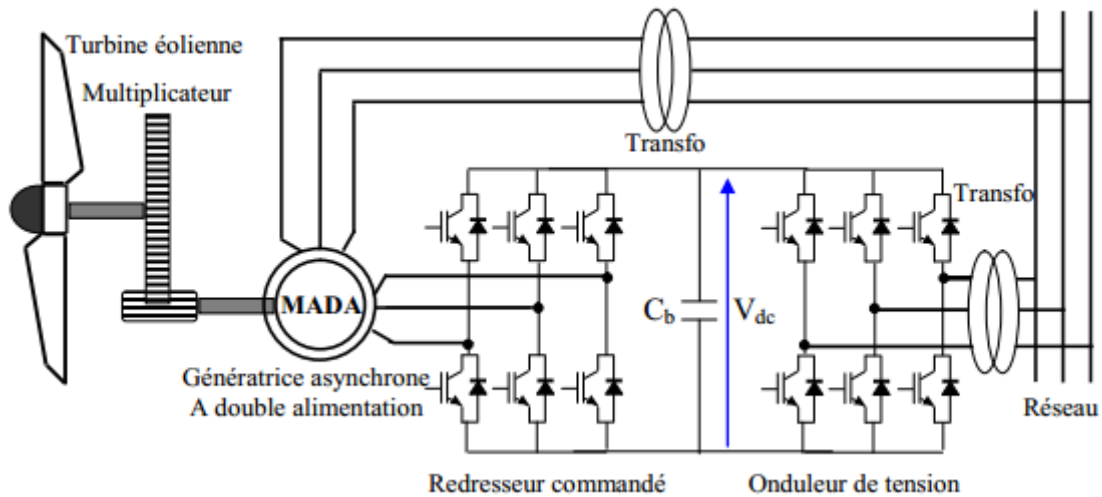


Figure II.3 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable

Les convertisseurs d'électronique de puissance offrent des possibilités de contrôle extrêmement utiles au pilotage de l'ensemble : contrôle de la qualité des courants et des puissances active et réactive injectés au réseau. La commande de l'onduleur côté rotor permet le contrôle de la puissance convertie. Il s'agit en fait de contrôler le couple du générateur afin d'obtenir la vitesse de rotation souhaitée. La commande de l'onduleur côté réseau permet le contrôle du transfert de puissance. Il s'agit d'assurer le transfert de la puissance rotorique en contrôlant le niveau de la tension du bus continu à une valeur garantissant un fonctionnement correct de l'onduleur. L'objectif est atteint par le contrôle du courant continu dans l'onduleur et des courants triphasés. Le contrôle de tension fournit une consigne de courant continu d'où l'on déduit des consignes de courants triphasés (ou transformés) fournies aux contrôleurs de courant [13, 23]. Il est donc nécessaire d'insérer des inductances de lissage aux bornes de l'onduleur permettant de réduire significativement les harmoniques de courant [28].

Les convertisseurs de l'électronique de puissance sont ici dimensionnés en fonction du glissement que l'on s'autorise (de l'ordre de $\pm 30\%$ en théorie) donc à 30% de la puissance de la turbine [13, 23].

Le tableau II.3 présente les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable [8, 23, 25] :

Avantages	Inconvénients
➤ Fonctionnement à vitesse variable	➤ Maintenance boîte de vitesse
➤ Machine standard	➤ Prix de l'électronique de puissance
➤ Connexion de la machine plus facile à gérer	➤ Contrôle-commande complexe
➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens	➤ Contact glissant bagues-ballais
➤ EP dimensionnée à 30% de puissance nominale	➤ Oscillations mécaniques

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable

II.2.4 Système à vitesse variable-Machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Ces dernières années, avec le développement des matériaux magnétiques, la production de machines synchrones à aimants permanents devient compétitive. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes sans multiplicateur [29].

Comme dans le cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constituée d'un redresseur et un onduleur. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur figure II.4.

Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau qui assure le transfert de puissance entre la génératrice et le réseau ainsi que l'échange de puissance réactive avec ce dernier. Tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci donc sa vitesse de rotation. Ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le

comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [10,13,30].

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale « MPPT » [10,30].

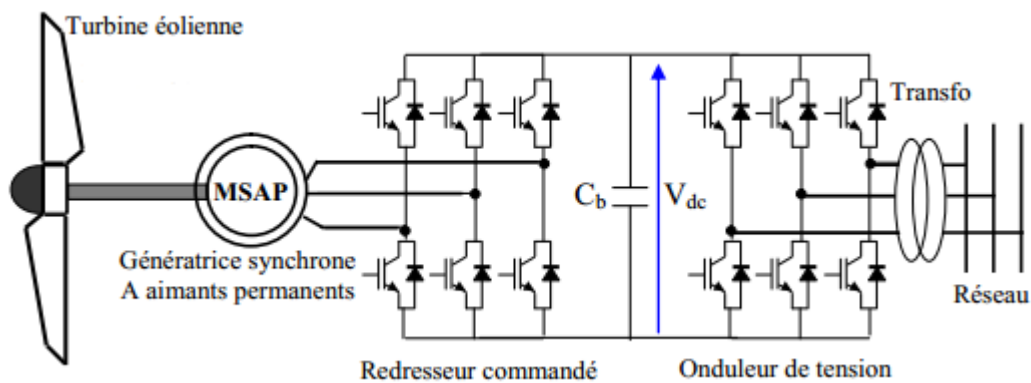


Figure II.4 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable

Cependant les aimants sont encore chers mais l'extension de leur utilisation dans des domaines très variés (Les micromoteurs aux moteurs de propulsion des navires et aux moteurs de traction ferroviaire) permet d'envisager une rapide réduction des coûts. Les travaux se poursuivent dans ce domaine avec comme principaux objectifs :

- ☞ Réduction des coûts de la machine.
- ☞ Développement de nouvelles technologies permettant une réduction du diamètre.
- ☞ Réduction des coûts des convertisseurs [23].

Le tableau II.4 présente les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable [8,23,25] :

Avantages	Inconvénients
➤ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse	➤ Machine spécifique
➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens	➤ Prix de l'EP et de la machine
➤ Connexion de la machine plus facile à gérer	➤ Grand diamètre de la machine
➤ Absence de boîte de vitesse	➤ EP dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale
	➤ Prix relativement élevé des aimants constitués de terres rares

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable

II.3 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 II.5.

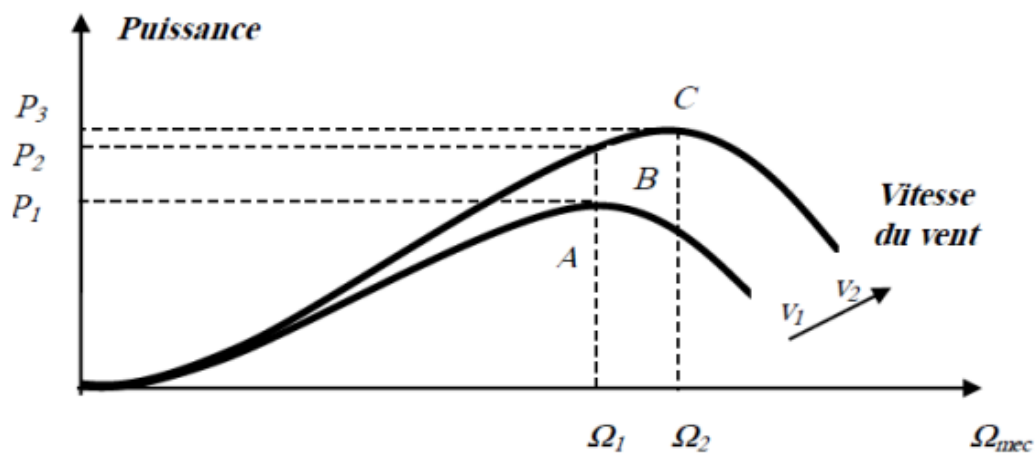


Figure II.5 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent

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 [14].

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.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une description de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne (les machines électriques et leurs convertisseurs associés). Nous avons ensuite établi un comparatif entre les systèmes de conversion électromécanique. A partir de cette comparaison, nous nous sommes intéressés à la machine synchrone à aimant permanent MSAP.

Chapitre III

Modélisation d'un système éolien basé sur une GSAP

III.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu que les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

Dans le cadre de notre travail, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine synchrone à aimant permanent. Ce troisième chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation et la simulation d'un système éolien à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent GSAP.

