

*République Algérienne Démocratique et Populaire*



*Ministère de l'Enseignement Supérieure et de  
la Recherche Scientifique*

*UNIVERSITE DE JIJEL  
Faculté des Sciences et de la Technologie*

*Département d'électrotechnique  
Option : Commande des Systèmes Electriques  
Mémoire de Master*



*Présenté par*

*SADESSAOUD Salim et ROUABAH Chams-Eddine*

---

*Commande d'une Chaine de Conversion  
Eolienne à Base d'une Machine Synchrone à  
Aimants Permanents*

---



*Encadreur : Mr LALILI DJAAFER*

*2015/2016*

## *Remerciements*

*Au Nom d'Allah, Le Tout Élément, Le Très Miséricordieux.*

*« Et ma réussite ne dépend que d'Allah. En Lui je place ma confiance, et c'est vers Lui que je reviens repentant »*

*« Allah le Très-Grand a dit vrai »*

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout d'abord Allah le tout puissant qui m'a donné la volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*J'aimerais remercier énormément mon encadreur, Mr Djaaser LALLOI, pour son support, sa compréhension, sa guidance et sa patience ainsi que pour ses précieuses conseils, qui a su m'aiguiller et me faire confiance tout au long de ce travail.*

*Enfin, j'adresse mes vifs remerciements à toute personne qui a participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, et à tous mes collègues de la promotion Commandes des systèmes électriques 2015/2016.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail, en premier lieu, à mes très chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices « Que Allah les protège ».*

*Mon cher frère sa femme ainsi que leur enfants, pour leur grand amour et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

*Mes chères sœurs qui sous leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.*

*Ma très chère Nesrine pour son aide et leur encouragement, Et à toute ma famille et à tous ceux que j'aime.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail, en premier lieu, à mes très chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices « Que Allah les protège».*

*Mes chers frères et ma sœur ainsi que leurs enfants, pour leur grand amour et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

## Liste des symboles et abréviations

MS	Machine synchrone.
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent.
GSAP	Génératrice synchrone a aimant permanent.
MAS	Machine asynchrone.
MADA	Machine asynchrone à double alimentation.
$V_1$	Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
$V_2$	Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
$m$	Masse d'air en mouvement.
$S$	Surface des pales.
$\rho$	Densité de l'air.
$P_m$	Puissance mécanique extraite du vent.
$P_{mt}$	Puissance théorique.
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne.
$\lambda$	Vitesse relative ou ratio vitesse.
$\Omega_1$	Vitesse de rotation avant multiplicateur.
$R$	Rayon de l'aérogénérateur.
$K$	Rapport de multiplicateur de vitesse.
$P_{mec}$	Puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur électrique.
$\Omega_2$	Vitesse de rotation après multiplicateur.
$g$	Glissement.
$R_r$	Résistance du rotor.
$\omega_r$	La pulsation rotorique.
$\Omega_s$	La vitesse de synchronisme.
$\Omega$	La vitesse du rotor.
$\Omega_r$	La vitesse de rotation avant le multiplicateur.
$p$	Nombre de pair de pôles.
$\omega$	Pulsation.
$C$	Capacité totale du condensateur.
$V$	Vitesse du vent.



## Liste des symboles et abréviations

$R_p$	Rayon de la turbine.
$P_v$	La puissance produite par un vent.
$\beta$	L'angle de calage des pales.
$P_t$	La puissance mécanique disponible sur le rotor.
$\Omega_t$	Vitesse de la turbine.
$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$	Coefficients dépendent de la turbine considérée.
$C_{pmax}$	Coefficient de puissance optimal de la turbine.
$\lambda_{opt}$	Rapport de vitesse optimal (point optimal).
$C_t$	Couple aérodynamique.
$P_t$	Puissance aérodynamique.
$G$	Gain du multiplicateur de vitesse.
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique.
$C_g$	Couple d'entraînement de la machine.
FMM	Force magnétomotrice.
$R_s$	Résistance des phases statoriques.
$L_s$	Inductance cyclique statorique.
$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	Les flux totaux à travers les bobinages statoriques.
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants des phases statoriques.
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	Tensions des phases statoriques.
$\theta$	Angle entre le repère statorique et le repère rotorique.
(d, q)	Indice de repère de Park lié au rotor.
$V_{sd}, V_{sq}$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park.
$I_{sd}, I_{sq}$ Park.	Composantes du courant statorique dans le repère de Park.
$\phi_{sd}, \phi_{sq}$	Composantes du flux statorique dans le repère de Park.
$P(\theta)$	Matrice de Park.
$\phi_f$	Flux d'excitation des aimants permanents.
$C_{em}$	Couple électromagnétique.
$L_{sd}, L_{sq}$	Inductances statorique dans le repère de Park.

## Liste des symboles et abréviations

$J$	Moment d'inertie total de la machine.
$F$	Coefficient de frottement visqueux.
D1, D2, D3, D4, D5, D6	Diodes de redresseur.
$V_a, V_b, V_c$	Tensions fournies par la GSAP.
$V_{red}$	Tension de sortie du redresseur.
$i_1$	Courant redressé.
$i_2$	Courant ondulé.
$i_{dc}$	Courant du condensateur.
$V_{dc}$	Tension filtrée.
GTO	Gate Turn-Off Thyristor.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
T1, T2, T3, T4, T5, T6	Transistors de l'onduleur.
$F_a, F_b, F_c$	L'état des signaux de commande.
$e_a, e_b, e_c$	Tensions de phases de réseau.
$e_\alpha, e_\beta$	Composantes de la tension du réseau dans le système d'axes biphasés Stationnaire.
$e_d, e_q$	Composante directe et quadrature de tension de réseau dans le repère de Park.
$\rho$	Densité de l'air.
$P_{ref}$	Puissance active de référence.
$Q_{ref}$	Puissance réactive de référence.
$\alpha$	L'angle des secteurs.
$[V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7]$	Vecteurs de tension de sortie de l'onduleur.
$\Delta P$	Variation de puissance active.
$\Delta Q$	Variation de puissance réactive.
$H_P, H_Q$	La largeur de la bande hystérésis pour les puissances active et réactive.
$S_P, S_Q$	Signaux de sortie des comparateurs à hystérésis.
DPC	Commande directe de puissance.
MPPT	Maximum Power Point tracking.
P	Puissance active.

## Liste des symboles et abréviations

Q

puissance reactive.

# Table des matières

**Remerciement**

**Dédicace**

**Listes des notations et symbole**

**Table des matières**

**Introduction générale..... 1**

## **Chapitre 1 :**

### **Généralités sur l'énergie éolienne**

1.1 Introduction.....	3
1.2 Définition de l'énergie éolienne.....	3
1.3 Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	4
1.4 Constitution d'une éolienne.....	4
1.5 Les différents types d'éoliennes.....	6
1.5.1 Eolienne à axe vertical.....	7
1.5.2 Eolienne à axe horizontal.....	7
1.6 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	8
1.6.1 Loi de betz.....	8
1.6.2 Production d'énergie mécanique .....	11
1.7 Les différents types des chaines de conversion éoliennes.....	12
1.7.1 Les chaines de conversion à vitesse fixe .....	12
1.7.2 Les chaines de conversion à vitesse variable .....	13
1.8 Conclusion.....	14

## **Chapitre 2 :**

### **Modélisation de la cascade de conversion**

2.1 Introduction.....	15
2.2 Modélisation de la Turbine .....	16
2.3 Multiplicateur.....	18
2.4 Modélisation de la Machine Synchrone à Aimant Permanent .....	19
2.5 Modélisation de Redresseur.....	26

# Table des matières

2.6 Modélisation de Bus Continu.....	27
2.7 Modélisation de l'Onduleur .....	28
2.8 Modélisation de Réseau .....	29
2.9 Conclusion.....	31

## **Chapitre 3 :**

### **Commande de la cascade de conversion**

3.1 Introduction.....	33
3.2 Recherche de Point Maximal de Puissance.....	33
3.3 Commande Directe de Puissance.....	34
3.3.1 Détermination des secteurs.....	34
3.3.2 Calcul des puissances.....	35
3.3.3 Définition des vecteurs de tension de sortie de l'onduleur.....	35
3.3.4 Effet des états de l'onduleur sur les puissances active et réactive.....	36
3.3.5 Régulateur à hystérésis.....	39
3.3.6 Table de commutation.....	40
3.3.7 Schéma de commande (DPC).....	41
3.3.8 Simulation numérique.....	41
Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56

Annexe.

Références Bibliographique

## **Introduction générale :**

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer. Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, les multiplications des appareils domestiques de plus en plus gourmand en consommation de l'énergie électrique, la demande de cette dernière est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution des stocks mondiales en hydrocarbures et surtout la crainte de la pollution, les pays industrialisés ont fait recours aux centrales nucléaires, mais les risques d'accidents nucléaires (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune), le traitement d'enfouissement sont encore des problèmes. Face à ce dilemme ; il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie renouvelable tel que l'éolien

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années [1]. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes sept siècles. Pour moulin du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le DANOIS POUL LACOUR construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité.

C'est principalement la crise pétrolière de 1973 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes. On cherche surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique.

Étant donné, le vent source énergétique complémentaire depuis la moitié des années 70 résultant de deux préoccupations : la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus efficace et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles. En outre, certains événements politiques ont rappelé à l'attention du public, l'importance de pouvoir disposer d'énergie fiable quant à leurs approvisionnements.

Grâce aux efforts intensifs déployés au cours des 30 dernières années, la conversion de l'énergie éolienne est devenue un moyen fiable et concurrentiel de produire de l'électricité. La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles. Pour donner une idée

des énormes progrès réalisés, pour des vents moyens de 23 Km/h, le prix du KWh à chuter de 50 à 29 centimes au Danemark depuis 1990 est la puissance moyenne des machines est passer de 30 KW en 1983 à 600 KW en 1997. Tous ces bouleversements techniques font que ce secteur est actuellement en pleine expansion et que s'ouvre à lui une multitude des marchés mondiaux. Ainsi, l'énergie éolienne est vouée à un bel avenir. Les plus avancée dans le domaine la Chine avec une puissance installée fin 2015 de 30,753 MW, USA 8,598 MW, L'Allemagne 6,013 MW et Brésil 2,754 MW [2].

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

Le but de ce travail est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents basé sur une structure proposée, et des stratégies de contrôle permettant à la fois d'optimiser la puissance produite, de réguler la tension du bus continu, et de contrôler les puissances transmises au réseau.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à des rappels sur les systèmes de conversion éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, et constituée d'un redresseur à diodes, et d'un bus continu; l'ensemble est relié au réseau via un onduleur. Les éléments de cette chaîne de conversion sont modélisés par des équations mathématiques et différentielles permettant leur simulation numérique.

Le dernier chapitre est consacré à la commande de la chaîne de conversion éolienne. En appliquant une technique de recherche de point maximal de puissance, et de la technique de commande directe de Puissance (DPC), qui consiste à commuter les interrupteurs de l'onduleur suite à la comparaison entre les puissance de référence et les puissances réelles

# *Chapitre 1*

## *Généralités sur l'Energie Eolienne*

## 1.1. Introduction

Très tôt, dans l'histoire des technique, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour les moulins, le pompage ou, au moyen âge, pour l'industrie. Vers le milieu du *XIX<sup>eme</sup>* siècle, il y avait environ 200000 moulins à vent en Europe, mais l'arrivée des machines à vapeur industrielle a initié leur déclin. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes. En cherchant sur tout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploiter dans toutes les centrales électrique : un fluide (ici : le vent) entraînent une turbine reliait mécaniquement à une machine électrique, appelé génératrice, qui va produire le courant.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier et l'autre avantage de cette énergie éolienne, elle n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

## 1.2. Définition de l'énergie éolienne

La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Eole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents. L'énergie éolienne est une énergie produite de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales hélices induisent la mise en rotation du rotor.

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

- **la transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **la production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité

### 1.3. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Certaines énergies renouvelables, comme le bois ou l'hydroélectricité, sont utilisées massivement depuis très longtemps. Aujourd'hui, c'est l'énergie éolienne qui se développe à un rythme soutenu dans presque tous les pays du monde, avec une croissance de 30% par an. « Six raisons principales expliquent ce succès rapide : l'énergie éolienne est abondante, bon marché, inépuisable, disponible presque partout, propre et sans impact sur le climat. Aucune autre source d'énergie ne possède toutes ces qualités. »

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes [01]. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne pu se développer. Ensuite les aides financières au EU mais augmentèrent en Europe, ce qui permit un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne, la France et surtout dans les dernières années la Chine qui est devenu le premier producteur au monde.

L'énergie éolienne devrait pouvoir fournir, d'ici trente ans, 20% de la consommation mondiale d'électricité. Il a fallu attendre la crise pétrolière des années 1970 pour que l'énergie soit réellement considérée comme une option sérieuse

La production éolienne connaît depuis quelques années le taux de croissance plus important de l'industrie de la production d'électricité voici quelque donner statiques de différents pays pour l'année 2015.

Pays	P en MW	pays	P en MW
Chine	30,753 MW (48.5 %)	Canada	1,506 MW (2.4 %)
Etats Unis	8,598 MW (13.5 %)	Pologne	1,266 MW (2.0 %)
Allemagne	6,013 MW (9.5 %)	France	1,073 MW (1.7 %)
Brésil	2,754 MW (4.3 %)	Royaume-Uni	975 MW (1.5 %)
Inde	2,623 MW (4.1 %)	Turquie	956 MW (1.5%)

Tableau 1.1 : Puissance éolienne installée dans le monde à la fin de 2015 (en MW) [2]

### 1. 4. Constitution d'une éolienne

Les dimensions sont beaucoup plus considérables qu'on ne l'imagine :

La toure à 45 mètres de hauteur, mais le diamètre de l'hélice (turbine) atteint presque la même taille, fait culminer l'ensemble à près de 60 mètre.

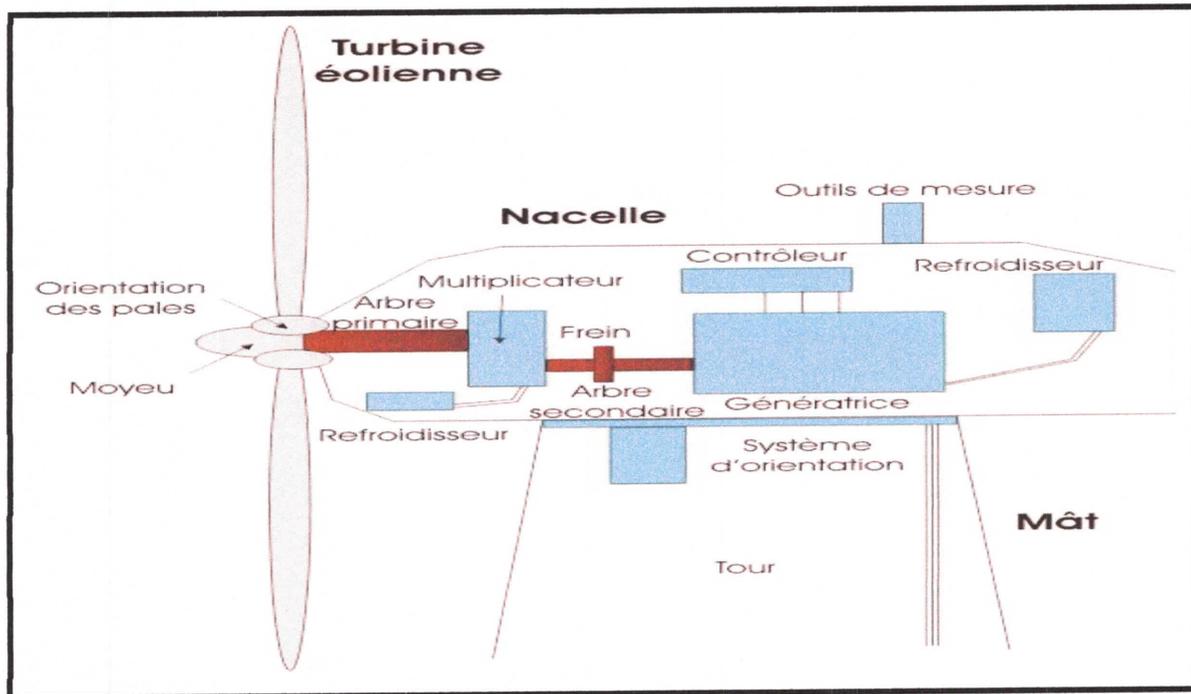


Figure 1.1 : Principaux composants d'une éolienne.

