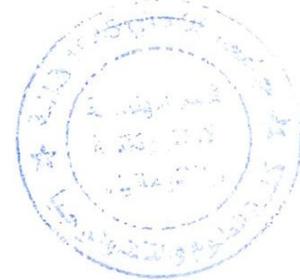


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf: 0562...../2018



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Automatique et informatique industriel

Par: ZITOUNI Abdelkarim et MESSAADI Okba

Thème

**Commande d'une chaine de conversion directe d'une éolienne
isolée de 5 MW à base d'une MSAP**

Soutenu publiquement, le 24/06 /2018, devant le jury composé de:

M. BABOURI Abdesselam	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. MENDACI Soufiane	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. SEBBAGH Abdennour	MCB	Univ. Guelma	Examineur
Mme. BOUBIDI Assia	MAA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

79/3786

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 – L'ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE	
I.1. Introduction	3
I.2. Définition de l'énergie éolienne	3
I.3. L'énergie éolienne dans le monde	4
I.4. Historique de l'énergie éolienne	6
I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne	7
I.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.6.1 Les avantage	8
I.6.2 Les inconvénients	8
I.7 Les différents types d'éolienne	8
I.7.1 Classification des éoliennes selon leur axe	8
I.7.1.1 Eolienne à axe vertical	9
a) Eolienne de Savonius	10
b) Eolienne de Darrieus	10
I.7.1.2 Eolienne à axe Horizontal	11
I.7.1.3 Comparaison	11
I.7.2 Classification des eoliennes selon leur vitesse	12
a) Eolienne à vitesse fixe	12
b) Eolienne à vitesse variable	13
I.7.3 Classification des éoliennes selon le type de génératrice	14
I.8 La structure des éoliennes à axe horizontal	15
I.9 La génératrice synchrone à aimants permanents et Le redresseur MLI	16
I.9.1 Génératrice synchrones à aimants permanents	16
I.9.2 Principe de fonctionnement d'une MSAP	17
I.9.3 Le redresseur à MLI	17

CHAPITRE II – MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

II.1 introduction	19
II.2 Modèle du vent	19
II.3 Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	21
II.3.1 loi de Betz	21
II.3.2 Production d'énergie mécanique	23
II.3.3. Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne	24
II.4 Modélisation de la turbine	25
II.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	28
II.5.1 Mise en équations de la GSAP	29
II.5.1.1 Equations électriques	29
II.5.1.1.1 Passage au repère de Park	30
II.5.1.2 Equations magnétiques	31
II.5.1.3 Equations mécaniques	33
II.6 Modélisation de redresseur à commande MLI	33
II.7 Modélisation du filtre et de la charge de la partie continue	34

CHAPITRE III –COMMANDE ET SIMULATION DE SYSTEME EOLIENNE

III.1 Introduction	36
III.2 La chaîne de conversion éolienne	36
III.3 La commande MPPT	38
III.3.1 Stratégie MPPT avec connaissance de courbe caractéristique	38
a) Présentation de MPPT avec asservissement de vitesse	39
b) Résultat de simulation	41
III.4 Commande Vectorielle de la MSAP	43
CONCLUSION GENERALE	48
Références Bibliographiques	50

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie éolienne est une source d'énergie non polluante et sans danger pour l'homme et l'environnement, L'utilisation de cette énergie n'est pas nouvelle. On peut ainsi trouver la trace d'ancêtres des éoliennes modernes jusque dans la perse ancienne. Plus près de nous, certains pays ont, depuis le Moyen Âge, largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (moulins hollandais). Dans les derniers années grâce à le développement de la technologie, la majorité des pays du monde sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables : l'éolienne, le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice ...

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) à attaque directe. Nous allons également étudier une stratégie de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine. Cette technique est appelée MPPT «Maximum Power Point Tracking».

Pour mener à bien ce travail, nous l'avons scindé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons entamer des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par quelques statistiques sur la production mondiale et la production des pays considérés comme de grands producteurs. Puis nous allons parler des différents types d'éoliennes existantes en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts.

Dans le chapitre deux, nous proposerons la modélisation mathématique des éléments d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). En effet, nous commençons par la modélisation du vent qui est la source principale d'énergie. Ce qui nous permettra d'identifier le profil du vent qui sera utilisé dans le reste du travail. Nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent. Le modèle de la MSAP au sens de Park sera aussi présenté à la fin de ce chapitre ainsi que le modèle du redresseur à MLI qui fera la liaison entre la génératrice et la charge.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter au début les stratégies de commande des éoliennes et une technique de commande MPPT qui permet d'assurer une exploitation

optimale de l'énergie du vent disponible. Des résultats de simulation seront présentés pour montrer l'efficacité de la MPPT proposée. Ce chapitre sera terminé par une présentation de la commande vectorielle de la GSAP, à travers un exemple de simulation d'une grande éolienne d'une puissance de 5 MW pour un vent de 12 m/s. Cette commande permet de contrôler le couple électromagnétique développé par la génératrice, ce qui permet ensuite de régler la vitesse de l'éolienne pour assurer l'extraction de la puissance maximale.

Ce travail sera terminé par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE

I

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est une des meilleures énergies renouvelable, cette dernière est utilisée depuis des siècles, elle s'est développée en conséquence des problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles et du progrès technologiques des aérogénérateurs. En comparaison avec les éoliennes à vitesse fixe, les éoliennes de dernière génération fonctionnant à vitesse variable permettent de diminuer le coût de production d'électricité et d'améliorer la qualité de la puissance électrique générée ainsi que le rendement de la production d'énergie [1].

Dans ce chapitre, nous commençons par un état de l'art sur les énergies éoliennes puis une description des aérogénérateurs et architectures employées dans les systèmes éoliens.

I.2. Définition de l'énergie éolienne

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité.

Depuis quelques années, la production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux atouts : c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui utilise les ressources nationales et concourt donc à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements. Enfin, le démantèlement des installations et la gestion des déchets générés pourront se faire sans difficultés majeures et les sites d'implantation pourront être réutilisés pour d'autres usages. Des difficultés existent malgré tout : la gestion technique de la production sur le réseau électrique, certains impacts environnementaux (avifaune, paysage, bruit) et l'aménagement du territoire [2].

Alors pour définir cette énergie, c'est l'énergie produite à partir de la force du vent sur les pales de l'éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

I.3. L'énergie éolienne dans le monde

Aujourd'hui, le vent est la technologie la plus compétitive sur de nombreux marchés, sinon la plupart ; et l'émergence d'hybrides éolien / solaire, une gestion plus sophistiquée des réseaux et un stockage de plus en plus abordable commencent à brosser un tableau de ce à quoi ressemblera un secteur de l'énergie totalement exempt d'énergie fossile.

La capacité de production d'énergie renouvelable a connu sa plus grande augmentation en 2016, avec une estimation de 161 gigawatts (GW) de capacité ajoutée. Le monde a continué à ajouter plus de capacité d'énergie renouvelable annuellement que de capacité ajoutée de tous les combustibles fossiles combinés.

L'énergie éolienne terrestre est l'option la plus rentable pour l'alimentation basée sur le réseau dans un nombre croissant de marchés. Au large, Environ 2,2 GW de capacité étaient connectés aux réseaux, y compris premiers projets commerciaux en République de Corée et aux États-Unis et une nouvelle capacité substantielles en Allemagne, aux Pays-Bas et la Chine. En Europe, l'énergie éolienne offshore a enregistré des offres record pour les appels d'offres au Danemark et aux Pays-Bas, la figure I.1 donne un idée sur les capacités globale installée entre 2001 et 2012 dans le monde [3].

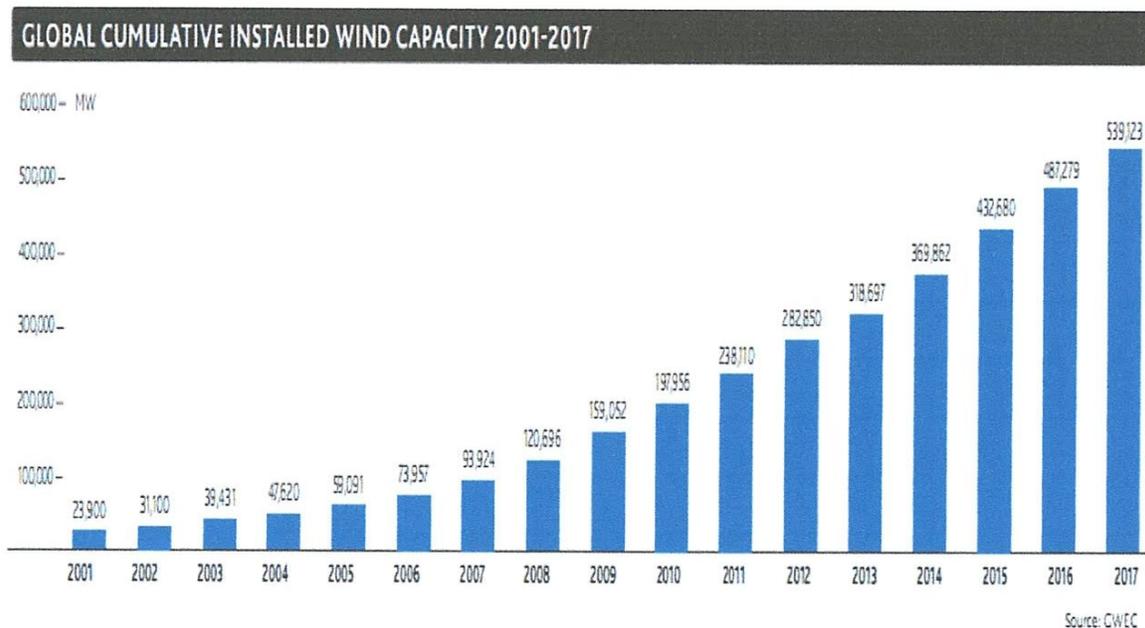


Figure I.1 : Production mondiale de l'énergie éolienne entre 2001 et 2017

Près de 51 GW de capacité éolienne ont été ajoutés en 2016, portant le total mondial à près de 539 GW. L'Asie représente environ la moitié de la capacité, L'Europe et l'Amérique du Nord représentent la majeure partie du reste, mais de nouveaux marchés ont continué à s'ouvrir dans le monde entier. À la fin de l'année, plus de 90 pays ont connu une activité commerciale. Au moins 24 pays ont répondu à 5% ou plus de leur demande annuelle d'électricité avec l'énergie éolienne en 2016, et au moins 13 rencontré plus de 10%.

L'année 2017 a été bonne pour les meilleurs fabricants de turbines, et l'innovation technologique a continué à faire face à la concurrence de gaz naturel à faible coût et, de plus en plus, à partir de PV solaire.[3]

La figure I.2 et I.3 montrent respectivement le TOP 10 des pays en termes de nouvelles capacités installées et le TOP 10 des pays utilisant l'énergie éolienne en 2017.

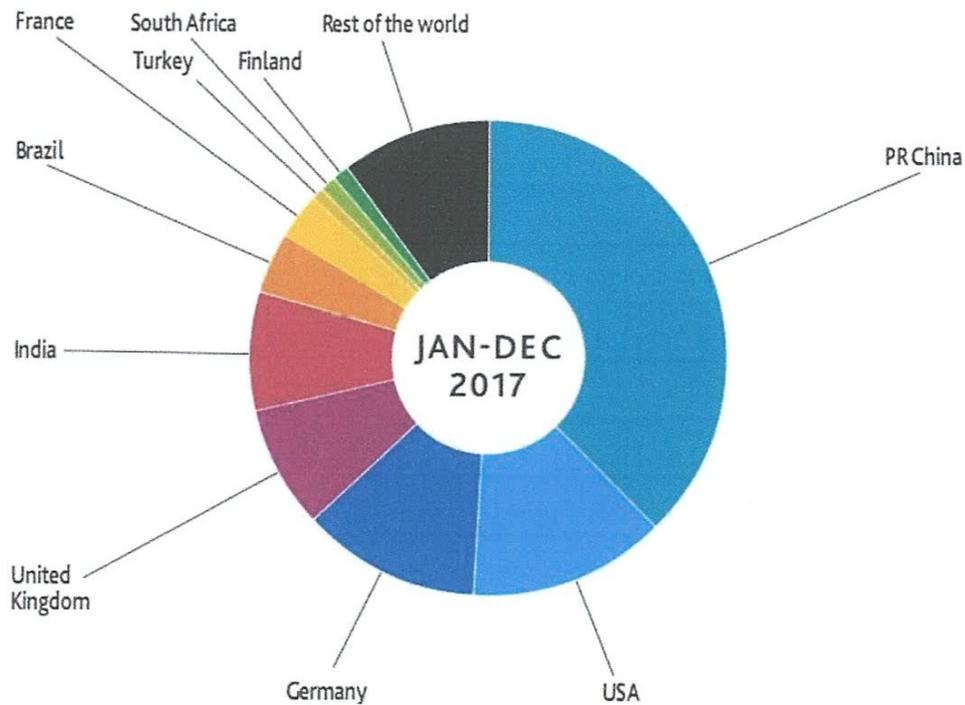


Figure I.2 : Top 10 des pays en termes de nouvelles capacités installées 2017

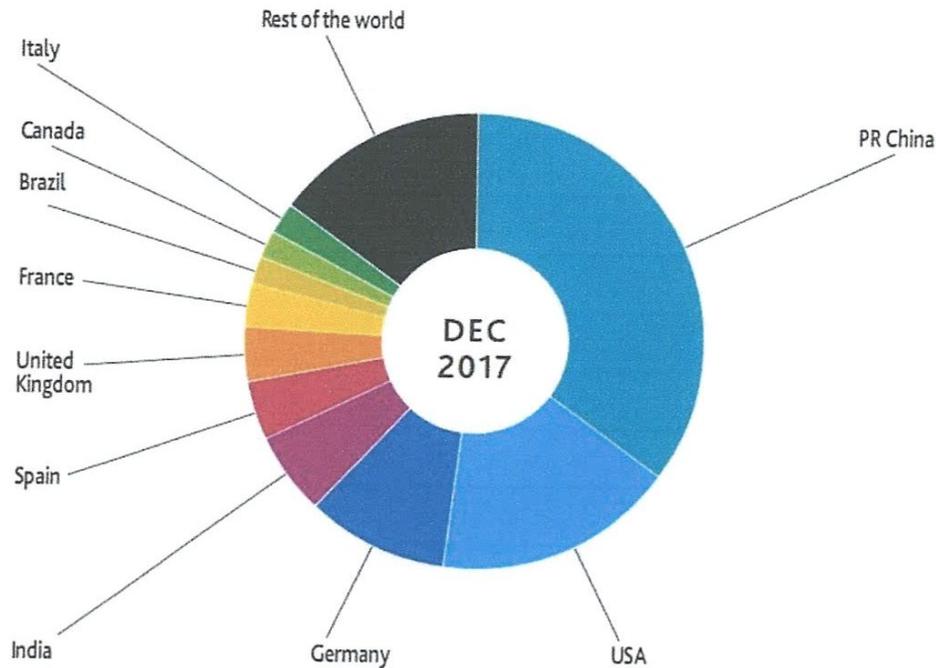


Figure I.3 : Top 10 des pays utilisant l'énergie éolienne fin 2017

I.4 Historique de l'énergie éolienne

Les premières éoliennes apparaissent au XIXe siècle aux États-Unis et sont utilisées pour le pompage de l'eau. L'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique ; Elles sont constituées d'un pylône surmonté d'un axe horizontal autour duquel sont fixées plusieurs pales.

