

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



## **Mémoire de Fin d'Etudes**

En Vue d'Obtention du Diplôme Master

**Filière** : Energies Renouvelables

**Option** : Energies Renouvelables en Electrotechnique

**Sous le thème :**

**Étude d'un système éolien basé sur  
La machine synchrone à aimants  
Permanents double étoile**

**Réalisé Par :**

M. BENAKLI Nabil  
M. IDIR Ramdhan

**Encadré par :**

M. MADI Yazid

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020/2021**

# *Dédicaces*

*Nous dédions ce Projet de Fin d'Etudes*

- *A nos très chers grande parents, chers parents, pour leur soutien permanent dans tous les côtés.*
- *A nos chères sœurs,*
- *A nos chers frères,*
- *A toute la famille,*
- *A tous nos copains de chambre de la résidence universitaire,*
- *A tous nos amis.*

*BENAKLI Nabil*

*IDIR Ramdhan*

# *Remerciements*

*Notre premier remerciement va tout d'abord à Dieu, le miséricordieux, pour nous avoir donné la foi, le courage et la patience qui nous ont permis de réaliser et de finir ce travail.*

*Nous tenons à remercier particulièrement, Monsieur Yazid MADI, Docteur à l'Université de Bejaia et encadreur du présent mémoire, pour avoir proposé, suivi et dirigé ce travail, mais aussi pour le respect dont nous fûmes témoins. Nous le remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience de chercheur, pour ses encouragements et ses orientations constructives qui nous ont permis de mener à bien ce travail.*

*Nous tenons aussi, à remercier profondément tous les enseignants, qui nous ont donné de leur savoir, et pour leur soutien au long de notre parcours universitaire.*

*Que les membres de jury trouvent aussi nos hautes considérations pour avoir accepté d'évaluer notre travail dont leurs jugements nous seraient certainement d'un grand profil.*

*Nous adressons aussi ces remerciements aux membres de nos familles, pour l'incalculable soutien et encouragement que nous avons toujours reçus de leur part.*

*BENAKLI Nabil*

*IDIR Ramdhan*

# **SOMMAIRE**

**LISTE DES FIGURES****LISTE DES TABLEAUX****NOTIONS ET SYMBOLES****INTRODUCTION GENERALE****INTRODUCTION GENERALE.....8****CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE****INTRODUCTION.....9**

<b>I.1- HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE.....</b>	<b>10</b>
<b><i>I.2.1- Avantages.....</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>I.2.2- Inconvinients.....</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b>I.3- PRESENTATION DU SYSTEME EOLIEN .....</b>	<b>12</b>
<b><i>I.3.1- Définition de l'énergie éolienne .....</i></b>	<b><i>12</i></b>
<b><i>I.3.2- Les différents types d'éoliennes .....</i></b>	<b><i>12</i></b>
<b><i>I.3.2.1- Les éoliennes à axe vertical.....</i></b>	<b><i>13</i></b>
<b><i>I.3.2.2- Les éoliennes à axe horizontal .....</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b>I.4- PRINCIPALES COMPOSANTES D'UNE EOLIENNE .....</b>	<b>16</b>
<b><i>I.4.1- La nacelle.....</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b><i>I.4.2- Le rotor.....</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b><i>I.4.3- La tour .....</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b>I.5- CHOIX D'AEROGENERATEURS ET LEURS RACCORDEMENTS AU RESEAU .....</b>	<b>17</b>
<b>I.6- GENERATEURS ELECTRIQUES.....</b>	<b>18</b>
<b><i>I.6.1- Systèmes éoliens utilisant la génératrice synchrone (GS et GSAP). 18</i></b>	
<b><i>I.6.2- Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).....</i></b>	<b><i>19</i></b>
<b><i>I.6.3- Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à cage d'écureuil (GAS).....</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b><i>I.6.4- Système éolien utilisant la génératrice synchrone à aimants permanents double étoile (GSAPDE)....</i></b>	<b><i>22</i></b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>23</b>

**CHAPITRE II :L'AUTOPILOTAGE ET COMMANDE VECTORIELLE DE LA MSAPDE****INTRODUCTION.....24**

<b>II.2 PRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS DOUBLE ETOILE .....</b>	<b>24</b>
<b><i>II.2.1 Description de la MSAPDE.....</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b><i>II.2.2 Les avantages de la MSAPDE .....</i></b>	<b><i>25</i></b>

---

II.2.3 Les inconvénients de la MSAPDE.....	25
II.3 MODELE MATHEMATIQUE GENERAL .....	25
II.3.1 Hypothèses Simplificatrices.....	26
II.3.2 Équations électriques.....	26
II.3.3 Équations magnétiques.....	26
II.3.4 Équations mécaniques .....	27
II.4 TRANSFORMATION TRIPHASE- BIPHASE .....	28
II.4.1 Transformation de PARK.....	28
II.4.2 MODELE BIPHASE DE LA MACHINE (REPÈRE D-Q) .....	29
II.4.3 Equation des flux dans système biphasé (d, q) .....	30
II.4.5 Equation des tensions dans système biphasé (d, q) .....	30
II.4.6 Equation du couple électromagnétique .....	30
II.4.7 La forme matricielle .....	30
II.4.8 Equations d'état de la MSAPDE.....	31
II.5 RESULTATS DE SIMULATION .....	31
II.6 INTERPRETATION DES RESULTATS DE SIMULATION .....	33
II.7 MODELISATION DE L'ENSEMBLE SYSTEME D'ALIMENTATION-MSAPDE .....	33
II.7.1 Modélisation du redresseur.....	34
II.7.2 Modélisation du filtre .....	35
II.7.3 Modélisation de l'onduleur.....	36
II.7.3.1 Commande par modulation sinus-triangle.....	38
II.7.3.2 Association de la MSAPDE-onduleurs.....	40
II.8 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MSAPDE.....	40
II.8.1 Principe de la commande vectorielle de la MSAPDE.....	40
II.8.2 Application de la commande vectorielle à la MSAPDE .....	41
II.8.3 Découplage par compensation .....	41
II.8.4 Dimensionnement des régulateurs .....	43
II.8.4.1 Régulation des courants .....	44
II.8.4.2 Régulation de vitesse.....	44
II.8.5 Schéma global de la commande.....	45
II.9 Résultats de simulation numérique .....	46
II.10 INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS .....	48
CONCLUSION.....	48

### CHAPITRE III : INTEGRATION DE LA MSAPDE DANS LE SYSTEME DE CONVERSION EOLIEN

INTRODUCTION.....	49
III.2 DESCRIPTION SIMPLIFIEE DU SYSTEME ETUDIE.....	49
III.3 CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE .....	50
III.3.1 Modélisation du vent.....	50
III.3.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .	50
III.3.4 Théorie de Betz .....	52
III.4 MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE .....	53
III.4.1 Modèle de la turbine .....	53
III.4.1.1 Puissance mécanique de la turbine .....	54
III.4.1.2 Coefficient de puissance.....	54
III.4.1.3 Vitesse relative.....	54
III.4.1.4 Couple mécanique de la turbine .....	55
III.4.2 Modèle du multiplicateur.....	55

<i>III.4.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....</i>	<i>56</i>
<b>III.5 STRATEGIE DE MAXIMUM DE PUISSANCE MPPT .....</b>	<b>56</b>
<i>III.5.1 Commande de la turbine du vent par la stratégie MPPT .....</i>	<i>57</i>
<i>III.5.3 Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable .....</i>	<i>58</i>
<b>III.6 RESULTATS DE SIMULATION .....</b>	<b>59</b>
<b>III.6.1 INTERPRETATION DES RESULTATS .....</b>	<b>61</b>
<b>III.7 MODELE COMPLET DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE.....</b>	<b>62</b>
<i>III.7.1 Contrôle de l'onduleur côté réseau électrique .....</i>	<i>62</i>
<i>III.7.2 Calcul de la tension du bus continu.....</i>	<i>62</i>
<i>III.7.3 Régulation de la tension du bus continu.....</i>	<i>63</i>
<i>III.7.4 Régulation des courants .....</i>	<i>63</i>
<i>III.7.5 Calcul des courants de références .....</i>	<i>65</i>
<b>III.8 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE .....</b>	<b>65</b>
<b>III.8.1 INTERPRETATION DES RESULTATS DE SIMULATION .....</b>	<b>70</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>71</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>73</b>

**BIBLIOGRAPHYQUE****ANNEXES**

---

**Liste des figures**

Figure I. 1 Eolienne à axe vertical .....	13
Figure I. 2 Capteurs à axe horizontal .....	14
Figure I. 3 Eléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal [12] .....	17
Figure I. 4 Système éolien basé sur la génératrice synchrone (GS) .....	18
Figure I. 5 Système éolien basé sur la GSAP .....	19
Figure I. 6 Système éolien basé sur la GADA à couplage électronique par le rotor .	20
Figure I. 7 Système éolien basé sur la GADA avec contrôle du glissement par la dissipation de la puissance .....	20
Figure I. 8 Système éolien basé sur la GADA à structure de Kramer .....	21
Figure I. 9 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage d'écureuil ...	22
Figure I. 10 Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimants permanents double étoile .....	23
Figure II. 1 Représentation des enroulements statoriques de la MSAPDE.....	25
Figure II. 2 Différents couples qui agissent sur le rotor .....	27
Figure II. 3 Représentation schématique du modèle de Park de la MSAPDE .....	29
Figure II. 4 Représentation schématique de la machine dans le repère (d,q) .....	29
Figure II. 5 Performance de la conduite de MSAPDE en charge .....	32
Figure II. 6 Schéma de l'association MSAPDE-Système d'alimentation.....	33
Figure II. 7 Modélisation du redresseur triphasé double alternance à diode en pont de Graetz .....	34
Figure II. 8 Modélisation du filtre .....	35
Figure II. 9 Onduleur triphasé .....	37
Figure II. 10 Principe de la commande par MLI sinus-triangle.....	39
Figure II. 11 Association MSAPDE-Onduleurs de tension à commande MLI .....	40
Figure II. 12 Principe de découplage par compensation .....	43
Figure II. 13 Découplage par compensation de la MSAPDE .....	43
Figure II. 14 Boucle des régulateurs de courants .....	44
Figure II. 15 Boucle de régulation de la vitesse.....	44
Figure II. 16 Schéma global de la commande vectorielle de la MSAPDE.....	45
Figure II. 17 La vitesse de rotation de la MSAPDE.....	46
Figure II. 18 Le couple électromagnétique de la MSAPDE.....	46
Figure II. 19 Les courants $I_{q1}$ , $I_{q2}$ de la MSAPDE .....	47
Figure II. 20 Les courants $I_{d1}$ , $I_{d2}$ de la MSAPDE.....	47
Figure II. 21 Les courants statoriques de la MSAPDE.....	47
Figure III. 1 Schéma synoptique du système étudié.....	50
Figure III. 2 Représentation d'une colonne d'aire.....	51
Figure III. 3 Tube autour d'une turbine éolienne .....	52
Figure III. 4 Système de conversion de l'énergie éolienne.....	53
Figure III. 5 Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de $\lambda$ .....	55
Figure III. 6 Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien .....	56
Figure III. 7 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite .....	58
Figure III. 8 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable .....	59
Figure III. 9 Profil de vent.....	60
Figure III. 10 La puissance de la turbine éolienne .....	60
Figure III. 11 Le coefficient de puissance $C_p$ .....	60

Figure III. 12 La vitesse relative $\lambda$ .....	61
Figure III. 13 La vitesse de l'arbre mécanique.....	61
Figure III. 14 Commande vectorielle Foc de la GSAPDE.....	62
Figure III. 15 Profil du vent .....	65
Figure III. 16 La vitesse de la GSAPDE et sa référence .....	66
Figure III. 17 Couple électromagnétique de la GSAPDE et sa référence.....	66
Figure III. 18 Courants statoriques des deux étoiles.....	67
Figure III. 19 Puissance active et réactive de la GSAPDE.....	67
Figure III. 20 Tension du bus continu et sa référence.....	68
Figure III. 21 Le courant et la tension d'une phase du coté réseau .....	68
Figure III. 22 Puissance active et réactive du coté réseau .....	69

### **Liste des tableaux**

Tableau I. 1 Classification des éoliennes selon leur puissance nominale .....	12
Tableau I. 2 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical [11].....	14
Tableau I. 3 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal [11] .....	15

---

## **Notations et Symboles**

MSAPDE	Machine Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimants Permanents
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
GSAPDE	Génératrice Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile
GS	Génératrice Synchrone
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel Intégral
$R_{s1}$	Résistance statorique par phase de stator 1
$R_{s2}$	Résistance statorique par phase de stator 2
$R_s$	Résistance du stator 1 et le stator 2
$I_{d1}$	Le courant statorique de l'axe q
$I_{q1}$	Le courant statorique de l'axe d
$I_{d2}$	Le courant statorique de l'axe q
$I_{q2}$	Le courant statorique de l'axe d
$V_{d1}$	La tension statorique de l'axe d
$V_{q1}$	La tension statorique de l'axe q
$V_{d2}$	La tension statorique de l'axe q
$V_{q2}$	La tension statorique de l'axe d
$\Phi_r$	Flux rotorique (constant)
J	Moment d'inertie du rotor
$C_r$	Couple de charge
$C_e$	Couple électromagnétique
$C_f$	Couple de frottement
$\Omega_r$	Vitesse de rotation rotorique de la machine
$W_r$	Vitesse de rotation
P	Transformation de Park
$[P_{s1}(\theta)]$	Matrice de transformation de Park (stator 1)
$[P_{s2}(\theta)]$	Matrice de transformation de Park (stator 2)
$[P_{s1}(\theta)]^{-1}$	Matrice de transformation inverse de Park (stator 1)

---

## NOTIONS ET SYMBOLES

---

$[P_{s2}(\theta)]^{-1}$	Matrice de transformation inverse de Park (stator 2)
Ld1	Inductance statorique de l'axe d (stator 1)
Lq1	Inductance statorique de l'axe q (stator 1)
Ld2	Inductance statorique de l'axe d (stator 2)
Lq2	Inductance statorique de l'axe q (stator 2)
a , b, c	Axes liés aux enroulements triphasés
d q	Axes correspondants aux référentiels fixes par rapport au champ tournant
$\theta$	Angle électrique entre la phase 1 a et la position du rotor
$\gamma$	Angle électrique entre les deux étoiles
$\alpha$	Angle électrique entre les phases d'un stator
$V_{vent}$	Vitesse du vent
S	Section du rotor
R	Le rayon des pales
$\beta$	Angle d'orientation des pales

---

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie propre. Au début, elle était exploitée dans des applications mécaniques. Par la suite, elle a été utilisée pour produire de l'électricité. La technologie de fabrication des éoliennes a été améliorée au cours des 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> guerres mondiales. La crise pétrolière de 1974 a relancé à nouveau les études sur les éoliennes. Depuis les années 1990, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW. L'intégration des systèmes éoliens nécessitent la réduction des coûts d'exploitation et de maintenance ainsi que l'augmentation de la puissance captée du vent.[1]

Le système étudié est constitué d'un aérogénérateur tripale, à axe horizontal, relié au réseau par le biais du générateur synchrone à aimants permanents double étoile (GSAPDE). Ce type de machine présente certains avantages par rapport aux autres types, telles que la segmentation de puissance, la minimisation des ondulations du couple et la réduction des harmoniques.[1]

Un appareil de contrôle performant nécessite en générale une bonne réponse en régulation et doit être peu sensible aux variations des conditions de fonctionnement et des paramètres du système. Les techniques de commande conventionnelles de type PI couvrent une large gamme dans les applications industrielles, ce sont des techniques de contrôle linéaire et présentent un intérêt de simplicité de mise en œuvre et la facilité des régulateurs gagne en synthèse.

En premier chapitre, nous décrivons un bref historique sur l'énergie éolienne, puis nous présentons la constitution des turbines éoliennes. La description des générateurs les plus utilisés est présentée en fin de ce chapitre.

La modélisation et la simulation de la machine synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE) ainsi que l'association de cette dernière à deux onduleurs en parallèle sont présentés en deuxième chapitre, ensuite, nous avons appliqué la commande vectorielle (FOC) à tout le système sus-cité.

Le modèle mathématique de l'éolienne et le contrôle vectoriel qui partagent des puissances entre le système éolien et le réseau électrique sont détaillés au troisième chapitre.

Une conclusion générale avec quelques perspectives viendra clore ce mémoire.

**Chapitre I :**  
Etat de l'art sur l'énergie  
éolienne

## Introduction

L'énergie électrique est l'un des facteurs primordiaux dans la vie quotidienne de l'être humain, la consommation mondiale ne cesse d'augmenter par la multiplicité des domaines d'activités et des besoins journaliers faisant appel à l'électricité. Une grande partie de cette énergie provient des énergies fossiles causant ainsi des problèmes environnementaux.

A partir de cet état de fait et suite à la recherche d'un développement durable, la maîtrise et le développement des énergies renouvelables sont devenus l'un des importants sujets débattus et véhiculés au sein des congrès, conférences et des laboratoires de recherche etc..., en particulier l'énergie éolienne qui a énormément évolué ces deux dernières décennies.

Dans ce chapitre, nous décrivons un bref historique sur l'énergie éolienne, puis nous présentons la constitution générale d'un système éolien et les turbines usuelles. Ensuite une description des générateurs les plus utilisés actuellement est présentée [2].

### I.1- Historique de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est utilisée depuis l'antiquité, au *XII<sup>e</sup>* siècle, les Perses et les Egyptiens ont commencé à utiliser cette énergie pour pomper de l'eau, avant même que le charbon et le pétrole raffiné ont été découverts. Ensuite, les hommes se sont servis des moulins à vent et des roues à eau pour moudre le blé et le riz, des siècles avant les Européens [3]. Probablement, la première éolienne a été construite en Ecosse par le professeur James Blythen en 1887 [4]. L'année suivante en 1888, la première éolienne opérationnelle a été développée par Bruch et ses collègues et installée sur la côte atlantique. Le diamètre de cette turbine était de 17 m et elle fut équipée avec 144 pales de cèdre.

Elle avait généré seulement 12 kW et fut utilisée pour charger les batteries et comme alimentation continue de lampes et moteurs [5].

Par la suite, le développement réel de l'énergie éolienne comme une source d'électricité a commencé et avancé étape par étape. Au cours des années 1920-1930, la popularité des éoliennes n'a cessé d'augmenter et a atteint son plus haut sommet à la fin de cette période avec plus de 600.000 unités de turbines éoliennes installées dans les fermes et les zones rurales des Etats Unis. La plupart de ces éoliennes étaient seulement capables de produire moins de 1 kW d'électricité [6]. Le marché de l'éolien a commencé à ralentir à la fin des années 1950, ce ci étant causé par le développement des lignes électriques à grande échelle. Mais avant cela, la plupart des fermes utilisaient l'électricité éolienne équipée de la turbine à axe horizontal au vent construit en 1941 [7]. L'emploi de l'énergie éolienne a connu une hausse considérable au cours de la dernière décennie, la production mondiale à doubler tous les 3,5 ans depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle.

Les systèmes éoliens peuvent être classés selon leur conception, leur construction, leur type ou leur emplacement [8]. On distingue les éoliennes :

- A axe horizontal ou vertical.
- Avec multiplicateur ou entraînement direct.
- Face au vent ou contre le vent.
- Avec une ou plusieurs pales.
- Employant une commande pitch ou un décrochage aérodynamique pour le système mécanique.
- A installer sur terre ou sur mer.

## **I.2- Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [9].

### **I.2.1- Avantages**

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

- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui cause un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

### **I.2.2- Inconvénients**

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs **[10]**. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines **[11]**.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

### I.3- Présentation du système éolien

#### I.3.1- Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit de l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui la transmet ensuite sur les réseaux électriques.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale:

- Eoliennes de petite puissance : inférieures à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieures à 1 MW.

A titre de comparaison, le tableau I.1 ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [12].

**Tableau I. 1 Classification des éoliennes selon leur puissance nominale**

<b>Eolienne</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
<b>Moyenne</b>	12 m à 45 m	De 40 Kw à 1MW
<b>Grande</b>	46 m et plus	1 MW et plus

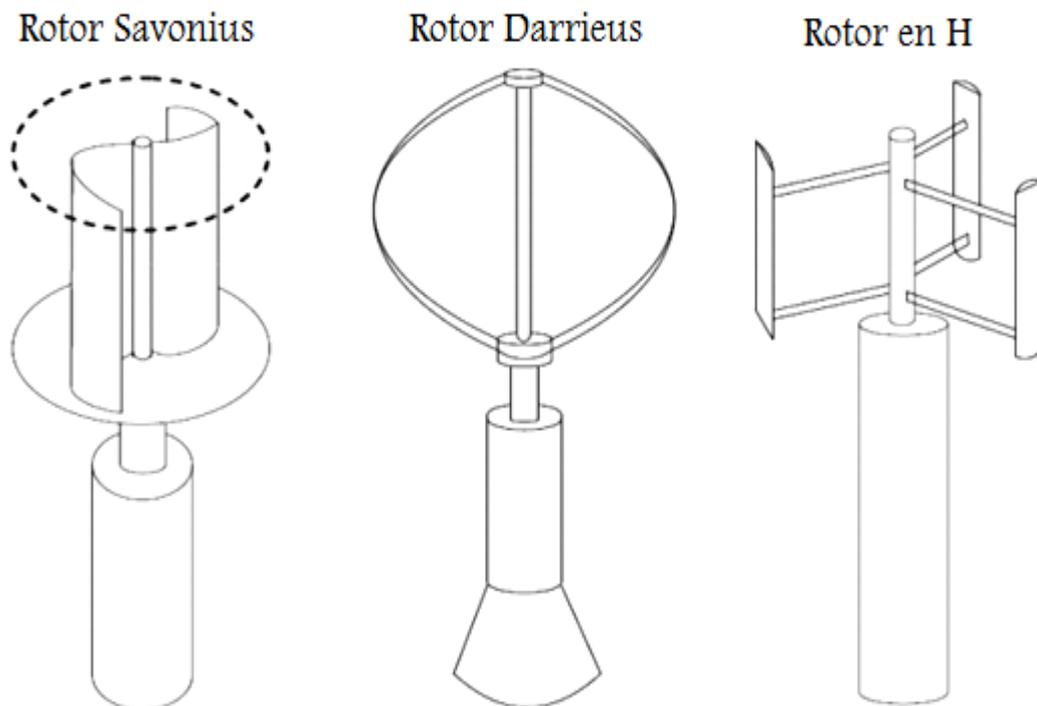
#### I.3.2- Les différents types d'éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles :

- Éoliennes à axe vertical.
- Éoliennes à axe horizontal.

**I.3.2.1- Les éoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement, en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol; donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais trois structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : Savonius, Darrieus et rotor de Musgrave prennent une forme 'H' (voir la figure I.1).