Une centrale éolienne typique figure I.1 est composée essentiellement des parties suivantes

- **Le mat** qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 KW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour entretien ;
- **Les pales** : généralement deux ou trois pales, souvent réalisées en fibre de verre et en matériaux composites .elle capturent le vent et transmettent son énergie en moyen du rotor ;
- **Le moyeu** : est, vu de extérieure, la partie pointue, le "nez" de éolienne. Il supporte les pales, et sur certains modèles il gère l'angle d'attaque des pales, on parle alors d'éolienne a pas variable ;
- **La fondation** : une fondation solide assurant la résistance de ensemble par grands vents et/ou dans des conditions de givrage ;
- **La nacelle** : est une véritable salle des machines perchées dans le ciel (situé à l'extrémité supérieure du mat).elle comporte une ou deux génératrice, une boîte de vitesse

(multiplicateur) un système de freins à disque est différents équipements automatisés d'asservissement ;

- **Système hydraulique pour les freins aérodynamique** : c'est élément essentiel de la survie d'une éolienne. la plupart des accidents surviennent d'un sous freinage de ses machines ;
- **Anémomètre** : la mesure de la vitesse de vent se fait le plus souvent par emploi d'un anémomètre à coupelles. Un tel anémomètre est menu d'un rotor a trois coupelles qui, sous effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical .la vitesse de rotation est enregistrée électroniquement .la plage de vitesse de fonctionnement varie entre 5 et 25 m/s ;
- **L'arbre** : pièce imposante car elle subit des efforts élevés .entre le rotor et la boîte de vitesse, c'est l'arbre lent ; l'arbre rapide rejoint le multiplicateur a l génératrice .pour les éolienne sans génératrice, il n'y a qu'un arbre unique ;
- **La boîte de vitesse (multiplicateur)** : un mal nécessaire car beaucoup voudraient l'éliminer. c'est qu'il s'agit d'une composante lourde et coûteuse. elle permet toutefois d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) et de se coupler a un générateur de série, donc peu cher, qui tourne lui 40 à 50 fois plus vite ;
- **Système de contrôle** : c'est un système électronique qui permet de contrôler le fonctionnement globale de éolienne ;
- **Moteur d'orientation au vent** : l'orientation de la nacelle face à la direction du vent est assurée par ce système d'orientation qui utilise des moteurs électriques ;
- **Le générateur électrique** : généralement un machine asynchrone ; il faut alors contrôler leur excitation par des condensateurs ou les relier au réseau, ce qui n'est pas facile ;
- **Système de refroidissement** : convection force de l'air est refroidissement par ou eau, pour le refroidissement de la génératrice et la liaison éventuellement le multiplicateur ;

### **I.5. Les différents types d'éoliennes**

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

### I.5.1. 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 ; ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches.

Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal.

### I.5. 2. Les éoliennes à axe horizontal:

On distingue les éoliennes classiques tripales : conception qui s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de la structure.

Parmi celles-ci il existe deux catégories d'éoliennes : Les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (littéralement pas sur le sol, donc sur la mer), elles présentent des avantages au niveau des nuisances sonores (moins gênantes car elles sont éloignées des habitations), et des vents marins (plus nombreux et plus forts que les vents continentaux) ; en revanche elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses



Figure 1.2 : Les éoliennes à axe vertical



Figure 1.3 : Eolienne à axe horizontal

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

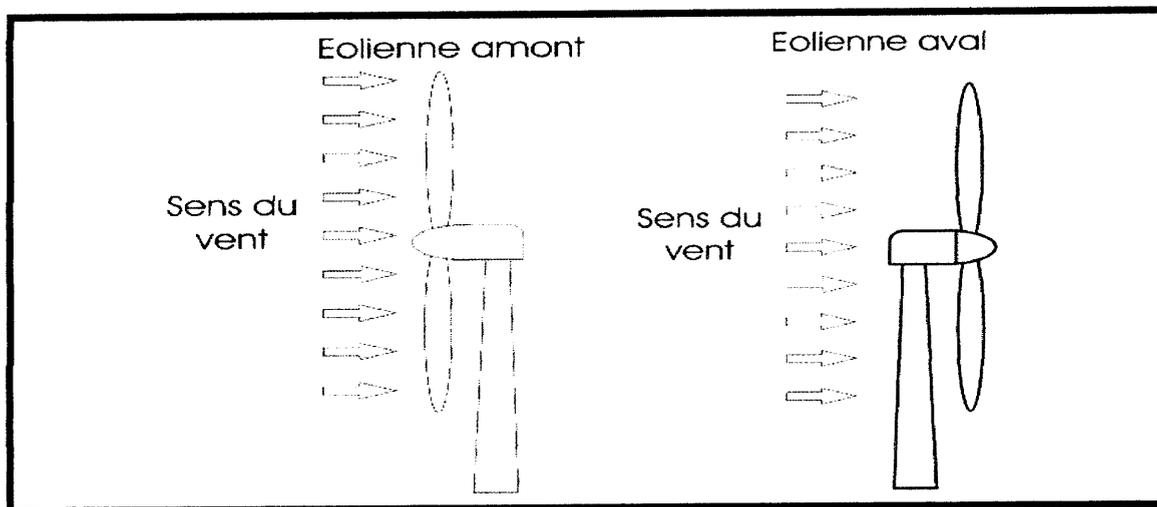


Figure 1.4 : Types d'éoliennes d'axe horizontal

## I.6. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

### I.6.1 Loi de betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1-3 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 : la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \rho \frac{S(V_1+V_2)}{2} \tag{1.1}$$

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) [03] :

$$P_m = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{1.2}$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (1.1) :

$$P_m = \rho \frac{S(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{1.3}$$

$P_m$  : la puissance extraite du vent

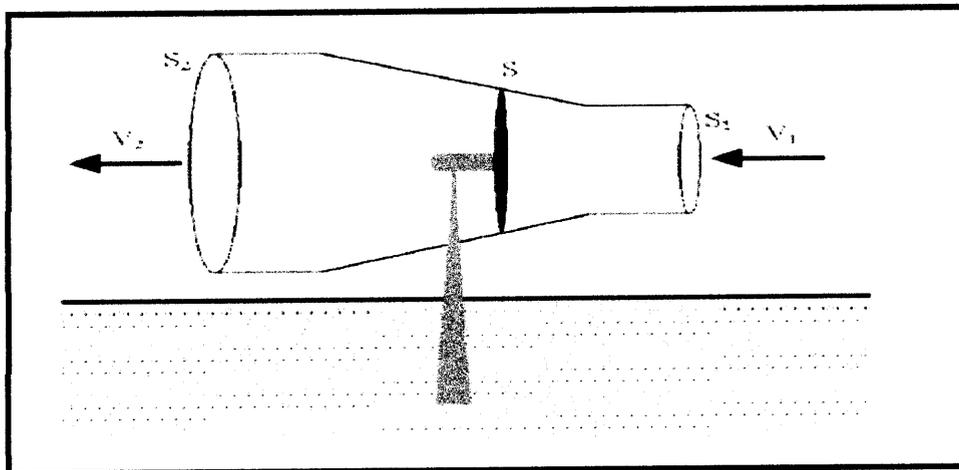


Figure 1.5 : Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{1.4}$$

Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right] - \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} \tag{1.5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 1-4), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$ .

D'après Betz, le coefficient de puissance  $C_p$  ne peut être supérieur à 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  $\lambda$  (ou,  $\lambda = \frac{V_1}{V_2}$ ) représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent. [03]

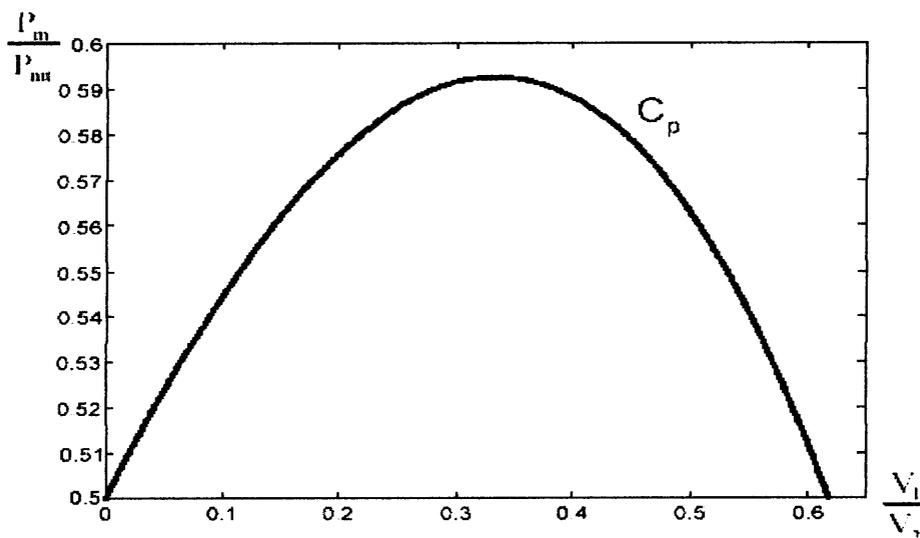


Figure 1.6 : Coefficient de puissance

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure 1-5) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur

coefficient de puissance (Figure 1.5) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [03].

1.6.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{mec} = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{1.6}$$

Avec  $\lambda = R \frac{\Omega_1}{V_1}$

$\Omega_1$  : Vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R : Rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse k, la puissance mécanique  $P_{mec}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{k V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{1.7}$$

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent Figure 1.6. [03]

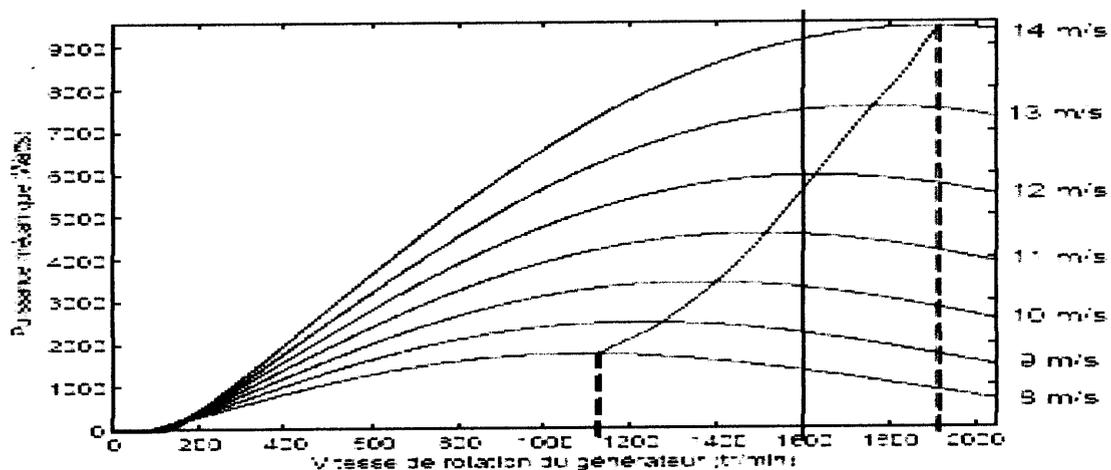


Figure 1.7 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

## 1.7. Les différents types des chaînes de conversion éoliennes :

### 1.7.1. Les chaînes de conversion à vitesse fixe :

Une machine asynchrone à cage d'écureuil munie d'un multiplicateur, connectée directement au réseau.

Exemple : les éoliennes du Danemark Pour connecter l'éolienne au réseau dans cette configuration, on procède en deux temps : Le premier temps consiste à connecter les enroulements statoriques au réseau par l'intermédiaire de résistances afin de limiter les courants statoriques transitoires. Pendant cette phase, les pales de l'éolienne sont orientées de façon à ce que le couple fourni soit nul. Après quelques secondes, les résistances sont éliminées (elles sont court-circuitées) puis le système de régulation oriente les pales pour croître la puissance. La magnétisation du circuit magnétique entraîne un appel de courant qui sera limité par les résistances. Les résistances peuvent être remplacées par un gradateur dont on fera varier l'angle de retard à l'amorçage lors de la phase de couplage.

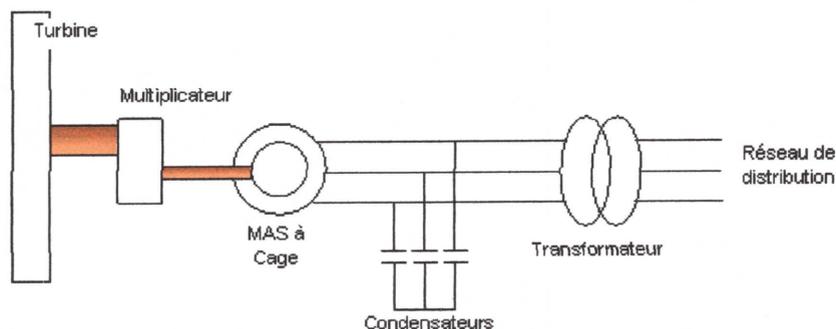


Figure 1.8. Schéma de la connexion directe au réseau de l'éolienne avec la machine asynchrone à cage

### 1.7.2. Les chaînes de conversion à vitesse variable :

La génératrice utilisée est la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation), MAS à rotor bobiné, à énergie rotorique dissipée :

Le rotor de la machine asynchrone est équipé d'une résistance variable.

Cette solution exploite le fait que le glissement  $g$  est fonction de la résistance du rotor, qui s'exprime par  $R_r / g$  dans le schéma équivalent d'une machine asynchrone. L'ajout de résistances électriques au rotor permet d'ajuster les conditions de glissement aux conditions de vent. En faisant varier la résistance interne du rotor, on fait varier le glissement  $g$ . En effet, la pulsation rotorique  $\omega_r$  est donnée par :

$$\omega_r = |g| \cdot \omega$$

Avec:  $\omega$  la pulsation du réseau fixe, et  $g$  le glissement, qui s'exprime aussi par :

$$\omega_r = P \cdot |\Omega_s - \Omega| \text{ Où } \Omega_s \text{ est la vitesse de synchronisme, d'où : } \Omega = \Omega_s + \frac{\omega_r}{p} \text{ Si } g < 0$$

Exemple : La variation maximale du glissement peut être de 10 % voire plus.

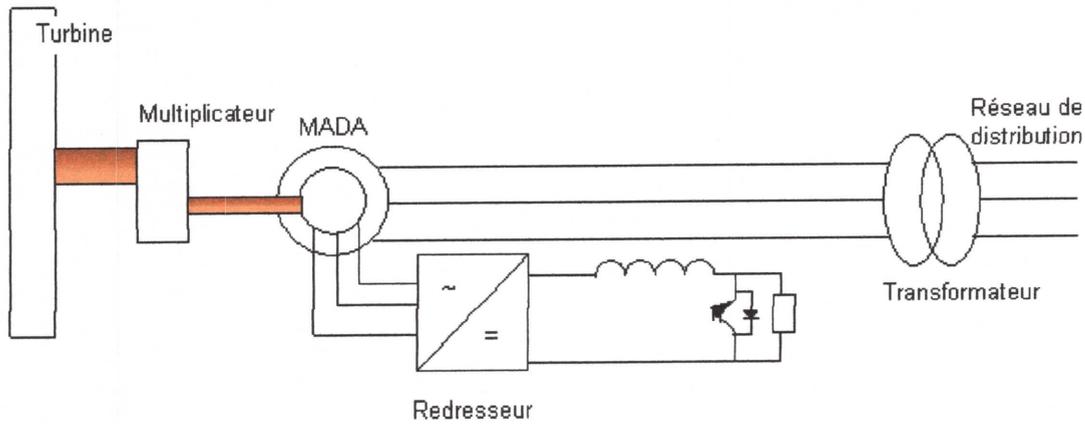


Figure 1.9. Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la machine asynchrone équipée d'une résistance variable.

- Machine synchrone munie d'un multiplicateur, avec convertisseur au stator.

Dans le cas d'une machine synchrone, l'amplitude et la fréquence sont fonctions de la vitesse, le raccord au réseau nécessite un convertisseur statique de fréquence avec un redresseur et un onduleur

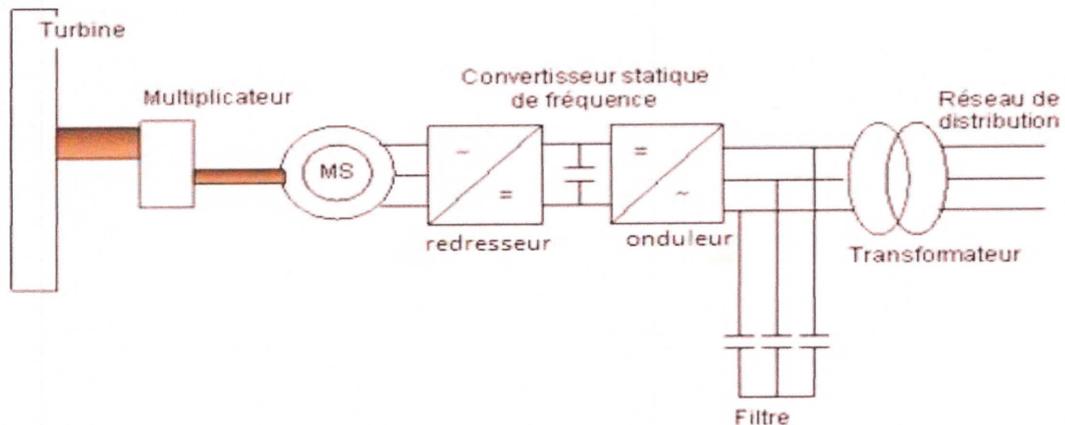


Figure 1.9 : Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la machine synchrone et un convertisseur statique.

On peut se passer de multiplicateur, en prenant une génératrice synchrone à grand nombre de pôles, pour bénéficier de la vitesse variable. Rappelons que pour la machine synchrone :

$$\Omega_s = \Omega = \frac{\omega}{p}$$

Deux solutions sont possibles, elles concernent la technologie du rotor :

- Le rotor bobiné.
- Le rotor à aimants permanents.

La génératrice dans les deux cas, est reliée au réseau par un convertisseur de fréquence, qui ramène la fréquence variable du courant généré à la fréquence du réseau.