Le vent fait tourner les pales et grâce à un système de bielle-manivelle, le mouvement de rotation est transformé en mouvement de va-et-vient ce qui permet d'actionner un piston qui aspire l'eau.

En 1887-1888, aux États-Unis, Charles F. Brush construit la première éolienne qui produit de l'électricité. Cette éolienne d'une puissance de 12kW a permis de charger des batteries pour alimenter sa maison en électricité pendant 20 ans. Le rotor de l'éolienne constitué de 144 pales et du nez avait un diamètre de 17 m !

En 1891, le danois Poul La Cour (1846–1908) met en place une éolienne plus efficace permettant de produire 25 kW grâce à des rotors à 4 pales. Il met en évidence que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales apportent un meilleur rendement. Cette éolienne sera la première utilisée à l'échelle industrielle.

Au XXe siècle, les éoliennes vont se développer petit à petit. Dans les années 1920, Georges Darrieus (1888-1979) imagine une éolienne à axe vertical.

En 1957, Johannes Juul (1887-1969) crée une turbine appelée Gedser qui sert encore de modèle aux éoliennes actuelles. Les éoliennes utilisant ce type de turbine produisaient jusqu'à 1000 kW. Le développement des éoliennes sera freiné par la suite en raison de la grande consommation en énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon. [4]

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne ou aérogénérateur utilise la force du vent pour actionner les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée en énergie électrique grâce à un générateur. Une éolienne se compose d'un mât pouvant mesurer de 10 à 120m de hauteur selon la puissance de la machine. Sur le mât est installée une nacelle enfermant la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de deux ou trois pales mesurant entre 5 et 80m de diamètre. Une éolienne fonctionne uniquement lorsqu'il y a du vent. [5]

Un multiplicateur de vitesse est généralement utilisé pour faire tourner le rotor de la génératrice qui produit de l'électricité à une vitesse convenable, figure I.4.

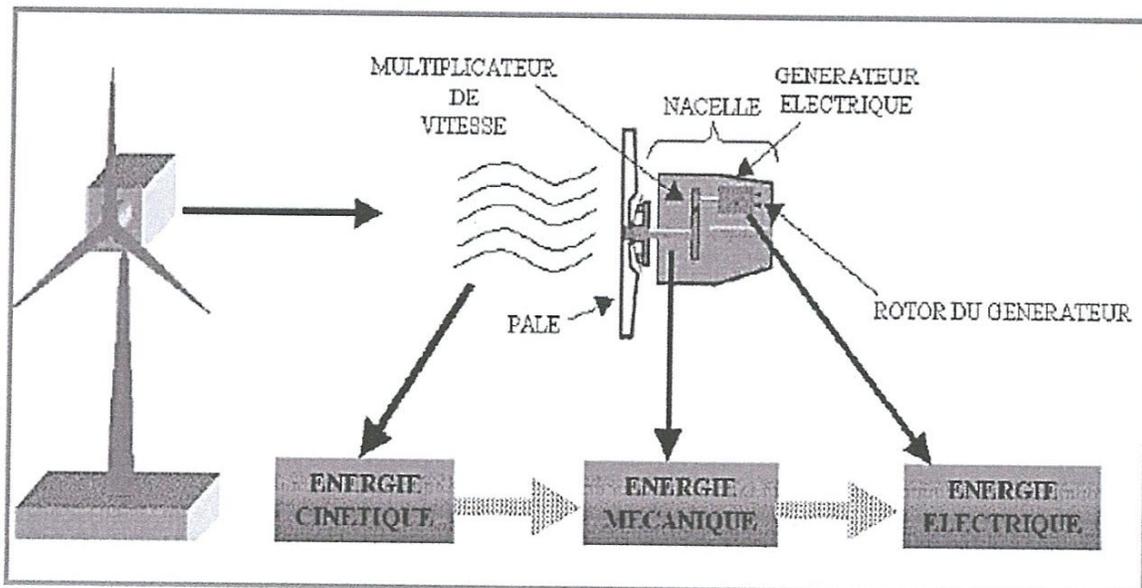


Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une éolienne

I.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

I.6.1 Les avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires[6].
- Moins chère entre les autres énergies renouvelables.

I.6.2 Les inconvénients :

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe [6].
- Impacte visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage.

I.7 Les différents types d'éolienne

I.7.1 Classification des éoliennes selon leur axe

On peut classer les éoliennes en deux grandes familles : les éoliennes à axe horizontal et éolienne à axe vertical.

La figure suivante représente une vue sur les coefficients de puissances C_p habituels en fonction de la vitesse spécifique λ , pour différents type d'éoliennes.

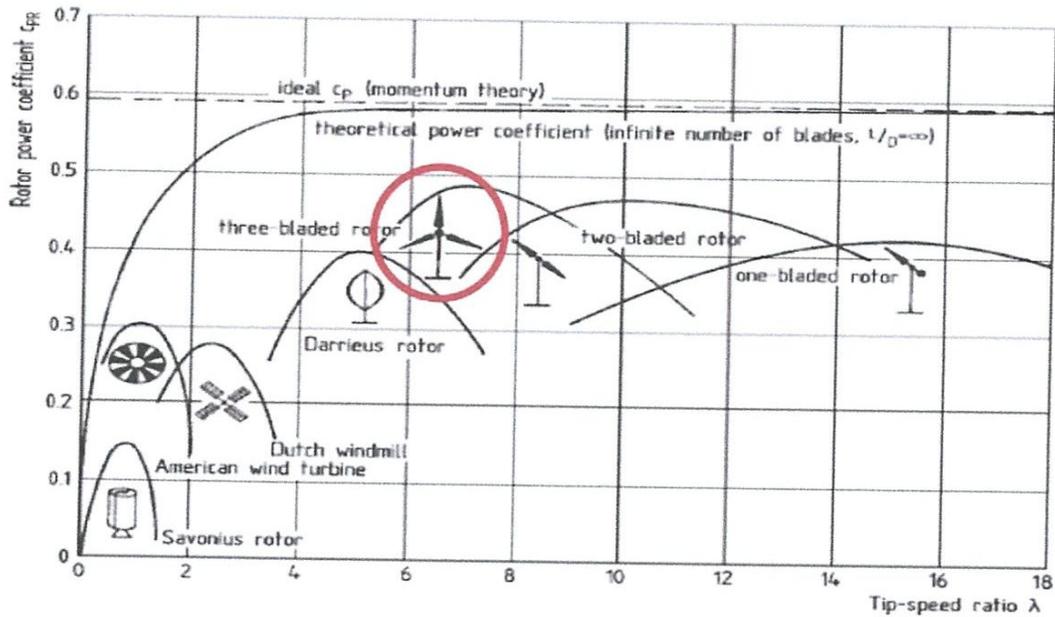


Figure I.5 : Courbe de caractéristique des éoliennes

I.7.1.1 Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [7] :



Eolienne de Savonius



Eolienne de Darrius

Figure I.6 : Eolienne à axe vertical

a) Eolienne de Savonius

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.

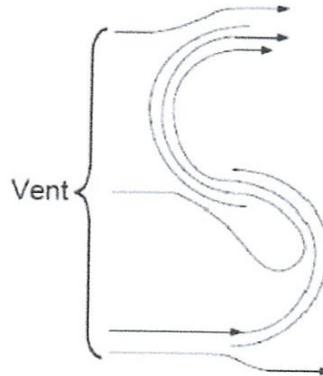


Figure I.7 : Le principe de traînée différentielle

b) Eolienne de Darrieus

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure 1.8) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables.

La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même.[7]

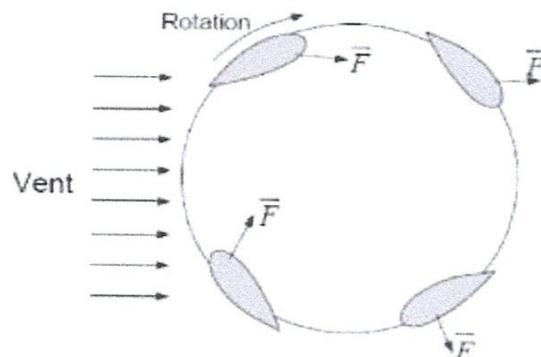


Figure I.8 : Principe de l'incidence variable

I.7.1.2 Eolienne à axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les éoliennes les plus utilisées pour la production d'électricité en sites isolés ou pour alimenter le réseau électrique. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts).

Il y a deux types de configuration : Les éoliennes «amont», sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et inversement, les éoliens «avals».

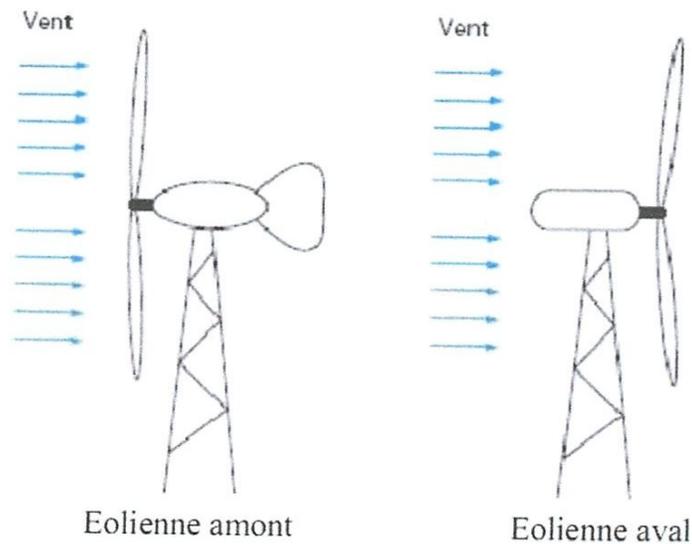


Figure 1.9 : configuration d'une éolienne à axe horizontal

I.7.1.3 Comparaison

Le tableau suivant résume les points forts et faibles de chaque type de turbine. Pour les applications à grande puissance les éoliennes à axe horizontal dominent le marché grâce à leur fort rendement et leur accès au vent fort. Par contre, les éoliennes à axe vertical sont plus appropriées pour les applications domestique en toit d'immeubles, vu que cela leurs donnent automatiquement accès au vent fort et qu'elles sont facilement accessible pour la maintenance[8].

Tab I.1 : Comparaison des éoliennes à axe vertical et à axe horizontal

Types de Turbines	Avantages	Inconvénients
Eolienne à axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface. • fonctionnement indépendante du sens du vent. • adéquat pour les toits d'immeuble. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement moins faible • Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques • Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent.
Eolienne à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Fort rendement de conversion d'énergie • Accès au vent plus fort • Régulation de la puissance décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle. • Des câbles plus long du haut la tour jusqu'au la terre • Systèmes d'orientation requis.

1.7.2 Classification des éoliennes selon leur vitesse

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- a) Eolienne à vitesse fixe.
- b) Eolienne à vitesse variable.

a) Eolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées dans cette technologie, ou la génératrice est directement couplée au réseau[9].

Elles tournent à une vitesse relativement constante, comme leur nom indique. Cette vitesse est déterminée par le rapport de multiplicateur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, si la vitesse du vent change sa valeur, l'efficacité du système dégrade. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergie qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable[8].

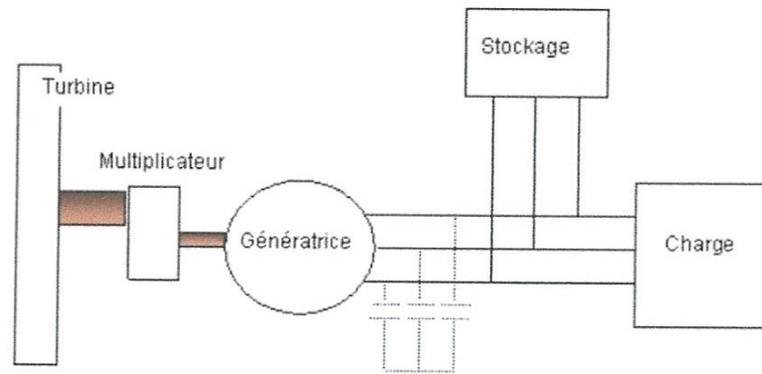


Figure I.10 : Schéma général en mode autonome pour une éolienne à vitesse fixe

Les éoliennes non raccordées au réseau, fonctionnent en mode autonome et alimentent des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appui. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt significatif en cas d'absence de groupes électrogènes, notamment en cas de vent faible.

