

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**  
**Université A.MIRA-BEJAIA**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique**

# **Mémoire de Fin d'études**

**Pour l'obtention du diplôme de Master en électromécanique**  
**Spécialité : Électromécanique**

## **Thème**

**Modélisation et commande d'un**  
**aérogénérateur synchrone à aimant**  
**permanent**

**Réalisé par :**

Mr. Mazouz Fares

Mr. Korichi Mohand

**Encadré par :**

Mr. B. Fella

**Année Universitaire : 2018/2019**

## ***Remerciements***

Tout d'abord, nous remercions ; dieu le tout puissant; de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études.

Nous tenons à remercier très vivement notre promoteur Monsieur

**B. Fella**, enseignant à l'université de Bejaïa, pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de sa réalisation, pour sa disponibilité ainsi que pour nous avoir fait bénéficier de sa compétence scientifique et nous avoir supporté pendant toute la durée du travail.

Nous tenons à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury.

Nous tenons aussi à remercier tous les membres de nos familles respectives pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Enfin, nous remercions tous nos amis. Notamment nos copains de chambres de cité.

Et toute personne ayant apporté un plus ; de près ou de loin ; à l'élaboration du présent travail.

## ***Remerciements***

Tout d'abord, nous remercions ; dieu le tout puissant; de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études.

Nous tenons à remercier très vivement notre promoteur Monsieur

**B. Fella**, enseignant à l'université de Bejaïa, pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de sa réalisation, pour sa disponibilité ainsi que pour nous avoir fait bénéficier de sa compétence scientifique et nous avoir supporté pendant toute la durée du travail.

Nous tenons à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury.

Nous tenons aussi à remercier tous les membres de nos familles (mes parents, mes frères et mes sœurs) respectives pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Enfin, nous remercions tous nos amis. Notamment nos copains de chambres de cité, Et toute personne ayant apporté un plus ; de près ou de loin ; à l'élaboration du présent travail.

## ***Dédicaces***

✚ *Je dédie ce modeste travail :*

✚ *A mes chers parents qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études*

✚ *A mes deux sœurs*

✚ *A mes frères*

✚ *A tous mes amis et à tous ceux qui me sont chers*

✚ *A mon camarade et binôme « Korichi Mohand » et toute sa famille.*

## ***Dédicaces***

✚ *Je dédie ce modeste travail :*

✚ *A mes chers parents qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études*

✚ *A mes sœurs*

✚ *A mes frères*

✚ *A tous mes amis et à tous ceux qui me sont chers*

✚ *A mon camarade et binôme « MazouzFares » et toute sa famille.*

## Liste des abréviations

### Liste des abréviations

$C_p$  : Coefficient de puissance.

$\lambda$ : vitesse spécifique (réduite) de la turbine éolienne.

$B$  : Induction magnétique [T].

$H$  : Champ magnétique [A/m].

$B_r$  : Induction rémanents [T].

$V_v$  : Vitesse de vent [m/s].

$P_v$ : Puissance de vent de la turbine[w].

$R$  : Rayon de l'éolienne [m].

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

$\beta$ : Angle d'orientation des pales [rad].

$\Omega_{mec}$ : Vitesse mécanique de la turbine [rad/s].

$\rho$  : Masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>].

$S$  : Surface balayée par la turbine [m<sup>2</sup>].

$\lambda$ : Rapport de vitesse.

$P_{aero}$ : Puissance aérodynamique [W].

$C_{aero}$  : Couple aérodynamique [N.m].

$G$  : Gain du multiplicateur de vitesse.

$J_{turbine}$ : Moment d'inertie de la turbine [kg.m<sup>2</sup>].

$J_g$  : Moment d'inertie de la génératrice [kg.m<sup>2</sup>].

$C_{mec}$  : Couple mécanique [N.m].

$C_{em}$  : Couple électromagnétique [N.m].

$C_{visq}$ : Couple des frottements visqueux [N.m].

$f$  : Coefficient de frottement visqueux [N.m.s/rd].

a, b, c, Indices du repère naturel triphasé.

$V_a, V_b, V_c$ : Tensions de phase statoriques dans l'axe (a, b, c) [V].

$i_{aibic}$ : Courants de phase statoriques dans l'axe (a, b, c) [A].

$\varphi_a, ,$  : Flux de phases statoriques dans l'axe (a, b, c) [Wb].

[ $M_{sf}$ ] : Matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator

[ $L_{s0}$ ] : Inductance propre d'une phase statorique [H].

[ $L_{s2}$ ] : Matrice inductance stator [H].

$\Omega$  : La vitesse angulaire mécanique rotorique [rad/s]. Liste des symboles et abréviations

## Liste des abréviations

$\theta$ : Angle entre le stator et le rotor [rad].

d, q : Indices du repère Park biphasé.

$\psi$  : Flux dans les axes (d, q) [Wb].

$\varphi_{sf}$ : Flux induction produit par aimant permanent [Wb].

RS : Résistance de l'enroulement statorique [ $\Omega$ ].

Vd, Vq: Tensions de phase statoriques dans l'axe (d, q) [V].

Id, Iq: Courants dans l'axe (d, q) [A].

Ld: Inductance statorique directe [H].

Lq: Inductance statorique quadrature [H].

$[P(\theta)]$  : Matrice de la transformation de Park.

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

$C_{em}$ : Couple électromagnétique produit par la génératrice [N.m].

$C_r$ : Couple résistant [N.m].

S1, S2, S3 : Etat de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

V1, V2, V3 : Tensions d'entrée entre phases du redresseur [V].

Vc, Vb, Va : Tensions d'entrée entre phases du l'onduleur [V].

m : Indice de modalisation

$f_m$  : Fréquence de la référence [Hz]

$f_p$  : Fréquence de la porteuse [Hz]

P : Nombre de paire de pole.

$I_{dc}$  : Courant redressé [A]

$V_{dc}$  : Tension redressé [V]

$K_t$  : Une constante

Vqref, Vdref: Tensions de référence [V].

iqref, idref: Courants de référence [A].

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation de la machine [rad/s].

$\omega$  : Pulsation de fréquence rotorique [rad/s].

$G_v(s)$  : Fonction de transfert systèmes bouclés courant tension et courant rad/s

$\omega_v$  : Pulsation de coupure rad/s

$e_d, e_q$  : Composantes de la force électromotrice de compensation.

S : Operateur de Laplace.

$K_p, K_i$ : Actions proportionnelle et intégrale.

$T_d$  : Constante de temps électrique relative à l'axe d.

## Liste des abréviations

$\tau$ : Constante du temps électrique.

FTBO : Fonction de transfert en boucle ouverte.

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermée.

MCC : Machine à courant continu.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

GSAP : Génératrice synchrone aimants permanents.

MAS : Machine asynchrone.

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

MPPT: Max Power Point Tracking.

PI : Correcteur Proportionnel intégrale

a : amplitude de la porteuse

$f_p$  : fréquence de la porteuse

$R_l$  : résistance de la ligne

$L_l$  : inductance de la ligne

$T_q$  : Constante de temps électrique relative à l'axe q. List des symboles et abréviations



## Liste des figures

### Liste des figures

<b>FigureI.1</b> : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
<b>FigureI.2</b> : schéma d'une éolien.....	5
<b>FigureI.3</b> : différente de tour.....	6
<b>FigureI.4</b> : deux types d'éoliennes.....	7
<b>FigureI.5</b> : Eolienne a axe horizontal.....	8
<b>FigureI.6</b> : éolien à axe vertical de type savounius.....	8
<b>FigureI.7</b> : éolien à axe vertical de type darrieus.....	9
<b>Figure I.8</b> : Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur.....	12
<b>Figure I.9</b> : Vitesse de rotation du générateur (tr/min).....	13
<b>Figure I.10</b> : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe.....	14
<b>Figure I.11</b> : éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable.....	14
<b>Figure I.12</b> : éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation.....	15
<b>Figure II.1</b> puissance utile en fonction de la vitesse du vent.....	17
<b>Figure. II.2</b> : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine.....	19
<b>Figure II.3</b> : structure du générateur éolien étudié.....	23
<b>Figure II.4</b> schéma de la MSAP dans le repère (a, b, c).....	24
<b>Figure II.5</b> Schéma de la MSAP dans le repère (d q).....	27
<b>FigureII.6</b> :Redresseur MLI.....	29
<b>Figure. II. 7</b> :modèles du bus continu.....	31
<b>FigureIII.1</b> :schéma global de la commande vectorielle.....	34
<b>FigureIII.2</b> principe de la commande vectorielle.....	36
<b>Figure III.3</b> Représentation de régulateur par PI.....	37
<b>Figure III.4</b> Commande des courants en double boucle indépendantes.....	37
<b>Figure III.5</b> : Association Redresseur MLI – Bus Continu.....	40

## Liste des figures

<b>Figure III.6</b> : Boucle de régulation de la tension du bus continu.....	41
<b>Figure III.7</b> : profil de vent.....	42
<b>Figure III.8</b> : le couple électromagnétique résistant.....	42
<b>Figure III.9</b> : allure de la vitesse.....	42
<b>Figure III.10</b> : allure de la puissance.....	43
<b>Figure III.11</b> : allure des tensions.....	43
<b>Figure III.12</b> : allure des tensions avec zoom.....	43
<b>Figure III.13</b> : allure des tensions ( $V_{dc}$ , $V_{dc\_ref}$ ).....	44
<b>Figure III.14</b> : les courants ( $I_{dmes}$ , $I_{d\_ref}$ ).....	44
<b>Figure III.15</b> : allure des courants.....	44
<b>Figure III.16</b> : allure des courants avec zoom.....	45
<b>Figure III.17</b> : la vitesse de rotation.....	46
<b>Figure III. 18</b> : les tensions $V_{abc}$ .....	46
<b>Figure III. 19</b> : les tensions $V_{abc}$ avec zoom.....	46
<b>Figure III.20</b> : les courants $I_{abc}$ .....	47
<b>Figure III.21</b> : les courants $I_{abc}$ avec zoom.....	47
<b>Figure III.22</b> : le couple électromagnétique et le couple résistant.....	47

# Sommaire

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens</b>	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Historique.....	2
I.3 Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.3.1 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne .....	3
I.4 Principaux composants de l'éolienne.....	5
I.5 Différentes types d'éoliennes.....	7
• I.5.1 Eoliennes à axe horizontal .....	7
• I.5.2 Eoliennes à axe vertical .....	8
I.6 Classification des éoliennes selon leur vitesse.....	10
• I.6.1 les éoliennes à vitesse fixe .....	10
• I.6.2 les éoliennes à vitesse variable .....	11
I.7 Principe de conversion d'énergie.....	11
I.8 Conversion en énergie mécanique .....	12
I.9 Types des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens .....	13
I.9.1Génératrice asynchrone à cage .....	13
I.9.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	14
I.9.3 Machine synchrones .....	15
<b>a</b> Machine synchrone à rotor bobiné .....	15
<b>b</b> Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) .....	15
I.10 Conclusion .....	16

# Sommaire

## Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

II.1 Introduction .....	17
II.2 Régulation mécanique de la puissance aérodynamique .....	17
II.3 Technique de régulation pour les éoliennes .....	18
• II.3.1 Régulation « pitch ».....	18
• II.3.2 Régulation « stall » .....	18
II.4 Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne.....	18
• II.4.1 Modélisation de la partie mécanique .....	19
• II.4.1.1 Modélisation de la turbine éolienne.....	19
• II.4.1.3 Equation dynamique de l'arbre.....	20
II.4.1.4. Stratégie de commande de la turbine.....	20
• II.4.1. Maximisation de la puissance (MPPT).....	20
a) MPPT avec asservissement de vitesse .....	21
b) MPPT sans asservissement de vitesse .....	21
II.5 Structure de la MSAP .....	23
II.5.1 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent .....	24
• II.5.1.1 Modélisation de la partie électrique.....	24
• II.5.1.2 Hypothèses simplificatrices .....	24
II.5.1.3 les équations électriques et magnétiques dans le repère (a b c).....	24
a) Equations des tensions .....	25
b) Equation des flux.....	25
c) Equation mécanique .....	26
II.5.2 les équations électriques et magnétiques dans le repère de Park.....	26
a) Equations électriques.....	27
b) Equations magnétiques.....	28
• II.5.2.1 Couple électromagnétique de la machine .....	28
II.6 Modélisation d'interface d'électronique de puissance .....	29

## Sommaire

II.6.1 Modélisation des convertisseurs statiques .....	29
II.6.2 Modélisation du redresseur .....	30
II.6.3 commande des convertisseurs .....	30
a) Commande MLI .....	30
b) Commande à hystérésis .....	30
II.6.4 Modélisation du bus continu .....	31
II.7 Conclusion .....	32
<b>Chapitre III : Commande et simulation de la chaîne de conversion</b>	
III.1 Introduction .....	33
III.2 principe de la commande vectorielle .....	33
III.3 commande vectorielle de la (MSAP) .....	34
III.4 technique de découplage .....	35
III.5 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle .....	36
III.5.1 Avantages de la commande vectorielle .....	36
III.5.2 Inconvénient de la commande vectorielle .....	36
III.6 Conception des Régulateurs .....	36
III.6.1 Action Proportionnelle .....	37
III.6.2 Action Intégrale .....	37
III.7 Calcul des Régulateurs .....	37
III.7.1 Régulateur des Courants .....	37
III.8 Régulation de la tension .....	40
III.9 Modèle du bus continu .....	40
III.10 Calcul des paramètres du régulateur PI .....	41
III.11 Résultats de simulation et interprétations .....	42
III.12 conclusion .....	48
Conclusion générale .....	49

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La production d'énergies renouvelables (ER) est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles.

Par énergie renouvelable, on parle des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre (biomasse) et de l'eau. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue, la filière étudiée dans le travail qui suit est l'énergie éolienne.

Différents types de génératrices peuvent être utilisées pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique. Les génératrices synchrones à aimants permanents, prennent de plus en plus la prédominance sur les autres machines électriques. Ce type de machine permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques, cela par élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien.

La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple élevé, une inertie très faible. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, une meilleure contrôlabilité, d'où notre travail qui porte sur l'étude d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne basée sur la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Ce mémoire sera composé de trois chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet d'une brève description sur les systèmes éoliens où sera présenté le modèle de la turbine, basé sur des notions mécaniques et aérodynamiques pures.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) dans le plan de Park, ainsi que les convertisseurs statiques.

Le troisième chapitre sera dédié à la commande vectorielle de la GSAP et au calcul des paramètres des régulateurs, et nous présenterons une structure de commande du système global ainsi que les résultats de simulation.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre I

## Généralités sur les systèmes éoliens



## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

Ce premier chapitre présente une définition sur l'énergie renouvelable avec les différents types. Ensuite nous décrivons les différents types d'aérogénérateurs, nous décrivons ensuite les avantages et les inconvénients et aussi leurs applications.

## I.2 Historique

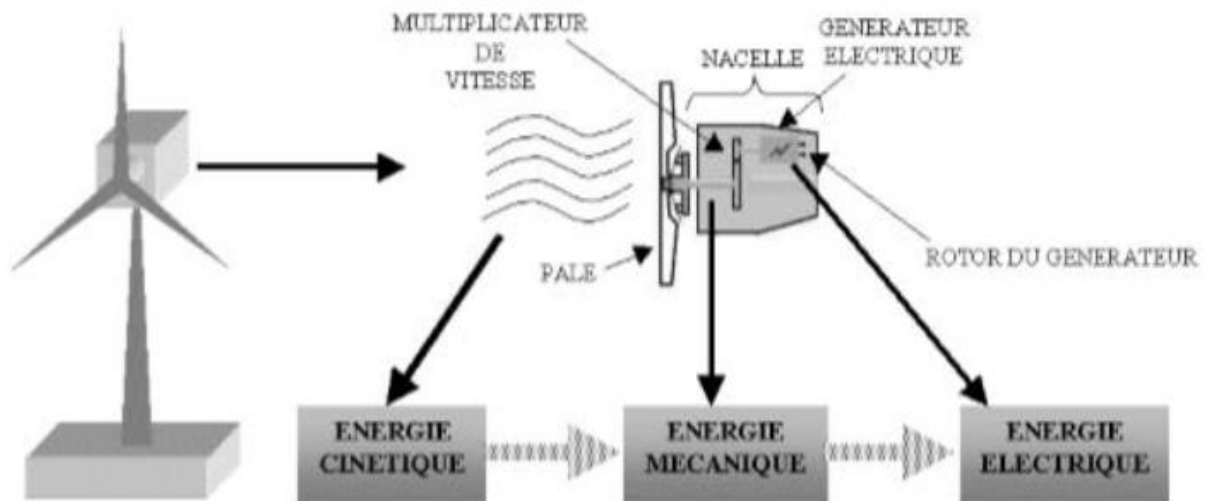
L'homme a toujours su utiliser les ressources naturelles qui l'entourent au profit de ses besoins qui n'ont jamais cessé d'accroître.