**Figure I. 1 Eolienne à axe vertical**

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical :

Tableau I. 2 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical [13]

Avantages	Inconvénients
La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner qu'elle que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.	La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	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.

**I.3.2.2- Les éoliennes à axe horizontal**

Les turbines de vent horizontales peuvent être construites avec deux ou trois pales. La technologie largement dominante aujourd'hui c'est la turbine tripale à axe horizontal, parfois bipale et à rotor face au vent. La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou en arrière (voir la figure I.2).

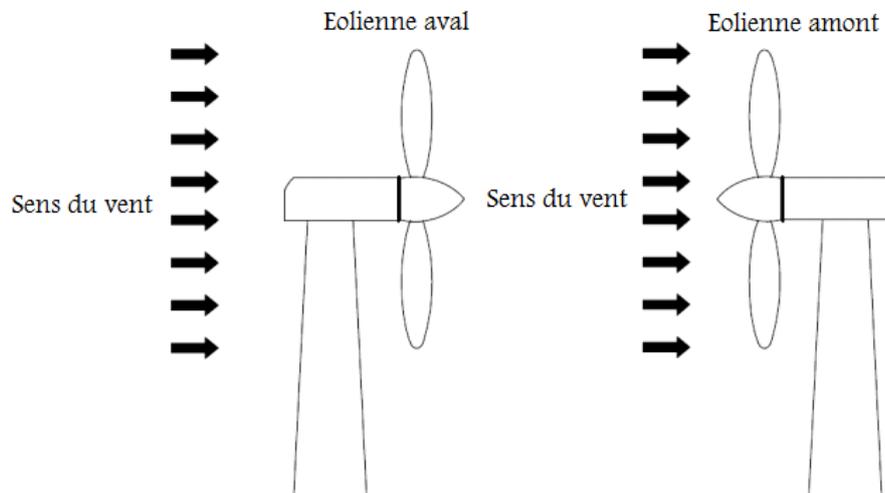


Figure I. 2 Capteurs à axe horizontal

Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono pale, bipales, tripales ou multipales. Une éolienne mono pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité.

Cependant, un contre poids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela. Les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive pas des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour.

Alors, pour remédier à ces problèmes, pratiquement toutes les éoliennes installées sont de type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et présentent le coefficient de puissance le plus élevé.

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal.

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal:

**Tableau I. 3 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal [13]**

Avantages	Inconvénients
Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.	Coût de construction très élevé.
Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.	L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.	L'éolienne met plus de temps à se déclencher qu'une éolienne à axe vertical, elle doit s'orienter par rapport à la direction du vent, ce qui retarde d'autant son déclenchement.

Malgré ces inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles ont de faible puissance et généralement destinées à des utilisations permanentes comme par exemple la charge des batteries.

#### **I.4- Principales composantes d'une éolienne [11]**

Nous avons traité ici uniquement l'aérogénérateur à axe horizontal, étant donné que la majorité des éoliennes installées dans le monde sont à axe horizontal. La figure I.3 montre les éléments clés constituant une éolienne.

##### **I.4.1- La nacelle**

C'est le cœur de l'éolienne, elle contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesure du vent. Elle est liée à la tour par une liaison de type pivot motorisée permettant de choisir son orientation et éventuellement de positionner l'éolienne au vent.

##### **I.4.2- Le rotor**

Il permet de transférer une partie de la puissance du vent à l'arbre lent de l'éolienne. Son diamètre détermine la puissance qui pourra être récupérée. Il est composé d'un moyeu auquel sont accouplées des pales. Les matériaux entrants dans la composition des pales sont essentiellement à base de composites comme la fibre de verre, la fibre de carbone ou encore la résine d'époxy afin de résister aux nombreuses contraintes mécaniques (torsion et flexion) ainsi qu'au phénomène d'abrasion auquel s'ajoute un phénomène de corrosion en milieu marin.

Les pales peuvent être articulées sur leur axe totalement ou partiellement, ou encore être conçues afin de décrocher aérodynamiquement sous des vitesses de vent excessives.

### I.4.3- La tour

Bien que plusieurs types de tour existent suivant la puissance de l'éolienne (pylône en treillis métalliques, mât haubané, etc), la plupart des éoliennes de forte puissance sont conçues avec une tour autoporteuse en structure acier solidement ancrée à une fondation en béton ferraillé. Dans le cas des aérogénérateurs offshore, l'ancrage de la tour est assuré par un élément de transition immergé qui peut être de plusieurs types.

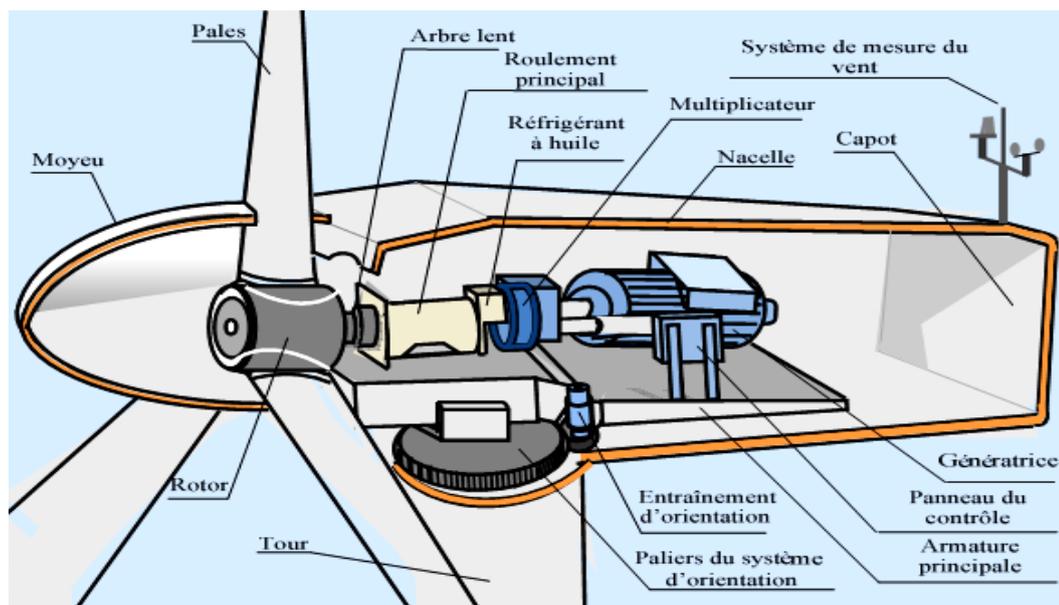


Figure I. 3 Eléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal [14]

### I.5- Choix d'aérogénérateurs et leurs raccordements au réseau

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration [15]. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

❖ **Fonctionnement à vitesse fixe :**

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système d'électronique de puissance.
- Moins cher.

**❖ Fonctionnement à vitesse variable :**

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.

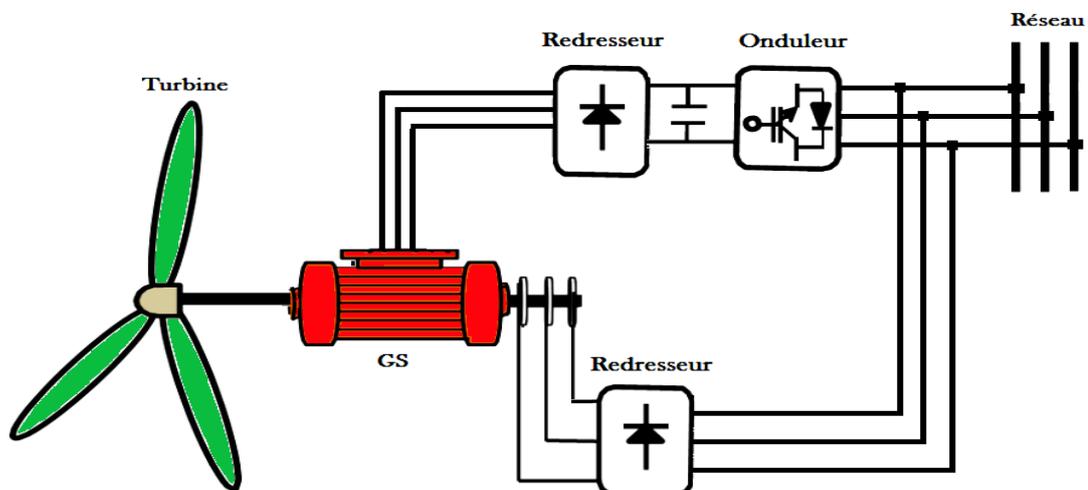
**I.6- Générateurs électriques**

De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe ou variable. Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans l'industrie éoliennes:

- Générateurs synchrones.
- Générateurs asynchrones à double alimentation.
- Générateurs asynchrones à cage d'écureuil et à double étoile.

**I.6.1- Systèmes éoliens utilisant la génératrice synchrone (GS et GSAP)**

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Néanmoins, les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive (figure I.4).



**Figure I. 4 Système éolien basé sur la génératrice synchrone (GS)**

Les machines synchrones à aimants permanents sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables (figure I.5).

Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défaut : suppression du multiplicateur de vitesse et du système bagues et balais pour les GSAP. La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [16].

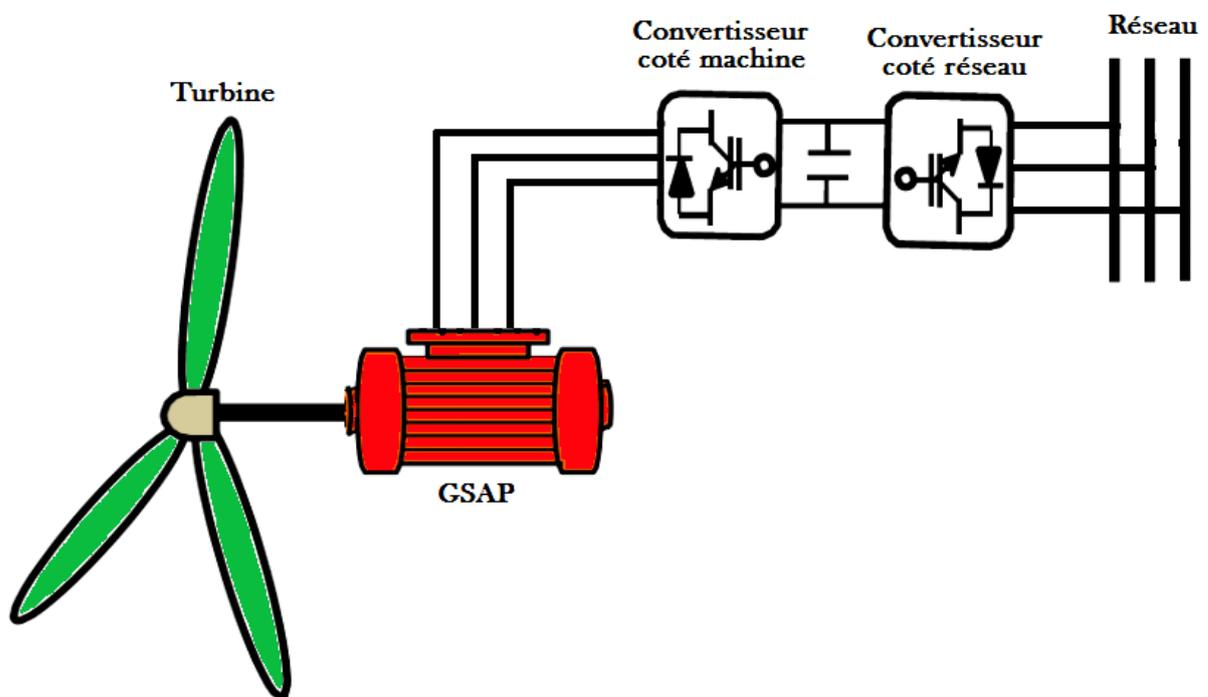
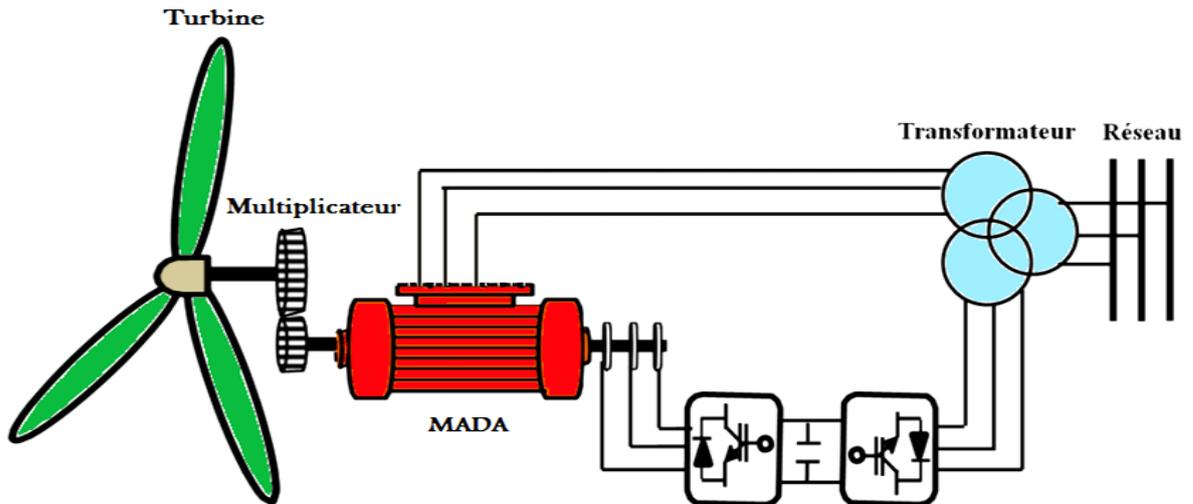


Figure I. 5 Système éolien basé sur la GSAP

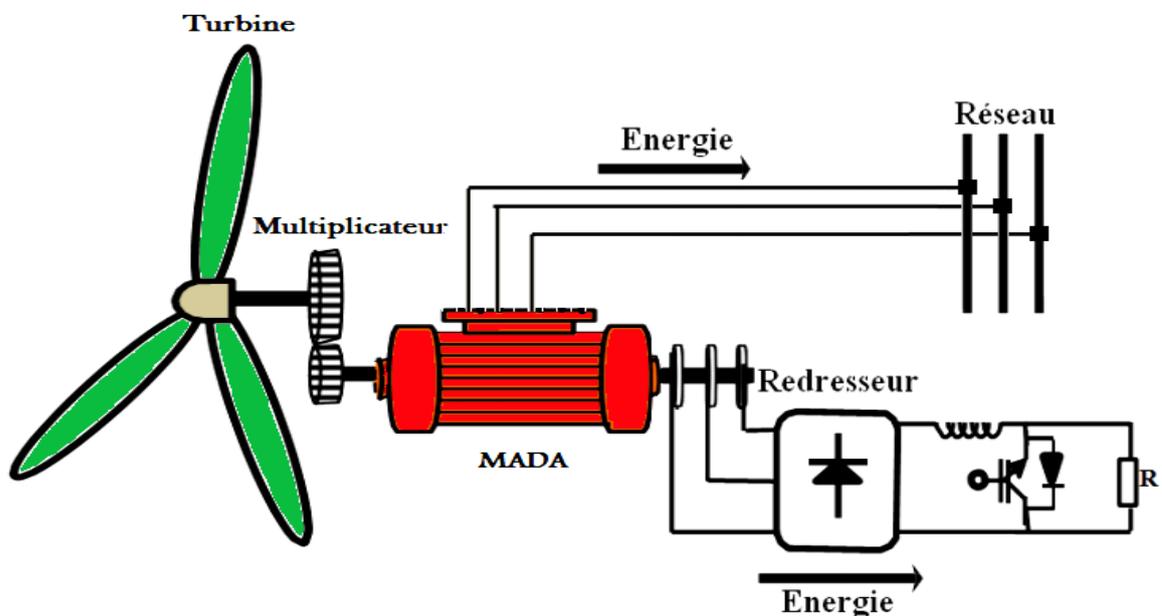
### I.6.2- Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

Les éoliennes à vitesse variable à couplage électronique par le rotor (figure I.6) sont connectées au réseau par une GADA (rotor bobiné). Le couplage entre l'aéroturbines et la génératrice se fait par le biais d'un multiplicateur mécanique de vitesse. Toutefois, sa robustesse est légèrement diminuée par la présence du système bagues et balais.



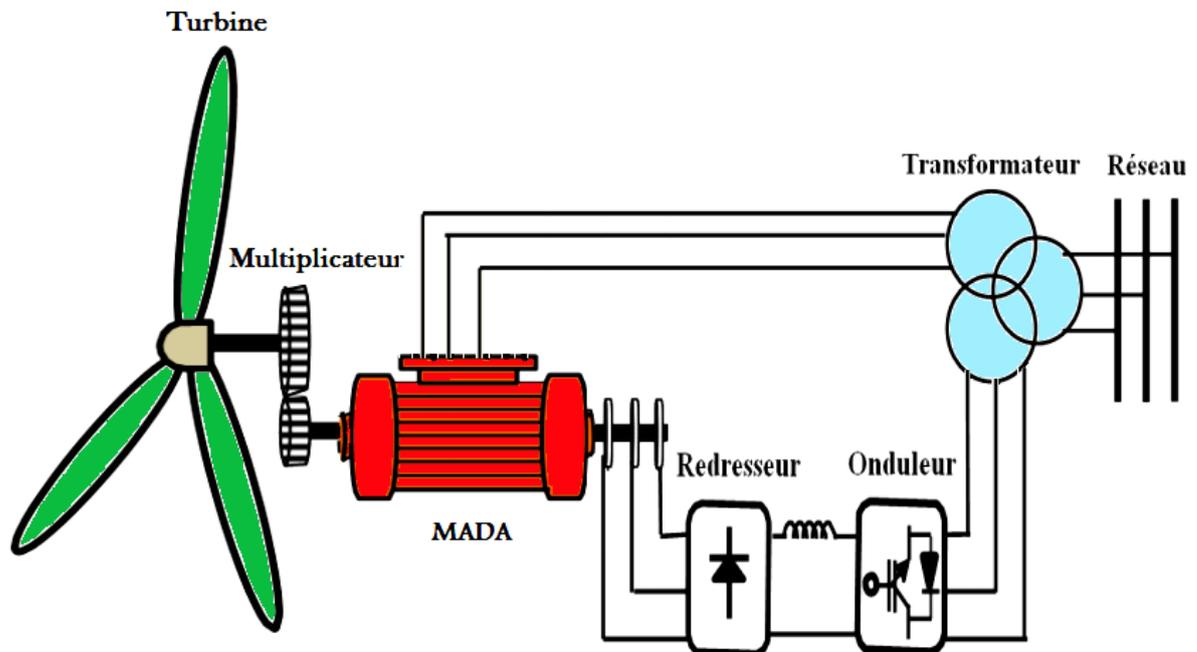
**Figure I. 6 Système éolien basé sur la GADA à couplage électronique par le rotor**

La figure I.7 montre la technologie qui permet une variation limitée de la vitesse à environ de 10% autour de celle de synchronisme par le changement de la résistance du rotor. La plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs [2].



**Figure I. 7 Système éolien basé sur la GADA avec contrôle du glissement par la dissipation de la puissance**

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système représenté sur la figure I.7, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau dite structure de Kramer comme le montre la figure I.8.



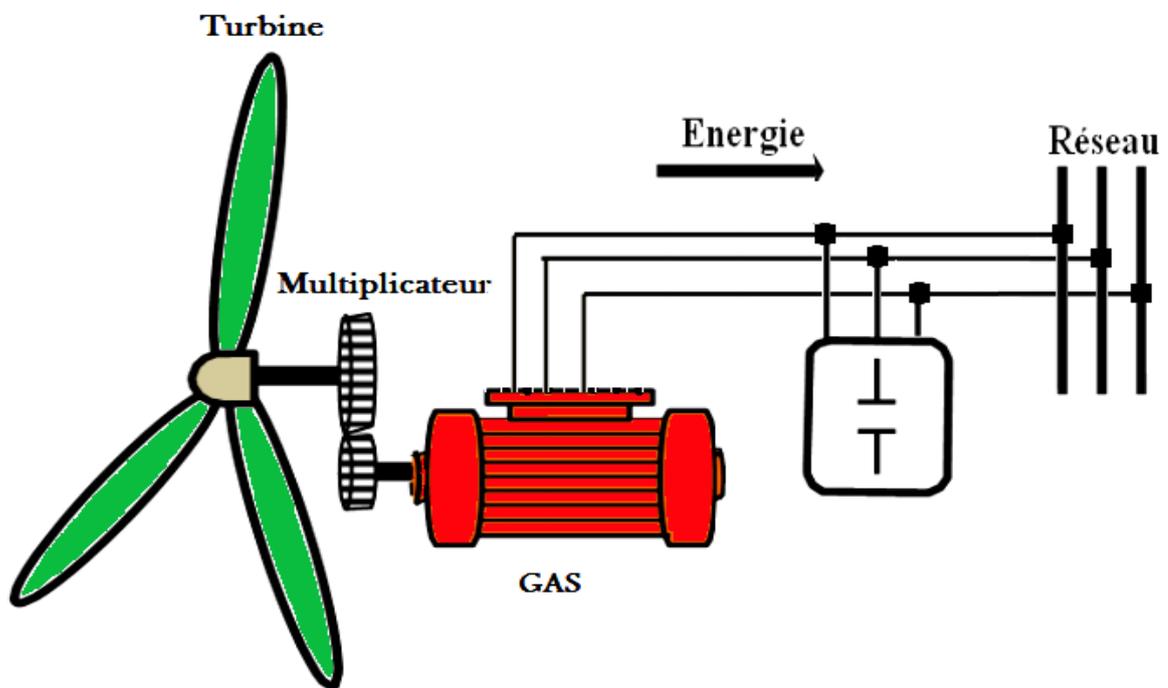
**Figure I. 8 Système éolien basé sur la GADA à structure de Kramer**

### **I.6.3- Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à cage d'écureuil (GAS)**

La machine asynchrone fut le premier type de génératrice à être utilisé pour les éoliennes de grande puissance, présente des avantages certains liés à sa conception simple, sa fabrication peu coûteuse, sa robustesse, son poids et son inertie faible et le peu d'entretien (pas de système balais collecteur) qu'elle requiert. Par ailleurs, le stator étant connecté directement au réseau, le besoin en équipement électronique est réduit.

L'aérogénérateur à vitesse fixe est constitué d'une machine asynchrone à cage d'écureuil qui est couplée mécaniquement à la turbine par un multiplicateur (figure I.9). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).

La machine fonctionne alors en hypersynchronisme c'est-à-dire le glissement  $g < 0$  pour un fonctionnement en génératrice.