Lorsque l'éolienne est connectée au réseau, la vitesse de rotation de la MAS doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme, principal critère pour un fonctionnement stable de la génératrice. La fréquence du réseau impose la vitesse de rotation de la machine[10].

b) Eolienne à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont souvent moins coûteuses car le dispositif d'orientation des pales est simplifié[11]. Elles peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance[8].

Le tableau I.2 présente une comparaison entre ces deux types de technologie.

Tab I.2 : Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable[8]

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> • Simple, robuste, fiable. • Faible coût de construction et maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de conversion • Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci • Fluctuation importante de la puissance.
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> • Fort rendement de conversion d'énergie. • Puissance électrique de meilleure qualité. • Stress mécanique réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs. • Contrôle du système plus compliqué.

I.7.3 Classification des éoliennes selon le type de génératrice

Il existe différents types de génératrices à courant alternatif, on les classe généralement en deux catégories, les génératrices synchrones et les génératrice asynchrones. Le tableau suivant montre les avantages et les inconvénients des différentes machines[12].

Tab I.3 : Différents types des machines

	Avantages	Inconvénients
Machine asynchrone (à cage)	<ul style="list-style-type: none"> • Faible coût • Machine robuste • Fiabilité • Machine standard 	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance extraite non optimisé • Maintenance de boîte de vitesse • Pas de contrôle de l'énergie réactive • Magnétisation de la machine imposée par le réseau
Machine asynchrone (MADA)	<ul style="list-style-type: none"> • Machine robuste • Fonctionnement a vitesse variable • Puissance extraite optimisée • Machine standard 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance de boîte de vitesse • Prix de l'électronique de puissance • Contrôle commande complexe • Contact glissant bagues balais
Machine synchrone (MSAP)	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement • Fonctionnement a vitesse variable. • Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé (à cause des aimants). • Prix de l'électronique de puissance. • Moins robuste.

I.8 La structure des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne compose d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice.

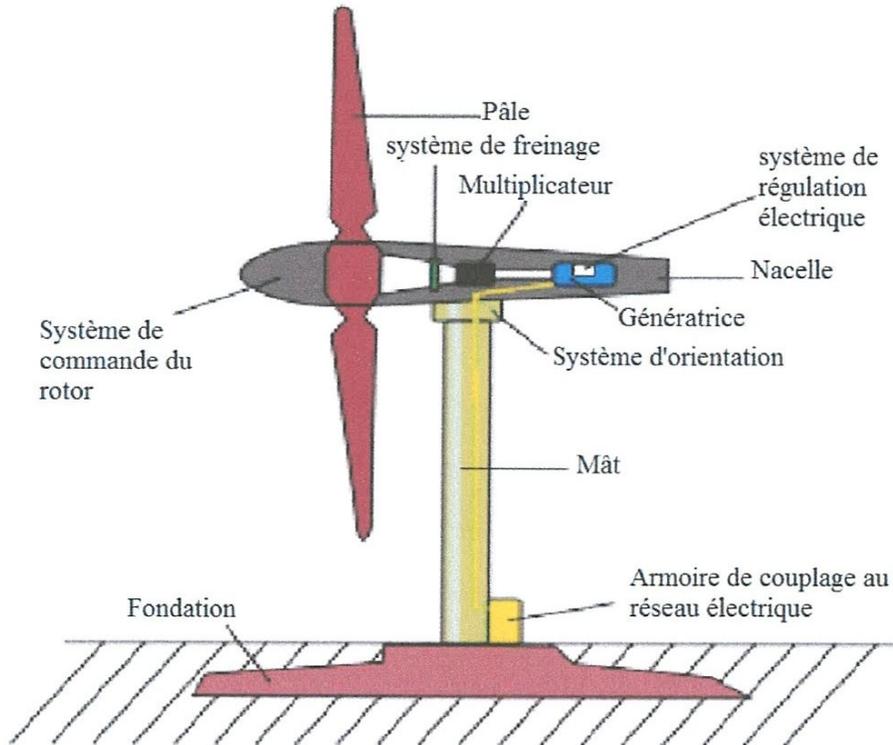


Figure I.11 Schéma d'ensemble d'une éolienne à axe horizontal

- **Le mât ou la tour :** Solidement implanté dans le sol, c'est un tube d'acier, placé le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent, et d'autre part pour éviter les perturbations près du sol.
- **Le rotor :** Composé du nez et de l'hélice, qu'on désigne souvent sous le nom de pâles de l'éolienne, construits avec des technologies dérivées de l'aéronautique. L'hélice possède en général trois pâles, plus rarement deux, Les pâles sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement est entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110mètres .[13]
- **La nacelle :** Située en haut du mât, elle regroupe les équipements mécaniques, permettant de produire l'électricité en couplant la génératrice électrique à l'arbre du rotor.

Les équipements abrités par la nacelle sont :

- **Multiplicateur** : il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne (arbre lent) à celle de la génératrice électrique (arbre rapide).
- **système de refroidissement** : il se compose en général d'un ventilateur électrique pour la génératrice et d'un refroidisseur à huile pour le multiplicateur.
- **Génératrice électrique** : c'est l'élément principal qui permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est en général une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné.
- **Système de commande** : assure le contrôle et le bon fonctionnement de l'éolienne. Grâce à ce système de supervision et de contrôle, l'éolienne peut être arrêtée automatiquement d'une manière très rapide en cas de nécessité. La sécurité de fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.
- **Système d'orientation des pâles** : il sert au réglage aérodynamique (régulation de puissance)[5].

I.9 La génératrice synchrone à aimants permanents et Le redresseur MLI

I.9.1 Générateur synchrones à aimants permanents

Après le développement large dans le domaine d'énergie éolienne, ils ont établi que les entraînements directs (sans multiplicateur de vitesse) sont l'avenir des systèmes éoliens, il se trouve que ces derniers sont basés sur des génératrices synchrones à aimants permanents.

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [14].

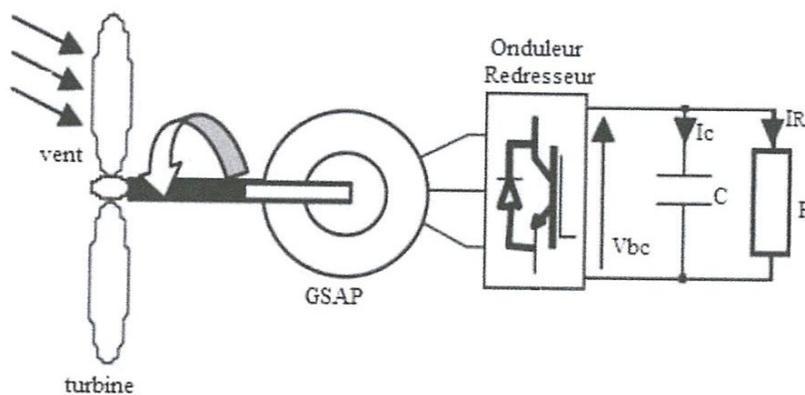


Figure I.12 : Système éolien utilisé la GSAP

I.9.2 Principe de fonctionnement d'une MSAP

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Les champs créés par les enroulements du stator interagissent avec les aimants du rotor et orientent ce dernier. La Figure I.13 montre deux types de rotor, un à aimants surfacique protégés par des pièces polaires et l'autre à aimants insérés [18].

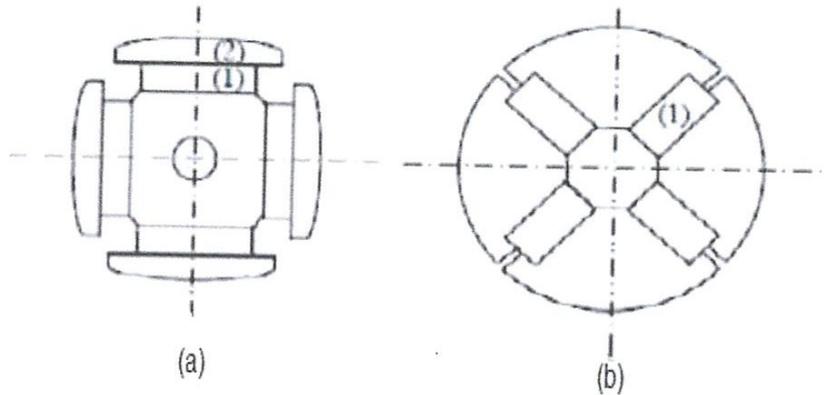


Figure I.13 : Deux types de rotor d'une MSAP

- (a) Aimants permanents protégés par des pièces polaires saillantes.
- (b) Aimants permanents noyés.

I.9.3 Le redresseur à MLI :

Le principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI est le même qu'un hacheur élévateur. Donc sa tension de sortie est toujours supérieure à sa tension d'entrée pour cela il faut régler cette tension de sortie [19].

Dans le cas du montage de la figure I.14, on voit la présence d'un redresseur MLI entre la génératrice et le condensateur de filtrage. Ce redresseur permet de contrôler le flux de l'énergie générée par l'éolienne, ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Donc on peut assurer un fonctionnement à puissance maximale (MPPT) de l'éolienne quel que soit la vitesse du vent. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position [18].

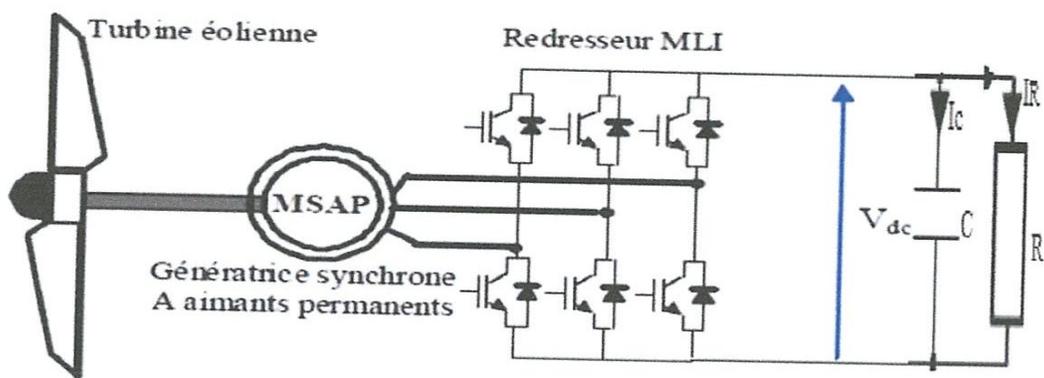


Figure I.14 : MSAP connecté à redresseur à MLI

CHAPITRE

II

II.1. Introduction

Une éolienne a le rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments 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.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini.

Et on va voir une des méthodes de commande connu pour la régulation de vitesse est la maximisation de la puissance.

II.2. Modèle du vent

Le vent représente la source de l'énergie électrique produite par l'éolienne. Tout en étant l'entrée et la raison d'être du système éolien, il est également la perturbation principale. Le vent est une grandeur stochastique même si certaines de ces caractéristiques sont déterministes. On ne peut pas le représenter par des expressions exclusivement déterministes. Ce sont avant tout les paramètres statiques qui le définissent. La vitesse du vent en un point peut être décomposée en deux composantes : une moyenne variant lentement et l'autre avec des fluctuations tel que :

$$V(t) = V_0 + V_t(t) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

V_0 : Valeur moyenne de la composante lente.

$V_t(t)$: Fluctuations provoquées par les turbulences [5].

L'énergie cinétique d'une quantité de vent de masse m et de vitesse V est donnée par la relation suivante :

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

La puissance de ce vent ambulant est la qualité d'énergie par seconde exprimé en watt :

$$P = \frac{1}{2} \frac{m}{s} V^2 \quad (\text{II.3})$$

La grandeur (m/s) , peut être ré-exprimer comme le produit de la densité de l'air ρ , la surface balayé par le vent A , et la vitesse du vent V . Alors $A \cdot V$ représente le volume du vent

parcouru par seconde et $\rho \cdot A \cdot V$ représente la masse du vent qui traverse la surface A par unité de seconde.

Ainsi on peut réécrire l'expression de la puissance P du vent de la manière suivante :

$$P = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

P : La puissance mécanique du vent ambulant (watts),

ρ : La densité de l'air (kg/m^3),

A : L'aire balayé par le vent (m^2),

V : Vitesse du vent (m/sec).

On peut citer que la comparaison entre deux sites potentiels se fait en terme de la puissance en watt par mètre carré balayé par les pales de la turbine éolienne. La puissance potentielle d'un site est donnée par l'expression suivante :

$$P_p = \frac{1}{2}\rho V^3 \quad (\text{II.5})$$

La puissance mécanique du vent est donc proportionnel à la densité de l'air qui balayée par les pales de la turbine et aussi proportionnel au cube de la vitesse de vent en amont de la turbine. Il est à noter que cette puissance ne peut pas être entièrement extraite à l'aide des pales, parce que il y a une puissance mécanique résiduelle dans le vent en aval de la turbine qui continue à circuler mais à une vitesse inférieure [8].

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, le modèle du vent alors est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une représentation de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation suivante :

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- Développé et affiner la modélisation du rotor.
- Evaluer le potentiel d'énergie [4].