La vitesse de rotation de l'alternateur doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. [4]

## 1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne. Après un rappel des notions de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les principaux composants d'une éolienne ont été décrits. Nous avons également parlé des différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. On a présenté aussi la loi aérodynamique de Betz. Nous avons décrit aussi les différentes structures d'éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable basée sur deux grandes familles des génératrices soit les génératrices synchrones ou asynchrones. Le chapitre suivant, sera consacré à l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion.

## *Chapitre 2*

### *Modélisation de la Chaîne de Conversion*

2.1. Introduction :

La chaîne de conversion éolienne est composée d'une turbine, d'une génératrice synchrone, d'un redresseur à diode, d'un filtre, d'un onduleur et d'un réseau triphasé.

La turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice. Cette dernière assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le redresseur permet de redresser la tension alternative générée par la machine, et le transformer en tension continue. Le rôle du filtre est de filtrer la tension redressée. L'onduleur assure le conditionnement de l'injection de l'énergie électrique produite dans le réseau.

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion.

La figure 1 montre le schéma détaillé de la chaîne de conversion

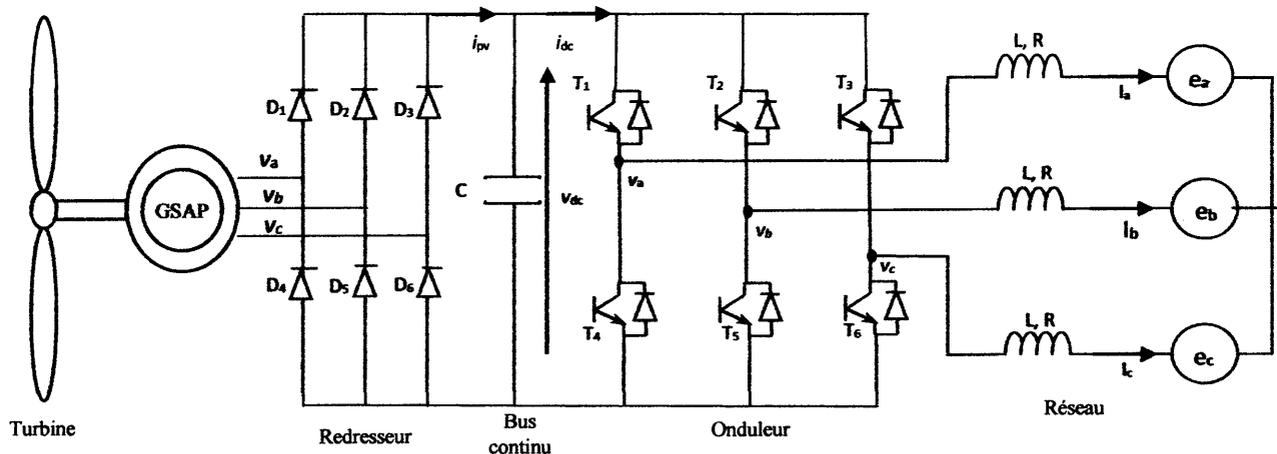


Figure 2.1: Système basé sur la machine synchrone à aimants permanent.

## 2.2. Modélisation de la turbine :

La puissance produite par un vent traversant une surface  $S$  dépend du cube de la vitesse du vent  $V$  et de la densité de l'air  $\rho$ . Cette puissance est donnée par:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (2.1)$$

Où :

$$S = \pi \cdot R_p^2 \quad (2.2)$$

$R_p$ : Rayon de la turbine.

La puissance mécanique disponible sur le rotor  $P_t$  c'est exprimée par le produit de la puissance du vent par coefficient de puissance de la turbine:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3)$$

Le coefficient de puissance est équivalent au rendement de la turbine, c'est une propriété intrinsèque de la turbine : Généralement, le coefficient de puissance est exprimé par une formule empirique en fonction de la vitesse spécifique et de l'angle de calage [5] :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_1}} + c_6 \lambda \quad (2.4)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{R_p \cdot \Omega_t}{V} \quad (2.6)$$

Où:

$\Omega_t$ : Vitesse de la turbine [rad/s].

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ -coefficients dépendent de la turbine considérée et les valeurs sont données dans le Tableau.

coefficients	Valeur
$c_1$	0.5
$c_2$	116
$c_3$	0.4
$c_4$	5
$c_5$	21
$c_6$	0.0068



Tableau 2.1 : Coefficients définissant l'évolution de  $C_p$ . [5]

La figure 2.2 indique l'évolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour différents angles de calage. Chaque courbe dans la figure 2.2 possède un point maximal  $C_{pmax}$ , correspondant à une vitesse spécifique optimale  $\lambda_{opt}$ . Dans le cas particulier  $\beta = 0$ , le point maximale est caractérisé par  $(\lambda_{opt}=8; C_{pmax}=0.479)$  qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance  $C_p$  et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de  $\beta$  permet de réduire le coefficient  $C_p$  et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

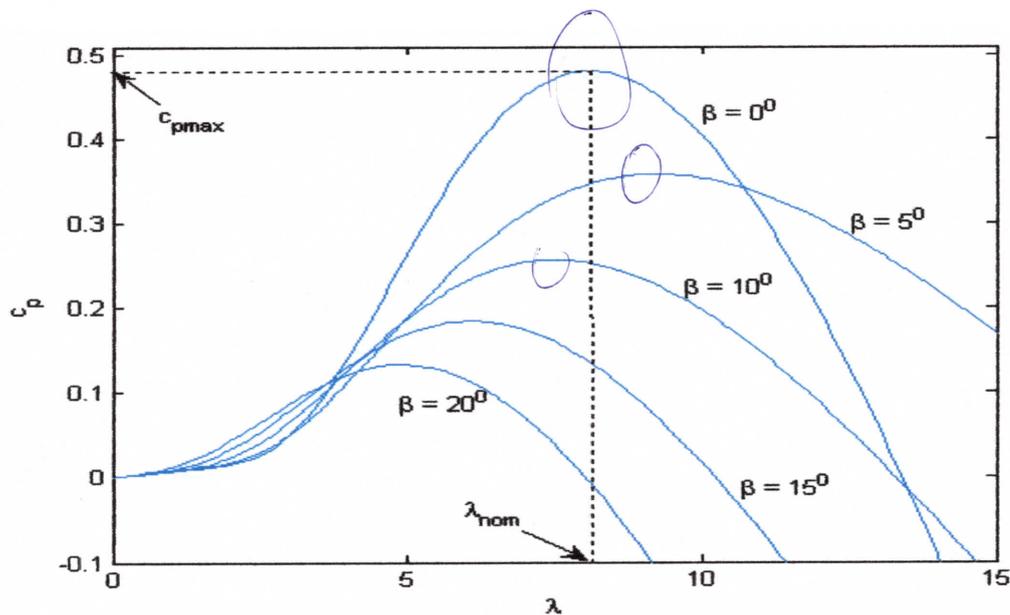


Figure 2.2 : Courbe de coefficient  $C_p(\lambda, \beta)$

La puissance aérodynamique de l'éolienne peut être aussi exprimée comme suit:

$$P_{mec} = \Omega_t C_t \tag{2.7}$$

L'expression du couple aérodynamique  $C_t$  est alors donnée par :

$$C_t = \frac{1}{2} \rho \pi R_p^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) / \Omega_t \tag{2.8}$$

### 2.3. Le multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 2.3).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

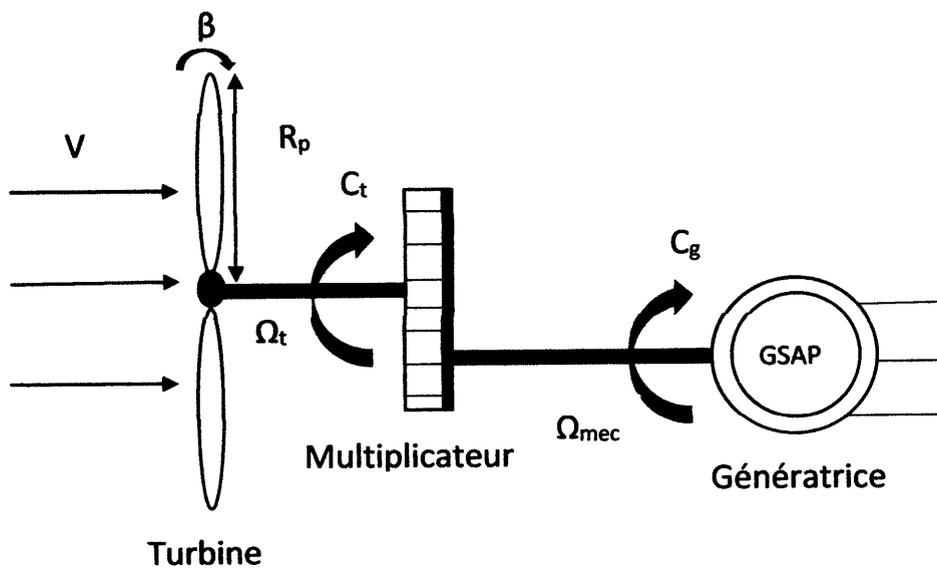


Figure 2.3 : Schéma de la turbine éolienne.

$$C_g = \frac{C_t}{G} \tag{2.9}$$

$$\Omega_T = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{2.10}$$

Avec :

G : Gain du multiplicateur de vitesse.

$C_g$  : Couple d'entraînement de la machine.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse mécanique.

$C_t$  : Couple aérodynamique.

#### 2.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne.

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et le contact glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine.

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices [6] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault de l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La figure 3.1 indique le schéma des enroulements statoriques de la machine. Les équations électriques de la machine dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Avec :

$R_s$ : La résistance des phases statoriques.

$[V_{sa} V_{sb} V_{sc}]$  : Les Tensions des phases statoriques.

$[\phi_{sa} \phi_{sb} \phi_{sc}]$  : Les Flux totaux à travers les bobinages statoriques.

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \cos 240^\circ & \cos 0^\circ & \cos 120^\circ \\ \cos 120^\circ & \cos 240^\circ & \cos 0^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_f \cos(\theta) \\ \phi_f \cos(\theta - 120^\circ) \\ \phi_f \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$[i_a \ i_b \ i_c]$  : Les courants des phases statorique.

$\phi_f$ : Flux d'excitation des aimants [wb].

$\theta$  : Angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé (figure 2.4), 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.

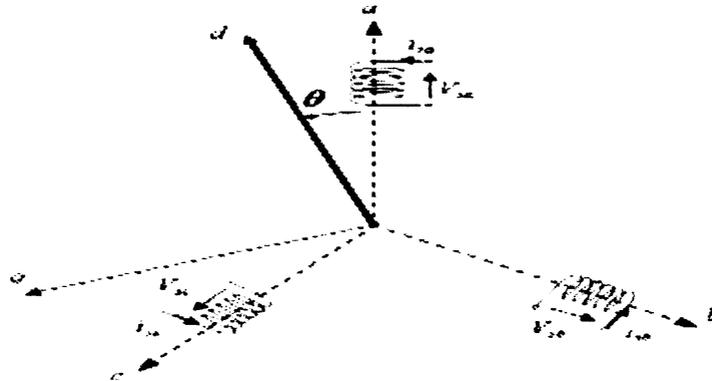


Figure 2.4: Structure de la génératrice synchrone

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine (figure 2.5) sera utilisé  $V_{sd}, V_{sq}$  et  $I_{sd}, I_{sq}$ . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage.

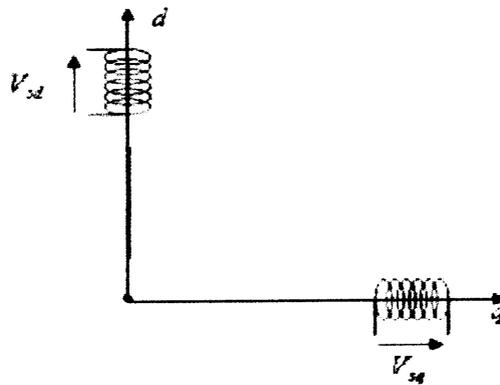


Figure 2.5: Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (d-q).

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)] [V_{sabc}]$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)] [I_{sabc}]$$

Avec:

$P(\theta)$  Matrice de PARK donnée par:

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - p\Omega \phi_{sq} \tag{2.14}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + p\Omega \phi_{sd} \tag{2.15}$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\phi_{sd}$  et  $\phi_{sq}$  sont fonctions linéaires des courants  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$ :

$$\phi_{sd} = L_{sd}I_{sd} + \phi_f \quad (2.16)$$

$$\phi_{sq} = L_{sq}I_{sq} \quad (2.17)$$

$$\omega = p\Omega \quad (2.18)$$

Avec :

$I_{sd}I_{sq}$ : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd}V_{sq}$ : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

$R_s$ : Résistance statoriques [ $\Omega$ ].

$L_s$ : Inductance cyclique statorique [H].

$p$ : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

$\omega$ : Pulsation des tensions [rad/s].

$\phi_f$ : Flux d'excitation des aimants [wb].

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{d}{dt}i_{sd} = \frac{1}{L_s}(-R_s I_{sd} + L_s \Omega p I_{sd} + V_{sd}) \quad (2.19)$$

$$\frac{d}{dt}i_{sq} = \frac{1}{L_s}(-R_s I_{sq} - L_s \Omega p I_{sq} + V_{sq} - p \Omega \phi_f) \quad (2.20)$$

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones peut être donné par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd}) \quad (2.21)$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_{sd} - L_{sq})I_{sd}I_{sq} + \phi_f I_{sq}] \quad (2.22)$$

Avec  $L_{sd} = L_{sq} = L_s$

Le couple électromagnétique sera :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\phi_f I_{sq} \quad (2.23)$$

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

$$C_t - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{2.24}$$

$C_t$ : Couple appliqué sur la machine.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

$f$  : Coefficient de frottement.

$J$  : Moment d'inertie de la machine.

$\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine.

Les paramètres de la MSAP :

$R_s$	2.875Ω
$L_d=L_q$	$8.5e^{-3}H$
$\phi_f$	0.175wb
$J$	$0.8e^{-3}kg.m^2$
$p$	4
$f$	0

Tableau 2.2 : les paramètres de la machine

**Simulation numérique :**

L'application d'un couple constant à la génératrice permet la génération de l'énergie électrique. C'est pourquoi nous avons procédé à des simulations sous Matlab-Simulink afin de voir le comportement de la génératrice synchrone lorsqu'elle alimente une charge résistive, en visualisant sa vitesse de rotation et couple, tensions, courants ainsi que les tensions et courants suivant l'axe d et q.

On applique un couple de -3.5N.m, et une charge de résistive de 100Ω.