Il y'a déjà 3000 ans av JC, l'homme a exploité le vent afin d'en extraire de l'énergie mécanique pour la propulsion des navires et pour des moulins à céréales. Vers le milieu du XIXème siècle, il y'avait environ 200 000 moulins à vent en Europe. [3]

La découverte de l'électricité et la place qu'elle a prise parmi les autres énergies a donné l'idée au Danois Poul La Cour en 1891 d'associer une dynamo à une turbine éolienne, cela fait sans doute le premier pas des aérogénérateurs actuels. Jusqu'aux années 60les éoliennes ont connu une large utilisation en Europe et aux USA ; Dans les années 1920, il existait déjà en France des éoliennes bipales de 20m de diamètre puis dans les années 1950-60 des éoliennes tripales de 30 m avec génératrice synchrone de 800 KW et bipale de 35 m avec génératrice asynchrone de 1 MW ; En 1978, les Danois aujourd'hui leaders dans le domaine, réalisèrent une machine tripale de 54 m pour une puissance de 2 MW ; Au début de siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les compagnes isolées. Mais la dominance des énergies fossiles a ralenti la recherche dans le domaine des aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1974 a donné un nouveau souffle pour les énergies renouvelables, l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le Wind-rush) au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 KW).

### I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. (Figure I.1) [1]



**Figure I.1** Conversion de l'énergie cinétique du vent [1]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des masts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 180m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences. [1]

#### I.3.1 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente des inconvénients qu'il est nécessaire de palier pour qu'elles ne constituent pas un frein à son développement.

**Le tableau ci-dessous montre les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne**

Avantages	Inconvénients
L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo.
L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).	Possède un mécanisme bruyant.
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant.	La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets toxiques.	
L'énergie éolienne produit de l'électricité sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols	
Le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.	
La surface occupée au sol est peu importante.	
C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.	

**Tableau I.1** Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

## I.4 Principaux composants de l'éolienne

Une éolienne est généralement constituée de cinq éléments principaux : la nacelle, la tour, la génératrice, le rotor et le multiplicateur.

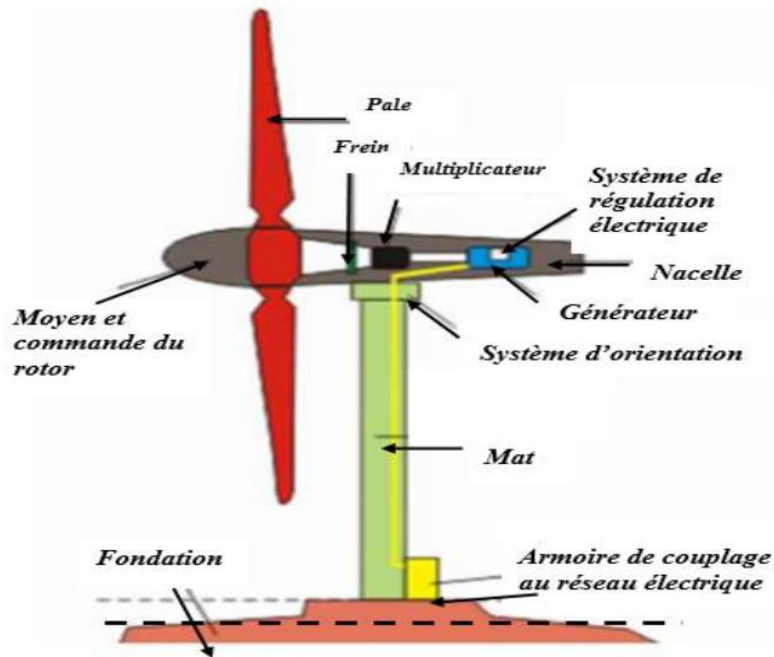


Figure I.2 : schéma d'une éolienne [4]

### I.4.1 La nacelle

Au sommet du mât se trouve la nacelle qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein, générateur...)

### I.4.2 La tour (le mat)

C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Trois grands types de tour existent, sont :

#### I.4.2.1 Tour mât haubané

De construction simple et moins coûteuse, elle s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.

### I.4.2.2 Tour en treillis

Qui sont les moins chères sont souvent mal acceptées et très peu utilisées. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend.

Attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.

### I.4.2.3 Tour tubulaire

Qui est beaucoup plus élégant, a un cout qui peut atteindre trois à quatre fois celui d'un pylône haubané.

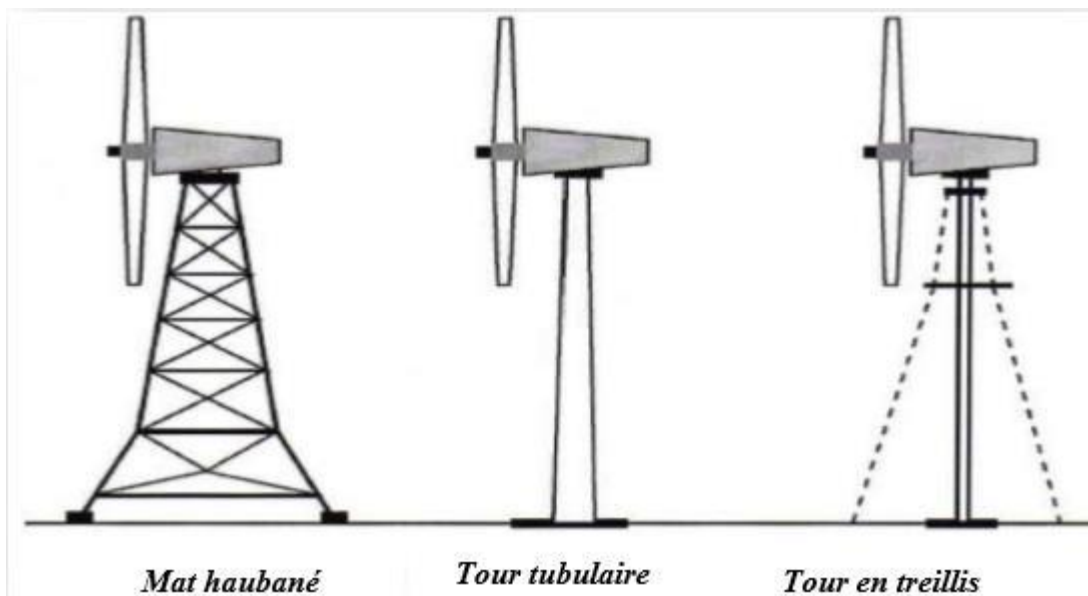


Figure I.3 : différentes tours[4]

### I.4.3 Le rotor

Le rotor est entraîné par l'énergie du vent via des pâles, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique ...).

### I.4.4 Le multiplicateur

Sert à adapter la vitesse de la turbine de l'éolienne à celle de la génératrice électrique.

### I.4.5 La génératrice

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est généralement soit une machine synchrone, ou une machine asynchrone à cage ou encore une machine à rotor bobiné.[2]

### I.5 Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical, perpendiculaire au sol.

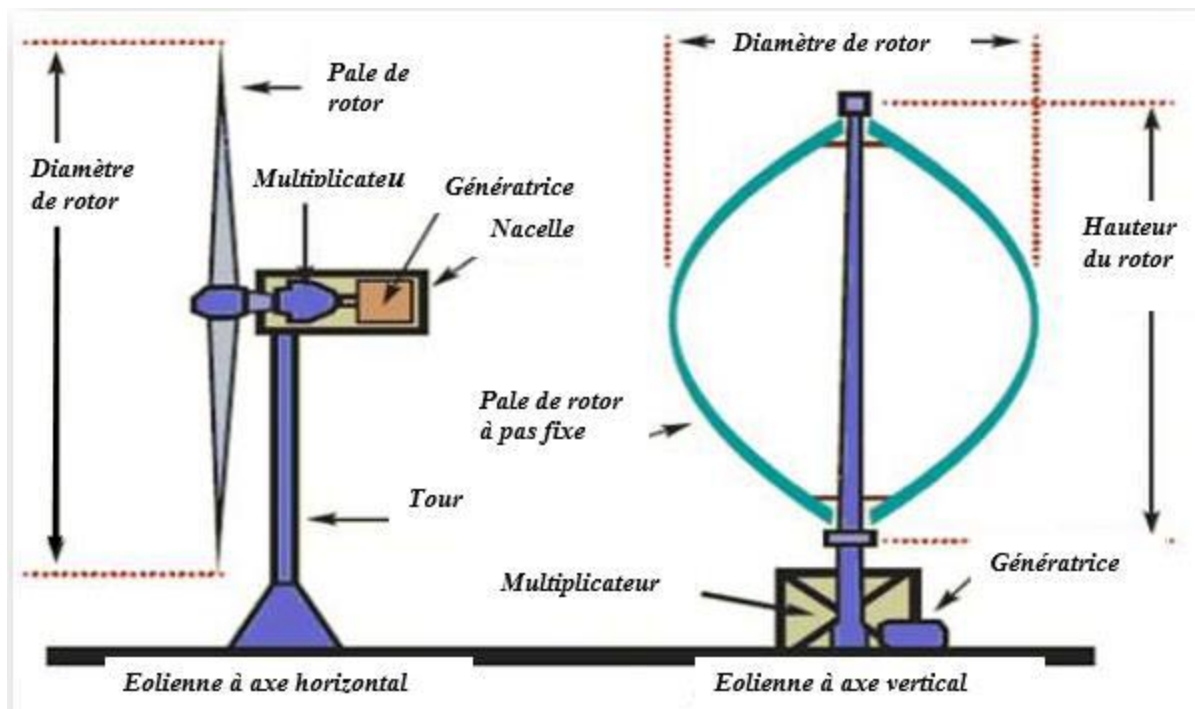


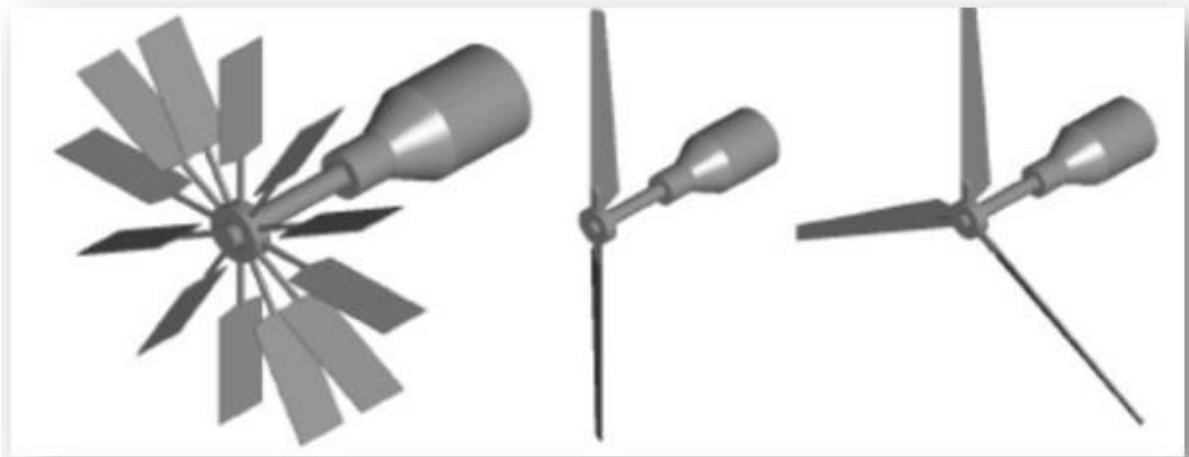
Figure I.4 : Deux types d'éoliennes

#### I.5.1 Eoliennes à axe horizontal

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales.

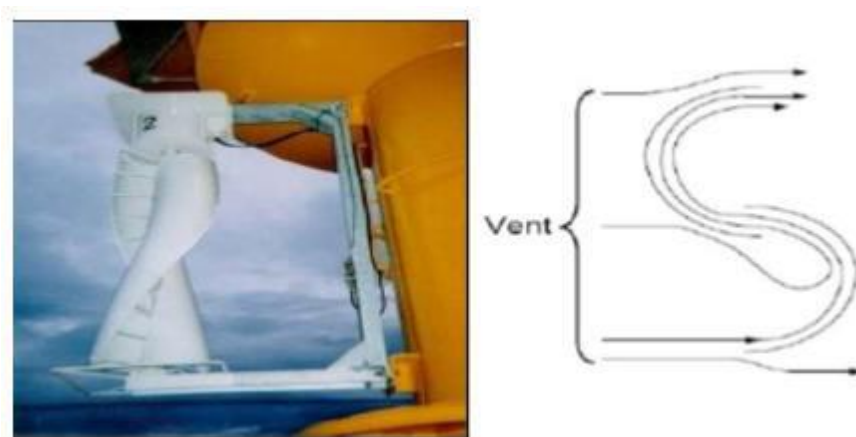
Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion.

Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.

*Eolienne à pale**Eolienne à deux**Eolienne à trois***Figure I.5** : Eolienne a axe horizontal

### I.5.2 Eoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Il existe deux types d'éolienne verticale, les éoliennes de Savonius (inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), elles sont basées sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.

**Figure I.6** : Eolienne à axe vertical de type savounius[4]

On trouve aussi les éoliennes de Darrieus (conçu par l'ingénieur français George Darrieus). Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de

l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig I.7). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

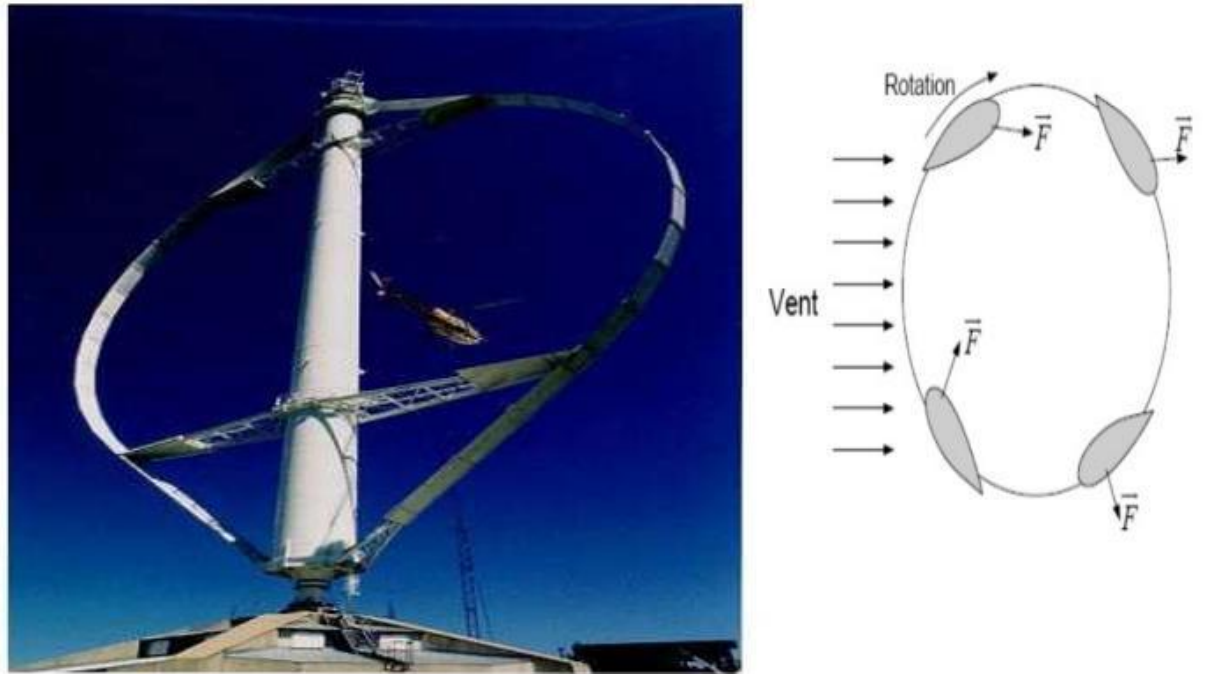


Figure I.7 : Eolienne à axe vertical de type Darrieus[4]

**Le tableau ci dessous représente les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical et horizontal**

	Horizontal	Vertical
Avantages	Cout limité	De conception plus simple que Les machines à axe horizontal
	Peu de contraintes mécaniques	Elle est plus facile d'accès
	Grande efficacité	La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol



Inconvénients	Bruit conséquent	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
	Grande sensibilité au flux éolien et sa variation	Les éoliennes ne démarrent pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne
		Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

**Tableau I.2** : Comparaison entre éoliennes à axe vertical et à axe horizontal

## I.6 Classification des éoliennes selon leur vitesse

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

### I.6.1 Eoliennes à vitesse fixe

Elles sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice. Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent se résumer dans les points suivants :

- Système électrique simple
- Grande fiabilité
- Prix modéré

➤ **Inconvénients**

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La Connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée.