II.3 Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

II.3.1 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, (figure II.1)

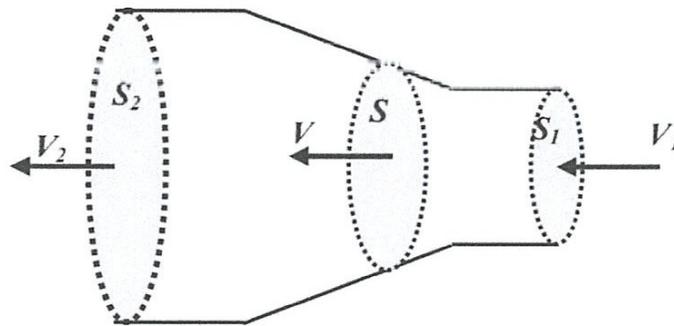


Figure II.1 : Tube de courant à travers une éolienne

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

ρ : la masse volumique de l'air (1.225 kg/m^3 à la pression atmosphérique).

S : la surface balayée par les pales de la turbine [m^2]

V : la vitesse du vent [m/s]

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 (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.8})$$

Soit en remplaçant m par son expression (équation I.1) :

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

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance théorique P_{mt} correspondante serait alors

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.10})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(\left(1 + \frac{V_1}{V_2} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \right)}{2} = C_p \quad (\text{II.11})$$

La figure suivante représente l'évolution du ratio P_m/P_{mt} en fonction de $\frac{V_1}{V_2}$. Le ratio s'appelle aussi coefficient de puissance C_p qui a un maxima de $16/27$ soit 0.59.

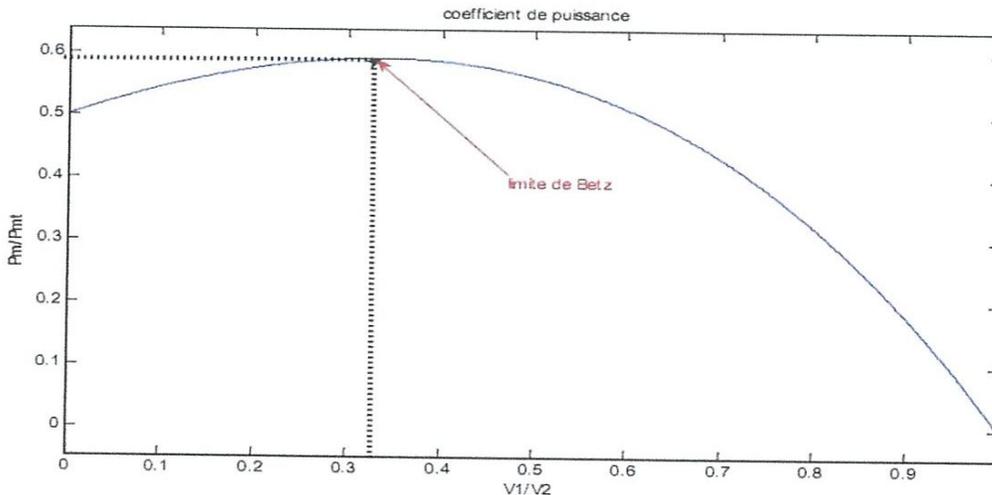


Figure II.2 : Limite de Betz

Cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, elle n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale se situent à 60-65% de cette limite, on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. [6], [14].

II.3.2 Production d'énergie mécanique

L'exploitation des éoliennes est généralement régie par quatre phases importantes qui dépendent essentiellement de la vitesse du vent.

La figure II.3 représente ces quatre phases [9].

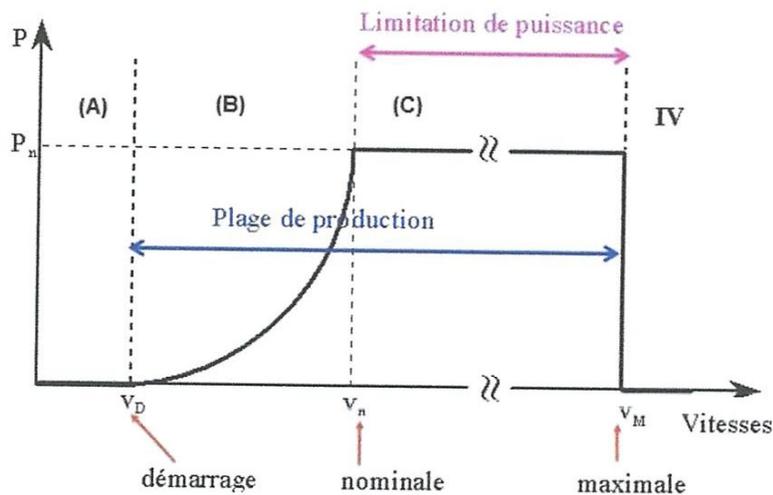


Figure II.3 : Courbe de la puissance d'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Après une partie (A) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage V_v^{min} , une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (MPPT) celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (B). Quand la puissance nominale P_n est atteinte, elle doit être limitée (C). Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent, la turbine doit être arrêtée [9].

Il existe quatre méthodes principales pour limiter la puissance dans le cas de forts vents.

- La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable «pitch control» : elle est utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à forte puissance (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales lorsque la vitesse du vent dépasse la limite correspondant à la puissance nominale.

- La seconde technique est passive «stall control». Utilise des formes de pales spéciales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort vent. Il existe aussi des combinaisons de ces deux technologies.
- La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (une rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.
- La dernière méthode qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion à base de d'électronique de puissance pilotée pour gérer le transfert d'énergie électrique. Le plus souvent, dans les turbines classiques à axe horizontal, le dispositif de réglage à fréquence variable est associé à un réglage mécanique (pitch ou stall)[9].

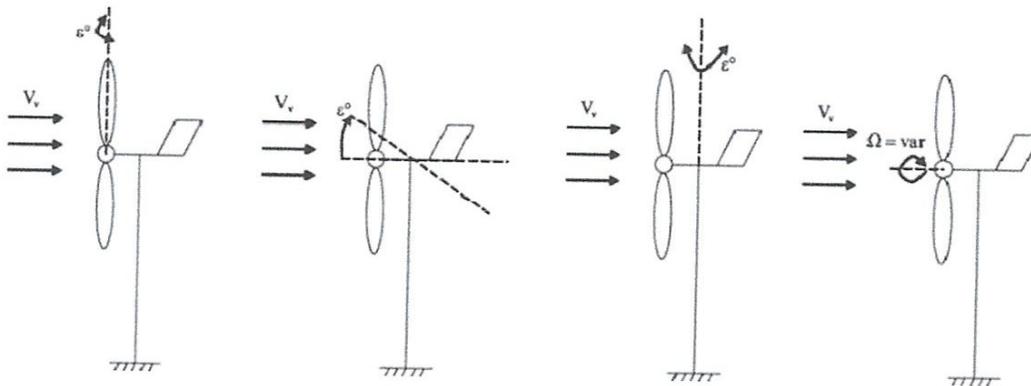


Figure II.4 : Orientation de la nacelle en vue de la limitation de puissance

II.3.3 Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne

L'expression du couple éolien donne le couple moyen présent sur l'arbre de la turbine correspondant au vent équivalent moyen. Il faut, pour mieux décrire le comportement, prendre en compte l'existence des couples pulsatives, qui entraîneront des fluctuations de puissance, et qui sont générés par les irrégularités déterministes du champ de vitesses [15].

Ces phénomènes sont dus en particulier à l'effet de cisaillement, l'effet du passage d'une pale devant la tour (effet d'ombre), sans oublier d'ajouter également les effets des imperfections de construction (asymétrie). Ces différentes contraintes peuvent être classées selon leur effet temporel sur le rotor et selon le caractère dynamique de la conversion.

- ✓ Les contraintes liées à l'effet temporel :

- a) Les charges stationnaires, indépendantes du temps, lorsque le rotor tourne à une vitesse fixe : vitesse du vent constante, forces centrifuges.
 - b) Les charges stationnaires dans le temps, mais pas dans l'espace, qui provoquent des contraintes cycliques sur le rotor telles que l'augmentation du vent avec la hauteur et l'interférence entre la tour et l'écoulement du vent.
 - c) Les forces de gravité dues au poids des pales qui entraînent aussi des fluctuations périodiques.
 - d) Les contraintes non périodiques et stochastiques dues aux turbulences du vent.
- ✓ Les contraintes liées au caractère dynamique de la conversion :
- a) Effet d'ombre ou effet de tour : L'effet de tour est produit du fait de la résistance de la turbine à l'écoulement du vent, perturbe en amont et en aval. Loin de l'influence de la tour, la vitesse de vent est supposée constante alors qu'elle augmente à l'approche de la tour et diminue ensuite.
 - b) Phénomène de cisaillement : Le phénomène de cisaillement du vent produit également des oscillations de couple provoquées par le gradient de vitesse du vent le long du secteur balayé par les pales [15].

II.4 Modélisation de la turbine

L'éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique. Une voilure 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 [8].

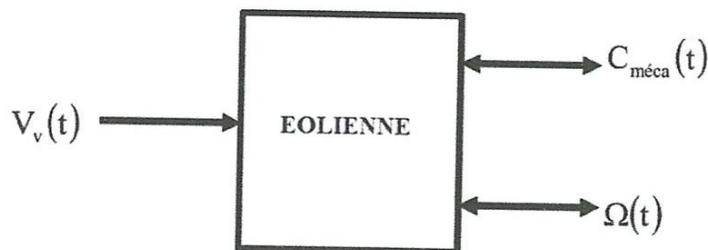


Figure II.5 : transfert de l'énergie cinétique en énergie mécanique

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\beta, \lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (II.12)$$

Avec :

$$C_p(\beta, \lambda) = \frac{P_m}{P_v} \quad (II.13)$$

$C_p(\beta, \lambda)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ appelé TSR (Tip Speed Ratio), qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β .

Le ratio λ peut être exprimé par la relation suivante qui est précédemment donnée par [16]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (II.14)$$

Avec :

C_p : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique λ

λ : Vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent $\lambda = R\Omega/V$.

ρ : La densité du vent en $[Kg/m^3]$.

S : La surface balayé par les pales de l'éolienne $[m^2]$.

Ω_t : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne $[rad/s]$.

V : Vitesse du vent $[m/s]$.

R : Rayon d'une pale de la turbine $[m]$.

A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 5 MW est approximé par l'équation.

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.7 \left(\frac{151}{A_i} - 0.58 \beta - 0.02 \beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{-18.4}{A_i}} \quad (II.15)$$

$$\text{Avec : } A_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 - 1}}$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.6), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche. On constate que pour chaque vitesse du vent il y a une vitesse de la turbine qui donne un C_p max.

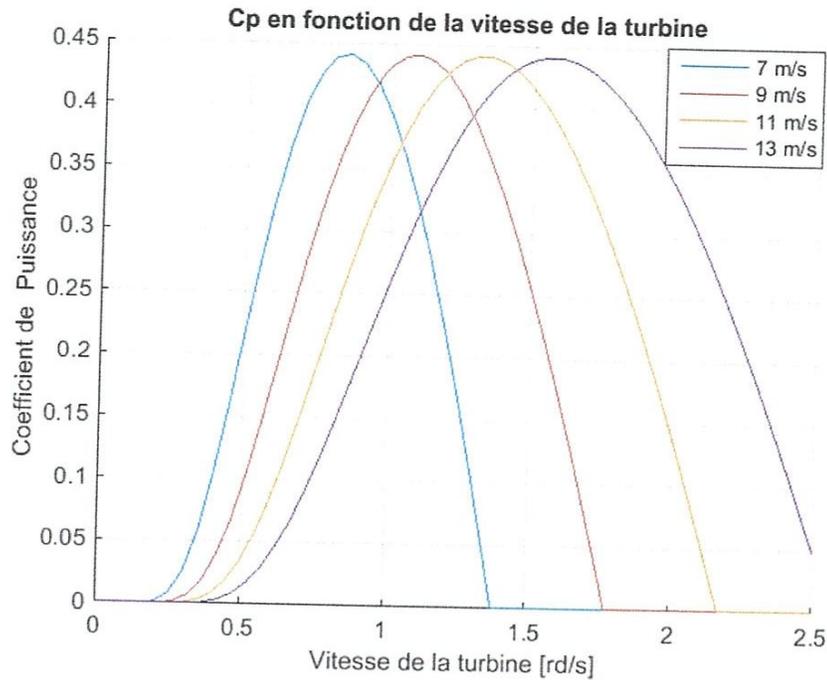


Figure II.6. Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse de la turbine

L'expression du couple est déduite de la puissance mécanique par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3}{\Omega} \quad (II.16)$$

Le couple mécanique vu par la machine synchrone est différent du couple éolien car il faut tenir compte de l'inertie de l'éolienne et des frottements visqueux propre à la structure de l'éolienne. Ceci peut être traduit en terme mathématiques par l'équation suivante :

$$C_{eol} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_{mec} \quad (II.17)$$

Avec J et f respectivement l'inertie de l'éolienne et le frottement de l'éolienne.

A partir des équations II.16 et II.17, nous pouvons représenter le modèle dynamique de l'éolienne avec le schéma suivant :

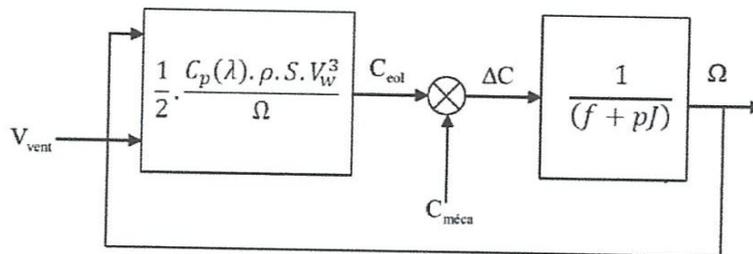


Figure II.7 : Model dynamique de l'éolienne

II.5 Modélisation de la Génératrice synchrone à aimants permanents

Pour l'obtention de modèle mathématique de la machine dédié pour la commande et la simulation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), nous utilisons la méthode basée sur les circuits électriques qui permet de modéliser les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la MSAP.