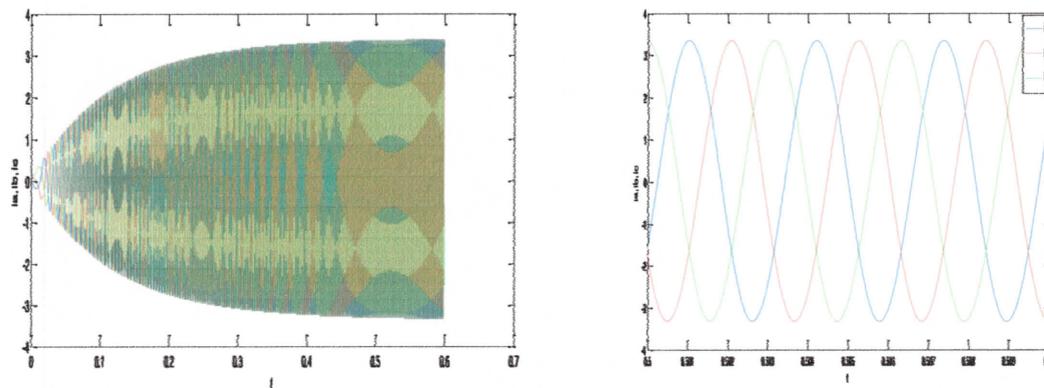


Figure 2.6 : les courants de la génératrice

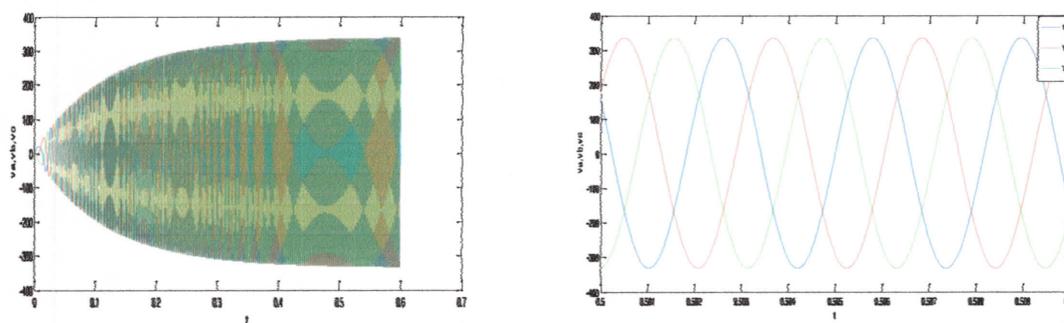


Figure 2.7 : les tensions de la génératrice

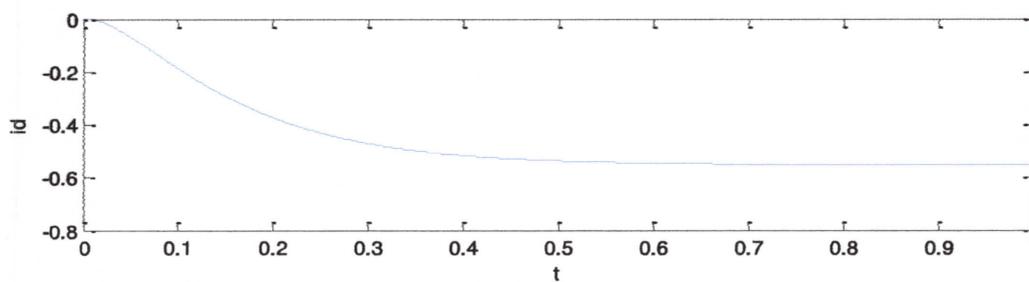


Figure 2.8 : le courant direct

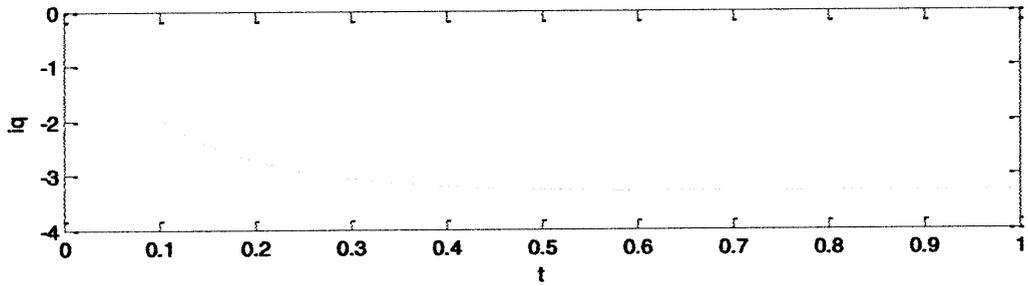


Figure 2.9 : le courant quadrature

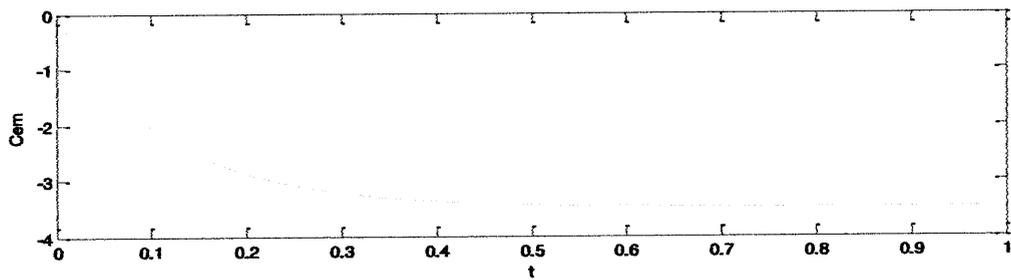


Figure 2.10 : le couple électromagnétique

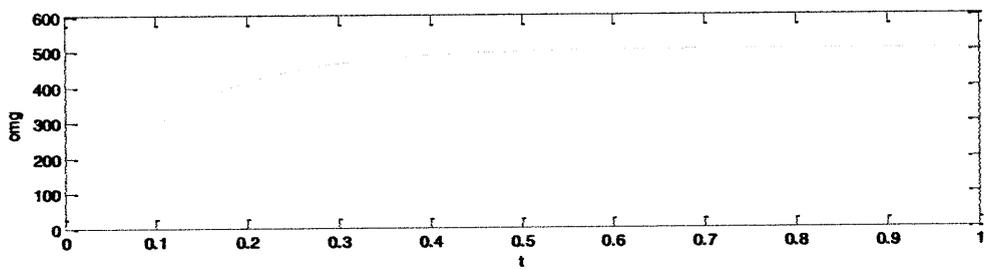


Figure 2.11 : La vitesse de rotation de la machine.

Bloc de simulation :

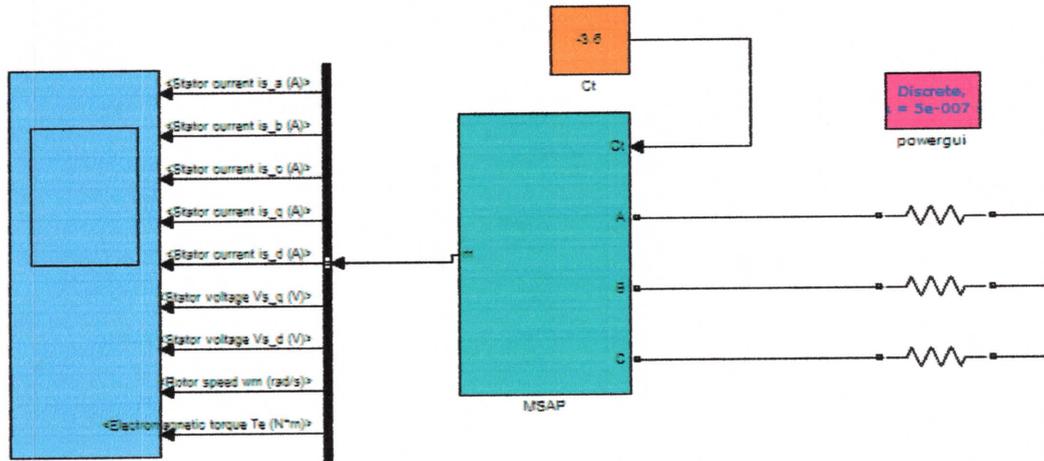


Figure 2.12 : schéma de bloc de la MSAP alimente une charge resistive.

**Interprétations des résultats de simulation :**

Les systèmes des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ) et les tensions ( $v_a, v_b, v_c$ ) passent par un régime transitoire puis se stabilise.

Les courants et les tensions prennent une forme sinusoïdale et sont déphasés entre eux à la sortie de la MSAP.

On remarque des battements importante représente dans la courbe de la vitesse mais après le régime transitoire elle stabilise.

Le couple électromagnétique suit le couple appliqué à la MSAP.

Le couple électromagnétique est identique à celle du courant  $i_q$  du fait la linéarisation existence entre ces deux grandeurs.

L'allure des tensions  $v_d, v_q$  coïncident a l'allure des courants  $i_d, i_q$  respectivement, cette partie définit la transformation de Park.

**2.5. Modélisation de redresseur :**

Le redresseur est un convertisseur statique.il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu.

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, On modélise le redresseur 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 (pas d'empîement). .

Pour un redresseur à diodes, la tension redressée est fixe et non commandable. Sa valeur dépend des tensions alternatives à l'entrée du redresseur.

La figure 2.13 indique un redresseur à diodes non commandé. Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D2, D3) a cathode commune assurant l'allé du courant  $i_1$  et trois diodes (D4, D5, D6) a anode commune assurant le retour du courant  $i_1$ . Les tensions ( $V_a, V_b, V_c$ ) fournit par la GSAP qui alimentent le redresseur sont équilibrées.

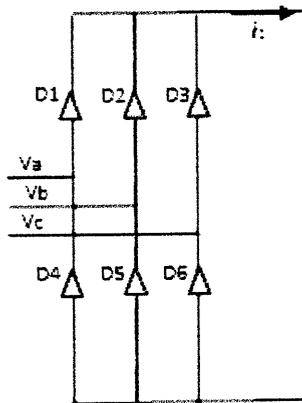


Figure 2.13 : Schéma électrique d'un redresseur à diodes.

$$V_a(t) = V_{max} \sin(\omega t) \tag{2.25}$$

$$V_b(t) = V_{max} \sin(\omega t - 2\pi/3) \tag{2.26}$$

$$V_c(t) = V_{max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \tag{2.27}$$

Si en néglige l'effet d'empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suite :

$$V_{dc} = \max[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] - \min[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] \quad (2.28)$$

Max/min : représente la tension la plus positive et la plus négative des trois tensions disponible en amont du pont de diodes respectivement. [7].

**2.6. Modélisation du bus continu :**

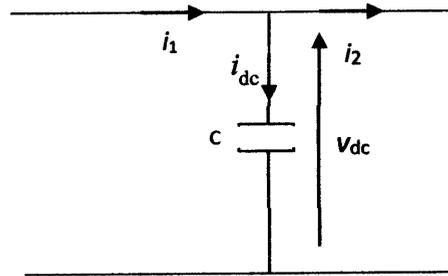


Figure 2.14 : Schéma électrique du bus continu

Le schéma électrique du bus continu permet par la loi des nœuds d'établir la relation suivante :

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_{dc}(t) \quad (2.29)$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \quad (2.30)$$

$i_{dc}$  : Le courant du condensateur.

$i_2$  : Le courant ondulé.

$i_1$  : Le courant redressé.

**2.7. Modélisation de l'onduleur :**

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. [8]

L'onduleur triphasé de tension se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et

d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du coté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $C$  de tension  $V_{dc}$ .

L'onduleur de tension est connecté au réseau électrique.

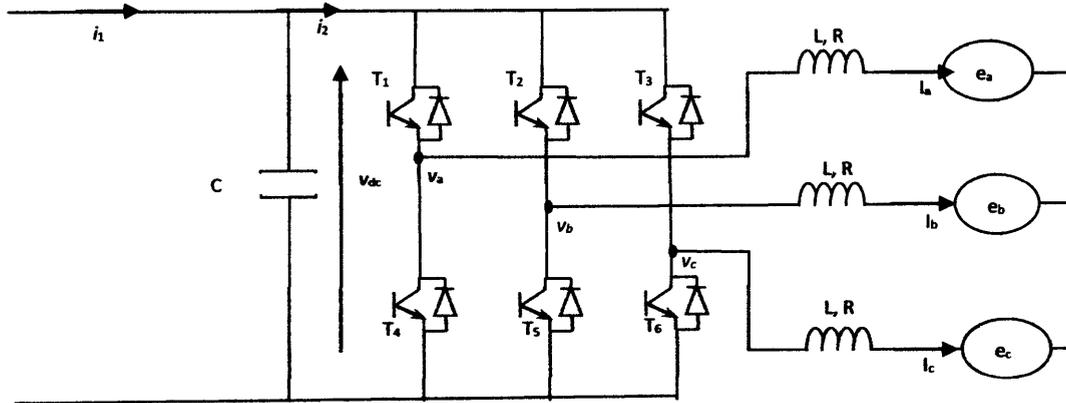


Figure 2.15 : Schéma d'un onduleur connecté au réseau

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande  $(F_a, F_b, F_c)$ , comme suite :

$$F_a = \begin{cases} 1 & T1 \text{ fermé } T4 \text{ ouvert} \\ 0 & T1 \text{ ouvert } T4 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$F_b = \begin{cases} 1 & T2 \text{ fermé } T5 \text{ ouvert} \\ 0 & T2 \text{ ouvert } T5 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$F_c = \begin{cases} 1 & T3 \text{ fermé } T6 \text{ ouvert} \\ 0 & T3 \text{ ouvert } T6 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.33)$$

La loi des mailles permet d'obtenir les tensions composée entre phases :

$$U_{ab} = V_a - V_b = V_{dc}(F_a - F_b) \quad (2.34)$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = V_{dc}(F_b - F_c) \quad (2.35)$$

$$U_{ca} = V_c - V_a = V_{dc}(F_c - F_a) \quad (2.36)$$

Si on suppose que la charge triphasée de l'onduleur est équilibrée, les tensions simples forment alors un système triphasé équilibré :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \tag{2.37}$$

On obtient la relation :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \tag{2.38}$$

2.8. Modélisation de réseau :

Le réseau électrique est indiqué en aval de l'onduleur à la figure 2.15 La variation des courants absorbés, dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, est donnée par les équations :

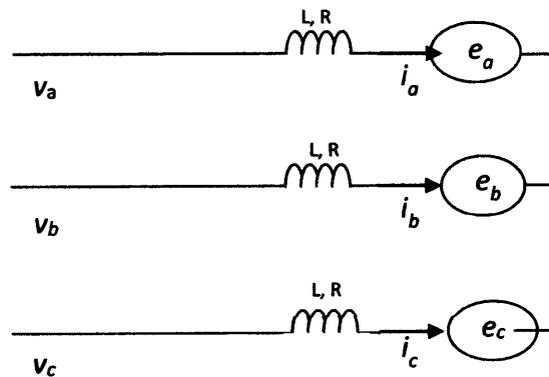


Figure 2.16 : le schéma de réseau électrique

$$\begin{cases} \frac{Ldi_a}{dt} + Ri_a(t) = V_a(t) - e_a(t) \\ \frac{Ldi_b}{dt} + Ri_b(t) = V_b(t) - e_b(t) \\ \frac{Ldi_c}{dt} + Ri_c(t) = V_c(t) - e_c(t) \end{cases} \tag{2.39}$$

Donc :

$$\begin{cases} \frac{Ldi_a}{dt} + Ri_a(t) = V_{dc}/3(2.F_a - F_b - F_c) - e_a(t) \\ \frac{Ldi_b}{dt} + Ri_b(t) = V_{dc}/3(-F_a + 2.F_b - F_c) - e_b(t) \\ \frac{Ldi_c}{dt} + Ri_c(t) = V_{dc}/3(-F_a - F_b + 2.F_c) - e_c(t) \end{cases} \tag{2.40}$$

Les tensions de réseau électrique :

$$\begin{cases} e_a(t) = -\frac{Ldi_a}{dt} - Ri_a(t) + V_{dc}/3(2.F_a - F_b - F_c) \\ e_b(t) = -\frac{Ldi_b}{dt} - Ri_b(t) + V_{dc}/3(-F_a + 2.F_b - F_c) \\ e_c(t) = -\frac{Ldi_c}{dt} - Ri_c(t) + V_{dc}/3(-F_a - F_b + 2.F_c) \end{cases} \quad (2.41)$$

D'après la transformation de Park, les tensions et les courants de réseau dans le repère  $(d, q)$  sont décrits par les équations suivantes :

$$e_d = 2/3. (e_a \cdot \cos(\omega t) + e_b \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e_c \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})) \quad (2.42)$$

$$e_q = -2/3. (e_a \cdot \sin(\omega t) + e_b \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e_c \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})) \quad (2.43)$$

$$i_d = 2/3. (i_a \cdot \cos(\omega t) + i_b \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})) \quad (2.44)$$

$$i_q = -2/3. (i_a \cdot \sin(\omega t) + i_b \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})) \quad (2.45)$$

Avec :  $\omega = 2\pi f$ .

D'après la loi des mailles dans le réseau électrique le modèle dynamique du réseau électrique est donné par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

D'après la transformation de Park le modèle dynamique du réseau électrique dans le repère  $(d, q)$  est décrit par l'équation suivante:

$$[P(\Theta)] \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = [P(\Theta)] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} [P(\Theta)] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - [P(\Theta)] L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Avec :

$e_d, e_q$  : Les tensions de réseau dans le repère  $(d, q)$ .

$V_d, V_q$  : Les tensions de sortie de l'onduleur dans le repère  $(d, q)$ .

$i_d, i_q$  : Les courants injectés au réseau.

$L$  : Inductance d'une ligne du réseau.

$R$  : Résistance d'une ligne du réseau.

$\omega$  : Fréquence de réseau.

## **2.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique des différents éléments constituant notre chaîne de conversion d'énergie éolienne.

La modélisation de la turbine permet d'obtenir le coefficient maximal de puissance. Nous avons modélisé la génératrice synchrone à aimants permanents et présenté les résultats de simulation lorsque cette génératrice alimente une charge résistive. On a constaté que les courants et tensions fournis par la machines sont sinusoïdaux, et que le couple de la machine suit le couple imposé. On a donné les modèles d'équations mathématiques de chaque élément de convertisseur électrique (redresseur, filtre et onduleur). Et on a présenté aussi un modèle de réseau électrique dans le référentiel triphasé et biphasé.

Dans le chapitre suivant on va étudier la commande de la chaîne de conversion.



## *Chapitre 3*

# ***COMMANDE DE LA CASCADE DE CONVERSION***

### 3.1. Introduction

Pour pouvoir exploiter la turbine d'une manière optimale, on doit faire fonctionner cette dernière avec un rendement maximale, en continu. Pour atteindre cet objectif on doit introduire un algorithme de recherche de point de puissance maximale de la turbine.

Avant d'injecter la puissance générée par la machine synchrone à aimant permanent dans le réseau électrique, cette puissance doit être conditionnée aux critères du réseau, tels que le facteur de puissance, et la qualité du courant. Ces exigences peuvent être satisfaites à travers la commande de l'onduleur placé entre la machine et le réseau.

Dans ce chapitre on va appliquer la technique de commande directe de puissance pour commander les puissances actives et réactives du réseau. La référence de la puissance active sera générée par un bloc de recherche de point de puissance maximale.

### 3.2. Recherche de point de puissance maximale – MPP- :

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient de puissance  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine de manière à garder la vitesse spécifique  $\lambda$  égale à sa valeur optimale quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. De cette manière on assure le fonctionnement de la turbine avec un coefficient de puissance maximale. [9]

A partir de la courbe  $C_p(\lambda)$ , indiquée à la figure 1, on déduit que pour  $\beta=0$  ;  $C_p=0.479$  et  $\lambda_{opt}=8$ .

A partir de  $C_{p\_max}$  on déduit la puissance maximale selon la relation :

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_{p\_max} \quad (3.1)$$

Cette puissance est utilisée comme étant une puissance active de référence pour la commande directe de puissance.

Le schéma de la recherche de point de puissance maximale se résume à la figure 3.1. A partir de la vitesse du vent  $V$  et du coefficient de puissance maximale précalculé  $C_{pmax}$ , on calcule la puissance de référence  $P_{ref}$ .