## **I.6.2 Eoliennes à vitesse variable**

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales. De plus, il limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, l'utilisation de convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue[4]

➤ **Parmi les avantages de cette configuration nous avons :**

- L'augmentation du rendement énergétique.
- La réduction des oscillations de couple (Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).
- La génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité

## **I.7 Principe de conversion d'énergie**

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en Energie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en Mouvement passent par la surface active  $S$  de la voilure

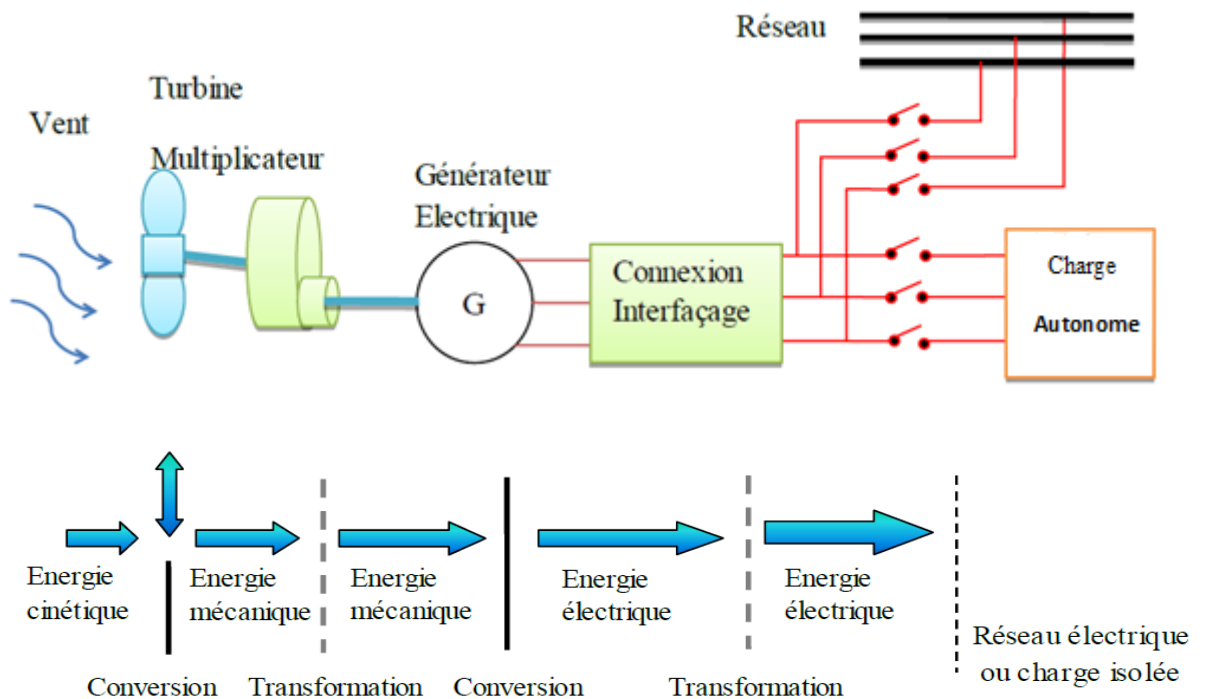
Les aérogénérateurs permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes

- Au niveau de la turbine, qui extrait, à l'aide des pales, une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique disponible sur le rotor ;

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique du rotor de la turbine et la convertit en énergie électrique, transmise par la suite au réseau électrique ou à une charge isolée.

La figure ci-dessous représente la chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur.



**Figure I.8:** Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

## I.8 Conversion en énergie mécanique

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s V v^3$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{Vv}$$

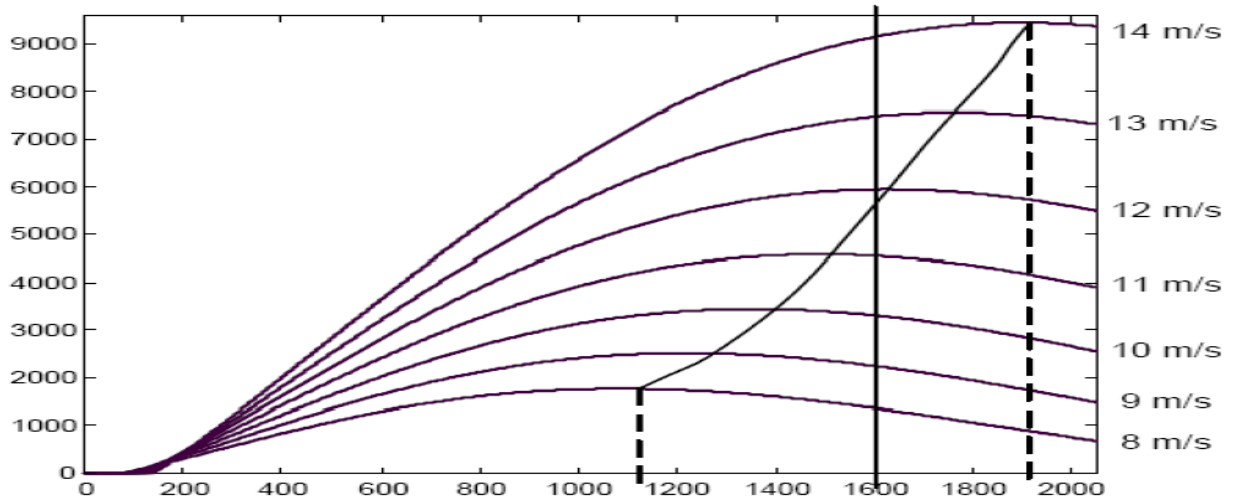
Appelée vitesse spécifique

Avec vitesse  $\Omega R$  linéaire au bout des pales

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre est

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega R}{V_v} \right) \rho_s V v^3$$

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 I.9 :** Vitesse de rotation du générateur (tr/min)

## I.9 Types des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens

Dans une éolienne, le passage d'une énergie mécanique à une énergie électrique de bonne qualité et qui prête à la consommation, se fait à travers une chaîne de conversion composée d'une machine électrique, d'un ou plusieurs convertisseurs statique et parfois d'un système de stockage.

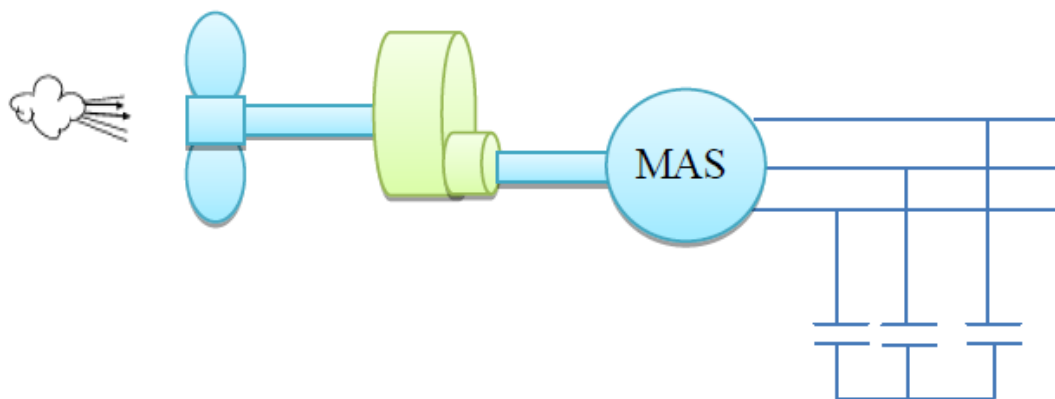
La puissance d'une éolienne nous renseigne directement sur sa taille et sa destination qui peut être le couplage au réseau électrique dans le cas des grandes puissances ou la production d'énergie électrique dans les régions isolées comme les îles, maisons de campagne.

On peut classer les machines utilisées selon que le système soit couplé ou non au réseau

### I.9.1 Génératrice asynchrone à cage

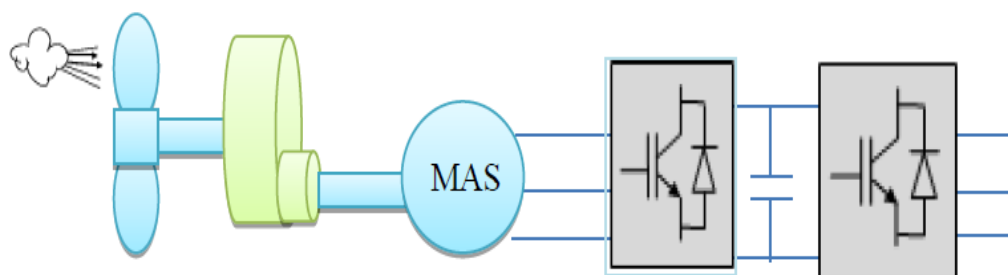
C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant « au fil du vent ». Au départ faible coût et la standardisation des machines asynchrones ont conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des

puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrone à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimension importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce qui nécessite l'insertion un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la (figure 9)



**Figure I.10 :** Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence (figure 10), mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée.



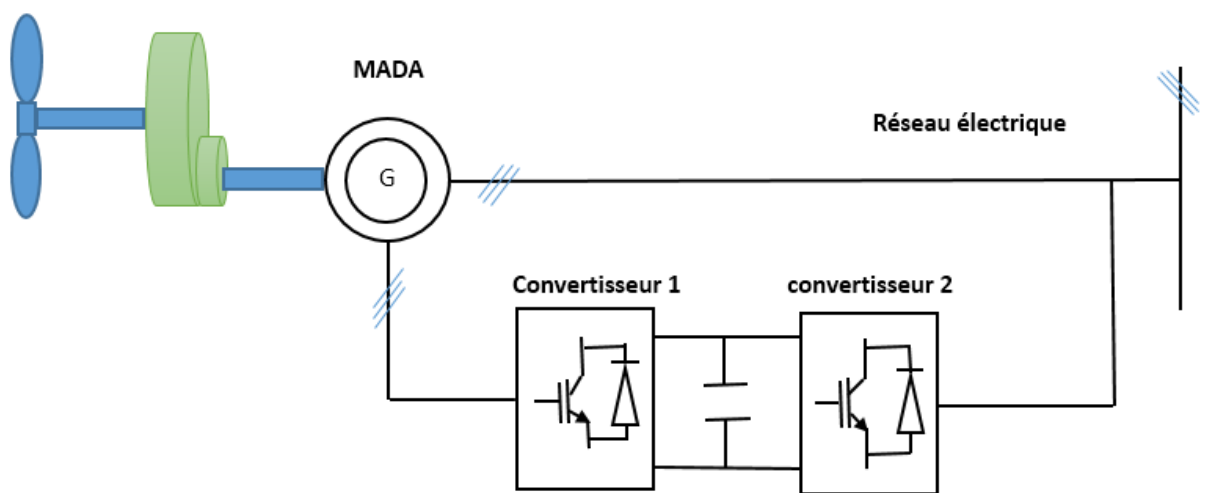
**Figure I.11 :** Eolienne basée sur la machine asynchrone à fréquence variable

## I.9.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est

relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence comme le montre la figure 11. Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machine.



**Figure I.12** : Eolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation

### I.9.3 Machines synchrones

#### a) Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine (synchrone à rotor bobiné) possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur en puissance. Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du collecteur (système bagues-balais).

#### b) Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission direct) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De par son aimantation permanente à

plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible.

Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime par rapport aux autres machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisque il n'y a que des hélices qui sont en mouvement. L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé.

➤ **Avantages de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)**

- Couples massiques et volumiques importants.
- Très bon rendement.
- Puissances massiques élevées.
- Absence de contacts glissants.

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté l'historique sur les origines de l'énergie éolienne, ainsi que les différents types des générateurs utilisés dans ce domaine. Puis nous avons décrit le principe de conversion de l'énergie éolienne et les avantages de la MSAP par rapport aux autres machines utilisées dans les systèmes éoliens.

La modélisation de tous les éléments de la chaîne de conversion sera présentée dans le chapitre suivant.

# **Chapitre 02**

## **Modélisation de la chaîne conversion éolienne**



## II.1 Introduction

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

Ce chapitre est consacré à la modélisation de chaque élément de la chaîne de conversion. La première partie présente la modélisation mathématique de la partie mécanique, les composants de la partie électrique sont modélisés dans la deuxième partie de ce chapitre où l'on trouve la modélisation de MSAP ainsi que les convertisseurs de puissance.

## II.2 Régulation mécanique de la puissance aérodynamique

Le fonctionnement d'une éolienne est caractérisé par trois vitesses sont :

- $V_D$  : vitesse de démarrage
- $V_N$  : vitesse nominale
- $V_M$  : vitesse maximale

Ces trois vitesses définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

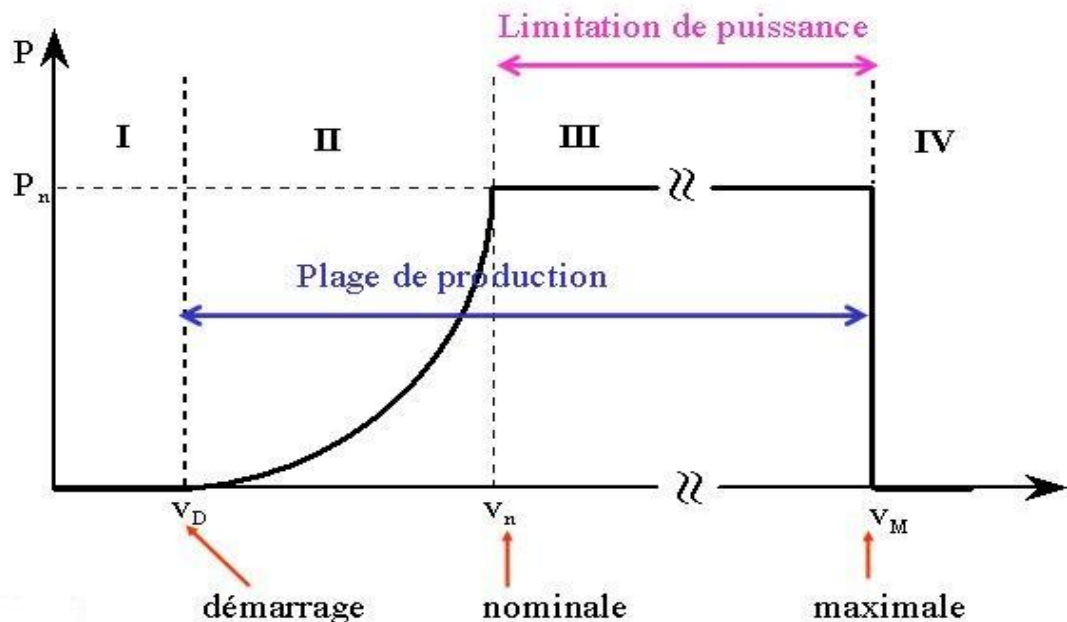


Figure II.1 puissance utile en fonction de la vitesse du vent

La puissance est nulle dans la zone « 1 » car le vent est assez faible pour faire fonctionner l'éolienne ; dans la zone « 2 » le vent est atteint la vitesse de démarrage et la puissance augmente avec la croissance de la vitesse du vent jusqu'à atteindre sa valeur nominale ; la puissance reste nominale dans la zone « 3 » grâce à un système de régulation mécanique ; la puissance est nulle dans la zone « 4 » car le système de sécurité freine l'éolienne et arrête le transfert de l'énergie.