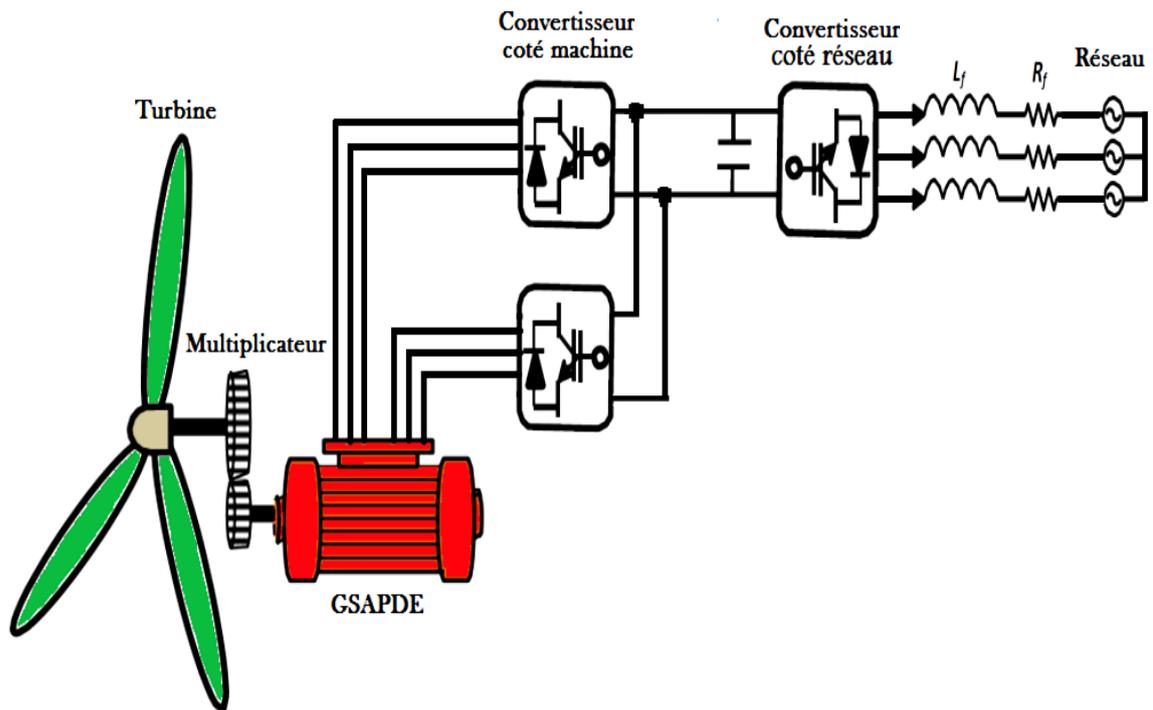


**Figure I. 9** Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage d'écureuil

#### **I.6.4- Système éolien utilisant la génératrice synchrone à aimants permanents double étoile (GSAPDE)**

La génératrice synchrone à aimants permanents double étoile (figure I.10) se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés décalés d'un angle électrique de  $30^\circ$ , et d'un rotor qui est remplacé par les aimants permanents. Les enroulements sont directement connectés au réseau par le biais de l'électronique de puissance et constituent les principaux supports de transmission de l'énergie générée de forte puissance et de petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées.

Le couplage entre l'aéroturbines et la génératrice se fait à travers un multiplicateur mécanique de vitesse (au cas où le nombre de paires de pôles n'est pas trop élevé).



**Figure I. 10** Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimants permanents double étoile

### Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur l'énergie éolienne globalement présenté, les différentes configurations de la conversion de l'énergie éolienne à base des différents générateurs électriques les plus utilisés ont été également exposées.

Compte tenu des recherches récentes sur la machine synchrone double étoile à aimants permanents (MSAPDE) et vu ses avantages, il est très intéressant de pouvoir étudier ce récent type de générateur dans un système éolien. Toutefois, ce dernier est couplé au réseau par le biais de l'électronique de puissance.

En effet, nous allons voir dans le suivant chapitre, l'autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents double étoile ainsi que sa commande vectorielle.

## **Chapitre II :**

L'autopilotage et  
commande vectorielle de  
la MSAPDE

## II- L'autopilotage et commande vectorielle de la MSAPDE

### Introduction

En raison de sa puissance massique élevée, la machine synchrone à aimants permanents double étoile a bien mérité sa place dans les applications nécessitant des performances dynamiques et statiques très élevées. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et fiable. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor.

L'objectif de ce chapitre est de modéliser et simuler la machine synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE) ainsi que présenter l'architecture et le principe de fonctionnement de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux, et les performances de l'onduleur associé à la MSAPDE en point de vue de sa commande. Nous allons présenter, également, l'application de la commande vectorielle à la machine, les boucles des courants et la boucle de la vitesse sont régulées à l'aide des correcteurs classiques de type PI.

### II.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents double étoile

#### II.2.1 Description de la MSAPDE

La machine synchrone double étoile à aimants permanents est une machine comme toutes les machines électriques multi phasées, elle se compose de :

- Un induit fixe portant deux enroulements triphasés ( $a_1, b_1, c_1$  et  $a_2, b_2, c_2$ ) montés en étoile et décalés entre eux d'un angle électrique ( $\gamma = \frac{\pi}{6}$ ).
- Un inducteur tournant à aimants permanents décalé par rapport à l'axe de la première phase statoriques d'un angle ( $\theta$ ) mesurant la position du rotor.

### II.2.2 Les avantages de la MSAPDE

Lors de construction de la machine synchrone à aimants permanents double étoile, l'utilisation des aimants permanents à la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantages [17][18] :

- Élimination de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais).
- Moins de pertes de cuivre et absence de pertes joules.
- Facteur de puissance et rendement du moteur sont améliorés.
- Une meilleure performance dynamique.
- Construction et maintenance plus simple.
- Pas d'échauffement au rotor.

### II.2.3 Les inconvénients de la MSAPDE

- Prix des aimants rend la machine trop chère.
- La présence de pulsation du couple.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants.

## II.3 Modèle mathématique général

Le modèle des machines multi phasées est un système de plusieurs équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil informatique. L'utilisation des changements convenables des variables permet de détourner cette difficulté et d'obtenir un modèle facilement exploitable. [19]

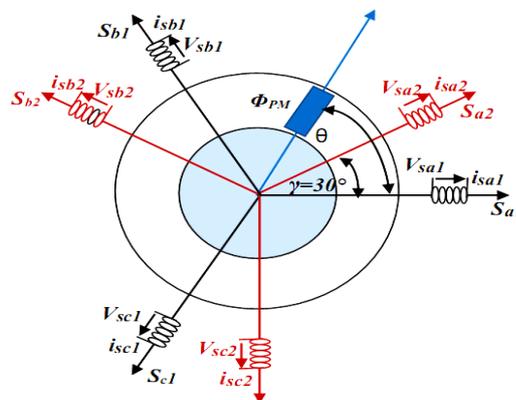


Figure II. 1 Représentation des enroulements statoriques de la MSAPDE

### II.3.1 Hypothèses Simplificatrices

Dans une machine plusieurs phénomènes complexes qui interviennent lors de son fonctionnement. Pour réduire et négliger cette complexité, il est important de poser les hypothèses simplificatrices suivantes : [20][21][22]

- La saturation, les effets d'hystérésis des circuits magnétiques, pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) et l'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances sont négligés.
- Les six phases statoriques ont les mêmes caractéristiques électriques. Les enroulements créent une force magnétomotrice à répartition sinusoïdale et on ne tient compte que de la première harmonique.
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé.
- Le stator est supposé lisse en admettant que les irrégularités de l'entrefer liées aux encoches statoriques ont une influence négligeable, le couple de détente, dû à l'interaction des aimants rotoriques et les dents statoriques, sont alors négligés.
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale.
- Les effets des encoches ne sont pas pris en compte. [21][23]

### II.3.2 Équations électriques

$$\text{Stator 1 : } [V_{Sabc}] = R_s [i_{Sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{Sabc}] \quad \text{II.1}$$

$$\text{Stator 2 : } [V_{Sa'b'c'}] S' = R_s [i_{Sa'b'c'}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{Sa'b'c'}] \quad \text{II.2}$$

### II.3.3 Équations magnétiques

$$\text{Stator 1 : } [\Phi_{Sabc}] = l_s [i_{Sabc}] + [\Phi_{fabc}] \quad \text{II.3}$$

$$\text{Stator 2 : } [\Phi_{Sa'b'c'}] = l_s [i_{Sa'b'c'}] + [\Phi_{fa'b'c'}] \quad \text{II.4}$$

Tel que :

$$[V_{Sabc}] = [V_a, V_b, V_c]^T : \text{Vecteur tension statorique 1.}$$

$$[V_{Sa'b'c'}] = [V_{a'}, V_{b'}, V_{c'}]^T : \text{Vecteur tension statorique 2.}$$

$[i_{Sabc}] = [i_a, i_b, i_c]^T$  : Vecteur courant statorique 1.

$[i_{Sa'b'c'}] = [i_{a'}, i_{b'}, i_{c'}]^T$  : Vecteur courant statoriques 2.

$[\Phi_{Sabc}] = [\Phi_a, i_b, i_c]^T$  : Vecteur flux statorique 1.

$[\Phi_{Sa'b'c'}] = [\Phi_{a'}, i_{b'}, i_{c'}]^T$  : Vecteur flux statorique 2.

$[\Phi_{fabc}] = [\Phi_{af}, i_{bf}, i_{cf}]^T$  : Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique 1.

$[\Phi_{fa'b'c'}] = [\Phi_{a'f}, i_{b'f}, i_{c'f}]^T$  : Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique 2.

$$R_{S1} = R_{S2} = R_S$$

$$[R_S] = \begin{pmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{pmatrix} : \text{Matrice résistance du stator 1 et le stator 2.}$$

### II.3.4 Équations mécaniques

$$C_e - C_r - C_f = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{II.5}$$

$$C_e = C_{e1} + C_{e2} \tag{II.6}$$

$$C_f = f\Omega$$

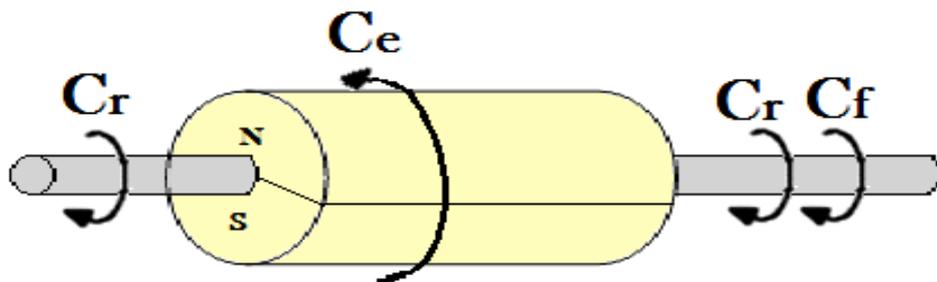


Figure II. 2 Différents couples qui agissent sur le rotor

## II.4 Transformation triphasé- biphase

### II.4.1 Transformation de PARK

La transformation de Park est définie par la matrice P aux vecteurs originaux,  $[V_{abc}]$ ,  $[i_{abc}]$  et  $[\Phi_{abc}]$ , la transformation de Park correspond aux vecteurs  $[V_{dq0}]$ ,  $[i_{dq0}]$  et  $[\Phi_{dq0}]$ .

La transformation de Park est définie par :

$$[V_{abc}] = [P(\theta)][V_{dq0}] \quad \text{II.7}$$

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{abc}] \quad \text{II.8}$$

$[PS1(\theta)]$ ,  $[PS2(\theta)]$  et  $[P(\theta)]^{-1}$  sont des matrices de passage directe pour les deux stators et inverse, elles sont données par :

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \text{II.9}$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta - \gamma) & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \text{II.10}$$

La matrice inverse de Park :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \text{II.11}$$

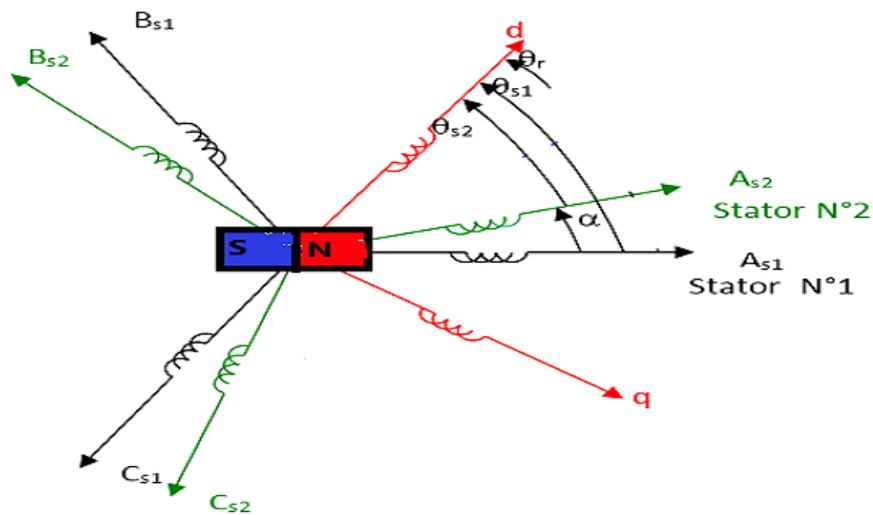


Figure II. 3 Représentation schématique du modèle de Park de la MSAPDE

#### II.4.2 Modèle biphasé de la machine (repère d-q)

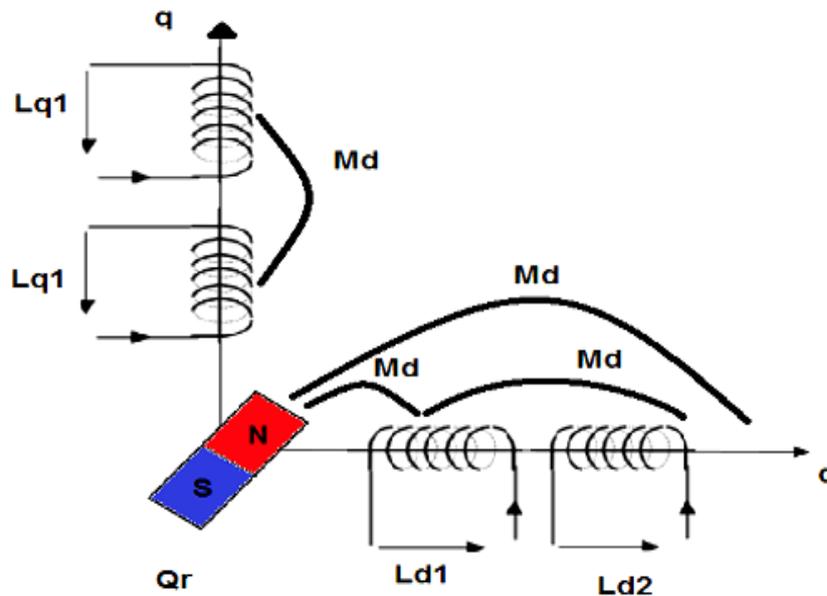


Figure II. 4 Représentation schématique de la machine dans le repère (d,q)

**II.4.3 Equation des flux dans système biphasé (d, q)**

$$\Phi_r = \text{constant} \quad \text{II.12}$$

$$\Phi_{d1} = L_{d1}I_{d1} + \Phi_r + M_d I_{d2} \quad \text{II.13}$$

$$\Phi_{q1} = L_{q1}I_{q1} + M_d I_{q2} \quad \text{II.14}$$

$$\Phi_{d2} = L_{d2}I_{d2} + \Phi_r + M_d I_{d1} \quad \text{II.15}$$

$$\Phi_{q2} = L_{q2}I_{q2} + M_d I_{q1} \quad \text{II.16}$$

**II.4.5 Equation des tensions dans système biphasé (d, q)**

$$V_{d1} = R_s I_{d1} + \frac{d\Phi_{d1}}{dt} - \omega_r \Phi_{q1} \quad \text{II.17}$$

$$V_{q1} = R_s I_{q1} + \frac{d\Phi_{q1}}{dt} + \omega_r \Phi_{d1} \quad \text{II.18}$$

$$V_{d2} = R_s I_{d2} + \frac{d\Phi_{d2}}{dt} - \omega_r \Phi_{q2} \quad \text{II.19}$$

$$V_{q2} = R_s I_{q2} + \frac{d\Phi_{q2}}{dt} + \omega_r \Phi_{d2} \quad \text{II.20}$$

**II.4.6 Equation du couple électromagnétique**

$$C_{e1} = \frac{3}{2} P (\Phi_{d1} I_{q1} - \Phi_{q1} I_{d1}) \quad \text{II.21}$$

$$C_{e2} = \frac{3}{2} P (\Phi_{d2} I_{q2} - \Phi_{q2} I_{d2}) \quad \text{II.22}$$

**II.4.7 La forme matricielle**

$$[V] = [R][I] + [L]\left[\frac{dI}{dt}\right] + \omega_s [M][I] + \omega_s [Q] \quad \text{II.23}$$

$$[Q] = \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi_r \\ 0 \\ \Phi_r \end{pmatrix} \quad [L] = \begin{pmatrix} L_{d1} & 0 & M_d & 0 \\ 0 & L_{q1} & 0 & M_d \\ M_d & 0 & L_{d2} & 0 \\ 0 & M_d & 0 & L_{q2} \end{pmatrix} \quad [R] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{pmatrix}$$

$$[M] = \begin{pmatrix} 0 & -L_{q1} & 0 & -M_d \\ L_{d1} & 0 & M_d & 0 \\ 0 & -M_d & 0 & -L_{q2} \\ M_d & 0 & L_{d2} & 0 \end{pmatrix}$$

#### II.4.8 Equations d'état de la MSAPDE

$$\left\{ \begin{array}{l} j \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \\ \frac{dI_{d1}}{dt} = \frac{1}{L_{d1}} (V_{d1} - R_s I_{d1} - M_d \frac{dI_{d2}}{dt} + \omega_r L_{q1} I_{q1} + \omega_r M_d I_{q2}) \\ \frac{dI_{q1}}{dt} = \frac{1}{L_{q1}} (V_{q1} - R_s I_{q1} - M_d \frac{dI_{q1}}{dt} - \omega_r L_{d1} I_{d1} - \omega_r \Phi_r - \omega_r M_d I_{d2}) \\ \frac{dI_{d2}}{dt} = \frac{1}{L_{d2}} (V_{d2} - R_s I_{d2} - M_d \frac{dI_{d1}}{dt} + \omega_r L_{q2} I_{q2} + \omega_r M_d I_{q1}) \\ \frac{dI_{q2}}{dt} = \frac{1}{L_{q2}} (V_{q2} - R_s I_{q2} - M_d \frac{dI_{q1}}{dt} - \omega_r L_{d2} I_{d2} - \omega_r \Phi_r - \omega_r M_d I_{d1}) \\ C_e = \frac{3}{2} P [((\Phi_{d1}) I_{q1} - (\Phi_{q1}) I_{d1}) + ((\Phi_{d2}) I_{q2} - (\Phi_{q2}) I_{d2})] \end{array} \right. \quad \text{II.24}$$

#### II.5 Résultats de simulation

La figure (II.5) représente les performances de la conduite de la machine synchrone triphasée à aimants permanents double étoile lors d'un démarrage avec application d'un couple résistant  $C_r=500$  N.m lorsque  $t=2$  s.

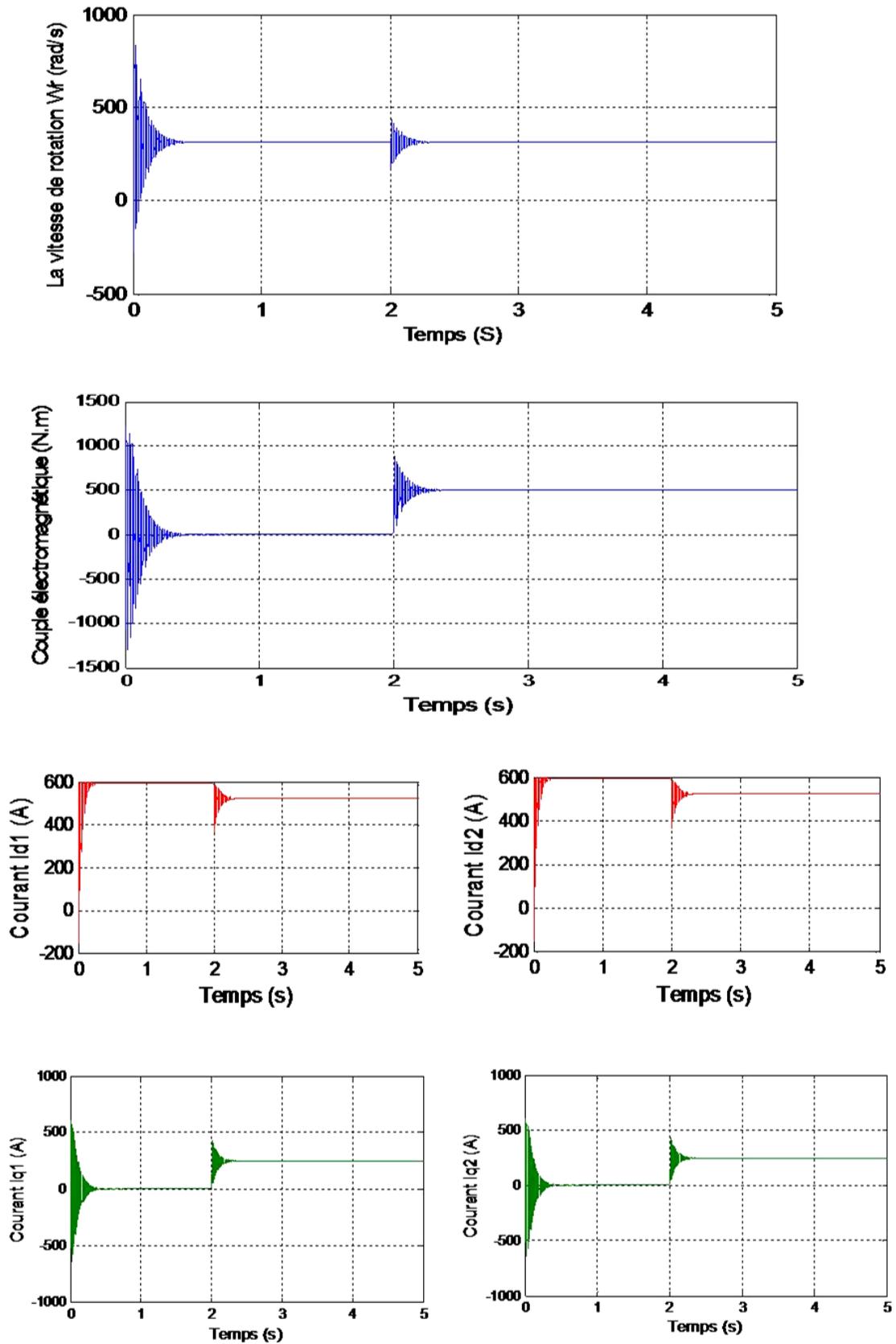


Figure II. 5 Performance de la conduite de MSAPDE en charge

## II.6 Interprétation des résultats de simulation

La figure (II.5) montre le comportement de la MSAPDE lors de l'application d'une charge de 500 N.m. Au démarrage ou la valeur du couple résistant est nulle, on constate un couple électromagnétique ( $C_e$ ) qui présente des oscillations et des pics ainsi qu'un dépassement très important à cause du régime transitoire. La vitesse  $W_r$  et les courants ( $i_{d1}$ ,  $i_{q1}$ ,  $i_{d2}$ ,  $i_{q2}$ ) ont des faibles oscillations même pour le dépassement il est faible, mais juste après un temps donné  $T=2$  (s) lorsqu'on applique une charge de 500N.m, on constate que la vitesse prend des oscillations plus importantes que précédemment, mais se stabilise toujours au synchronisme malgré l'application de la charge. A noter que la valeur choc du couple en charge est un peu plus élevée par rapport à celle du régime de démarrage. Cela est tout à fait vrai car, pour toute machine électrique, ses valeurs ne sont pas proportionnelles aux charges appliquées.