Le rotor de ces machines peut être à pôles lisse ou à pôles saillants comme dans la figure II.8, puisque l'entrefer est plus faible sur l'axe direct de la machine, alors l'inductance directe L_d dans la machine à pôles saillant est plus grande que celle de l'axe indirect (quadratique) L_q [17].

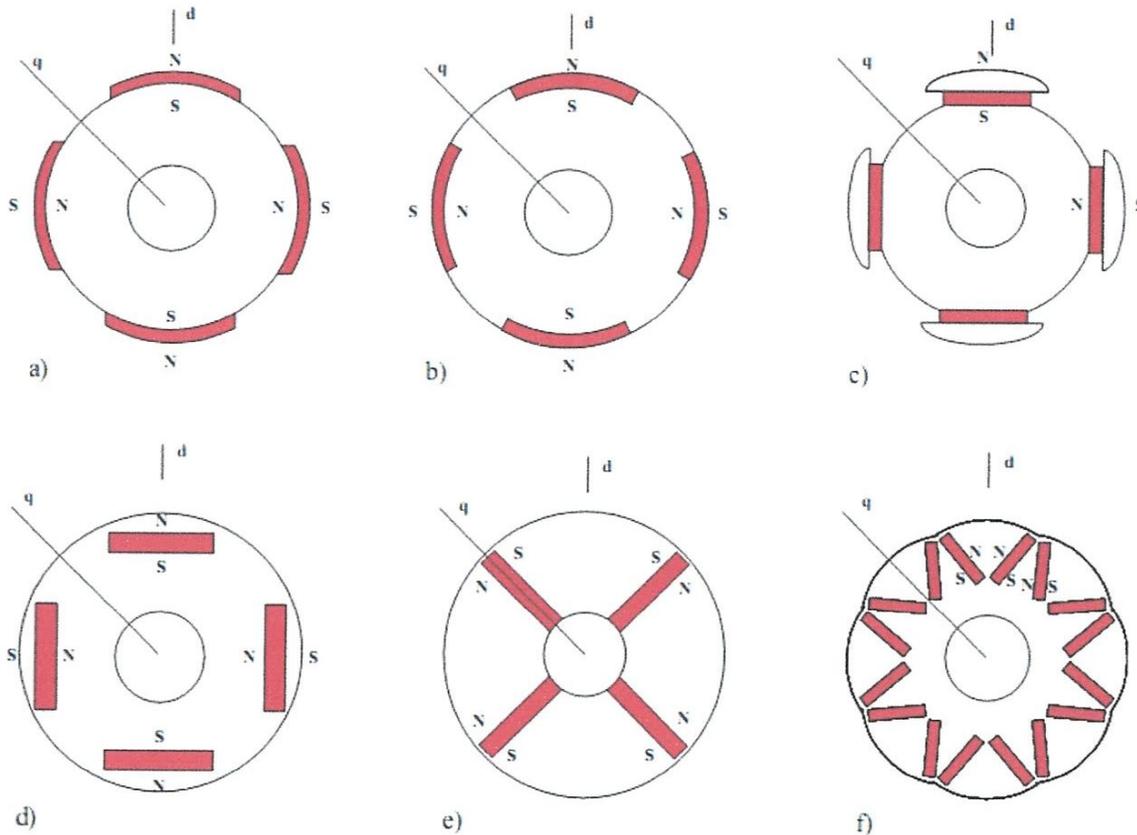


Figure II.8 : Différentes formes du rotor de la MSAP

Avant d'établir le modèle mathématique nous devons nous imposer quelques hypothèses :

- les f.e.m sont à répartition sinusoïdale,
- La distribution sinusoïdale de la f.m.m créée par les enroulements du stator.
- le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé,

- l'effet de la température sur les résistances est négligeable, donc, les résistances des enroulements ne varient pas avec la température
- l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables,
- l'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable,
- l'entrefer est d'épaisseur uniforme.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor et ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air [17], [6].

II.5.1 Mise en équation de la GSAP

II.5.1.1 Equation électriques

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$[v_a \ v_b \ v_c]^t$: Vecteur tension des phases statoriques.

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

$[\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : La résistance des phases statorique.

On considère que la connexion entre les enroulements du stator de la machine synchrone est en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulles, il n'y a pas de courant homopolaire [6].

II.5.1.1.1 Passage au repère de Park

Pour la simplification de modèle dynamique de la machine, on applique d'abord un changement de repère. Après cette transformation théorique, il devient deux bobines statorique fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ au lieu de trois bobines statorique fixes déphasées de $2\pi/3$ et situées sur le rotor.

On utilise la transformé de Park-Clarke ou Park-Concordia. La transformée de Park-Clarke assure la conservation des amplitudes des grandeurs en introduisant le coefficient $2/3$,

mais pas des puissances électriques, à la différence de la transformée de Park-Concordia qui conserve la puissance et utilise le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$.

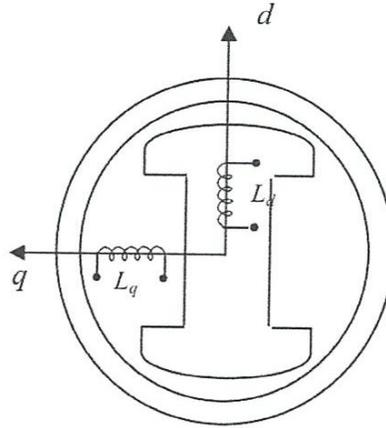


Figure II.9 : Représentation de la MSAP dans le repère (d,q) de Park

Les deux bobines d et 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 de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [6].

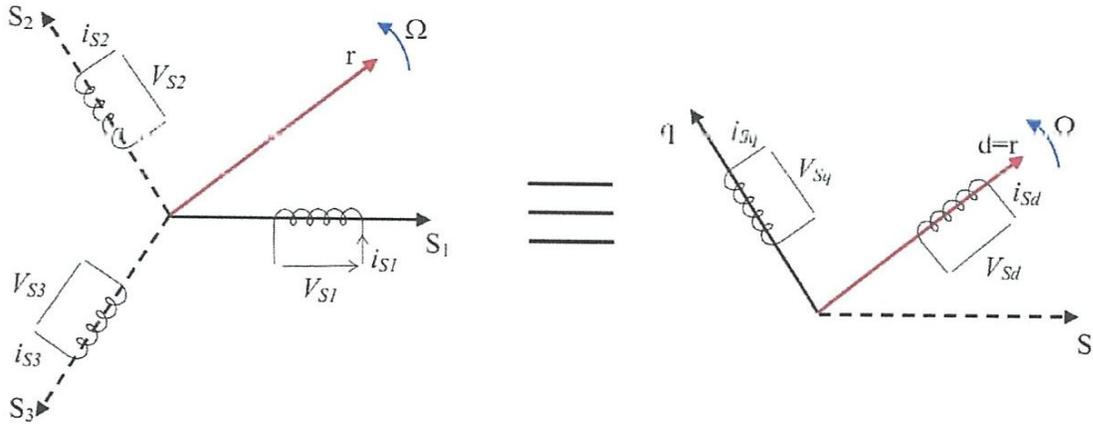


Figure II.10 : Passage de repère naturel du stator au repère (d,q) de Park

La transformation de Park basée sur l'égalité des amplitudes est définie par (II.19) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec θ de rotation du repère (d,q).

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (II.18), on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

v_d, v_q, i_d et i_q sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant.

Ψ_d et Ψ_q sont les composantes directe et en quadrature du flux.

II.5.1.2 Equations magnétiques

L'application aussi de la transformation de Park sur les flux triphasés du stator, donne des expressions simplifiées des flux des deux axes d et q :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

L_d et L_q sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ . Ψ_f Représente le flux des aimants. En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (II.20), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p\Psi_f\Omega \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Où $\omega = p\Omega$, p étant le nombre de paires de pôles et Ω la vitesse angulaire du rotor. e_d et e_q sont les composantes directe et en quadrature de f.e.m. données par :

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

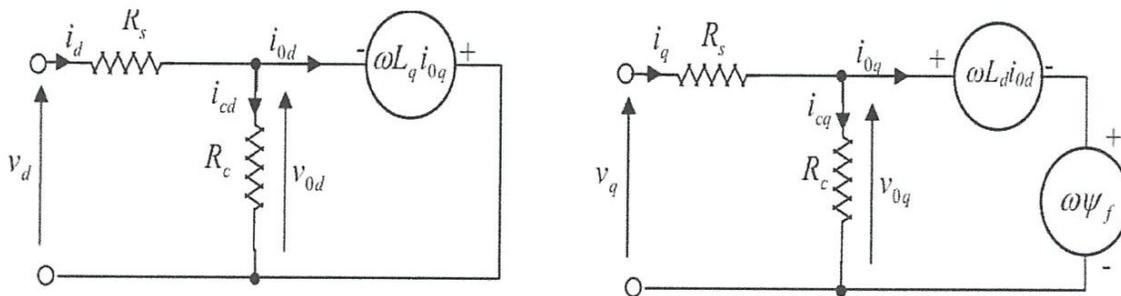


Figure II.11 : Circuit équivalent de MSAP –convention moteur-

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park (figure 3-11), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [6] :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \Psi_f \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

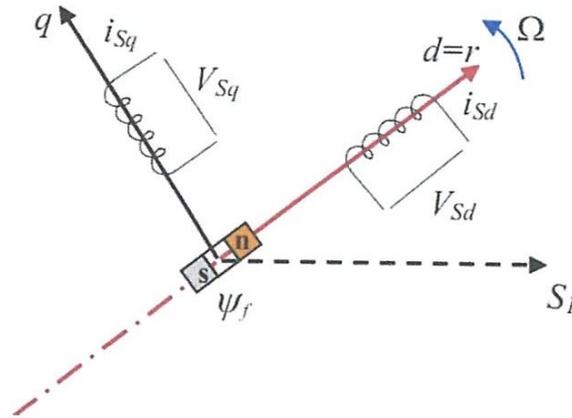


Figure II.12 : Modèle de Park pour la GSAP

II.5.1.3 Expression du couple électromagnétique

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par [6] :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2) \left(i_d \frac{d\Psi_d}{dt} + i_q \frac{d\Psi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)] \quad (\text{II.25})$$

$\frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \right]$: Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que : $p\Omega = \omega$ et $P_e = C_{em} \cdot \Omega$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (II.26)$$

II.5.1.3 Equations mécaniques

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante [6] :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.27)$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

Ωf : Le couple de frottement.

J : Moment d'inertie totale de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.6 Modélisation du redresseur à commande MLI

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

Le schéma représentatif d'une association GSAP-machine peut être donné par la figure (II.13).

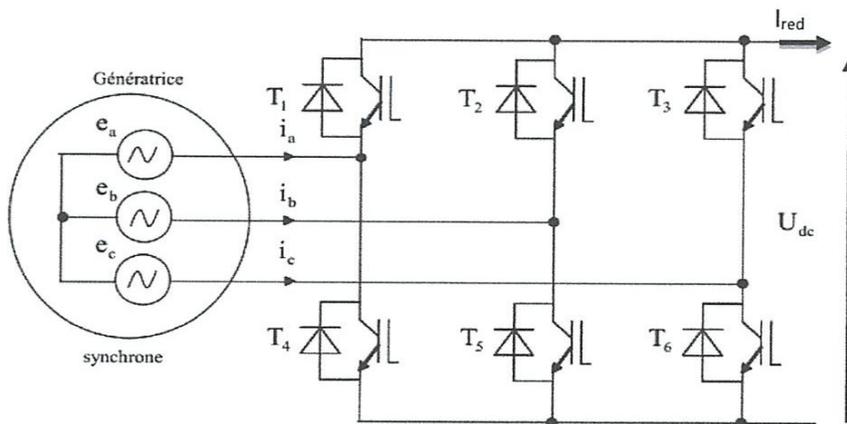


Figure II.13 : structure du redresseur à commande MLI relié à la GSAP

Les transistors (généralement des IGBTs) et les diodes constituant le pont sont supposés idéaux. Les commutations sont supposés instantanées et les pertes par conductions et par commutation sont négligées. L'état des interrupteurs peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j = a, b, c$) telles que [16] :

$$\begin{aligned} S_j &= 1 \text{ si l'interrupteur du haut est fermé et celui d'en bas est ouvert.} \\ S_j &= 0 \text{ si l'interrupteur du haut est ouvert et celui d'en bas est fermé.} \end{aligned}$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ U_{ac} = (S_a - S_c)U_{dc} \\ U_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Les tensions et les courant sont supposés équilibrés, donc :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{II.29})$$

La combinaison entre les équations précédentes (II.28) et (II.29), donne les tensions simples (par rapport au neutre de la source) à l'entrée du redresseur en fonction des signaux de commande PWM :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

De même, on peut exprimer le courant de sortie I_{red} en fonction des courants d'entrée par la relation suivante :

$$I_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

II.7 Modélisation du filtre et de la charge de la partie continue

Ce bloc est composé d'une capacité C en parallèle avec une charge qui peut être de différentes natures, (figure II.14). [16]

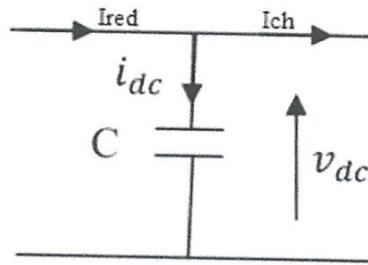


Figure II.14 : bus continu.

La tension V_{dc} aux bornes de la charge est donnée à partir de la loi des nœuds par l'équation suivante :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{I_{red} - I_{cH}}{C} \quad (\text{II.32})$$

Le courant absorbé par la charge I_{ch} , dépend de la nature de celle-ci.