### II.3 Technique de régulation pour les éoliennes

Dans les éoliennes de grande puissance, on utilise deux techniques de régulation

#### II.3.1 Régulation « pitch »

Cette régulation est appelée aussi « à pas variable » son principe consiste à varier l'angle de calage des pales et d'ajuster leur portance à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone « 3 ».

En générale, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne a quatre objectifs distincts :

- Démarrage à une vitesse du vent réduite
- Régulation de la vitesse  $\Omega$ , pour  $V > V_N$
- optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites  $[V_D V_N]$
- protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ( $V > V_M$ ), par la mise en drapeau des pales de l'hélice

#### II.3.2 Régulation « stall »

Elle est appelée aussi « à décrochage aérodynamique », elle est plus robuste que la précédente car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, en plus elle est la plus fiable car elle possède moins de pièces (pas de système de contrôle d'angle de calage).

### II.4 Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne

Notre étude se fait une éolienne à vitesse variable composée d'une turbine tripales montée sur un arbre rigide, un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  est intercalé de entre la turbine et le générateur électrique qui est une machine synchrone à aimant permanent, cette dernière débite

sur un réseau électrique à travers deux convertisseur statique (redresseur et onduleur) entre lesquels est intercalé un bus continu.

Notre système consiste deux parties, la partie mécanique et la partie électrique.

## II.4.1 Modélisation de la partie mécanique

### II.4.1.1 Modélisation de la turbine éolienne

Le système éolienne classique est composé d'une turbine qui transforme une énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse G qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple et comprenant des pales entrainés par le vent.

La puissance cinétique du vent est donnée par [4] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad \text{II.1}$$

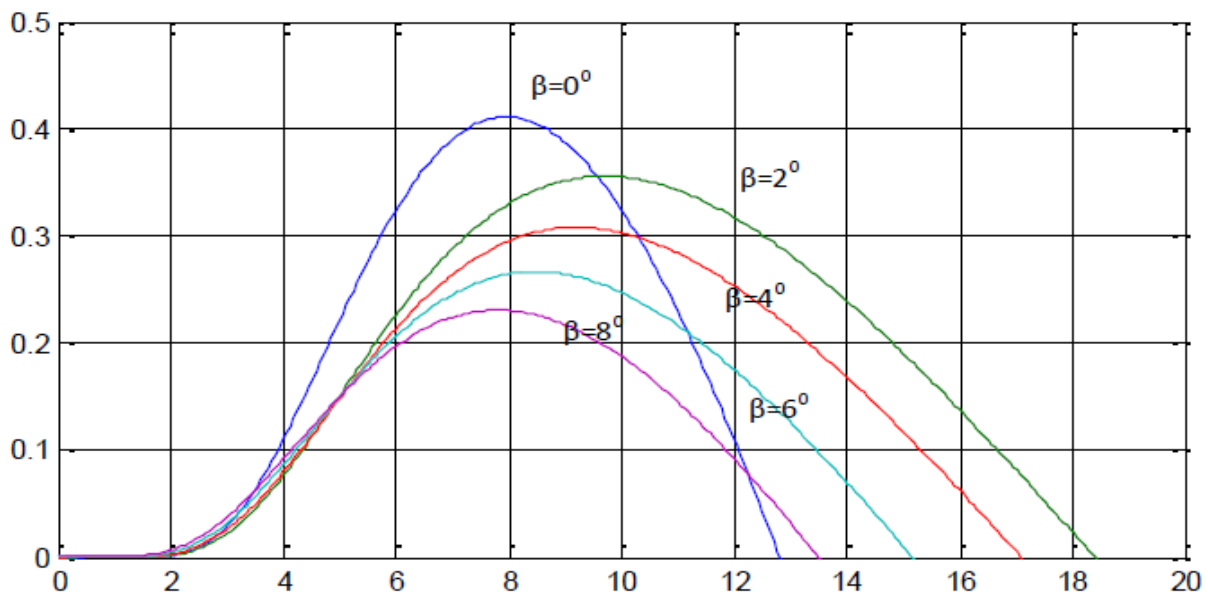
La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique  $C_{aero}$  est donné par l'expression suivante [6] [07] :

$$C_{aero} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3}{2\Omega_T} \quad \text{II.2}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aero} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad \text{II.3}$$

Elle dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ ).



**Figure. II.2 :** Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine[8]

Le ratio de vitesse  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine  $\Omega_T R$  et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R}{v} \quad \text{II.4}$$

### II.4.1.2 Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad \text{II.5}$$

Avec :

$J$  : L'inertie totale sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice.

Comme :

$$C_{mec} = C_{em} - C_r - C_f \quad \text{II.6}$$

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{II.7}$$

Où :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple issu de multiplicateur.

$C_f$  : Le couple de frottements.

$f$  : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

### II.4.1.3 Stratégie de commande de la turbine

On voit bien qu'il y a deux zone de fonctionnement intéressante ou interviennent deux stratégies de commande, l'une pour maximiser la puissance et l'autre pour la limiter à sa valeur nominale.

### II.4.1.4 Maximisation de la puissance (MPPT)

Les deux techniques de maximisation de puissance les plus utilisées dans le domaine des aérogénérateurs sont :

- La MPPT avec asservissement de vitesse
- La MPPT sans asservissement de vitesse

Ces deux techniques interviennent durant le fonctionnement de l'éolienne dans la zone II ou

$V_{\text{démarrage}} \leq V_v \leq V_{\text{v nominale}}$

### a) MPPT avec asservissement de vitesse

On suppose dans cette technique que le couple électromagnétique développé par la machine est égale à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée, et cela malgré les perturbations qu'engendre la nature fluctuante du vent.

On peut écrire alors :

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad \text{II.8}$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir de couple mécanique totale appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.[11]

$$C_{em-ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad \text{(II.9)}$$

Avec :

$C_{ass}$  : Régulateur de vitesse

$\Omega_{ref}$  : Vitesse de référence

D'après l'équation (II.4), la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_T = \frac{\lambda \cdot V_v}{R} \quad \text{(II.10)}$$

La vitesse de référence de la turbine peut se déduire de l'équation (II.10) car elle correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ .

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad \text{(II.11)}$$

L'efficacité de cette commande est assurée par le régulateur de vitesse qui doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

### b) MPPT sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de

la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse du vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs. [11]

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent. Ceci, nous conduit à déduire :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul  $C_{mec} = 0$
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé  $C_f \approx 0$

De l'équation suivante :

$$C_{mec} = C_{em} - C_r - C_f = 0 \quad \text{II.12}$$

On peut déduire que :

$$C_{em} = C_r = \frac{C_{aer}}{G} \quad \text{II.13}$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad \text{II.14}$$

De l'équation (II.4) on va déduire l'expression du couple aérodynamique estimé :

$$C_{aer-est} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{1}{\Omega_{T-est}} \cdot V_{V-est}^3 \quad \text{II.15}$$

Avec :

$$\Omega_{T-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.16}$$

$$V_{V-est} = \frac{R \cdot \Omega_{T-est}}{\lambda} \quad \text{II.17}$$

En remplaçant les deux expressions (II.16) et (II.17) dans (II.15), puis cette dernière dans (II.14) on déduit l'expression globale du couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad \text{II.18}$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{Pmax}$ . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{Pmax}}{\lambda^3_{opt}} \rho \pi R^5 \frac{\Omega^2_{mec}}{G^3} \quad \text{II.19}$$

En mettant

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{Pmax}}{\lambda^3_{opt}} \rho \pi R^5 \frac{1}{G^3} \quad \text{II.20}$$

L'expression (II.19) devient alors :

$$C_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega^2_{mec} \quad \text{II.21}$$

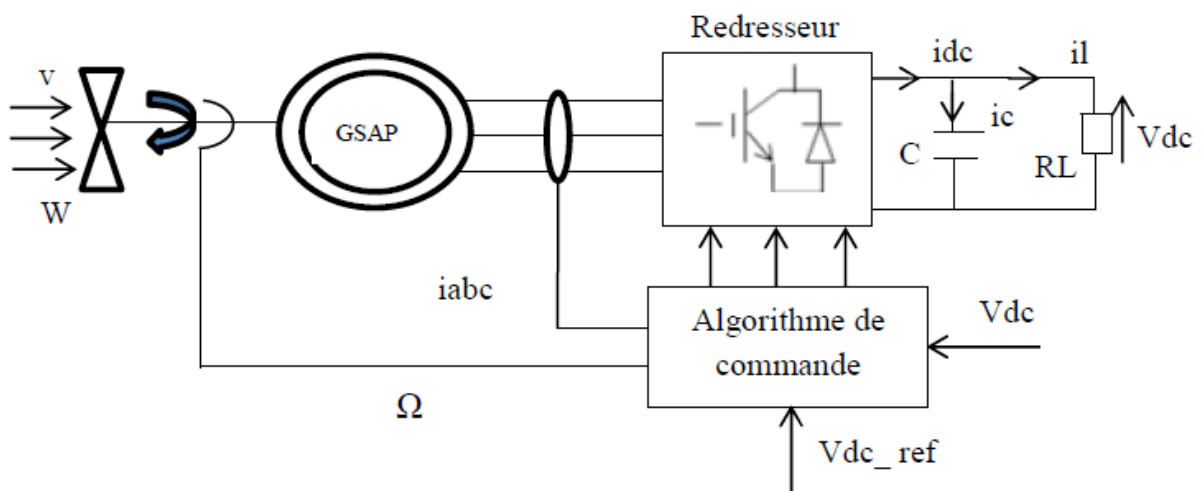


Figure II.3 structure du générateur éolien étudié

## II.5 Structure de la MSAP

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs [13]. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [14], [15]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimant (aimantation radiale) ou génératrice discoïdes (champ axial), ou encore à rotor extérieur [14], [16], [17]. La composition des MSAP est la suivante :

- **Stator**

Le stator de la MSAP triphasés a une autre structure identique à celle des MS à rotor bobiné.

- **Rotor**

Les aimants permanents constituent le rotor et ont pour fonction principale la création du flux inducteur, leur puissance massique doit être élevée, ce qui va réduire le volume de la machine. Ce type de structure nous permet de réaliser des machines plus compactes, avec moins de pertes (pas d'enroulement inducteur), donc un meilleur rendement. [18]

## II.5.1 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

### II.5.1.1 Modélisation de la partie électrique

Dans cette partie nous allons modéliser la génératrice synchrone à aimants permanents, en se basant sur des hypothèses simplificatrices.

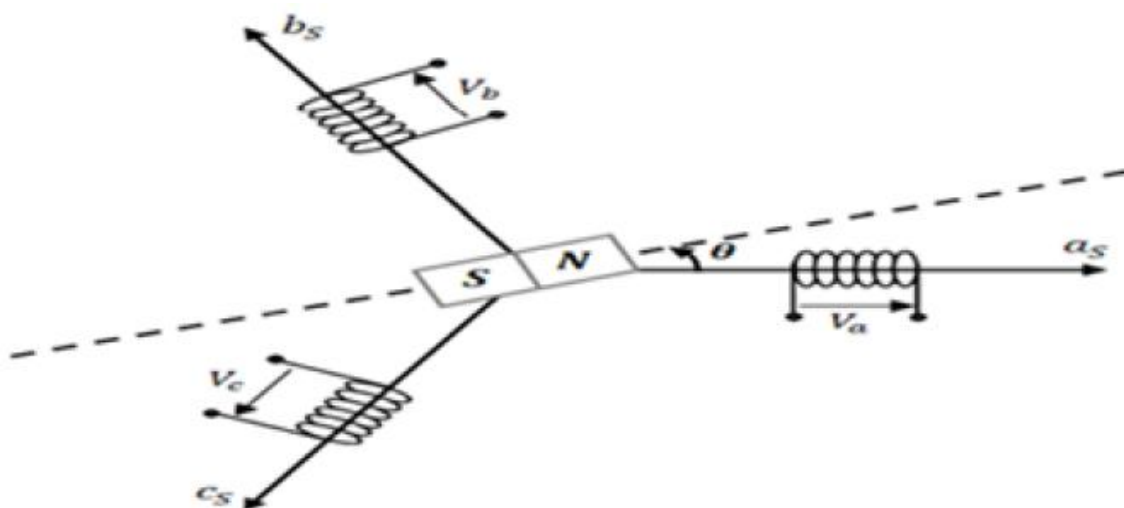
### II.5.1.2 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [10].

- Linéarité du circuit magnétique (la saturation est négligée).
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- La variation des résistances des enroulements en fonction de la température est négligée.
- Les forces magnétomotrices dans l'entrefer sont réparties sinusoïdalement.
- La machine est symétrique pour éliminer la composante homopolaire des courants.

### II.5.1.3 Mise en équations électriques et magnétiques dans repère (a b c)

Le schéma représentatif de la machine à modéliser est donné par la (Figure II.4)



**Figure II.4** schéma de la MSAP dans le repère (a, b, c)



- Au stator : trois enroulements a, b, c, décalés entre eux de  $2\pi/3$  électriques.
- Au rotor : un inducteur à aimants permanents.

### a) Equations des tensions

Comme tenu du schéma de la figure II.3 On peut écrire les équations de tension relatives au stator:

$$\begin{cases} V_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{II.22}$$

Ce système d'équations (II.24) peut se mettre sous une forme matricielle

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad \text{II.23}$$

Avec

$[V_a V_b V_c]^t$  : vecteur tension statoriques

$[i_a i_b i_c]^t$  : vecteur courant statoriques

$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$  : vecteur flux statoriques

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{II.24}$$

R : matrice des résistances statoriques

### a) Equations des flux

$$[\varphi_{abc}] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad \text{II.25}$$

Où :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad \text{II.26}$$

$$[L_{s2}(\theta)] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos 2(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

$[M_{s0}]$  : Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

$[L_{s0}]$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$\theta$  : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \theta - \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta - \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} \quad \text{II.28}$$

$[M_{sf}]$  : La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

## b) Equations mécaniques

L'équation mécanique est exprimée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_{em} - C_r \quad \text{II.29}$$

Avec

$J$  : Moment d'inertie.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

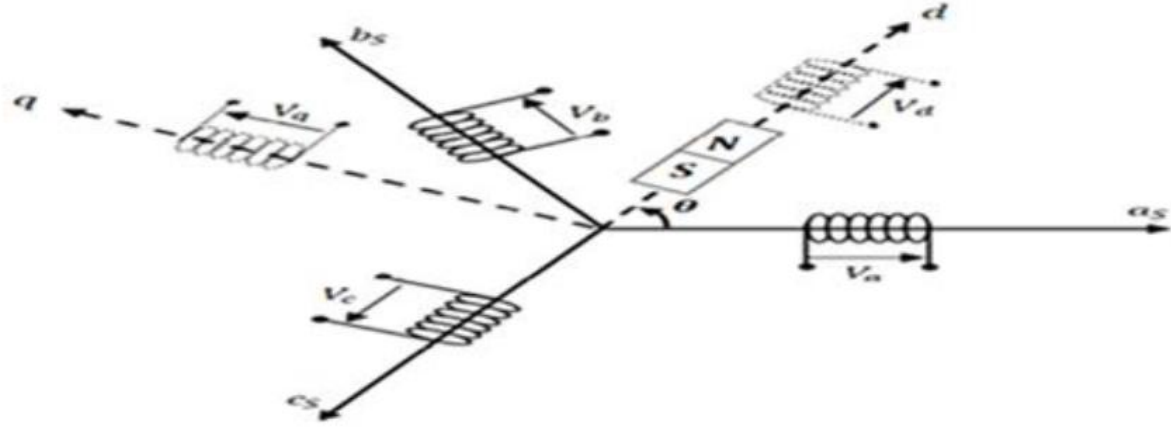
$C_r$  : Couple résistant.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse angulaire mécanique rotorique.