## II.7 Modélisation de l'ensemble système d'alimentation-MSAPDE

Dans cette partie, on présentera la modélisation du système d'alimentation complet de la MSAPDE.

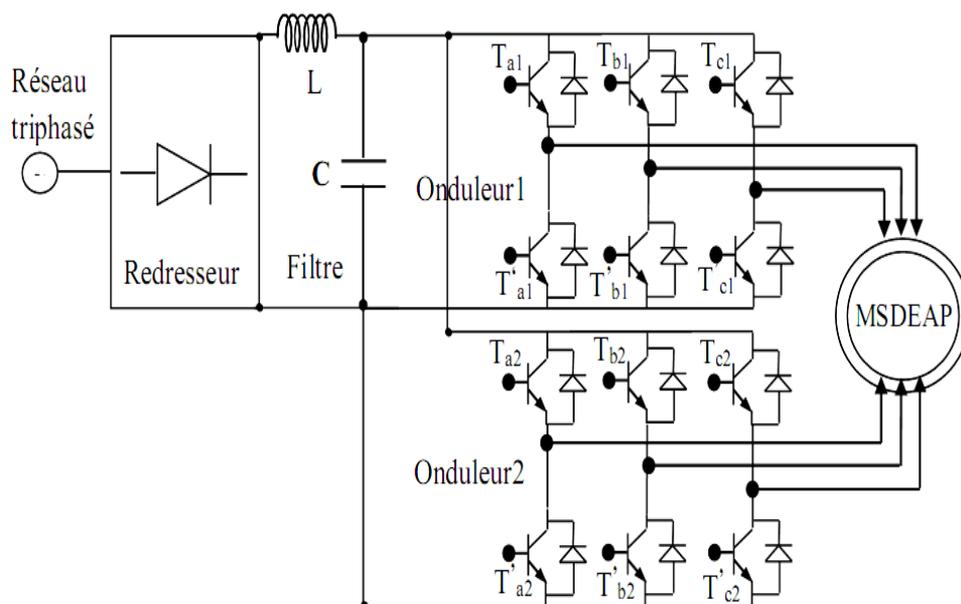
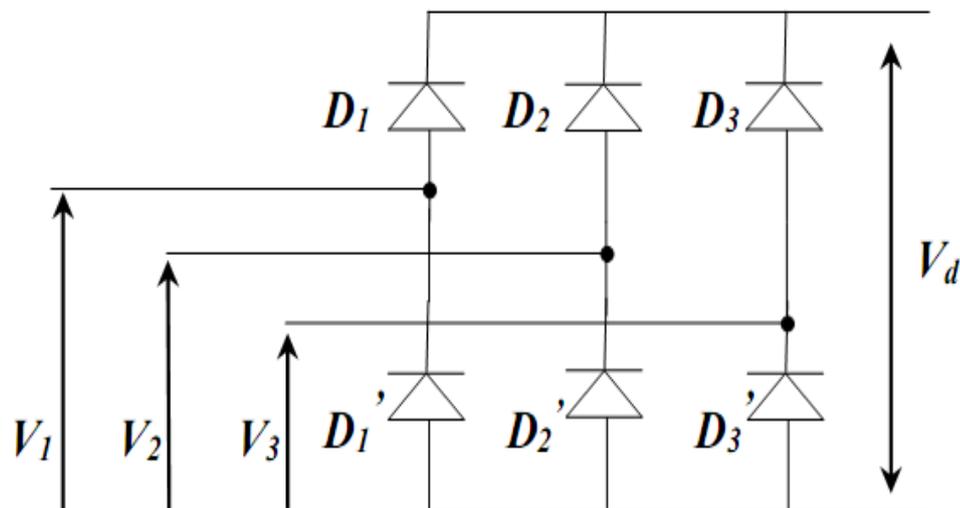


Figure II. 6 Schéma de l'association MSAPDE-Système d'alimentation

Ce système est constitué de trois étages, un redresseur triphasé symétrique à diodes et un filtre qui permet de réduire les ondulations du courant et de la tension coté réseau, et du coté machine, deux onduleurs de tensions triphasés en parallèle. La figure II.6 illustre le schéma bloc de cette association. [24][25]

### II.7.1 Modélisation du redresseur

Le schéma de principe d'un redresseur triphasé double alternance à diodes en pont de GRAETZ est illustré sur la figure II.7.



**Figure II. 7 Modélisation du redresseur triphasé double alternance à diode en pont de Graetz**

La tension redressée répond aux équations suivantes pendant une période :

- $D_i$  = passante si  $V_i = V_{\max}(t)$
- $D_i'$  = passante si  $V_i = V_{\min}(t)$

Avec :  $i=1, 2, 3$

Où  $V_d$  est définie comme suit :

$$V_d = \text{Max}(V_{1,2,3}) - \text{Min}(V_{1,2,3})$$

**II.25**

On a:

$$\begin{cases} V_1(t) = V_{\max} \sin(\omega_r t) \\ V_2(t) = V_{\max} \sin(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3(t) = V_{\max} \sin(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{II.26}$$

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$V_{redMoy} = (3\sqrt{3} / \pi) V_{\max} \quad \text{II.27}$$

### II.7.2 Modélisation du filtre

La tension de sortie du redresseur (tension redressée) présente des oscillations (ondulations) importantes, pour les minimiser, il est nécessaire d'insérer un filtre entre le pont redresseur et les deux onduleurs de tension.

Le filtre est constitué d'une inductance montée en parallèle avec un condensateur ( $L_f$  -  $C_f$ ) comme illustré sur la figure II.8.

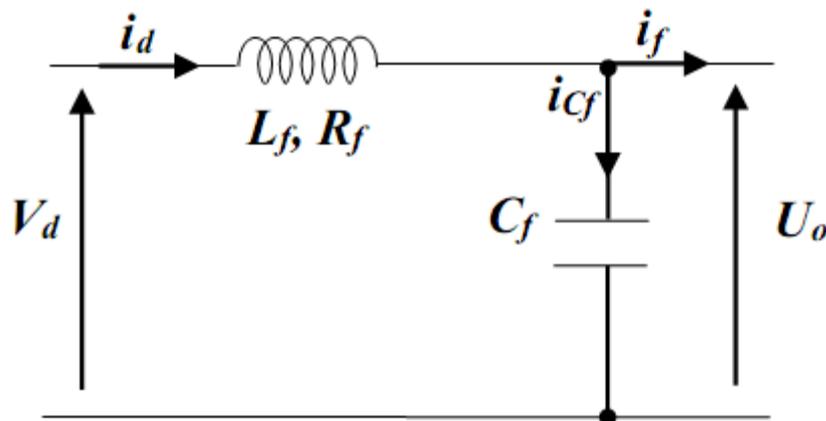


Figure II. 8 Modélisation du filtre

Ce filtre est modélisé par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_d - U_o - R_f i_d) \\ \frac{dU_o}{dt} = \frac{1}{C_f} (i_{cf}) = \frac{1}{C_f} (i_d - i_f) \end{cases} \quad \text{II.28}$$

Où :  $R_f$  résistance interne de l'inductance  $L_f$ .

En combinant les deux équations précédentes, La fonction de transfert du filtre est donnée par la relation suivante qui a la forme d'un système du deuxième ordre:

$$F(s) = \frac{V_o(s)}{V_d(s)} = \frac{1}{(L_f C_f \cdot s^2 + R_s C_f + 1)} \quad \text{II.29}$$

Et sa pulsation définie par la relation suivante :

$$\omega(s) = \sqrt{\frac{2}{L_f C_f} - \left(\frac{R_f}{L_f}\right)^2} \quad \text{II.30}$$

### II.7.3 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable [26].

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MSAPDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable.

Chaque étoile de la MSAPDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante:

$$i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé ( } Ki \text{ conduit, } \overline{Ki} \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert ( } Ki \text{ bloqué, } \overline{Ki} \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec :  $f_i + \bar{f}_i = 1$  et  $i = 1...3$

La figure II.9 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

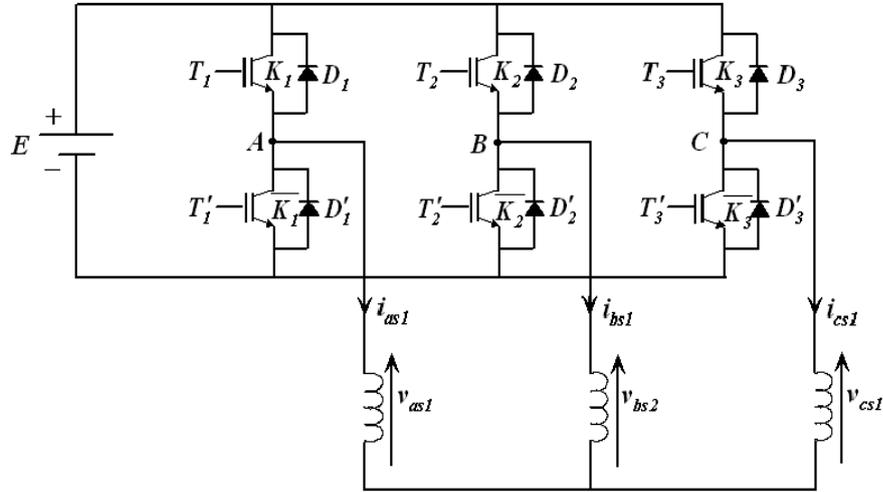


Figure II. 9 Onduleur triphasé

Les tensions composées sont:

$$V_{AB} = V_{a1} - V_{b1} = E(f_1 - f_2) \tag{II.31}$$

$$V_{BC} = V_{b1} - V_{c1} = E(f_2 - f_3) \tag{II.32}$$

$$V_{CA} = V_{c1} - V_{a1} = E(f_3 - f_1) \tag{II.33}$$

Les tensions simples  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  et  $V_{c1}$  forment un système triphasé équilibré, tel que:

$$V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} = 0 \tag{II.34}$$

La résolution des équations (III.31), (III.32), (III.33) et (III.34) nous donne:

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \tag{II.35}$$

Pour le second onduleur, on obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad \text{II.36}$$

### II.7.3.1 Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [16].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par:

– Pour la première étoile:

$$\begin{aligned} V_{a1ref} &= V_m \sin(2\pi ft) \\ V_{b1ref} &= V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{c1ref} &= V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad \text{II.37}$$

– Pour la seconde étoile:

$$\begin{aligned} V_{a2ref} &= V_m \sin(2\pi ft - \gamma) \\ V_{b2ref} &= V_m \sin\left(2\pi ft - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{c2ref} &= V_m \sin\left(2\pi ft - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad \text{II.38}$$

L'équation de la porteuse est donnée par:

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} [4(t/T_p) - 1] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} [-4(t/T_p) + 3] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad \text{II.39}$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants:

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation  $f_p$  sur la fréquence de référence  $f$ .

- Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence  $V_m$  à la valeur crête de l'onde de modulation  $V_{pm}$ .

La figure II.10 représente le principe de la commande par M.L.I sinus-triangle dont  $r = 0.8$  et  $m = 21$ .

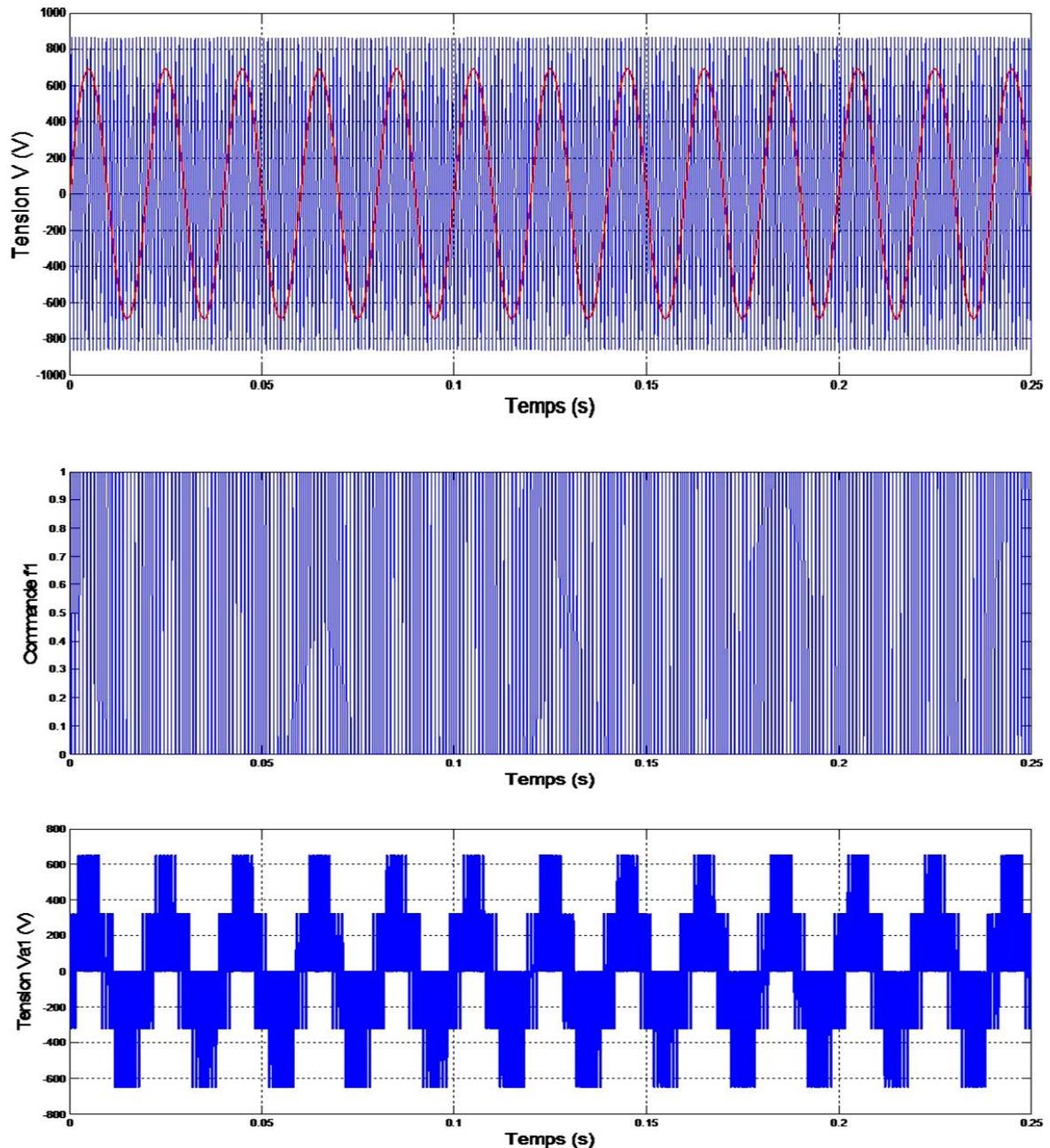


Figure II. 10 Principe de la commande par MLI sinus-triangle

### II.7.3.2 Association de la MSAPDE-onduleurs

La représentation schématique de l'association de la MSAPDE avec deux onduleurs de tension à commande MLI sinus-triangle est donnée par la figure II.11.

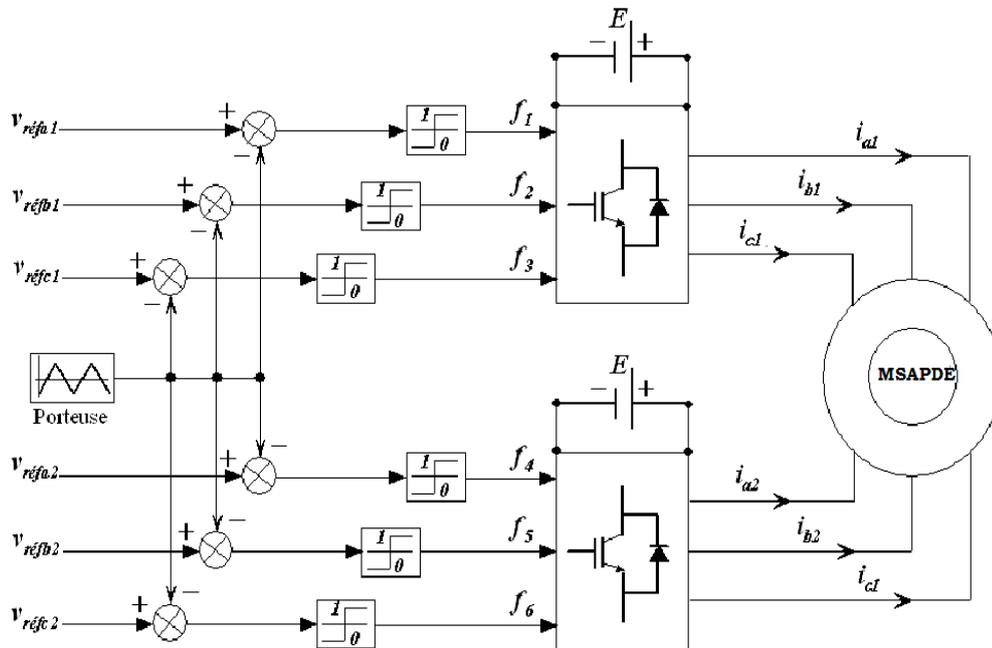


Figure II. 11 Association MSAPDE-Onduleurs de tension à commande MLI

## II.8 Commande vectorielle de la MSAPDE

### II.8.1 Principe de la commande vectorielle de la MSAPDE

La commande vectorielle, consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système d'axes (d, q) et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple.

La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir les courants  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant.

### II.8.2 Application de la commande vectorielle à la MSAPDE

Le modèle de la machine synchrone à aimants permanents alimentée en tension est donné par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{d1} = R_s \cdot i_{d1} + L_{d1} \frac{di_{d1}}{dt} - W_r \cdot L_{q1} \cdot i_{q1} \\ V_{q1} = R_s \cdot i_{q1} + L_{q1} \frac{di_{q1}}{dt} + W_r \cdot (L_{d1} \cdot i_{d1} + \Phi_r) \\ V_{d2} = R_s \cdot i_{d2} + L_{d2} \frac{di_{d2}}{dt} - W_r \cdot L_{q2} \cdot i_{q2} \\ V_{q2} = R_s \cdot i_{q2} + L_{q2} \frac{di_{q2}}{dt} + W_r \cdot (L_{d2} \cdot i_{d2} + \Phi_r) \\ C_e = \frac{3}{2} P \Phi_r (i_{q1} + i_{q2}) \end{array} \right. \quad \text{II.40}$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAPDE est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé.

Dans la commande vectorielle de la MSAPDE, le couple ne dépend que de la composante en quadrature, la valeur optimale des courants directs est évidemment égale à zéro ( $I_{d1}=I_{d2}=0$ ).

Si les courants directs sont maintenus nuls, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents  $\Phi_d = \Phi_r$ .

### II.8.3 Découplage par compensation

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrer de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possibles des tensions de référence. Cependant, il faut définir d'abord les termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes d et q.