- à vide :

$$I_{cH} = 0 \quad (\text{II.33})$$

- Pour une charge résistive R_{ch} :

$$I_{cH} = \frac{v_{dc}}{R_{cH}} \quad (\text{II.34})$$

- Pour une charge résistive inductive (L_{ch}, R_{ch}) :

$$\frac{dI_{cH}}{dt} = \frac{v_{dc} - R_{cH}I_{cH}}{L_{cH}} \quad (\text{II.35})$$

- Pour une charge active (L_{ch}, R_{ch}, E) :

$$\frac{dI_{cH}}{dt} = \frac{v_{dc} - R_{cH}I_{cH} - E}{L_{cH}} \quad (\text{II.37})$$

CHAPITRE

III

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement quelques notions sur la commande MPPT, indispensable pour la gestion des chaînes de conversion éolienne de grande et moyenne puissance. Ensuite, une technique de commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » sera développée et validée par simulation pour contrôler une chaîne de conversion directe d'une grande éolienne isolée de 5MW composé d'un générateur de type MSAP, un redresseur à commande MLI et un grand condensateur relié à une charge R-L.

III.2 La chaîne de conversion éolienne

La chaîne de conversion qui nous allons utiliser est présentée dans la figure (III.1)

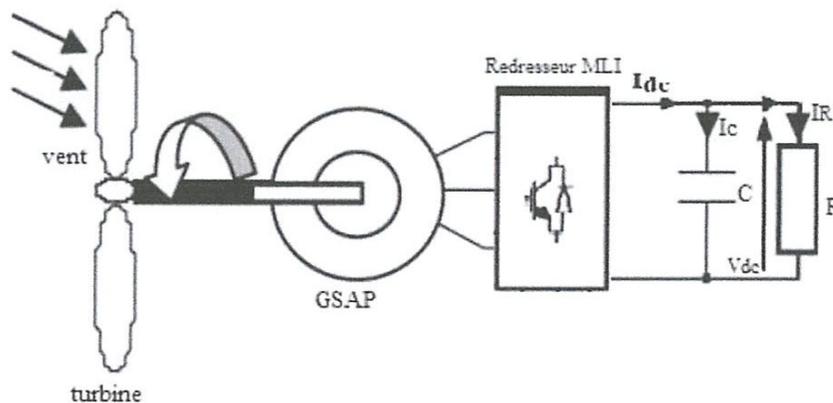


Figure III.1 : chaîne de conversion étudiée

La figure présente une éolienne à axe verticale avec trois pales, connectée à une génératrice synchrone à aimants permanents sans multiplicateur de vitesse, ensuite un redresseur MLI qui est branché à un filtre et une charge R.

Les principaux paramètres des éléments considérés du système étudié sont :

Tab III.1 : Paramètres de la turbine éolienne

Nom	Valeur	Symbole
Masse volumique de l'air	$1,225 \text{ kg/m}^3$	ρ
Rayon de la pale	60 m	R
Surface balayée par les pales	$\pi \cdot R^2 \text{ m}^2$	S
Inertie de la turbine	$25 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^2$	J_t
Coefficient de frottement de la turbine	0.0004	F_t

Tab III.2 : Paramètres de la GSAP

Nom	Valeur	Symbole
Résistance du stator	0.05Ω	R_s
Inductance de l'axe q	0.0075 H	L_q
Inductance de l'axe d	0.0075 H	L_d
Inertie de la GSAP	$5.2 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^2$	J_g
Coefficient de frottement de la GSAP	0.002	F_g
Nombre de pair de pôles	60	P
Flux d'aimant permanent	28.6 Wb	Φ

La figure suivante représente la simulation de la turbine éolienne AREVA 5000 :

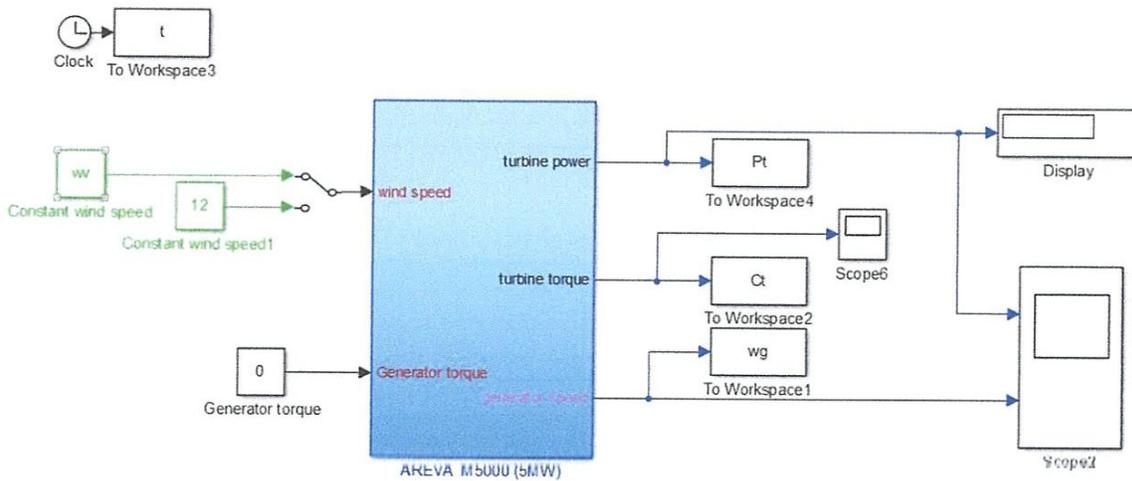


Figure III.2 : Simulation de la turbine

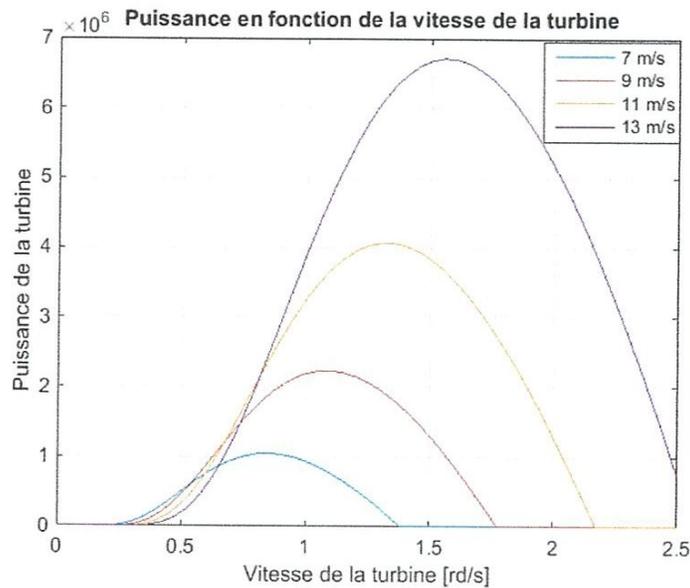


Figure III.3 : Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation et du vent

Dans cette simulation, nous avons supposé que la vitesse du vent est constante et le couple de la génératrice est égal à zéro.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques en forme de cloche (figure III.3), définit une courbe dite de puissance optimale qui dépend de la vitesse du vent et celle de rotation de l'éolienne. Donc pour chaque vitesse du vent il y a une vitesse de rotation optimale.

III.3 La commande MPPT

Un fonctionnement idéal du système éolien dans la région nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) doit être utilisée. Les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définit par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho S C_p^{opt}(\beta, \lambda_{opt}) v_v^3 \quad (III.1)$$

Il y-a deux grandes stratégies de la commande MPPT :

- Des stratégies nécessitant la connaissance préalable de la caractéristique $C_p(\lambda)$ de l'éolienne.
- Des stratégies ne nécessitant pas la connaissance de cette courbe caractéristique [8].

III.3.1 Stratégie MPPT avec connaissance de courbe caractéristique :

Ces stratégies de commande, souvent intitulées contrôle basé sur la relation optimale, ORB (Optimum Relationship-Based Control), se servent de la caractéristique de l'éolienne afin de déterminer la vitesse spécifique optimale qui permettra de dresser la relation optimale entre puissance maximale et vitesse de rotation du rotor optimale. Et ce pour retrouver rapidement la consigne à appliquer au régulateur pour traquer en permanence et efficacement la puissance maximale.

On peut commander l'éolienne avec cette stratégie en utilisant une des quatre commandes suivantes :

- ✓ Commande en vitesse, c'est de trouver la vitesse optimale qui nous permet de traquer le point de fonctionnement optimale correspondant à la puissance maximale.

- ✓ Commande en couple, La commande en couple est parfaitement stable et sans à-coups, les deux stratégies sont presque équivalentes avec un léger avantage de la commande en couple.
- ✓ Commande indirecte par le pilotage du courant.

a) Présentation de MPPT avec asservissement de vitesse

La figure (III.4), montre le schéma bloc utilisé pour simuler la commande MPPT avec asservissement de vitesse qui utilise la méthode de connaissance de la fonction C_p .

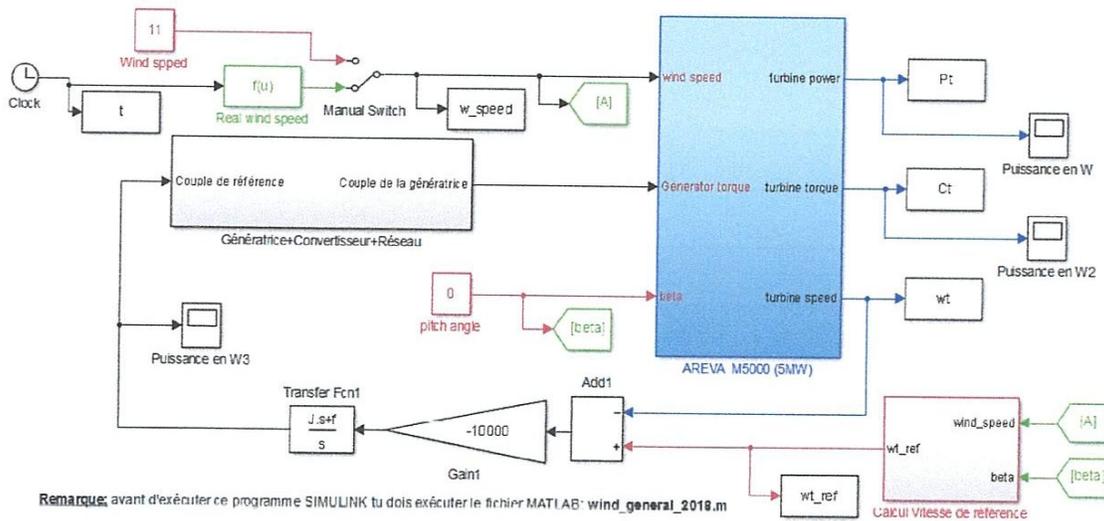


Figure III.4 : Schéma block représente la commande MPPT de l'éolienne M5000

La figure suivante (III.4) montre le contenu de block de commande MPPT de l'éolienne. Dans cette simulation nous avons supposé que la MSAP est idéale.

Le bloc qui calcul la vitesse de référence pour assurer un fonctionnement à puissance maximale (MPPT) est donnée par la figure III.5.

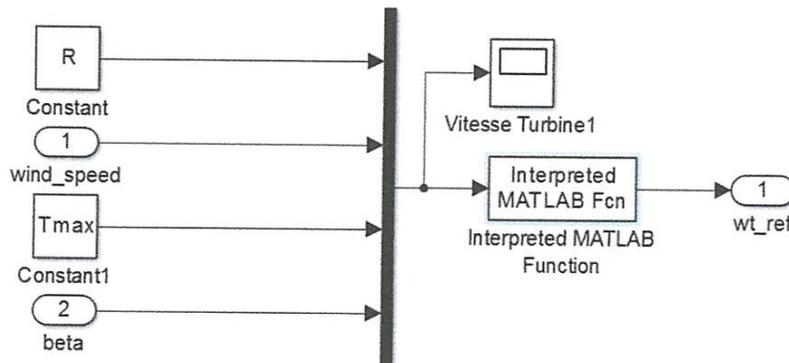


Figure III.5 : Méthode MPPT avec connaissance de la fonction C_p

Le bloc bleu dans la figure (III.4) représente la turbine, il calcule la puissance, le couple et la vitesse de la turbine. Les entrées sont la vitesse du vent et le couple électromagnétique développé par la GSAP et Beta l'angle de calage des pales, (dans cette figure le couple électromagnétique de génératrice est supposé égale au couple de référence « MSAP idéale »). Le contenu de ce bloc est donné par la figure (III.5).

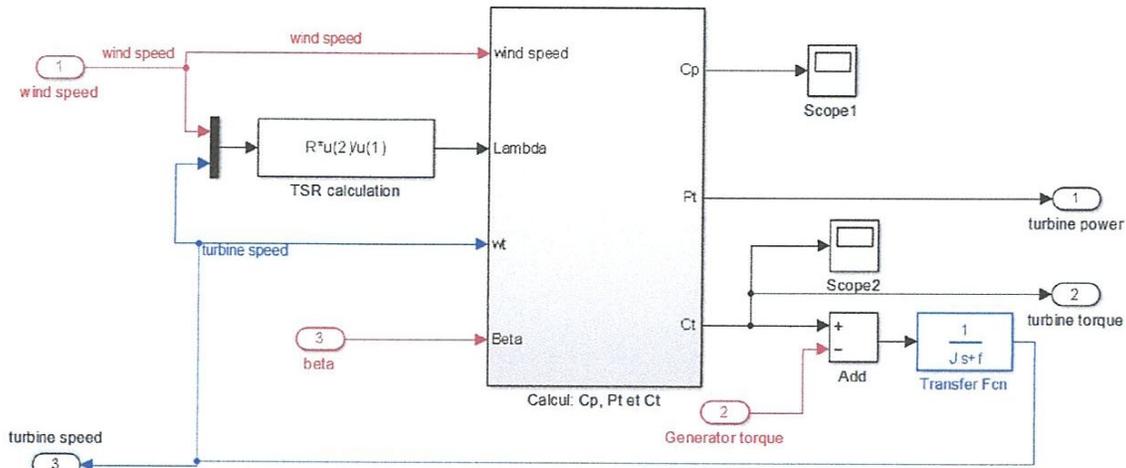


Figure III.6 : schéma bloc de la turbine et de la partie mécanique

Le bloc qui calcule la puissance de la turbine est représenté dans la figure (III.5).