## II.5.2 Mise en équations électriques et magnétiques dans le repère de Park

Il existe plusieurs transformations ayant pour objectif la simplification des équations de la machine en les rendant plus facile à résoudre numériquement. Parmi ses transformations, la transformée de Park qui consiste à remplacer les enroulements triphasés (a b c) par deux enroulement d et q (figure II.5)



**Figure II.5** Schéma de la MSAP dans le repère (d q)

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tournent avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tensions, courants ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante [12].

$$[V_{abc}] = [P(\theta)][V_{dq}] \quad \text{II.30}$$

$$[V_{dq}] = [P(\theta)]^{-1} [V_{abc}] \quad \text{II.31}$$

Avec

$$[P(\theta)] \text{ Et } [P(\theta)]^{-1}$$

Sont les matrices de passage direct et inverse qui conserve les puissances et qui assure le changement de variable. Elle est donnée par la matrice suivante:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.32}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.33}$$

### a) Equations électriques dans le repère de Park

Les équations de la MSAP dans le repère de Park sont

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - P\Omega_{mec} \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + P\Omega_{mec} \varphi_d \end{cases} \quad \text{II.34}$$

### b) Equations magnétiques dans le repère de Park

Sur l'axe d [Las 04].

$$\varphi_d = L_d I_d + \varphi_{sf} \quad \text{II.35}$$

$\varphi_d$  : Constante indiquant le champ du à l'aimantation permanente du rotor.

Sur l'axe q

$$\varphi_q = L_q I_q \quad \text{II.36}$$

Le système devient

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{d\varphi_d}{dt} i_d - L_q i_q P \Omega_{mec} \quad \text{II.37}$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d\varphi_q}{dt} i_q + (L_d i_d + \varphi_{sf}) P \Omega_{mec}$$

Le dernier système obtenu décrit le schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park (figure II.5), identique à celui d'une machine à courant continu ayant comme inducteur l'enroulement et deux induits en quadrature.

#### II.5.2.1 Couple électromagnétique de la machine

Le couple électromécanique  $Cem$  est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les FMMs dans l'entrefer ; générées par les courants statorique [23].

Selon Park. L'expression de la puissance transmise est comme suite :

$$P(t) = \frac{3}{2} P [V_d I_d + V_q I_q] \quad \text{II.38}$$

En remplaçant  $V_d$  et  $V_q$  par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left( i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)] \quad \text{II.39}$$

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

$\frac{3}{2} \left( i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right)$  : Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$  : représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$\omega = P\Omega_{mec} \text{ Et } P_e = C_{em} \Omega$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [\varphi_d i_q - \varphi_q i_d] \quad \text{II.40}$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \varphi_{sf}] \quad \text{II.41}$$

Si le rotor est lisse ( $L_d = L_q$ ), cette équation se simplifie en:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_q \varphi_{sf} \quad \text{II.42}$$

## II.6 Modélisation d'interface d'électronique de puissance

Dans cette partie, on va étudier le convertisseur qui intervient dans la chaîne de conversion éolienne

### II.6.1 Modélisation des convertisseurs statiques

Le redresseur et l'onduleur sont formés de trois bras, composés chacun de deux cellules de commutations. Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs bidirectionnels. Chaque cellule à son tour est constituée d'un transistor et une diode en antiparallèle. Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage [24].

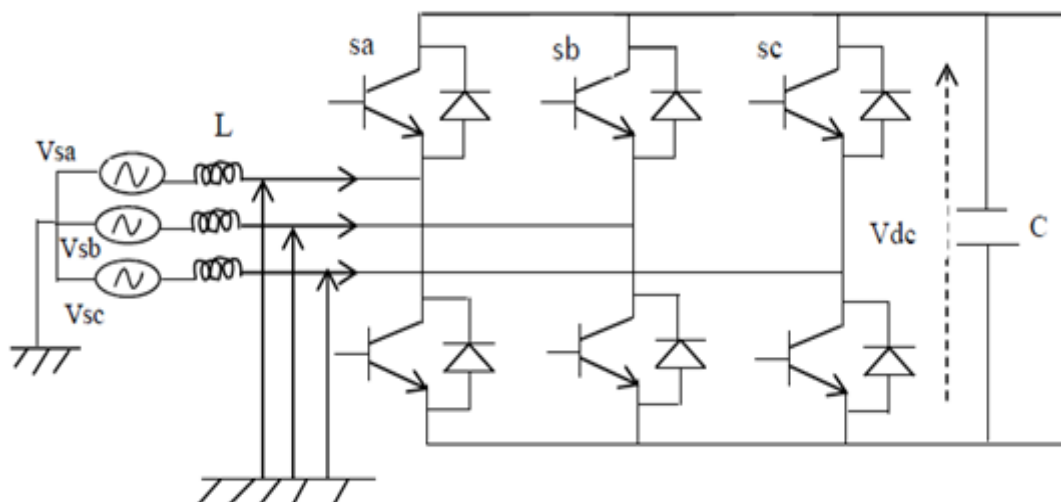


Figure II.6 : Redresseur MLI

## II.6.2 Modélisation du redresseur

Les interrupteurs utilisés sont des transistors IGBT avec diodes antiparallèles, ces interrupteurs sont bidirectionnels, qui permet le transit de puissance dans les deux sens du système. Les signaux de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont générés par des comparateurs à hystérésis.

En utilisant les fonctions de connexion  $S_i$ ,  $i=1\text{à}6$ , pour chaque interrupteur on définit la matrice de transfert du redresseur comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{dc}^+ \\ V_{dc}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 S_2 & S_3 \\ S_4 & S_5 S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{II.43}$$

Avec :

$$V_{dc} = V_{dc}^+ - V_{dc}^- \quad \text{II.44}$$

Le courant à la sortie du redresseur est continu, il est exprimé comme suit :

$$[i_s] = (S_1 \ S_2 \ S_3) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{II.45}$$

## II.6.3 Commande du convertisseur

Il existe plusieurs stratégies de commande appliquées dans le domaine de l'électronique de puissance telle que les commandes  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ , MLI, MLI vectorielle et hystérésis. Dans ce qui suit on va présenter le principe de fonctionnement de la commande MLI et la commande à hystérésis.

### a) Commande MLI

La MLI est une stratégie de commande analogique, elle est utilisée pour générer les signaux de commande qui permettent l'ouverture et la fermeture des interrupteurs utilisée dans les deux convertisseurs de la chaîne étudiée. Le principe de la MLI se base sur la comparaison entre un signal sinusoïdale appelé référence et un signal triangulaire ou en dents de scie appelé porteuse, tel que la fréquence  $f_p$  est très grande devant la fréquence  $f$  de référence, on obtient à la sortie des convertisseurs et des tensions ou des courants en forme de plusieurs créneaux rectangulaires de largeurs convenable. [19], [20]

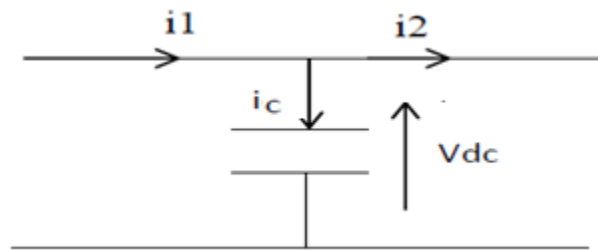
### b) Commande à hystérésis

Le principe de cette commande est basé sur la commande des interrupteurs de l'onduleur de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans

une bande encadrant les références des courants. Cette commande se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références comme le montre la figure II.7. Les signaux de commande des interrupteurs sont obtenus alors à la sortie des comparateurs à hystérésis. [21]

#### II.6.4 Modélisation du bus continu

Le couplage entre le redresseur et l'onduleur est fait par l'intermédiaire d'un bus continu. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. La figure II.7 représente le schéma du bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur C où sont connectés les convertisseurs de puissance. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. [22]



**Figure II.7** modèle du bus continu

Les courants dans le bus à courant continu agissent directement sur la valeur de la tension à ses bornes  $V_{dc}$ . A partir de la figure précédente, on peut écrire l'équation suivante :

$$i_c = i_1 - i_2$$

La tension  $V_{dc}$  est une fonction du courant  $i_c$  :

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt}$$

$$V_{dc} = V_{dc0} + \frac{1}{C} \int_{i_1}^{i_2} i_c dt$$

Avec :

C : Capacité du condensateur

$V_{dc0}$  : Tension initiale aux bornes du condensateur

La valeur de la tension  $V_{dc}$  est fonction des courants  $i_1$  et  $i_2$ , si le générateur fournit plus d'énergie, la valeur de  $V_{dc}$  augmentera parce que la différence d'énergie est accumulée dans le condensateur. Par contre, si le générateur ne peut pas fournir l'énergie demandée par la charge, celle-ci prendra au condensateur le reste d'énergie demandé, alors la valeur de la tension  $V_{dc}$  va diminuée. [9]

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne. Nous avons établi les équations électriques, magnétiques et mécaniques dans le repère triphasé puis dans le repère biphasé pour simplifier le modèle à utiliser.

Le chapitre suivant sera dédié à la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent.



# **Chapitre III**

## **Commande et la simulation de la chaîne de conversion**

### III.1 Introduction

Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre aux variateurs synchrones à aimants permanents d'atteindre ces performances.

Cependant le contrôle vectoriel porte en général sur des machine alimentées en tension et régulées en courant, cette topologie permet un découplage entre les variables de commande, reste le plus utilisé vu les performances dynamique élevées qu'il offre pour une large gamme d'application [25].

Afin de contrôler le couple d'une GSAP, il est nécessaire de contrôler le vecteur courant, ceci est possible en contrôlant instantanément soit son amplitude et son retard par rapport à la f.é.m., ces composantes suivant l'axe direct et l'axe en quadrature.

### III.2 principe de la commande vectorielle

Le principe de découplage permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu, par application de cette nouvelle technique de commande.

Ceci concilie les avantages de propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique. Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant  $I_d$  nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant  $I_q$  via la tension  $V_q$ .

Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation.

La forme du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \varphi_{sf} i_q \quad \text{III.1}$$

Comme le flux est constant, le couple est directement proportionnel à  $i_q$  d'où la représentation suivante :

$$C_{em} = k_t i_q \quad \text{III.2}$$

Avec:

$$k_t = \frac{3}{2} P \varphi_{sf} \quad \text{III.3}$$

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composants ( $i_d$ ) et ( $i_q$ ) du courant statorique en imposant les tensions ( $V_d$ ) et ( $V_q$ ) qui conviennent. Pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de références ( $V_{qref}$ ) et ( $V_{dref}$ ) à l'entrée de l'onduleur [26].

### III.3 commande vectorielle de la (MSAP)

Il existe deux méthodes distinctes pour contrôler le courant :

- L'une ne nécessite pas la connaissance du modèle électrique de la machine et consiste à imposer directement les courants de phase dans une bande autour des courants de référence, c'est la méthode de contrôle par les régulateurs à hystérésis.
- L'autre méthode exige la connaissance du modèle de la machine et permet en fonction de l'erreur des courants de phase par rapport à leurs références de déterminer les références des tensions qui seront imposées aux bornes de la machine grâce à un onduleur de tension commandé en modulation de largeur d'impulsion (MLI) [27].

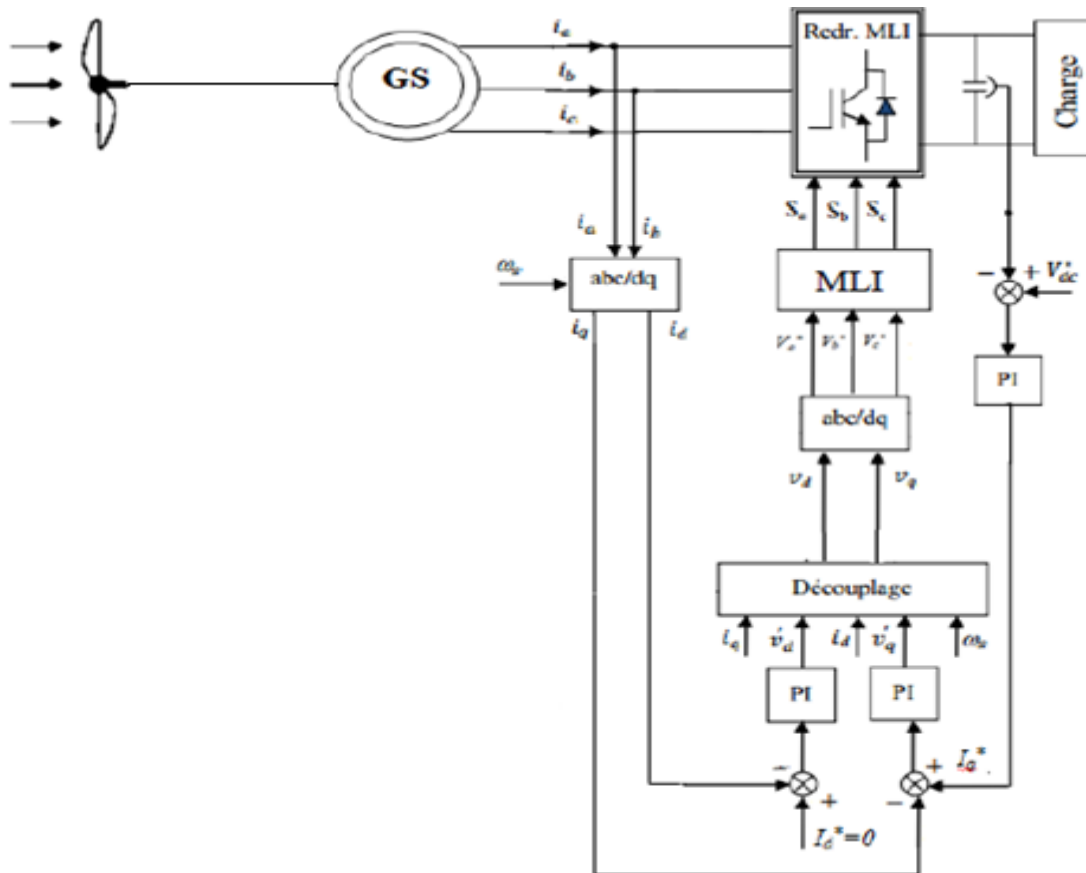


Figure III.1 schéma global du système étudié

### III.4 technique de découplage

Les lois de commande vectorielle des machines alimentées en tensions présente des découplages entre les actions sur les axes (d) et (q). Dans un repère (d) et (q) avec l'axe (d) aligné sur l'axe du flux rotorique, on a les équations suivantes [28],[29], [30].