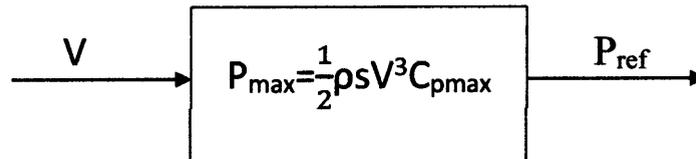


Figure 3.1 : le point maximal la puissance théorique

### 3.3. Commande directe de puissance DPC :

La commande directe de puissance (DPC) est basée sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive dans un réseau électrique. Les erreurs entre les valeurs de référence des puissances active et réactive instantanées et leurs mesures sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis. L'état de commutation des semi-conducteurs se déduit à partir d'un tableau de commutation à la base des sorties des comparateurs à hystérésis ainsi que le secteur contenant le vecteur de tension du réseau. [10]

#### 3.3.1. Détermination des secteurs :

On définit le vecteur de tension de réseau par:

$$e = e_{\alpha} + je_{\beta} \quad (3.2)$$

Avec :  $e_{\alpha}$  et  $e_{\beta}$  : les composantes de la tension du réseau dans le système d'axes biphasés

Stationnaire ( $\omega = 0$ ) :

$$e_\alpha = 2/3. (e_a. \cos(\omega t) + e_b. \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e_c. \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})) \quad (3.3)$$

$$e_\beta = -2/3. (e_a. \sin(\omega t) + e_b. \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e_c. \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})) \quad (3.4)$$

La position de ce vecteur e peut être déterminée à partir du calcul de l'angle  $\alpha$  :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{e_\beta}{e_\alpha}\right). \quad (3.5)$$

Suivant l'angle  $\alpha$ , on divise le plan  $\alpha$ - $\beta$  en six secteurs égaux de la manière suivante :

$\alpha$	$0 \leq \alpha < \pi/3$	$\pi/3 \leq \alpha < 2\pi/3$	$2\pi/3 \leq \alpha < \pi$	$-\pi \leq \alpha < -2\pi/3$	$-2\pi/3 \leq \alpha < -\pi/3$	$-\pi/3 \leq \alpha < 0$
s	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>

Tableau3.1 Définition des secteurs

A chaque instant, le vecteur e peut être situé dans un des six secteurs s<sub>1</sub> à s<sub>6</sub>.

### 3.3.2. Calcul des puissances :

Les puissances active et réactive instantanées sont proportionnelles aux composantes des courants directs et en quadratures :

D'après les équations (2.41), (2.43), (2.44) :

$$P = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (3.6)$$

$$Q = -\frac{3}{2} (e_d i_q - e_q i_d) \quad (3.7)$$

### 3.3.3. Définition des vecteurs de tension de sortie de l'onduleur :

La tension de sortie de l'onduleur dépend des états de commutation ( $F_a, F_b, F_c$ ). selon la variation de ces derniers, les vecteurs qui peuvent être utilisés sont :

$$V_1[1,0,0]$$

$$V_2[1,1,0]$$

$$V_3[0,1,0]$$

$$V_4[0,1,1]$$

$$V_5[0,0,1]$$

$$V_6[1,0,1]$$

Six vecteurs actifs

$$V_0[0,0,0]$$

$$V_7[1,1,1]$$

Deux vecteurs nuls (pas d'influence).

### 3.3.4. Effet des états de l'onduleur sur les puissances active et réactive :

Lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature. Ainsi pour analyser la variation de puissance il faut analyser la variation de courant.

La variation de courant est calculée à partir de l'équation suivante :

D'après la loi des mailles dans le réseau électrique :

$$V = e + L \cdot \frac{di}{dt} + Ri(t) \quad (3.8)$$

Ou :

$V$  : La tension de sortie de l'onduleur.

$e$  : La tension de réseau.

$L$  : Inductance d'une ligne de réseau.

$R$  : Résistance d'une ligne de réseau.

Les puissances active et réactive instantanées sont proportionnelles aux composantes des courants directs et en quadratures.

En négligeant la chute de tension dans la résistance, On peut déduire La variation du courant :

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V - e) \quad (3.9)$$

Donc cette variation est proportionnelle du vecteur  $(V - e)$ .

En considérant une différence constante, entre la tension de sortie de l'onduleur ( $V$ ) et la tension de réseau( $e$ ).

Le signe de ces incréments dépend de la position du vecteur de tension de réseau ( $e$ ) par rapport à la tension de sortie de l'onduleur ( $V$ ).

Donc :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L} (V_d - e_d) \quad (3.10)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} (V_q - e_q) \quad (3.11)$$

Les dérivées de puissance active et réactive dans le repère ( $d, q$ ) sont données par :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3}{2} \left( \frac{de_d}{dt} i_d + e_d \frac{di_d}{dt} \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{3}{2} \left( \frac{de_d}{dt} i_q + e_d \frac{di_q}{dt} \right) \quad (3.13)$$

On rappelle que la tension de réseau reste constante donc on obtient les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3}{2} \left( e_d \frac{di_d}{dt} \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{3}{2} \left( e_d \frac{di_q}{dt} \right) \quad (3.15)$$

Donc la variation des puissances active et réactive est proportionnelle à la variation du courant direct et quadrature respectivement.

$$\Delta P = \Delta i_d$$

$$\Delta Q = -\Delta i_q$$

D'après les équations (3.10), (3.11) on déduit :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3}{2} \left( e_d \frac{1}{L} (V_d - e_d) \right) \quad (3.16)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{3}{2} \left( e_d \frac{1}{L} (V_q - e_q) \right) \quad (3.17)$$

Donc la variation des puissances active et réactiveest dépend du vecteur( $V - e$ ).

On prend un cas dans un secteur :

Par exemple le secteur 1 dans le cas :

$$P_{ref} - P \geq 0, Q_{ref} - Q \geq 0$$

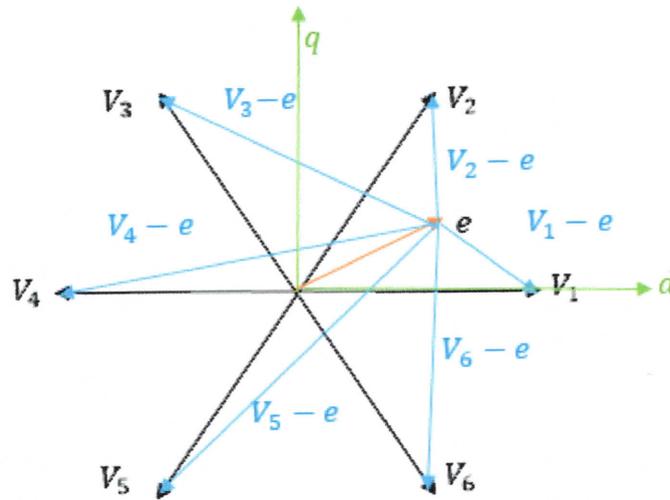


Figure 3.2 : calcul de vecteur( $V - e$ ) pour le cas de secteur 1.

Le tableau suivant présente les signes des variations des puissances actives et réactives instantanées pour chaque vecteur de tension de sortie de l'onduleur selon le secteur où se trouve la tension de réseau.

vecteur	V1	V2	V3	V4	V5	V6
$P$	↑	↑	↓	↓	↓	↑
$Q$	↑	↑	↑	↑	↑	↓

Tableau : 3.2 l'effet de chaque vecteur sur  $P$  et  $Q$ .

Une analyse de tableau, montre que dans certains cas il y a plusieurs possibilités d'obtention d'un même incrément (les mêmes signes de  $P$  et  $Q$  sont obtenus en appliquant différents vecteurs). Dans ce cas le choix du vecteur de tension est celui qui provoque la variation de puissance la plus faible.

Cette effet peut être obtenu par la projection de  $(V - e)$  sur les axes  $detq$ .

Le choix du mode de commutation de l'onduleur est imposé par deux bandes d'hystérésis  $H_p, H_q$  de façon à ce que les erreurs, entre les valeurs de référence des puissances ( $P_{ref}, Q_{ref}$ ) et les valeurs mesurées, doivent rester dans ces bandes.

Pour parvenir à ce but, les erreurs des puissances active et réactive instantanées sont traitées par deux comparateurs à hystérésis de deux niveaux, dont les sorties (SP, SQ) sont mise à 1 pour augmenter la variable de contrôle ( $P$  ou  $Q$ ) et à 0 pour quelle reste inchangée ou doit diminuer.

### 3.3.5. Régulateur à hystérésis :

Le schéma de principe de la figure suivante donne deux régulateurs à hystérésis à deux niveaux. Pour réaliser le réglage des puissances active et réactive. L'un est influencé par l'erreur  $\Delta P = P_{ref} - P$  pour la puissance active. L'autre est influencé par l'erreur

$\Delta Q = Q_{ref} - Q$  Pour la puissance réactive.

Le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour la puissance instantanée active peut être décrit comme suite :

$$\Delta P > H_p \longrightarrow SP=1$$

$$-H_p \leq \Delta P \leq H_p \text{ Et } \frac{d\Delta P}{dt} > 0 \longrightarrow SP=0$$

$$-H_p \leq \Delta P \leq H_p \text{ Et } \frac{d\Delta P}{dt} < 0 \longrightarrow SP=1$$

$$\Delta P < -H_p \longrightarrow SP=0$$

Et le même pour le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour la puissance réactive :

$$\Delta Q > H_q \longrightarrow SQ=1$$

$$-H_q \leq \Delta Q \leq H_q \text{ Et } \frac{d\Delta Q}{dt} > 0 \longrightarrow SQ=0$$

$$-H_Q \leq \Delta Q \leq H_Q \text{ Et } \frac{d\Delta Q}{dt} < 0 \longrightarrow SP=1$$

$$\Delta Q < H_Q \longrightarrow SP=0$$

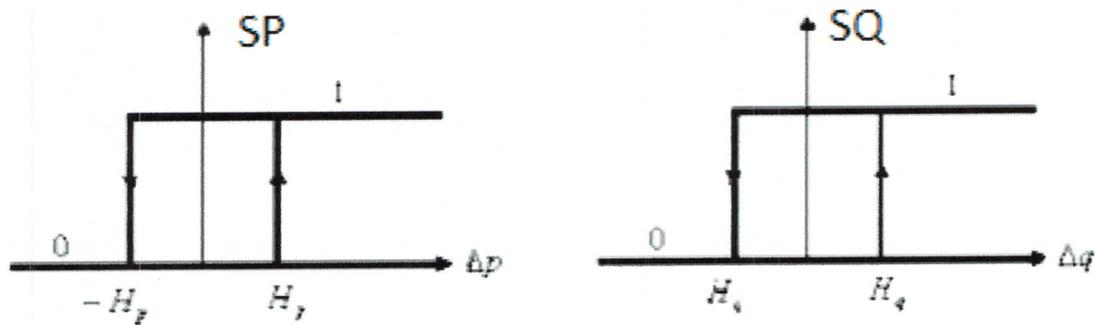


Figure 3.3 : Caractéristique de régulateur à hystérésis

3.3.6. Table de commutation :

Le tableau de commutation à six secteurs est décrit comme suite :

Secteur	S1	S2	S3	S4	S5	S6
SP, SQ						
SP=1, SQ=1	V1	V2	V3	V4	V5	V6
SP=1, SQ=0	V2	V3	V4	V5	V6	V1
SP=0, SQ=1	V5	V6	V1	V2	V3	V4
SP=0, SQ=0	V3	V4	V5	V6	V1	V2

Tableau 3.3 : table de commutation des vecteurs dans les six secteurs



3.3.7. Schéma de commande (DPC) :

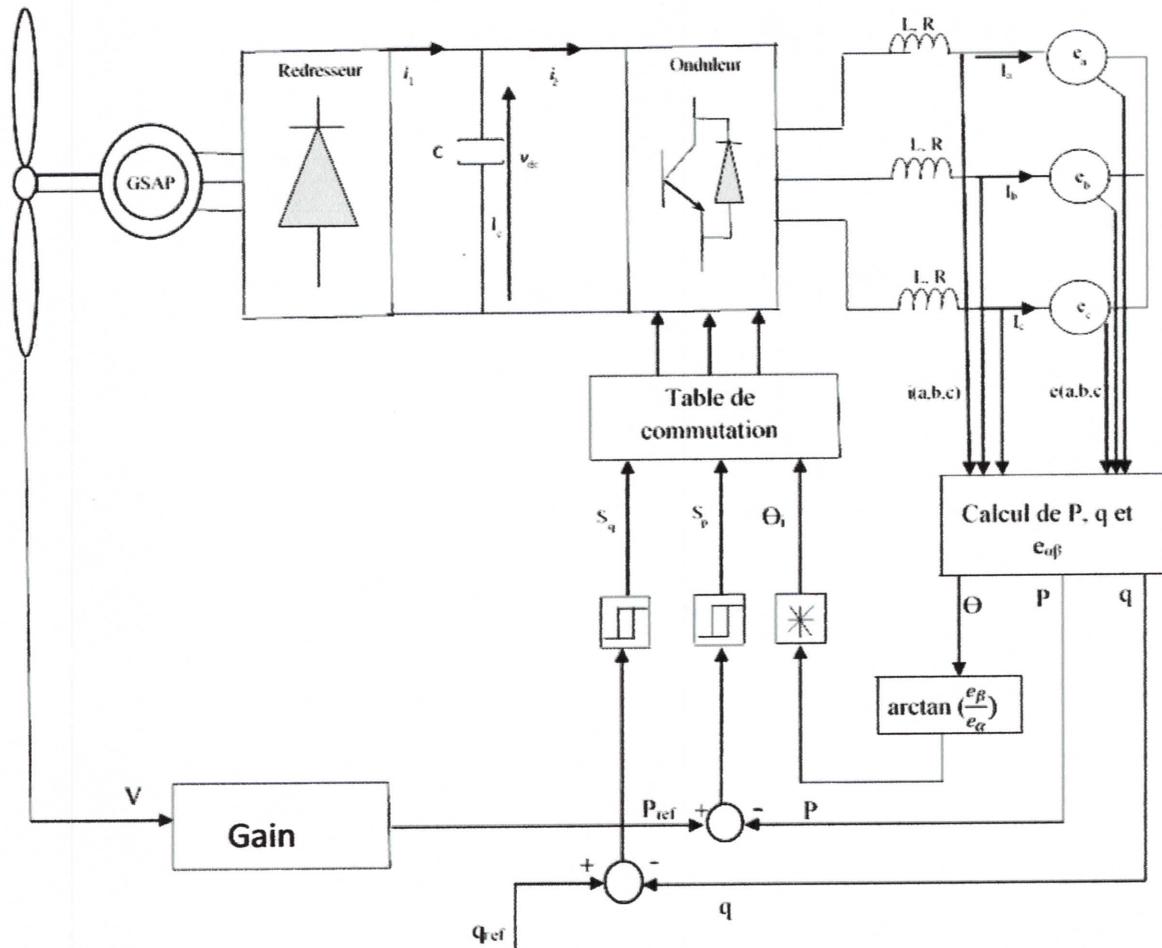


Figure 3.4 : schéma de commande avec régulateur à hystérésis.

3.3.8. Simulation numérique :

L'application d'une commande directe de puissance sur la chaîne de conversion permet de contrôler la puissance active et réactive suivant la vitesse du vent.

La figure 3.5 présente le schéma Simulink de la chaîne de conversion réalisé pour faire la simulation. Les éléments constituant ce schéma sont : Dans l'entrée de la turbine il y a la vitesse du vent  $V$  et l'angle de calage  $\beta$ , après la turbine il y a le multiplicateur, la MSAP, le redresseur, le bus continu, l'onduleur, le réseau et dernièrement les deux stratégies de commande -MPPT- et la DPC qui nécessite de calculer les puissances  $P$  et  $Q$  et d'imposer la  $Q_{ref}$  et les deux comparateurs à hystérésis.



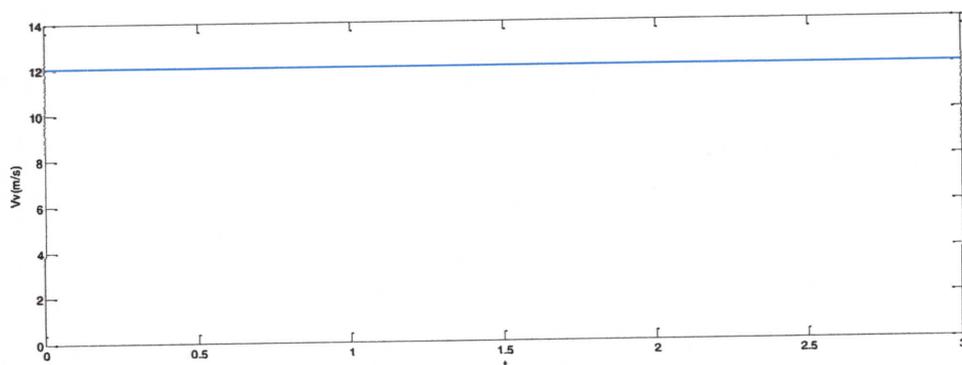


Figure 3.6 : La vitesse du vent.