III.2 Modélisation et simulation du générateur éolien

Pour avoir un modèle globale de la chaîne de conversion, il est nécessaire de modéliser chaque élément constituant ce système individuellement. Dans notre étude nous nous sommes intéressés par la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne à axe horizontale qui comporte une turbine tripale avec multiplicateur entraînant un générateur synchrone à aimant permanent débitant sur un convertisseur statique composé d'un redresseur à diode puis un onduleur de tension. Le schéma du système est présenté sur la figure III.1 [26].

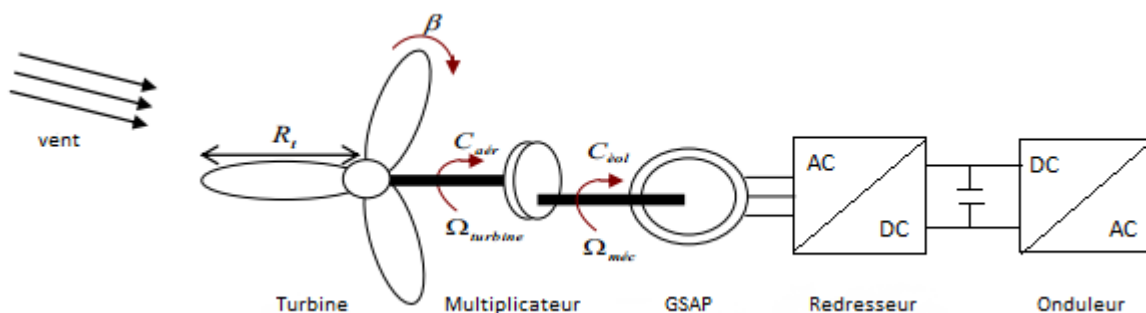


Figure III.1 : Chaîne de conversion éolienne étudiée

III.2.1 Modèle du vent

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, et du convertisseur de puissance. Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a déjà fait l'objet de nombreux travaux et par conséquent, elle ne sera pas détaillée dans ce travail. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [31].

$$V = f(t) \quad (\text{III.1})$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (\text{III.2})$$

III.2.1.1 Résultat de la simulation du vent

Le résultat de simulation de la figure III.2 représente la vitesse du vent simulée par l'équation :
 $V(t) = 9 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t)$

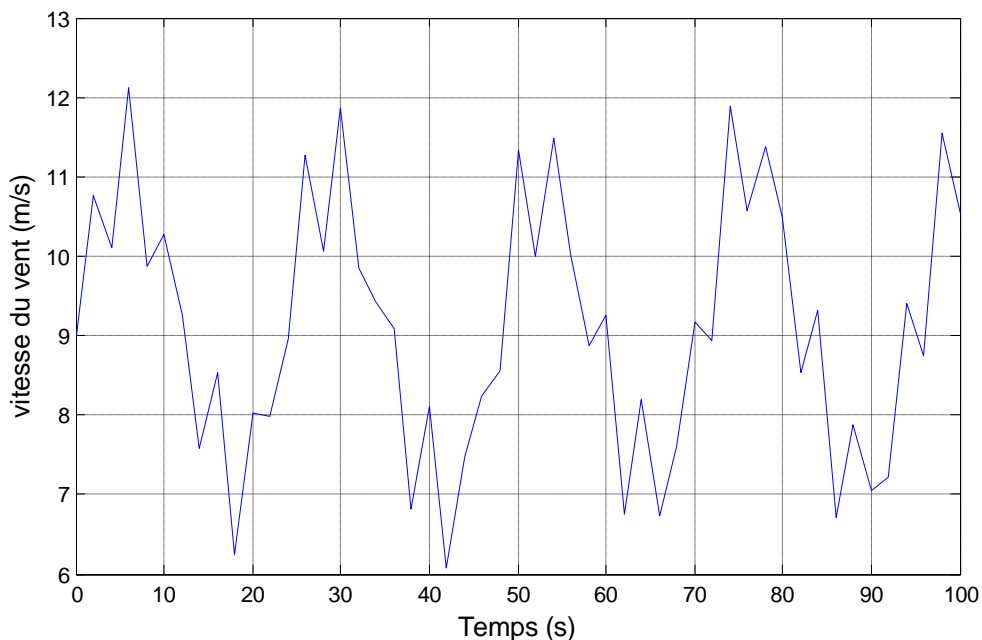


Figure III.2 : Vitesse du vent en fonction du temps

Cette figure montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (100s) entre deux valeurs ($V=12\text{m/s}$) comme valeur maximale et ($V=6\text{m/s}$) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

III.2.2 Modèle de la turbine (voilure)

La turbine éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Un modèle prenant en compte toutes ces propriétés n'est à l'heure actuelle pas envisageable. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la turbine, et non pas uniquement le comportement quasi-statique. Une turbine éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [1].

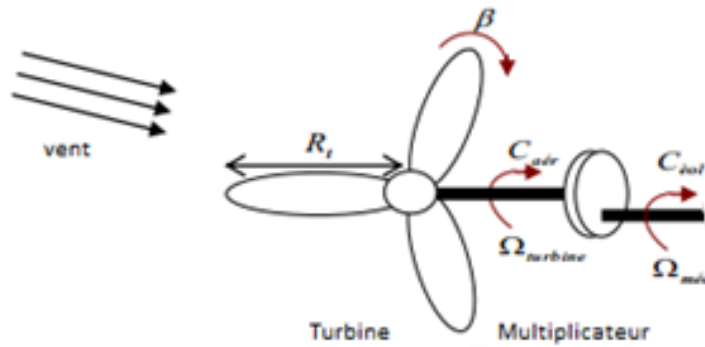


Figure III.3 : Entrées – sorties du modèle de la turbine

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent})

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}}$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à $16/27$

Le coefficient c_p diffère pour chaque éolienne dépend de l'angle d'inclinaison des pale β_i et du rapport de vitesse λ

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V} \quad (\text{III.3})$$

La courbe caractéristique de la voilure utilisée dans notre cas d'étude est présentée sur la figure III.4.

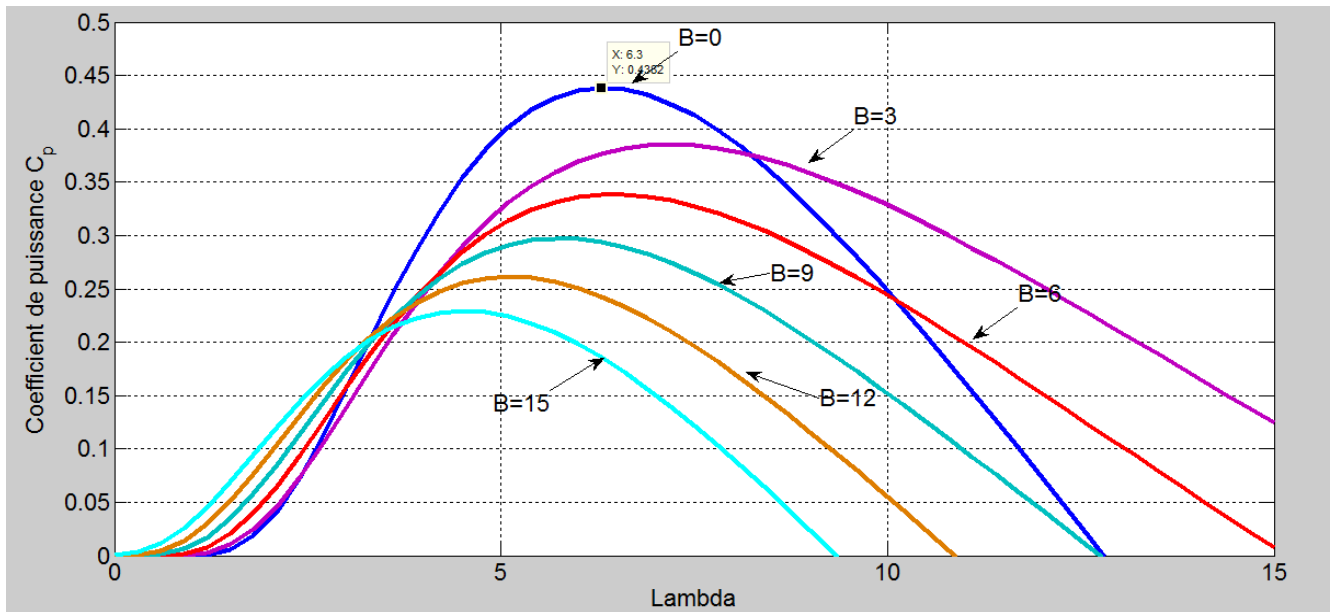


Figure III.4 : Courbe caractéristique retenue pour notre étude

La puissance récupérée par l'éolienne est déterminé par l'équation suivant :

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{III.4})$$

D'où :

Le coefficient aérodynamique de puissance optimale $C_{p_{opt}} = 0.43$.