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q i_q \omega \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q - L_d i_d \omega + \varphi_{sf} \omega \end{cases} \quad \text{III.4}$$

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} - C_r \quad \text{III.5}$$

$$\text{Avec : } \omega = P\Omega_{mec}$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_{sf} i_q] \quad \text{III.6}$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé. Le but principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatifs est d'améliorer leur comportement statique et dynamique grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

La machine étudiée est de couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de Park est maintenu calé sur l'axe q ( $I_s = I_q$ ). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle (figure III.3) qui a pour effet la diminution des pertes joules. Le système d'équation (III.4) devient :

$$\begin{cases} V_d = -L_q i_q \omega \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \varphi_{sf} \omega \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Et le couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \varphi_{sf} i_q \quad \text{III.8}$$

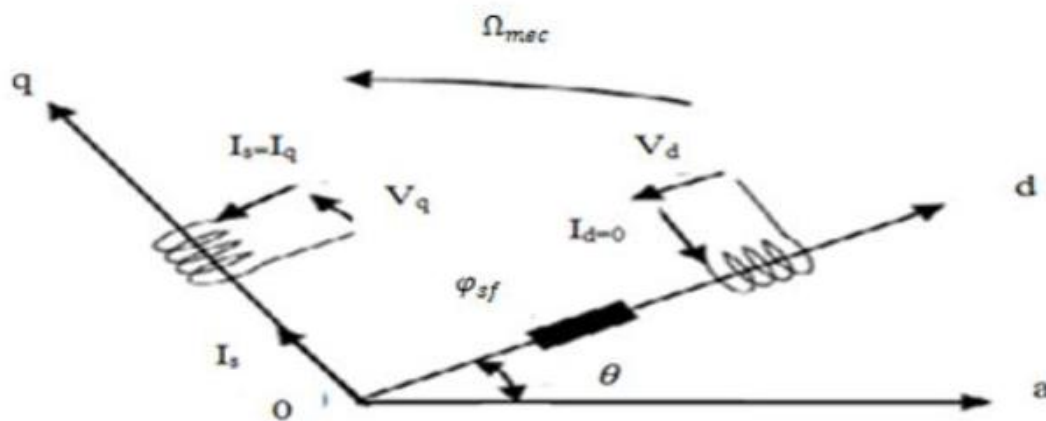


Figure III.2 principe de la commande vectorielle

### III.5 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

#### III.5.1 Avantages de la commande vectorielle

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un couple de contrôle à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

#### III.5.2 Inconvénients de la commande vectorielle

Le contrôle vectoriel par orientation de flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénient :

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse).
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un  $\theta_s$  estimé.

La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances de variateur.

### III.6 Conception des Régulateurs

Soit  $Y^*(t)$  le signal à poursuivre, et  $Y(t)$  le signal de sortie du système à contrôler [31].

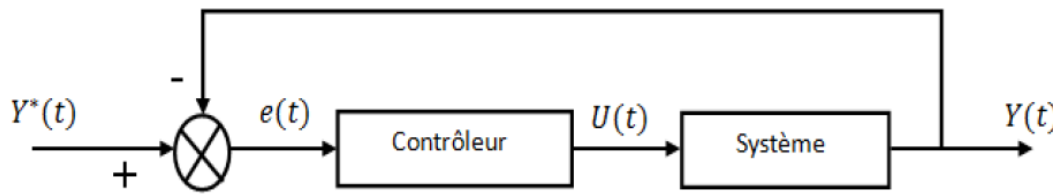


Figure III.3 Représentation du régulateur PI.

La loi de commande est :

$$U(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad \text{III.9}$$

### III.6.1 Action Proportionnelle ( $k_p$ )

Si  $K_p$  est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît, autrement la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

### III.6.2 Action Intégrale ( $k_i$ )

L'action intégrale régit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action  $U(t)$  augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

## III.7 Calcul des Régulateurs

### III.7.1 Régulateur des Courants

Le schéma du contrôle des courants de la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure suivante [32].

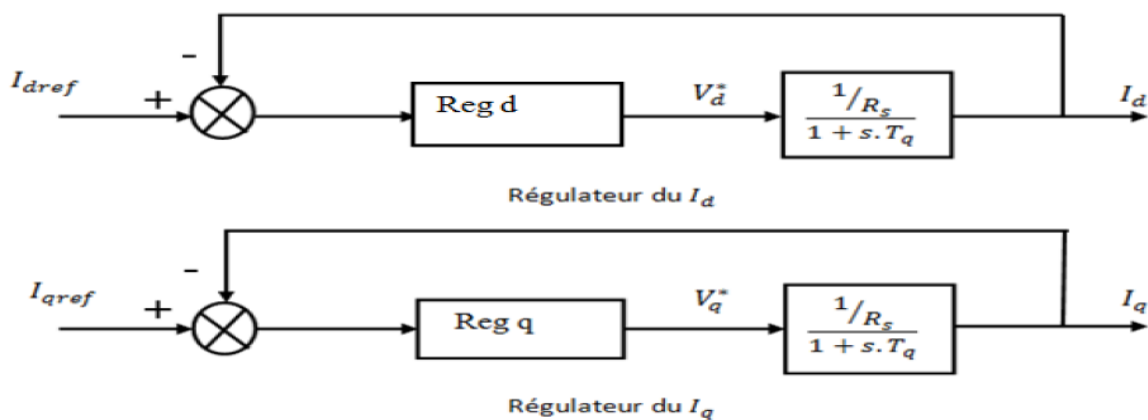


Figure III.4 Commande des courants en double boucle indépendantes.

Soit les fonctions de transfert suivantes

$$F_d(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+s.T_d} = \frac{i_d}{V_{d1}} \quad \text{III.10}$$

$$F_q(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+s.T_q} = \frac{i_q}{V_{q1}} \quad \text{III.11}$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, on pose :

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} \quad \text{et} \quad T_q = \frac{L_q}{R_s}$$

$T_d$  : Constante de temps électrique relative à l'axe  $d$ .

$T_q$  : Constante de temps électrique relative à l'axe  $q$ .

Les régulateurs (Reg  $d$ ) et (Reg  $q$ ) sont choisis comme étant des régulateurs proportionnels et intégraux, avec des fonctions de transfert de la forme suivante

$$\text{Reg } d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \quad \text{III.12}$$

$$\text{Reg } q(s) = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s\right) \quad \text{III.13}$$

$k_{pd}$  : Gains à action proportionnelle du correcteur de courant  $i$ .

$k_{id}$ ,  $k_{iq}$  : Gains de l'action intégrale.

$T_{id}$  : Constante du temps d'intégration.

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$\text{FTBO}_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+s.T_d} \quad \text{III.14}$$

$$\text{FTBO}_q = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+s.T_q} \quad \text{III.15}$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant :

$$\frac{K_{pd}}{K_{id}} = T_d \quad \text{III.16}$$

$$\frac{K_{pq}}{K_{iq}} = T_q \quad \text{III.17}$$

Ce qui ramène les fonctions de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes :

$$FTBF_d = \frac{1}{1+\tau_d s} = \frac{i_d}{i_{dref}} \quad \text{III.18}$$

$$FTBF_q = \frac{1}{1+\tau_q s} = \frac{i_q}{i_{qref}} \quad \text{III.19}$$

Avec :

$$\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \quad \text{III.20}$$

$$\tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}} \quad \text{III.21}$$

Les boucles des courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de  $\tau_d$  et  $\tau_q$ . Celles-ci sont choisies de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée régulé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

On imposant le temps de réponse:  $Tr = 3\tau$

$$T_r = \frac{R_s}{K_{id}}$$

Pour le courant  $i_d$  :

$$K_{id} = \frac{3.R_s}{T_r}$$

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}}$$

$$K_{pd} = \frac{L_d K_{pd}}{R_s} = \frac{3L_d}{T_r}$$

Pour le courant  $i_q$

$$K_{iq} = \frac{3.R_s}{T_r}$$

$$K_{pq} = \frac{L_q K_{pq}}{R_s} = \frac{3L_q}{T_r}$$



### III.8 Régulation de la tension

Les boucles des courants étant considérées unitaires. Le régulateur de la boucle tension  $V_{dc}$  permet la génération du courant de référence  $I_q^*$  afin de maintenir la tension aux bornes du bus continu constante, un régulateur de type PI est y inséré.

### III.9 Modèle du bus continu

Le modèle du bus continu est établi en écrivant le bilan des puissances à l'entrée du bus et à sa sortie

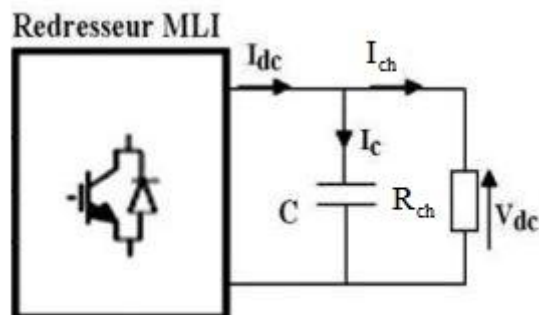


Figure III.5: Association Redresseur MLI – Bus Continu

En considérant le rendement du redresseur MLI unitaire, il vient :

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc} = V_q \cdot I_q \quad (\text{III.22})$$

La figure III.5, nous permet d'écrire

$$I_{dc} = I_{ch} + I_c \quad (\text{III.23})$$

$C$  : la capacité du bus continu en  $F$

$R_{ch}$  : la résistance de charge en  $\Omega$

$$\begin{cases} I_c = c \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \\ I_{ch} = \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Donc

$$c \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad \text{III.25}$$

La transformation de Laplace donne :

$$\left(C \cdot s + \frac{1}{R_{ch}}\right) \cdot V_{dc} = I_{dc} \quad \text{III.26}$$

D'où

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{R_{ch}}{R_{ch} \cdot C \cdot s + 1} = G_v(s) \quad \text{III.27}$$

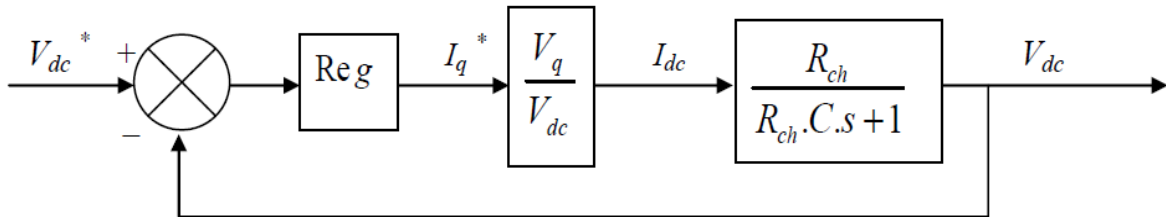


Figure III.6 : Boucle de régulation de la tension du bus continu

### III.10 Calcul des paramètres du régulateur PI

Le régulateur de tension choisi est un PI de fonction de transfert suivante :

$$F(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad \text{III.28}$$

La fonction de transfert du régulateur de tension dans le modèle IMC est la suivante :

$$F(s) = \frac{w_v}{s} \cdot G_v(s)^{-1} \quad \text{III.29}$$

Avec :

$$H(s)^{-1} = \frac{R_{ch} \cdot C \cdot s + 1}{R_{ch}} \quad \text{III.30}$$

Ce qui fait

$$F = \frac{w_v}{s} \cdot G_v^{-1}(s) = \frac{w \cdot R_{ch} \cdot C \cdot s + 1}{R_{ch}} = wC + \frac{1}{s} \frac{w_v}{R_{ch}} \quad \text{III.31}$$