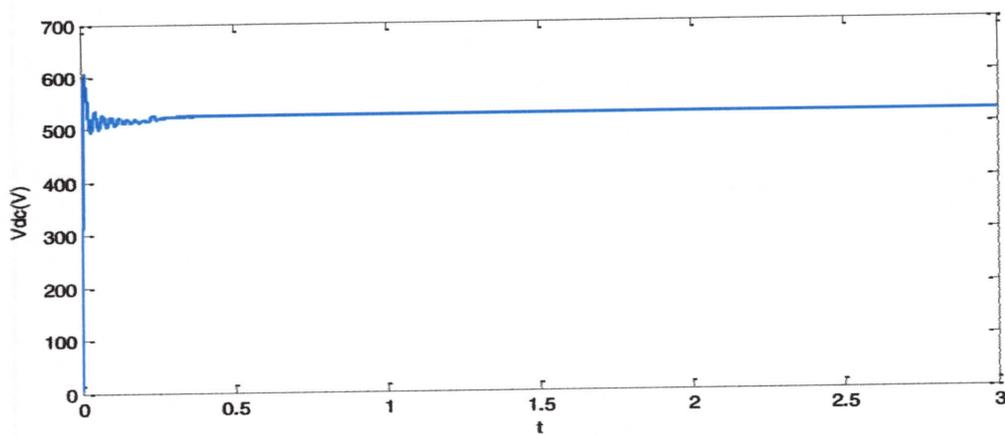


Figure 3.7 : La tension du bus continu.

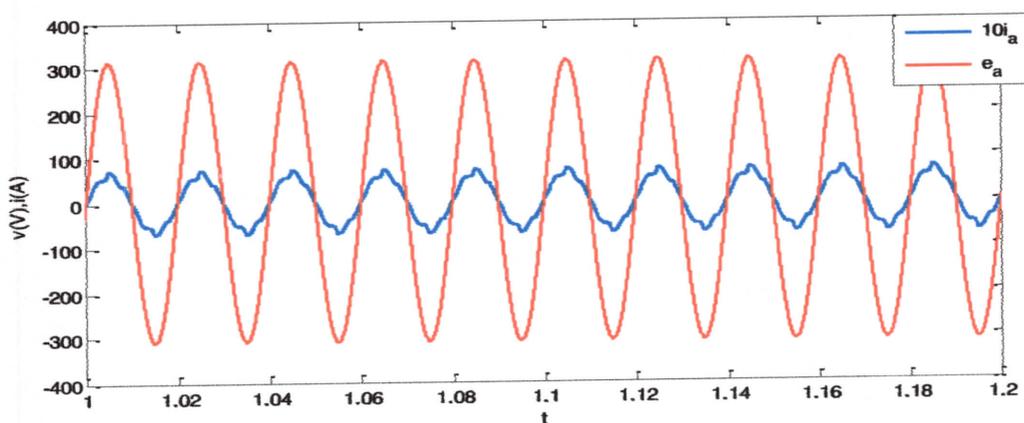


Figure 3.8 : Le courant et la tension d'une ligne du réseau.

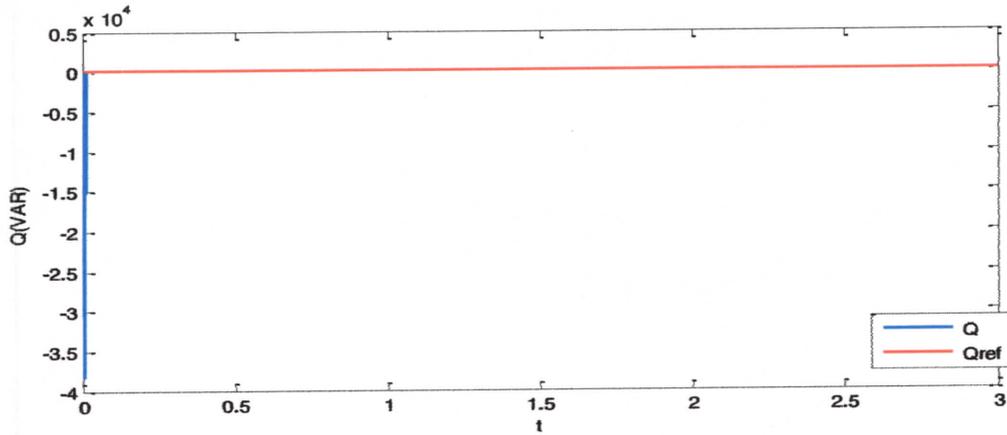


Figure 3.9 : La puissance réactive.

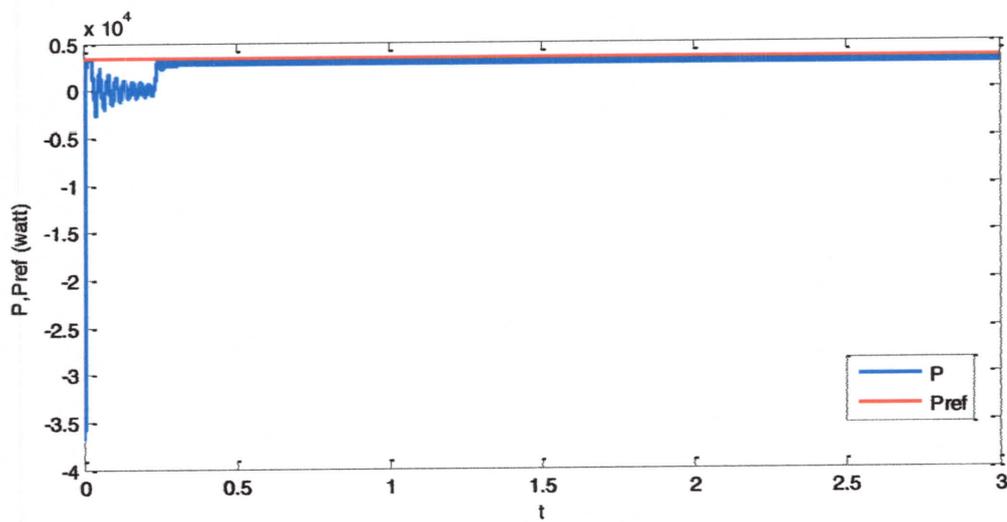


Figure 3.10 : La puissance active.

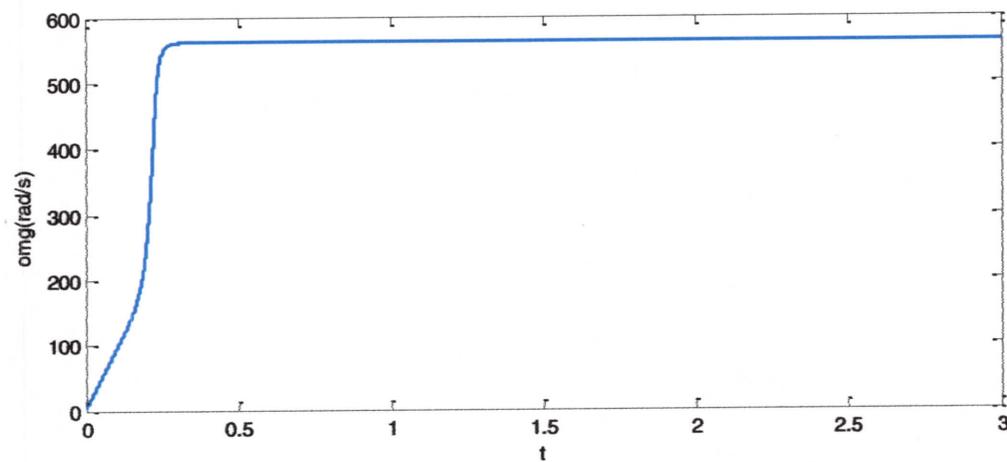


Figure 3.11 : la vitesse de rotation de la MSAP.

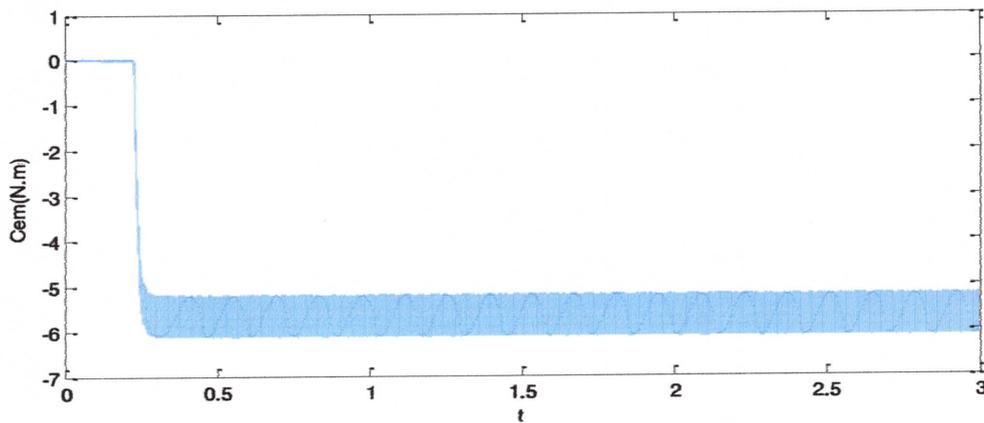


Figure 3.12 : le couple électromagnétique.

On simule un test de diminution de la vitesse du vent de 12m/s à 10m/s (fig.3.13). Les résultats de simulation de ce test sont indiqués dans les figures 3.13 à la figure 3.18.

La fig. 3.13 indique la vitesse du vent qui est varié de 12m/s à 10m/s a l'instant  $t=1.5s$ .

La fig. 3.14 indique la tension de bus continu. On remarque que la tension de bus continu, présente d'une perturbation à l'instant de l'application la variation de la vitesse du vent puis se stabilise.

La fig. 3.15 indique la puissance active. Cette puissance active suit la puissance active de référence quel que soit les variations de la vitesse du vent.

La fig. 3.16 indique la puissance réactive. La variation de la vitesse du vent ne provoque aucune influence sur la puissance réactive qui est suit la puissance réactive de référence.

La fig. 3.17 indique la vitesse de rotation de MSAP. On remarque que la vitesse de rotation de la MSAP diminue à l'instant de la diminution de la vitesse du vent.

La fig. 3.18 indique le couple électromagnétique. On remarque que le couple électromagnétique diminue à l'instant de la diminution de la vitesse du vent.

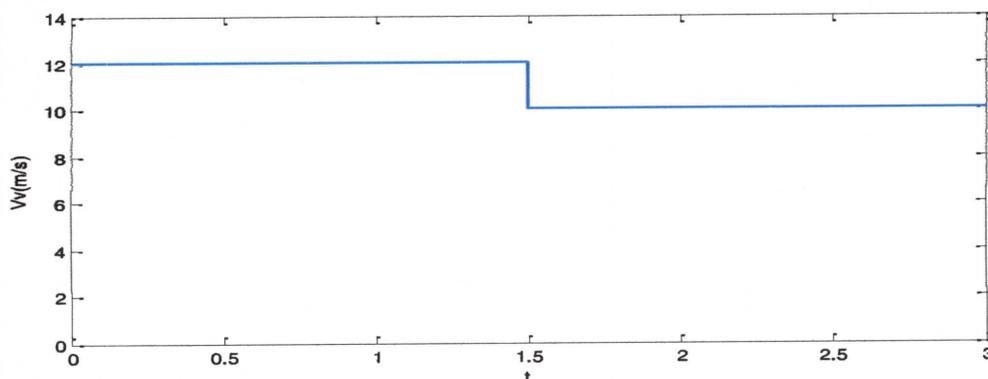


Figure 3.13 : La vitesse du vent.

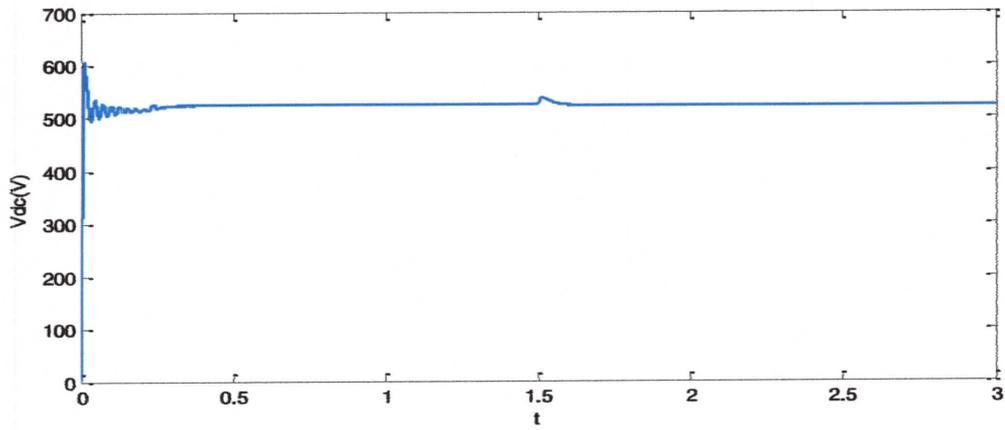


Figure 3.14 : La tension de bus continu.

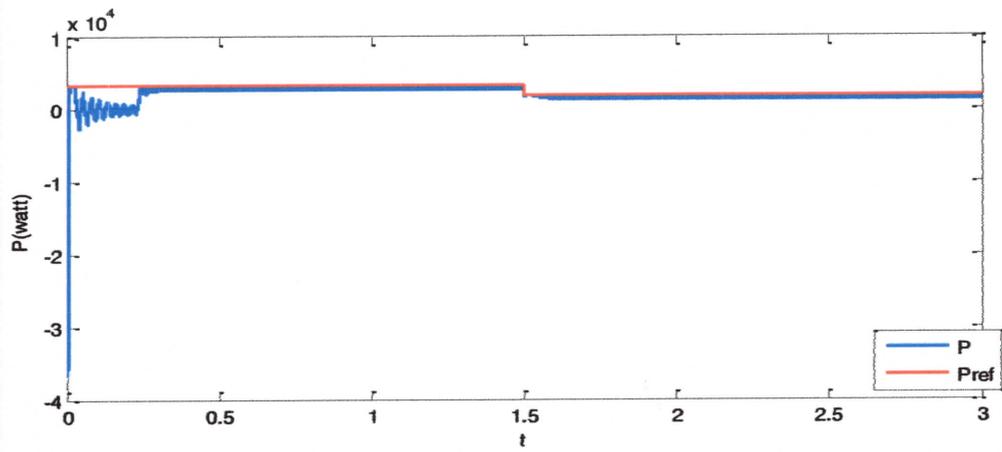


Figure 3.15 : La puissance active.

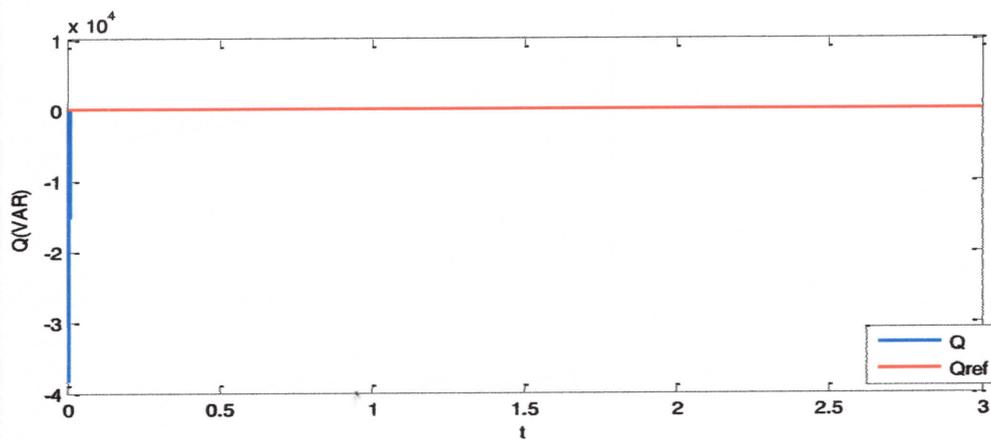


Figure 3.16 : La puissance réactive.

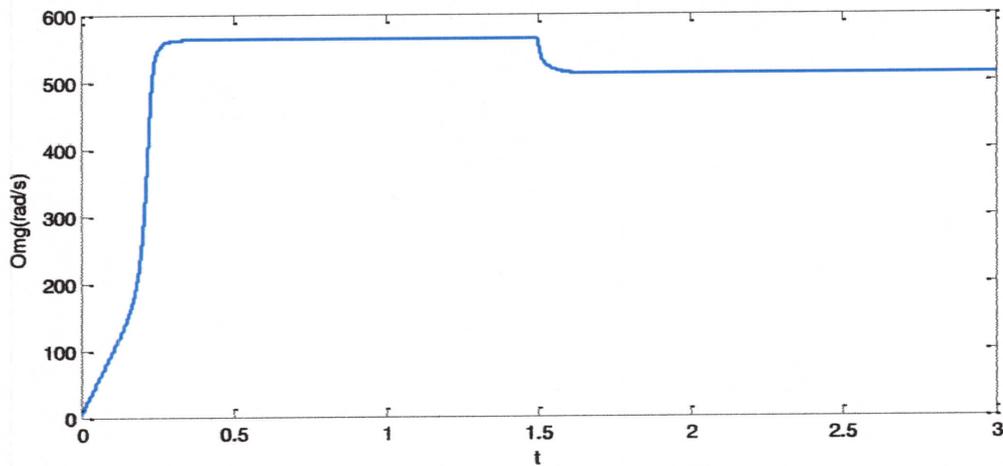


Figure 3.17 : la vitesse de rotation de la MSAP

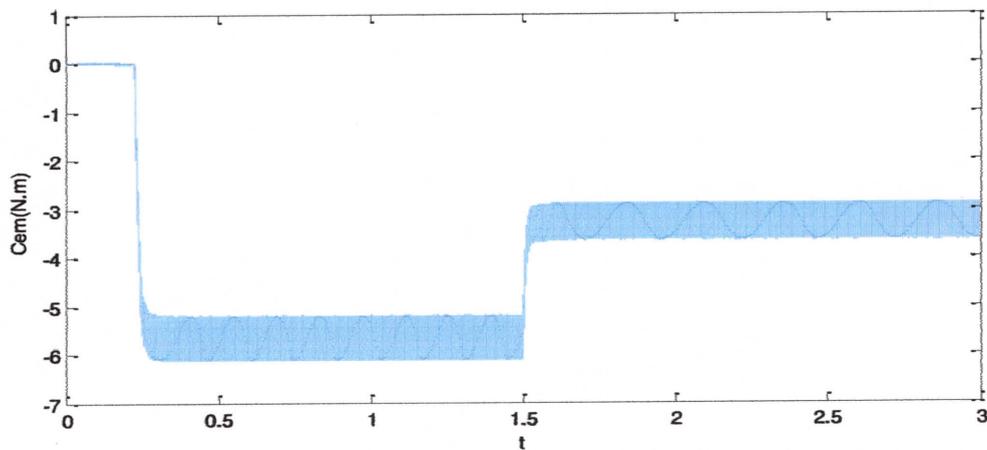


Figure 3.18 : le couple électromagnétique.