La compensation a pour but de découpler les axes (d, q), ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

A partir des équations de tension, il est possible de définir les termes de découplage suivants :

$$\begin{cases} V_{d1} = V'_{d1} - e_{d1} \\ V_{q1} = V'_{q1} + e_{q1} \\ V_{d2} = V'_{d2} - e_{d2} \\ V_{q2} = V'_{q2} + e_{q2} \end{cases} \quad \text{II.41}$$

Tel que :

$$\begin{cases} e_{d1} = W_r \cdot L_{q1} \cdot i_{q1} \\ e_{q1} = W_r \cdot (L_{d1} \cdot i_{d1} + \Phi_r) \\ e_{d2} = W_r \cdot L_{q2} \cdot i_{q2} \\ e_{q2} = W_r \cdot (L_{d2} \cdot i_{d2} + \Phi_r) \end{cases} \quad \text{II.42}$$

Les termes sont ajoutés de manière à obtenir les fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = V'_{d1} \left( \frac{1}{R_s + s \cdot L_{d1}} \right) \\ i_{q1} = V'_{q1} \left( \frac{1}{R_s + s \cdot L_{q1}} \right) \\ i_{d2} = V'_{d2} \left( \frac{1}{R_s + s \cdot L_{d2}} \right) \\ i_{q2} = V'_{q2} \left( \frac{1}{R_s + s \cdot L_{q2}} \right) \end{cases} \quad \text{II.43}$$

Le principe de découplage par compensation des courants Id1, Iq1, Id2 et Iq2 est donné par la figure II.12 :

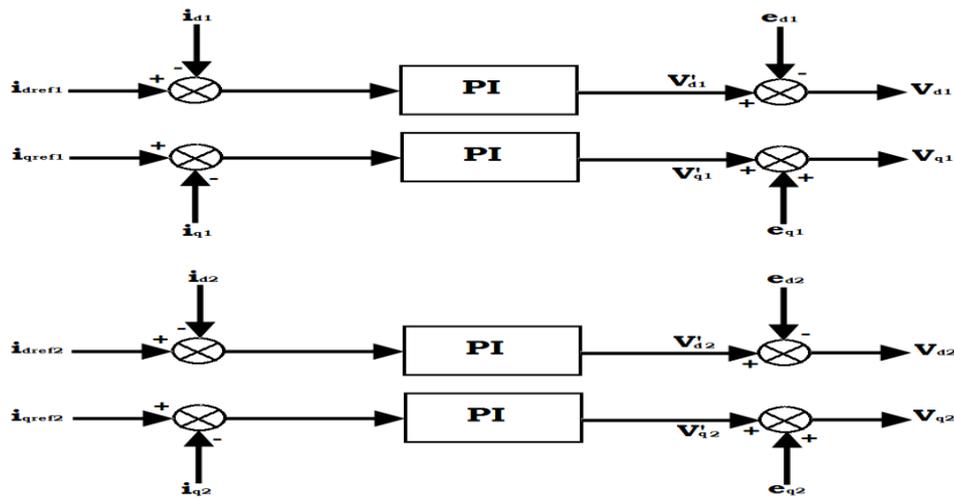


Figure II. 12 Principe de découplage par compensation

Avec ce découplage par compensation, nous obtenons le schéma bloc de la figure II.13 suivante :

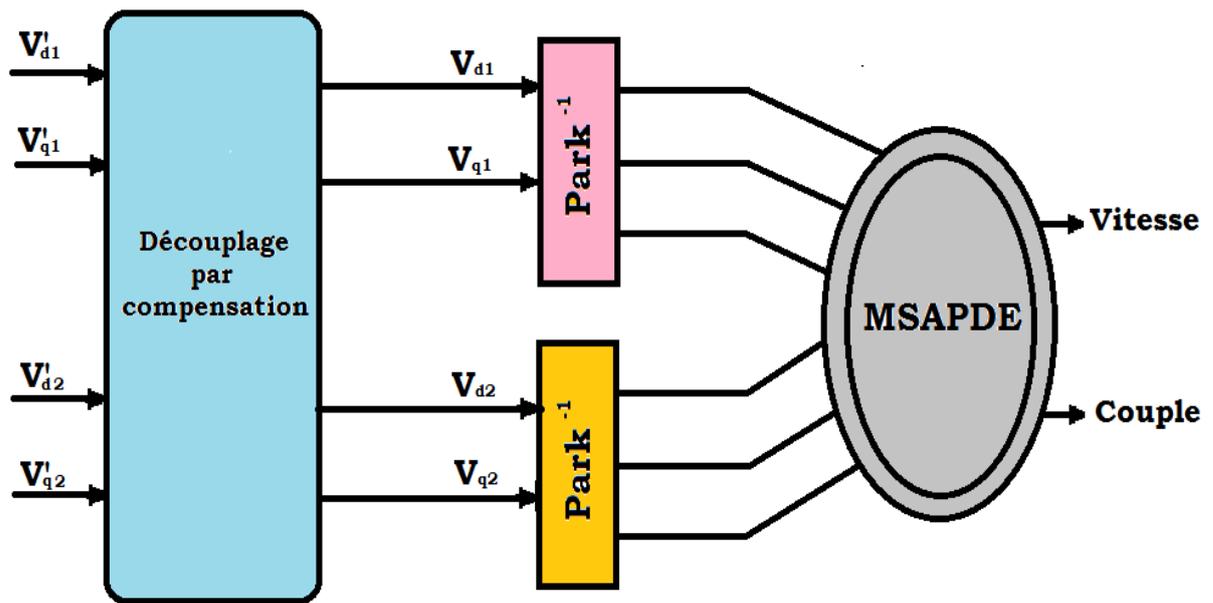


Figure II. 13 Découplage par compensation de la MSAPDE

### II.8.4 Dimensionnement des régulateurs

Lorsque le découplage entre l'axe d et l'axe q est réalisé, les régulateurs de courant et de vitesse peuvent être synthétisés au moyen des techniques de l'automatique classique ou avancée développées pour les systèmes linéaires.

Dans ce chapitre, on se limite à la technique de contrôle par régulateurs classiques PI (proportionnelle, intégrale) dont le coefficient intégral  $K_i$  sert à réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée donc de réduire l'erreur statique, le terme proportionnel  $K_p$  permet le réglage de la rapidité du système (le temps de réponse).

**II.8.4.1 Régulation des courants**

Les boucles de régulation des courants  $i_{d1}$  et  $i_{q1}$  sont données par la figure II.14 :

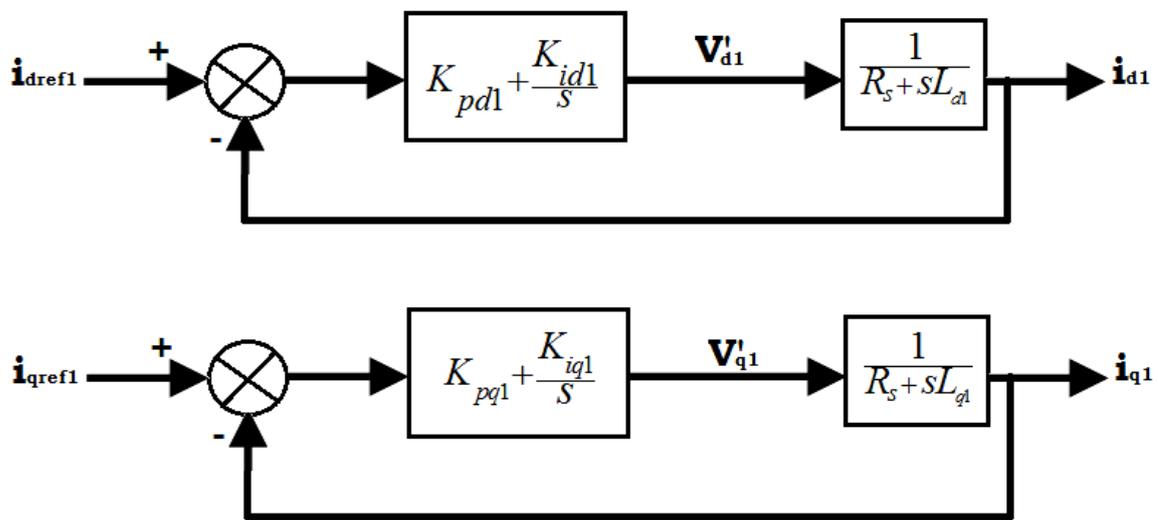


Figure II. 14 Boucle des régulateurs de courants

La régulation des courants  $i_{d2}$  et  $i_{q2}$  s'est effectuée de la même manière.

**II.8.4.2 Régulation de vitesse**

La boucle de régulation de la vitesse de rotation est donnée par la figure II.15 suivantes :

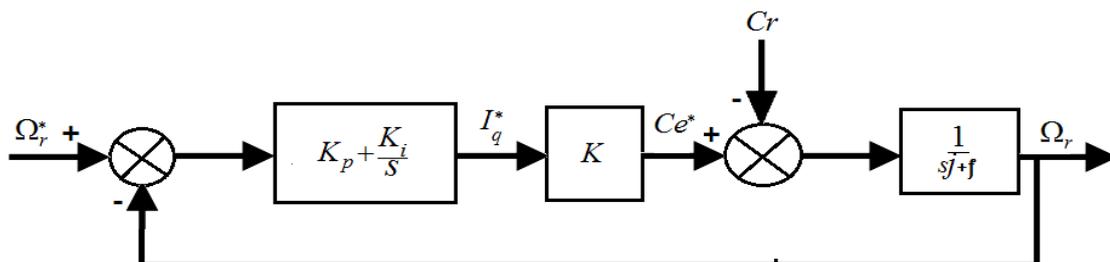


Figure II. 15 Boucle de régulation de la vitesse

II.8.5 Schéma global de la commande

La figure II.16 représente le schéma global de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents double étoile dans le repère (d, q). Les références  $i_{d1}^*$  et  $i_{d2}^*$  sont fixes, la sortie du régulateur constitue la consigne du couple  $C_e^*$ . Les références des courants  $i_{d1}^*$ ,  $i_{d2}^*$ ,  $i_{q1}^*$  et  $i_{q2}^*$  sont comparées séparément aux courants réels de la machine.

Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génèrent les tensions de références  $v_{d1}^*$ ,  $v_{d2}^*$ ,  $v_{q1}^*$  et  $v_{q2}^*$ .

Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse qui permet de générer la référence des courants  $i_{q1}^*$  et  $i_{q2}^*$ . Ces références sont limitées au courant maximal. Par contre les courants  $i_{d1}^*$  et  $i_{d2}^*$  sont imposés nuls dans notre cas d'étude. Les sorties de la régulation des courants  $i_{d1}$ ,  $i_{d2}$ ,  $i_{q1}$  et  $i_{q2}$  servent les tensions de référence ( $v_{a1}^*$ ,  $v_{b1}^*$  et  $v_{c1}^*$ ) pour la commande M.L.I.

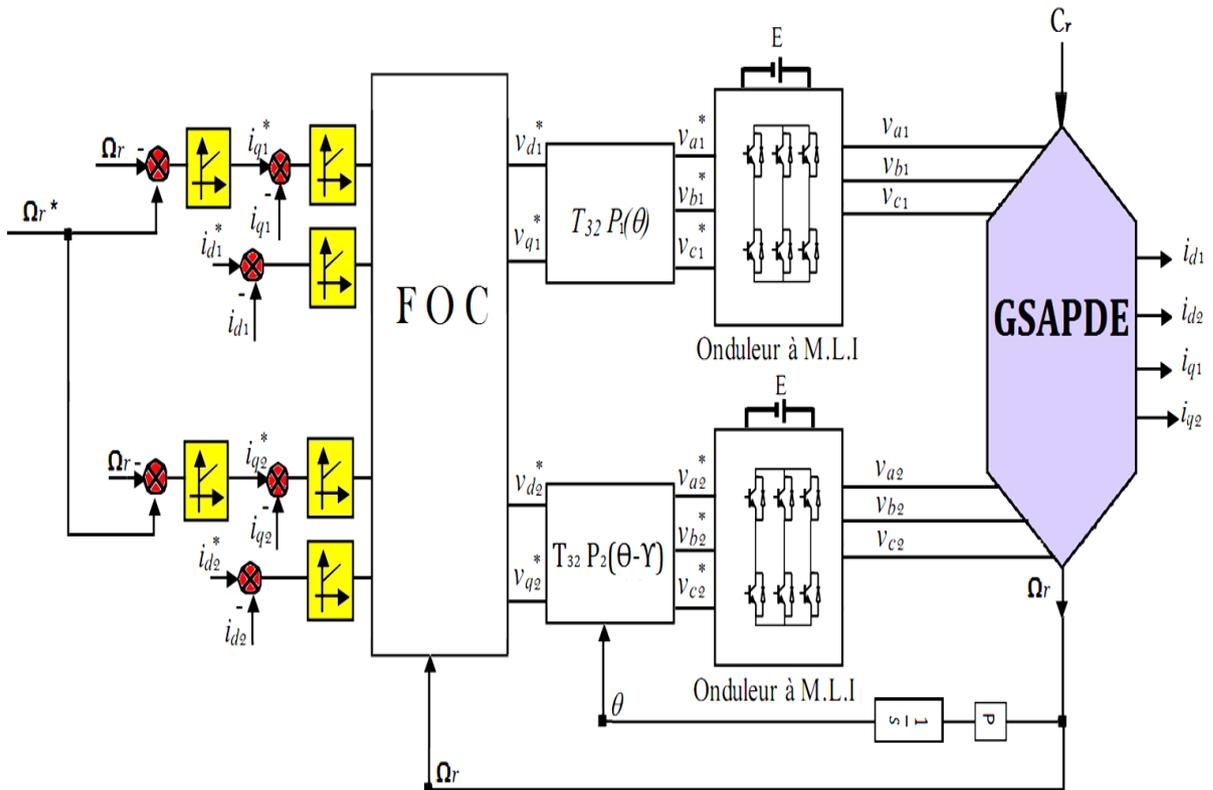


Figure II. 16 Schéma global de la commande vectorielle de la MSAPDE

## II.9 Résultats de simulation numérique

Après la réalisation du découplage et la synthèse des régulateurs, et afin de tester les performances de la commande vectorielle appliquée à la MSAPDE, nous avons simulé le fonctionnement du moteur à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

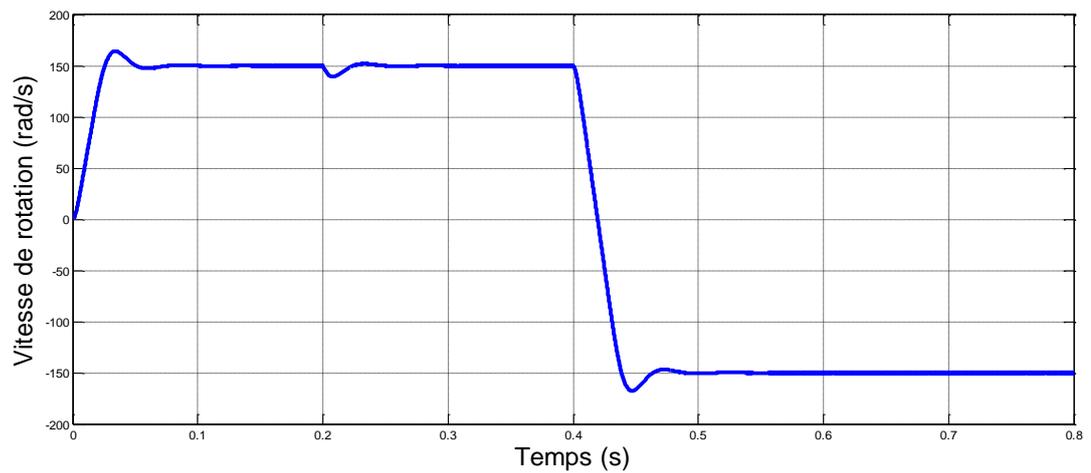


Figure II. 17 La vitesse de rotation de la MSAPDE

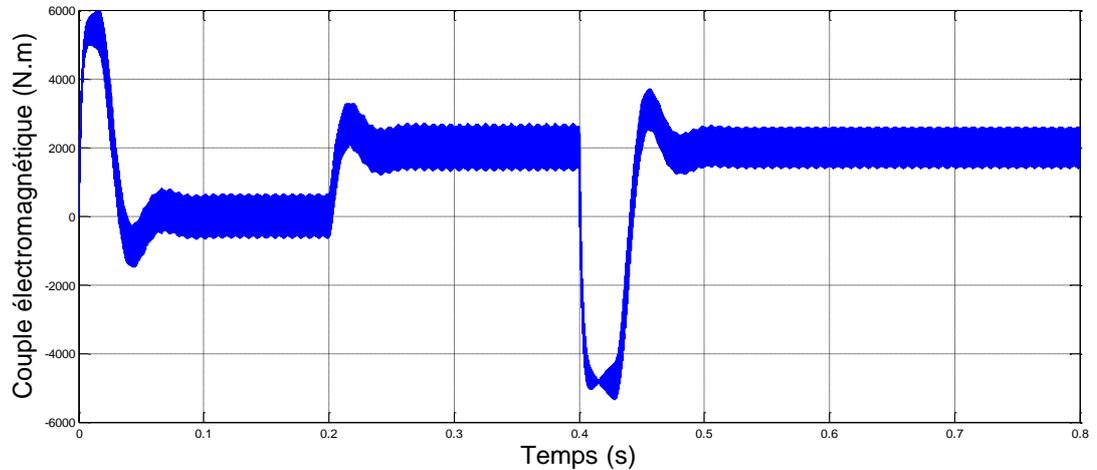


Figure II. 18 Le couple électromagnétique de la MSAPDE

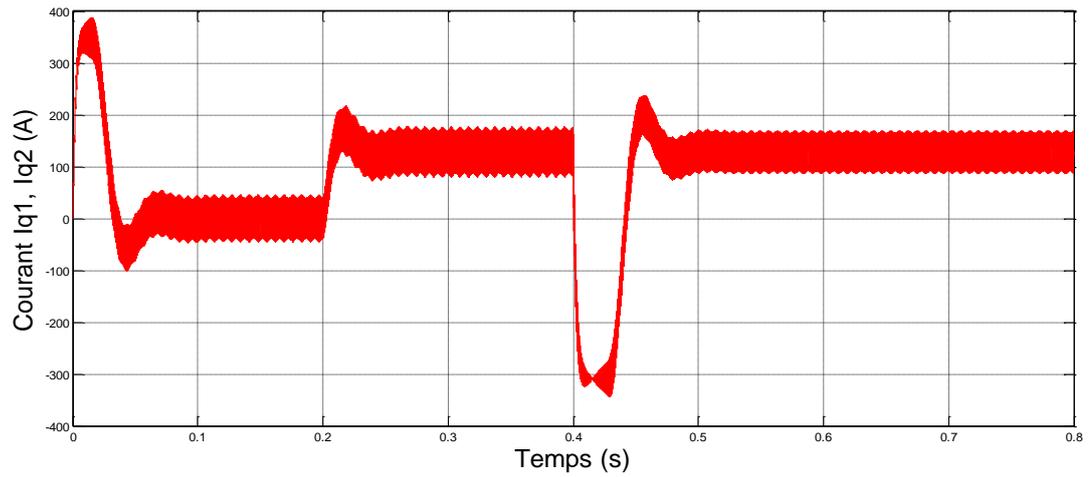


Figure II. 19 Les courants  $I_{q1}$ ,  $I_{q2}$  de la MSAPDE

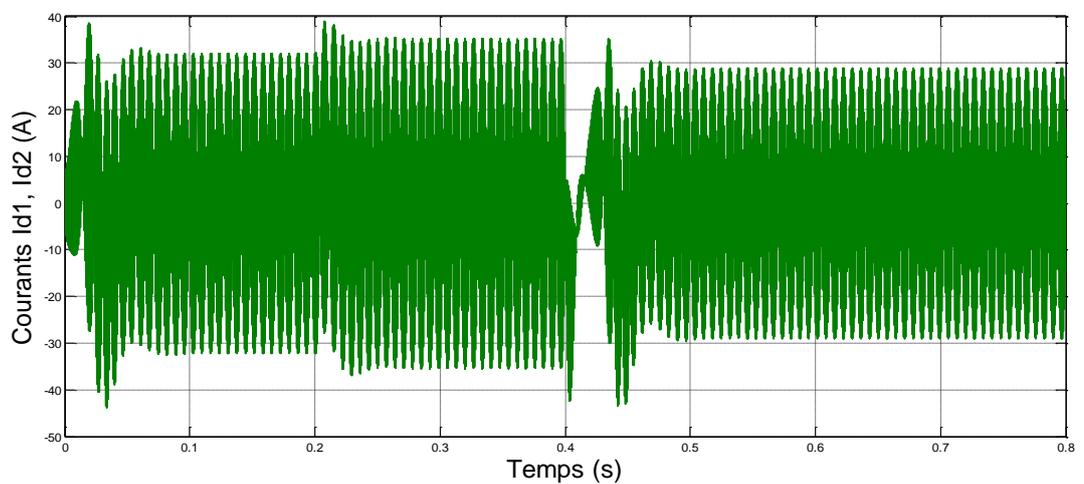


Figure II. 20 Les courants  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  de la MSAPDE

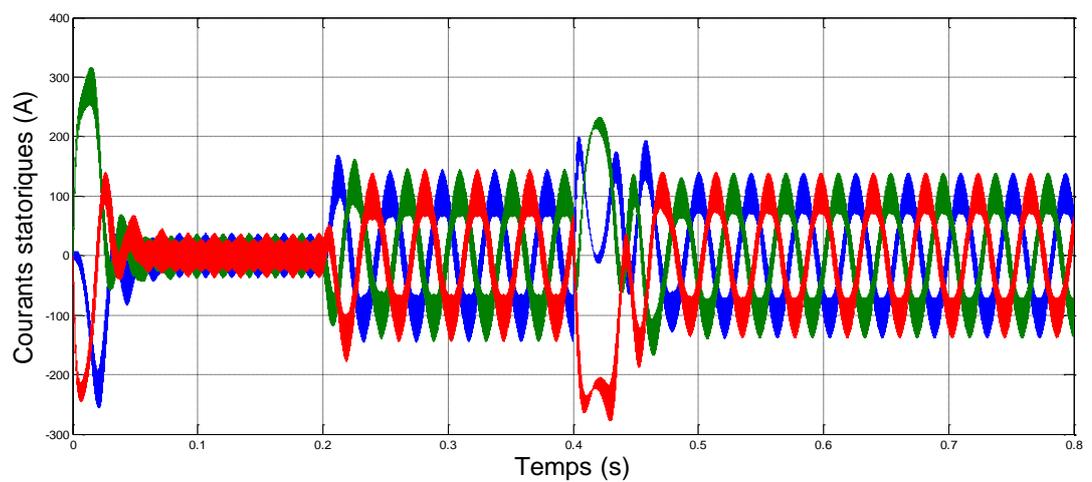


Figure II. 21 Les courants statoriques de la MSAPDE

## II.10 Interprétation des résultats obtenus

Les figures ci-dessus présentent les caractéristiques de la MSAPDE après le réglage de la vitesse par la commande vectorielle.

Afin de tester la robustesse de la commande vectorielle vis-à-vis la variation importante de la référence de vitesse, on introduit un changement de la consigne de vitesse de 150 rad/s à -150 rad/s à l'instant  $t= 0.4$  s après le démarrage, puis on applique un couple de charge  $C_r= 2$  kN.m à l'instant  $t= 0.2$  s.

Les résultats obtenus par cette méthode de découplage sont satisfaisants. Les performances de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents double étoile régulée en vitesse ont été testées lors du démarrage suivi d'une perturbation du couple de charge, on remarque que le couple électromagnétique augmente lorsqu'on applique le couple de charge, puis il effectue un pic lorsque la vitesse de référence devient -150 rad/s et se stabilise à la valeur initiale. On constate aussi que les courants  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  atteignent rapidement leur valeur nulle de référence et restent presque insensibles à la variation des courants  $i_{q1}$  et  $i_{q2}$ .

### Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons modélisé les différents éléments du système (MSAPDE et convertisseurs), par que cette partie est nécessaire pour l'intégration de la MSAPDE dans les systèmes de commandes tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

L'étude des caractéristiques de la MSAPDE directement alimentée par des sources sinusoïdales, puis par des onduleurs de tensions à commande MLI en charge a été accomplie.

On a vu l'application de la commande vectorielle sur la MSAPDE, cette stratégie qui nous permet de faire un découplage entre le couple et le flux pour assurer une commande efficace.

On a distingué que les régulateurs classiques (PI) donne toujours des meilleurs résultats pour un réglage de vitesse et sans dépassement mais la sensibilité au changement des paramètres demeure toujours comme inconvénient majeur de ces régulateurs.

Nous allons voir dans le chapitre suivant, le modèle mathématique de la turbine éolienne et l'intégration de la MSAPDE dans le système de conversion éolien.