$w$  : La pulsation de coupure en rd/s

$$k_p = w_v c \quad \text{et} \quad k_i = \frac{w_v}{R_{ch}}$$

### III.11 Résultats de simulation et interprétations

- Pour un vent aléatoire

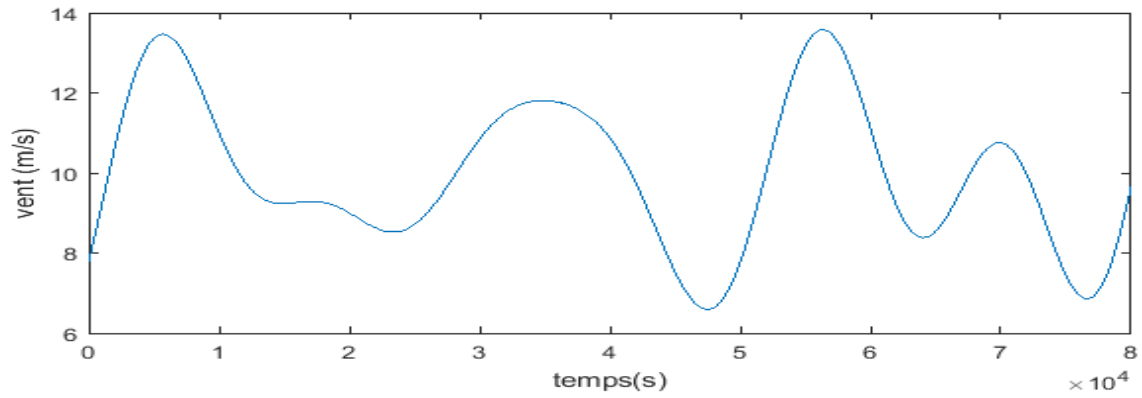


Figure III.7 profil de vent

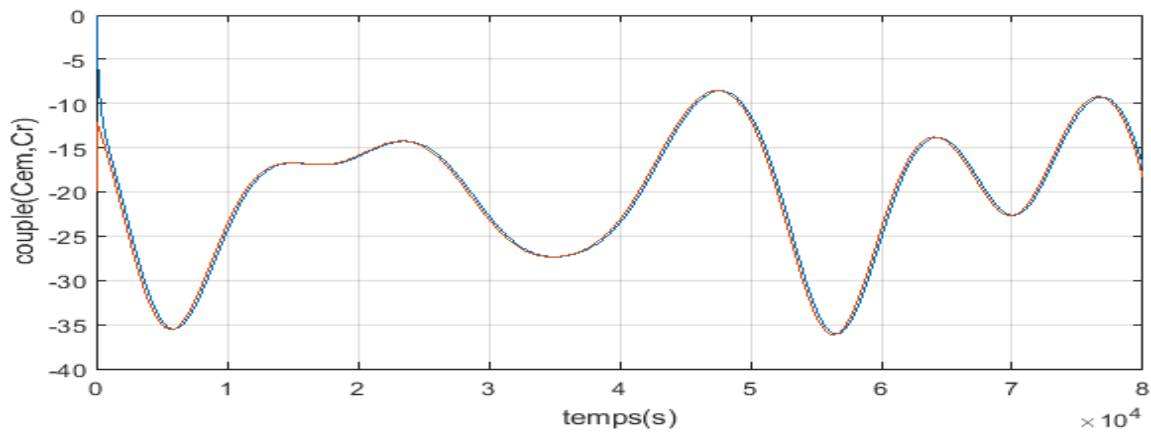


Figure III.8 Couples électromagnétique et résistant

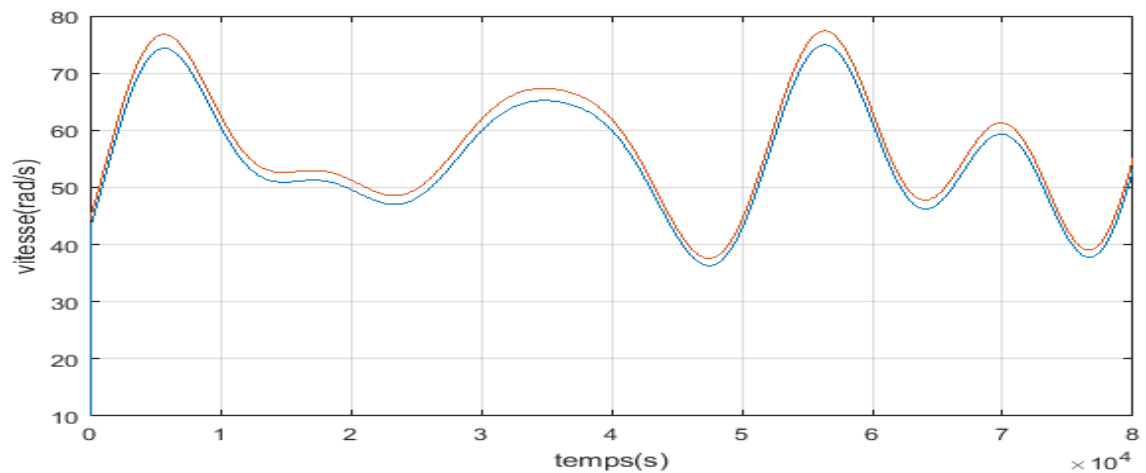
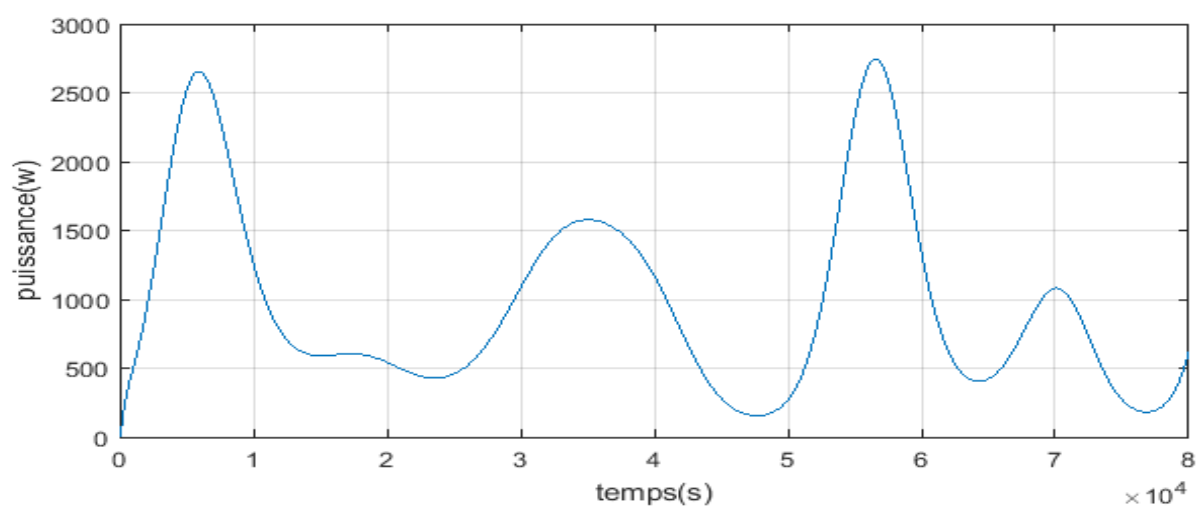
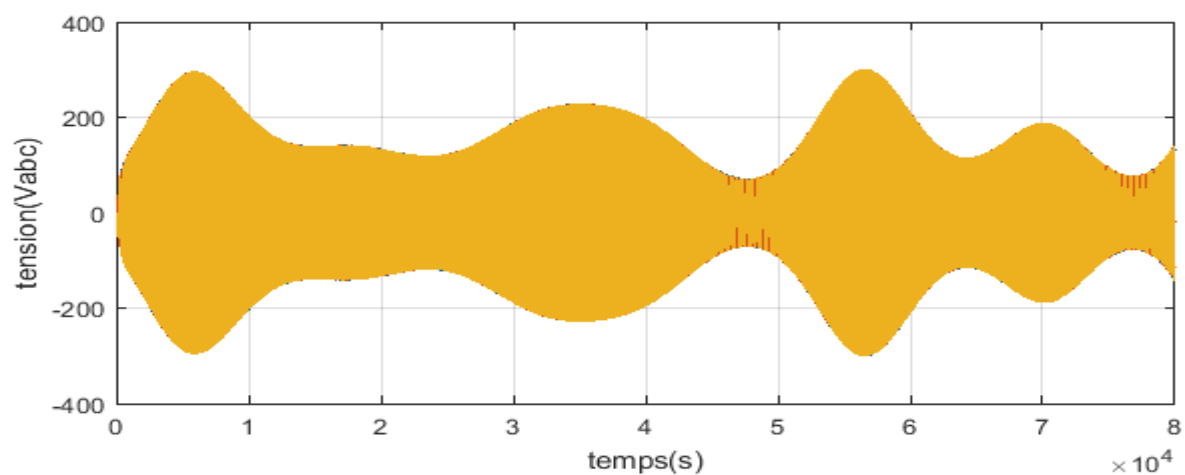
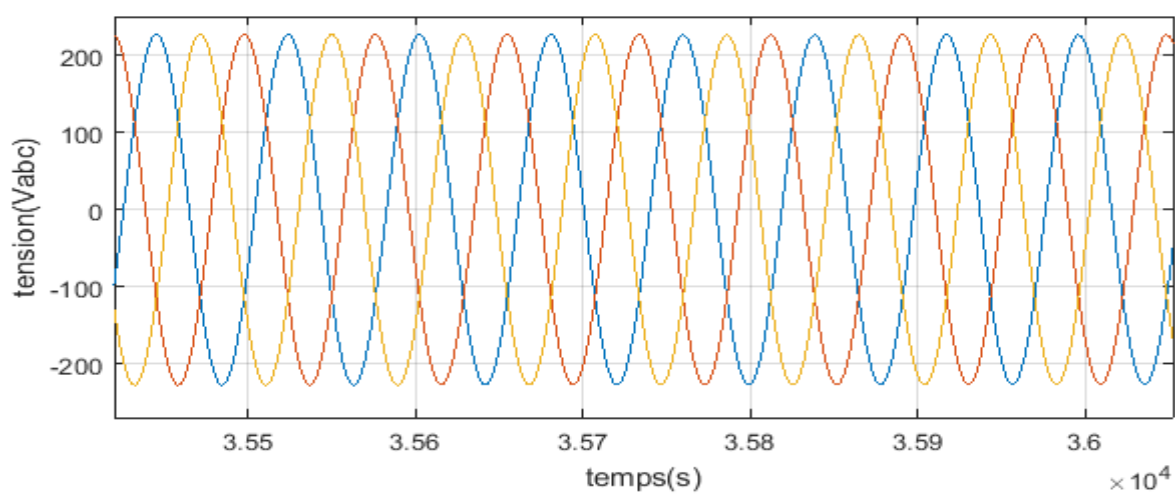


Figure III.9 Allures de vitesses

**Figure III.10** allure de puissance**Figure III.11** allure des tensions**Figure III.12** allure zoom des tensions

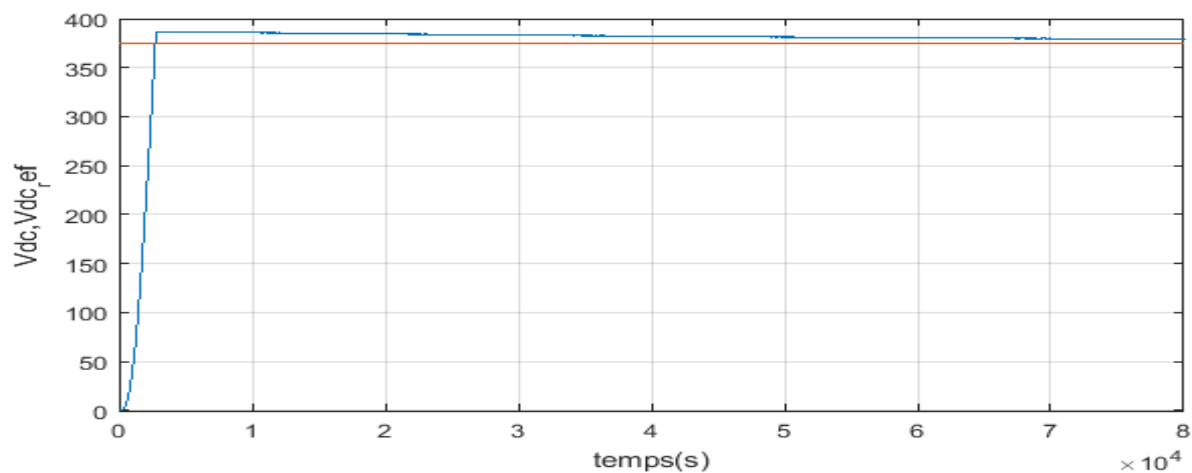


Figure III.13 allure des tensions ( $V_{dc}$ ,  $V_{dcref}$ )

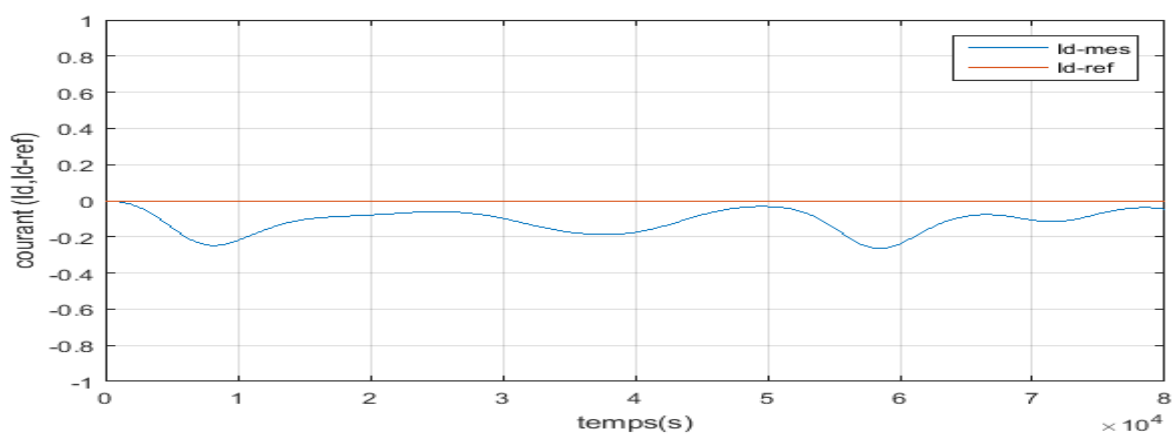


Figure III.14 les courants ( $I_{dmes}$ ,  $I_{dref}$ )

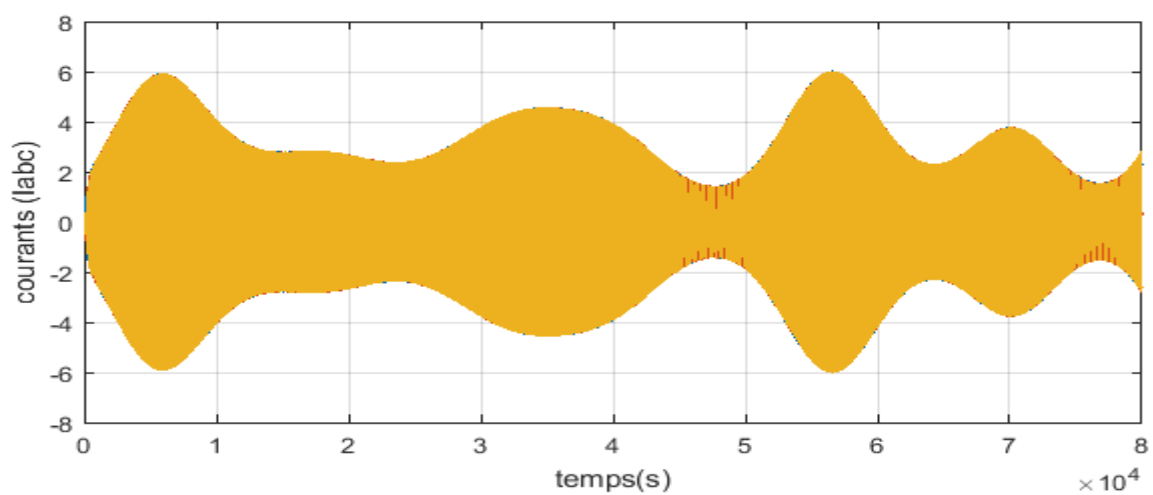
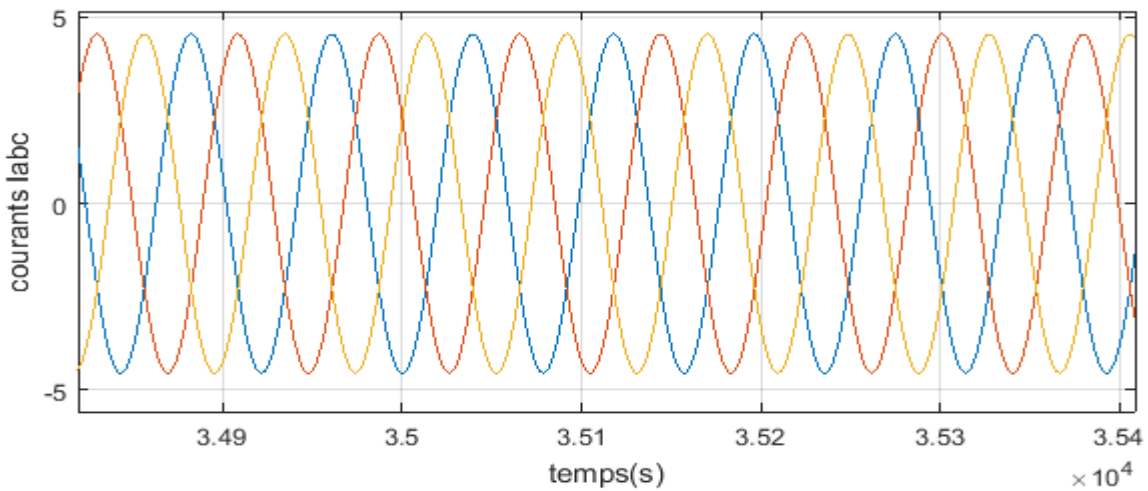


Figure III.15 allure des courants



**Figure III.16** allure zoom des courants

### Interprétation des résultats

La figure (III.6) représente le profil de vent qui varie entre (6.5 à 13.8) (m/s)

La figure (III.7) montre le couple électromagnétique qui suit le profil de vent avec un signe négatif et qui signifie le fonctionnement génératrice

La figure (III.8) montre que la vitesse mécanique mesurée suit la vitesse de référence

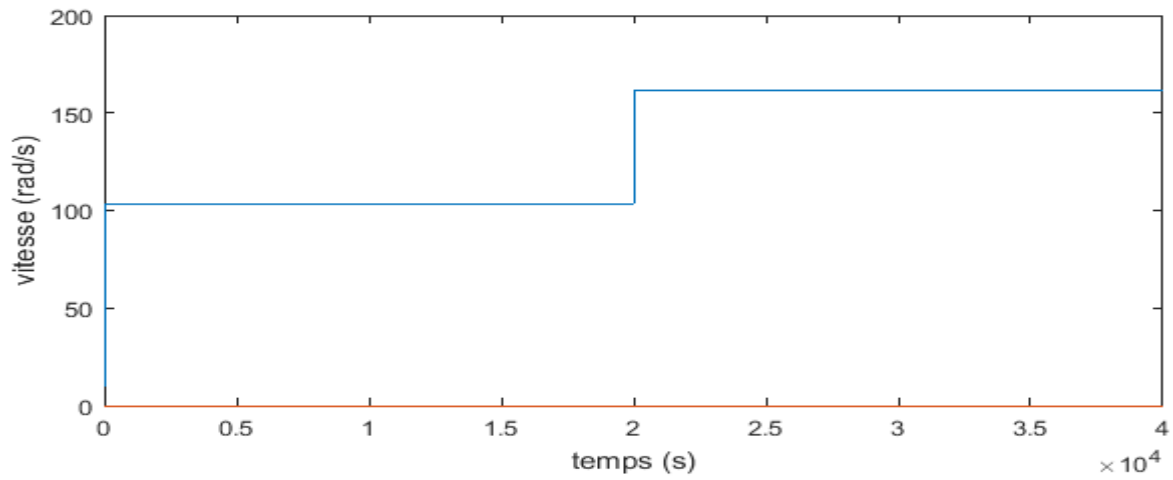
La figure (III.9) montre la puissance active issue de générateur qui suit le profil de vent

Les figures (III.10 et 14) montrent les tensions et les courants de sorties de la génératrice qui sont sinusoïdales.