On simule un test d'augmentation de la vitesse du vent de 10m/s à 12m/s (fig.3.19). Les résultats de simulation de ce test sont indiqués dans les figures 3.20 à la figure 3.24.

La fig.3.20 indique la tension de bus continu. On remarque que la tension de bus continu, présente d'une perturbation à l'instant de l'application la variation de la vitesse du vent puis se stabilise.

La fig.3.21 indique la puissance active. Cette puissance active suit la puissance active de référence quel que soit les variations de la vitesse du vent.

La fig.3.22 indique la puissance réactive. La variation de la vitesse du vent ne provoque aucune influence sur la puissance réactive qui est suivie la puissance réactive de référence.

La fig.3.23 indique le couple électromagnétique. On remarque que le couple électromagnétique augmente à l'instant de l'augmentation de la vitesse du vent.

La fig.3.24 indique la vitesse de rotation de MSAP. On remarque que la vitesse de rotation de la MSAP augmente à l'instant de l'augmentation de la vitesse du vent.

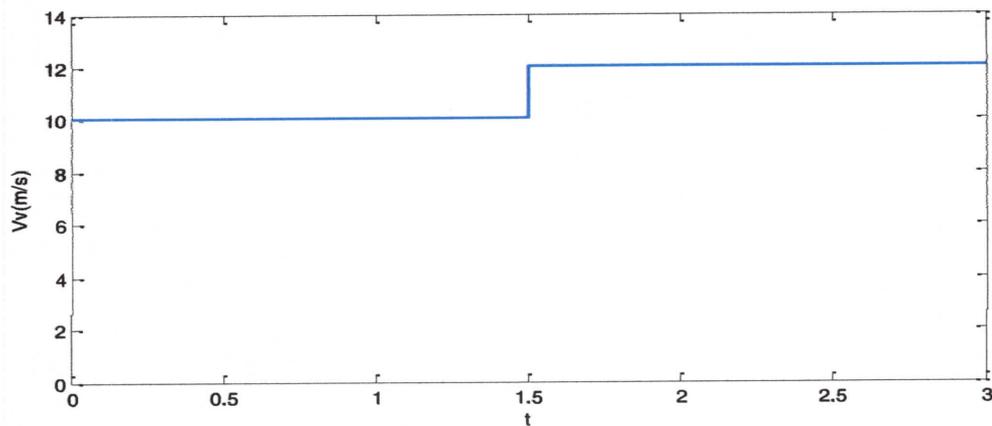


Figure 3.19 : La vitesse du vent.

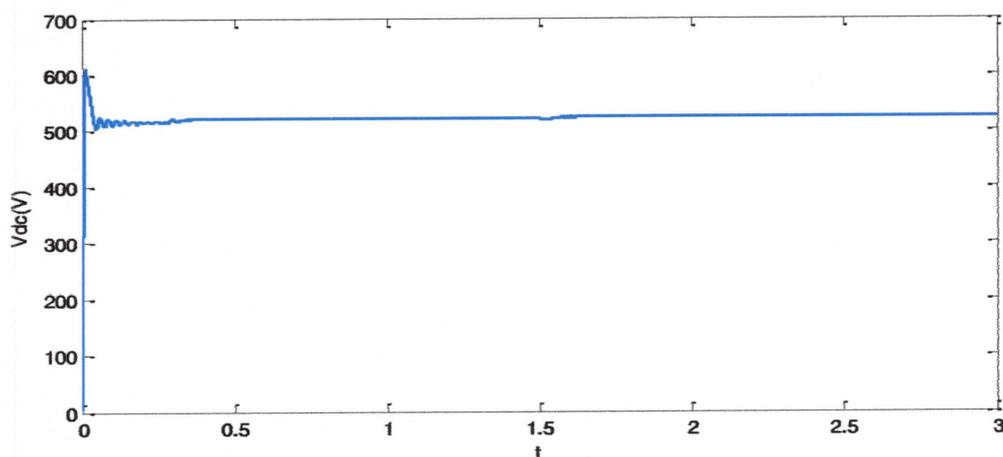


Figure 3.20 : La tension du bus continu.

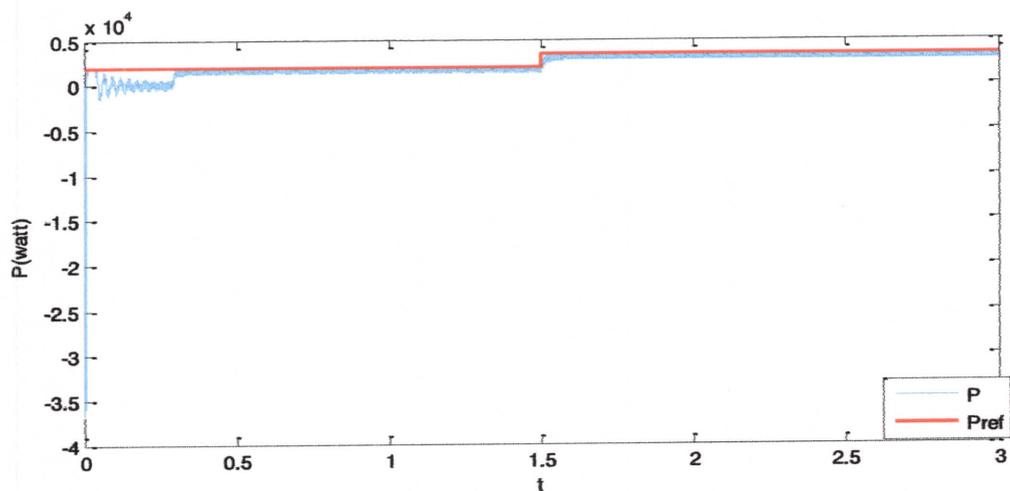


Figure 3.21 : La puissance active.

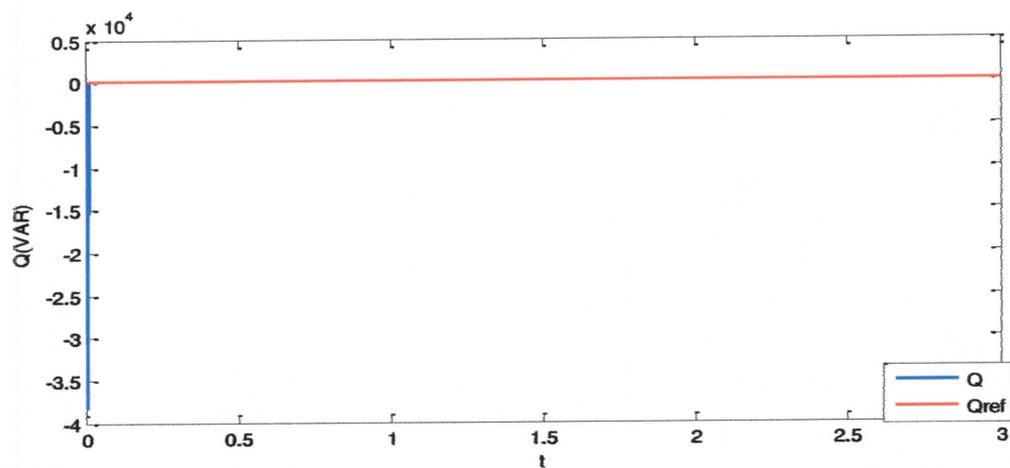


Figure 3.22: La puissance réactive.

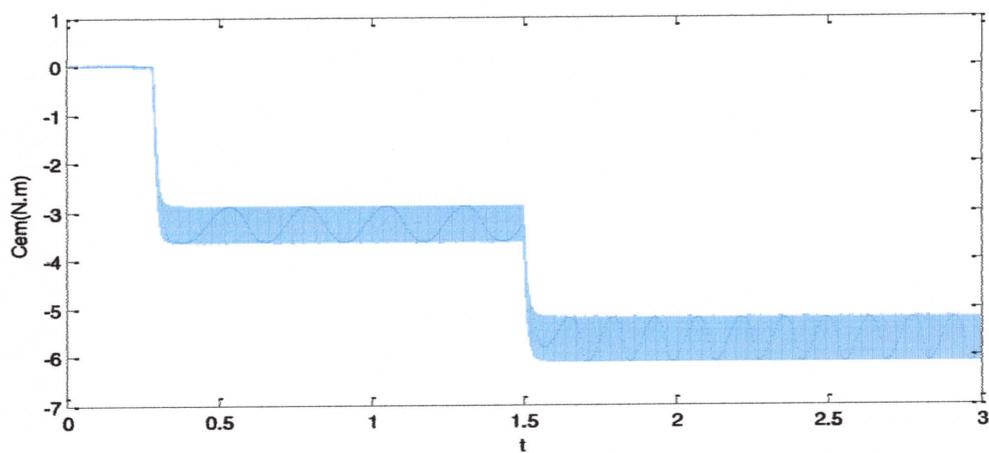


Figure 3.23 : le couple électromagnétique.

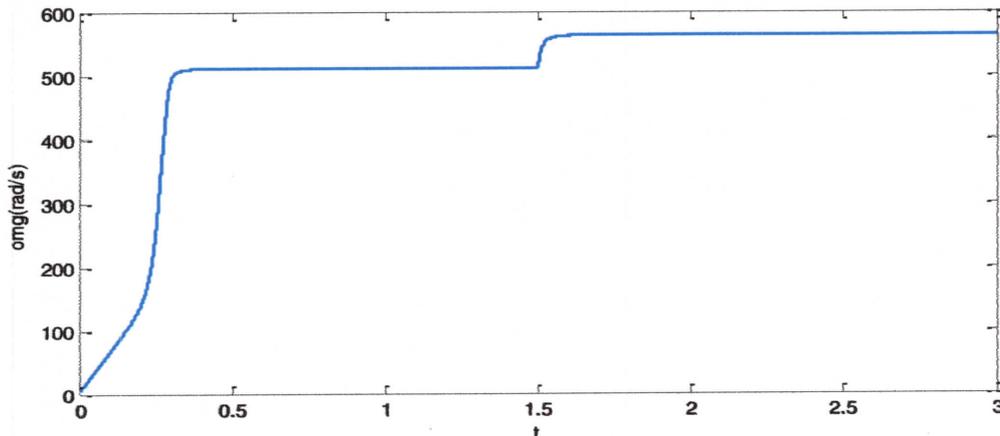


Figure 3.24 : la vitesse de rotation de la MSAP.

On simule un test de variation de la puissance réactive de référence à une valeur de 1000 VAR (figure 3.25), on remarque que la puissance réactive suit la puissance réactive de référence imposé par nous. Les résultats de simulation de ce test sont indiqués dans les figures 3.26 à la figure 3.29.

La figure 3.26 montre la puissance active. On remarque que la puissance active suit la puissance active de référence après un léger dépassement.

La figure 3.27 montre la vitesse de rotation de la MSAP. On remarque que la variation de la puissance réactive de 0 à 1000 VAR ne provoque aucune influence sur vitesse de rotation de la MSAP. Cette vitesse représente une croissance rapide.

La figure 3.28 montre le couple électromagnétique. On remarque que la variation de la puissance réactive de 0 à 1000 VAR ne provoque aucune influence sur le couple électromagnétique. Le couple électromagnétique suit le couple appliqué à la MSAP.

La figure 3.29 montre la tension du bus continu. On remarque que la variation de la puissance réactive de 0 à 1000 VAR ne provoque aucune influence sur la tension du bus continu. On remarque qui est présente un léger dépassement, puis se stabilise rapidement. Cependant cette tension est superposée par des faibles ondulations qu'on peut supprimer par l'utilisation du tableau de douze secteurs.

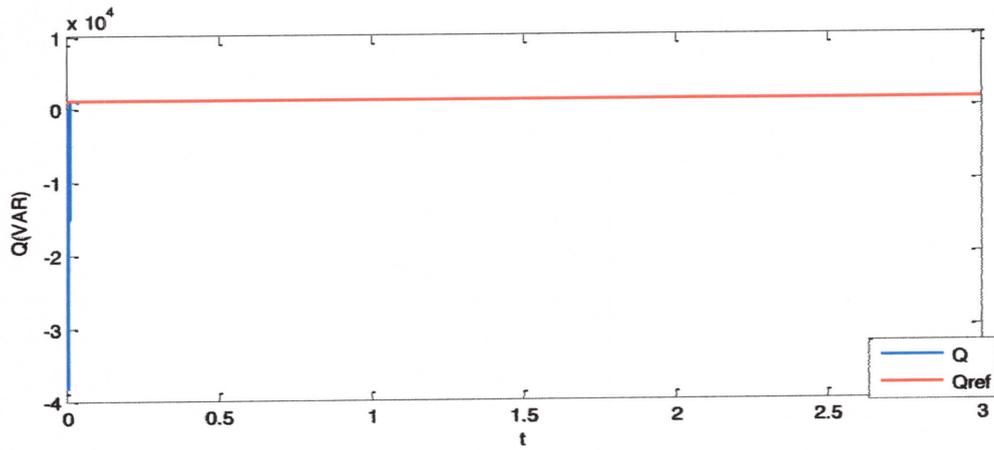


Figure 3.25 : la puissance réactive.

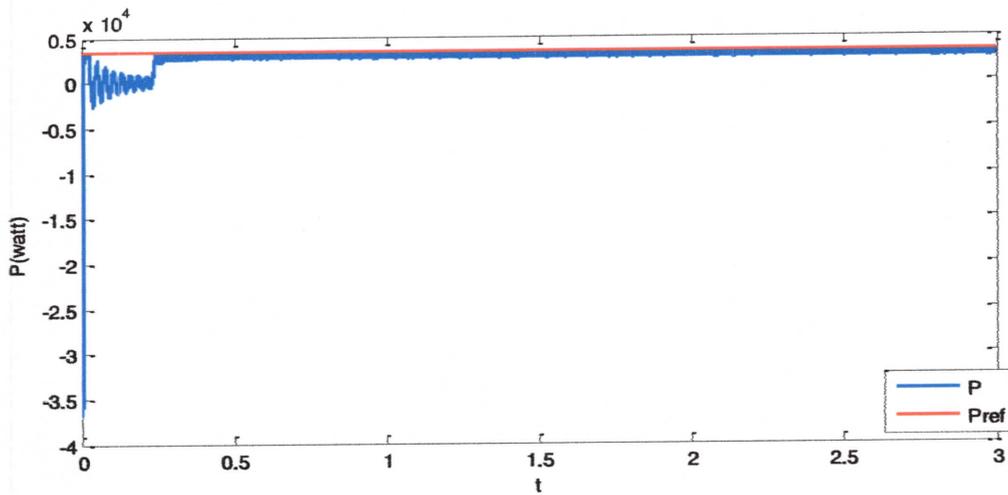


Figure 3.26 : la puissance active.

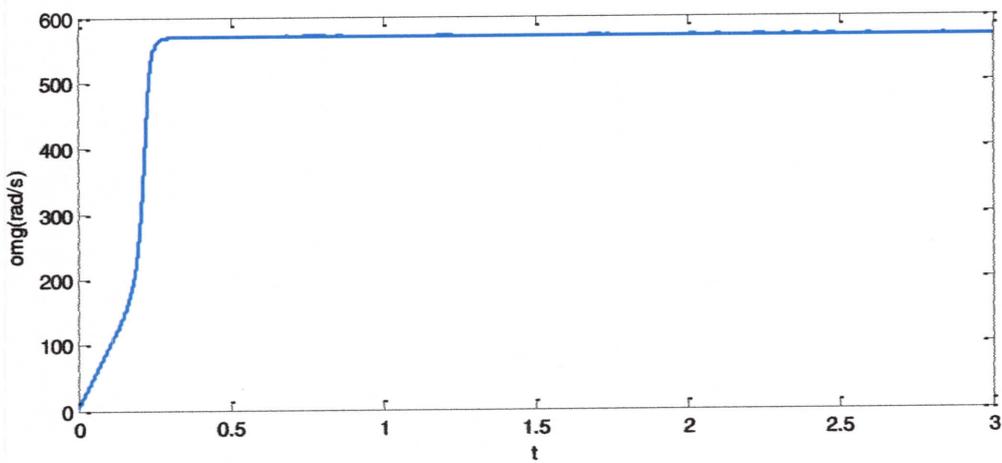


Figure 3.27 : la vitesse de rotation de la GSAP.