**Chapitre III :**  
Intégration de la  
MSAPDE dans le système  
de conversion éolien

### **III- Intégration de la MSAPDE dans le système de conversion éolien**

#### **Introduction**

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

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et la commande de la turbine éolienne. Dans la première partie, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance, de couple et la limite de Betz. Ensuite, une stratégie de commande est décrite dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine. Un modèle analytique de la turbine éolienne est réalisé et comparé en utilisant la méthode d'extraction du maximum de puissance MPPT (sans asservissement de la vitesse).

A la fin de ce chapitre, la validation du mode de fonctionnement en génératrice est effectuée, et cela en associant les différentes parties de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne et en l'intégrant au réseau électrique.

#### **III.2 Description simplifiée du système étudié**

L'aéroturbine capte une partie  $P_m$  de la puissance  $P_v$  contenue dans le vent, la génératrice synchrone à aimants permanents double étoile la transforme ensuite en puissance électrique. La plus grande partie de cette dernière est transférée directement au réseau par les deux bobinages statoriques de la machine, et à travers les deux convertisseurs en parallèle, un bus continu, un convertisseur du côté réseau et un filtre RL.

La figure (III.1) illustre le schéma synoptique du système éolien basé sur la GSAPDE.

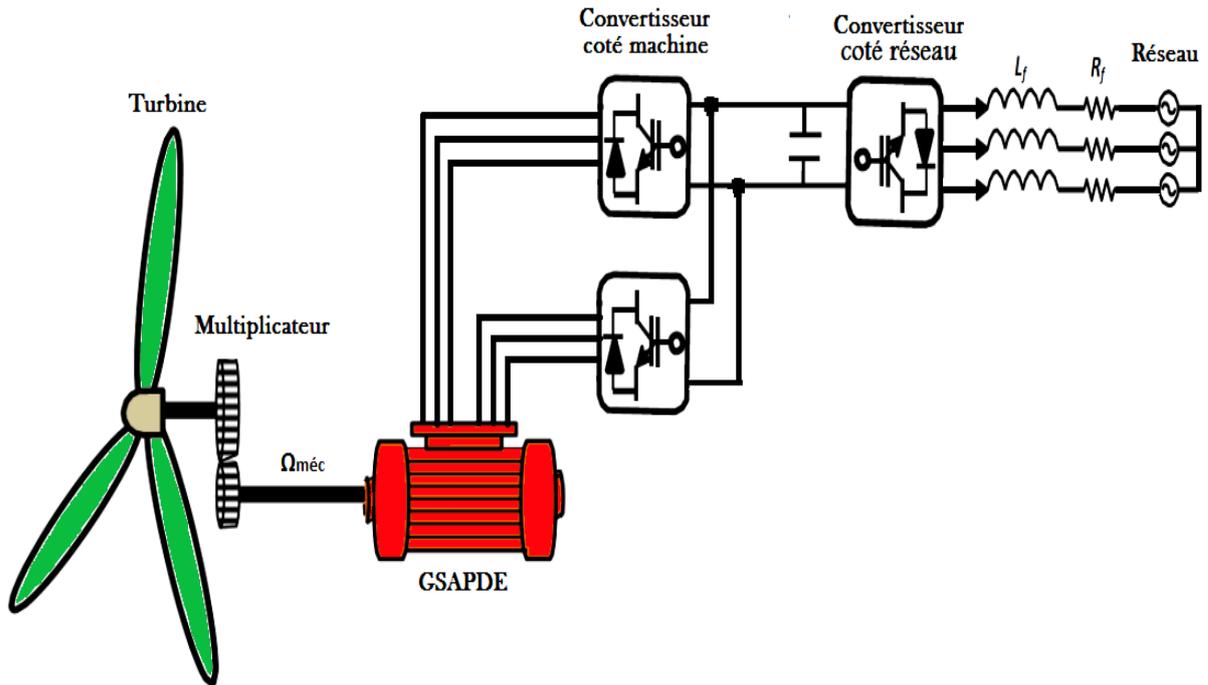


Figure III. 1 Schéma synoptique du système étudié

### III.3 Conversion de l'énergie éolienne

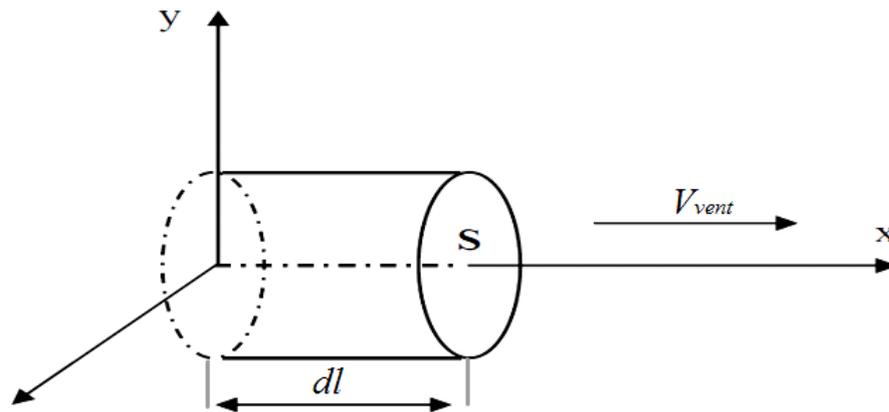
#### III.3.1 Modélisation du vent

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Les propriétés du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, puisque sa puissance, dans les conditions idéales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour connaître les caractéristiques d'un site, il est indispensable d'avoir des mesures de la vitesse du vent et de sa direction, sur une grande période du temps. Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation (III.1) [26] :

$$V(t) = 7.5 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad \text{(III.1)}$$

#### III.3.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $V_{\text{vent}}$ , de longueur  $dl$  et de section  $S$  telle que représentée sur la figure (III.2) :



**Figure III. 2 Représentation d'une colonne d'air**

L'énergie cinétique de cette colonne d'air de longueur  $dx$  est donc :

$$dE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dm \cdot V_{vent}^2 \quad \text{III.2}$$

Avec :

$$dm = \rho \cdot S \cdot dl, \text{ masse de cette colonne d'air}$$

Or, nous savons que:  $V_{vent} = \frac{dl}{dt}$

D'où :

$$dE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot dt \quad \text{III.3}$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible:

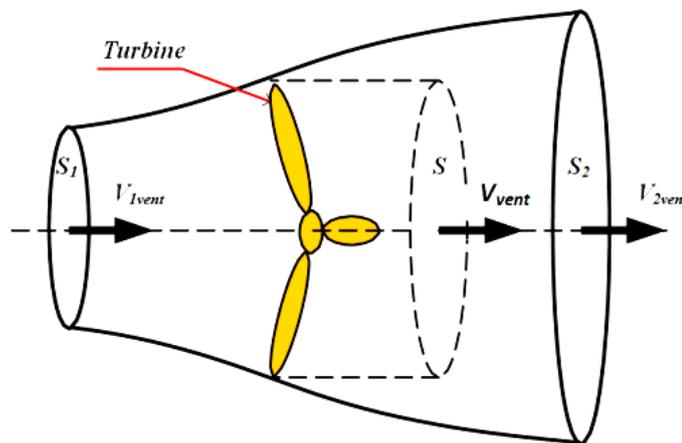
$$P_{vent} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad \text{III.4}$$

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ( $S = \pi \cdot R^2$ ); la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad \text{III.5}$$

**III.3.4 Théorie de Betz**

La théorie de Betz stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de  $\frac{16}{27}$  (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [27],[28],[29]. Considérons le système de la figure (III.3) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal.  $V_1$  représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.



**Figure III. 3 Tube autour d'une turbine éolienne**

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface et la vitesse moyenne [30],[28].

$$m_0 = \rho \cdot S \cdot (V_{1vent} - V_{2vent})$$

**III.6**

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [30].

$$P_m = \frac{1}{2} m_0 (V_{1vent}^2 - V_{2vent}^2)$$

**III.7**

En remplaçant  $m_0$  par son expression dans (II.7):

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_{1vent}^2 + V_{2vent}^2) (V_{1vent} - V_{2vent}) \quad \text{III.8}$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface  $S$  est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant  $V_{2vent} = 0$  dans l'expression (III.8):

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{1vent}^3 \quad \text{III.9}$$

### III.4 Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, les domaines aérodynamiques, mécaniques et électriques. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine.

La figure (III.4) montre la configuration du système étudié qui est composé d'une turbine éolienne entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse.

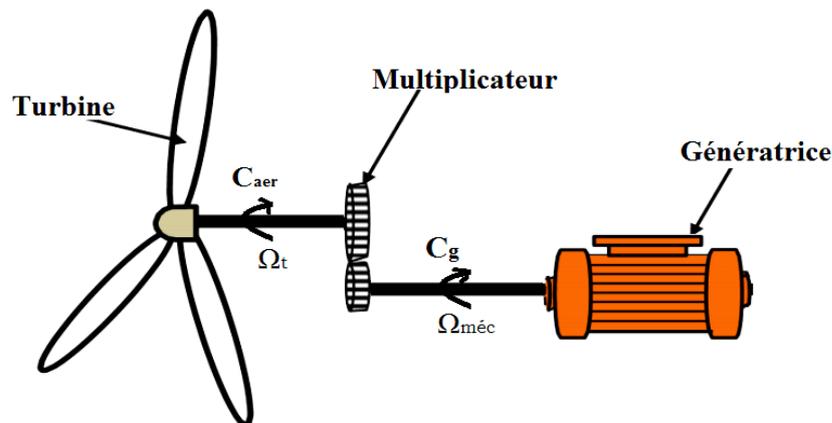


Figure III. 4 Système de conversion de l'énergie éolienne

#### III.4.1 Modèle de la turbine

Le dispositif étudié dans ce travail est composé d'une turbine éolienne d'une puissance nominale de 1.5 MW, comprenant des pales de rayon de 39 m qui entraîne une génératrice à travers un multiplicateur de gain  $G = 70$ .

**III.4.1.1 Puissance mécanique de la turbine**

La relation entre la vitesse du vent et la puissance aérodynamique extraite à partir du vent peut être décrite comme suit [31]:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_{vent}^3 \quad \text{III.10}$$

**III.4.1.2 Coefficient de puissance**

Le coefficient de puissance  $C_p$  indique le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il est en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$ . Il est différent d'une turbine à une autre vu sa dépendance de la caractéristique de chacune. Durant ce travail, ce coefficient sera modélisé par l'expression analytique suivante [32]:

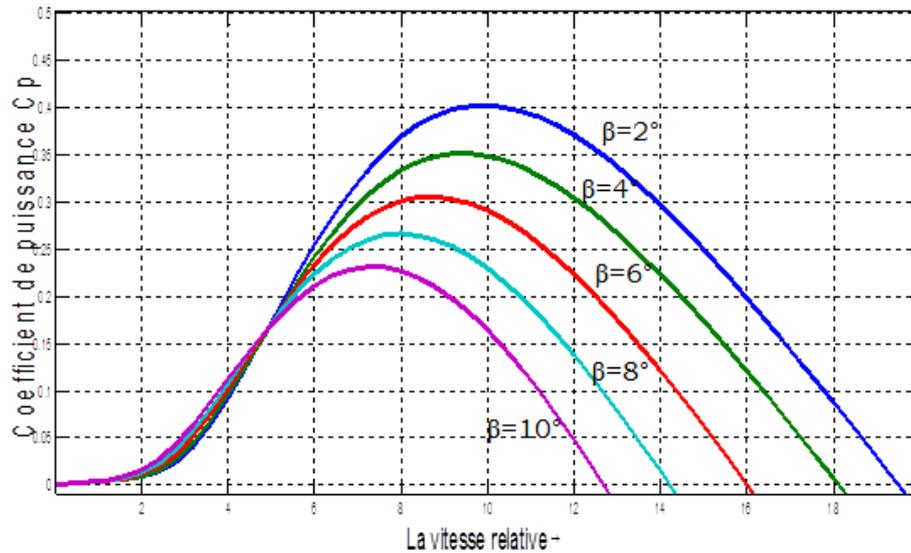
$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad \text{III.11}$$

**III.4.1.3 Vitesse relative**

Afin de permettre une utilisation pratique du coefficient de puissance  $C_p$ , nous introduisons la variable appelée vitesse relative qui est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} \cdot R}{V_{vent}} \quad \text{III.12}$$

La caractéristique du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  obtenue par l'équation (III.11), est illustrée par la figure (III.5).



**Figure III. 5 Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$**

La figure III.5 représente la fonction du coefficient de puissance  $C_p$  par rapport à la vitesse relative  $\lambda$  pour différents angles de calage. On peut remarquer que le coefficient de puissance passe par un maximum ( $C_{pmax}=0.4$ ), pour un angle de calage= $2^\circ$ , une valeur de la vitesse relative  $\lambda$  dite optimale ( $\lambda_{opt}=10$ ).

#### III.4.1.4 Couple mécanique de la turbine

A partir de l'expression de la puissance produite par la turbine et connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique s'exprime comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turb}} \quad \text{III.13}$$

#### III.4.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple d'entraînement de la génératrice selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{\Omega}{\Omega_{turb}} \quad \text{III.14}$$

$$G = \frac{C_{turb}}{C_m}$$

III.15

**III.4.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission**

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \sum C = C_T - C_{vis}$$

- J est l'inertie totale :  $J = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_{générateur}$
- $C_{vis}$  couple de frottement visqueux :  $C_{vis} = f\Omega$
- $C_T$  couple totale qui égale à la superposition des couples de la génératrice.

L'équation de l'arbre mécanique devient alors :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{Turb} + C_m + C_{em}$$

III.16

A partir des équations précédentes le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est donné par la figure (III.6).

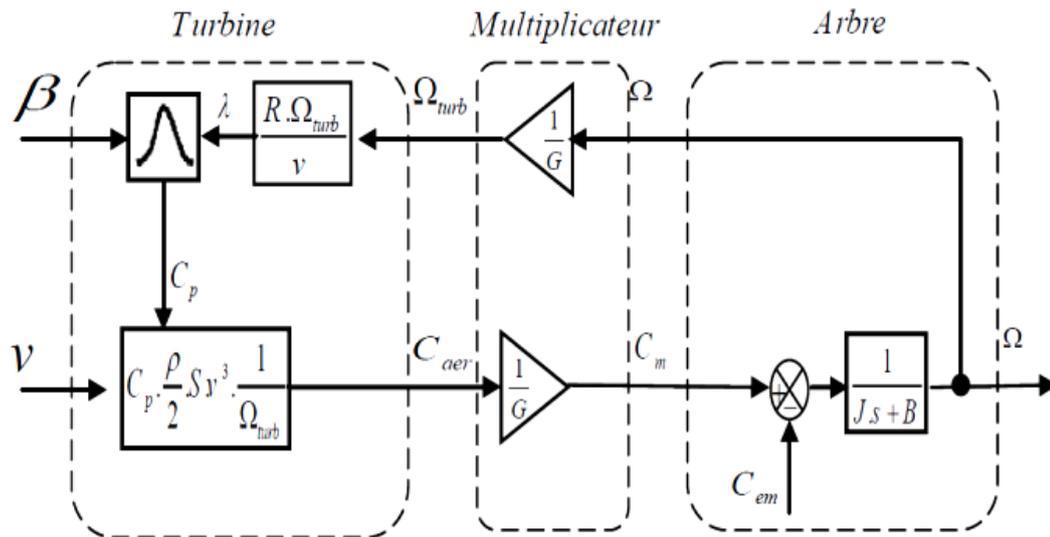


Figure III. 6 Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien

### III.5 Stratégie de maximum de puissance MPPT

En fonction des conditions aérodynamiques données (vitesse du vent), il existe un point de fonctionnement optimal permettant "d'extraire" le maximum de puissance de la turbine. Il faut donc commander, soit la vitesse de rotation de la turbine, soit la puissance de la turbine pour atteindre ce point.

Plusieurs MPPT pourraient être employés, soit par l'utilisation de MPPT à l'aide de la caractéristique de la turbine ou sans la connaissance de cette dernière. Dans notre étude nous opterons pour la première méthode [33].

#### III.5.1 Commande de la turbine du vent par la stratégie MPPT

Afin de rechercher le point de fonctionnement à puissance optimale, il est nécessaire de s'intéresser aux caractéristiques aérodynamiques de la turbine. Il existe des méthodes pour connaître les points de fonctionnement sans connaître ses caractéristiques (stratégie par logique floue).

Cependant, dans cette étude, nous supposons que nous connaissons parfaitement les caractéristiques aérodynamiques de la turbine, et que ces données sont fiables.

La puissance maximale  $P_{turb, max}$  captée par la turbine est donnée par la relation suivante [34]:

$$P_{turb, max} = \frac{1}{2} C_{p, max} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{est}^3 \quad \text{III.17}$$

$$\text{Tel que : } V_{estimé} = \frac{\Omega_{turb} \cdot R}{\lambda_{opt}}$$

La vitesse de rotation optimale  $\Omega_{opt}$  pour la transmission mécanique maximale de la turbine de vent est donnée par :

$$\Omega_{turb, opt} = \frac{\lambda_{opt} V_{est}}{R} \quad \text{III.18}$$

Ainsi, le couple électromagnétique optimal  $C_{em, opt}$  correspondant est :

$$C_{em,opt} = \frac{P_{turb,max}}{\Omega_{turb,opt}} \cdot \frac{1}{G}$$

III.19

La représentation sous forme de schéma bloc du dispositif de commande est illustrée dans la figure (III.7) :

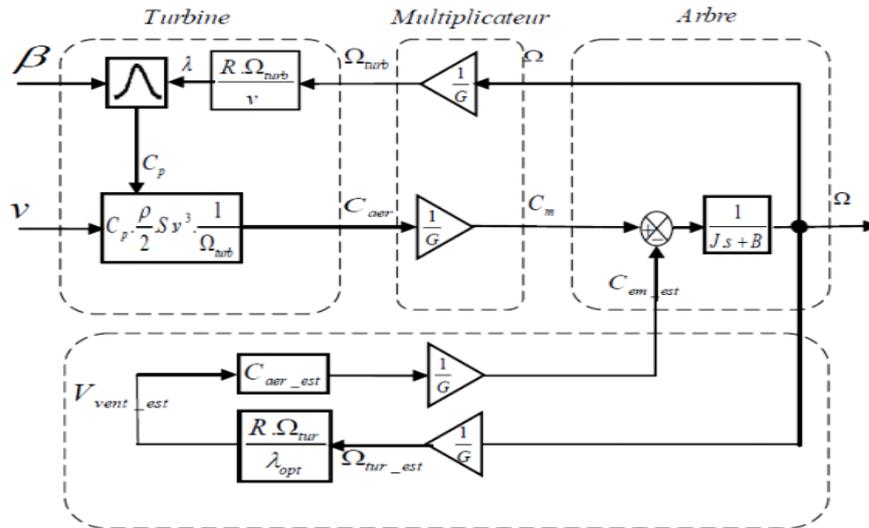


Figure III. 7 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite

### III.5.3 Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable sont illustrées sur la figure III.8.

- ❖ Zone1: Correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- ❖ Zone2: MPPT: Dans cette zone, l'angle de calage est maintenu constant, et c'est le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice qui va être mis en œuvre [35] afin de capter le maximum de puissance pour chaque vitesse de vent (principe de MPPT). Dans cette zone, la courbe de puissance de la génératrice suit une progression rapide.
- ❖ Zone3: Ici la vitesse de la génératrice est maintenue constante à son maximum par opposition d'un couple moteur approprié. L'augmentation de la vitesse de vent va donc s'accompagner d'une décroissance du

coefficient  $C_p$  et d'une augmentation moins rapide de la puissance récupérée. Lorsque la puissance maximale de la génératrice est atteinte, l'angle des pales est modifié afin de dégrader encore plus le coefficient  $C_p$ .

- ❖ Zone4: Dans cette zone, lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ( $V_M$ ), un dispositif d'urgence permet d'arrêter l'éolienne (production d'énergie électrique nulle) et de la mettre en sécurité pour éviter tout dégât.

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines, le système d'orientation des pales (PitchControl) est un système à décrochage aérodynamique (StallControl).