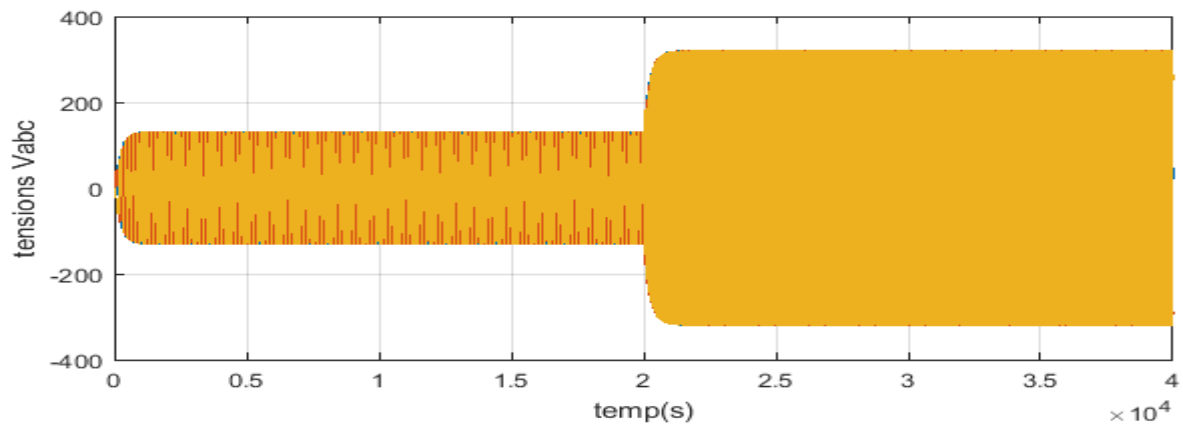
La figure (III.12) représente la tension Vdc qui suit la référence

La figure (III.13) représente le courant Id mesuré qui est proche au courant de référence.

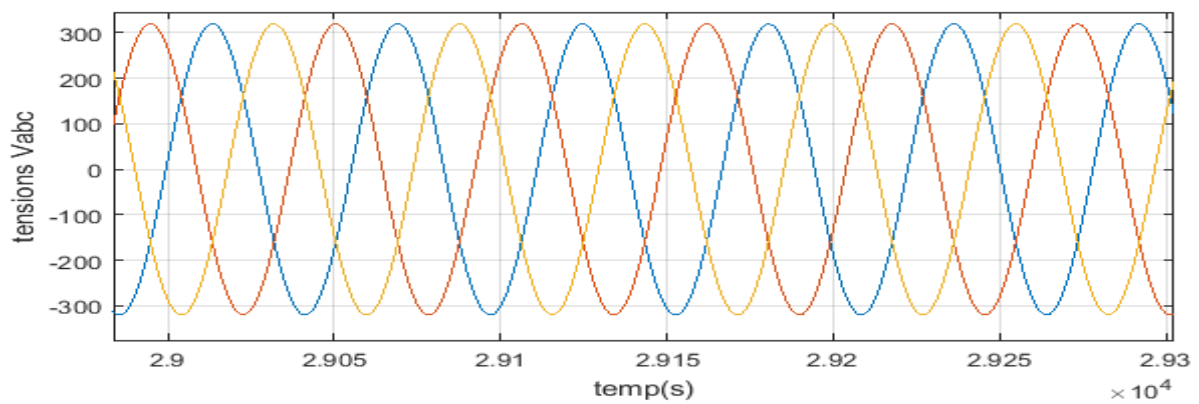
- Pour une variation de la vitesse de rotation de 100 à 160rad/s



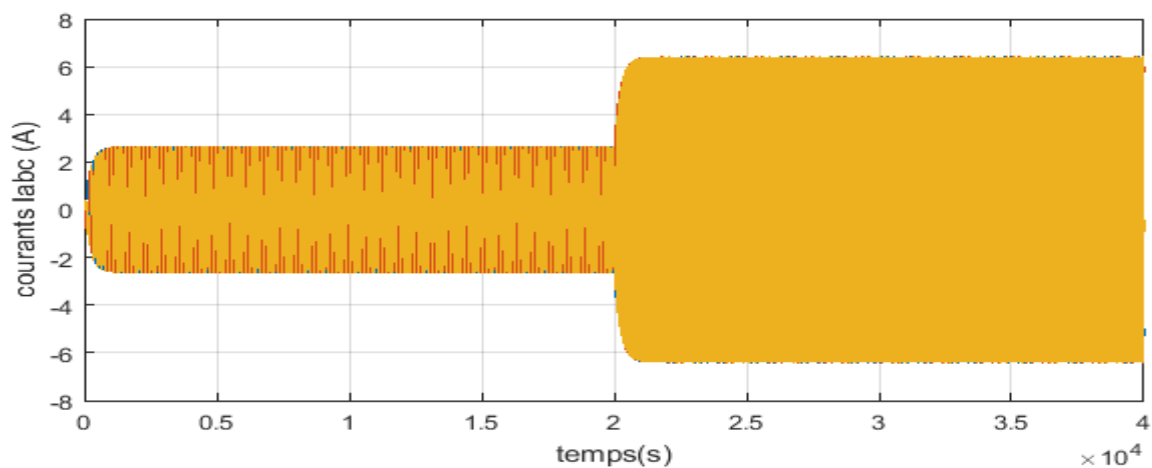
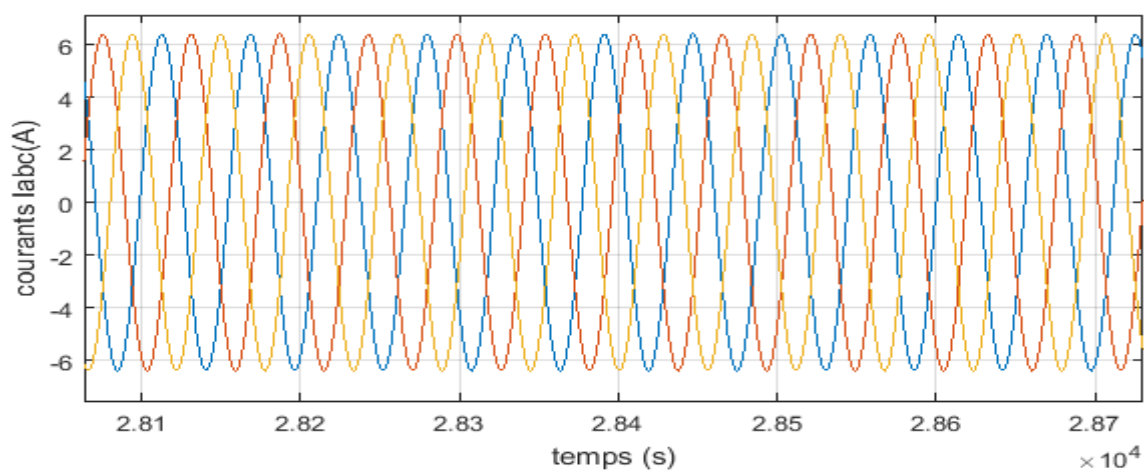
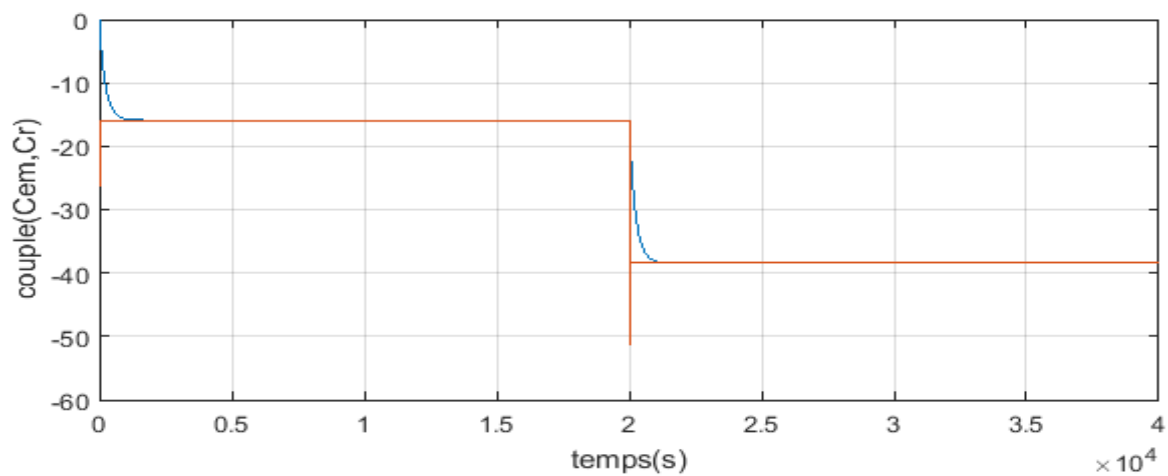
**Figure III.17** : vitesse de rotation



**Figure III.18** : les tensions Vabc



**Figure III.19** : allure zoom des tensions Vabc

**Figure III.20 : Courants Iabc****Figure III.21 : allure zoom des courants Iabc****Figure III.20 Couple Cem, Cr**



## Interprétations des résultats

La figure III.15 représente la vitesse de rotation qui varie entre (100 à 160) rad/s

Les figures (III.16 et III.18) représentent les tensions et les courants de sortie où leurs amplitudes changent à l'instant  $t=2s$ , le moment où la vitesse de rotation varie.

La figure III.20 représente le couple électromagnétique qui suit la vitesse de rotation.

## III.12 Conclusion

L'objectif principal de la commande vectorielle de la GSAP est d'améliorer leur comportement dynamique.

Le travail effectué dans ce chapitre nous a permis de simuler le comportement de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la commande vectorielle permet d'atteindre un découplage entre les axes d et q ce qui rend la GSAP similaire à la machine à courant continu à excitation séparée et l'obtention des bonnes performances. Ensuite on a présenté le principe de la commande vectorielle et les résultats de simulation avec des commentaires pour chaque courbe obtenu.

Enfin on peut conclure que malgré la variation de l'entrée du système qui est le vent, la tension à la sortie de redresseur reste constante à la valeur désirée ce qui justifie la robustesse de la commande réalisée.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Vu la tendance de la majorité des pays vers les énergies renouvelables, le gisement éolien présente l'un des potentiels propres et un bon rendement par rapport à l'énergie solaire. Dans le cadre de la réalisation de ce mémoire, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne, avec pour objectif l'étude de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents.

Le travail présenté, à débuté par des généralités sur l'énergie éolienne et les différents types d'éolienne existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical. Puis on est passé à la modélisation du vent et la turbine éolienne en utilisant l'algorithme MPPT.

L'utilisation de la MSAP à nombre de pôles élevé, permet de supprimer le multiplicateur de vitesse (réduire la taille et la maintenance du système), avoir un fonctionnement à vitesse variable et aux faibles vitesses, et offre l'avantage de ne pas avoir besoin d'une alimentation électrique au rotor. Cela contribue largement à augmenter l'efficacité énergétique du système. Par la suite nous avons abordé une description de la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents en vue de sa commande. Cette dernière doit être effectuée via l'association avec de redresseur et bus continu implémentés par la technique de modulation largeur d'impulsion et se termine par la commande vectorielle de la GSAP. Les paramètres des différents régulateurs ( $K_p$  et  $K_i$ ) sont déterminés et calculés par la méthode analytique.

Un système global de la commande de la chaîne de conversion est proposé, et réalisé sous l'environnement MATLAB/SUMILINK. Les résultats des différentes simulations effectuées ont été satisfaisants et ont permis de valider les modèles mathématiques du système proposé.

# **Bibliographie**

**Références bibliographiques**

- [1] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de doctorat, Université de Nantes, France 2003.
- [2] B. MULTON, O.gergaud, H. AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C.NICHOTA. Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelable », paru mai 2002.
- [3] RABIA MAMMAD « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique.
- [4] A.MERKI, "Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance " ; Thèse de doctorat à l'institut nationale de polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [5] S. Muller, M. Deicke, R. W.De Doncker, "Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, 2000.
- [6] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs trois niveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique", thèse de doctorat en cotutelle entre l'école centrale de Lille et l'école nationale polytechnique d'Alger, 19-04-2007.
- [7] RAMLI-Aziz « Contribution à l'amélioration des performances d'un aérogénérateur basé sur une MSAP », Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2010.
- [8] G.O.cimuca, « système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateur éoliens », Thèse de doctorat 20005.
- [9] HAMECHA Samira Ep. BOUREKACHE, «Etude et commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants permanents», mémoire de magister, université mouloud Mammeri de Tizi ouzou, Algérie, 2013.
- [10] S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologie éoliennes intégrés dans un réseau de moyen tension », université des sciences et technologies de Lille. Thèse de doctorat 2004.
- [11] T. REKIOUA, «Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines à aimants permanents», thèse de doctorat de l'I.N.P.L, 1992.

- [12] « Convertisseurs et machines électriques » Technique de l'ingénieur, D 3960.
- [13] Y. chen, P. pillay, KHAN, « PM Wind Generator Topologies », IEEE Transaction on industry application, vol. 41, Novembre / December 2005.
- [14] M. chinchilla, S.arnaltes, et al, «control of permanent-Magnet Generator Applied to Variables-Speed Wind-Energy Systemes Connected to the Grid » IEEE Transaction on energy conversion vol 21, n°, 1, Mars 2006.
- [15] F. sahin, « Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine », these de doctorat de l'université de Eindhoven, 2001.
- [16] J. marques, H. pinheiro et al, «Asurey on variable-speed wind turbine system », Federal University of Santa Maria-UFSM.Group of power Electronics and control- EPOC.97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.
- [17] E. de veries, «A turn of the better innovative concepts for a wind turbines », Renewable Energy World, 2001.
- [18] P.vidal «Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat de l'institut nationale de la polytechnique de Toulouse, 2004.
- [19] G.seguier «Electronique de puissance », Livre, 7<sup>e</sup> édition. Editeur « DUNDO ».
- [20] H. ZIANE, « Commande vectorielle des machines synchrones à aimant permanents », Mémoire magister, Université A MIRA. Bejaia 2000.
- [21] S. TARAFT « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaine de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université A.MIRA de Bejaia, 2008.
- [22] Abdenour Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaine d'éolienne passive » thèse de Doctorat, INP de TOULOUSE, 2004
- [23] Melle. Boubet W. et Azib S. «Modélisation, simulation et la commande vectorielle sous les conditions de défaut de la machine double étoile», mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique. Université A. mira de Bejaia, 2005.
- [24] L. khettache, «Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée», Batna, 2007.

- [25] M. Sebba, A. Chaker, Y. Meslem, S. Hassaine «Commande en Vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Doté d'un Observateur de Luenberger», 4th International Conférence on Computer Integrated Manufacturing, CIP'2007, Tiaret, 03-04 Nov. 2007.
- [26] E. Smigiel, G. Stuzer « Modélisation et commande des moteurs triphasés, commande vectorielle des moteurs synchrones à aimant permanent, commande par DSP », 2000
- [27] A. Massoum « contribution à la commande Singulièrement Perturbée d'une machine synchrone à aimant permanent », thèse de doctorat, université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbés, 2007
- [28] J.M. Retif « commande vectorielle des machines asynchrones et synchrones Notes de cours, Institut National des sciences Appliquées de Lyon (INSA), 2008
- [39] F. Khatounian « Contribution à la modélisation, l'identification de la commande d'une interface Haptique à un degré de liberté entraînée par une machine synchrone à aimant permanent », thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Cachan, 2006
- [30] A. AOUIFI, «Utilisation d'observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectoriel d'une machine asynchrone à cage », Thèse de magistère Université de Biskra, 2011.
- [31] ANNANE adel, « Analyse du comportement du moteur synchrones dans les entraînements électriques à vitesse variable ». Mémoire de Magister, Université d'Annaba, 2009.

## Annexes

### Les paramètres de la turbine

$$R = 1.6 \text{ [m]}$$

$$\rho = 1.225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$G = 1.2$$

$$f = 0.001 \text{ [N.m.s/rad]}$$

$$j = 0.0004 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$C_p \text{ max} = 0.5270$$

### Les paramètres de la GSAP

$$L_q = 0.00355 \text{ [H]}$$

$$L_d = 0.00355 \text{ [H]}$$

$$J = 0.011 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$f = 0.00014 \text{ [N.m.s/rad]}$$

$$\omega_0 = 12 \text{ [rad/s]}$$

$$\text{flux} = 0.35$$

$$P = 14$$

$$R_s = 0.3676 \text{ [\Omega]}$$

### Les paramètres de bus continu

$$C = 10 \times 10^{-3} \text{ [F]}$$

$$V_{dc}^* = 375 \text{ [V]}$$

$$R_{ch} = 100 \text{ [\Omega]}$$

### Les paramètres du redresseur MLI

$$R_1 = 4.2 \text{ [\Omega]}$$

$$L_1 = 0.0028 \text{ [H]}$$

$$a = 300 \text{ [v]}$$

$$f_p = 2000 \text{ [HZ]}$$