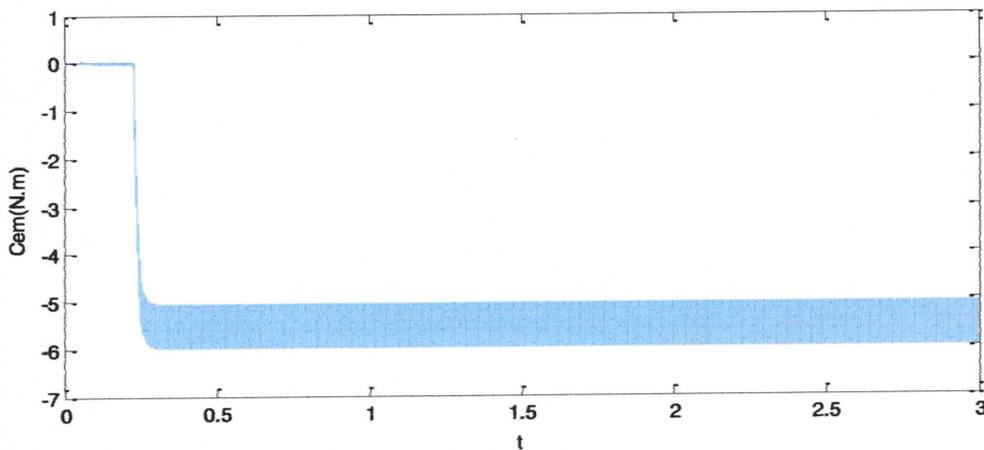


Figure 3.28 : le couple électromagnétique.

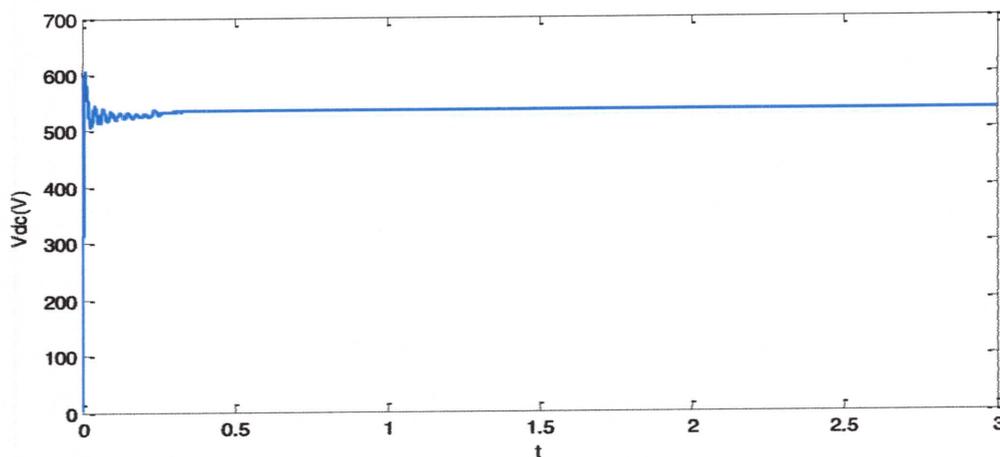


Figure 3.29 : la tension du bus continu.

On simule un test de variation de la largeur de la bande d'hystérésis de  $h=10$ ,  $h=100$ ,  $h=500$ .

Les figures 3.30, 3.31 Indique un zoom de puissance active et réactive pour une largeur de la bande  $h=10$ ,

On remarque que les nombres de commutation trop élevé et plus précise.

Les figures 3.32, 3.33 Indique un zoom de puissance active et réactive pour une largeur de la bande  $h=100$ ,

On remarque que les nombres de commutation élevé et de faible précision.

Les figures 3.34, 3.35 Indique un zoom de puissance active et réactive pour une largeur de la bande  $h=500$ ,

On remarque que les nombres de commutation est faible et de très faible précision.

D'après les six figures 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34, 3.35 on remarque que l'augmentation de la bande d'hystérésis réduire le nombre de commutation mais réduire la précision.

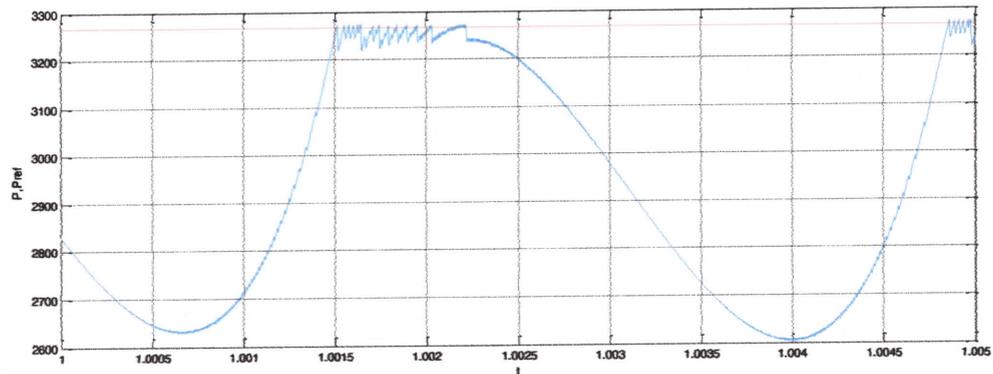


Figure 3.30 : zoom de puissance active pour une bande de largeur  $h=10$ .

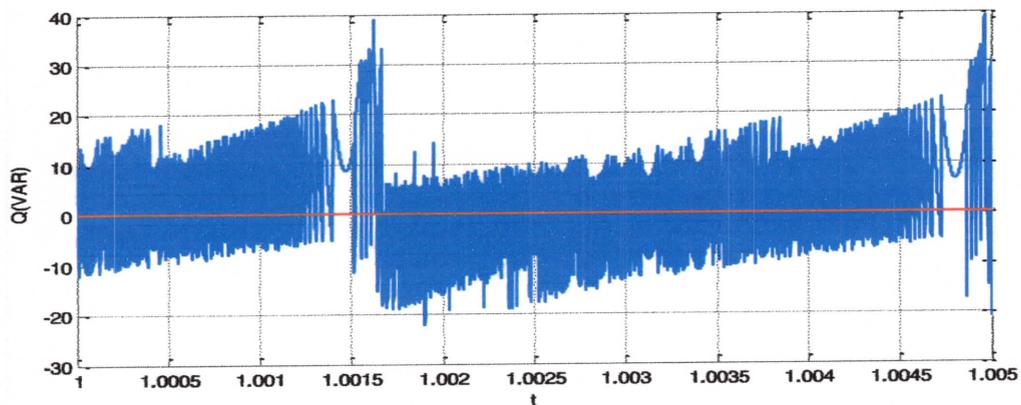
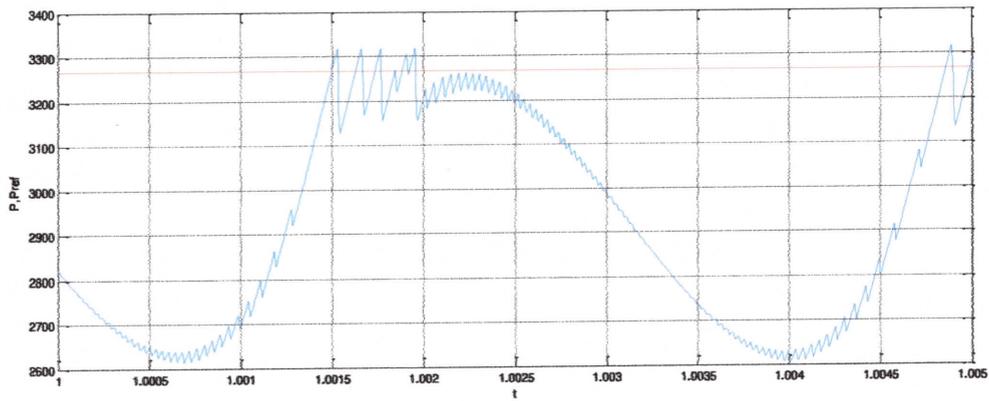
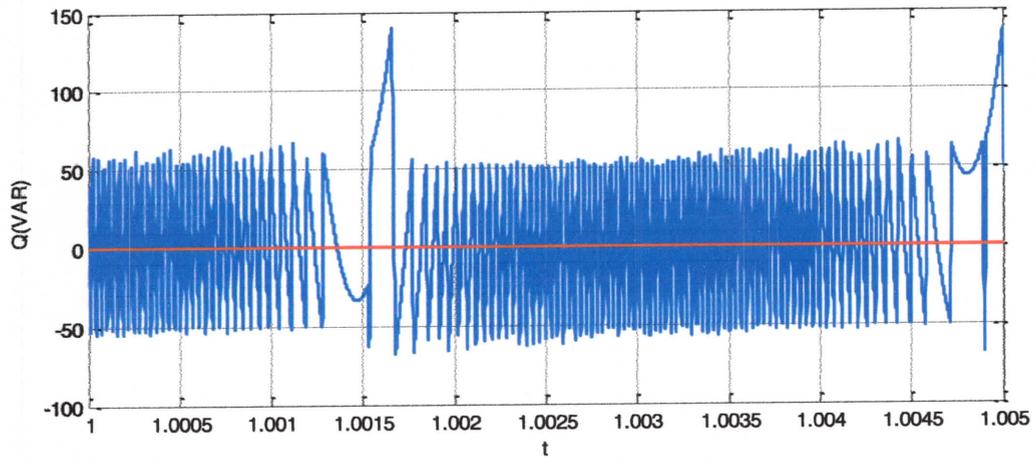


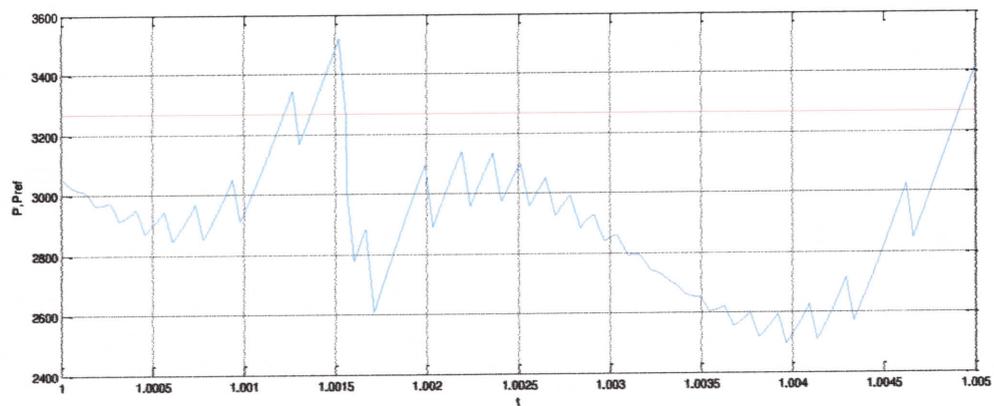
Figure 3.31 : zoom de puissance réactive pour une bande de largeur  $h=10$ .



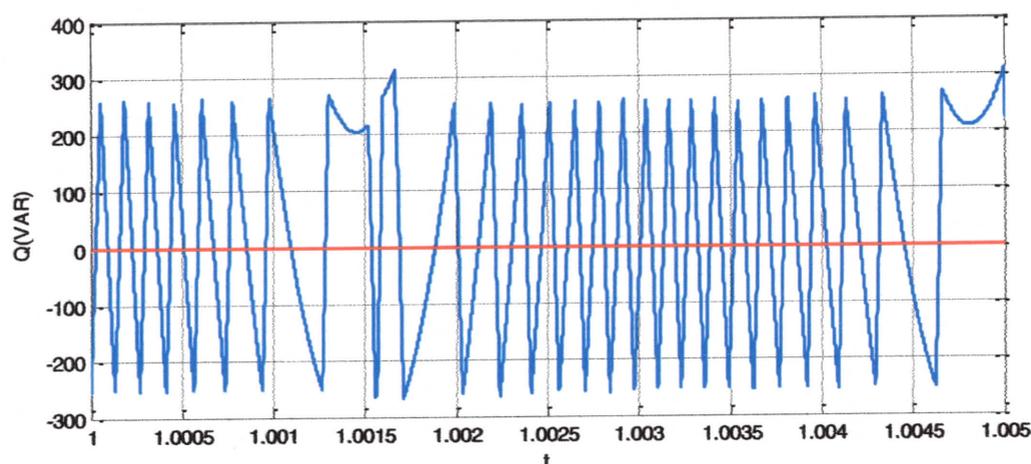
La figure 3.32 : zoom de puissance active pour une bande  $h=100$ .



La figure 3.33 : zoom de puissance réactive pour une bande  $h=100$ .



La figure 3.34 : zoom de puissance active pour une bande  $h=500$ .



La figure 3.35 : zoom de puissance réactive pour une bande  $h=500$ .

**Les paramètres de simulation :**

$R_{réseau}$	0.25 $\Omega$
$L_{réseau}$	0.01H
$e_{réseau}$	220V
$R_{turbine}$	1.525m
$\rho$	1.08
Temps de simulation	3s
C	0.001F

**1.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne de conversion éolienne, en appliquant la commande du point de puissance maximale et la commande directe de puissance.

On a constaté que la chaîne fonctionne toujours dans le point correspondant à la puissance maximale de la turbine, quel que soit la vitesse du vent.

On a constaté que la commande directe de puissance permet de séparer la commande de la puissance active et de la puissance réactive, et par conséquent on peut contrôler le facteur de puissance du réseau dans lequel la puissance est injectée.

On a vu qu'on peut réduire la fréquence de commutation des interrupteurs des convertisseurs de la chaîne de conversion par l'introduction des régulateurs à hystérésis, avec l'inconvénient de la réduction de la précision du réglage, qui dépend de la largeur de la bande d'hystérésis.

### **Conclusion générale :**

Dans le cadre de la réalisation du mémoire master, nous avons étudié une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à la base d'une machine synchrone à aimant permanent.

Dans le premier chapitre, une généralité sur les systèmes éoliens a été présentée. Ce système prend son place dans la production de l'énergie électrique mondiale. Puis nous avons parlé des différents types des éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons parlé aussi sur les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la définition et le modèle de chaque élément constituant notre chaîne de conversion de l'énergie éolienne, chacun de ces éléments à son rôle dans la chaîne de conversion. Nous constatons à partir de la caractéristique de la turbine qu'elle possède toujours un point de fonctionnement pour lequel, la puissance produite est maximale. La définition et le modèle de la MSAP permet de connaître les caractéristiques et performances de cette machine qui est connectée à la turbine. Le redresseur permet de redresser les tensions de sorties de la MSAP, le bus continu permet de filtrer cette tension redressée, et l'onduleur permet de transformer la tension filtrée en une tension alternative mais il est besoin d'une commande pour assurer de conditionner l'injection de la puissance au réseau triphasé électrique.

Dans le dernier chapitre, nous avons appliqué une technique de commande pour la recherche de point maximal de puissance –MPPT- qui est fourni comme une valeur de référence de la puissance active vers le deuxième bloc de commande qui est le bloc de la commande directe de puissance DPC qui permet de commander l'onduleur pour assurer l'amélioration de l'énergie électrique injectée au réseau électrique. Nous avons appliqué une structure de la DPC, c'est la DPC avec régulateur à hystérésis, d'après les résultats de simulation nous avons déduit qu'il y a plusieurs paramètres qui permettent de commander les puissances, pour cela la DPC assure une bonne amélioration de l'énergie électrique injectée dans le réseau triphasé électrique.

Comme suite de ce travail, propose d'appliquer d'autres stratégies de commande de la cascade, que ce soit pour le calcul de point de puissance maximale, ou la commande des puissances injectées dans le réseau, dans le but d'améliorer les performances de la conversion.



# *Bibliographie*

- [1]. H.CAMBLONG "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable", THESE de DOCTORAL, Ecole National Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, spécialité : Automatique. Soutenu le 18 décembre 2003.
- [2]. Statistiques mondiales sur l'énergie éolienne en 2015 " <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/> ".site internet.
- [3]. L. MOREAU « Modélisation, Conception et Commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse » THÈSE de DOCTORAT, Ecole Polytechnique de l'université de Nantes spécialité : Electronique et Génie Electrique, soutenu le 9 décembre 2005.
- [4]. " <http://sites-final.uclouvain.be/elec/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/DifferentesTechnologies/DifferentesTechnologiesEolien2.htm> ". site internet.
- [5]. MATLAB, Simulink, SimPowerSystems, Wind Generation-help.
- [6]. S.BELAKEHAL « conception et commande des machines à aimants permanents Dédiées aux Energie Renouvelable» THÈSE de DOCTORAT de l'université de Constantin.
- [7]. W.HIBER "Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne" Mémoire magistère de université de Setif, 2013.
- [8]. S.HAMECHA "Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants permanents" Mémoire de Magistère de université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013.
- [9]. A.MAMADIE SYLIA "Modélisation d'un Emulateur Eolien à Base de Machine Asynchrone à Double Alimentation" Mémoire présenté à l'université du Québec 2013. 
- [10]. F.KENDOULI "Centrale Eolienne et Qualité de l'Energie Electrique" Mémoire Doctorat de l'Université de Mentouri Constantine 2012.