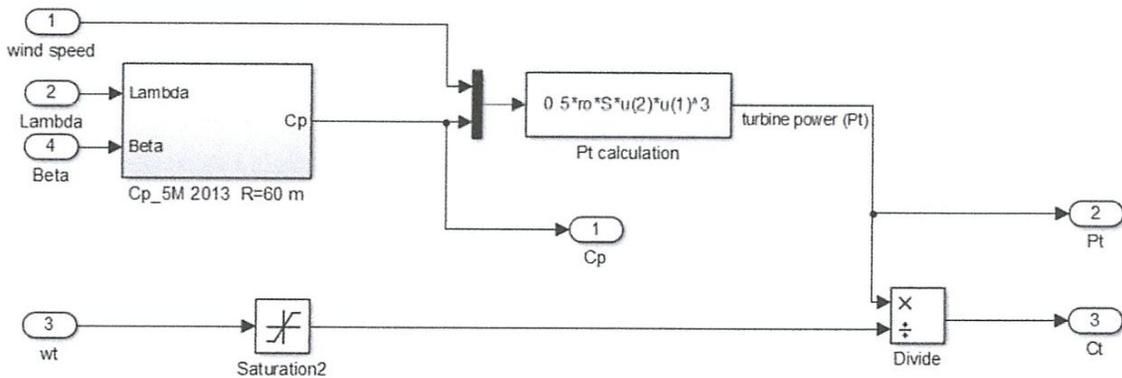


Figure III.7 : Calcul de la puissance et le couple de la turbine

Le fonctionnement de cette technique MPPT est le suivant :

- On compare la vitesse de la turbine à la vitesse de référence qui correspond au coefficient de puissance optimal (donc puissance optimale),
- La sortie du régulateur, qui se trouve après le comparateur des vitesses, constitue le couple de référence que doit développer la GSAP pour régler la vitesse à sa référence [16].

b) Résultat de simulation

La vitesse du vent varié est donnée avec le modèle mathématique suivant :

$$V_v = 10 + 0,2. \sin(0,1047t) + 2. \sin(0.2665t) + \sin(1.293t) + 0,2. \sin(3,6645t) \quad (III.2)$$

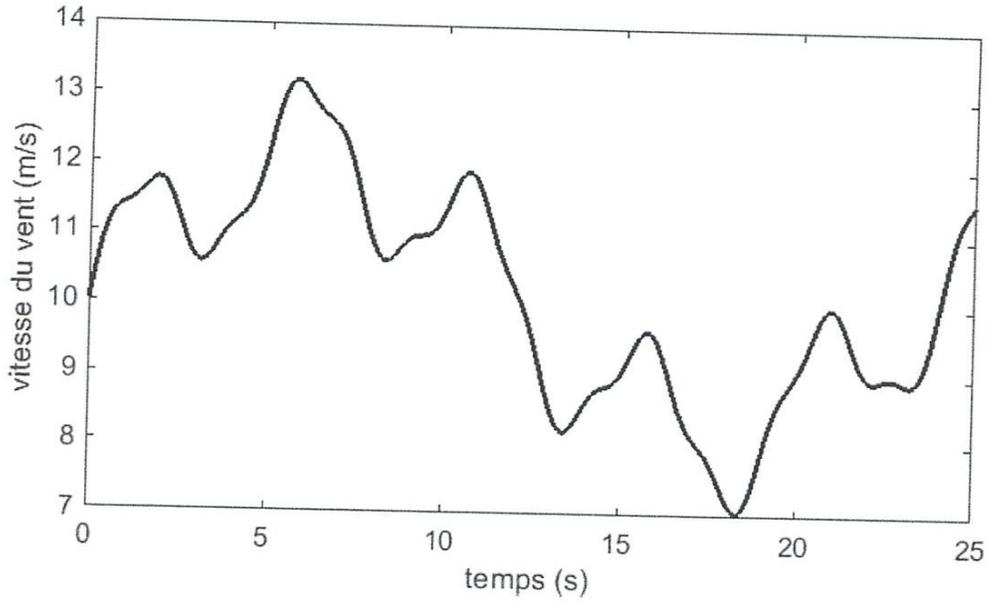


Figure III.8 : Courbe représente l'évolution de vitesse du vent

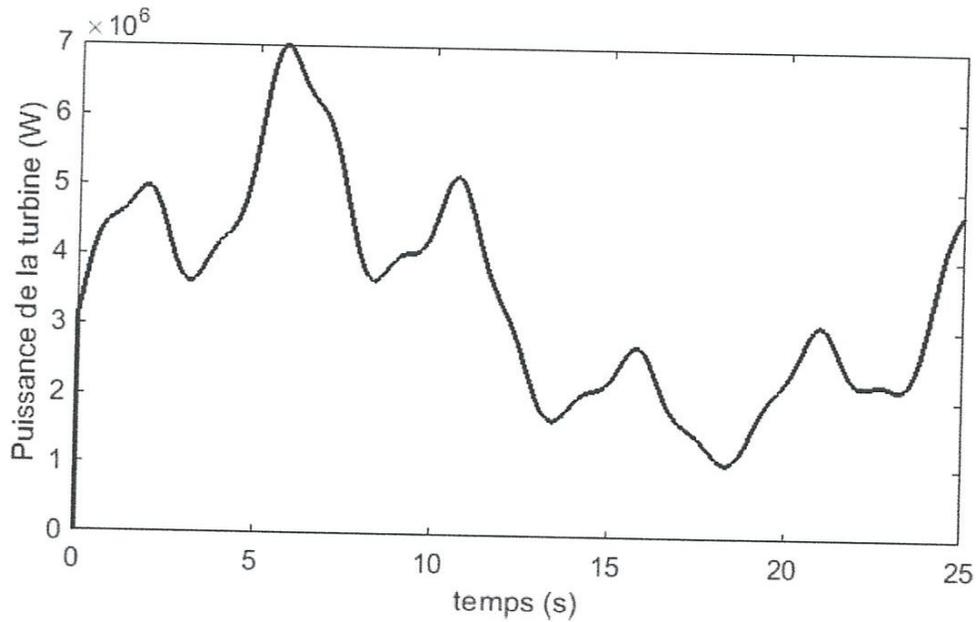


Figure III.9 :L'évolution de la puissance de turbine

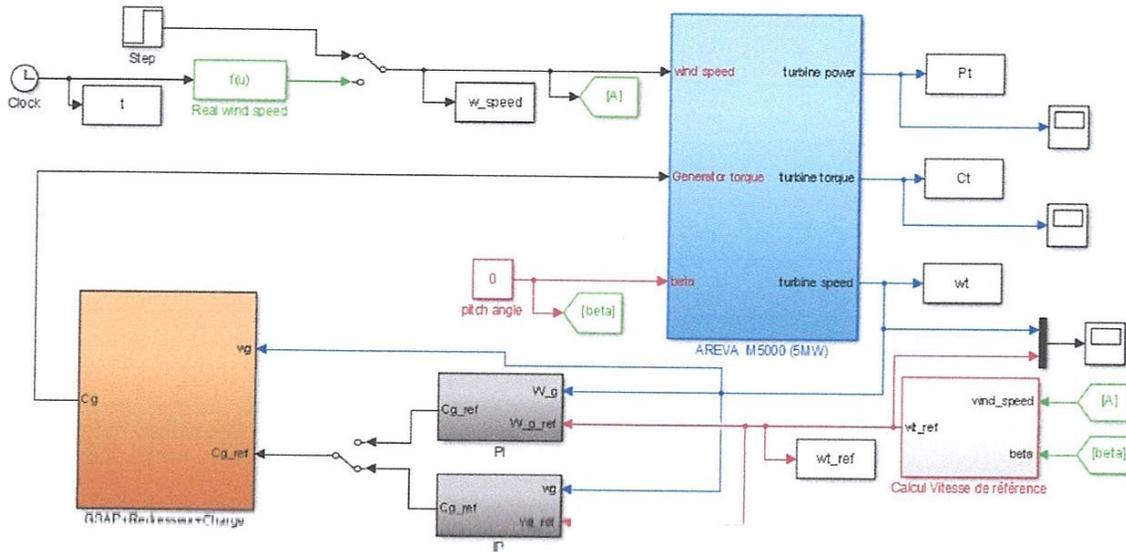


Figure III.13 : structure contrôle de la GSAP dans SIMULINK

La figure III.13, montre le schéma bloc réalisé sous MATLAB/SIMULINK pour faire la simulation de l'ensemble Eolienne+MSAP+Redresseur(MLI)+Filtre+Charge avec la commande MPPT.

Sur la figure III.14, on voit une comparaison entre la vitesse de référence générée par le bloc MPPT et la vitesse de la génératrice (turbine). Les deux vitesses sont en parfaite concordance sauf un petit pic au régime transitoire qui peut être éliminé avec un bon choix du correcteur.

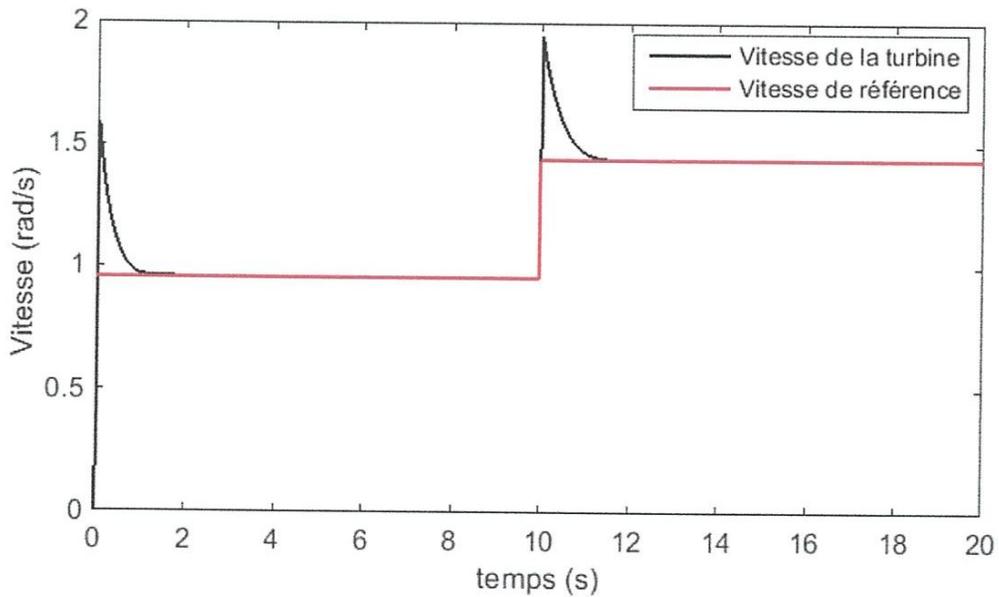


Figure III.14 : Comparaison entre la vitesse de la MSAP et celle de référence

La figure III.15, montre une comparaison entre le couple de référence généré par le correcteur IP de la vitesse et le couple développé par la génératrice. Les deux couple sont très proche ce qui montre l'efficacité du correcteur IP.

La figure III.15, montre que l'éolienne donne la puissance maximale pour les deux vitesses du vent (5 MW pour 12 m/s et 1.5 MW pou 8m/s).