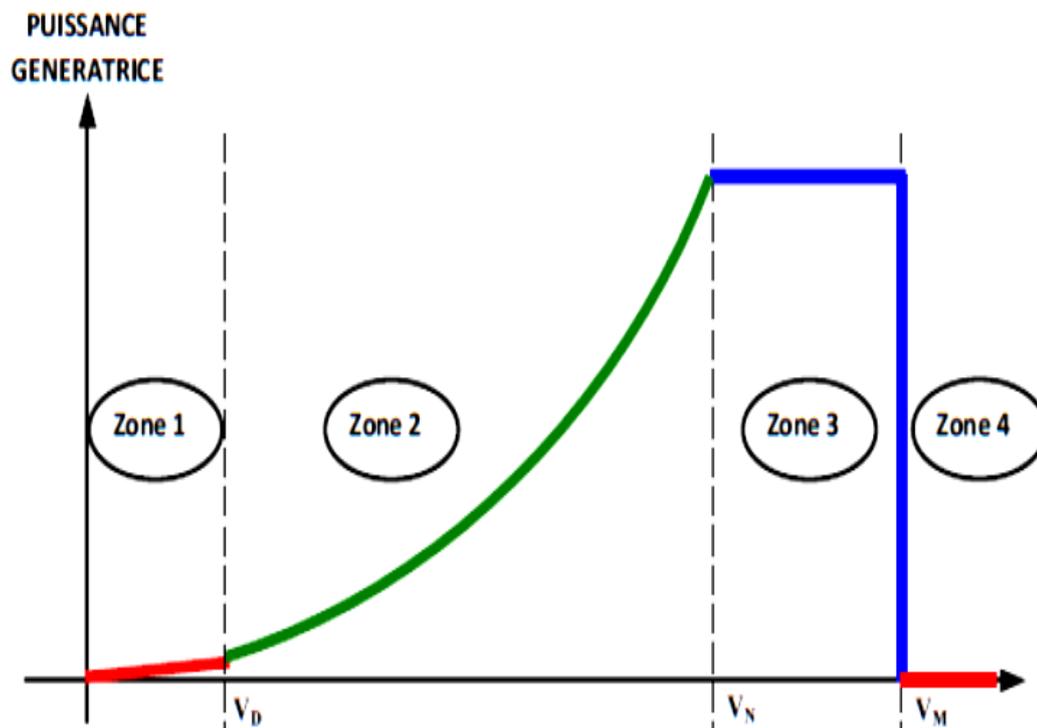


Figure III. 8 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

## III.6 Résultats de simulation

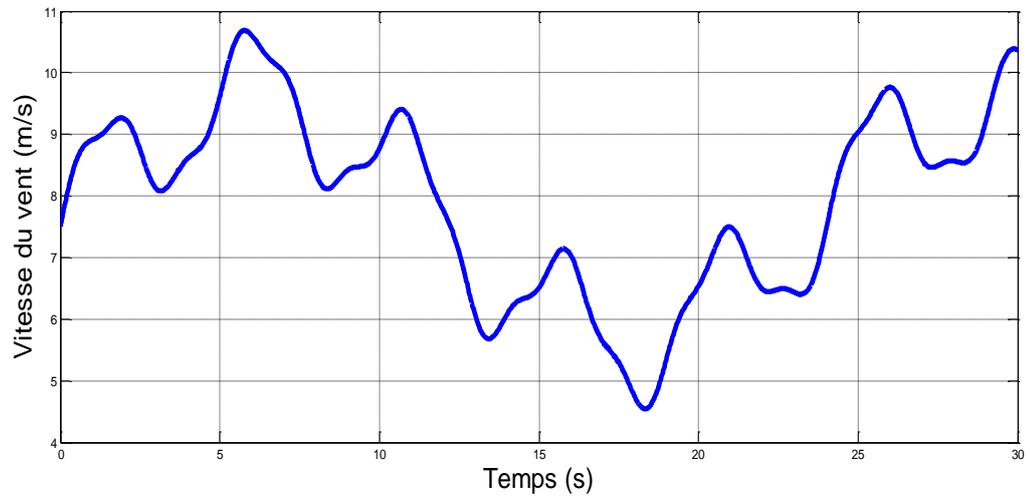


Figure III. 9 Profil de vent

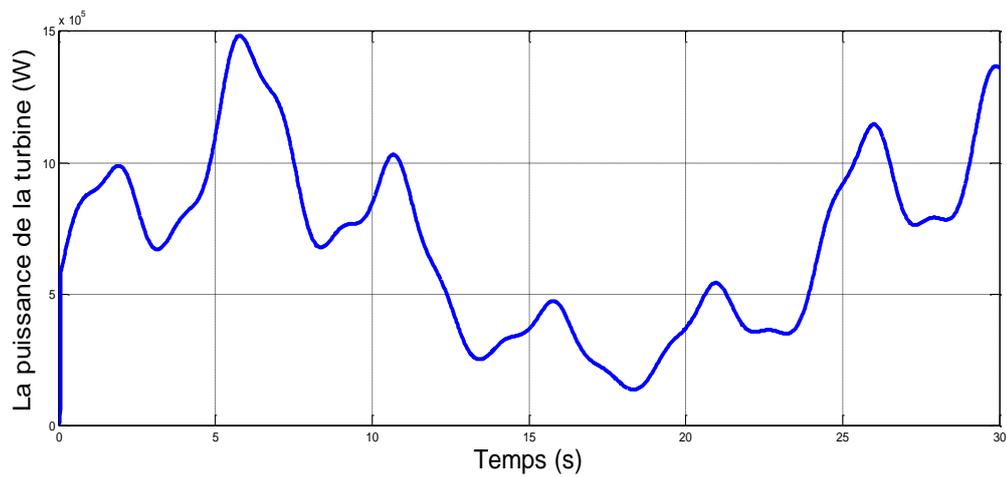
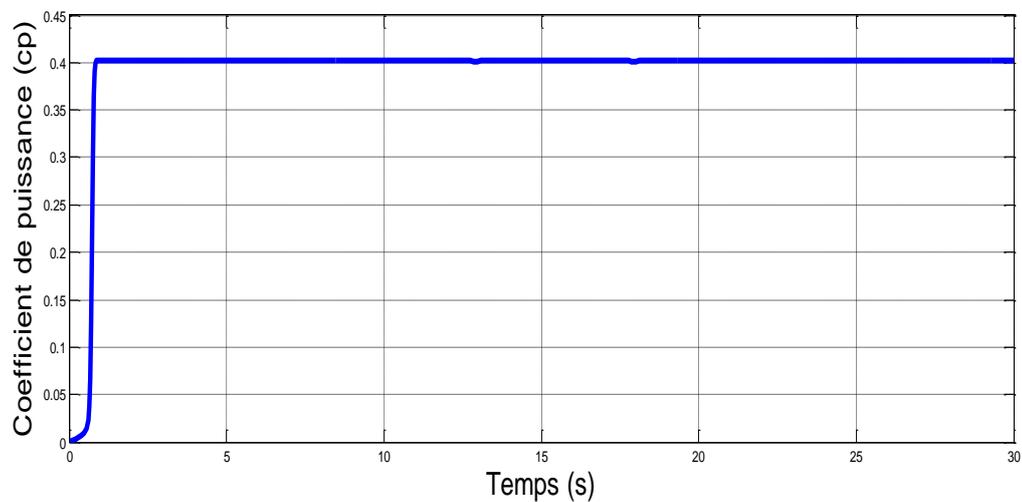


Figure III. 10 La puissance de la turbine éolienne

Figure III. 11 Le coefficient de puissance  $C_p$

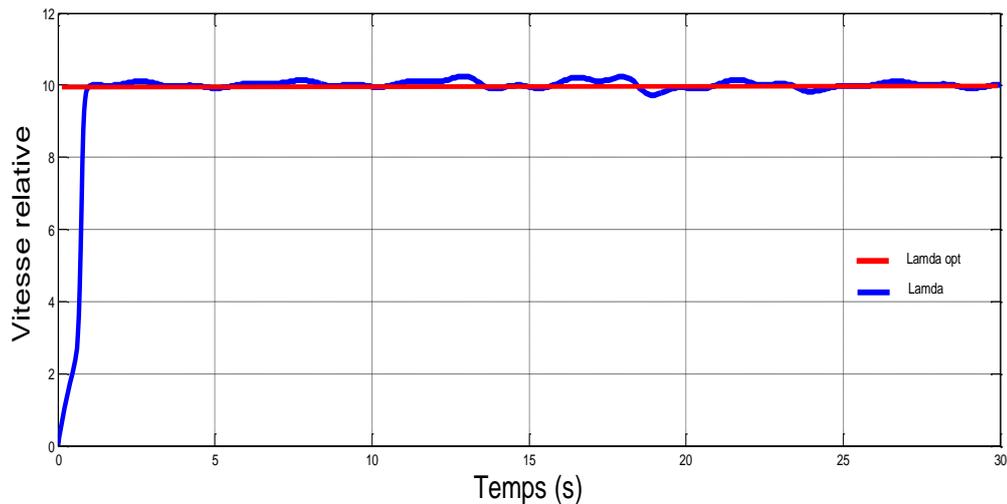


Figure III. 12 La vitesse relative  $\lambda$

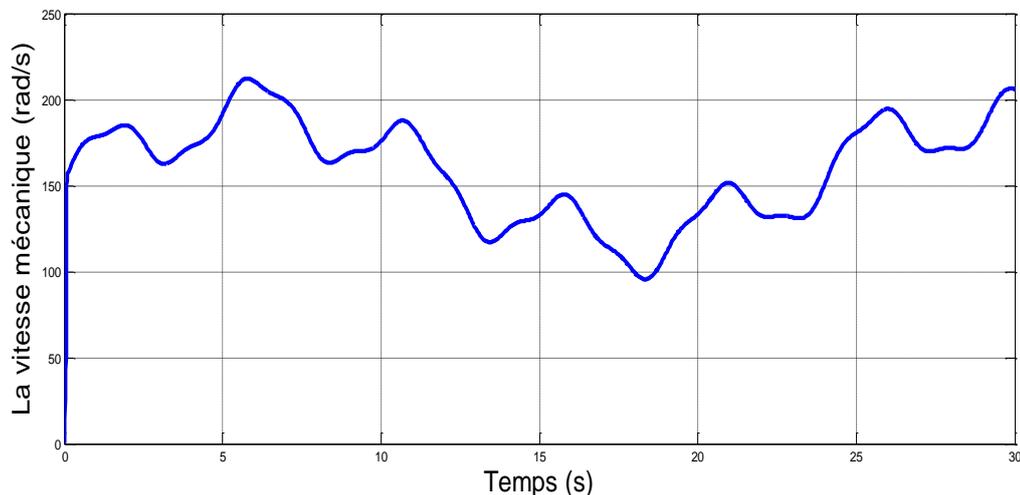


Figure III. 13 La vitesse de l'arbre mécanique

### III.6.1 Interprétation des résultats

La commande de la turbine éolienne a été simulée en considérant un profil de vent moyen autour de ( $V_{vent}=7.5m/s$ ). L'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale  $\beta = 2^\circ$ .

Au regard des résultats obtenus pour la stratégie de commande de vitesse effectuée, on observe que la puissance et le couple aérodynamique varient proportionnellement avec la variation du profil du vent.

La vitesse relative  $\lambda$  et le coefficient de puissance  $C_p$  suivent leurs références, avec un temps de réponse important au démarrage.

Pour extraire le maximum de la puissance générée, nous avons fixé le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{opt}=10$ , ce qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}=0.4$  quelque soit la vitesse du vent.

### III.7 Modèle complet du système de conversion de l'énergie éolienne

On adopte le modèle équivalent des convertisseurs représentés dans le repère de Park, le bus continu, la liaison au réseau contenant le convertisseur MLI et le filtre intermédiaire. Le même principe de la commande vectorielle présentée dans le chapitre précédent est appliqué à la génératrice. La figure (III.14) présente le système visé.

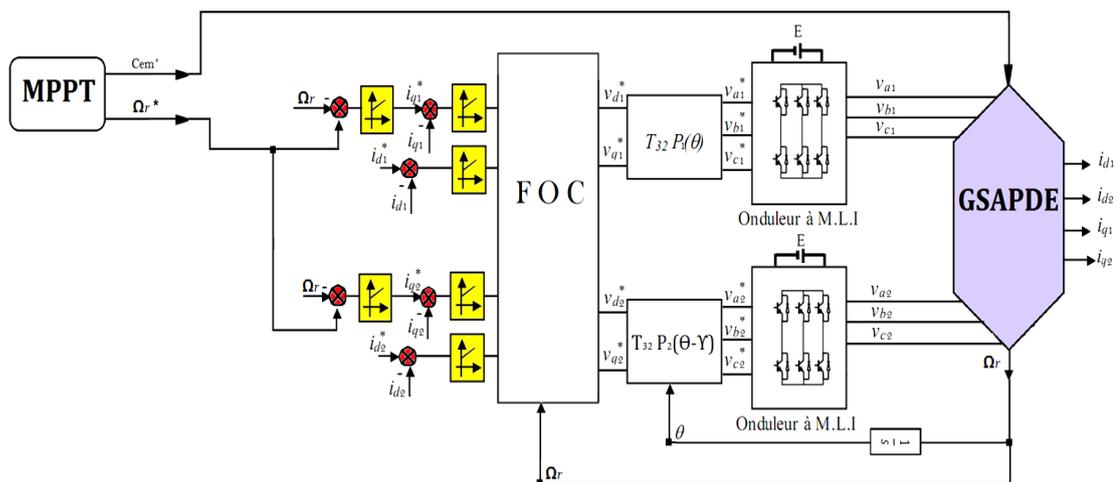


Figure III. 14 Commande vectorielle Foc de la GSAPDE

#### III.7.1 Contrôle de l'onduleur côté réseau électrique

Le but de cet onduleur est d'assurer le bon fonctionnement de l'électronique de puissance, en régulant le bus continu à une valeur suffisamment élevée. L'onduleur doit également alimenter, après adaptation grâce à un transformateur, le réseau électrique avec une tension idéalement égale à celle du réseau.

#### III.7.2 Calcul de la tension du bus continu

Pour déterminer la valeur du bus continu nécessaire pour faire transiter une puissance donnée, on utilise les expressions suivantes :

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{P_{\max} * X^2}{9 * E^4} + 1} \quad \text{III.20}$$

$$U_{dc} = \alpha_1 * E_1 * 2\sqrt{2} \quad \text{III.21}$$

La puissance nominale  $P_{nom}=1.5\text{MW}$  est considérée pour une valeur de la tension simple efficace du réseau de  $E=400\text{V}$ , l'impédance de la self de lissage de  $1\text{ mH}$ , a comme valeur  $X=0.314\Omega$ .

On trouve :  $\alpha_1 = 1.00005$  ;  $U_{dc} = 1131\text{ V}$

### III.7.3 Régulation de la tension du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité qui a pour but de lisser la tension. L'évolution de cette tension est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}(i_{dc} - i_{ond}) \quad \text{III.22}$$

D'où :

$$i_c = i_{dc} - i_{ond} \quad \text{III.23}$$

Avec :

$$i_{ond} = f_{11}i_{g1} + f_{12}i_{g2} + f_{13}i_{g3}$$

$$i_{dc} = i_{d1} + i_{d2}$$

$$i_{d1} = f_{11}i_{as1} + f_{12}i_{bs1} + f_{13}i_{cs1}$$

$$i_{d2} = f_{11}i_{as2} + f_{12}i_{bs2} + f_{13}i_{cs2}$$

### III.7.4 Régulation des courants

Les tensions simples du réseau s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{g1} = V_m \cdot \sin(\omega_s t) \\ V_{g2} = V_m \cdot \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{g3} = V_m \cdot \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{III.24}$$

Avec :

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

$$V_m = \sqrt{2}.V_{eff}$$

Les tensions côté stator et côté réseau se transforment de la même façon :

$$\begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} = P[\theta_s]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \\ V_{0s1} \end{bmatrix} \quad \text{III.25}$$

$$\begin{bmatrix} V_{dg} \\ V_{qg} \\ V_{0g} \end{bmatrix} = P[\theta_s]^{-1} \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \\ V_{g3} \end{bmatrix} \quad \text{III.26}$$

Les courants du réseau s'écrivent:

$$\begin{cases} i_{dg} = \frac{1}{(R_t + L_t s)} (V_{d\_ond} - V_{dg} - L_t \omega_s i_{qg}) \\ i_{qg} = \frac{1}{(R_t + L_t s)} (V_{q\_ond} - V_{qg} - L_t \omega_s i_{dg}) \end{cases} \quad \text{III.27}$$

Les tensions simples de références pour le réseau exprimées dans le repère de Park sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{d\_ond}^* = V_{dg}^* + V_{dg} - L_t \omega_s i_{qg} \\ V_{q\_ond}^* = V_{qg}^* + V_{qg} - L_t \omega_s i_{dg} \end{cases} \quad \text{III.28}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} V_{dg}^* = PI.(i_{dg}^* - i_{dg}) \\ V_{qg}^* = PI.(i_{qg}^* - i_{qg}) \end{cases}$$

### III.7.5 Calcul des courants de références

Les puissances, active et réactive, de référence s'expriment par :

$$\begin{cases} P_g^* = V_{dg} . i_{dg}^* + V_{qg} . i_{qg}^* \\ Q_g^* = V_{qg} . i_{dg}^* - V_{dg} . i_{qg}^* \end{cases} \quad \text{III.29}$$

La puissance réactive de référence est imposée nulle. Le facteur de puissance côté réseau électrique est donc unitaire.

$$Q_g^* = 0 \quad \text{III.30}$$

La puissance active de référence côté réseau électrique est donnée par la relation suivante:

$$P_g^* = U_{dc} \cdot i_{dc} - U_{dc} \cdot i_c^* \quad \text{III.31}$$

Avec :  $i_c^* = PI \cdot (U_{dc}^* - U_{dc})$

D'après les expressions (III.29), on calcule les courants de référence du réseau électrique, exprimés dans le référentiel de Park par :

$$\begin{cases} i_{dg}^* = \frac{P_g^* V_{dq} + Q_g^* V_{qg}}{V_{dq}^2 + V_{qg}^2} \\ i_{qg}^* = \frac{P_g^* V_{qg} + Q_g^* V_{dq}}{V_{dq}^2 + V_{qg}^2} \end{cases} \quad \text{III.32}$$

### III.8 Résultats de simulation numérique

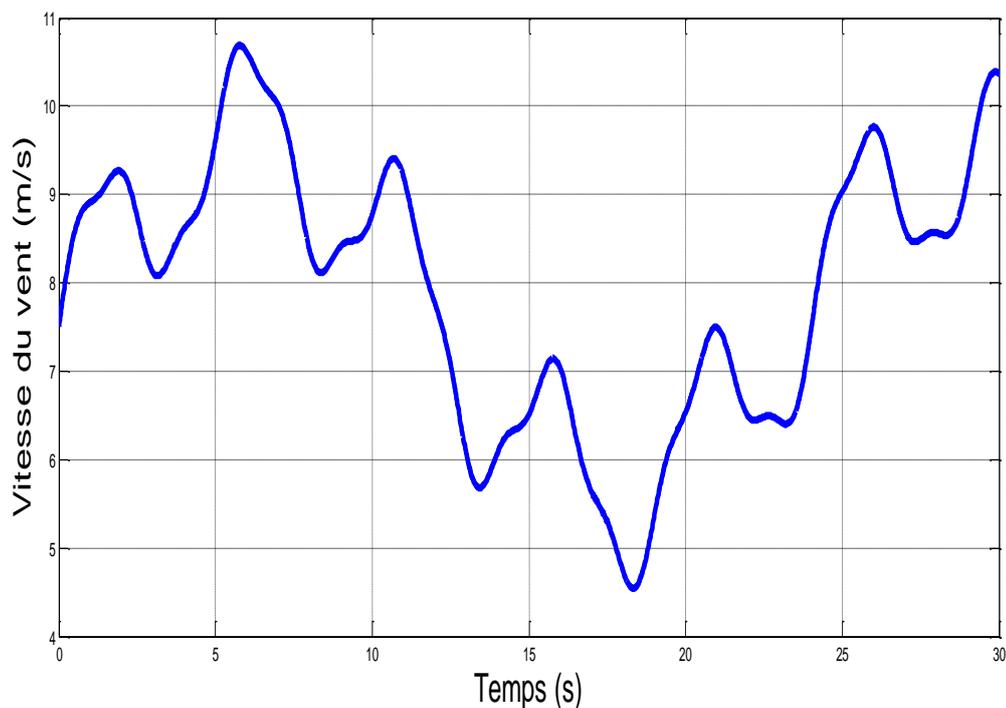


Figure III. 15 Profil du vent

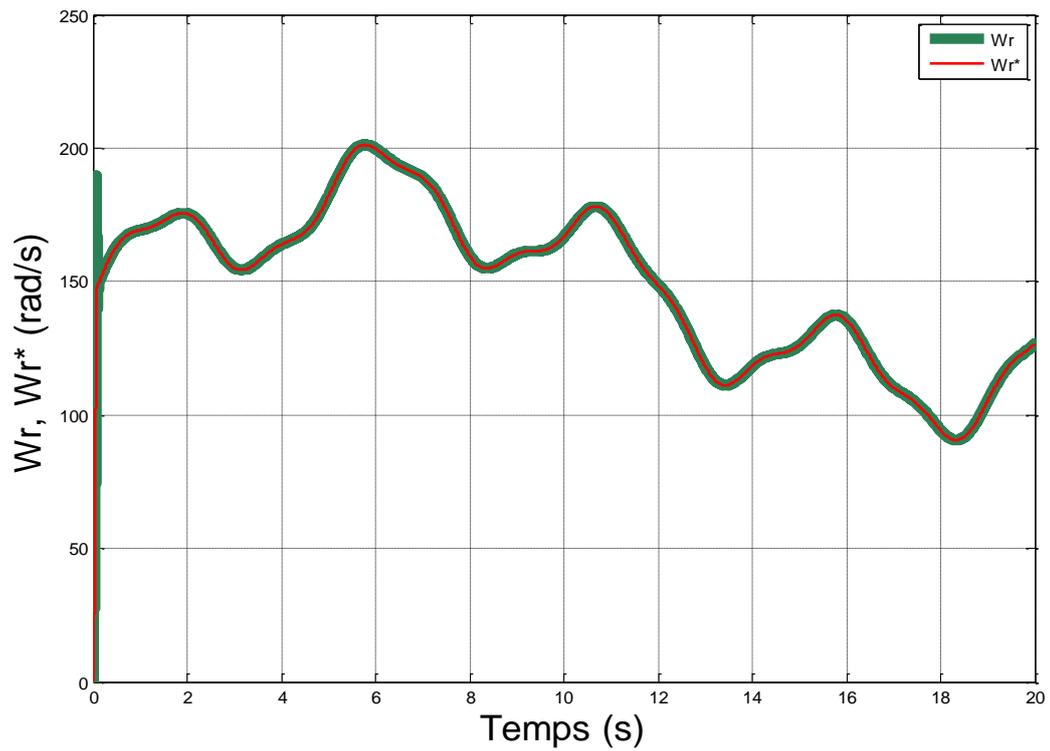


Figure III. 16 La vitesse de la GSAPDE et sa référence

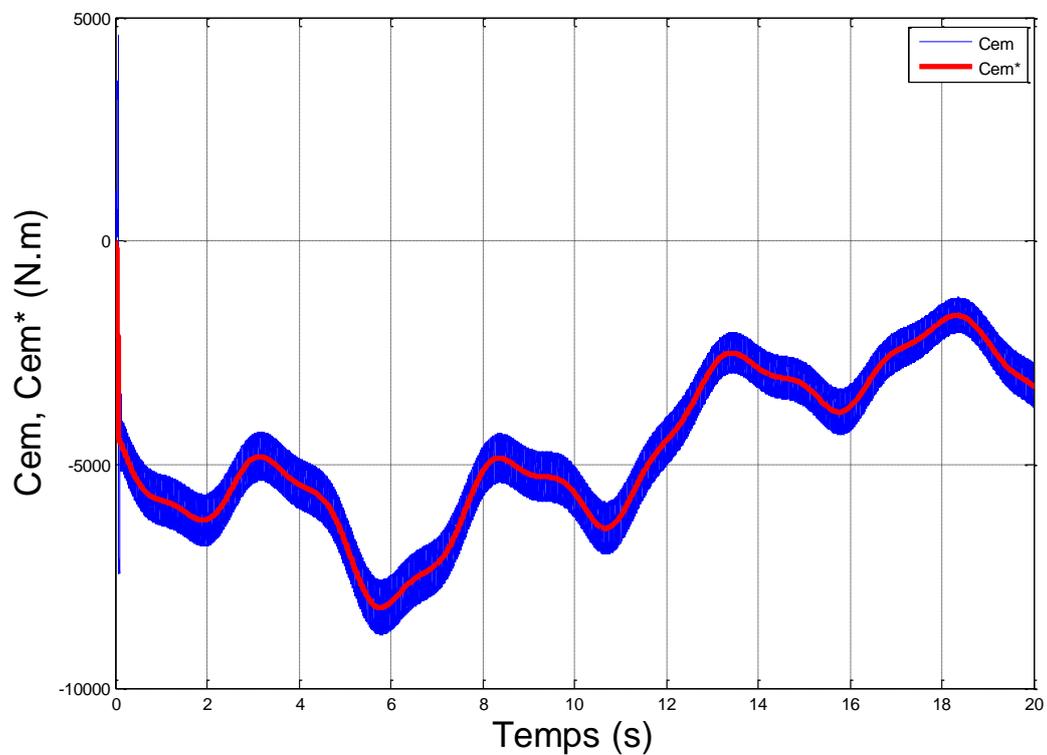


Figure III. 17 Couple électromagnétique de la GSAPDE et sa référence

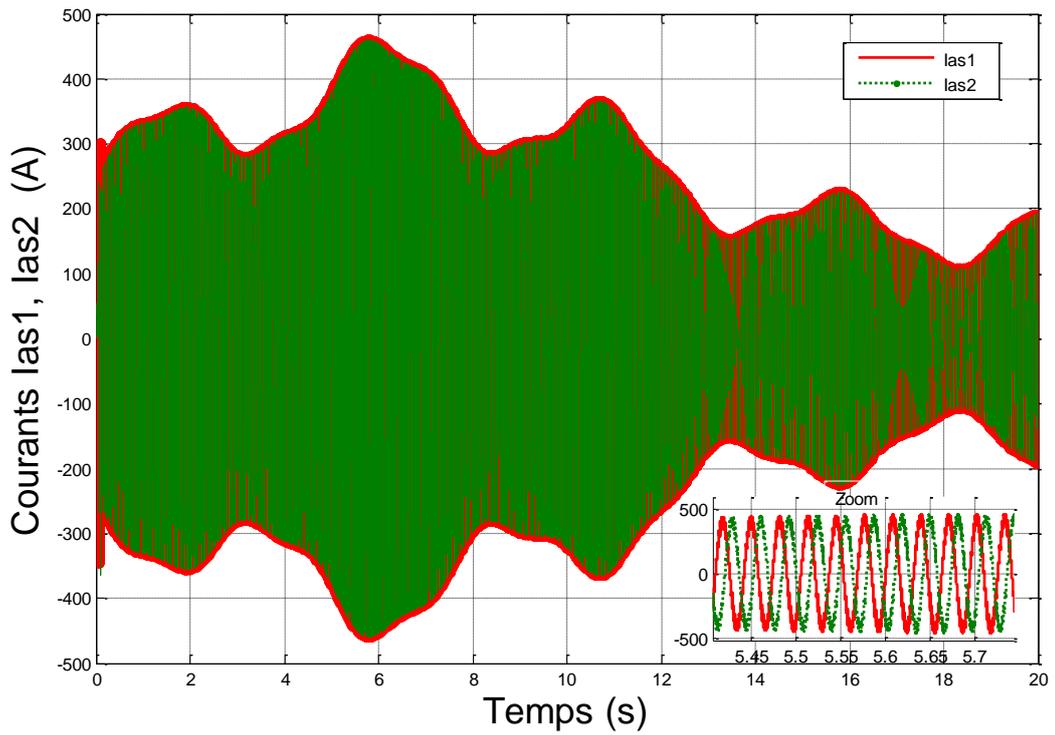


Figure III. 18 Courants statoriques des deux étoiles

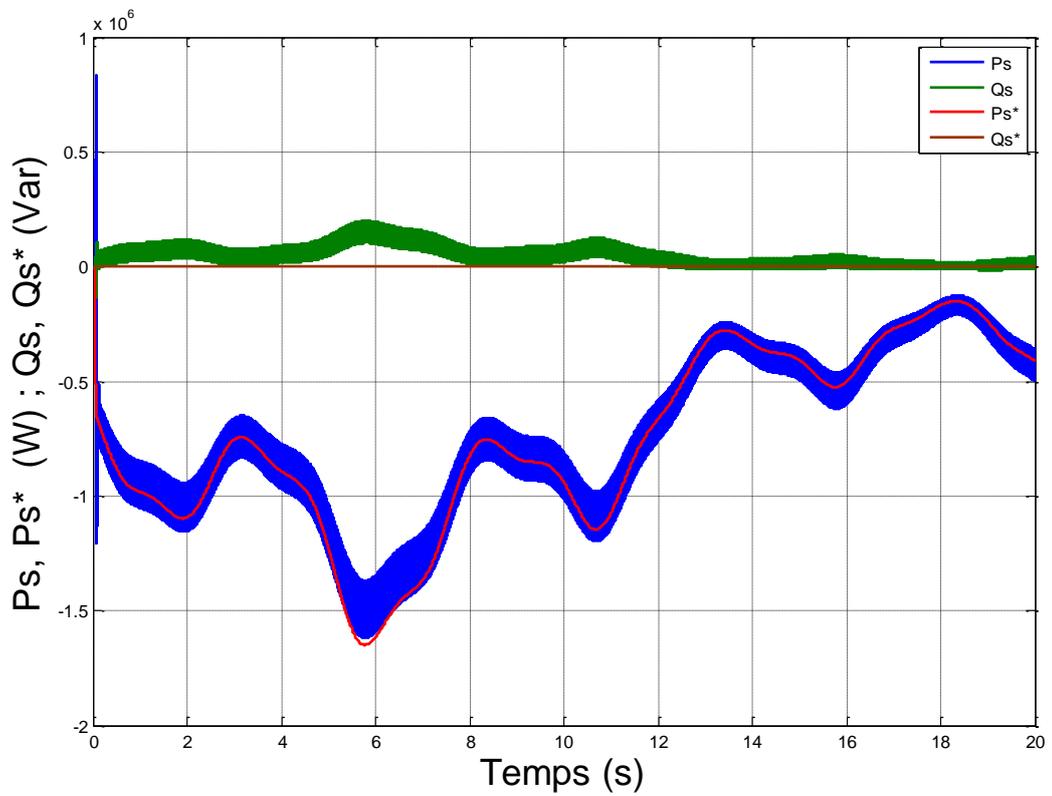


Figure III. 19 Puissance active et réactive de la GSAPDE

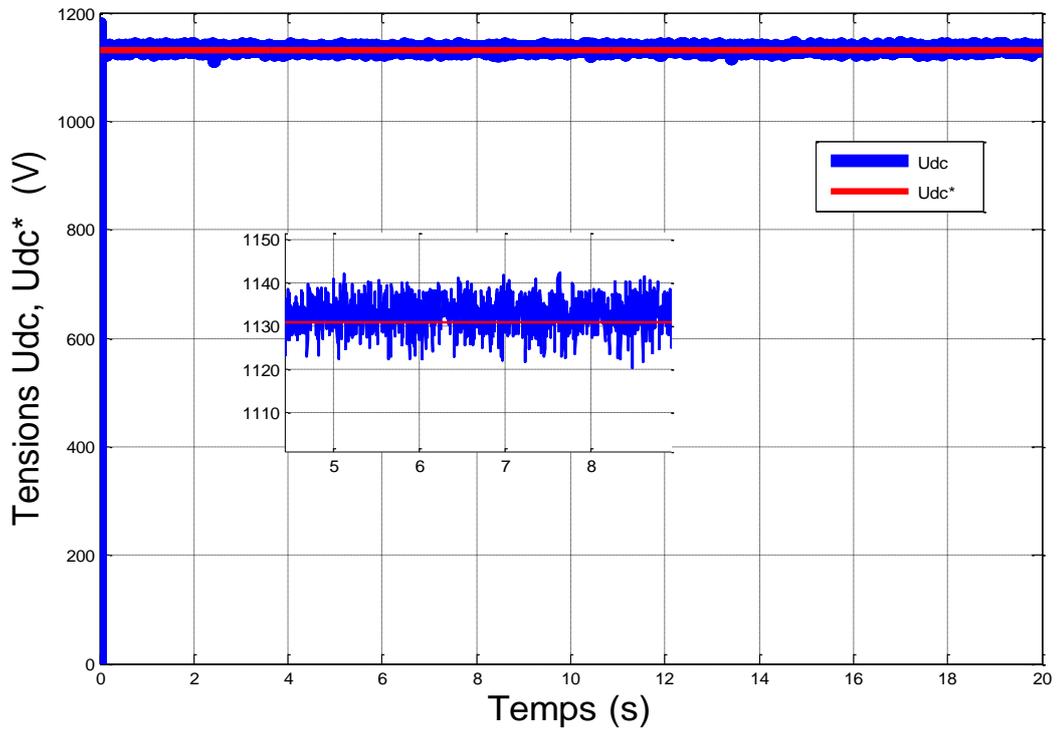


Figure III. 20 Tension du bus continu et sa référence

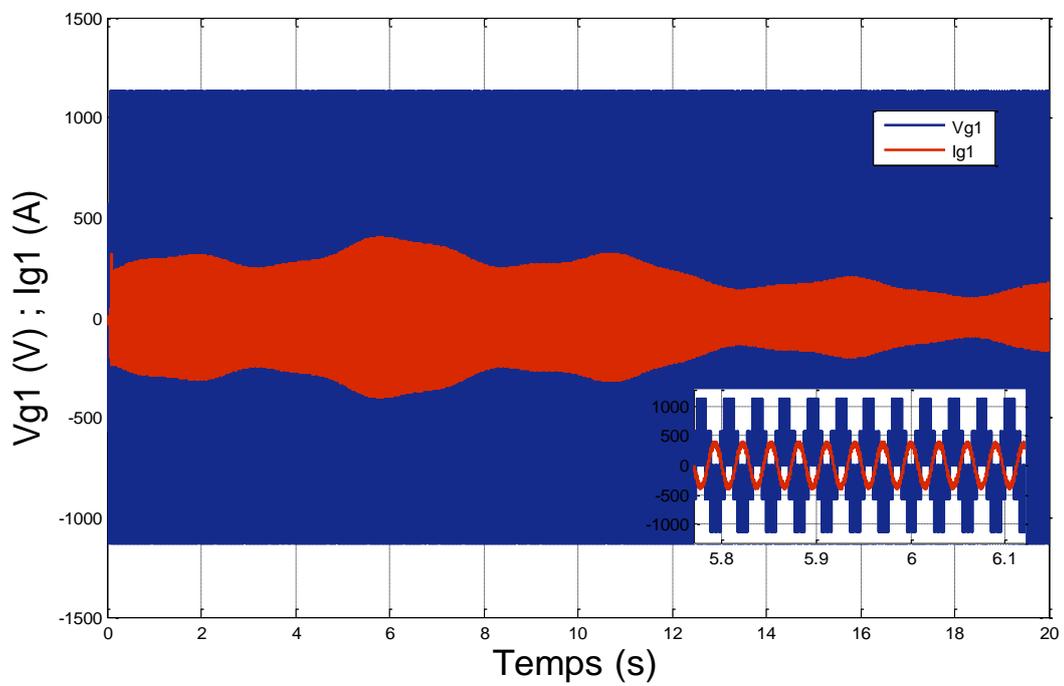
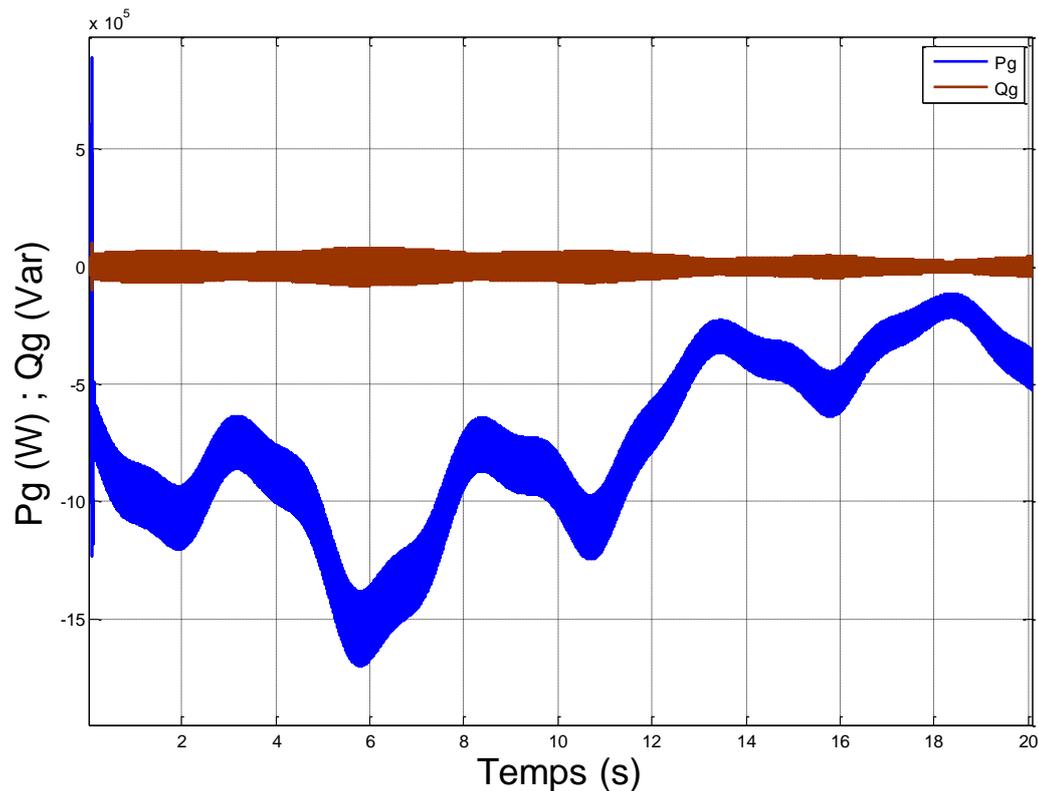


Figure III. 21 Le courant et la tension d'une phase du coté réseau



**Figure III. 22 Puissance active et réactive du côté réseau**

### III.8.1 Interprétation des résultats de simulation

La figure III.16 représente l'allure de la vitesse de la GSAPDE. On peut remarquer que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence qui est variable selon le profil du vent imposé (figure III.15). Les allures du couple de référence, issues de l'algorithme MPPT et du couple électromagnétique de la génératrice, sont illustrées par la figure III.17. La (figure III.18) représente les courants statoriques des deux étoiles. On remarque que la 2<sup>ème</sup> étoile est décalée d'un angle électrique  $\alpha=30^\circ$  par rapport à la 1<sup>ère</sup> étoile.

La figure III.19 représente les allures des puissances statoriques, active et réactive, totales de la GASDE. La puissance active est de signe négatif et suit parfaitement sa référence, c'est-à-dire la GASDE génère cette puissance tout en présentant des fluctuations. Par contre, la puissance réactive tend vers sa valeur nulle de référence, puisque les courants Id1 et Id2 sont nuls.

La tension du bus continu Udc et Udc\* de la figure III.20 sont échantillonnées à une valeur constante de 1130V pour une puissance nominale de 1.5MW. La

figure III.21 montre l'évolution de la tension et du courant statoriques de la première phase correspondant à la première étoile, celles-ci dévoilent que la tension et le courant sont presque déphasés de  $180^\circ$ .

Pour maintenir le facteur de puissance du côté réseau unitaire, la puissance réactive de référence  $Q_s^*$  est maintenue nulle. La figure III.22 représente les puissances, active et réactive, fournies au réseau électrique. On constate que la puissance active suit sa référence et la puissance réactive est nulle selon sa consigne imposée (une puissance négative représente une puissance générée).

### Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de la turbine éolienne et la technique de commande d'extraction du maximum de puissance a été présentée. Nous avons décrit en premier lieu les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, avec une attention particulière à la zone 2, pour laquelle la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par une stratégie de commande sans asservissement de la vitesse mécanique.

Nous avons, ensuite, intégré la chaîne de conversion de l'énergie éolienne au réseau, en associant la turbine éolienne et la génératrice synchrone à aimants permanents double étoile, et en appliquant la commande vectorielle à la GSAPDE. L'observation des différents résultats obtenus montrent un bon comportement du système.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE) dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Ensuite, nous avons établis les différentes configurations de la conversion de l'énergie éolienne. Comme toutes les énergies renouvelables, le gisement éolien est très considérable, parce qu'il est très supérieur à la consommation énergétique dans le monde.

Nous avons également suivi en présentant les différents types de générateurs électriques (en s'intéresse au générateur synchrone à aimants permanents double étoile) utilisés dans les chaînes de conversion éoliennes.

Dans un second temps, nous avons établis un modèle mathématique décrivant le fonctionnement de la machine et sa modélisation sous la forme d'état qui permet d'étudier son comportement dynamique et statique en tenant compte des hypothèses simplificatrices.

Pour réaliser une commande performante de l'ensemble des deux onduleurs de tension MLI (Sinus triangle) et la MSAPDE, un découplage naturel du flux et du couple est indispensable. Pour cela on a utilisé la technique de la commande vectorielle sus-cité (FOC).

Dans le dernier chapitre, on a fait une modélisation de la turbine éolienne avec la commande d'extraction du maximum de puissance MPPT et on a présenté des résultats de la simulation numérique satisfaisants.

Finalement, on a procédé la modélisation de tout le système de conversion d'énergie éolienne connecté au réseau électrique pour prédire son comportement à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

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

- Le contrôle de la MSAPDE par des commandes non linéaires, la fusion des réseaux de neurones avec les techniques flous, la commande par mode glissant et la commande adaptative floue.
- L'exploitation de la génératrice GSAPDE dans les systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque) et (éolienne-diesel).

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHYQUES**

- [1] T. Azzouz, A. Benakcha, "Performance of PI controller for control of active and reactive power in DFIG operating in a grid-connected variable speed wind energy conversion system" *Frond. Energy* 2014,8(3), PP.371-378.
- [2] M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non linéaire pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 2016.
- [3] T. Price J. Blyth. Britain's first modern wind power pioneer. *Wind Engineering*, Vol. 29, No. 03, pp. 191-200, 2005.
- [4] W. Tong. *Wind power generation and wind turbine design*. Southampton. Boston: WIT Press, 2010.
- [5] D. Wood. *Small wind turbines analysis, design, and application*. New York: Springer; 2011.
- [6] AR. Jha. *Wind turbine technology*. Hoboken: CRC Press, 2010.
- [7] V. Nelson. *Wind turbines. Wind energy*. CRC Press; 75-99.
- [8] H. Camblong. Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2003.
- [9] The World Wind Energy Association. <http://www.wwindea.org>. Consulté le 19-04-2021.
- [10] M. Etxaide B. Kortabarria. Dosierra: Energia elikoa. In *Elhuyar*, Vol. 133-134; 1998.
- [11] H. Ben Ahmed X. Roboam S. Astier B. Dakyo C. Nichita O. Gergaud, B. Multon. Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques. *L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Ed. NOVELECT – ECRIN, ISBN 2912154-8-1, pp.97-154, 2002.
- [12] F. Poitiers. Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [13] P. Krafczyk. Modélisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Electrotechnique, Centre d'enseignement de Nancy, 10 juillet 2013.
- [14] Haritza Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable", Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, Thèse doctorat Soutenue le 18 décembre 2003.
- [15] A. Mireki, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.

- [16] L. Abdelhamid, R. Abdessemed, H. Amimeur, E. Merabet, "Étude des performances des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens, " International Conference on Renewable Energy ICRE '07, University of Bejaia, pp.1-6 (CDROM), 25-27 November 2007.
- [17] A.Ameur, "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants doté d'un observateur d'ordre complet à mode glissant", Mémoire de magistère, université de Batna, 2003.
- [18] C.Bouchereb, "contrôle direct du couple des machine synchrone ", Mémoire de magistère, université de Batna, 2005.
- [19] M.I. Hemmami, "Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimant permanent par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant", Mémoire de Magister, université de Biskra, 2012.
- [20] B. Kosko « Neural Network and Fuzzy System, a Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence», Prectice Hall. 1992
- [21] B. Meliani «Application des Techniques Intelligentes à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile Associée à un Convertisseur Matriciel». Thèse De Doctorat, Universite Djillali Liabes, Sidi, -Bel-Abbes. 2014
- [22] A. El Ougli « Intégration des Techniques Floues à la Synthèse de Contrôleurs Adaptatifs».Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès- Maroc. 2009.
- [23] M. N. Cirstea, A. Dinu, J. G. Khor and M. M. Cormick «Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems». Elsevier Science, Printed and Bound in Great Britain. 2002
- [24] E. Merabet «Amélioration des Performances de Régulation d'une Machine Asynchrone Double Etoile par les Techniques de l'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université de Batna. 2012
- [25] T. Laamayad «Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode Glissant Apport de la Logique floue». Thèse de Doctorat, Université De Batna. 2014
- [26] F. Kendouli, Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation, Thèse, Université Mentouri, Constantine, 2011.
- [26] G. Cuntly. Eoliennes et aerogénérateurs guide de l'énergie éolienne. Edisud, 2001.
- [27] Dr. Gary L. Johnson. Wind Energy Systems. Electronic Edition, 2001.
- [28] D. Gourieres. Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations. Eyrolles, 1982.
- [29] P. Leconte M. Rapin, E. Szechenyi. Eoliennes.Techniques de l'Ingénieur,BM 4640 22p, Janvier 2001.

- [30]** H. Merabet Boulouiha. Contribution a l'étude et la commande d'une éolienne pour la production de l'énergie électrique. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université d'Oran, 2013.
- [31]** Dominique Guérette, Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le caadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration. Mémoire pour l'obtention du grade (M.Sc.A.), Quebec, Novembre 2010
- [32]** H. Merabet Boulouiha, A. Allali, A. Tahri, A. Draou, and M. Denaï "A simple maximum power point tracking based control strategy applied to a variable speed squirrel cage induction generator," J. Renewable Sustainable Energy 4, 053124 (2012).
- [33]** Haritza Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable", École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, Thèse doctorat Soutenue le 18 décembre 2003.
- [34]** I. Boldea. The electric generator shand book: variable speed generators. CRC press Taylor francis group ,NewYork, U.S.A., 2006.
- [35]** N. MOUBAYED «Speed Control of Double Stator Synchronous Machine Supplied by Two Independent Voltage Source Inverters».Wseas Transactions On Systems And Control. Vol(4), Iss 6, PP, 253-258. 2009 .

# **ANNEXES**

---

**Annexe** : Paramètres de simulation du système éolien

- Paramètres de la turbine éolienne :

<b>R (m)</b>	<b>Nombre des pales</b>	<b>G</b>	$C_{P_{max}}$	$\lambda_{opt}$
39	3	70	0.4	10

- Paramètres de la GSAPDE :

<b>Pn (MW)</b>	<b>U (V)</b>	<b>F (Hz)</b>	<b>Paires de pôles</b>	<b>Rs (<math>\Omega</math>)</b>	$L_{d1}, L_{d2}$ (mH)
1.5	480	50	2	0.3	0.35
$L_{q1}, L_{q2}$ (mH)	$M_d$ (mH)	$\varphi_r$ (Wb)	<b>J (kg.m<sup>2</sup>)</b>	$f_r$ (Nm.s/rd)	
0.35	2.2	2.6	1.576	0.0024	

- Paramètres du filtre :

$L_f$ (H)	$R_f$ ( $\Omega$ )	<b>C (F)</b>
0.001	0.01	0.072

---