La masse volumique de l'aire $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$.

Le rayon de la turbine $R = 2.5 \text{ m}$.

La vitesse moyenne au niveau de la turbine supposé $V = 9 \text{ m/s}$.

La vitesse spécifique optimale $\lambda_{opt} = 7$.

A partir de cette puissance, et en faisant abstraction dans un premier temps de l'inertie de voilure, le modèle le plus basique consiste à supposer un fonctionnement quasi-statique en mode générateur de couple éolien C_{eol} . Une équation du générateur de couple éolien est donc obtenue en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant l'expression (III.3) de la vitesse réduite [1] :

$$C_{eol} = C_{meca} = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} R^3 V^2 \quad (\text{III.5})$$

L'équation (III.6) donne la valeur du couple éolien qui est créé sur les pales de la voilure par la masse d'air ayant une vitesse V et à la vitesse de rotation de la voilure Ω . En réalité ce couple éolien

n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine surtout à cause de l'inertie conséquente de la turbine J et, dans une moindre mesure, des frottements mécaniques f des paliers.

Comme présenté schématiquement sur la figure (III.5) [1,9] :

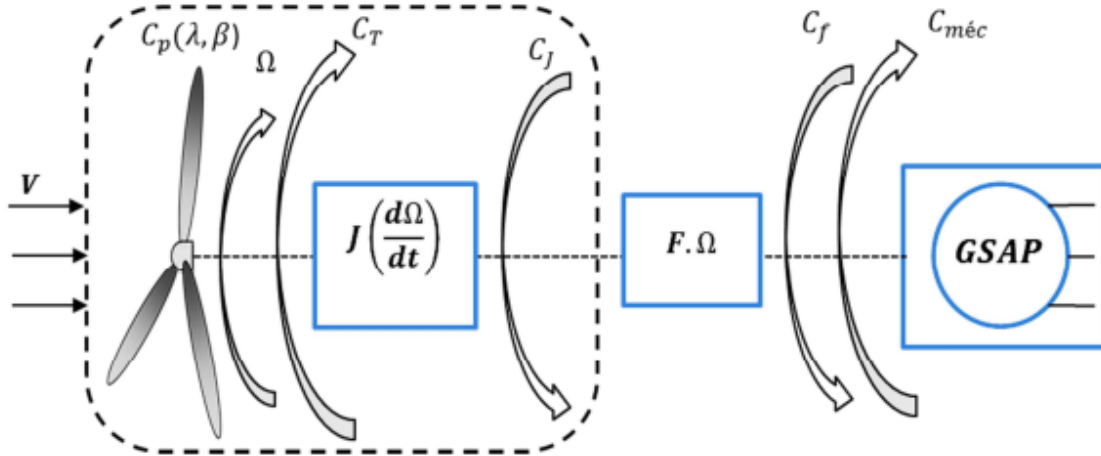


Figure III.5 : Schéma bloc d'une turbine éolienne

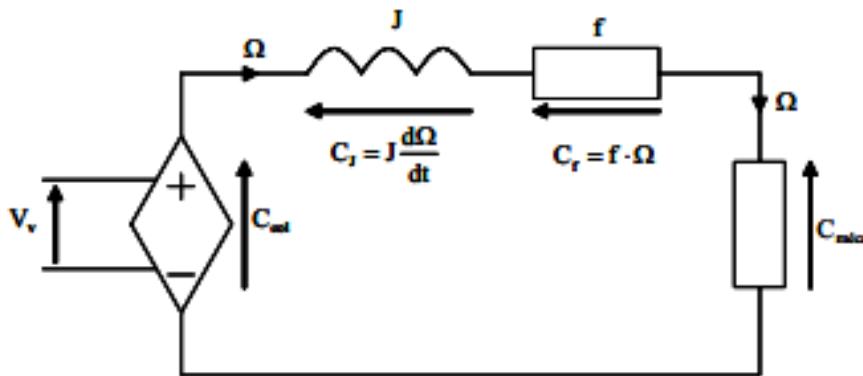


Figure III.6 : Schéma équivalent de la turbine éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$\Delta C = C_{eol} - C_{méca} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \tag{III.6}$$

D'où, après le réarrangement des termes, la valeur de la vitesse obtenue par :

$$\Omega = \frac{1}{J} \int (\Delta C - C_f) dt \tag{III.7}$$

Avec : $C_f = f \cdot \Omega$.

III.2.3 Modèle de la génératrice synchrone à aimant permanent

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotorique ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation. La modélisation de cette machine nécessite aussi comme toute autres machines triphasées de passer du système d'axes triphasés (réel) au système d'axes biphasés (et réciproquement) figure III.15. Pour cela il faut utiliser les transformations de Park suivantes :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

D'où :

x_a, x_b, x_c : les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

x_d, x_q : les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

x_o : la composante homopolaire.

$[P(\theta)]$: la matrice directe de Park.

$[P(\theta)]^{-1}$: la matrice inverse de Park.

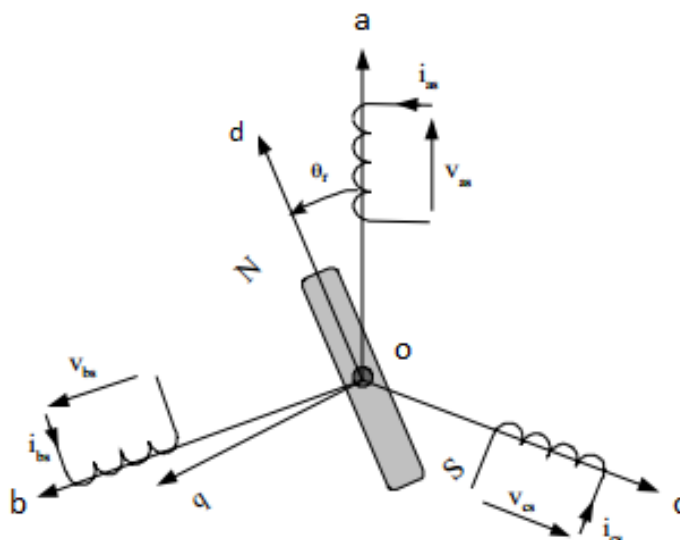


Figure III.15 : Représentation d'une MSAP dans les repères (abc) et (d, q)

- Les axes [oa, ob, oc] sont les axes respectifs des trois enroulements a, b, c du stator.
- L'axe 'od' est l'axe du rotor, et l'axe 'oq' est situé entre deux pôles.

III.2.3.1 Equations électriques dans le repère (abc)

Le point de départ dans l'étape de l'élaboration du modèle électrique de la machine consiste à modéliser le circuit des enroulements de phases illustrés dans la figure III.16. Cette Figure définit les tensions de phase, V_a , V_b et V_c et les courants instantanés i_a , i_b et i_c circulant dans ces phases ainsi que les FEM induites [9].

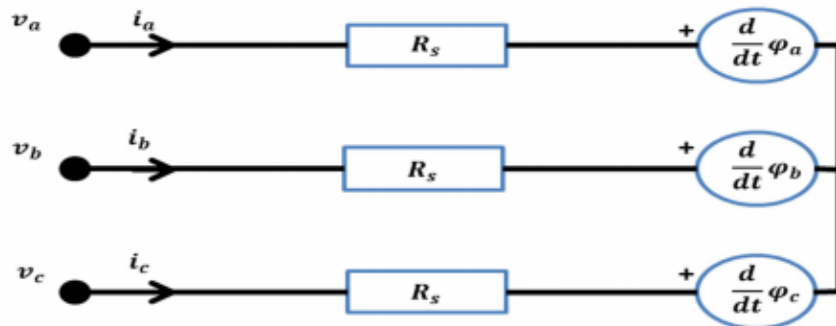


Figure III.16 : Structure électrique du stator d'une MSAP

Les tensions s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes [9]:

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \\ V_b = R_s i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \\ V_c = R_s i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

La mise sous forme matricielle est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$[V_a \ V_b \ V_c]$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]$: Vecteur courant des phases statoriques.

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé, voir figure III.16, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire.

Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes [31].

III.2.3.2 Equations électriques dans le repère de Park ($d q$)

A l'aide de transformation de PARK on passe de grandeurs réelle ($V_a V_b V_c$) et ($i_a i_b i_c$) à leurs composantes ($V_o V_d V_q$) et ($i_o i_d i_q$) figure III.17.

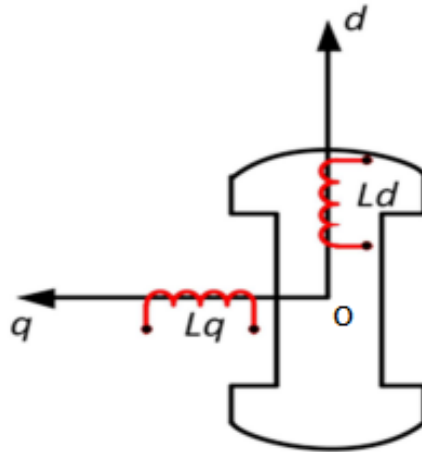


Figure III.17 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor, l'axe ' d ' se situe sur le même axe que celui de l'aimant permanent. Les deux bobines sur les axes (d, q) tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [9].

Les matrices de Park modifiées (matrices orthogonales) sont données par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Avec θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé.

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit :

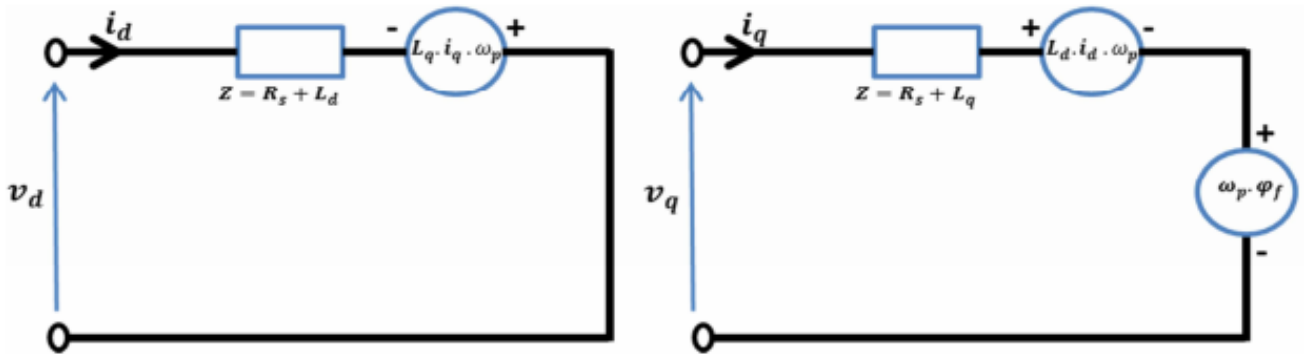


Figure III.18 : circuit équivalent de MSAP en mode moteur

Le modèle électrique d'une «MSAP» en fonctionnement générateur est reproduit à partir du modèle de la machine en mode moteur, figure III.18, en inversant le sens des courants « i_d » et « i_q » dans les repères de Park, le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu, peut s'écrire sous la forme suivante [9] :

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + L_q i_q \omega \quad (\text{III.15})$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - L_d i_d \omega + \omega \varphi_f \quad (\text{III.16})$$

Avec :

V_d, V_q : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

i_d, i_q : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

L_d, L_q : Inductances statoriques dans le repère de Park [H].

R_s : Résistance statoriques [Ω].

ω : Pulsation des tensions [rad/s].

φ_f : Flux des aimants permanents [Wb].

$\omega \varphi_f$: Force électromotrice induite seulement sur l'axe q [V].

Dans notre cas d'étude nous allons modéliser la génératrice en charge, pour cela on suppose que la génératrice alimente une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}), l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne [26] :

$$V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{ch} i_q \quad (\text{III.17})$$

$$V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q + \omega L_{ch} i_d \quad (\text{III.18})$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (III.17) et (III.18) respectivement, on aura le système suivant :

$$0 = -(L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d - (R_s + R_{ch}) i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q \quad (\text{III.19})$$

$$0 = -(L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q - (R_s + R_{ch}) i_q - \omega (L_q + L_{ch}) i_d + \omega \varphi_f \quad (\text{III.20})$$

III.2.3.3 Equations du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Pour compléter le modelé électromécanique de la GSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique. L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \varphi_f] \quad (\text{III.21})$$

Avec P est le nombre de paires de pôles.

L'équation mécanique est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_m - C_{em} \quad (\text{III.22})$$

D'où :

C_m : Couple moteur entraînant la GSAP.

Ω : Vitesse mécanique de l'arbre.

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

f : Coefficient de frottement visqueux.

$f\Omega = C_f$: Couple de frottement.

III.2.4 Modèle du redresseur à diodes

Les convertisseurs statiques utilisés couramment dans les chaînes de conversion d'énergie dédiées aux systèmes éoliens, sont basés sur des modules entièrement commandés qui leur rend coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées [26].

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, et débitant sur une batterie supposée idéale. Dans un premier temps, on considère que l'impédance de la source est nulle. Dans ce cas, les courants de ligne i_a , i_b et i_c prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu I_{dc} .

Chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période. Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur I_{dc} lorsqu'une diode devient conductrice.

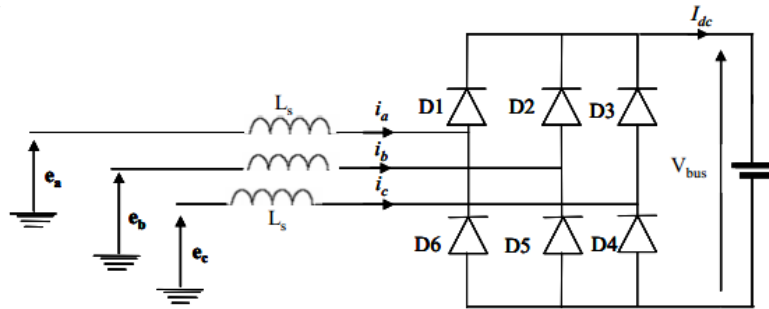


Figure III.23 : Schéma d'un pont de diodes

Le schéma équivalent pendant une séquence de conduction, par exemple les phases 1 et 2 est représenté sur figure III.24. A partir du schéma équivalent, et en appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous pouvons écrire :

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2L_s} [V_a - V_b - V_{bus}] \tag{III.23}$$

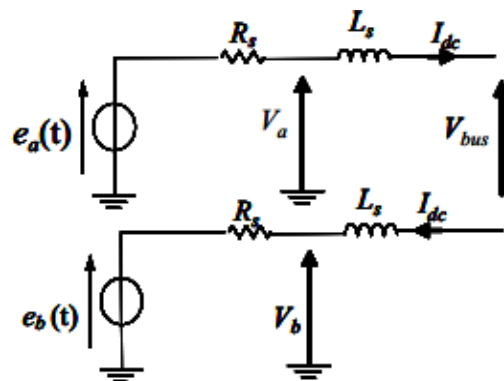


Figure III.24 : Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale

Pour implanter ce modèle sous Matlab /Simulink, la diode a été simulée comme dans le cas du redresseur monophasé. Il reste maintenant à sélectionner les phases qui vont rentrer en conduction. Ceci est fait à l'aide d'une fonction Matlab max/min qui nous permet de sélectionner respectivement la tension la plus positive et la plus négative des trois tensions disponibles en amont du pont de diodes.

Le courant continu en aval du pont de diodes est calculé à partir de l'équation (III.23). Les courants de ligne en amont du redresseur à diodes sont déterminés à partir du courant continu en aval de celui-ci, qu'on a multiplié par les séquences de conduction de chaque phase [32].

III.2.5 Modèle de l'onduleur de tension et de bus continu

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif (charge) à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la charge des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. Un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode antiparallèle figure III.27 [33].

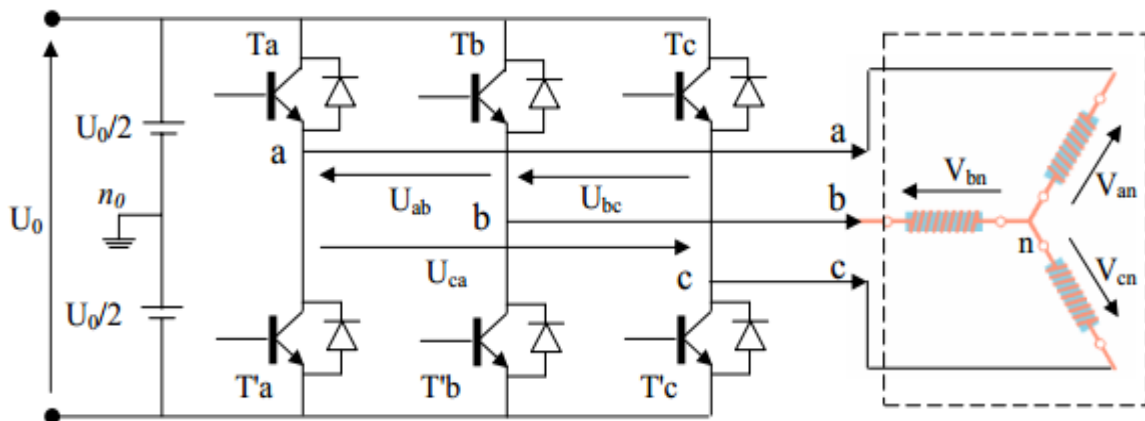


Figure III.27 : Schéma de l'onduleur triphasé

Pour faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation on modélise l'onduleur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. On considère l'alimentation de l'onduleur comme une source parfaite, supposée d'être de deux générateurs de F.E.M égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé. Elle a été modélisée à partir des tensions simples qui nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

- Si $S_i = 1$, Alors T_i est passant et T_i' est ouvert.
- Si $S_i = 0$, Alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3) [U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3) [U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3) [U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 :

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Donc, on peut déduire que:

$$V_{nn0} = (1/3) [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{III.27})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits S_i ($i = a, b, c$) on a :

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (\text{III.28})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

En remplaçant (III.29) dans (III.27), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (III.30)$$

En remplaçant (III.29) dans (III.30), on obtient [33] :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.31)$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme suit :

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (III.32)$$

Le bus continu est la partie se trouvant entre le redresseur et l'onduleur. Le courant de ce condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur figure III.28 [16].

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (III.33)$$

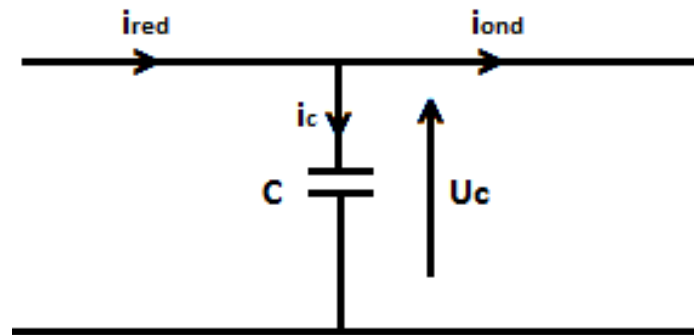


Figure III.28 : Schéma simple pour le circuit du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif i_c .

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (III.34)$$

Ainsi :

$$u_c = \int \frac{du}{dt} + u_c(t_0) \quad (III.35)$$

Où $u_c(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant initial t_0 .

III.2.5.1 Contrôle du courant par MLI

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La MLI est obtenue par la comparaison de deux signaux :

Un signal triangulaire de haute fréquence (F_p) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence $F_m \ll F_p$. Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur figure III.29 [33].

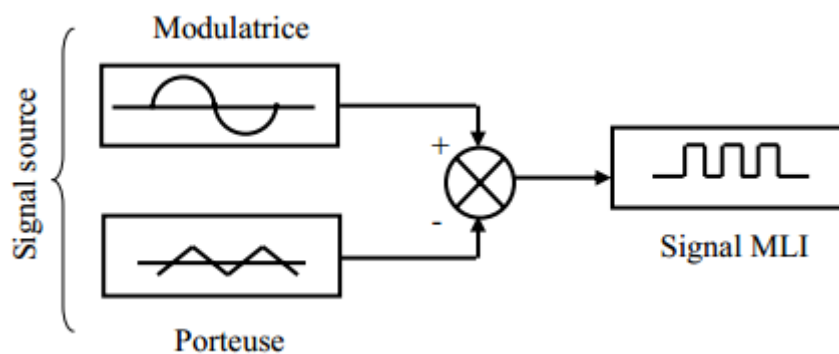


Figure III.29 : Schéma synoptique d'un MLI

Ces deux signaux sont définis comme étant :

- ❖ L'onde porteuse : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).
- ❖ L'onde modulatrice : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (en général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont :

- ❖ L'indice de modulation M_L : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse : $M_L = \frac{V_m}{V_p}$
- ❖ Le rapport de modulation M_r : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice : $M_r = \frac{F_m}{F_p}$

III.2.5.2 MLI à échantillonnage naturel

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (Modulatrice). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs figure III.30 [30,33].

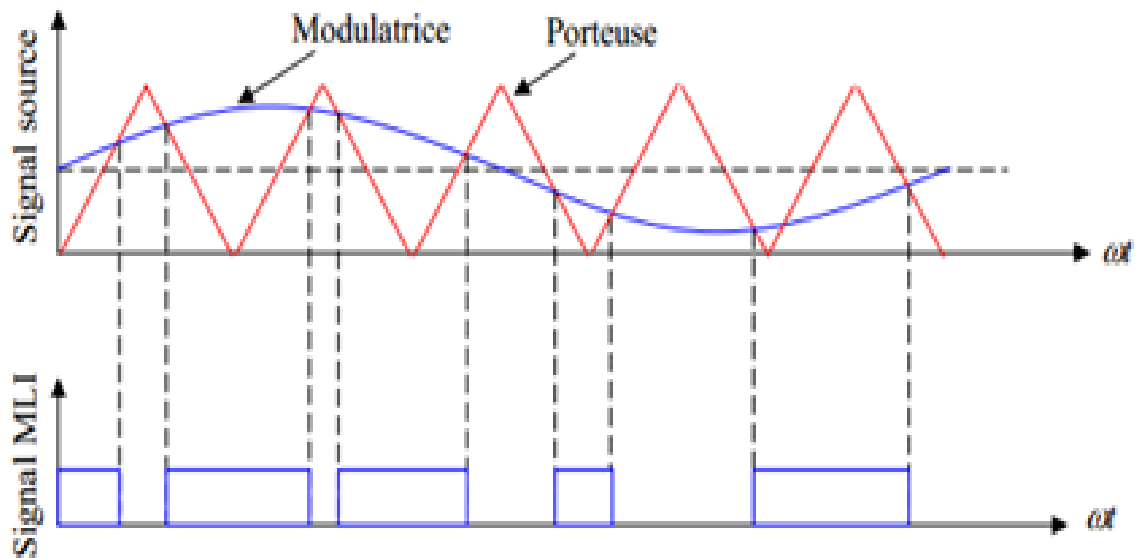


Figure III.30 : M.L.I à échantillonnage naturel

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice. La deuxième représente la partie électromécanique comprenant la machine à aimant permanent. La dernière représente la partie électrique (l'électronique de puissance), les deux convertisseurs avec le bus continu pour permettre le couplage de la machine au réseau électrique. Les résultats de la simulation sont présentés après chaque modélisation. Dans le prochain chapitre on va traiter une ferme éolienne et leur intégration dans le réseau.

Chapitre IV

Simulation et interprétation :

IV.1 Introduction

ce chapitre concerne l'étude en simulation des différents phénomènes liés à la production de l'énergie éolienne. Il passe en revue le comportement du vent, le couple électromagnétique, le courant statorique, la vitesse spécifique λ , le coefficient de puissance, la puissance active et la puissance réactive. Une interprétation des résultats est présentée pour tous les cas d'études.

IV.2 Comportement du vent

pour l'étude comportementale, nous avons adopté la stratégie suivante contrairement à la disposition du paragraphe III-2, Figure III.2. Nous avons adopté un vent variable à l'entrée de la turbine variant de 6 m/s à 13 m/s. L'évolution et la variation de la vitesse du vent, permet de constater la dynamique au niveau de la turbine. La figure IV.17 illustre ce comportement.

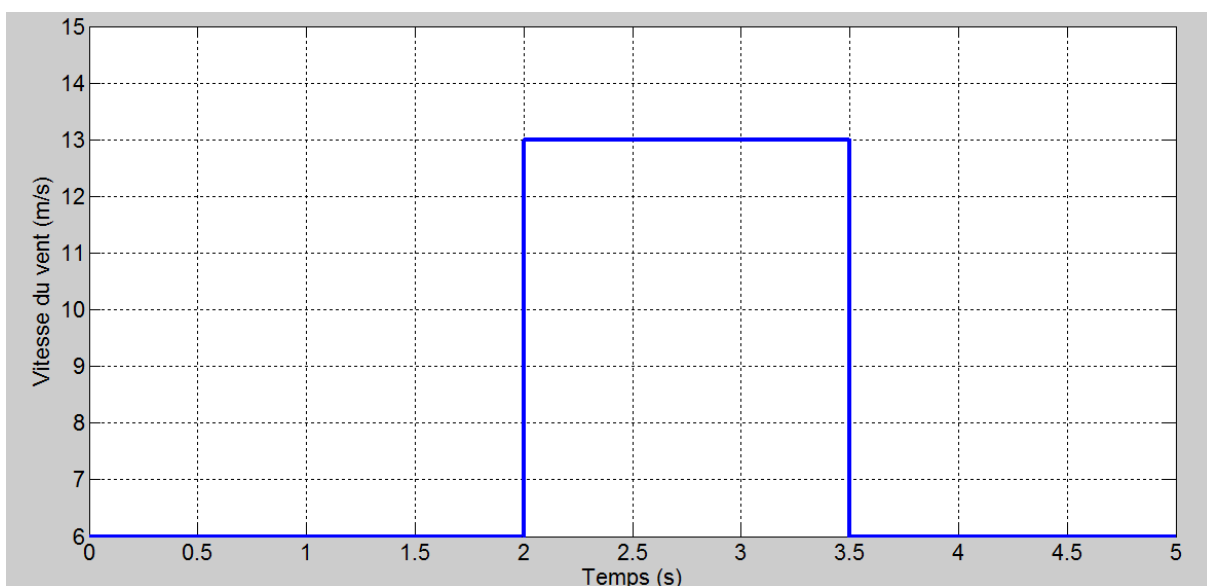


Figure IV.17 vitesse du vent

IV.3 Couple électromagnétique

Pour la valeur de vitesse de départ fixée à 6 m/s, le couple électromagnétique se stabilisé après un régime transitoire à la valeur -0.3 N.m. Lorsque le vent atteint 13m/s, le couple diminue pour atteindre une valeur de -1.4 N.m, figure IV. 18. Il en est de même, la vitesse réagit aussi avec la variation de la vitesse du vent pour la MSAP fonctionnant en mode génératrice.

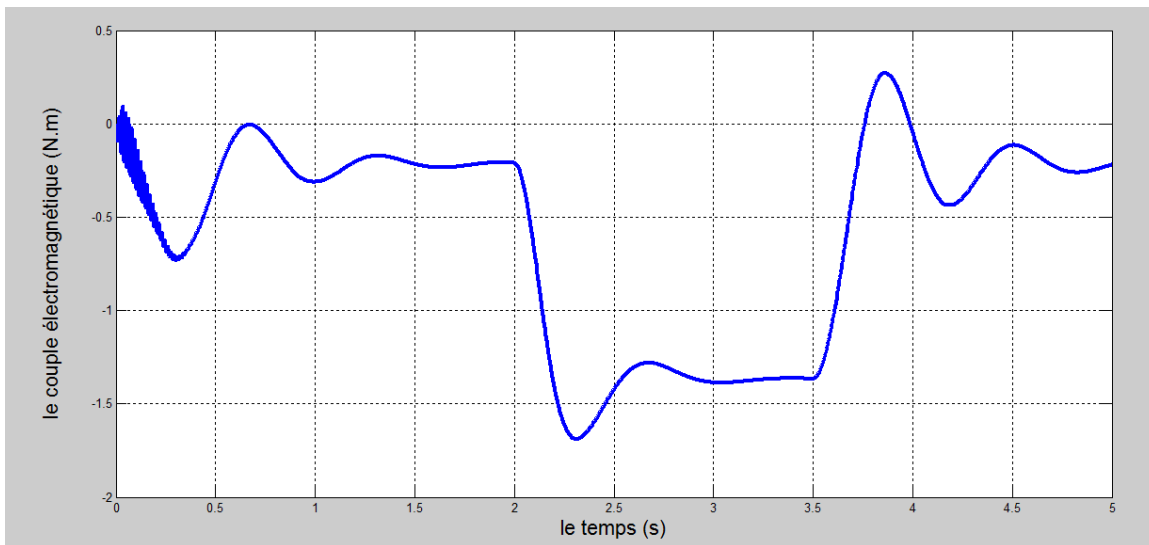


Figure IV.18 :couple électromagnétique

IV.4 Courant statorique

la figure IV.19 illustre les changement des valeur de courant statorique en fonction de la variation de la vitesse du vent. Suivant la période (2 - 3.5 s) où le vent est à son maximum, le courant prend une amplitude jusqu'à 2A. Ceci illustre clairement le suivi des paramètre électriques en fonction de la vitesse du vent, figure IV.19.

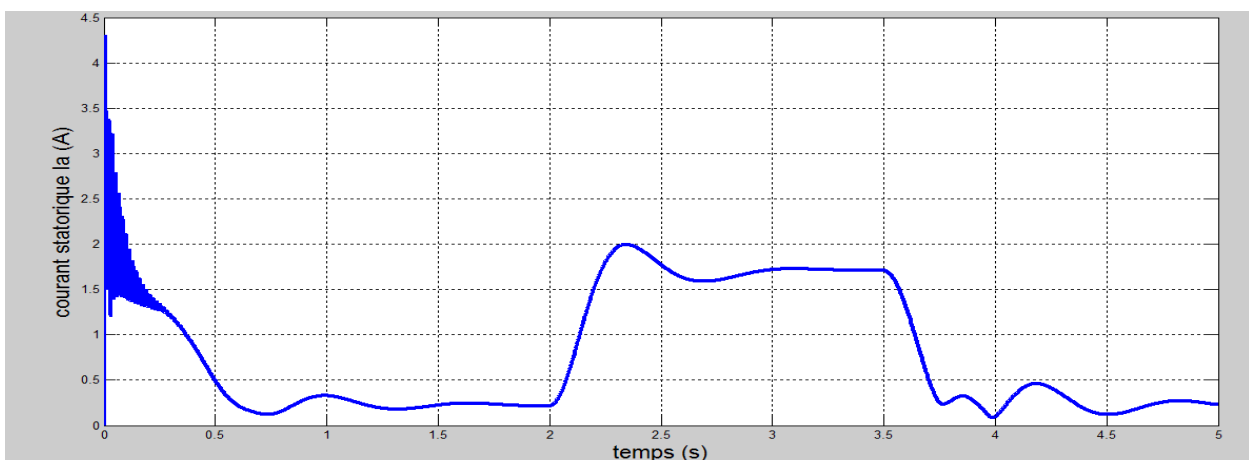


Figure IV.19 : courant statorique Ia

IV.5 Evolution de la vitesse spécifique

Conformément à l'expression théorique de λ (chapitre III, équation (III.3)), la vitesse spécifique est inversement proportionnelle à la vitesse du vent. La figure IV.20 illustre cette dynamique de changement ($\lambda > 3$). On constate que la vitesse spécifique λ est supérieure à la valeur 3, ce qui justifie la rapidité de l'éolienne.

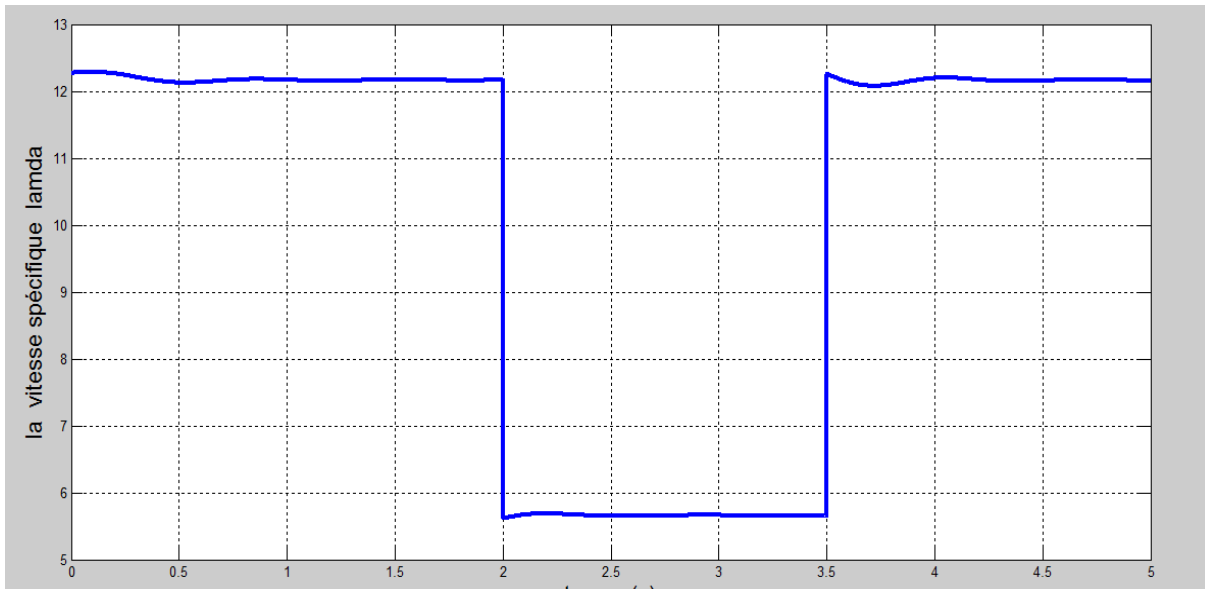


Figure IV.20 :vitesse spécifique lambda

IV.6 Evolution du coefficient de puissance

Conformément à l'expression théorique du C_p (chapitre I – Equation I.11), le coefficient de puissance est inversement proportionnel à la vitesse du vent. La figure IV.21 illustre cette dynamique de changement. D'après le graphe, on trouve que $C_p \approx 0.41$, ce que permet d'envisager un bon niveau de fonctionnement.

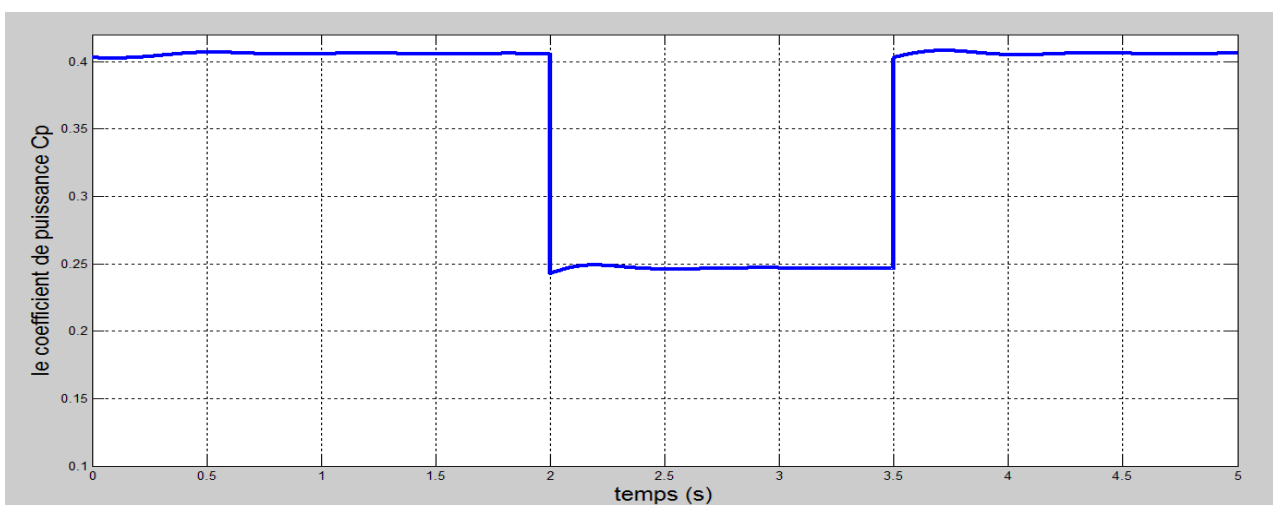


Figure IV.21 :Coefficient de puissance

IV.6 Evolution des puissance active réactive

Finalement, les figure IV. 22 et IV.23 montrent les puissances active et réactive. On constate que les variation de puissance imposées par la commande sont bien suivies par la génératrice.

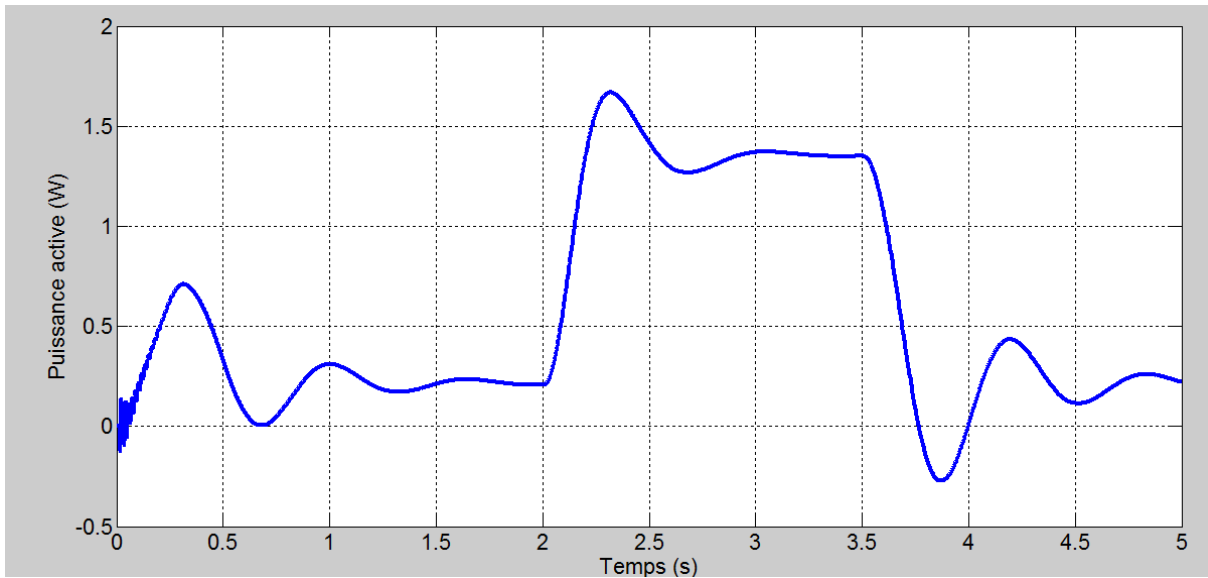


Figure IV.22 : puissance active

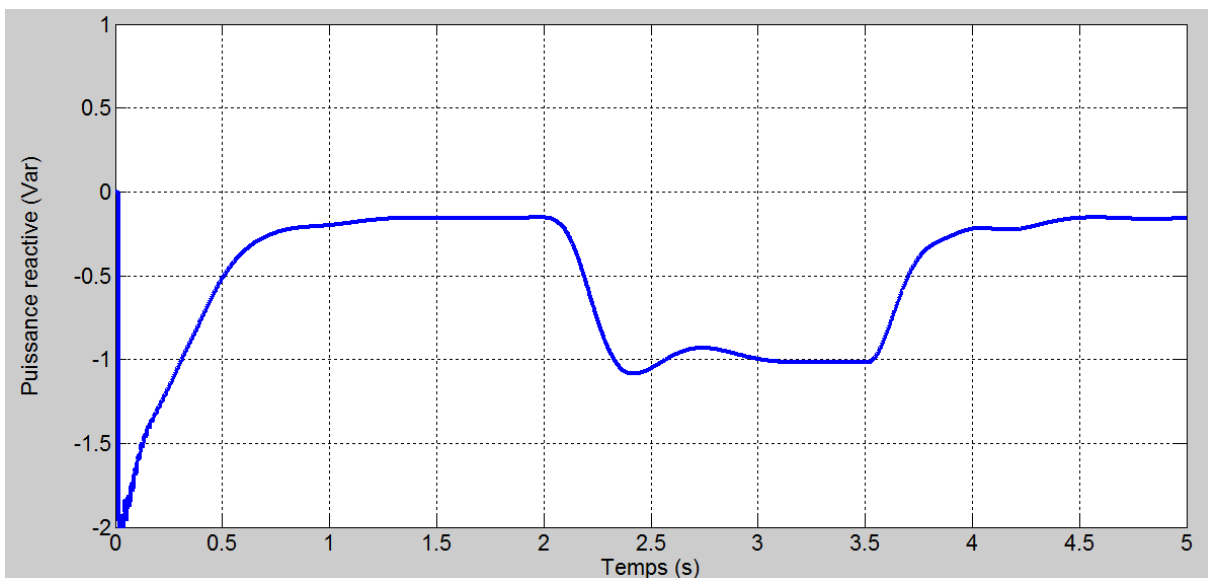


Figure IV.23 : puissance réactive

IV.7 Conclusion

Nous avons constaté à travers les différentes représentations des paramètres de la chaîne éolienne, que l'éolienne choisie est rapide du fait que $\lambda > 3$

Elle dispose d'un bon niveau de fonctionnement car le coefficient de puissance est égal 0.41 selon la limite de betz.

Conclusion générale

Afin de protéger notre environnement et sauvegarder notre planète, la production des énergies propres et durables intéressent de plus en plus les pays. L'Algérie comme tous les pays du monde s'intéressent à son tour à ces énergies dites propres et renouvelables en général, et à la filière éolienne en particulier. Le développement de ces énergies est en continuelle progression, grâce aux différentes recherches et études effectuées de part le monde.

L'intégration des éoliennes pose des problèmes majeurs dans la stabilité et l'écoulement de puissances dans un réseau électrique. En effet, sa puissance est sensible à la variation rapide de la force de vent et elle présente une production aléatoire et difficilement prévisible.

On a établi, dans le cadre de ce travail, dans un premier temps une vue générale sur les systèmes éoliens et leur applications, ainsi que, leur impact sur réseau électrique. En deuxième temps, on a abordé les différentes conversions électromagnétiques possibles puis une modélisation et une simulation du système étudié.

Le premier et le deuxième chapitre rappellent les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Ainsi les différents types des éoliennes (à vitesse fixe et variables), et dresse les différentes associations machines électriques-convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne.

Le troisième et le quatrième chapitre portent sur la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, et constituée d'un redresseur, un bus continu, l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à commande MLI.

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Avant de faire un choix sur le système de conversion éolienne, une donnée nécessaire doit être connue, c'est le profil du vent et sa variabilité.
- Développer des régulateurs de tension ou de vitesse pour maintenir la stabilité des systèmes électriques.
- Etudier la gestion des systèmes, c.à.d. réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.

Bibliographie

- [1] Adam Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [2] Hariz Abdelkader Abdelhafid « Etat de l'art sur les énergies solaire et éolienne en Algérie », mémoire magister de l'université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [3] Miguel Lopez, « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », thèse de doctorat de l'université Paris sud, 2008.
- [4] Feddaoui Omar, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables », Mémoire Magister de l'université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras, 2014.
- [5] Ghamri Imane, « Analyse et amélioration de la stabilité transitoire du réseau conventionnel après intégration d'une éolienne », Mémoire Master de l'université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [6] Frederic Poitiers, « Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne », thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [7] Duc-Hoan Tran, « Conception optimale intégrée d'une chaîne éolienne « passive »: Analyse de robustesse, validation expérimentale », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2010.
- [8] Kendouli Fairouz, « Centrale éolienne et qualité de L'énergie électrique », thèse doctorat de l'université Mentouri de Constantine, 2012.
- [9] Latreche Mohammed Tahar, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire Magister de l'université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [10] M. Kassa Idjdarene, « contribution à l'étude et la commande du génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électrique éoliennes autonomes », thèse de doctorat de l'université Abderrahmane MIRA de Béjaia, université de Lille I, 2010.
- [11] Redjem Radia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », thèse magistère de l'université Mentouri de Constantine, 2007.
- [12] Ludovic Leclercq, «Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes», Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [13] Bouhedda Ali «Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne» mémoire de magister de l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

- [14] Salma El aimani «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL), 2004.
- [15] Touati Mustapha Kamel «Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique », mémoire magister de l'université El Hadj Lakhdar de Batna, 2015.
- [16] Tamaarat Azzouz « Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation », mémoire magister de l'université Mohamed Khider Biskra, 2009.
- [17] Haritza Camblong «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable» thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers Bordeaux, 2003.
- [18] Saïdou Madougou « Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent », thèse de doctorat de l'université de toulouse, 2010.
- [19] Bencherif Bilel « Etude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone à aimants permanents », mémoire magister de l'université Ferhat Abbas de Sétif, 2011.
- [20] Manuel Franquesa Voneschen « Introduction à la théorie des éoliennes », Livre dédié à Heather Blagrove et à l'île de Madagascar, 2010.
- [21] Ait Ramdane Naima « Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne », mémoire de magister de l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [22] Site web [www.GM- Energie-éolienne.com](http://www.GM-Energie-éolienne.com), « EOLIENNE : ROTOR-PALES-PUISSANCE ».
- [23] Nicolas Laverdure «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [24] Vincent Courtecuisse « Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique, thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers Paris, 2008.
- [25] Arnaud Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [26] Meghlaoui Issam « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal », mémoire de magister de l'université de Badji Mokhtar-Annaba, 2009.
- [27] Minh Huynh Quang «Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de doctorat, Université de Reims, 2013.

- [28] Tarak Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger et l'Ecole Centrale de Lille, 2012.
- [29] Bennour Cherif « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire magister de l'université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [30] Mohammed Malki Belarbi « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret », mémoire master de l'université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [31] Soltane Belakehal « conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », Thèse de doctorat, Université de constantine, 2010.
- [32] Abdennour Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat de l'institut nationale polytechnique de Toulouse, 2007.
- [33] Merzoug Med salah « Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) », mémoire magister de l'université El Hadj Lakhdar de Batna, 2008.

Annexe

$P = f(v, \Omega)$

```
R=40;G=100; b=0;
```

```
for lambda = 0:0.1:15;
l=(1/(lambda+(0.08*b)))-(0.035/(1+(b*b*b)));
lambdai=(1/l);
CP=0.22*((116/lambdai)-(0.4*b)-5)*exp(-(12.5*1/lambdai));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for V=6:1:13,
```

```
P=(CP*1.225*2*pi*R*V*V*V)/2;
Wt=(V*lambda)/R;
Wm=Wt*G;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
figure(1)
plot(Wm,P)
xlabel('Vitesse de rotation W_r (rad/sec)')
ylabel('Puissance de la turbine P_tur (KW)')
hold on
end
end
grid
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

$C_p = F(\lambda, \beta)$

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for b=0:1:4;
for lambda = 0:0.01:15;
l=(1/(lambda+(0.08*b)))-(0.035/(1+(b*b*b)));
lambdai=(1/l);
CP=0.22*((116/lambdai)-(0.4*b)-5)*exp(-(12.5*1/lambdai));
```

```
plot(lambda,CP)
xlabel('tip-speed ratio Lumbda ')
ylabel('Power coefficient C_p')
hold on
end
end
grid
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```


Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'éolienne à axe vertical.....	8
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients d'éolienne à axe horizontal.....	9
Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de la MAS à cage à vitesse fixe.....	26
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la MAS à cage à vitesse variable.....	28
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable.....	30
Tableau II.4 : Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable.....	31

Liste des figures

Figure I.1 : Différents types des énergies renouvelables.....	4
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	5
Figure I.3 : Application des petites éoliennes.....	6
Figure I.4 : Application des grands éoliennes (parcs éoliennes).....	7
Figure I.5 : rotor de Savonius.....	7
Figure I.6 : rotor de Darrieus.....	7
Figure I.7 : Les éoliennes à axe horizontal.....	8
Figure I.8 : Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	9
Figure I.9 : Un moyeu.....	10
Figure I.10 : Une nacelle.....	11
Figure I.11 : Un multiplicateur.....	11
Figure I.12 : Une génératrice.....	12
Figure I.13 : Système de contrôle-commande.....	13
Figure I.14 : Système d'orientation.....	13
Figure I.15 : un anémomètre associé à une girouette.....	14
Figure I.16 : éoliennes à tour en treillis et à tour tubulaire.....	14
Figure I.17 : Caractéristiques coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique...	18
Figure I.18 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p	19
Figure I.19 : Variation de la vitesse du vent.....	19
Figure I.20 : Variation du coefficient de puissance en fonction de différence de vitesse.....	21
Figure I.21 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	21
Figure II.1 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.....	26
Figure II.2 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable.....	27

Figure II.3 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable.....	29
Figure II.4 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable.....	31
Figure II.5 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	32
Figure III.1 : Chaîne de conversion éolienne étudiée.....	34
Figure III.2 : Vitesse du vent en fonction du temps.....	35
Figure III.3 : Entrées – sorties du modèle de la turbine.....	36
Figure III.4 : Courbe caractéristique retenue pour notre étude.....	36
Figure III.5 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.....	38
Figure III.6 : Schéma équivalent de la turbine éolienne.....	38
Figure III.7 : Représentation d'une MSAP dans les repères (abc) et (d, q).....	40
Figure III.8 : Structure électrique du stator d'une MSAP.....	40
Figure III.9 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	41
Figure III.10 : circuit équivalent de MSAP en mode moteur.....	42
Figure III.11 : Schéma d'un pont de diodes.....	44
Figure III.12 : Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale.....	45
Figure III.13 : Schéma de l'onduleur triphasé.....	46
Figure III.14 : Schéma simple pour le circuit du bus continu.....	48
Figure III.15 : Schéma synoptique d'un MLI.....	49
Figure III.16 : M.L.I à échantillonnage naturel.....	50
Figure IV.17 : vitesse du vent.....	51
Figure IV.18 : couple électromagnétique.....	52
Figure IV.19 : courant statorique I_a	52
Figure IV.20 : vitesse spécifique λ	53
Figure IV.21 : coefficient de puissance.....	53

Figure IV.22 : puissance active.....	54
Figure IV.23 : puissance réactive.....	54