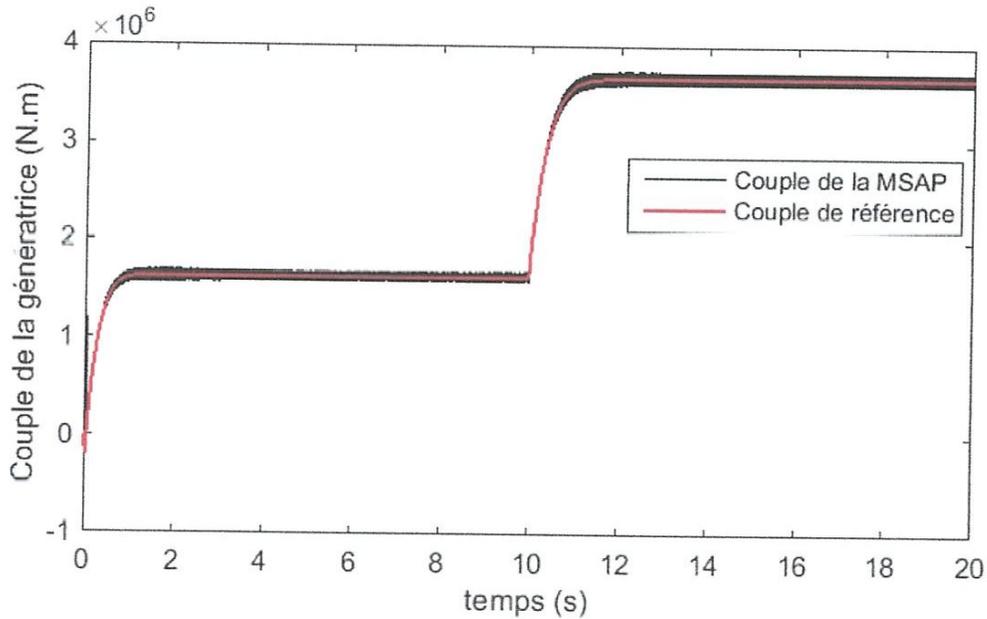


Figure III.15 : Comparaison entre le couple de référence et celui de la MSAP

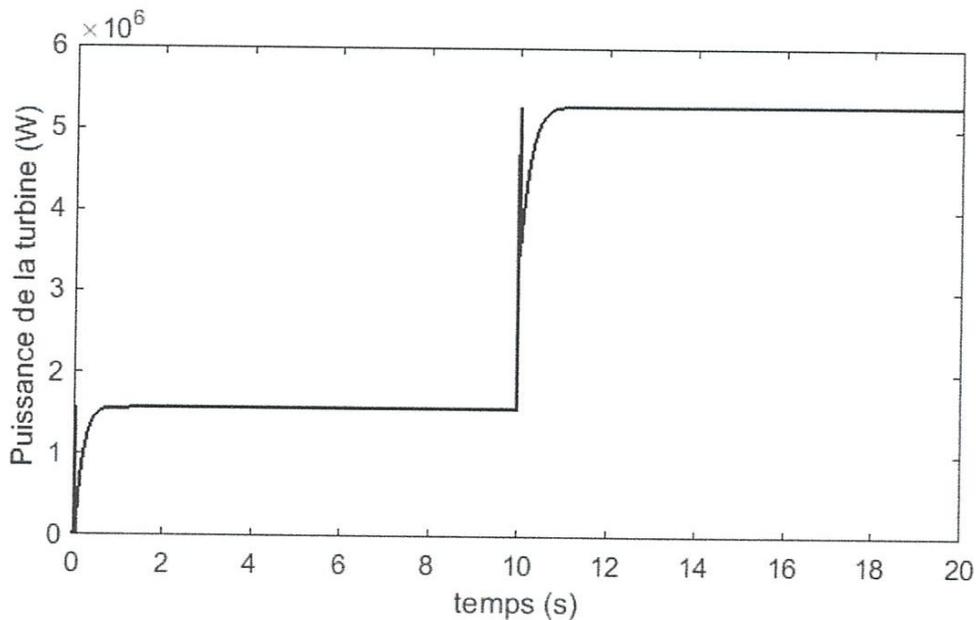


Figure III.16 : Puissance développée par l'éolienne pour deux vitesses du vent

La figure III.17, montre une comparaison entre le courant $I_a(t)$ de référence généré par la commande vectorielle et le courant de MSAP. Les deux est présentent presque la même allure. Ce qui montre l'efficacité du correcteur à hystérésis utilisé pour imposer les courants dans la MSAP. La figure III.18, montre un zoom sur les courants où on voit clairement le bon contrôle des courants.

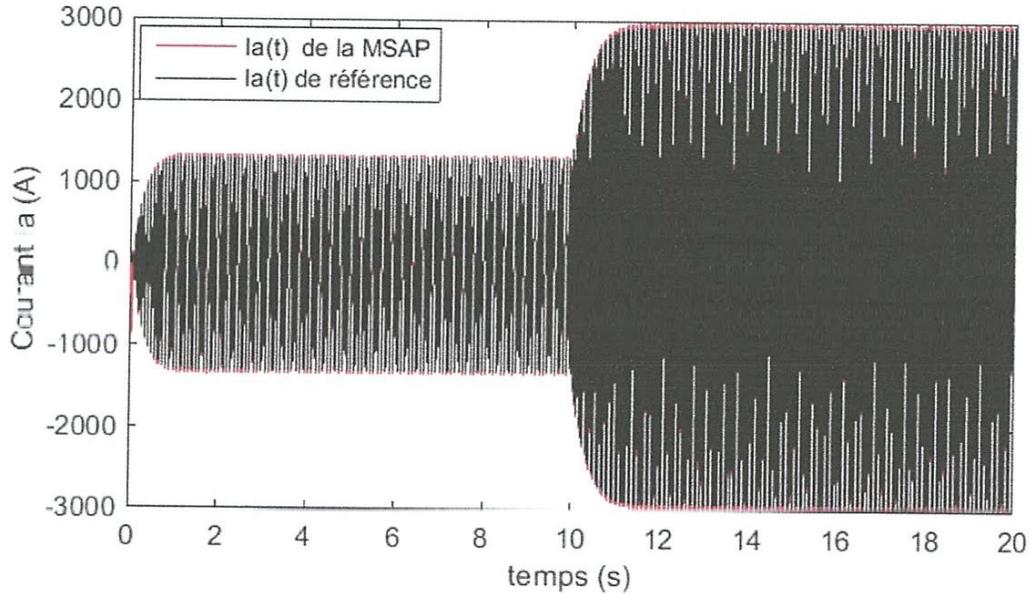


Figure III.17 : Comparaison entre le courant I_a de référence et celui de la MSAP

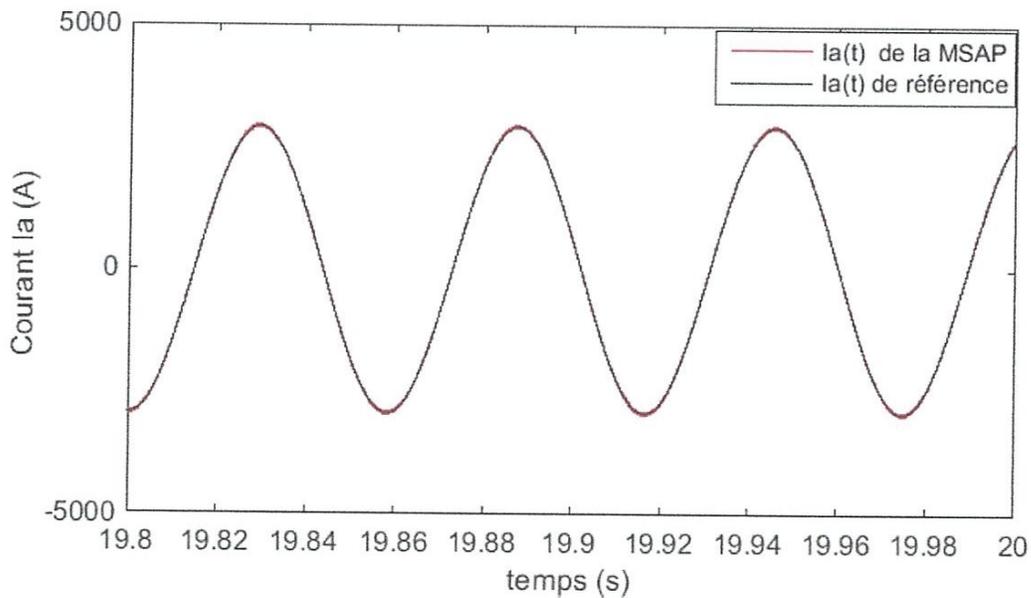


Figure III.18 : Zoom sur le courant $I_a(t)$ et sa référence

La figure III.19, la tension aux bornes du condensateur de filtrage en amont de la charge. On voit qu'elle varie en fonction de la vitesse du vent. La même remarque peut être constatée sur le courant de la charge qui est sensible aux variations du vent. En effet, si le vent augmente, la puissance mécanique extraite par l'éolienne augmente, donc la puissance électrique continue (tension et courant) délivrée à la charge augmente.

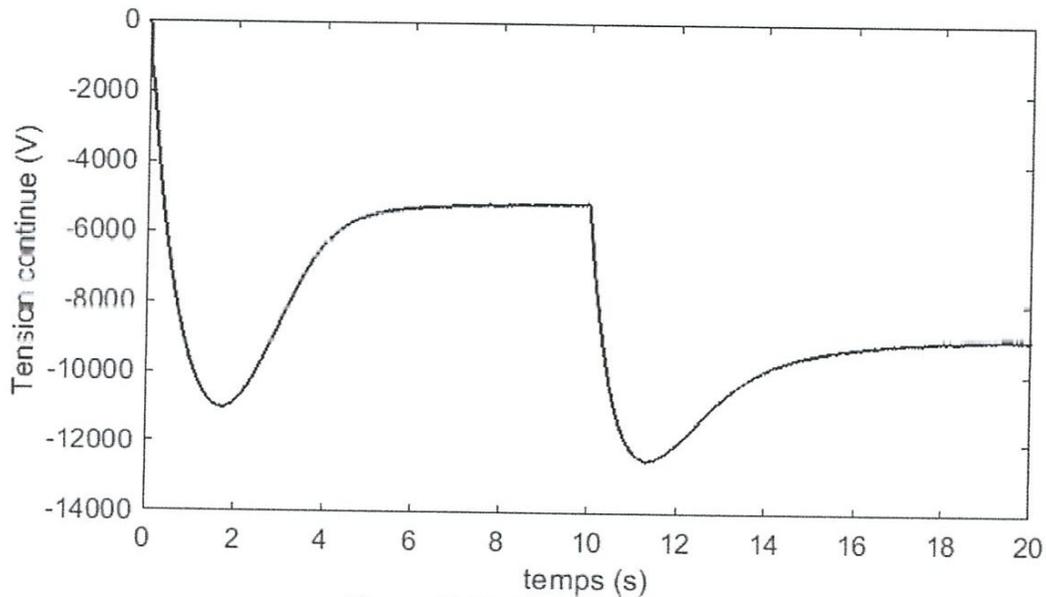


Figure III.19 : Tension du bus continu

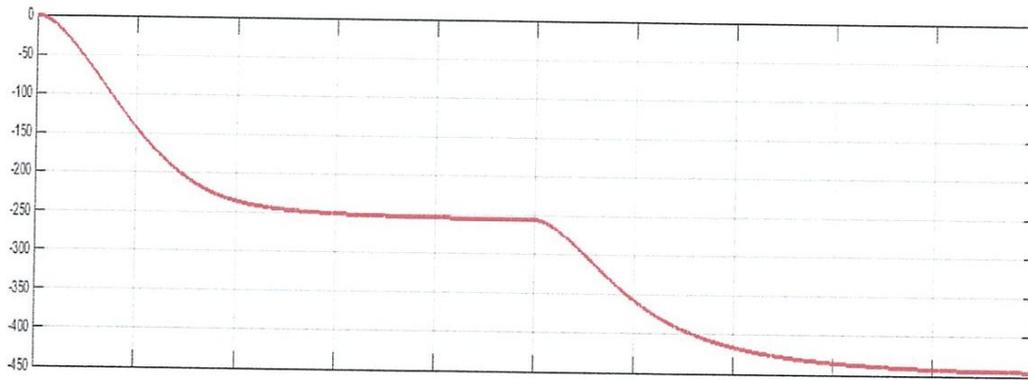


Figure III.20 : Courant de la charge R-L

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous avons présenté une stratégie de contrôle d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents et un redresseur à commande MLI pour alimenter une charge isolée.

En effet, nous avons commencé dans le premier chapitre par une étude générale des différentes structures d'éoliennes les plus utilisées. Ensuite, nous avons présenté globalement les différentes chaînes de conversion couramment utilisées dans les éoliennes à travers le monde. L'accent a été mis sur les chaînes basées sur la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) qui est l'élément principal de cette étude.

Dans le but de faire des simulations et de développer des stratégies de commande, nous avons consacré le deuxième chapitre à la modélisation mathématique de tous les composants de la chaîne de conversion, à savoir : la turbine, la GSAP, le redresseur à commande MLI et la charge du côté continu.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté brièvement les stratégies de commande des éoliennes et les classes des techniques de commande MPPT «Maximum Power Point Tracking » qui permettent d'assurer une meilleure exploitation et un bon rendement de l'éolienne pour toutes les vitesses du vent. Ensuite, nous avons présenté les résultats obtenus par simulation, d'une technique MPPT basée sur la caractéristique du coefficient de puissance et le réglage de la vitesse de la turbine. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle de la GSAP qui permet de contrôler le couple électromagnétique développé par la génératrice, ce qui permet ensuite de régler la vitesse de l'éolienne pour assurer l'extraction de la puissance maximale.

Enfin, nous recommandons la poursuite des recherches sur la commande des chaînes de conversion des éoliennes qui est un aspect très important pour les industriels. Dans cet axe plusieurs améliorations peuvent être apportées à savoir :

- Développer d'autres techniques MPPT.
- Réduire les hypothèses simplificatrices de la turbine.
- Utiliser d'autres chaînes de conversion (ex : GSAP+Redresseur à diode + Hacheur).
- Réalisation pratique de la stratégie de contrôle proposée.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] Kelkoul Bahia, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, université de Tlemcen, Tlemcen, 2011.
- [2] ADEME, « l'énergie éolienne », guide 7380, nov. 2015.
- [3] The Global Wind Energy Council, « Global Wind Report », avr. 2018.
- [4] Centre national d'histoire des sciences, « les énergie renouvelables de la préhistoire à nos jours », Bruxelles.
- [5] H. Boukhamkham, « Diagnostique des défaillances dans une machine asynchrone utilisée dans une chaîne éolienne », Magister en Electrotechnique, Université Mohamed khider, Biskra, 2011.
- [6] M. Mayouf, « Etude comparatif des architectures et strategies de control d'un aerogenerateur synchrone a aimants permanents », thèse de Doctorat, Université Hadj lakhdar Batna, 2014.
- [7] « <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/eoliennes-axe-vertical.html> ».
- [8] A. Zaimi, « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents », Mémoire pour obtenir diplôme d'ingénieur CNAM, Conservatoire national des arts et metiers, Maroc, 2014.
- [9] S. HAMECHA, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », mémoire de magister, université de tizi_ouzou, Tizi-Ouzou, 2013.
- [10] « <http://sites-final.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/DifferentesTechnologies/DifferentesTechnologiesEolien1b.htm> » . .
- [11] Naouel HAMDI, « Modélisation et commande des génératrice éoliennes », mémoire de magister, université MENTOURI de constantine, constantine, 2008.
- [12] Rabia MAMMAD, « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes