

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**  
**FILIERE : ELECTROMECHANIQUE**



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER**

**Option : Electromécanique**

Sous le thème :

**Commande Directe de Puissance (DPC) d'une  
MADA Intégrée à un Système Éolien**

Présenté par :

**KHEBAL Rabah**

**KHEBAL Zakarya**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. BENDAIKHA Abdelmalik	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. ZOUGGAR El Oualid	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. LAAMARI Yahia	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2021/2022**

N° d'ordre :

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# ***Dédicaces***

*Nous dédions ce modeste travail:*

*À Nos chers parents, pour leur grand soutien et leur confiance,  
que Allah leurs procure bonne santé et longue vie.*

*À nos frères et sœurs.*

*À nos Familles.*

*À Tous nos proches, nos amies et nos collègues.*

***Rabah, Zakarya***

# Remerciement

*Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné la bonne santé, la volonté, le courage et la patience tout au long de notre parcours d'étude pour arriver à ce jour et terminer ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et nos remerciements à notre encadreur de ce mémoire, le Dr. ZOUGGAR El Oualid, pour ses conseils constants, ses suggestions et son savoir qui ont contribué et facilité la réalisation de ce présent mémoire.*

*Nous adressons nos remerciement aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer cette travail.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département de génie électrique qui ont contribué à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

*Nous n'oublions pas de remercier toute notre promotion du Master 2022.*

*Enfin, nous désirons adresser nos remerciements à toutes les personnes qui, par leur assistance, ont contribué de près ou de loin à rendre possible la réalisation de cette recherche.*

## SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>v</b>
<b>ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES .....</b>	<b>vi</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes éoliens .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Historique et développement de l'énergie éolienne .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 La situation actuelle de l'énergie l'éolienne dans le monde .....</b>	<b>6</b>
I.3.1 Capacité mondiale installée de l'énergie éolienne (Statistiques de fin d'année 2020)....	6
I.3.2 Aperçu général de la production d'énergie éolienne.....	7
I.3.3 Évolution du SCEE en puissance (mégawatt).....	8
<b>I.4 L'énergie éolienne en Algérie .....</b>	<b>8</b>
<b>I.5 Principes physiques de la conversion d'énergie éolienne .....</b>	<b>10</b>
I.5.1 Quelques notions sur le vent .....	10
I.5.2 Énergie éolienne .....	12
<b>I.6 Modes de fonctionnement de l'éolienne .....</b>	<b>19</b>
I.6.1 Éolienne autonome .....	19
I.6.2 Éolienne connectée au réseau .....	20
<b>I.7 Régulation de la puissance d'une éolienne .....</b>	<b>24</b>
I.7.1 Régulation mécanique .....	25
I.7.2 Régulation électrique (contrôle MPPT) .....	26
<b>I.8 Production optimale d'énergie.....</b>	<b>27</b>
<b>I.9 Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne .....</b>	<b>28</b>
<b>I.10 Conclusion .....</b>	<b>29</b>
<b>Chapitre II:Modélisation d'une chaine de conversion éolienne à base de MADA.....</b>	<b>30</b>
<b>II.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2 Description du système étudié .....</b>	<b>31</b>

<b>II.3</b>	<b>Etats de l'Art de La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)</b> .....	<b>32</b>
II.3.1	Description de la machine asynchrone à double alimentation .....	32
II.3.2	Classification de la MADA .....	33
II.3.3	Principe de fonctionnement de la MADA .....	34
II.3.4	Notions hypo et hyper-synchrone de la MADA.....	35
II.3.5	Modes de fonctionnement de la MADA .....	37
II.3.6	Avantages et inconvénients de la MADA .....	39
II.3.7	Domaines d'application de la MADA.....	39
<b>II.4</b>	<b>Modélisation et Simulation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA (mode générateur GADA)</b> .....	<b>41</b>
II.4.1	Modélisation et Simulation de la partie mécanique de l'éolienne .....	41
II.4.2	Modélisation et Simulation de la partie de conversion électromécanique .....	50
II.4.3	Modélisation des convertisseurs de puissance bidirectionnels.....	60
<b>II.5</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>64</b>
<b>Chapitre III:Commande Directe de Puissance (DPC) de la MADA .....</b>		<b>65</b>
<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>66</b>
<b>III.2</b>	<b>Principe générale de la technique DPC-C</b> .....	<b>67</b>
<b>III.3</b>	<b>DPC-C de la MADA</b> .....	<b>67</b>
III.3.1	Estimation de la puissance active et réactive.....	67
III.3.2	Choix des comparateurs à hystérésis .....	69
III.3.3	Elaboration de la table de commutation .....	70
<b>III.4</b>	<b>DPC par la modulation vectorielle (DPC-SVM)</b> .....	<b>72</b>
III.4.1	Principe de la MLI vectorielle « SVM » .....	73
III.4.2	Résultats de simulation de la commande DPC-SVM.....	76
<b>III.5</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>80</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....		<b>81</b>
<b>ANNEXES</b> .....		<b>83</b>
<b>Références Bibliographiques</b> .....		<b>85</b>

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

Figure I-1: Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts annuels, 2010-2020.....	6
Figure I-2: Capacité de production d'énergie éolienne et ajouts, Top 10 pays, 2020 .....	7
Figure I-3: Évolution de la taille des Turbines éoliennes. ....	8
Figure I-4: La ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar).....	9
Figure I-5: Ensemble Anémomètre-Girouette .....	11
Figure I-6: Principe de conversion de l'énergie éolienne .....	13
Figure I-7: Principaux composants de l'éolienne à axe horizontal. ....	14
Figure I-8: Eoliennes à axe horizontal .....	16
Figure I-9: Configuration à axe horizontal. ....	17
Figure I-10: Eoliennes à axe vertical .....	18
Figure I-11: Eolienne fonctionne en mode autonome .....	20
Figure I-12: Configuration de base d'une éolienne connectée au réseau .....	20
Figure I-13: Schéma de la connexion directe au réseau de l'éolienne avec la MAS à cage .....	21
Figure I-14: Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator.....	22
Figure I-15: Eolienne à MAS pilotée au stator. ....	23
Figure I-16: Eolienne à MADA pilotée au rotor.....	23
Figure I-17: Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne. ....	26
Figure I-18: Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	27
Figure I-19: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable .....	27

### Chapitre II

Figure II-1 : Système de conversion éolienne à base de la MADA.....	32
Figure II-2: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	33
Figure II-3: Schéma de principe de la MADA Simple .....	33
Figure II-4: Schéma de principe de MADA en cascade .....	34
Figure II-5: Schéma de principe de la MADA sans balais .....	34
Figure II-6: Machine à rotor bobiné classique connecté à deux sources triphasées. ....	36
Figure II-7: Fonctionnement de la MADA en mode moteur .....	38
Figure II-8: Fonctionnement de la MADA en mode générateur .....	38
Figure II-9: Schéma de la turbine éolienne.....	41
Figure II-10: Tube de courant d'air autour d'une éolienne .....	41
Figure II-11: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué au système.....	43
Figure II-12: Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de $\lambda$ pour différents $\beta$ . ....	44

Figure II-13: Modèle mécanique de la turbine éolienne.....	45
Figure II-14: Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.....	46
Figure II-15: Orientation des pales. ....	47
Figure II-16: Boucle de régulation de l'angle de calage des pales. ....	47
Figure II-17: Contrôle MPPT sans asservissement de vitesse de rotation.....	49
Figure II-18: Résultats de simulation de la commande MPPT sans asservissement de vitesse. ....	50
Figure II-19: Représentation de la MADA dans le système triphasé .....	51
Figure II-20: Transformation des variables statoriques et rotoriques.....	54
Figure II-21: Les tensions d'alimentations au stator et au rotor. ....	57
Figure II-22: Les courants statoriques triphasées avec zoom. ....	58
Figure II-23: Les courants rotorique triphasées avec zoom.....	58
Figure II-24: Les composantes du courant statoriques de la GADA (d-q).....	58
Figure II-25: Les composantes du courant rotoriques de la GADA (d-q).....	59
Figure II-26 : Les puissances actives et réactive statoriques de la GADA.....	59
Figure II-27: Les puissances actives et réactive rotoriques de la GADA.....	59
Figure II-28: Couple électromagnétique.....	60
Figure II-29: Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux. ....	61
Figure II-30: Schéma simplifié du Convertisseur Coté Réseau avec un filtre.....	62

### **Chapitre III**

Figure III-1 : Configuration de la DPC-C de la MADA.....	67
Figure III-2: La décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan ( $\alpha$ - $\beta$ ).....	68
Figure III-3: Compérateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive .....	69
Figure III-4: Elaboration du vecteur de tension rotorique à partir des états de commutation de l'onduleur.....	70
Figure III-5: États des interrupteurs pour chaque vecteur de tension. ....	74
Figure III-6: Représentation des vecteurs de tension dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) .....	74
Figure III-7: Décomposition d'un vecteur de tension de référence $V_{r\_ref}$ .....	75
Figure III-8: Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA.. ....	76
Figure III-9: Résultats de simulation de la DPC-SVM de la MADA pour vitesse du vent fixe.....	77
Figure III-10: Résultats de simulation de la DPC-SVM de la MADA pour vitesse du vent variable.....	79

**LISTE DES TABLEAUX****Chapitre I**

Tableau I-1: L'échelle de beaufort. ....	11
Tableau I-2: Avantages et inconvénients des éoliennes. ....	18
Tableau I-3: Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. ....	19
Tableau I-4: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. ....	24

**Chapitre II**

Tableau II-1 : Avantages et inconvénients de la MADA.....	39
---	----

**Chapitre III**

Tableau III-1 : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive).....	71
Tableau III-2: Suivi de la variation de la puissance réactive. ....	71
Tableau III-3: Table de mise à jour des secteurs. ....	72
Tableau III-4: Table généralisée des vecteurs de tension d'une commande par DPC. ....	72

**Annexes**

Tableau A-1: Paramètres de la turbine éolienne. ....	83
Tableau A-2: Paramètres de la MADA.....	83

## ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

### ABRÉVIATIONS

#### 1. EN FRANÇAIS

**MADA** : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

**GADA** : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

**SCEE** : Systèmes de Conversion d'Énergie Éolienne.

**BDV** : Boîte De Vitesse.

**CCM** : Convertisseur Coté Machine.

**CCR** : Convertisseur Coté Réseau.

#### 2. EN ANGLAIS

**DFIM** : Double Fed Induction Machine.

**DFIG** : Double Fed Induction Generator.

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking.

**AC** : Alternatif Current.

**MOSFET** : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

**IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor.

**DPC** : Direct Power Control.

**SVM** : Space Vector Modulation.

### SYMBOLES

#### • Symboles spécifiques à la turbine :

$P_m$	Puissance mécanique
$\rho$	Masse volumique de l'air
$V_v$	Vitesse du vent
$S$	Surface circulaire balayée par la turbine
$C_p(\lambda, \beta)$	Coefficient de puissance
$C_{p-max}$	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance
$\lambda$	Vitesse relative de l'éolienne ou Ration de Vitesse
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative optimale

$\beta$	Angle d'orientation des pales
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine
$\Omega_{méc}$	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
$R_t$	Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.
$P_{mt}$	La puissance mécanique totale disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur
$C_t$	Couple de la turbine
$J$	Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolienne
$J_t$	Moment d'inertie de la turbine.
$J_m$	Moment d'inertie de la génératrice
$C_f$	Couple de frottement visqueux
$G$	Gain du multiplicateur
<b>• Paramètres de modélisation de la MADA :</b>	
$w_s$ et $w_r$	Pulsations statorique et rotorique de la MADA.
$R_s, R_r$	Résistances statorique et rotorique.
$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ et $I_{ra}, I_{rs}, I_{rs}$	Courants statoriques et rotoriques des phases a, b et c.
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ et $V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$	Tensions simples statoriques et rotoriques des phases a, b et c.
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$ et $\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	Flux respectivement statoriques et rotoriques des phases a, b et c
$L_s, L_r$	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques
$M_s$ et $M_r$	Inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques
$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$ et $V_{rq}$	Tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$ et $I_{rq}$	Courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$ et $\varphi_{rq}$	Flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
$\theta_s, \theta_r$	Angle électrique statorique, rotorique.
$P_r, Q_r$	Puissance active et réactive rotorique.
$P_s, Q_s$	Puissance active et réactive statorique.

---

# **INTRODUCTION**

# **GÉNÉRALE**

---

## *Introduction générale*

Ces dernières années, avec les progrès technologiques dans divers domaines, la demande d'énergie a augmenté pour répondre aux besoins de l'humanité. Par conséquent, les efforts des scientifiques se sont concentrés sur l'extraction de l'énergie à partir des sources alternatives et propres d'éléments de la nature et sur le développement des systèmes de conversion, divers aspects du contrôle de son propriétés et efficacité. Il est également souhaitable que la ressource énergétique ait au moins deux facteurs importants : d'une part, l'énergie extraite est inoffensive pour l'environnement et, d'autre part, son utilisation économique est compétitive par rapport aux autres sources d'énergie.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables sont une bonne solution pour contribuer à répondre aux besoins énergétiques du monde, surtout l'énergie électrique. Parmi les meilleures énergies renouvelables possibles, on trouve l'énergie éolienne, elle est la source d'énergie renouvelable la plus fiable et la plus développée durant ces dernières décennies. Les facteurs qui ont contribué de plus en plus au développement des systèmes éoliens sont les progrès rapides de l'industrie de l'électronique de puissance qui est au cœur des systèmes éoliens, le soutien des institutions gouvernementales et la sensibilisation croissante de la population aux énergies renouvelables [8].

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe [3], [10], [25].

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique [1], [33].

La stratégie de commande adoptée pour l'ensemble MADA associée aux convertisseurs statiques joue un rôle important dans l'amélioration des performances du système éolien en termes de production d'énergie électrique de bonne qualité. A cet effet, la technique de contrôle (DPC) est abordée dans cette étude.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et d'appliquer la Commande Directe de Puissance (DPC) d'une MADA intégrée à un système éolien. La structure de notre mémoire se décompose en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes éoliens. Où nous commencerons ce chapitre par l'histoire de l'énergie éolienne, son développement, et sa situation actuelle dans le monde à travers les dernières statistiques, et nous aborderons également son développement en Algérie. Puis nous mettons en évidence les principes physiques de transformation et les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et principes de fonctionnement, ainsi que les différents types de générateurs. La dernière partie, illustre les systèmes de régulation de puissance d'une éolienne, et nous passons à la production optimale d'énergie, aux systèmes de stockage.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation à partir de laquelle sont reposés les travaux de cette mémoire. En effet, à travers ce chapitre la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisés seront présentés dans le premier temps. Dans le second lieu, nous présenterons la modélisation et la simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur MADA (mode générateur GADA). Nous présenterons la modélisation des différents éléments constituant le système pour établir la commande associée. Ce chapitre présente également la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking), cette dernière repose sur le principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne pour chaque vitesse du vent. Une fois cette partie mécanique en fonctionnement, nous allons nous attacher à la génération d'électricité par la modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) et de son convertisseur statique qui alimente le rotor. Des résultats de simulation seront présentés dans l'objectif de vérifier la stratégie de contrôle MPPT et de valider le modèle de la génératrice utilisée.

Dans le dernier chapitre, nous étudierons et appliquerons la commande directe de puissance (DPC) à une machine asynchrone à double alimentation. Ce type de commande est basé sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à travers le convertisseur CCM. Les états de commutation du convertisseur sont sélectionnés à partir d'une table de commutation, ce dernier est alimentée par deux comparateurs à hystérésis dont les entrées sont les erreurs instantanées obtenues de la différence entre la valeur de référence et estimée de la puissance active et réactive ce qui représente la DPC classique (DPC-C). Pour surmonter les inconvénients de la DPC-C, tels que les ondulations des puissances et la fréquence de commutation variable, la DPC est combinée avec la technique MLI vectorielle (SVM).

Finalement, une conclusion générale vient clôturer les trois chapitres de ce mémoire.

**CHAPITRE I :**  
**Généralités sur les systèmes éoliens**

## I.1 INTRODUCTION

L'exploitation de l'énergie éolienne est actuellement l'une des sources d'énergie renouvelable les plus économiques et exploitables, avec un bon niveau de sécurité et de respect de l'environnement, outre les propriétés mécaniques des éoliennes, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante [1], [2]. Grâce à ces avantages que possède cette ressource énergétique, elle en a fait l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes à l'heure actuelle, ce qui a fait que de nombreux pays du monde, en particulier ceux qui ont ou n'ont pas de ressources énergétiques fossiles, se soucient d'un beaucoup sur cette ressource d'énergie renouvelable et propre et mobilisent leurs efforts pour en bénéficier également.

Dans ce premier chapitre, nous allons essayer de recueillir le plus possible de généralités sur les systèmes éoliens, en commençant par un bref historique de l'utilisation humaine de l'énergie éolienne ainsi que son évolution au fil des années, puis nous nous intéresserons à la situation actuelle de l'énergie éolienne en le monde suivi de son développement en Algérie, après cela nous mettons en évidence les principes physiques de transformation et les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et principes de fonctionnement, ainsi que l'étude de l'énergie cinétique éolienne et des différents types de générateurs. La dernière partie, illustre les systèmes de régulation de puissance d'une éolienne, et nous passons à la production optimale d'énergie, aux systèmes de stockage.

## I.2 Historique et développement de l'énergie éolienne

L'humanité utilise l'énergie éolienne depuis des millénaires pour remplir divers travaux par exemple: pour naviguer (voiliers), pour voler (cerfs-volants, parapentes), pour actionner des mécanismes (moulins, pompes à eau pour irriguer).

Tout au long de l'histoire, l'énergie éolienne a pris plusieurs stations pour son développement, Là où la première fois pour convertir l'énergie cinétique des masses d'air en énergie électrique remonte à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Poul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Vers les années 1950 **Johannes Juul** (élève de Poul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif. Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle. C'est principalement la première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle entre les années 1980 et 1986, débuté avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985 [3],[4] .

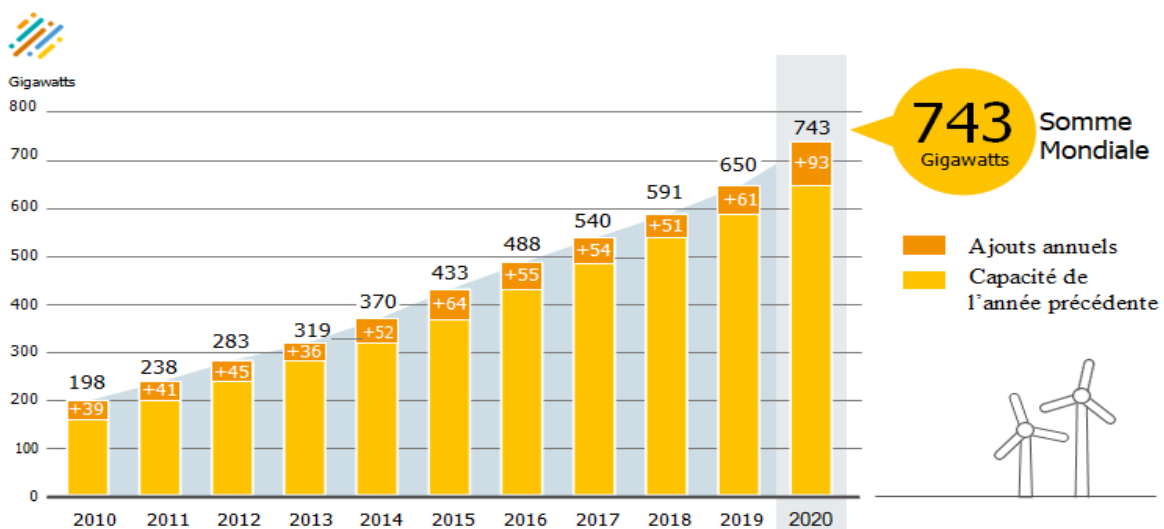
Aujourd’hui, les études portent sur l’amélioration de l’aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l’énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes ont été basées sur une génératrice asynchrone liée aux pâles par l’intermédiaire d’une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d’interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d’une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l’insertion de dispositifs de l’électronique de puissance entre la génératrice et le réseau, et d’autre part vers l’utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s’affranchir du réducteur de vitesse [5].

**I.3 La situation actuelle de l’énergie l’éolienne dans le monde**

L’énergie éolienne est en plein essor ces dernières années dans de nombreux pays du monde, dans cette partie nous allons présenter brièvement, la capacité mondiale installée de l’énergie éolienne (Statistiques de fin d’année 2020), l’aperçu général de la production d’énergie éolienne et en fin l’évolution du SCEE en puissance (mégawatt).

**I.3.1 Capacité mondiale installée de l’énergie éolienne (Statistiques de fin d’année 2020)**

L’énergie éolienne est l’une des sources d’énergie propres et renouvelables et est considérée comme une bonne alternative aux énergies non renouvelables, et c’est ce qui a fait que de nombreux pays du monde y prêtent une grande attention, car le taux de croissance de cette énergie est en plein essor et ce c’est ce que nous saurons grâce aux dernières statistiques. La figure I.1 présente les capacités éoliennes cumulées et annuelles installées dans le monde.



**Figure I-1: Capacité mondiale d’énergie éolienne et ajouts annuels, 2010-2020 [6].**

Le marché mondial de l'énergie éolienne est resté assez stable en 2020, avec une capacité installée d'environ 93 GW dans le monde (dont près de 86.9 GW à terre et 6,1 GW en mer), Ce marché record était supérieur de 45 % au précédent élevé, en 2015 (63,8 GW), et représente une augmentation de près de 53 % par rapport aux installations de 2019. Pendant plusieurs mois de 2020, les restrictions liées à la pandémie ont perturbé les chaînes d'approvisionnement, une grande partie de la main-d'œuvre éolienne indisponible, a entraîné les enchères reportées ou annulées et les investissements retardés, et retards ou annulations forcés de projets de construction dans de nombreux pays, en particulier dans le secteur à terre. Mais même avec défis sanitaires, économiques et politiques mondiaux, d'ici la fin de l'année la capacité éolienne mondiale totale a augmenté de 14 % par rapport à 2019 et approchait 743 GW (707,4 GW à terre et le reste en mer), ce était le double de la capacité en fonctionnement dans le monde seulement six ans plus tôt, fin 2014 [6].

### I.3.2 Aperçu général de la production d'énergie éolienne

En 2020, malgré le ralentissement économique que le monde a connu en raison de la pandémie, les capacités de production d'énergie éolienne ont connu un bond en avant, comme selon les dernières statistiques : La Chine a connu sa plus grande année pour les nouvelles installations, malgré retards liés à la pandémie dans les connexions au réseau au début de l'année. Les 52 GW estimés (48,9 GW à terre et 3,1 GW en mer) ajouté en 2020 concernait ce que le monde entier a installé en 2018, et presque doublé les installations de la Chine en 2019, et a apporté le capacité éolienne totale du pays à environ 288,3 GW, Les Amériques ont ajouté un record de près de 22 GW (+62% sur 2019), la plupart (72 %) étant installés aux États-Unis. le pays a mis en service 16,9 GW de nouvelles capacités en 2020, en hausse de 85 % sur 2019 installations, L'Europe a ajouté 13,8 GW de nouvelles capacités éoliennes en 2020(en baisse de près de 7 % par rapport à 2019), dont 21 % en exploitation en mer, portant le total de la région à près de 210,4 GW , La figure ci-dessous indique les dix premiers pays en termes de capacité éolienne installée cumulative et annuelle dans le monde [6].

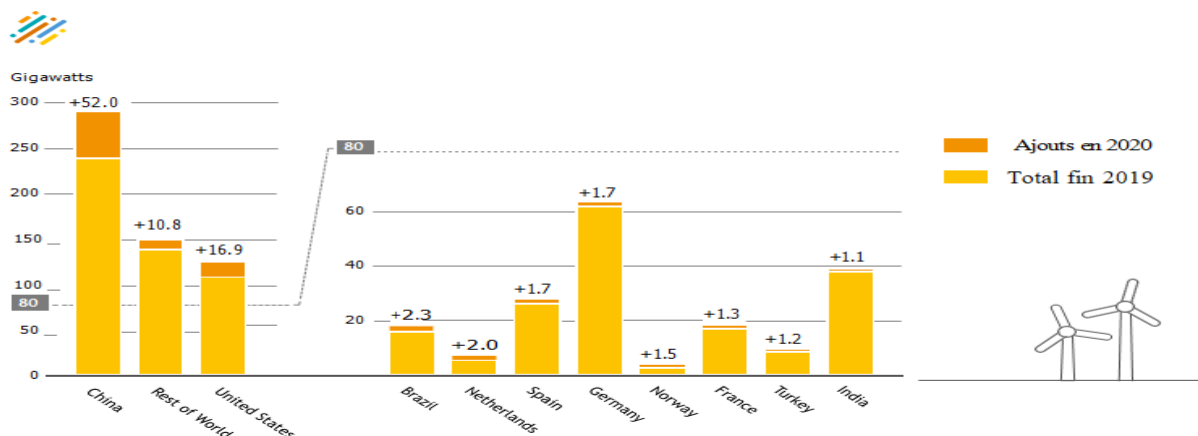
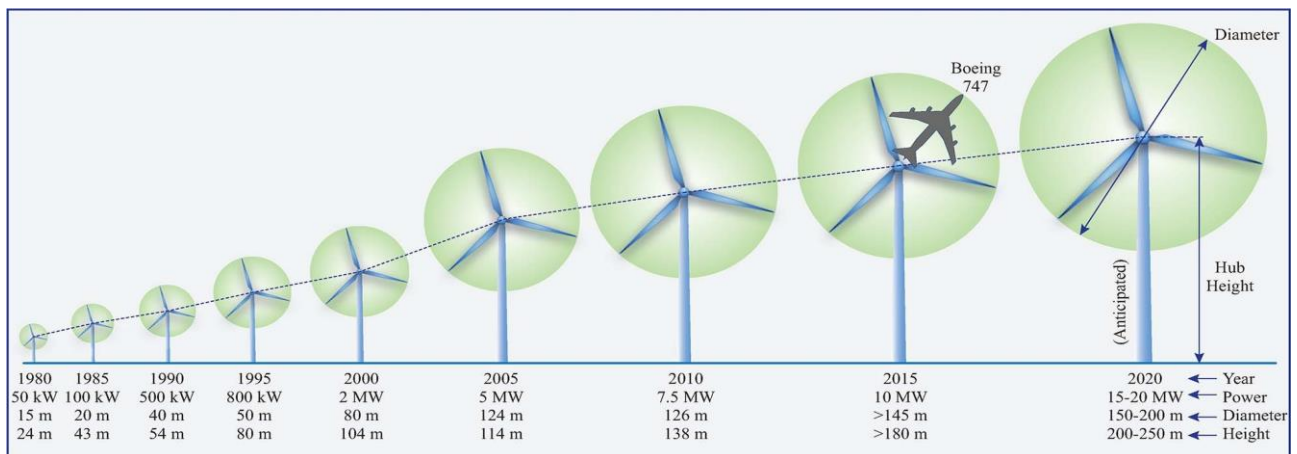


Figure I-2: Capacité de production d'énergie éolienne et ajouts, Top 10 pays, 2020 [6].

**I.3.3 Évolution du SCEE en puissance (mégawatt)**

L'industrie éolienne a connu au fil des ans de nombreuses avancées technologiques en termes de conception, de systèmes mécaniques, de générateurs, d'intégration avec des systèmes d'alimentation et théorie du contrôle. Alors que du point de vue de l'électrotechnique, les générateurs électriques et les convertisseurs de puissance électroniques ont été des composants clés dans le fonctionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne depuis le début de l'exploitation connectée au réseau dans les années 1980 [7]. La puissance d'une éolienne est proportionnelle au carré du diamètre du rotor et au cube de la vitesse du vent. Les grandes turbines peuvent capter plus puissance éolienne avec des coûts d'installation et de maintenance inférieurs à ceux d'un petit ensemble de turbines. En conséquence, la taille des éoliennes commerciales a considérablement augmenté au cours des 30 dernières années, comme le montre la figure I.3. La taille des turbines est passée de 50 kW en 1980 à 15-20 MW en 2020 [8].

L'étude de marché indique que le diamètre du rotor et les puissances nominales des éoliennes offshore (situées en mer) sont plus élevées par rapport au vent terrestre (situé à terre) turbines. En 2013, la taille moyenne des entreprises onshore et offshore éolienne sont rapportés comme 1.926 et 3.613 MW, respectivement. La tendance du marché indique également que 10– 20 MW Des turbines de seront opérationnelles dans un futur proche avec diamètres de rotor supérieurs à 150 m, soit environ deux fois la longueur d'un Boeing 747 [7]. La figure (I-3) représente l'évolution de la taille des turbines éoliennes (puissance nominale de sortie de la turbine, son diamètre et la hauteur de moyeu)[7].



**Figure I-3: Évolution de la taille des turbines éoliennes.**

**I.4 L'énergie éolienne en Algérie**

Sur le continent africain, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne ont fait l'objet d'une grande attention ces dernières années dans de nombreux pays du continent, car certains pays africains disposent d'un environnement propice à l'investissement dans l'énergie éolienne, et à cet égard, nous mentionnerons l'un des plus importants pays du nord pays africains, l'Etat algérien, où l'Algérie

dispose d'un potentiel éolien exceptionnel qui peut la placer devant le monde dans le domaine de l'énergie éolienne.

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Plusieurs autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Actuellement, la capacité éolienne totale installée en Algérie est négligeable malgré les gisements éoliens disponibles [9]. Cependant un premier bon pas a été déjà fait par le groupe Sonelgaz en 13 décembre 2010, qui a confié la réalisation de la première ferme (parc) éolienne de Kabertène à Adrar d'une puissance totale de 10MW (Figure I-4). Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014. Le parc éolien d'Adrar est considéré comme le premier du genre au niveau national, d'une capacité de 10 mégawatts, implanté sur une superficie de 30 hectares dans la région de Kabertin, à 72 kilomètres au nord de la wilaya d'Adrar. Les turbines utilisées dans ce parc sont de type « G52/850/50-60Hz » fournies par le constructeur espagnol GAMESA, équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) [10].



**Figure I-4: La ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) [10].**

Par ailleurs, dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables, le ministère de l'énergie et des mines prévoit d'installer sept centrales éoliennes supplémentaires d'une capacité totale de 260 MW à moyen terme pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales [9].

Dans le domaine de la production d'énergies renouvelables en Algérie, la ressource éolienne occupe la deuxième place (le soleil est la ressource la plus présente) et cela est principalement dû à la très grande diversité de terrain et de climat d'une région à l'autre. Mais dans ce domaine, et compte tenu des capacités exceptionnelles dont bénéficie l'Algérie, il est attendu que l'Algérie devienne un pionnier dans ce domaine au niveau africain et mondial. Selon un rapport publié par l'agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) intitulé " Statistiques de capacité renouvelable 2017", l'Algérie se classe au 18e rang du classement de la production d'énergies renouvelables en Afrique avec une capacité installée de 536 mégawatts [11]. Cette position ne fait que refléter le début des investissements dans ce domaine, et l'Algérie envisage d'entrer dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables et d'atteindre d'ici 2030 environ 40% de la production nationale d'électricité à partir de sources renouvelables [10].

## **I.5 Principes physiques de la conversion d'énergie éolienne**

Avant de procéder à l'étude de tout système de conversion d'énergie, quel que soit son type, le chercheur ou les personnes intéressées par cette étude doivent connaître et comprendre les différents principes physiques sur lesquels repose ce système. En commençant par le concept et les caractéristiques de la source primaire d'énergie et du milieu propice à son étude, en passant par le principe de transmutation, et enfin jusqu'à la forme désirée. Dans cette partie nous allons présenter, quelques notions sur le vent (direction, vitesse,..), l'énergie éolienne (principe de conversion, principaux composants des éoliennes, leur classification et différents types), et enfin les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

### **I.5.1 Quelques notions sur le vent**

Le vent est une forme d'énergie renouvelable. Si on veut donner une idée générale du vent, alors on peut dire qu'il s'agit d'une transmission des masses d'air due à la différence de pression atmosphérique (augmentation de la température dans certaines zones de la planète et refroidissement dans d'autres). Le vent est une grandeur aléatoire et intermittente et dépend d'une combinaison de facteurs tels que la situation géographique, les saisons, la température et l'altitude. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse [10].

#### **I.5.1.1 Direction et vitesse du vent**

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Cependant, aux latitudes moyennes et élevées, sa direction change en raison de la rotation de la Terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares plutôt que perpendiculaire à celles-ci. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par

rapport aux précédents [1], [10]. Moyens de mesure, le vent est mesuré avec un anémomètre (mesure sa vitesse) complété par une girouette (indique la direction de vent, qui permet à la nacelle de rester orientée face au vent).

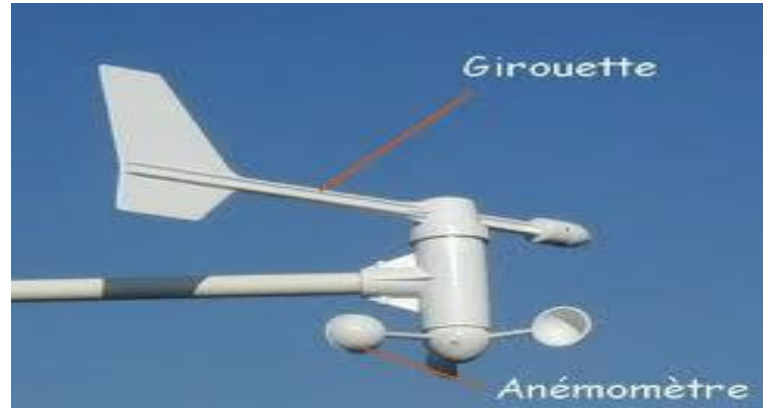


Figure I-5: Ensemble Anémomètre-Girouette [1].

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au (tableau I-1) [10]:

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Pression sur surface plan (daN/m <sup>2</sup> )	Description générale
0	0 à 0.4	< 1	-	Calme
3	3.5 à 5.5	12 à 19	3.2 (5m/s)	Petite brise
4	5.5 à 8	20 à 28	6.4 (7m/s)	Jolie brise
6	11.4 à 13.9	39 à 49	22 (13m/s)	Vent frais
8	17.4 à 20.4	62 à 74	52 (20m/s)	Coup de vent
11	28.4 à 32.5	103 à 117	117 (30m/s)	Violente tempête
17	54.1 à 60	202 à 220	470 (60m/s)	Cyclone

Tableau I-1: L'échelle de beaufort.

En fait, pour implanter un parc éolien, la prospection des emplacements potentiels est la première tâche à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets des sites supposés doivent être menés pendant au moins un an pour déterminer si le parc peut ou non être établi. Il faut non seulement connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variance avec l'altitude. Le vent le plus intéressant, qui donne finalement le plus de puissance annuelle, est le vent régulier avec une vitesse de 6-10 m/s [10].

### I.5.1.2 L'énergie disponible dans le vent

Dans le domaine de la physique, si l'on considère une masse d'air,  $m$ , qui se déplace à une vitesse  $v$ , alors l'énergie cinétique de cette masse est obtenue par :

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

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface  $S$ , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (I.2)$$

Avec :

$S$ : la surface d'aire balayée par les pales ( $m^2$ ) ;

$\rho$ : la masse volumique de l'air, en général elle est égale  $1.225 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ \text{C}$ ;

$v$ : vitesse du vent (m/s).

Quand même, cette puissance ne peut jamais être entièrement extraite par le dispositif de conversion (aérogénérateur), en raison de la vitesse non nulle des masses d'air derrière lui [10].

### I.5.1.3 Expression du vent en un point fixe

La vitesse du vent en un point  $V_0(t)$  peut-être décomposée en une somme d'une composante moyenne  $V$  (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations [1]:

$$V_0(t) = V + V(t) \quad (I.3)$$

Avec

$V$  : Vitesse moyenne du vent.  $V(t)$  : Les fluctuations (turbulences).

## I.5.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit pas d'émissions dans l'atmosphère ni de déchets radioactifs. Cependant, Elle est aléatoire dans le temps et le captage reste très complexe, nécessitant de grands mâts et pales (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement ouvertes pour éviter le phénomène de turbulences [12].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [1], [13], [14].

### I.5.2.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne

Lorsque la vitesse du vent mesuré par l'anémomètre sera suffisante, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min pour une machine à 2 paires de pôles, qui est la vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau

électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à une vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes jusqu'au point de raccordement au réseau public [1], [15].

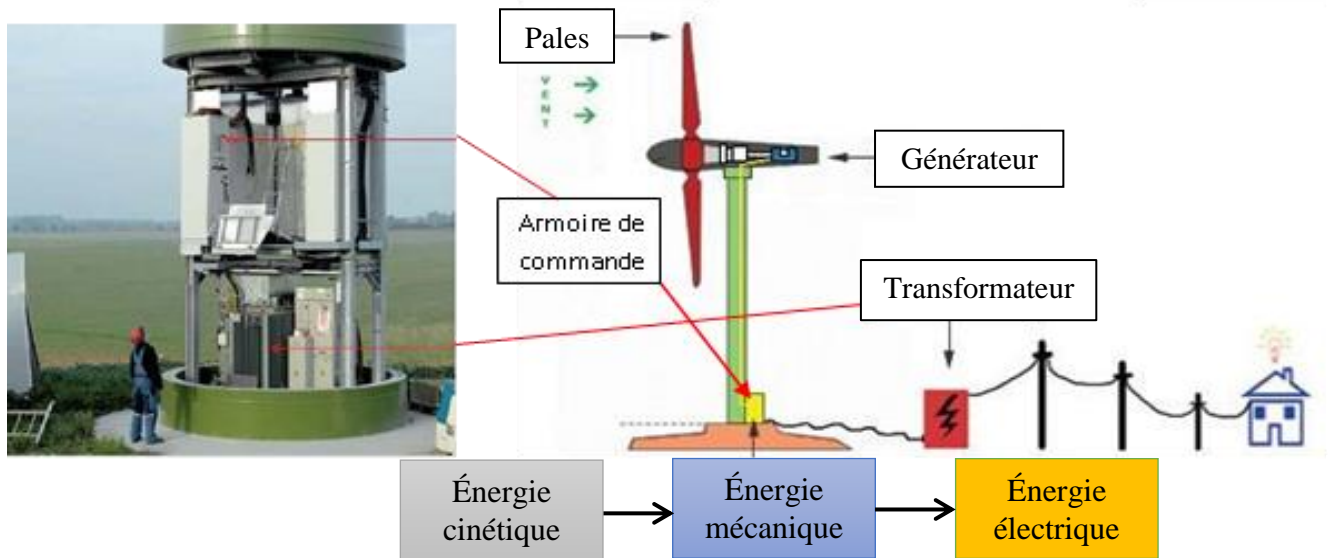


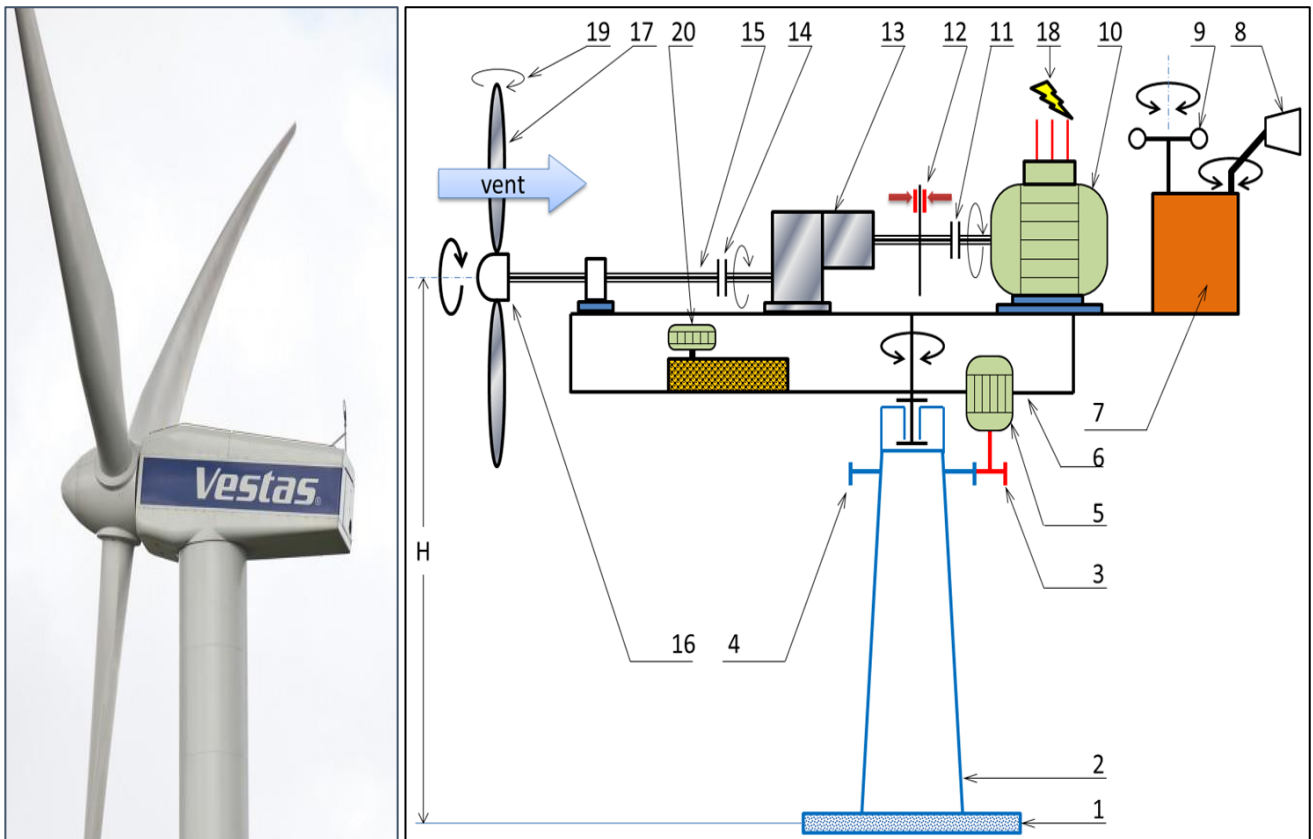
Figure I-6: Principe de conversion de l'énergie éolienne [1].

I.5.2.2 Principaux composants d'une éolienne

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus courantes en raison de leurs performances supérieures à celles des éoliennes à axe vertical.

La désignation des éléments présente dans la figure (I-7.b) [16] :

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour (mat)	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique



a) Photo réel (Vestas V52-850 kW) [17]

b) Schéma synoptique [16]

**Figure I-7: Principaux composants de l'éolienne à axe horizontal.**

Généralement, une éolienne est constituée de trois éléments principaux : Le mât (tour), la nacelle et le rotor.

- **Le mât :** C'est un élément utilisé pour supporter l'ensemble (rotor + nacelle), généralement constitué par un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et un bon niveau pour capter l'énergie produit par le vent. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur. A l'intérieur du mât (tour) se trouvent les éléments de contrôle, les appareillages de raccordement au réseau de distribution, les câbles de transmission d'énergie électrique et une échelle d'accès à la nacelle [11].
- **La nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques servant à relier le rotor éolien à la génératrice électrique. Elle comprend [11] :
  - Un arbre : qui relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
  - Un multiplicateur : Permet de adapté la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence

lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne et Le frein à disque permet aussi d'arrêter le système en cas de surcharge.

- Un anémomètre: Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.
  - Une girouette : indique la direction de vent, qui permet à la nacelle de rester orientée face au vent.
  - Le générateur : Son rôle principal est de convertir l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Le générateur qui est généralement une machine synchrone, asynchrone ou asynchrone a double alimentation.
  - Système de refroidissement : Ce système permet d'éviter l'échauffement du l'ensemble (génératrice - multiplicateur), par ventilateurs et radiateurs d'eau ou d'huile.
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit, On distingue deux types de rotors [14]:
- **Rotors à vitesse fixe** : sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ainsi, ce système allie ainsi simplicité et faible coût.
  - **Rotors à vitesse variable** : sont souvent moins chers car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Cependant, l'interface de l'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est essentielle. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

### I.5.2.3 Critères de classification des éoliennes

Dans l'industrie actuelle de l'énergie éolienne, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont classés suivant divers facteurs. Les facteurs de classification les plus importants sont basés sur les éléments suivants [8]:

1. Puissance électrique de sortie nominale de la turbine (faible, moyenne et forte puissance),

2. Alignement de l'arbre de la turbine par rapport au sol (axe vertical et horizontal),
3. Type d'application pour alimenter la puissance électrique de sortie de la turbine (autonome et connectée au réseau),
4. La vitesse de fonctionnement du générateur éolien par rapport aux différentes vitesses du vent (vitesse fixe et variable),
5. Le type d'accouplement mécanique entre la turbine et l'arbre du générateur (avec ou sans multiplicateur).

#### I.5.2.4 Différents types d'éolienne

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

##### I.5.2.4.1 Eoliennes à axe horizontal

Ce type est actuellement le plus courant dans l'industrie éolienne en raison de son rendement énergétique élevé et de sa faible exposition aux contraintes mécaniques. Ces éoliennes sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Le nombre de pales utilisées pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3 pales. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [1],[3].



a) Eoliennes on shore



b) Eoliennes off shore

**Figure I-8: Eoliennes à axe horizontal [1].**

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal, comme le montre dans la figure (I-9) [18] :

- **Amont** : Le vent souffle à l'avant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est dirigé dans la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

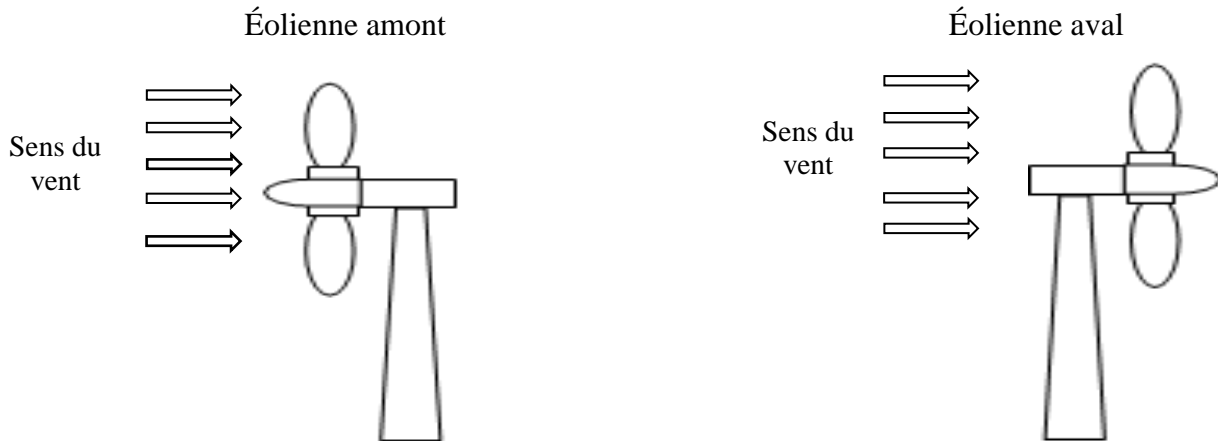
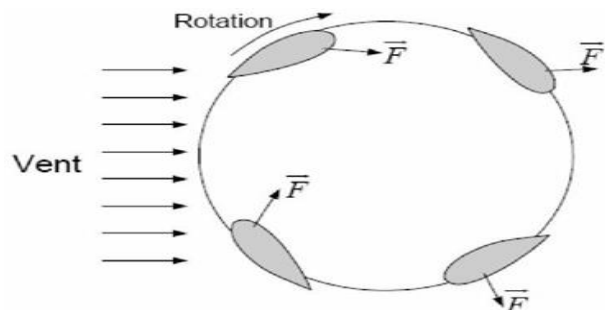


Figure I-9: Configuration à axe horizontal.

1.5.2.4.2 *Eoliennes 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 [19]. Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, de sorte que les organes de commande et le générateur sont placés au niveau du sol, ce qui facilite les opérations de maintenance. Cependant, son efficacité est faible, car les vents sont faibles près du sol et le mât est soumis à de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, les fabricants d'éoliennes d'aujourd'hui préfèrent les éoliennes à axe horizontal [18].



a) Structure Darrieus.



b) Structure de Savonius.

Figure I-10: Eoliennes à axe vertical [1].

- **Le rotor Darrieus :** Leur fonctionnement est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure (I-10.a)), est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [18].
- **Le rotor de Savonius :** (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure (I-10.b)) [1].

**1.5.2.4.3 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical**

La comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical est montrée dans le tableau (I-2).

Avantages et Inconvénients	Type d'éolienne	
	Eolienne à axe horizontal	Eolienne à axe vertical
<b>Les Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement plus élevé de la conversion de l'énergie éolienne;</li> <li>- Rotor positionné en hauteur donnant accès à des vents élevés [1];</li> <li>- Régulation de la puissance par le décrochage et le contrôle de l'angle d'inclinaison à des vitesses du vent élevées [1];</li> <li>- Elles sont équipées d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent;</li> <li>- La position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [19].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible coût d'installation et entretien plus facile [20];</li> <li>- L'éolien reçoit le vent de n'importe quelle direction [1];</li> <li>- Les organes de commande et le générateur sont au niveau du sol donc facilement accessibles [12], [19];</li> <li>- Ne nécessite pas de dispositif d'orientation du rotor dans la direction de vent comme pour les éoliennes à axe horizontal [18], [20].</li> </ul>
<b>Les Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût d'installation plus élevé [12];</li> <li>- Un mât plus fort pour supporter le poids lourd de la nacelle [1].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance [1];</li> <li>- doivent être entraînées au démarrage [18];</li> <li>- La surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [19];</li> </ul>

Tableau I-2: Avantages et inconvénients des éoliennes.

## I.5.2.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

ÉNERGIE ÉOLINNE	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre [10] ;</li> <li>– C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie [26] ;</li> <li>– Peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés) [25] ;</li> <li>– Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [14] ;</li> <li>– Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement [26].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent) [25];</li> <li>– Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs [14];</li> <li>– Le Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [26] ;</li> <li>– Les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars Météorologiques [10].</li> </ul>

Tableau I-3: Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

## I.6 Modes de fonctionnement de l'éolienne

Pour générer la puissance éolienne, différents types de machines électriques sont utilisés et pour la sélection, il existe des facteurs techniques et économiques qui déterminent le type de machine pour chaque application. La génératrice peut être connectée directement ou indirectement au réseau. Les générateurs que l'on trouve couramment dans les éoliennes sont présentés ci-dessous. Avec les éoliennes, deux possibilités s'offrent au particulier concernant la production d'électricité : le raccordement au réseau électrique et donc la revente de l'électricité ou l'utilisation d'un système autonome pour l'utilisation directe de l'énergie produite [20].

## I.6.1 Éolienne autonome

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissance allant de quelques dizaines de watts à quelques dizaines de kilowatts pour des appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les éoliennes plus petites sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météorologiques. Les plus grosses éoliennes sont utilisées dans des productions destinées à alimenter en énergie électrique des villages ou des chalets isolés [1], [10].

Les points communs entre toutes ces éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, qui est généralement constituée de batteries d'accumulateur [1],[10],[21].L'éolienne charge les batteries par la tension continue produite soit directement par une génératrice à courant continu pour les plus faibles puissances, soit par une génératrice de type synchrone, à aimants ou bobinée, via un pont redresseur et une électronique plus ou moins élaborée pour réguler leur charge. La tension continue des batteries est ensuite utilisée soit directement pour l'éclairage en tension continue ou alors mise en forme par un onduleur pour obtenir une alimentation sinusoïdale 50 Hz permettant l'utilisation de tous les appareils électriques classiques [21].

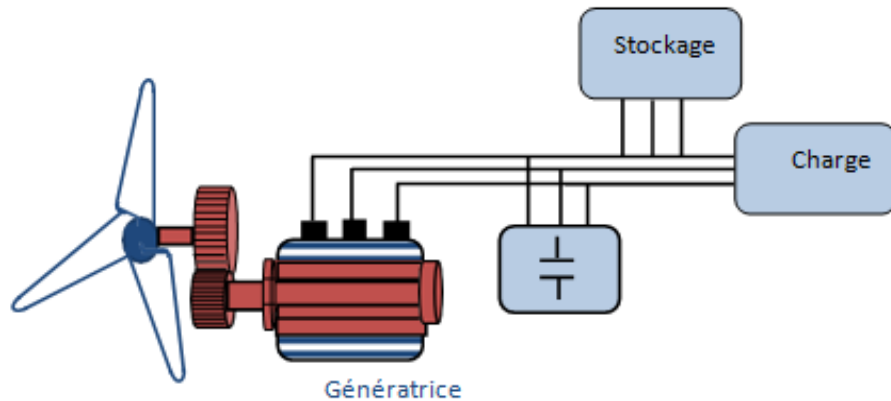


Figure I-11: Eolienne fonctionne en mode autonome [20].

**I.6.2 Eolienne connectée au réseau**

Les éoliennes connectées au réseau de distribution fonctionnent souvent pour tester le potentiel éolien du site considéré appartenant à des industriels ou des particuliers qui produisent leur propre électricité et revendent le surplus au distributeur local [10]. La figure (I-12) ci-dessous représente les principaux composants de l'éolienne connectée au réseau, se compose de plusieurs composants qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique de manière contrôlable, fiable et efficace [7]. Les éoliennes connectées au réseau peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celles-ci peuvent être fixes ou variables.

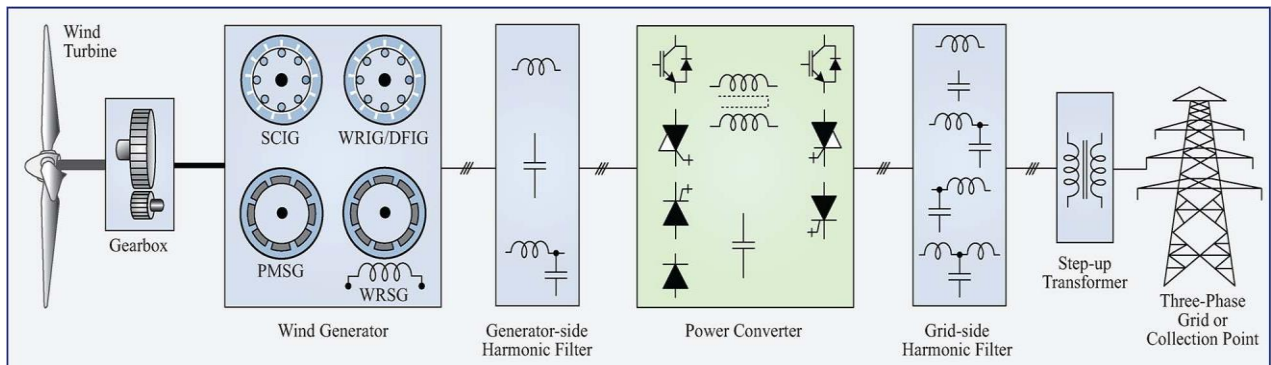


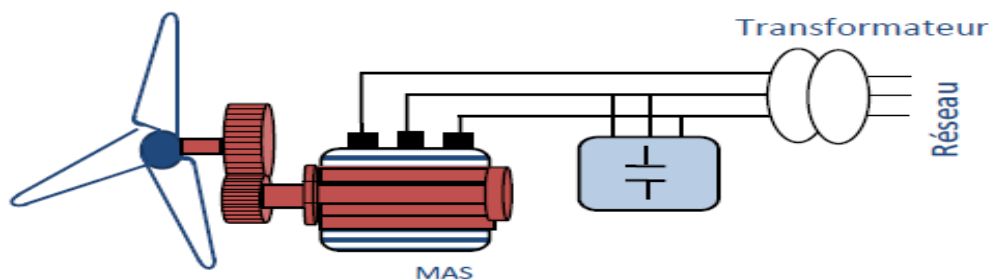
Figure I-12: Configuration de base d'une éolienne connectée au réseau [7].

### I.6.2.1 Vitesse fixe

L'éolienne à vitesse fixe est le système où la vitesse de l'éolienne reste fixe pendant toute la période de fonctionnement. Le système de contrôle des rotors de turbine est mis en œuvre de manière à maintenir la vitesse de rotation constante quel que soit le vent. Généralement, les turbines anti-décrochage fonctionnent à des vitesses fixes. La quantité d'énergie produite reste constante [22]. Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevées [20].

#### I.6.2.1.1 Machine asynchrone à cage

Les machines asynchrone à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé, elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi connues par leur sécurité de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues. Grâce à ces avantages, les générateurs asynchrones sont les plus populaires dans l'industrie des générateurs éoliens à vitesse fixe [20].



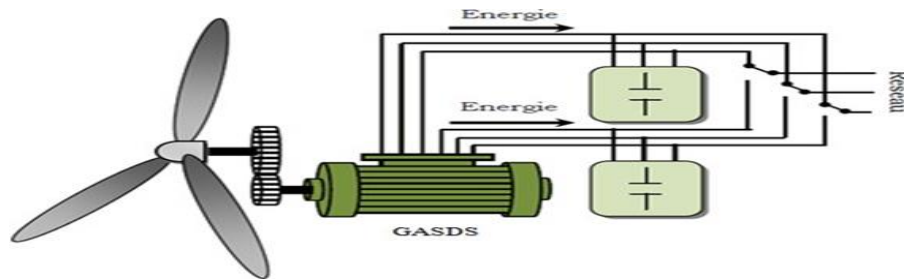
**Figure I-13: Schéma de la connexion directe au réseau de l'éolienne avec la MAS à cage [20].**

Pour connecter l'éolienne au réseau dans cette configuration, on procède en deux temps : le premier temps consiste à connecter les enroulements statoriques au réseau par l'intermédiaire de résistances afin de limiter les courants statoriques transitoires. Durant cette phase, les pales de l'éolienne sont orientées de manière à ce que le couple fourni soit nul. Après quelques secondes, les résistances sont éliminées (elles sont court-circuitées) puis le système de régulation oriente les pales pour accroître la puissance. Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator [1], [20].

#### I.6.2.1.2 Machine asynchrone à double stator

La machine asynchrone à double stator se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés décalés d'un angle électrique de  $30^\circ$ , et d'un rotor à cage d'écureuil. L'un des enroulements est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée de forte puissance et de petit nombre de paires de pôles pour les vitesses du vent les plus élevées; un second enroulement appelé enroulement d'excitation de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Cette topologie possède deux points de fonctionnement. Les

perturbations sonores de la machine pour des vents faibles sont diminuées du fait que l'orientation des pales est amoindrie. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre ce qui rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [1].



**Figure I-14: Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [1].**

### I.6.2.2 Vitesses variables

Un système d'éolienne à vitesse variable fonctionne à une vitesse de vent variable et ajuste la rotation des pales de la turbine en fonction de la variabilité de la vitesse du vent. Comme la vitesse du vent varie généralement tout au long de l'année et même à différents moments de la journée. Le système de contrôle mis en œuvre ici modifie la vitesse de la turbine pour maximiser la production d'énergie. Cela nécessite une technologie de contrôle complexe et avancée à mettre en œuvre dans l'aube de turbine et même également dans la partie génératrice. Ici, le système de contrôle de l'angle de pas est utilisé dans le rotor de la turbine pour contrôler la rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent. Un système de convertisseur d'électronique de puissance est fixé au système. En fonction de la puissance nominale du convertisseur d'électronique de puissance, un système à pleine échelle (où le stator est connecté au réseau via un convertisseur d'électronique de puissance) ou à échelle partielle (où le rotor est connecté au réseau via le convertisseur et le stator est directement connecté) peut être mis en œuvre. Les avantages de ce système en général sont la capacité de fonctionner à des vitesses de vent variables et un plus grand contrôle sur le système. Il peut fonctionner dans une large plage de vitesse (environ 30 %) autour du niveau de vitesse synchrone, ce qui permet une plus grande production d'énergie. L'éolienne à vitesse variable est la tendance récente et est actuellement le type sélectionné pour de nombreux projets. D'autres recherches sont en cours pour le rendre plus efficace [22]. Parmi les génératrices utilisées dans ce type d'éoliennes : Génératrice asynchrone à cage, Génératrice asynchrone à double alimentation.

#### I.6.2.2.1 Eolienne à machine asynchrone à cage

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique (figure (I-15)) [1].

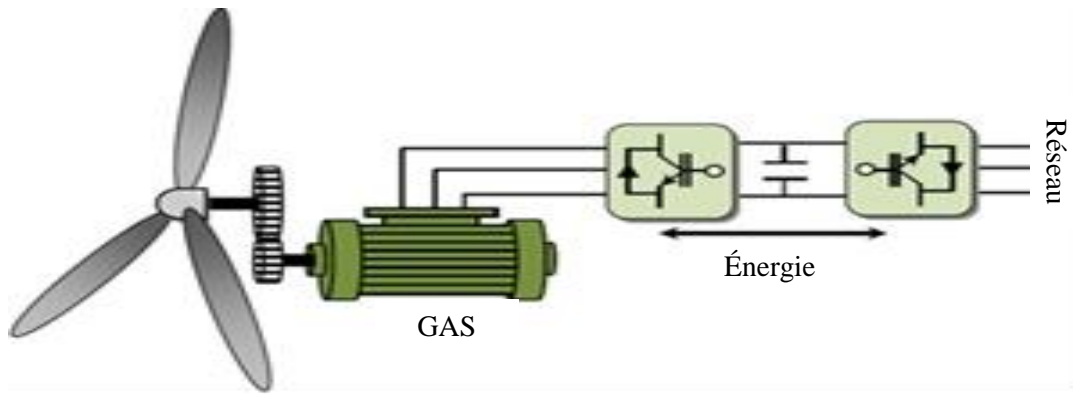


Figure I-15: Eolienne à MAS pilotée au stator.

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité sur la figure I-15). Les pales de la turbine éolienne sont commandable pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes [23].

**1.6.2.2 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation**

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique. Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la première configuration [23].

La MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants. C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en génératrice. Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, mode hypo-synchrone une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près [20].

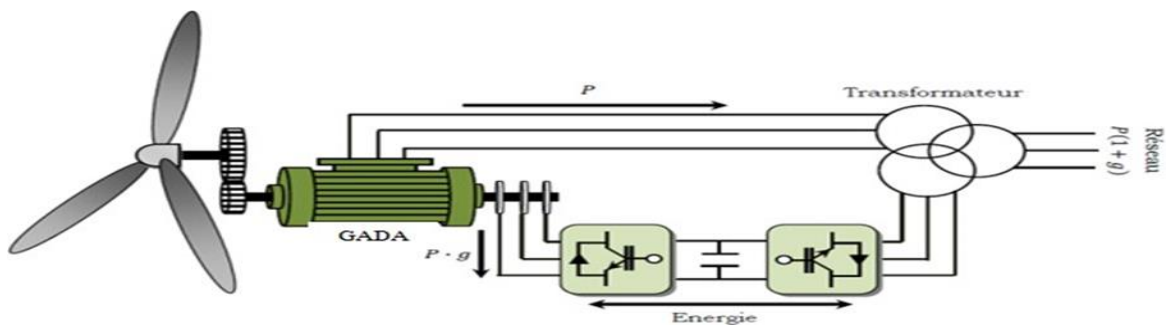


Figure I-16: Eolienne à MADA pilotée au rotor [1].

Dans ce qui suit, nous mettrons en évidence les différentes configurations de machine asynchrone à double alimentation :

- Machine Asynchrone à Double Alimentation à Energie Rotorique Dissipée.
- MADA -Structure de Kramer.
- MAS à double alimentation- Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur.
- MADA – Structure de Scherbius avec Convertisseurs MLI.

**I.6.2.3 Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe et des éoliennes à vitesse variable**

	Avantages	Inconvénients
<b>Eolienne à vitesse fixe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Construction robuste et simple [1] ;</li> <li>– Plus grande fiabilité [19], [24] ;</li> <li>– Moins cher [24] ;</li> <li>– Simplicité d’implantation [1], [19] ;</li> <li>– Pas besoin de système électrique de commande [1], [19], [25].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rendement très faible pour les moyens et faibles vents [25] ;</li> <li>– En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n’est pas atteint [19] ;</li> <li>– Génération de plus de stress mécanique sur la boîte de vitesses aux vitesses de vent variable [1] ;</li> <li>– Perte de control de la puissance réactive [25].</li> </ul>
<b>Eolienne à vitesse variable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Une meilleure exploitation de l’énergie du vent [19] ;</li> <li>– rendement énergétique élevé [25] ;</li> <li>– Capacité de fournir la puissance à une tension et fréquence constante [1];</li> <li>– La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques [19] ;</li> <li>– Contrôle de puissance active et réactive fournie au réseau [1] ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût [1], [19] ;</li> <li>– Convertisseur de puissance « complexe » [19], [24] ;</li> <li>– Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA [1], [19].</li> </ul>

**Tableau I-4: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.**

**I.7 Régulation de la puissance d’une éolienne**

Pour améliorer et augmenter la production d’électricité par l’utilisation de système de conversion de l’énergie éolienne, il est conseillé de renforcer ces systèmes nombreux systèmes de commande au niveau de la partie mécanique ou électrique, développés pour maximiser la conversion d’énergie et aussi pour la protection.

### I.7.1 Régulation mécanique

En réalité, la turbine éolienne est conçue pour fournir une puissance suffisante sur son arbre, appelant la puissance nominale  $P_n$ . Cette puissance  $P_n$  est obtenue à partir de la vitesse  $V_n$  (vitesse nominale) du vent relatif : Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$ , les paramètres de la turbine doivent évoluer afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. C'est l'objectif nécessaire de la régulation mécanique, d'une part de protéger l'éolienne contre les vents forts, et d'autre part limitant la puissance extraite par la turbine éolienne.

A côté de la vitesse nominale  $V_n$  qui varie entre 11m/s et 15m/s en fonction des technologies, on indique aussi [10]:

- La vitesse de démarrage  $V_d$  (cut-in), à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.  $V_d$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance, Selon les constructeurs,
- La vitesse maximale du vent  $V_m$  (cut-off), pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

On peut définir quatre zones de fonctionnement, comme le montre sur la figure (I-17) [10]:

- **La zone I** : Correspond aux faibles vitesses du vent.
- **La zone II** : Dans cette zone, la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- **La zone III** : Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la vitesse de rotation de la turbine à une valeur maximale pour limiter la puissance  $P$  fournie par l'éolienne égale à la puissance nominale  $P_n$ , afin d'éviter les surcharges. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.
- **La zone IV** : Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale autorisée par l'éolienne  $V_m$ , les pales de l'éolienne sont recouvertes de pales ( $\beta = 90^\circ$ ), afin de ne pas endommager la partie mécanique de l'éolienne.

Ils existent plusieurs systèmes de régulation pour contrôler la vitesse de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent. On peut citer trois systèmes de commande aérodynamiques sont intéressants pour le contrôle des éoliennes de grande puissance [10] :

- Contrôle par angle de calage variable « pitch control »,
- Contrôle par décrochage aérodynamique passif « passive stall control »,
- Contrôle par décrochage aérodynamique actif « active stall control ».

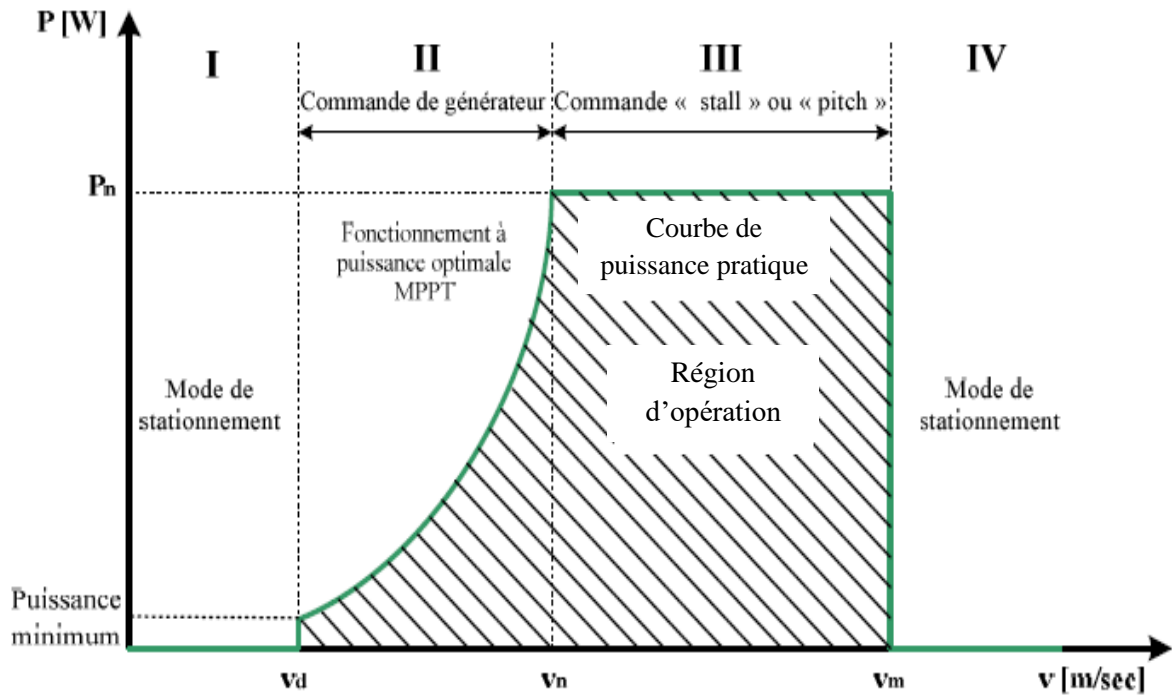


Figure I-17: Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne.

### I.7.2 Régulation électrique (contrôle MPPT)

L'MPPT (en anglais Maximum Power Point Tracking) est défini comme une méthode d'optimisation qui permet de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent. Ces systèmes pour obtenir ce point de puissance maximale utilisent différents moyens. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. Le maximum est constamment recherché et ainsi les éoliennes s'adaptent à chaque changement de vent pour être en configuration d'extraction de puissance maximale. Ces systèmes offrent également des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient également important et peut endommager les éoliennes [10].

Les caractéristiques de la figure (I-18) représentent les allures des puissances théoriquement disponibles au niveau d'une turbine éolienne de grande puissance en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes vitesses du vent. Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1900tr/min sur la figure I.18) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour atteindre ces maxima, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1200 et 2000tr/min pour cet exemple (courbe de réglage MPPT) [3].

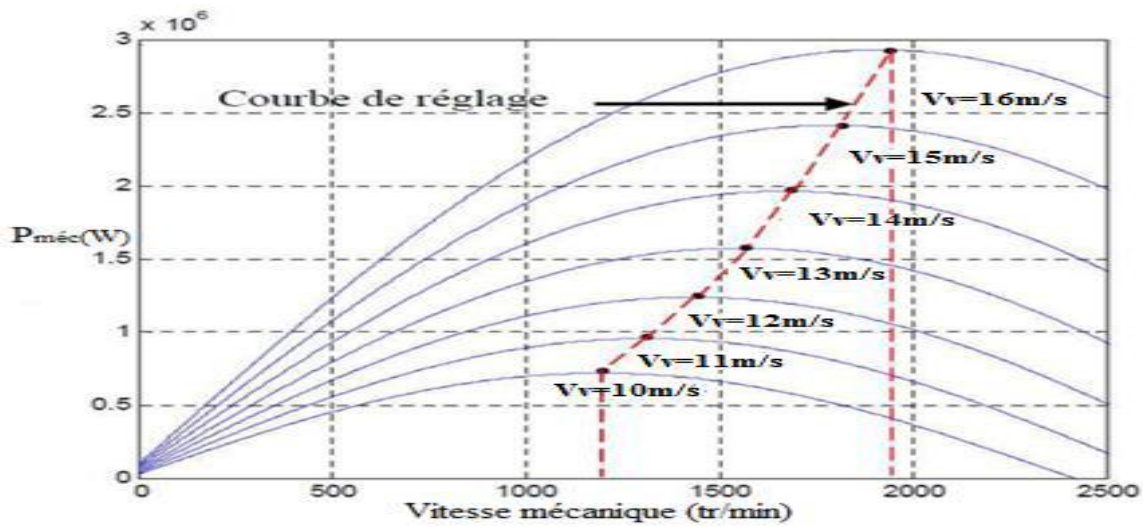


Figure I-18: Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Alors, l'importance de cette méthode est, d'une coté, de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre coté de délimiter la puissance.

**I.8 Production optimale d'énergie**

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure (I-19). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné, vitesse du vent fixe, on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de  $\lambda$  donnée appelée  $\lambda_{opt}$ . La vitesse de rotation optimale  $\Omega_{opt}$  résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} V_v \tag{I.4}$$

La caractéristique correspondante à cette relation est donnée sur la zone II de la figure (I-19) [3]. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts [13].

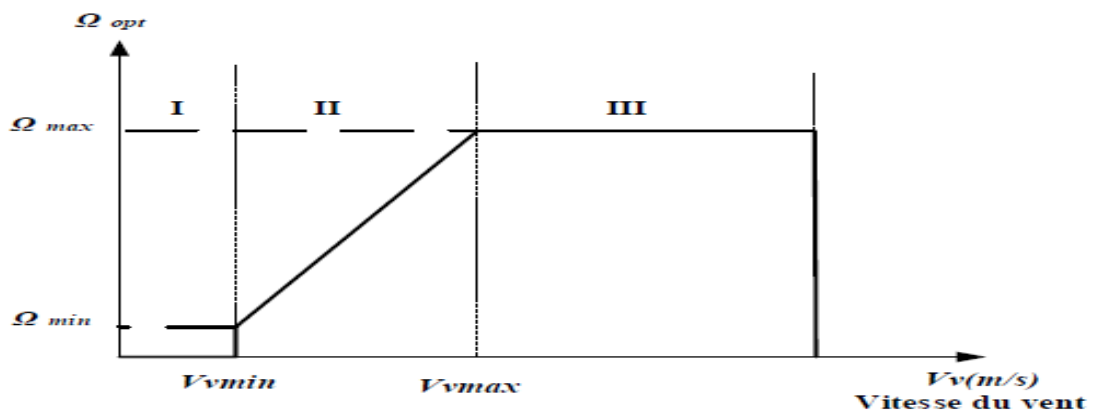


Figure I-19: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable [3].

## I.9 Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne

Dans cette partie nous allons concerner sur les types de stockage qui peuvent être associés à une éolienne. L'objectif est double: d'une part : stocker l'énergie électrique dans les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer dans les périodes de vent plus faible et d'autre part lisser au maximum la puissance produite par l'ensemble éolienne plus stockage. Cependant, L'électricité ne se stocke pas facilement et nécessite une conversion en une autre forme d'énergie (chimique, mécanique, thermique, magnétique, etc...). Le rendement total du stockage est donc très variable en fonction des stratégies choisies [21]. Aussi, à ce jour, des recherches sont en cours afin de stocker l'énergie électrique de manière idéale répondant aux aspirations souhaitées. Il existe deux types de stockage, l'un à court terme et l'autre à long terme. Ils appliquent différentes méthodologies et contrôles.

### ➤ Stockage à court terme

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à une dizaine de minutes. Il existe principalement des systèmes de stockage inertiel mais le développement récent de nouveaux composants comme les super-capacités permet d'envisager des solutions de stockage électrochimique [14]. Les systèmes inertiels de stockage d'énergie sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides. L'éolienne devient alors un système de stockage et si nécessaire, un volant d'inertie peut lui être ajouté. L'originalité de cette pièce réside dans le fait que l'énergie éolienne captée par la turbine est une source d'énergie, et elle ne peut être négligée en permettant la recharge permanente du système de stockage [10].

L'alimentation se fait par de l'électronique de puissance permettant d'obtenir de plus grandes puissances et de stocker encore plus d'énergie. Il est désormais possible de stocker et de récupérer une puissance de plusieurs dizaines de kW pendant plus de dix minutes. Ainsi, ces systèmes permettent d'atténuer les fluctuations de la puissance du vent [21]. Les super-capacités sont également d'une grande importance pour lisser les fluctuations de puissance en raison de leur dynamique plus rapide que les batteries. Leurs capacités augmentent et il existe désormais des super- capacités de 1800F, utilisées avec un convertisseur AC/DC permettant l'échange avec le réseau [14], [21].

### ➤ Stockage à long terme

En matière de systèmes de stockage à long terme, nous connaissons les batteries et voyons se développer des systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse des piles à combustible. Les batteries ont évolué au cours de la dernière décennie et offrent désormais des capacités volumiques et massiques très importantes, notamment avec les générations récentes de type lithium polymère. Elles permettent aussi des fonctionnements en cyclage sans contraintes majeures avec des chargeurs qui améliorent leur durée de vie [21].

Les systèmes à air comprimé utilisent divers procédés pour stocker et récupérer de l'énergie, en utilisant ou non l'énergie de chauffage fournie par la compression. De plus, le compresseur est utilisé pour le stockage et les turbines reliées à une génératrice pour le déstockage [14].

Des systèmes utilisant un électrolyseur pour stocker l'énergie sous forme d'hydrogène et la récupération d'énergie à raide d'une pile à combustible sont également à l'étude.

Quant aux systèmes à air comprimé ou électrolyse, ils sont encore en développement et le rendement global de compensation est relativement faible. En revanche, ils permettent d'obtenir de grandes capacités à moindre coût car le stockage se fait dans des réservoirs dont les dimensions peuvent être déterminées en fonction de l'énergie que l'on souhaite stocker [14].

Il existe donc plusieurs solutions de stockage. Ils peuvent être combinés afin d'avoir une unité qui à la fois lisse les fluctuations de puissance (court terme) et atténue les effets des périodes de production faible ou élevée (long terme). Dans tous les cas, il ne faut pas négliger un système de stockage lié à l'énergie éolienne en raison de son faible rendement global car les pertes dans les systèmes de commutation peuvent généralement ne pas être compartimentées si cela permet de maintenir en permanence une production continue [21].

## **I.10 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre, Les systèmes éoliens en général. En adoptant une méthodologie qui permet au lecteur de se faire une idée générale de ce système, qui revêt une grande importance de nos jours. En commençant par l'histoire et le développement de l'énergie éolienne, ainsi que sa situation actuelle dans le monde à travers les dernières statistiques, et dans cet aspect nous avons noté son développement en Algérie, Et puis quelques bases de la technologie éolienne ont été introduites concernant principalement, les notions nécessaires pour comprendre le système de conversion de l'énergie éolienne et ses différents types, avantages et inconvénients. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons abordé les modes de fonctionnement des systèmes éoliens ainsi que leurs avantages et inconvénients, les stratégies de régulation de leur puissance et la production optimale de l'énergie, jusqu'aux systèmes de stockage.

En outre, notre travail est basé sur l'étude d'éolienne à base sur une machine asynchrone à double alimentation MADA (fonctionnement générateur GADA), afin de bien étudier et exploiter de cette association, la modélisation et la commande sont indispensables. Le prochain chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de MADA.

**Chapitre II:**  
**Modélisation d'une chaîne de conversion**  
**éolienne à base de MADA**

**II.1 INTRODUCTION**

Pour mieux comprendre et analyse la chaîne de conversion éolienne à base de MADA, la modélisation est nécessaire. Où la modélisation du système étudié permis d'extraire un système d'équations mathématiques qui représentent leur comportement physique. Cette modélisation nous permet ensuite de créer un schéma block qui reflète ce comportement à travers des courbes pour diverses variables et données de base. Dans la chaîne de conversion éolienne, la turbine et le générateur sont les éléments les plus importants, donc la meilleure sélection de ces deux éléments est nécessaire pour une efficacité énergétique élevée. Parmi les différentes technologies de production d'énergie éolienne disponible, nous avons choisi le système éolien à vitesse variable qui utilise MADA comme générateur grâce aux avantages que possède chaque élément de ce système.

Dans ce chapitre, nous allons modéliser les différents éléments d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ce chapitre est divisé en trois parties : Une première partie est consacrée à faire une brève description du système étudié, en mettant l'accent sur les différents éléments de base. La deuxième partie est destinée à mener un état de l'art sur MADA, concernant tout ce qu'il y a à savoir sur cette machine. La dernière partie est la partie principale de ce chapitre consacrée à la modélisation et la simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur MADA (mode générateur GADA). Dans cette dernière partie nous allons d'abord modéliser le système de conversion d'énergie cinétique-mécanique (vent, pales, turbine, multiplicateur, ...) et sa commande MPPT sans asservissement de vitesse mécanique. Dans un deuxième temps, nous modélisons la partie de conversion électromécanique (le générateur), et dans un troisième temps nous modélisons les convertisseurs de puissance bidirectionnels associées au générateur. L'ensemble du système sera validé par simulation à l'aide du logiciel MATLAB / SIMULINK.

**II.2 Description du système étudié**

La chaîne de conversion éolienne à base de MADA (mode génératrice) sur laquelle s'appuie notre travail sur cette mémoire, est illustré à la figure (II.1). La turbine éolienne entraîne la GADA à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse (BDV). Le stator est directement raccordé au réseau alternatif, tandis que son rotor est alimenté depuis le convertisseur électronique de puissance par l'intermédiaire de bagues collectrices pour permettre au GADA de fonctionner à différentes vitesses selon l'évolution de la vitesse du vent. En fait, le concept de base consiste à interposer un convertisseur de fréquence entre le générateur asynchrone à fréquence variable et le réseau à fréquence fixe. Le courant continu disponible à la sortie du convertisseur de puissance Côté Réseau (CCR) est filtré et convertie en courant alternatif à l'aide du Convertisseur Côté Machine (CCM).L'intérêt majeur du

GADA est de réduire la taille du convertisseur qui dépend du glissement de la machine et ne dépasse généralement pas 25 à 30 % de la puissance nominale de la machine [27].

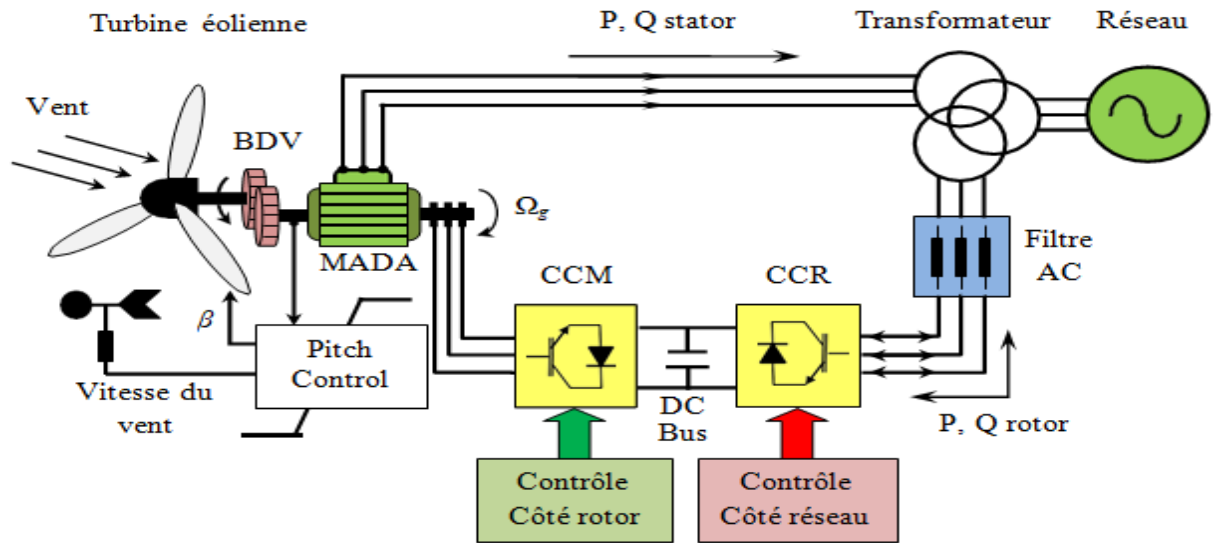


Figure II-1 : Système de conversion éolienne à base de la MADA [10].

### II.3 Etats de l'Art de La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

Dans le domaine du génie électrique, les efforts des ingénieurs et des chercheurs dans ce domaine en ce qui concerne les machines électriques se concentrent généralement sur l'efficacité, le rendement élevé, les domaines d'application larges, avec le coût le plus bas possible,... etc. Dans ce contexte, nous mentionnons la machine à double alimentation (MADA), qui se caractérise par un caractère qui lui permet d'occuper une large gamme d'applications, que ce soit en tant que moteur ou générateur, chacune selon les besoins. Le but de cette partie est de mener un état de l'art sur la MADA, concernant tout ce qu'il est important de savoir sur cette machine.

#### II.3.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation "en anglais doubly-fed induction machine (DFIM)" remonte à 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné composée de deux parties : un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements, Et le rotor d'où vient l'originalité de cette machine, du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements

rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence [28]. Cette machine peut fonctionner comme générateur (GADA) dans les systèmes éoliens, ou comme moteur pour des applications d'entraînement à vitesse variable.

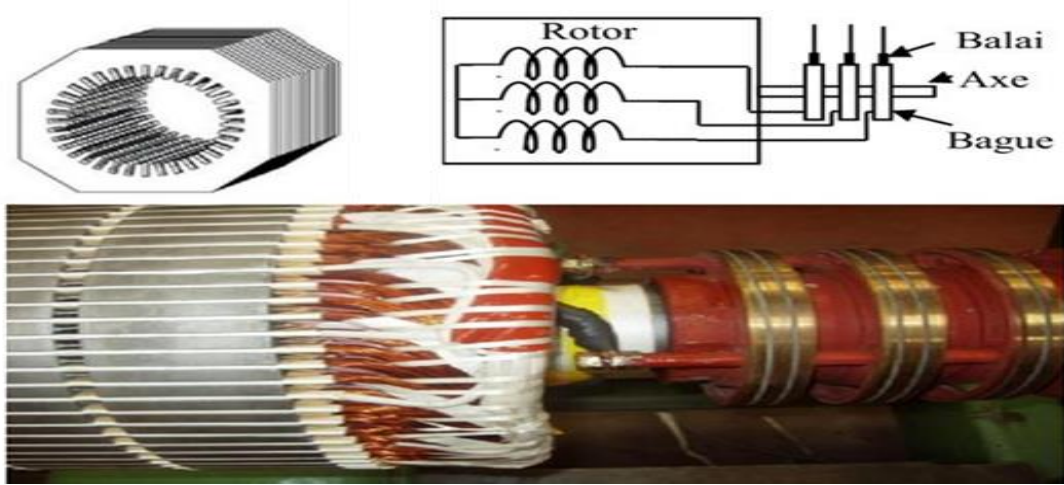


Figure II-2: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [1].

II.3.2 Classification de la MADA

II.3.2.1 MADA Simple (rotor bobiné)

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (II.3) illustre le schéma de principe de ce type de machines, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif/alternatif (AC/AC) de telle sorte que le glissement de la machine devient une grandeur contrôlable. Il faut noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé par un redresseur et un onduleur ou bien d'un convertisseur direct (AC/AC) comme cyclo-convertisseur [29].

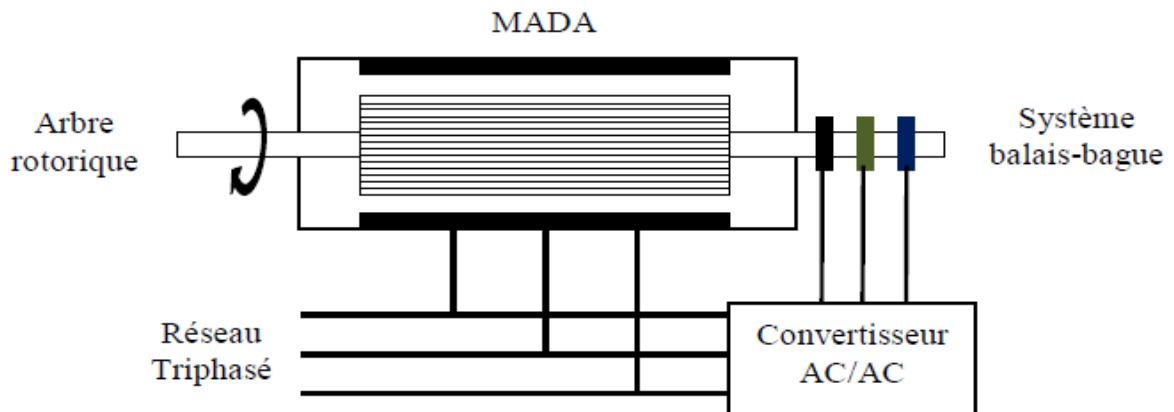


Figure II-3: Schéma de principe de la MADA Simple [28].

II.3.2.2 Machine à double alimentation en cascade

MADA en "cascade", deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement (Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (II.4) illustre le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [30].

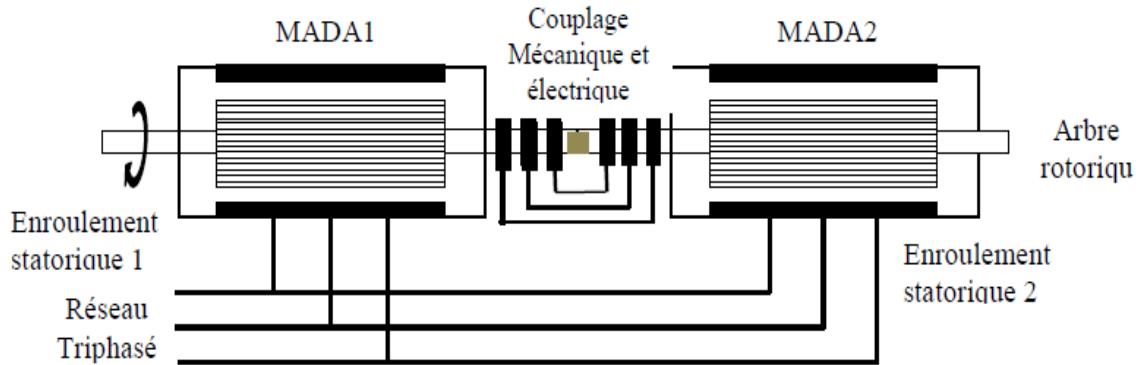


Figure II-4: Schéma de principe de MADA en cascade [28].

II.3.2.3 Machine à double alimentation sans balais

MADA sans balai, machine très proche de la précédente sauf que cette fois-ci, les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écurueil (Brushless Doubly Fed Machine). Le schéma de principe de ce type de machine est représenté sur la figure (II.5) [30].

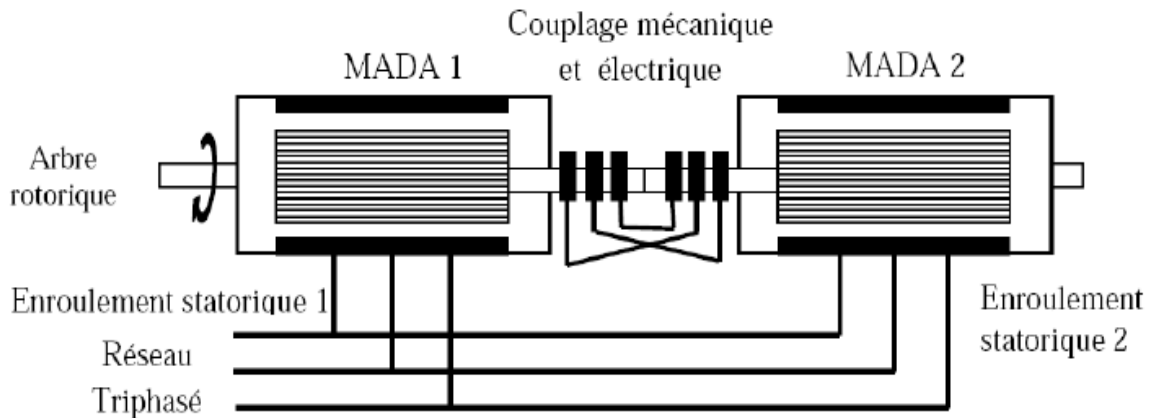


Figure II-5: Schéma de principe de la MADA sans balais [28].

II.3.3 Principe de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation que nous allons étudier est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné muni de bagues. Dans le cas où les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, le rotor tourne à la vitesse de glissement ( $\omega_{sr}$ ) par rapport au stator:

$$\omega_{sr} = \omega_s - \omega_r \tag{II.1}$$

Avec :

$\omega_s, \omega_r$  et  $\omega_{sr}$  sont respectivement, les pulsations des fréquences: statorique, rotorique et de glissement. D'autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor, est donnée par :

$$f_s = f_r + f_{sr} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$f_s, f_r$  et  $f_{sr}$  Sont la fréquence du stator, du rotor et de glissement respectivement.

Dans ce cas, le glissement est défini par la relation suivante :

$$\mathbf{g} = \frac{f_{sr}}{f_s} = \frac{\omega_{sr}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{II.3})$$

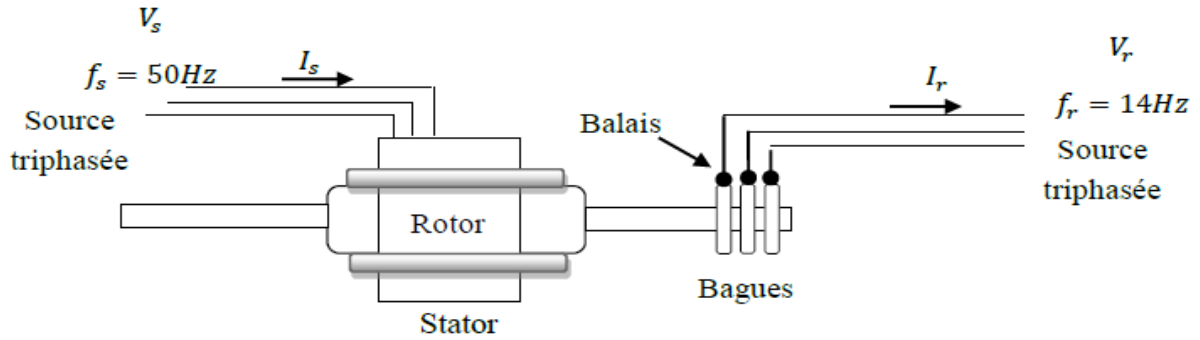
Selon l'équation (II.3), on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement:

- 1) **Régime stationnaire** : ( $\omega_r = 0 \Rightarrow \mathbf{g} = 1$ ), dans ce cas seul le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence  $f_s$ . Par conséquent le rotor est le siège d'une f.é.m. induite mais, il n'y a pas de courant qui circule dans son circuit, donc aucun couple n'existe dans cette machine. Dans ces conditions, le rotor était bloqué et la MADA se comporte comme un transformateur.
- 2) **Régime hypo-synchrone**: ( $\omega_r < \omega_s \Rightarrow 0 < \mathbf{g} < 1$ ) le glissement est positif, cela signifie que le champ tournant créé par les enroulements du rotor tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du stator. Dans ce cas, la fréquence  $f_r$  du rotor commence à décroître et plus la vitesse du rotor s'approche de celle du synchronisme, plus  $f_r$  tend vers zéro. De même, la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse du synchronisme.
- 3) **Régime synchrone**: ( $\omega_r = \omega_s \Rightarrow \mathbf{g} = 0$ ), Au point où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse synchronisme, la fréquence  $f_r$  du rotor s'annule. Dans ce cas, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne "voit" aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier ( $\omega_{sr} = 0$ ), par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- 4) **Régime hyper-synchrone** : ( $\omega_r > \omega_s \Rightarrow \mathbf{g} < 0$ ), par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et le glissement devient négatif, ce que signifie que l'ordre de succession de phase du rotor s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor [31].

#### II.3.4 Notions hypo et hyper-synchrone de la MADA

Afin de mieux comprendre les notions hypo et hyper-synchrone discutées dans la partie précédente, nous prenons l'exemple d'une machine à rotor bobiné classique. Comme d'habitude, son stator est branché à une source de fréquence de 50 Hz. Cependant, au lieu de brancher au rotor une charge résistive triphasée à travers un ensemble de bagues et balais, en relie plutôt le rotor à une deuxième source ayant une fréquence de 14 Hz, comme le montre dans la figure (II.6) [29].

Alors, comment se comporte cette machine à double alimentation ?



**Figure II-6: Machine à rotor bobiné classique connecté à deux sources triphasées.**

Supposons que les enroulements triphasés du stator et du rotor de notre machine aient chacun 4 pôles (le nombre de paire de pôles,  $p=2$ ) et que le stator soit branché à une source à 50Hz. Le flux créé par le stator tourne à la vitesse synchrone  $n_s = \frac{60f_s}{N_p} = 60 \times \frac{50}{2} = 1500$  tr/min. supposons de plus que ce flux tourne dans le sens horaire, un observateur externe "voit" donc ce flux statorique tourner dans le sens horaire à 1500tr/min.

Puisque le rotor est branché à une source à 14Hz, celui-ci produit un flux tournant à une vitesse  $n_r = \frac{60f_r}{N_p} = \frac{60 \times 14}{2} = 420$  tr/min par rapport au rotor. Supposons de plus que ce flux tourne également dans le sens horaire par rapport au rotor.

Pour que les pôles du stator restent alignés aux pôles du rotor, il faut que notre observateur externe voie les pôles du rotor tourner à la même vitesse que les pôles du stator. Il s'ensuit que le flux rotorique doit tourner dans le sens horaire à 1500tr/min. Cela implique que le rotor doit lui-même tourner à une vitesse de  $1500 - 420 = 1080$  tr/min. Toute autre vitesse produirait en effet un glissement continu des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator. Le couple moyen serait alors nul et le moteur s'arrêterait.

On constate donc que cette machine peut fonctionner en moteur si, et seulement si, sa vitesse est exactement de 1080tr/min. On dit alors qu'elle fonctionne à une vitesse *sous-synchrone* ou *hypo-synchrone* [28].

Maintenant, en changeant deux des trois fils de la source à 14Hz reliée aux balais, on force le flux tournant produit par le rotor à changer de sens par rapport au stator (sens anti-horaire). Dans ces conditions, pour que les pôles du stator restent alignés avec les pôles du rotor, il faut que le rotor tourne maintenant à une vitesse de  $1500 + 420 = 1920$  tr/min. On dit alors que le moteur fonctionne à une vitesse *hyper-synchrone* [29].

A partir de cet exemple, on peut généraliser et montrer que lorsqu'un moteur (autrement dit un générateur) à rotor bobiné est alimenté par deux sources, il doit tourner à une des deux vitesses suivantes :

$$n = \frac{60}{N_p} (f_s - f_r) \quad \text{hypo-synchrone} \quad (\text{II.4})$$

Ou :

$$n = \frac{60}{N_p} (f_s + f_r) \quad \text{hyper-synchrone} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$n$  : vitesse du rotor [tr/min].

$f_s$  : Fréquence appliquée au stator [Hz].

$f_r$  : Fréquence appliquée au rotor [Hz].

$N_p$  : Nombre de pair de pôles de la machine.

Pour une fréquence  $f_r$  donnée, la vitesse  $n$  dépend de la séquence des phases de la tension triphasée appliquée au rotor. Une séquence directe produit une vitesse hypo-synchrone (équation II.4), alors qu'une séquence inverse produit une vitesse hyper-synchrone (équation II.5).

### II.3.5 Modes de fonctionnement de la MADA

Dans cette étude, seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un convertisseur statique (AC/AC ou AC/DC/AC) est considéré.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Dans le cas d'une MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [3]. Cette propriété fondamentale a fait de MADA le choix préféré pour les entraînements à vitesse variable, en particulier ces dernières années pour la production d'énergie éolienne à vitesse variable [29]. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [3]:

#### II.3.5.1 Fonctionnement en mode moteur :

- **Hypo-synchrone:** La puissance  $P_s$  est fournie par le réseau au stator et la puissance  $P_r$  « la puissance de glissement » transite par le rotor pour être réinjectée au réseau, comme le montre dans la figure (II.7.a). On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

- **Hyper-synchrone:** La puissance  $P_s$  est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement  $P_r$  est également fournie par le réseau au rotor, comme le montre dans la figure (II.7.b). On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

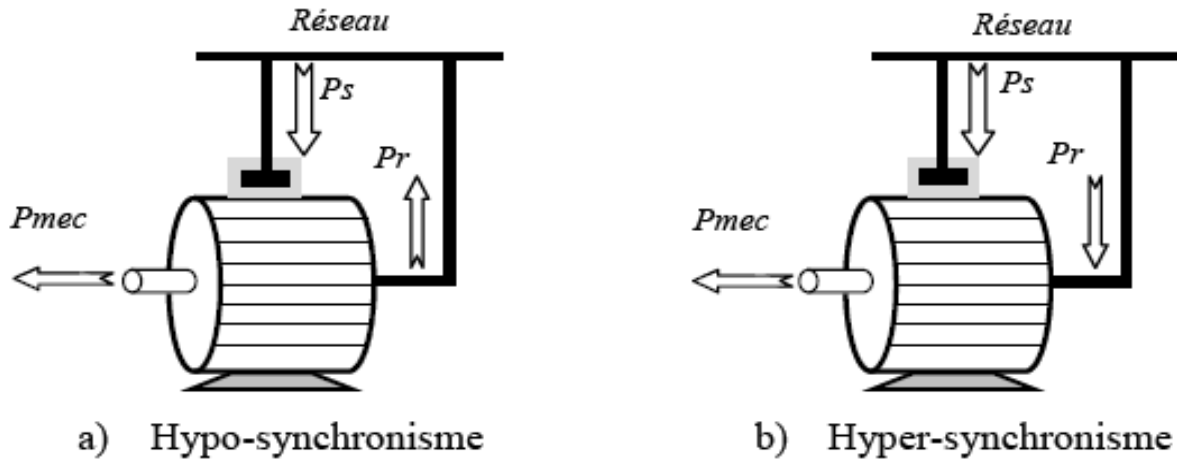


Figure II-7: Fonctionnement de la MADA en mode moteur [3].

### II.3.5.2 Fonctionnement en mode générateur:

- **Hypo-synchrone :** La figure (II.8.a) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La MAS à cage, ne peut pas fonctionner dans ce mode.
- **Hyper-synchrone :** La figure (II.8.b) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

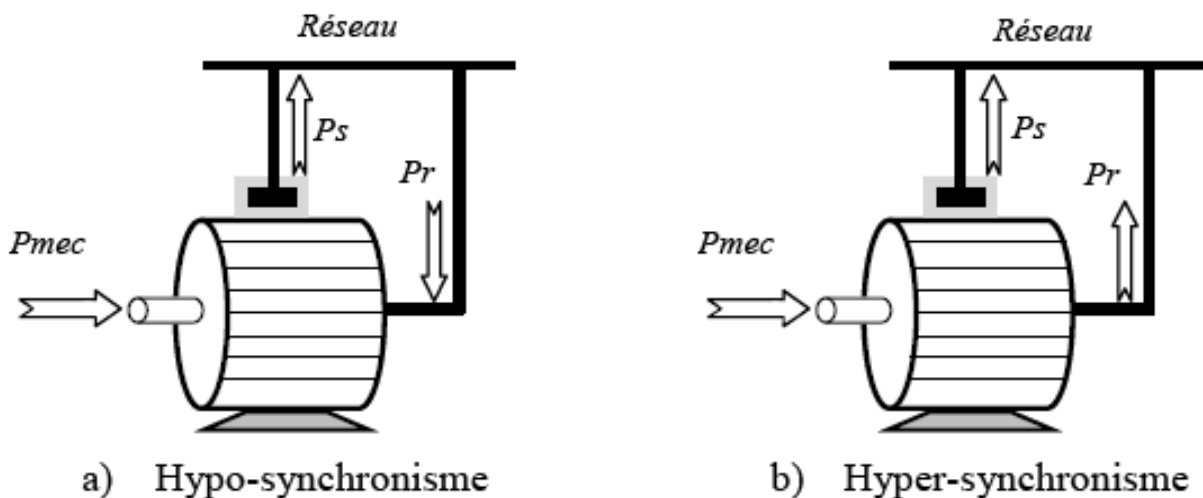


Figure II-8: Fonctionnement de la MADA en mode générateur [3].

II.3.6 Avantages et inconvénients de la MADA

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse [1], [10] ;</li> <li>- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [28],[31] ;</li> <li>- Le convertisseur coté rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la MADA, ce qui divise pratiquement leur prix par 3 par rapport à des convertisseurs dimensionnés pour la puissance nominale, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles dans ce cas, le rendement du système de conversion est ainsi amélioré [1], [10];</li> <li>- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones et asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [10] ;</li> <li>- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [29], [32] ;</li> <li>- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne [28], [26], [14].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais [1], [10], [28];</li> <li>- Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA, comparativement aux autres machines telles que: la machine synchrone à aimants permanents et la machine à réluctance variable [1], [10] ;</li> <li>- L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire [28].</li> </ul>

Tableau II-1 : Avantages et inconvénients de la MADA.

II.3.7 Domaines d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une place importante dans les applications industrielles, grâce à ses nombreux avantages par rapport à la machine Asynchrone

classique et Synchrone. Comme la machine asynchrone classique, la MADA peut fonctionner en moteur ou en générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

### II.3.7.1 Application en moteur

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse son utilisation permet de varier la vitesse par la variation de la fréquence d'alimentation rotorique. Donc ce dispositif sera économique car le convertisseur du côté du rotorique sera de petites dimensions. De plus, sa commande souple lui permet des applications très vastes comme dans les laminoirs, les tractions ferroviaires, les propulsions maritimes, les véhicules électriques, les ventilateurs, les pompes, et les compresseurs [29].

### II.3.7.2 Application en génératrice

Dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, la GADA est aussi une bonne solution pour la production de l'énergie électrique. L'alimentation à fréquence variable du rotor permet de générer des tensions à fréquence et amplitude fixes au stator quel que soit la vitesse de rotation de l'arbre de la machine. Cette application présente la GADA comme un meilleur choix par rapport aux machines synchrone classique pour la production d'énergie décentralisée à savoir [26]:

- ✓ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- ✓ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- ✓ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- ✓ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

#### II.3.7.2.1 Application de la GADA dans le domaine éolien

Comme expliqué dans la section sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par une éolienne dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance.

La GADA devient la solution adaptée à ce type d'application grâce à sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesses. Elle est plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée lorsque la puissance nominale de la machine est atteinte. Pour les éoliennes utilisant GADA, le stator de celle-ci est directement connecté au réseau tandis que son rotor est connecté au réseau par une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau) [26].

## II.4 Modélisation et Simulation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA (mode générateur GADA)

Les éoliennes à vitesse variable sont l'une des meilleures technologies disponibles pour la production éolienne, en raison de leurs avantages qui les qualifient pour cela, comme nous l'avons mentionné précédemment et en détail le plus important de ces avantages. Aussi, en ce qui concerne la machine asynchrone à double alimentation, on connaît déjà son importance dans ce domaine. Cette partie est divisée en trois étapes, dans la première étape nous présentons la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et dans la deuxième étape nous présentons la modélisation de la partie de conversion électromécanique avec la simulation pour les deux, et dans la dernière étape nous présentons la modélisation des convertisseurs de puissance bidirectionnels (CCR et CCM).

### II.4.1 Modélisation et Simulation de la partie mécanique de l'éolienne

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_{\text{turbine}}$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique à une vitesse  $\Omega_{\text{mec}}$ , comme le montre dans la figure (II.9) [26].

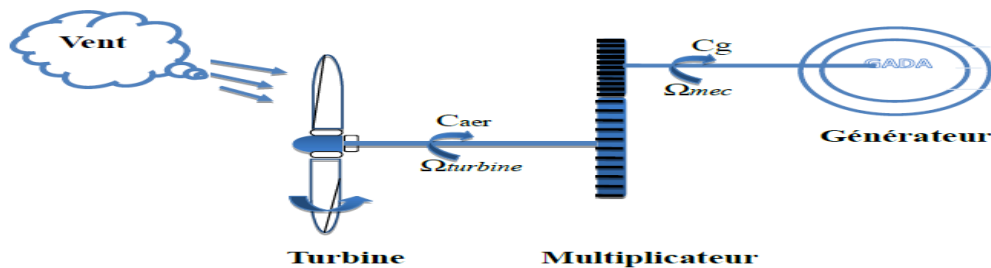


Figure II-9: Schéma de la turbine éolienne.

#### II.4.1.1 Loi De Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par le savant Allemand Albert Betz dans les années 1920. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $V_2$  [14]. Pour expliquer la théorie de BETZ, considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (II.10) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

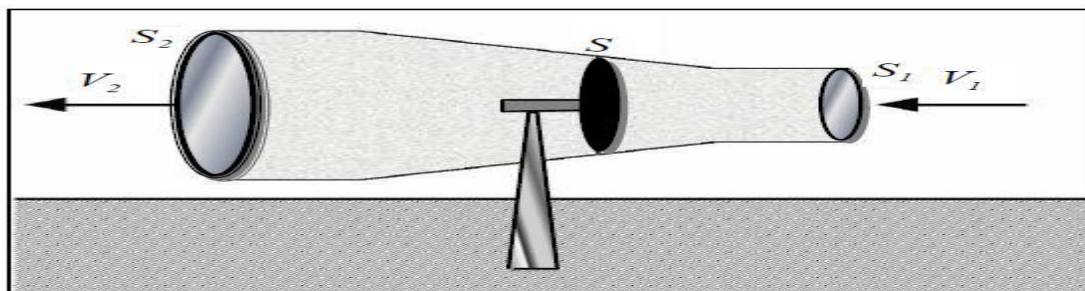


Figure II-10: Tube de courant d'air autour d'une éolienne [14].

Si  $V$  est la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, et  $S_1$  et  $S_2$  les sections amont et aval du tube d'air et  $S$  la surface balayée par l'hélice.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  ( $S = \pi R^2$ ) des pales est :

$$m = \frac{\rho.S.(V_1+V_2)}{2} \quad (\text{II.6})$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m.(V_1^2-V_2^2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (II.6) :

$$P_m = \frac{\rho.S.(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \quad (\text{II.8})$$

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2}\rho.S.V_1^3 \quad (\text{II.9})$$

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

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1+\left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.10})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (II.10), on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mt}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite ne peut être atteinte en réalité. Par conséquent, chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [13].

### II.4.1.2 Modélisation de la turbine éolienne

#### II.4.1.2.1 Modèle du vent appliqué à la turbine

Le vent joue un rôle primordial pour l'étude du système de conversion d'énergie éolienne car la puissance éolienne est en fonction de sa vitesse. Par conséquent, avant de procéder à la modélisation des éoliennes, nous devons disposer d'un modèle du vent appliqué au système.

Dans notre étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent, par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [40]:

$$V_v(t) = 8.7 + 0.5 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{II.11})$$

Le profil du vent en fonction du temps représenté dans la figure (II.10) simulé avec une vitesse moyenne de 8.7 m/s.

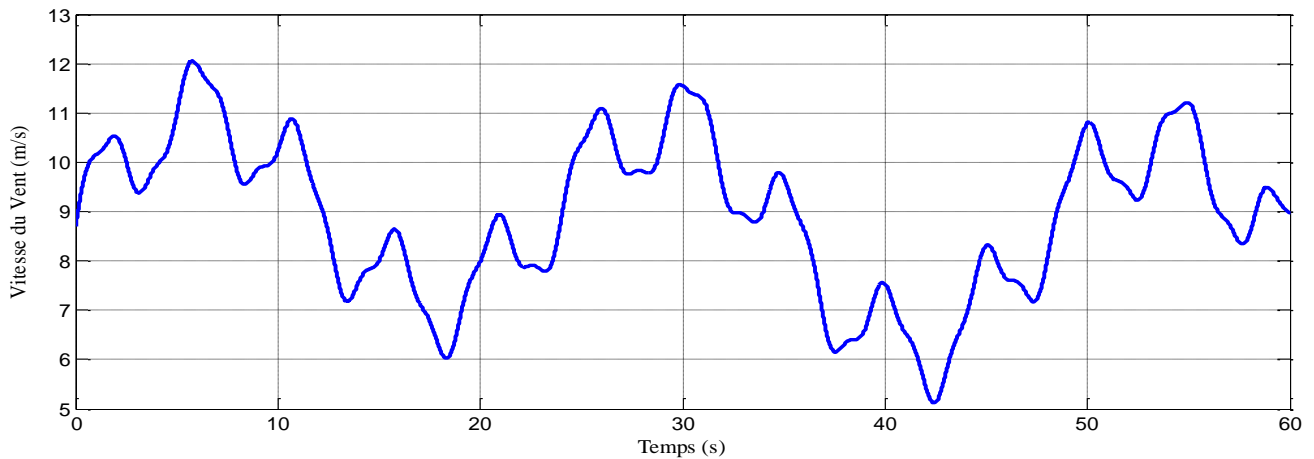


Figure II-11: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.

#### II.4.1.2.2 Modèle aérodynamique

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [13], [1] :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R_t^2 V_1^3 \quad (\text{II.12})$$

Où  $R_t$ : est le rayon de la turbine (m),  $\rho$  : la masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ),

$V_1$  (ou peut exprimer  $V_v$ ): la vitesse du vent (m/s),  $S$  : Surface circulaire balayée par la turbine ( $\text{m}^2$ ),

$C_p(\lambda, \beta)$  : Coefficient de puissance qui dépend de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ .

Le ratio de vitesse  $\lambda$  définit comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit [8]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- $\Omega_t$ : Vitesse de rotation de la turbine ;
- $R_t$ : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Dans ce travail, le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  utilisé est donné par l'expression [27] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (II.14)$$

La figure (II.12) montre les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK de l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour quelques angles de calage  $\beta$ . Ce coefficient augmente à chaque fois que le ratio de vitesse  $\lambda$  augmente jusqu'à une valeur maximale puis diminue et on remarque que  $C_p$  peut prendre une valeur négative qui provoque une inversion de l'écoulement de puissance sur l'arbre de la turbine. La valeur maximale de  $C_p$  ( $C_{pmax} = 0.5$ ) est atteinte pour  $\beta = 2^\circ$  et  $\lambda_{opt} = 9.2$ .

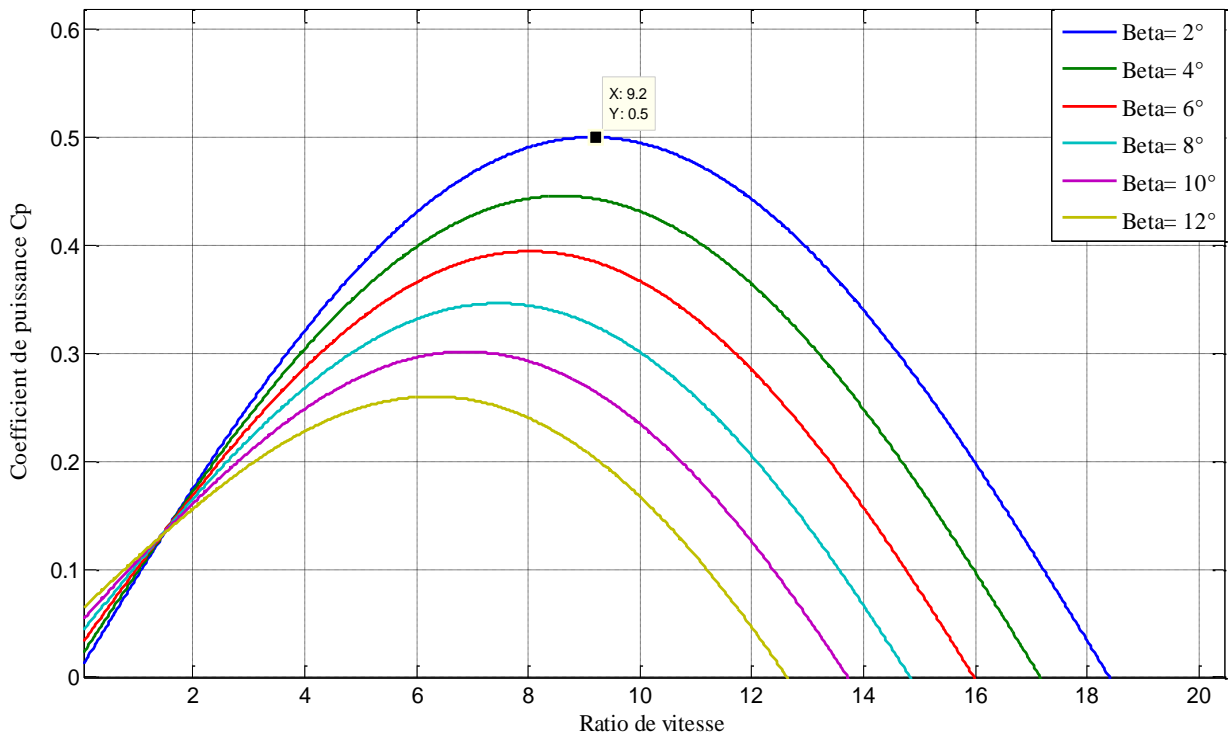


Figure II-12: Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différents  $\beta$ .

À partir de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , nous pouvons définir le couple mécanique  $C_t$  disponible sur l'arbre lent de la turbine par l'équation suivante [34] :

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V_1^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (II.15)$$

#### II.4.1.2.3 Modèle de la partie mécanique

La génératrice d'un système éolien est entraînée par la turbine éolienne qui comprend trois pales orientables de longueur  $R_t$  tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$  via un multiplicateur de gain G. Le but

de ce multiplicateur est d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_t$ , assez lente, à celle que nécessite la génératrice  $\Omega_m$ . Ce multiplicateur permet à la génératrice de fonctionner à une vitesse  $\pm 30\%$  de la vitesse de synchronisation. La partie mécanique d'un SCEE se compose d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice [8].

Le modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure II.13 est obtenu à base des hypothèses simplificatrices suivantes [33]:

- Les trois pales de la turbine sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeable par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

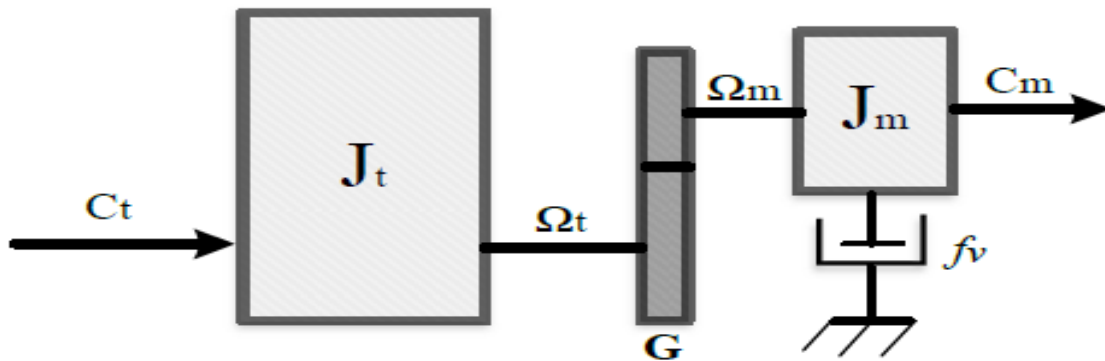


Figure II-13: Modèle mécanique de la turbine éolienne.

#### ❖ Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes [33]:

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.16})$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.17})$$

#### ❖ Modèle de l'arbre mécanique

D'après la figure (II.14), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par [33] :

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

- $J_t$  : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;
- $J_m$  : le moment d'inertie de la MADA ;
- $f_v$  : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA ;
- $C_m$  : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA ;
- $\Omega_m$  : la vitesse mécanique de rotation de la MADA ;
- $C_{em}$  : le couple électromagnétique de la MADA ;  $G$  : Gain du multiplicateur ;
- $C_f = f\Omega_m$  : Couple de frottement visqueux de la MADA.

**II.4.1.2.4 Schéma bloc du modèle de la turbine**

Basée sur les équations présentées précédemment, peut établir un schéma bloc correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique

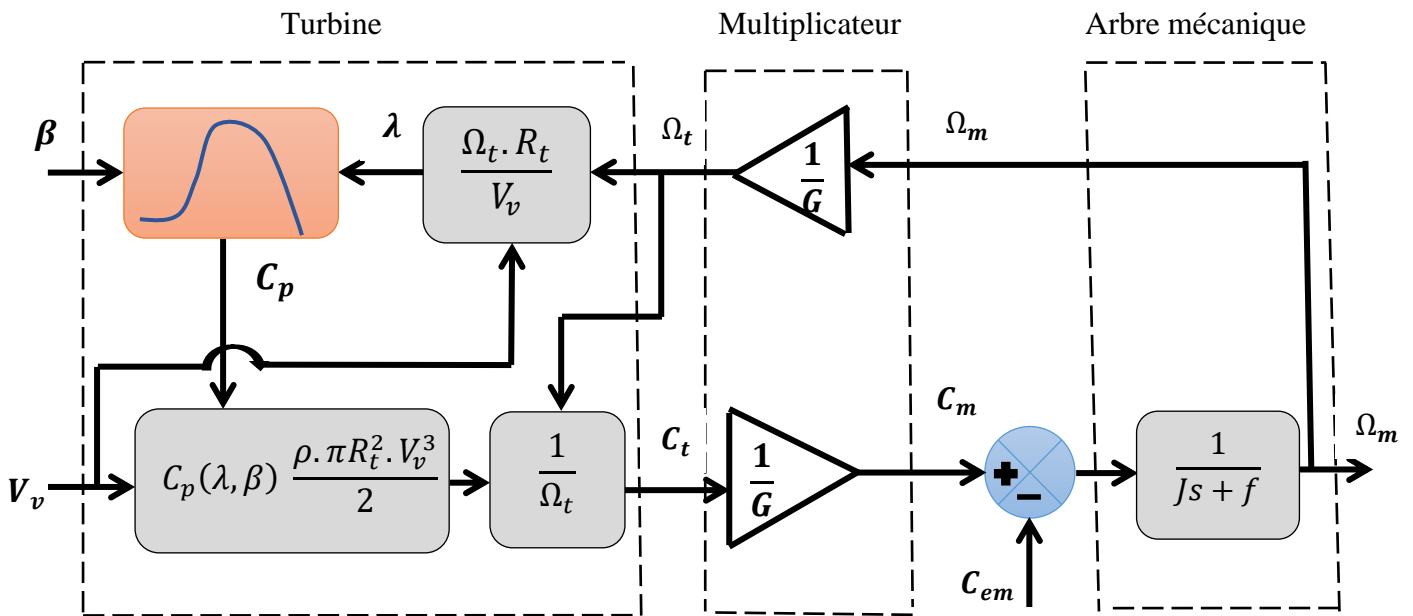


Figure II-14: Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

D'après le schéma bloc de la figure II-14, la vitesse mécanique de rotation  $\Omega_m$  de la MADA, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{em}$  de la MADA. La vitesse du vent  $V_v$  est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

**II.4.1.2.5 Modèle du système d'orientation des pales**

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le

coefficient de puissance figure (II.15). Les pales sont face au vent en faible vitesse du vent et s'inclinent pour des fortes vitesses du vent pour diminuer le coefficient de puissance [35].

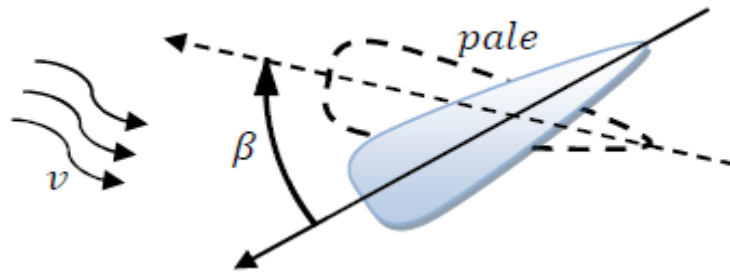


Figure II-15: Orientation des pales.

Généralement, le système d'orientation des pales est approché par une fonction de transfert de 1<sup>er</sup> ordre avec une constante de temps  $T_\beta$ . Lors de la modélisation de ce système de commande, il est très important de modéliser la vitesse de variation de l'angle  $\beta$  qui doit être limitée aux environs de  $10^\circ/s$  lors d'un fonctionnement normal et aux environs de  $20^\circ/s$  pour des cas d'urgence [35].

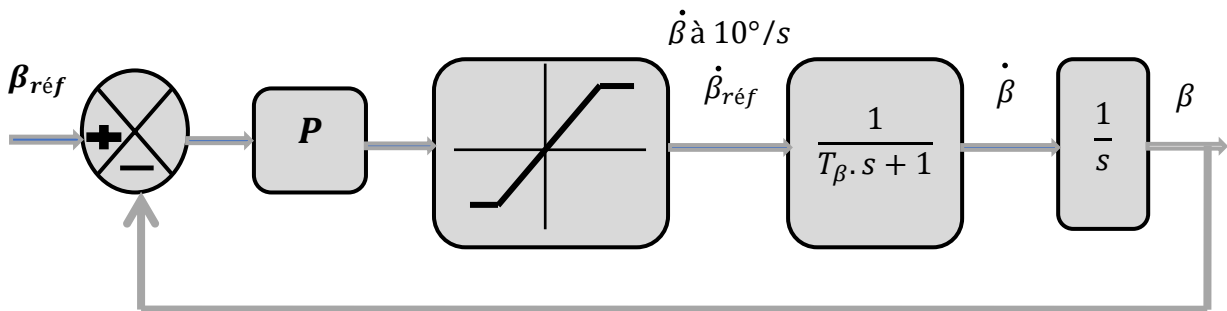


Figure II-16: Boucle de régulation de l'angle de calage des pales.

**II.4.1.3 Stratégie de maximisation de puissance "MPPT"**

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau de distribution électrique est principalement basé sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) [36]. La technique MPPT est une méthode de contrôle de la puissance très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer et à maintenir la vitesse de la turbine à une certaine valeur qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée [35]. Il existe deux façons pour appliquer cette technique selon le genre de la vitesse de référence qu'elle soit mesurée ou estimée. Nous présenterons dans cette section la stratégie de commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

**II.4.1.3.1 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique**

En pratique, la mesure précise de la vitesse du vent est difficile car l'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine et le diamètre de la surface balayée par les pales de l'éolienne est très important.

Dans ces conditions, on utilise un contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique qui est basé sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux  $C_{vis}$ .

L'équation mécanique (II.18) du système éolien peut s'écrire comme suit [8], [3]:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - C_{vis} = 0 \quad (II.19)$$

$$C_m = C_{em} \quad (II.20)$$

Le principe de la commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation est basé sur la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice, donc à partir de cette mesure on peut estimer la vitesse de rotation de la turbine comme suit :

$$\Omega_{t\_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.21)$$

A partir des équations (II.21) et (II.13), on estime la valeur de la vitesse du vent comme suit :

$$V_{v\_est} = \frac{R\Omega_{t\_est}}{\lambda} \quad (II.22)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$C_{t\_est} = \frac{1}{2\Omega_{t\_est}} \rho \cdot S \cdot V_{v\_est}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (II.23)$$

A partir des équations (II.16) et (II.20), on peut déterminer le couple électromagnétique de référence ou bien le couple de réglage comme suit :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{t\_est}}{G} = \frac{1}{2G\Omega_{t\_est}} \rho \cdot S \cdot V_{v\_est}^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.24)$$

En remplaçant les équations (II.21) et (II.22) dans (II.24), on obtient une relation du couple électromagnétique de contrôle, tel que :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2G^3\lambda^3} \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \Omega_m^2 \quad (II.25)$$

Afin d'obtenir le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse spécifique à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  pour obtenir le maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . Donc le couple électromagnétique de réglage devient :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2G^3\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 C_{pmax} \Omega_m^2 \quad (II.26)$$

Grâce au contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique de référence est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la GADA.

Selon les équations précédentes, Le schéma bloc présente le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation est illustrée par la figure II.17 ci-dessous [36], [34].

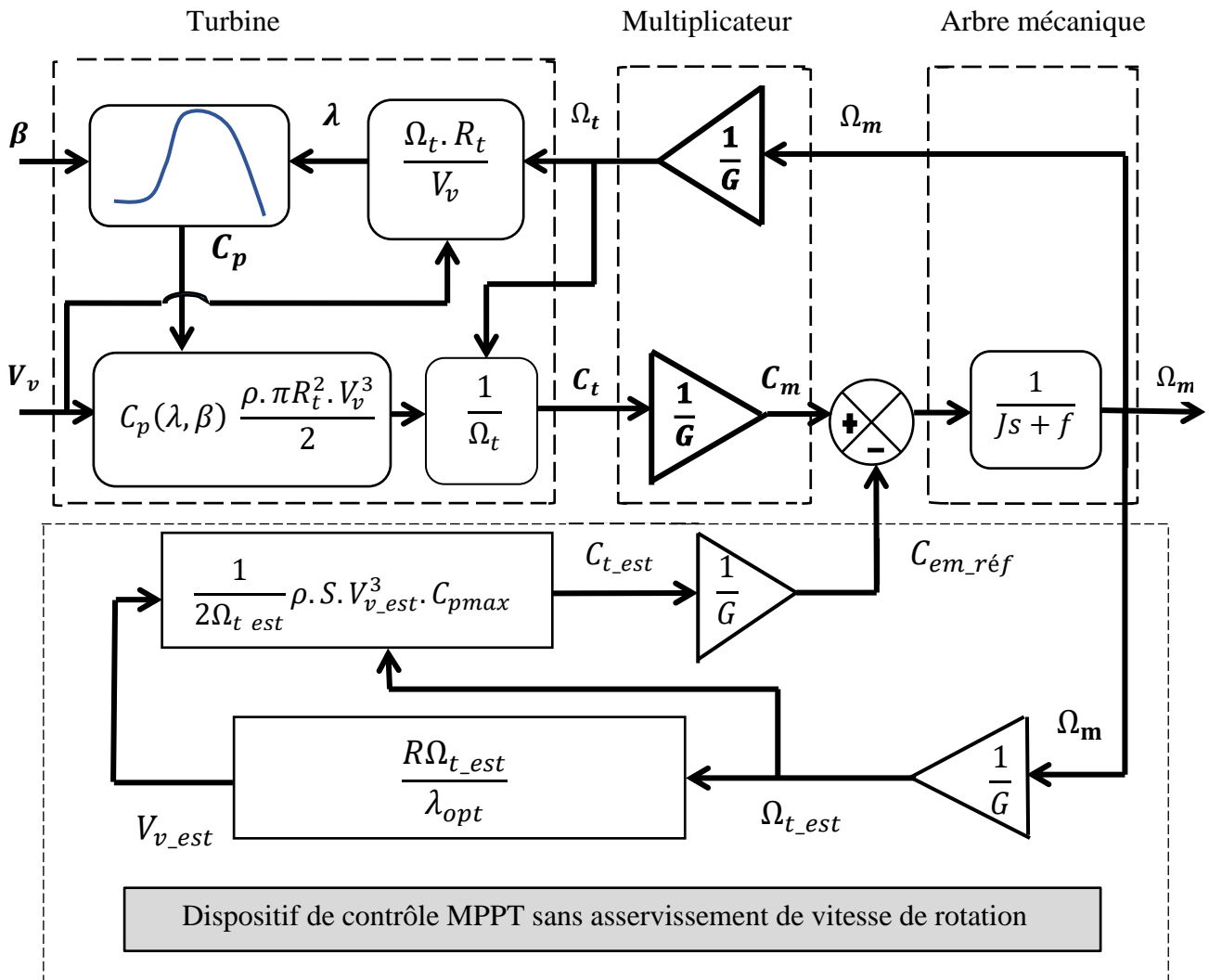
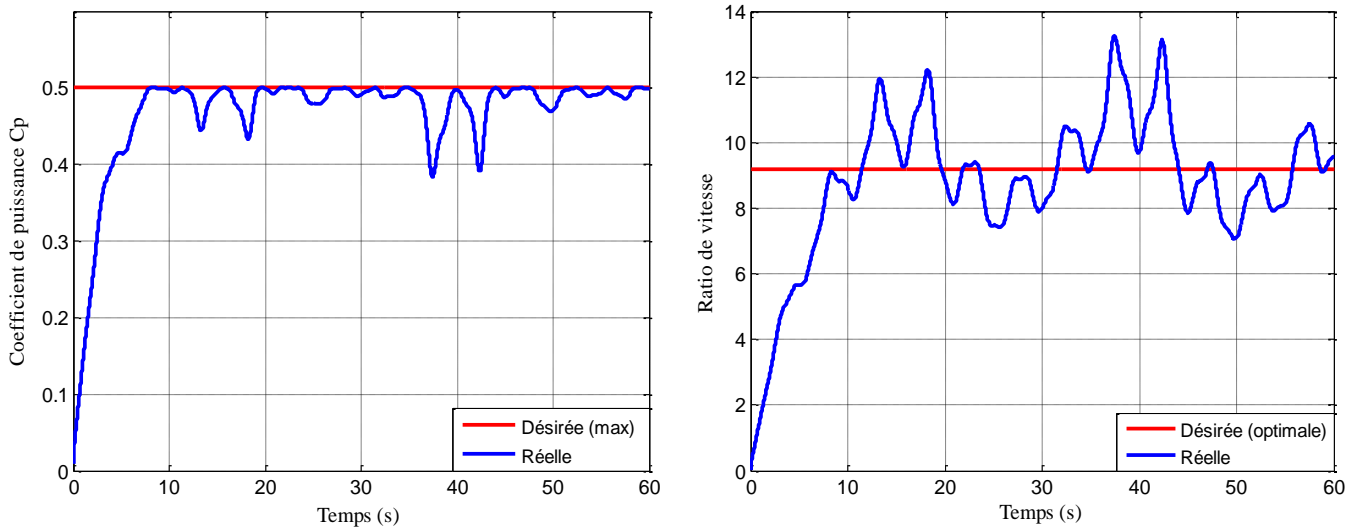


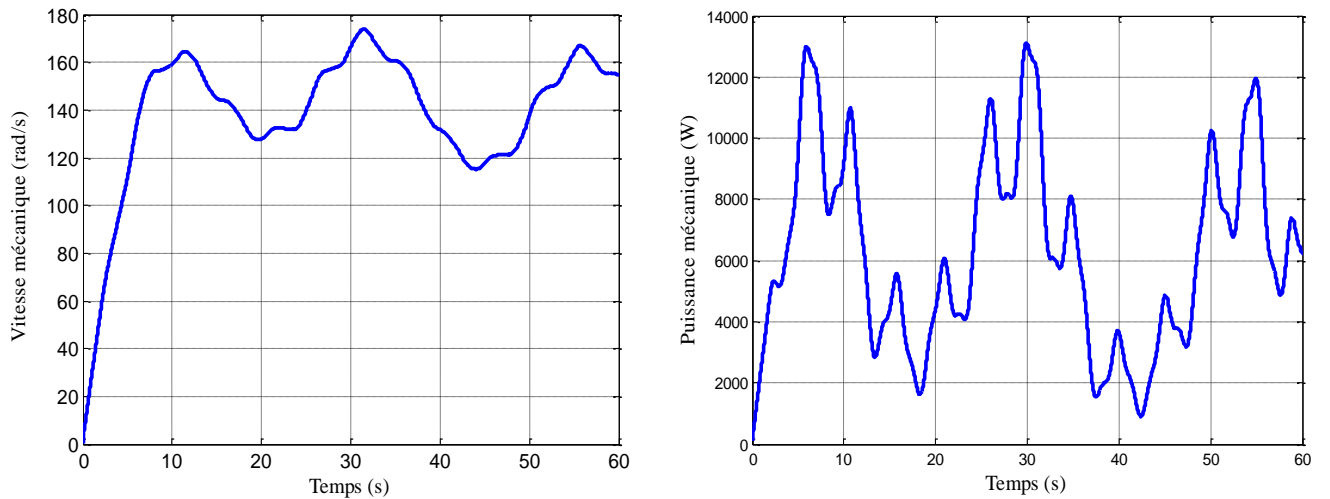
Figure II-17: Contrôle MPPT sans asservissement de vitesse de rotation.

#### II.4.1.4 Résultats obtenus par simulation avec interprétations

Les résultats de la simulation sous Matlab/Simulink pour une turbine éolienne contrôlée par la technique MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation du générateur sont présentés dans la figure (II.18) ci-dessous, en considérant le profil de vent de la figure (II.11). Les paramètres de la turbine éolienne utilisés dans la simulation sont donnés en annexe.



(a) Coefficient de puissance  $C_p$  ( $\lambda$ ,  $\beta$ ) et Vitesse spécifique  $\lambda$



b) Vitesse mécanique  $\Omega_m$  et Puissance mécanique

**Figure II-18: Résultats de simulation de la commande MPPT sans asservissement de vitesse.**

❖ **Interprétations des résultats**

A travers les résultats de simulation obtenus, nous pouvons déduire quelques points importants où en ce qui concerne la vitesse mécanique, les résultats ont montré qu'elle est proportionnelle à la vitesse du vent, on constate aussi que le ratio de vitesse suivi la référence optimale imposée, et que le coefficient de puissance suit le coefficient de puissance maximum requis. Finalement, Les résultats de la simulation nous ont permis de vérifier l'efficacité et la fiabilité de la stratégie de contrôle MPPT sans asservissement de vitesse de rotation du générateur.

**II.4.2 Modélisation et Simulation de la partie de conversion électromécanique**

**II.4.2.1 Hypothèses simplificatrices**

Afin de faciliter la modélisation de notre machine, nous nous appuyons sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui sont [37]:

- On néglige la saturation du circuit magnétique, ainsi que les pertes par hystérésis et courant de Foucault dans celui-ci. Cela permet de définir facilement les inductances propres ou mutuelles des bobinages,
- On suppose que chaque enroulement de phase, que ce soit au stator ou au rotor, crée un flux à répartition sinusoïdale. Ceci simplifie l'expression des inductances mutuelles entre phase du stator et du rotor,
- La machine à une construction symétrique, l'entrefer est constant et l'échauffement n'est pas pris en compte,
- les effets complexes tels que l'effet de peau et l'effet des extrémités sont négligeables.

Les conséquences importantes de ces hypothèses comprennent :

- L'additivité de flux,
- La constance des inductances propres,
- La présence d'une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

#### II.4.2.2 Modèle de la MADA dans le repère triphasé (abc)

La représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation MADA dans le repère triphasé est donnée par la figure (II.19).

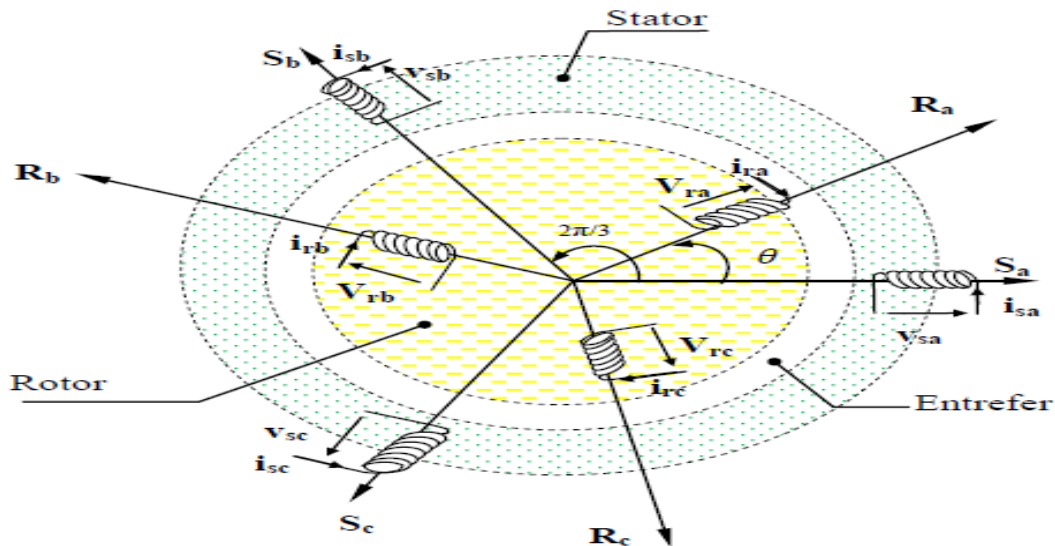


Figure II-19: Représentation de la MADA dans le système triphasé [38].

Comme décrit précédemment, MADA est une machine réversible pouvant fonctionner en mode générateur (GADA). Dans le cas où son couple est inversé en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle.

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [35]:

▪ **Equations électriques**

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où:  $R_s$  et  $R_r$  : sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

$V_s$ ,  $V_r$  : sont respectivement les tensions simples statoriques et rotoriques.

$I_s$ ,  $I_r$  : sont les courants de phase statoriques et rotoriques.

$\varphi_s$ ,  $\varphi_r$  : les flux respectivement statoriques et rotoriques.

▪ **Equations magnétiques**

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où :  $[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$  : sont respectivement les matrices des inductances statoriques et rotoriques.

$l_s$ ,  $l_r$  : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

$M_s$  et  $M_r$  : sont les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$  : est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule (II.29) :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$M_{max}$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.28) dans (II.27), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

#### ▪ Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$C_{em}$ : Le couple électromagnétique de la machine ;  $C_r$ : Le couple résistant ;

$f_v$ : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;

$\Omega$ : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;  $J$ : l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{II.32})$$

Où  $p$  : le nombre de paires de pôles de la MADA.

#### II.4.2.3 Transformation de PARK

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de simplifier les équations des machines électriques triphasées. Cette transformation permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère  $(a, b, c)$ ) à un système biphasé orthogonal de repère quelconque choisi, et enfin d'obtenir un système d'équations simplifié selon les avantages offerts par la référence choisie.

La matrice de transformation de Park est définie comme suit [39], [41]:

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

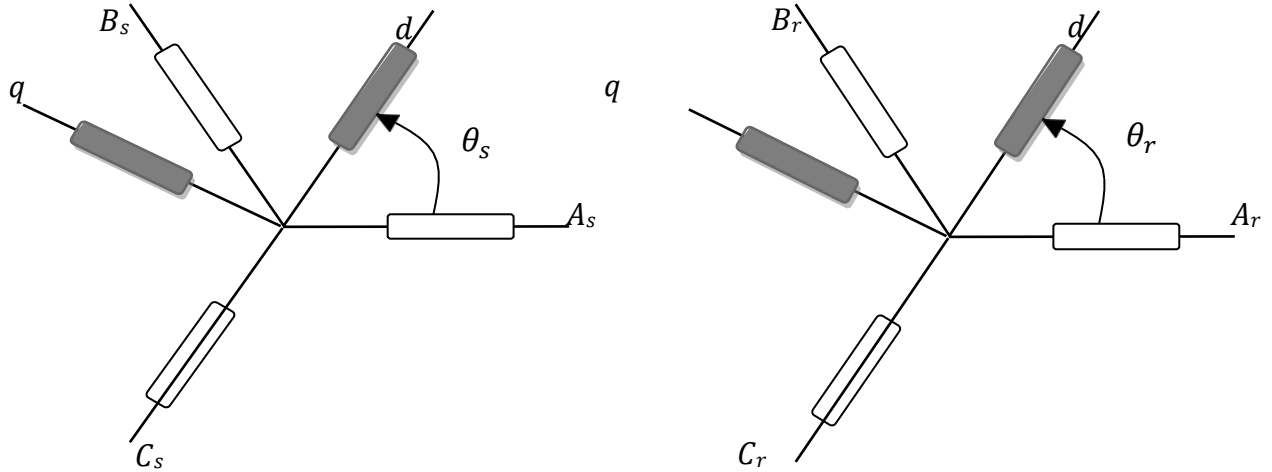
$[P(\theta)]$  Permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé.

$\theta$ : L'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \Rightarrow [x_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [x_{dq0}]$$

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur parmi les vecteurs tensions, courants, et flux statoriques et rotoriques.



**Figure II-20: Transformation des variables statoriques et rotoriques.**

$\theta_s, \theta_r$  : sont les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

La matrice inverse de Park est donnée par:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

#### II.4.2.4 Choix du repère

Le choix du référentiel dépend principalement de l'objectif de la modélisation, de la compatibilité des composants du système étudié, ainsi que de la simplification offerte par ce choix. Il existe trois repères biphasés de références [39]:

##### II.4.2.4.1 Repère lié au stator ( $\alpha, \beta$ )

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation de la machine. Le repère lié au stator appelé référentiel stationnaire où :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0$  ;  $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$

##### II.4.2.4.2 Repère lié au rotor ( $x, y$ )

Ce référentiel est choisi pour étudier les problèmes durant les régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant où :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0 ; \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

### II.4.2.4.3 Repère lié au champ tournant (d, q)

Le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s = \omega_r + \omega$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines asynchrones.

Grâce aux avantages de ce dernier repère, il sera retenu dans notre étude.

### II.4.2.5 Modèle de la MADA dans le repère biphasé (d, q)

Après l'application de la transformation de PARK sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, nous obtenons les équations générale de la MADA dans le repère biphasé (d, q) représenté ci-dessous [41]:

#### ▪ Equations électriques

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA dans le repère biphasé (d, q) sont :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$V_{sd}$ ,  $V_{sq}$ ,  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  : sont respectivement les tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.

$I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ ,  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  : sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.

$\varphi_{sd}$ ,  $\varphi_{sq}$ ,  $\varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  : sont respectivement les flux statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système.

$\omega_s$ ,  $\omega_r$  : sont les pulsations statorique et rotorique.

#### ▪ Equations magnétiques

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA dans le repère biphasé (d, q) sont :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Avec :  $L_s = l_s - M_s$ ,  $L_r = l_r - M_r$ ,  $M = M_{sr}$

$L_s$ ,  $L_r$ : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine;

$M$  : l'inductance mutuelle.

En remplaçant (II.36) dans (II.35), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{d}{dt} I_{sd} + M \frac{d}{dt} I_{rd} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + M \frac{d}{dt} I_{rq} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{d}{dt} I_{rd} + M \frac{d}{dt} I_{sd} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + M \frac{d}{dt} I_{sq} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (II.37)$$

▪ **Equation du couple électromagnétique**

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (II.38)$$

Avec  $p$ : le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les expressions des puissances active et réactive statoriques sont données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (II.39)$$

**II.4.2.6 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état**

Le système d'équations de tensions de la machine dans le repère biphasé décrit précédemment (II.37) peut s'écrire sous la forme matricielle. En considérant les courants statoriques et rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante:

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B][U] \quad (II.40)$$

Avec :

$X$ : Vecteur d'état.

$A$ : Matrice d'évolution d'état du système.

$B$  : Matrice de la commande.

$U$ : Vecteur du système de commande.

Telle que :

$$[X] = [I_{ds} \ I_{qs} \ I_{dr} \ I_{qr}]^t, \quad [U] = [V_{ds} \ V_{qs} \ V_{dr} \ V_{qr}]^t$$

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & M \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & M & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

On pose :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & M \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [Z] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ -(\omega_s - \omega)M & 0 & -(\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix}$$

Alors l'équation (II.40) devient :

$$[\dot{X}] = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot [X] + [L]^{-1} \cdot [U] \tag{II.42}$$

Par analogie de l'équation (II.42) avec l'équation (II.40) on trouve :

$$[A] = [L]^{-1} \cdot [Z] \quad \text{et} \quad [B] = [L]^{-1}$$

Afin de simplifier la réalisation par **MATLAB/SIMULINK** la matrice  $[Z]$  peut être analysée comme suit :

$$[Z] = -[Z_1] - \omega \cdot [Z_2] - \omega_s \cdot [Z_3]$$

Avec :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, \quad [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}, \quad [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

#### II.4.2.7 Résultats de simulation du MADA (mode générateur) avec interprétations

Une fois la machine asynchrone à double alimentation a été modélisée par des équations mathématiques, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci. Un modèle conçu en Matlab/Simulink permet de visualiser les différentes grandeurs de la machine (flux, couple, courants ...). Les paramètres de la machine sont donnés en annexe.

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasés, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50 Hz et d'amplitude de  $(220 * \sqrt{2} \text{ V} ; 100 * \pi \text{ rad/s} ; 50 \text{ Hz})$ , et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de  $(12 * \sqrt{2} \text{ V} ; 5 * \pi \text{ rad/s} ; 2.5 \text{ Hz})$ . Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe égale à 152 rad/s.

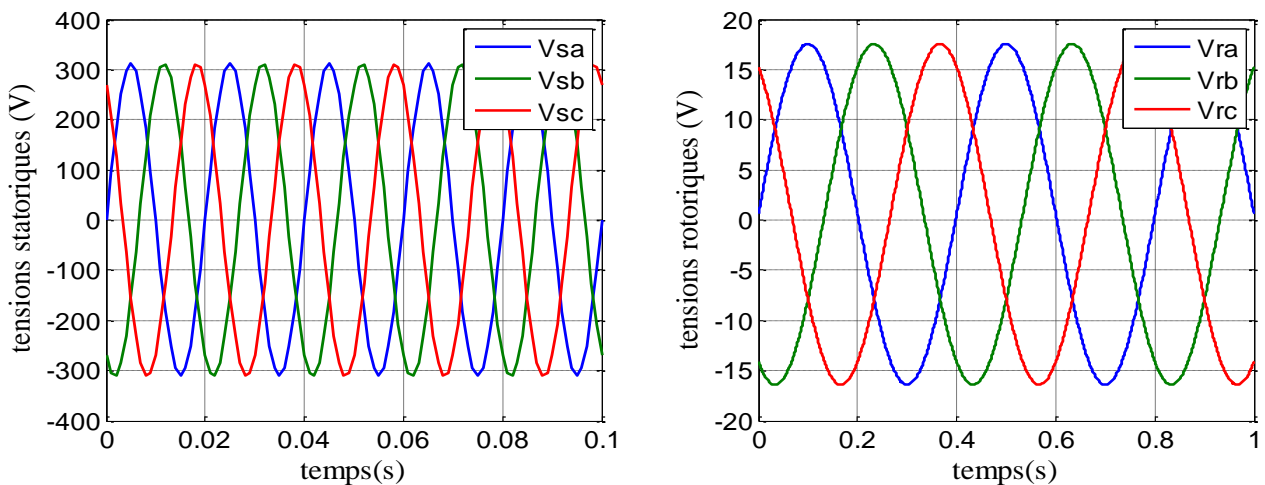


Figure II-21: Les tensions d'alimentations au stator et au rotor.

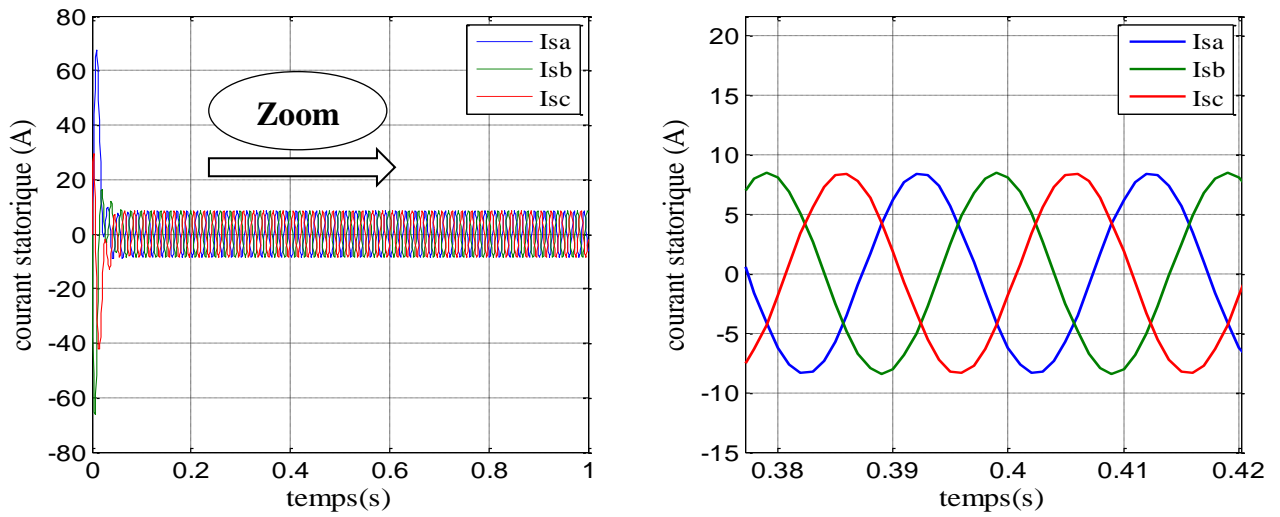


Figure II-22: Les courants statoriques triphasées avec zoom.

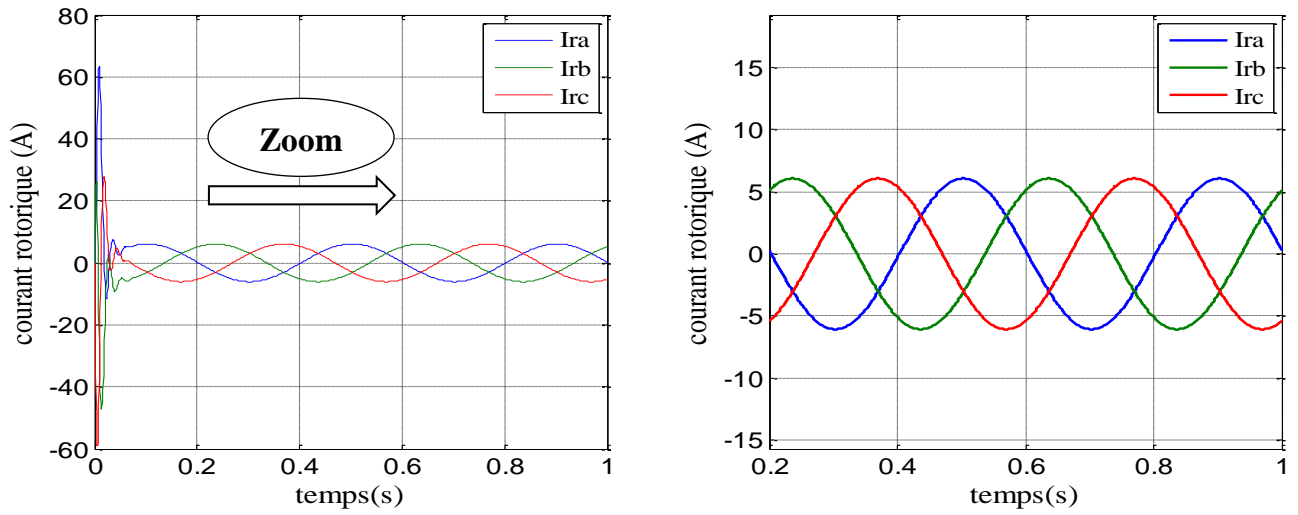


Figure II-23: Les courants rotorique triphasées avec zoom.

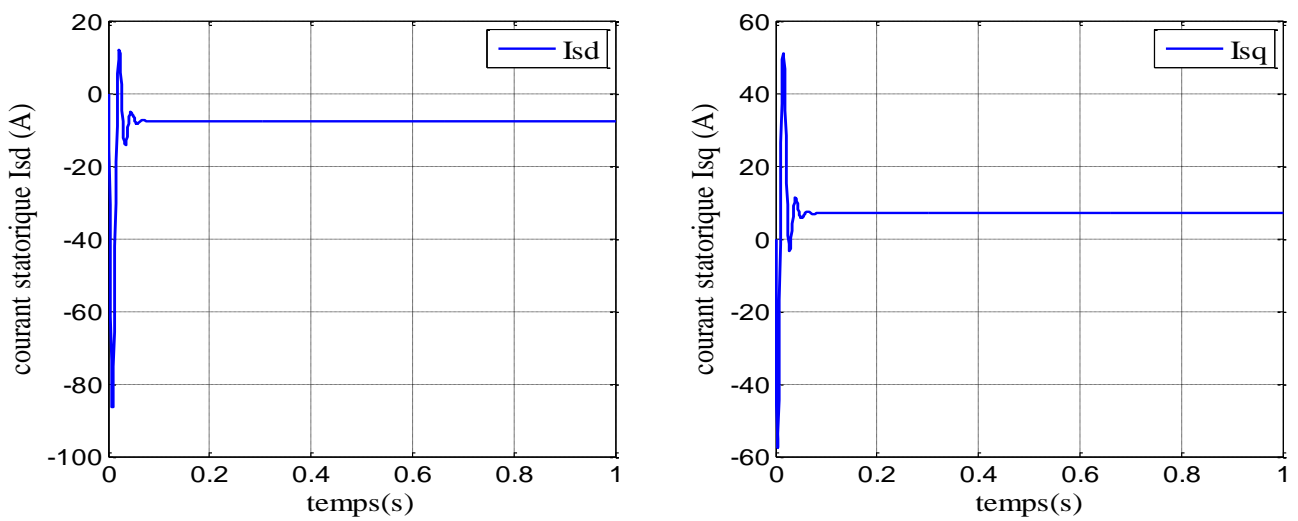


Figure II-24: Les composantes du courant statoriques de la GADA (d-q).

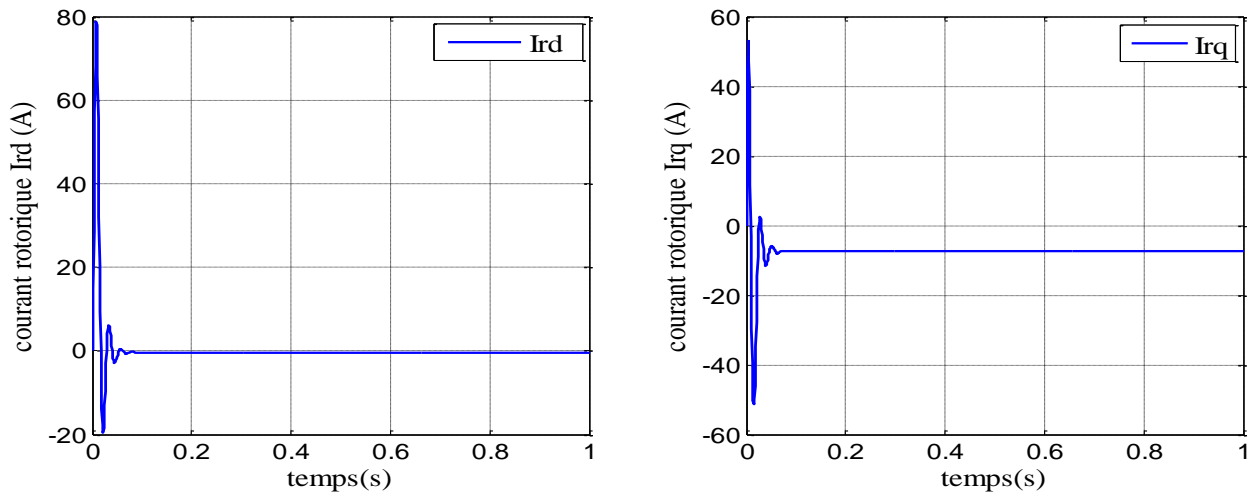
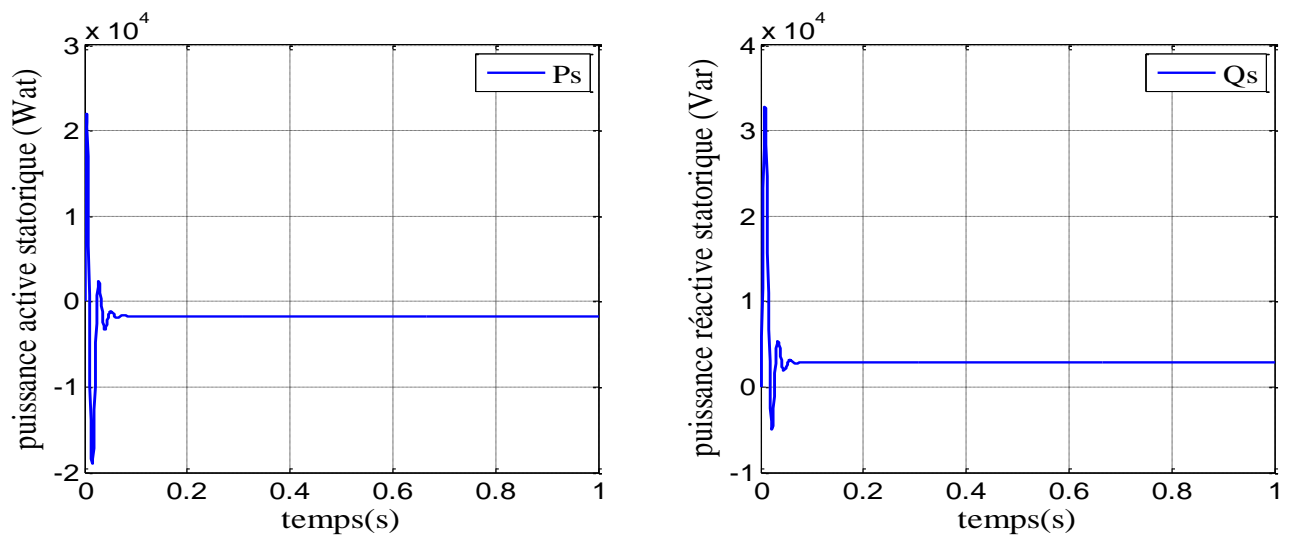


Figure II-25: Les composantes du courant rotoriques de la GADA (d-q).



FigureII-26 : Les puissances actives et réactive statoriques de la GADA.

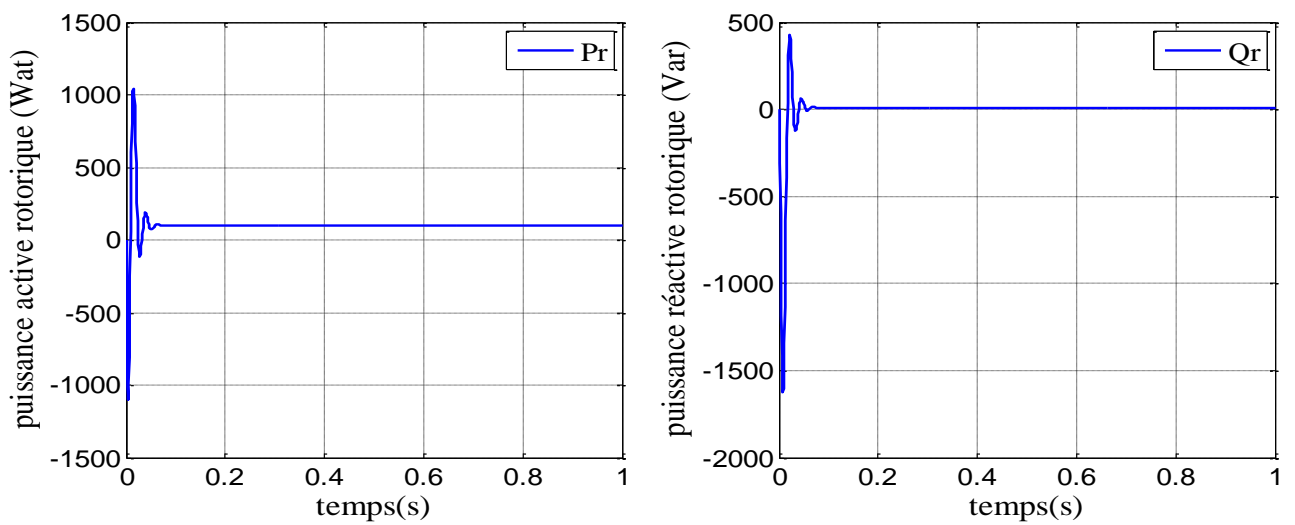
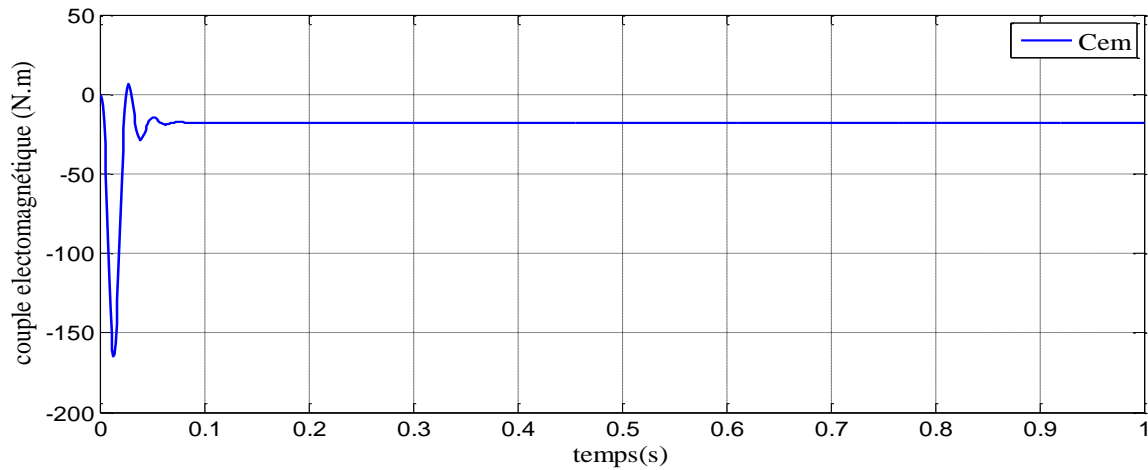


Figure II-27: Les puissances actives et réactive rotoriques de la GADA.



**Figure II-28: Couple électromagnétique.**

#### ❖ Interprétation des résultats de simulation

On remarque d'après les résultats de simulation que pendant la période de démarrage les courants de phase statorique ( $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ ) atteignent un pic négatif et présentent des oscillations considérables. D'autre part, l'allure du courant de phase rotorique ( $I_{rd}$ ,  $I_{rq}$ ) atteint un pic positif, puis s'équilibre à une valeur en régime permanent. Le couple électromagnétique est négatif et atteint au démarrage une valeur maximale de  $-160$  N.m. Aussi, les résultats obtenus montrent l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage après un temps égal à environ  $0,02$  s, après quoi ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales, et on peut signaler aussi que la tension et la fréquence rotoriques influencent sur les grandeurs de la génératrice, et l'effet sur la puissance au niveau de stator.

### II.4.3 Modélisation des convertisseurs de puissance bidirectionnels

L'intérêt majeur de l'utilisation de la MADA dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne est la possibilité de fonctionner à vitesse variable, grâce à la chaîne du rotor qui se compose de deux convertisseurs bidirectionnels, dont l'un est l'onduleur connecté directement au rotor du générateur et l'autre est le redresseur connecté au réseau, lesquels sont reliés par un bus continu qui est considéré comme un étage de filtrage nécessaire afin de stabiliser la tension.

Le contrôle du convertisseur statique connecté au réseau "CCR" consiste à réguler le bus continu intermédiaire quelle que soit la puissance générée par le système de conversion sous fréquence variable, tout en assurant le facteur de puissance côté AC. Tandis que le convertisseur statique connecté au rotor de la MADA "CCM" sert à gérer les puissances actives et réactives de la machine [10]. Dans cette partie nous allons présenter la modélisation de ces deux convertisseurs.

#### II.4.3.1 Modélisation du Convertisseur Côté Machine « CCM »

La fonction principale de l'onduleur de tension est d'assurer la conversion d'une tension continue fixe en une tension alternative triphasée d'amplitude et de fréquence variables pour une charge alternative dans notre cas cette charge est le rotor de la MADA. L'onduleur de tension qui sera étudié

dans cette section est un onduleur triphasé à deux niveaux équipé de plusieurs dispositifs de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture qui peuvent être soit des transistors MOSFET ou des IGBT associés à des diodes en tête bêche.

On admet que les six interrupteurs électroniques représentés ci-dessous, figure (II.29.A), sont parfaits, et en remplaçant chaque groupe de transistor-diode de la figure (II.29.A) par des interrupteurs  $K_j$  avec ( $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ), on obtient le schéma simplifié comme indiqué sur la figure (II.29. B) [35].

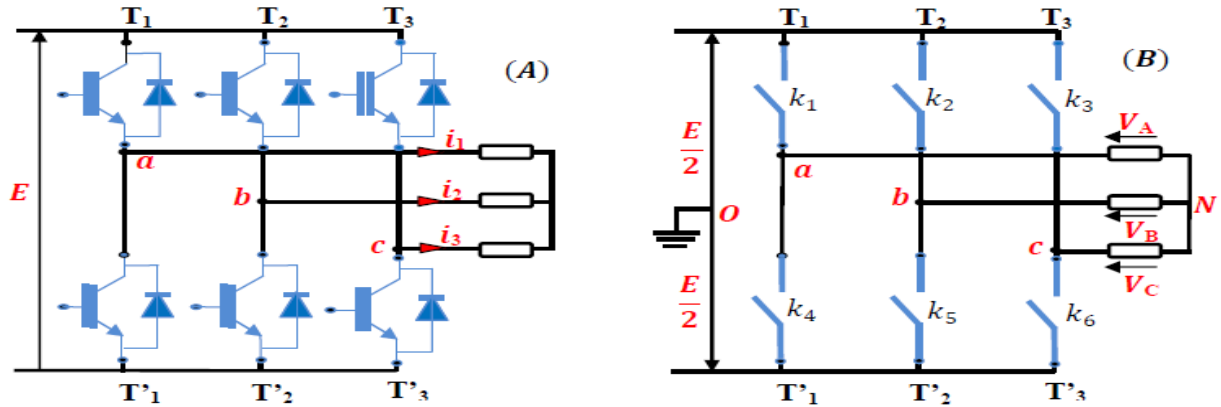


Figure II-29: Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Pour éviter de court-circuiter la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras doivent être complémentaires. Afin de simplifier l'étude, nous supposons ce qui suit [35], [39]:

- Le couplage est du type étoile sans neutre.
- Les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminés.
- Le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension.

Les équations des tensions simples aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (II.43)$$

Par addition on a :  $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON}$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$\text{donc : } V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON} = 0 \quad (II.44)$$

$$\text{d'où : } V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (II.45)$$

En remplaçant (II. 45) dans (II. 43), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (II.46)$$

On peut écrire le système (II. 46) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (II.47)$$

Grâce à l'ouverture et la fermeture successives des interrupteurs, l'onduleur génère une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires.

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (II.48)$$

Tel que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } k_1 \text{ fermé} & \text{si nom} & S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & \text{si } k_2 \text{ fermé} & \text{si nom} & S_2 = -1 \\ S_3 = 1 & \text{si } k_3 \text{ fermé} & \text{si nom} & S_3 = -1 \end{cases} \quad (II.49)$$

En remplaçant (II. 48) dans (II. 47), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.50)$$

Le système (II.50) représente le modèle mathématique de l'onduleur MLI triphasé à deux niveaux.

#### II.4.3.2 Modélisation du Convertisseur Côté Réseau « CCR »

Le redresseur est un convertisseur statique assurant la conversion d'une tension alternative de réseau électrique d'amplitude et de fréquence fixes en une tension à courant continu réglable.

Le convertisseur côté réseau (redresseur) est connecté au réseau électrique par un filtre  $R_f L_f$  et est situé entre le bus continu et le réseau électrique. Ce convertisseur a deux rôles : maintenir la tension du bus continue constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique [37]. Le convertisseur côté réseau a la même conception que le convertisseur côté machine présentée précédemment, comme le montre la figure (II.30) [8].

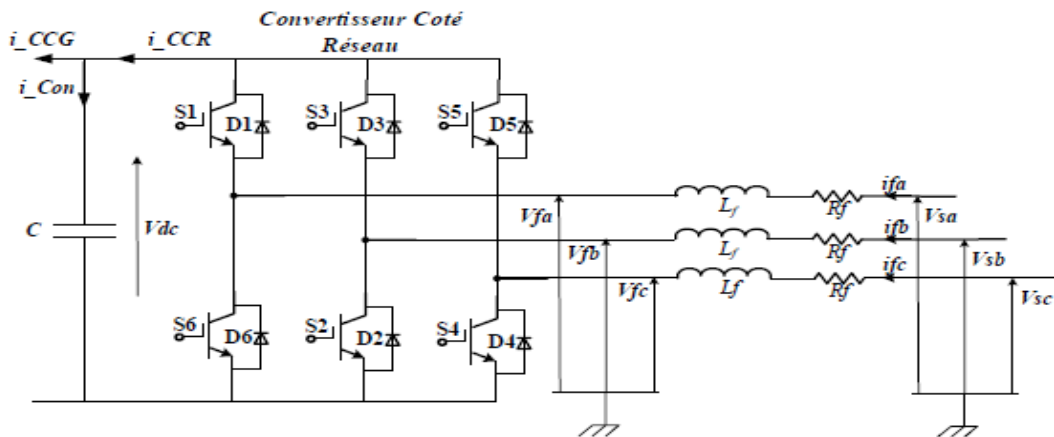


Figure II-30: Schéma simplifié du Convertisseur Côté Réseau avec un filtre.

La quantité d'énergie stockée dans le condensateur C peut s'écrire comme suit :

$$E_c = \int P dt = \frac{1}{2} C V_{dc}^2 \quad (\text{II.51})$$

Avec :

- P: est la puissance nette dans le condensateur,
- C : est la valeur du condensateur de liaison en courant continu,
- $V_{dc}$  : est la tension du condensateur.

#### II.4.3.2.1 Modèle du bus continu

Le bus continu est la liaison entre les convertisseurs côté réseau et côté rotor. Il s'agit d'un condensateur utilisé pour réduire les fluctuations de tension du bus continu. Le modèle du bus continu reçoit en entrée les courants continus CCR et CCG et calcule la tension continue comme suit :

$$V_{bus} = \frac{1}{C_{bus}} \int i_{con} dt \Rightarrow i_{con} = C \frac{d}{dt} V_{bus} \quad (\text{II.52})$$

Le courant qui traverse le condensateur est :  $i_{con} = i_{CCR} - i_{CCG}$  (II.53)

Où :

$i_{CCR}$  : Courant continu circulant à la sortie de redresseur vers la liaison CC (A).

$i_{CCG}$  : Courant continu circulant de la liaison CC vers la génératrice (A).

#### II.4.3.2.2 Modèle du filtre

En appliquant l'analyse du maillage (Figure (II.30)), le bilan des tensions triphasées à l'entrée du convertisseur est le suivant [8]:

$$\begin{cases} V_{fa}(t) = V_{sa}(t) - R_f i_{fa}(t) - L_f \frac{d}{dt} i_{fa}(t) \\ V_{fb}(t) = V_{sb}(t) - R_f i_{fb}(t) - L_f \frac{d}{dt} i_{fb}(t) \\ V_{fc}(t) = V_{sc}(t) - R_f i_{fc}(t) - L_f \frac{d}{dt} i_{fc}(t) \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

De même, le courant dans les trois phases peut être dérivé comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{fa}}{dt}(t) = \frac{1}{L_f} (V_{sa}(t) - R_f i_{fa}(t) - V_{fa}(t)) \\ \frac{di_{fb}}{dt}(t) = \frac{1}{L_f} (V_{sb}(t) - R_f i_{fb}(t) - V_{fb}(t)) \\ \frac{di_{fc}}{dt}(t) = \frac{1}{L_f} (V_{sc}(t) - R_f i_{fc}(t) - V_{fc}(t)) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Avec l'application de la transformation de Park aux trois équations précédentes (II.54), nous pouvons écrire les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{fd} = V_{sd} - R_f i_{fd} - L_f \frac{d}{dt} i_{fd} + \omega_s L_f i_{sq} \\ V_{fq} = V_{sq} - R_f i_{fq} - L_f \frac{d}{dt} i_{fq} - \omega_s L_f i_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

Où :

$V_{fd}(t), V_{fq}(t)$  : sont les composantes des tensions à l'entrée du convertisseur dans le repère tournant.

$V_{sd}(t), V_{sq}(t)$  : sont les composantes des tensions du réseau électrique dans le repère tournant.

$i_{fd}(t), i_{fq}(t)$  : sont les composantes des courants dans le repère tournant.

$\omega_s$  : est la pulsation du réseau ;  $L_f$  : inductance du filtre côté réseau (H) ;  $R_f$  : partie résistive du filtre côté réseau ( $\Omega$ ).

Par ailleurs, les puissances active et réactive d'entrée instantanée sont données par :

$$\begin{cases} P_f = \frac{3}{2}(V_{fd}i_{fd} + V_{fq}i_{fq}) \\ Q_f = \frac{3}{2}(V_{fq}i_{fd} - V_{fd}i_{fq}) \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

## II.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable basé sur MADA. Au début, nous avons fait une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa description, ses classifications, son principe de fonctionnement et tout ce qu'il faut savoir à la base, jusqu'à ses domaines d'application, en particulier dans notre domaine de travail. Ensuite, nous avons présenté la modélisation et la simulation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA (mode générateur GADA) séparément sur trois étapes de base :

Dans la première étape, nous avons modélisé la turbine éolienne et sa stratégie de contrôle, qui est la technique MPPT sans asservissement de vitesse mécanique dont le rôle principale est de régler la vitesse de la turbine et de la maintenir à une certaine valeur qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. A l'issue de cette étape nous avons simulé sous Matlab/Simulink la turbine avec cette technique, les résultats de la simulation nous ont permis de vérifier l'efficacité et la fiabilité de cette stratégie de contrôle.

La deuxième partie est destinée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park (Repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant qui réduit la complexité du modèle. Ce modèle de la MADA dans le repère (d, q) a été développé sous forme d'équation d'état pour simplifier la réalisation sous Matlab/Simulink. Les résultats de simulation ont montré la variation des grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques de cette machine, ce qui nous permet de bien comprendre son comportement, puis d'appliquer la commande pour augmenter l'efficacité et le rendement.

La dernière partie présente la modélisation de deux convertisseurs bidirectionnels qui alimentent le rotor de la MADA. Le prochain chapitre sera consacré à la commande directe de puissance (DPC) de la MADA.

**Chapitre III:**  
**Commande Directe de Puissance (DPC)**  
**de la MADA**

### III.1 INTRODUCTION

La grande similitude entre une machine électrique, alimentée par un onduleur de tension triphasé, et le redresseur à MLI triphasé connecté au réseau, a permis l'émergence d'une technique de contrôle analogue au DTC, appelée contrôle direct de puissance (en anglais Direct Power Control, DPC) [42],[43]. La première configuration de ce type de contrôle a été proposée par T. Noguchi en 1998 [44],[45], pour le contrôle direct des puissances instantanées actives et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. La stratégie DPC a été appliquée au DFIG en 2006 par L. Xu [45]. Le but commun de ce contrôle était d'assurer le prélèvement des courants sinusoïdaux tout en garantissant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive [42]. La technique DPC se caractérise par sa réponse dynamique rapide, sa structure simple et d'une faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la machine [55].

Deux différentes tendances sont identifiées par les chercheurs qui travaillent sur le Contrôle Direct de Puissance. D'un côté, une définition générale décrit le DPC comme la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, en remplaçant les variables de courant utilisées dans les systèmes imbriqués. Cette définition inclut les deux types des correcteurs DPC principaux, le DPC classique (DPC-C) et le DPC avec modulation vectorielle (DPC-SVM). D'un autre côté, une définition plus restrictive analyse le DPC comme le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation sont choisis directement par un tableau de commutation. Cette définition n'inclut que le DPC classique [46].

Ce chapitre a pour objectif d'étudier et d'appliquer la commande directe de puissance (DPC) à une machine asynchrone à double alimentation. La technique DPC est proposée pour le contrôle de la puissance active et réactive statoriques. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord le principe général de la technique DPC-C appliqué au convertisseur coté machine (CCM) de MADA. Ensuite, nous présenterons le DPC-C de MADA. A travers les résultats de simulation montrés dans les travaux précédents suivants [3, 10, 19, 43, 55], il a été constaté que la technique DPC-C a un inconvénient majeur, qui est les oscillations des puissances et les harmoniques des courants générés par la MADA, à cause de la fréquence de commutation variable. Une stratégie DPC-SVM sera proposée comme solution à ce problème. Enfin, les résultats de simulation sous le logiciel MATLAB / SIMULINK mettent en évidence les performances apportées par la technique de contrôle proposée DPC-SVM dans la commande du système de conversion d'énergie éolienne.

### III.2 Principe générale de la technique DPC-C

La structure globale de la DPC-C, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au convertisseur triphasé coté machine « CCM », est illustrée à la figure (III.1). Elle est similaire à celle du contrôle direct de couple (DTC) des machines à induction. Au lieu du couple et du flux rotorique, ce sont les puissances instantanées actives et réactives statoriques qui sont les grandeurs contrôlées.

Le principe de la technique DPC-C consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation ( $S_a, S_b, S_c$ ) des semi-conducteurs constituant le convertisseur coté machine, à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs numérisées ( $\varepsilon P_s$  et  $\varepsilon Q_s$ ) entre les références des puissances active et réactive ( $P_s^*$  et  $Q_s^*$ ) et les valeurs réelles ( $P_s$  et  $Q_s$ ), fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées  $H_P$  et  $H_Q$  respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel le vecteur du flux rotorique se trouve [44], [48], [49].

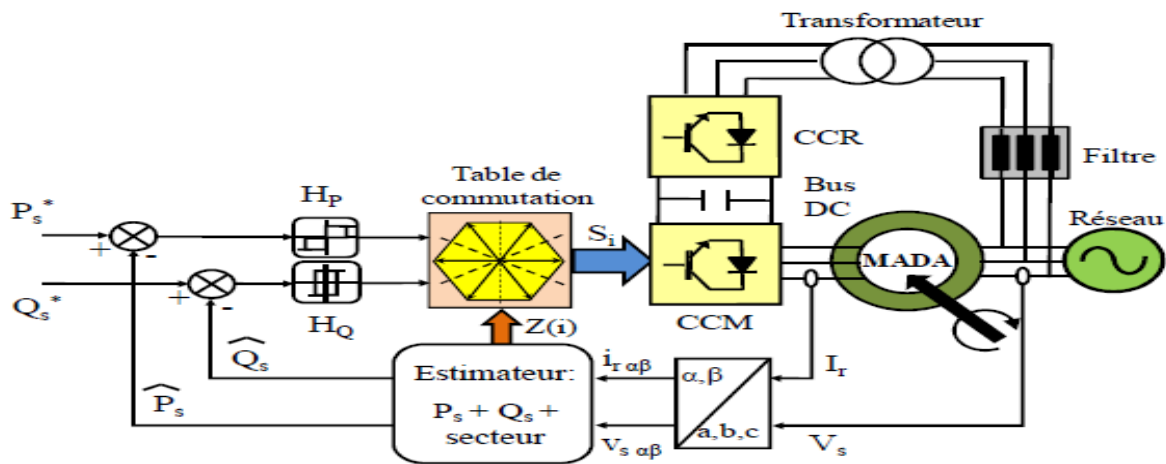


Figure III-1 : Configuration de la DPC-C de la MADA [10].

### III.3 DPC-C de la MADA

Afin de réaliser une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, dans tous les secteurs, il est nécessaire d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, et cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans cette table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément.

#### III.3.1 Estimation de la puissance active et réactive

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive [3], [10]:

- ❖ Par la mesure des courants et des tensions,
- ❖ Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants,
- ❖ Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

Au lieu de mesurer les puissances sur la ligne, en capturant les courants rotoriques, et en estimons  $P_s$  et  $Q_s$ . Cette approche donne un contrôle anticipé des puissances dans les enroulements statoriques. C'est à dire celui établi en négligeant la résistance de la phase statorique. On peut trouver les relations de  $P_s$  et  $Q_s$  en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel  $(\alpha_r - \beta_r)$  [45], [49]. Ce référentiel tourne solidairement avec le rotor de la MADA [3], [10]. Les puissances active et réactive sont contrôlées par deux comparateurs à hystérésis, les valeurs mesurées des puissances étant estimées à partir des relations suivantes [45], [49], [50]:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_s \varphi_{r\beta} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s \left( \frac{\varphi_s}{\sigma L_s} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{r\alpha} \right) \end{cases} \quad (III.1)$$

D'où :

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \sigma L_r i_{r\alpha} + \frac{M}{L_s} \varphi_s \\ \varphi_{r\beta} = \sigma L_r i_{r\beta} \\ |\vec{\varphi}_s| = \frac{|\vec{V}_s|}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (III.2)$$

Si en introduisant l'angle  $\delta$  qui se trouve entre le vecteur flux statorique et rotorique,  $P_s$  et  $Q_s$  deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s| |\varphi_r| \sin \delta \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\varphi_s| \left( \frac{M}{L_r} |\varphi_r| \cos \delta - |\varphi_s| \right) \end{cases} \quad (III.3)$$

La dérivée des deux équations dans (III.3) donne :

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{M \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\varphi_s| \frac{d(|\varphi_r| \sin \delta)}{dt} \\ \frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{M \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\varphi_s| \frac{d(|\varphi_r| \cos \delta)}{dt} \end{cases} \quad (III.4)$$

Comme on le voit dans (III.4), ces deux dernières expressions montrent que les puissances active et réactive statoriques peuvent être contrôlées par la modification de l'angle relatif  $\delta$  entre les vecteurs flux statorique et rotorique et de leur amplitudes (figure III.2).

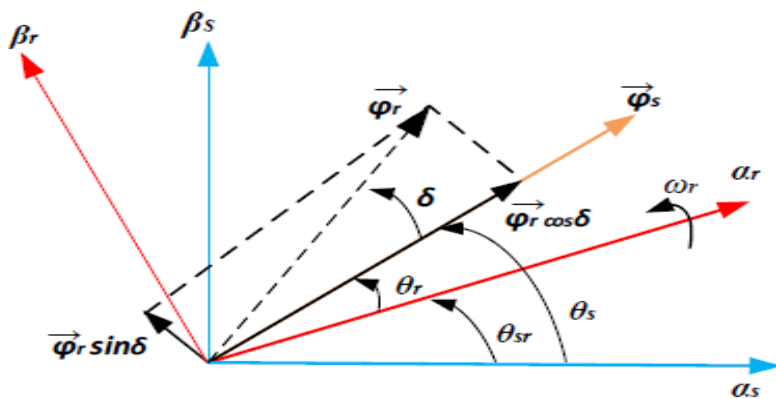


Figure III-2: La décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan  $(\alpha-\beta)$ .

III.3.2 Choix des comparateurs à hystérésis

Afin d’obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d’un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande de la puissance active et réactive. Ces comparateurs (figure III.3) doivent permettre de contrôler l’échange de la puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique dans les deux sens et avec les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone de la MADA.

La DPC pour la MADA est basée sur la sélection d’un vecteur de tension rotorique de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d’hystérésis.

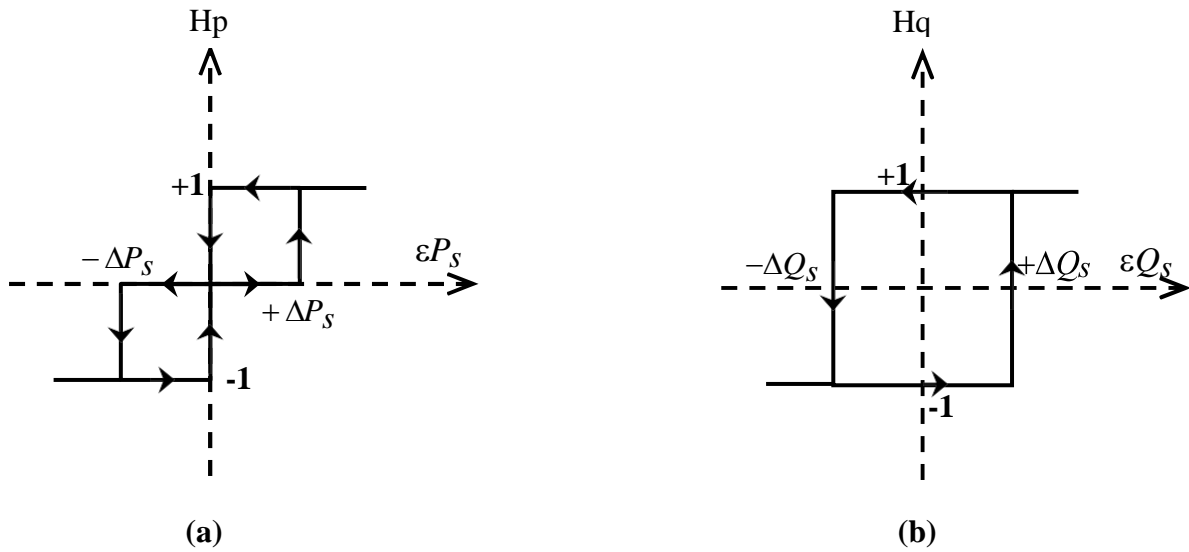


Figure III-3: Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive [3].

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur la puissance active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter la logique de commande suivante :

$$\begin{cases}
 Si \ \epsilon Q_s \geq \Delta Q_s & \Rightarrow H_Q = 1 \\
 Si \ \epsilon Q_s \leq -\Delta Q_s & \Rightarrow H_Q = -1 \\
 Si \ \epsilon P_s \geq \Delta P_s & \Rightarrow H_P = 1 \\
 Si \ -\Delta P_s \leq \epsilon P_s \leq \Delta P_s & \Rightarrow H_P = 0 \\
 Si \ \epsilon P_s \leq -\Delta P_s & \Rightarrow H_P = -1
 \end{cases} \quad (III.5)$$

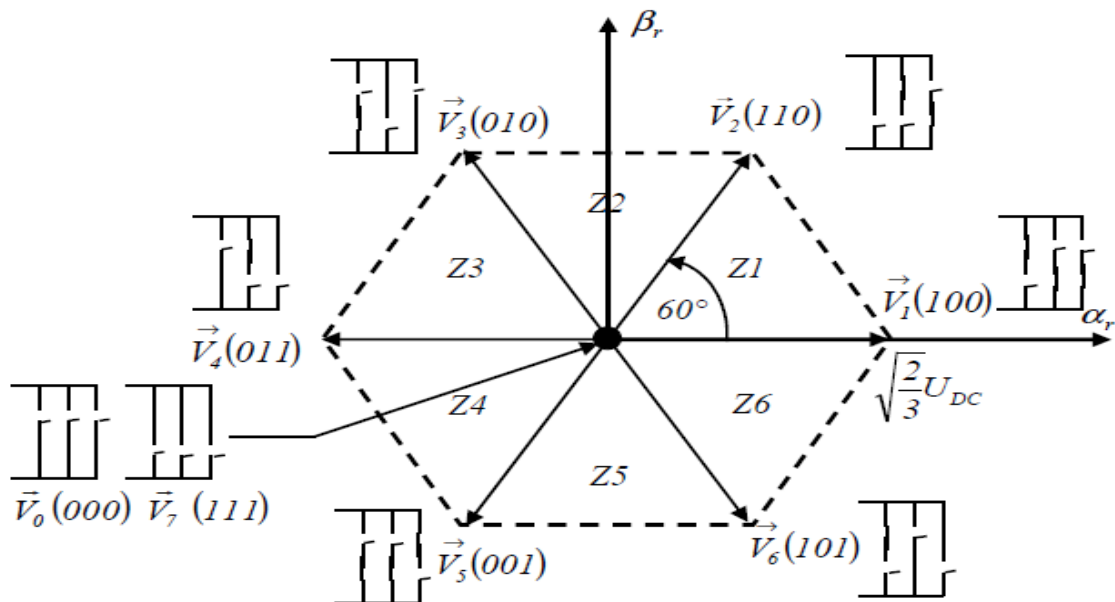
Les comparateurs analogiques présentent un inconvénient notable qui réside dans le fait que la fréquence d’échantillonnage soit variable. Ce problème peut être éliminé en utilisant des comparateurs discrets. Par cela, les variations des puissances ne sont pas maintenues exactement dans la bande d’hystérésis, mais fonctionnent à temps d’échantillonnage fixe [42].

### III.3.3 Elaboration de la table de commutation

Il est mentionné précédemment (figure III.2) que le traitement de la puissance active et réactive est identique en tous points à celui du couple et de flux dans la commande DTC. Donc, un apport en flux rotorique contribue au redressement du facteur de puissance au stator, c'est-à-dire à une diminution de la puissance réactive consommée (positive) par la machine. Cette relation est toujours vraie, quel que soit le mode d'opération de la machine [20], [47].

Pour sélectionner le vecteur de tension rotorique optimum, il faut connaître la position relative du flux rotorique dans les six secteurs (figure III.4). Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes lesquelles engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA.

Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan  $(\alpha_r-\beta_r)$  des vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la figure (III.4).



**Figure III-4: Elaboration du vecteur de tension rotorique à partir des états de commutation de l'onduleur [10].**

La division du plan complexe en six zones angulaires  $Z_i (i = 1, \dots, 6)$  peut être déterminée par la relation suivante :

$$-\frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \quad (\text{III.6})$$

Il en découle que le tableau (III.1) des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur celui de la puissance réactive. Les signaux de  $H_p$  et  $H_q$  ainsi la position de vecteur flux rotorique  $\delta$ , représentent les entrées de cette table de vérité, alors que les états de commutation  $S_a, S_b, S_c$  sont les sorties.

		Comparateur	3 niveaux			3 niveaux			
			2 niveaux			2 niveaux			
		Puissance réactive : $H_Q$		1			-1		
		Puissance active : $H_P$		1	0	-1	1	0	-1
Secteur $Z(i)$ vis-à-vis de l'angle $\delta$	1	$(330^\circ, 30^\circ)$	$V_5$	$V_7$	$V_3$	$V_6$	$V_0$	$V_2$	
	2	$(30^\circ, 90^\circ)$	$V_6$	$V_0$	$V_4$	$V_1$	$V_7$	$V_3$	
	3	$(90^\circ, 150^\circ)$	$V_1$	$V_7$	$V_5$	$V_2$	$V_0$	$V_4$	
	4	$(150^\circ, 210^\circ)$	$V_2$	$V_0$	$V_6$	$V_3$	$V_7$	$V_5$	
	5	$(210^\circ, 270^\circ)$	$V_3$	$V_7$	$V_1$	$V_4$	$V_0$	$V_6$	
	6	$(270^\circ, 330^\circ)$	$V_4$	$V_0$	$V_2$	$V_5$	$V_7$	$V_1$	
$V_0 = [0,0,0]$ ; $V_1 = [1,0,0]$ ; $V_2 = [1,1,0]$ ; $V_3 = [0,1,0]$ ; $V_4 = [0,1,1]$ ; $V_5 = [0,0,1]$ ; $V_6 = [1,0,1]$ ; $V_7 = [1,1,1]$									

Tableau III-1 : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive) [3], [51].

En fait, cette table de commutation (tableau III.1) n'est pas la seule table utilisée par la DPC. Il existe une variété des tables des commutations proposées dans la littérature [45], [51], [52].

Cependant, la réalité fondamentale sur laquelle s'appuie la technique DPC est que le déplacement du flux rotorique dans la machine suit une progression continue dans le temps et qu'il semblera traverser chaque secteur un à un s'il est échantillonné suffisamment. L'étude du tableau (III.1) indique que si le flux rotorique était par exemple dans le secteur 2 et que le vecteur  $V_3$  venait tout juste d'être appliqué, la variation de la puissance réactive mesurée au stator doit inévitablement être négative puisque le vecteur  $V_3$  fait décroître la puissance réactive au stator. S'il n'en avait pas été ainsi, nous serions contraints d'admettre que notre estimation du secteur n'est plus juste et que le flux serait plutôt dans le secteur 1 ou 5. Etant donné qu'il était précédemment dans le secteur 2, il serait peu probable qu'il soit maintenant dans le secteur 5, puisqu'il aurait « sauté » par-dessus deux autres secteurs. Le synopsis précédent peut être représenté à l'aide des tableaux de références (tableau III.2 et tableau III.3) basés sur le tableau III.1 [3].

	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$
Secteur 1	0	0	-	+	0	+	-	0
Secteur 2	0	-	0	-	+	0	+	0
Secteur 3	0	+	-	0	-	+	0	0
Secteur 4	0	0	+	-	0	-	+	0
Secteur 5	0	+	0	+	-	0	-	0
Secteur 6	0	-	+	0	+	-	0	0

Tableau III-2: Suivi de la variation de la puissance réactive.

La première table (tableau III.2) de référence vérifie la condition de variation de la puissance réactive. C'est-à-dire qu'elle vérifie si la variation de puissance réactive mesurée au stator correspond bien à celle anticipée pour le secteur et le vecteur courant (actuel).

En réponse à la table de vérification de variation de puissance réactive, dans le cas où il y a incohérence entre la valeur anticipée et celle mesurée, le tableau III.3 suggère une modification du secteur en cours. Par exemple, reprenons notre exemple précédent où nous supposons que le flux se situe dans le secteur 2 et où, suite à l'application du vecteur 3, la variation de puissance réactive au stator a été trouvée positive, ce qui est en contradiction avec le tableau III.2. À cet effet, le tableau III.3 suggère de décrémenter (-1) le secteur en cours. Si l'on se réfère à nouveau au tableau III.3, pour le secteur 1 et le vecteur 3, la variation anticipée de puissance réactive concorde maintenant avec celle mesurée.

	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$
Secteur 1	0	0	-1	+1	0	-1	+1	0
Secteur 2	0	+1	0	-1	+1	0	-1	0
Secteur 3	0	-1	+1	0	-1	+1	0	0
Secteur 4	0	0	-1	+1	0	-1	+1	0
Secteur 5	0	+1	0	-1	+1	0	-1	0
Secteur 6	0	-1	+1	0	-1	+1	0	0

**Tableau III-3: Table de mise à jour des secteurs.**

Alors, en cas de divergence, le secteur actuel doit être mis à jour selon le tableau III.3 [45], [47], [51], en déplaçant sa position dans le sens horaire (-1), ou dans le sens antihoraire (+1), ou tout simplement de maintenir sa position précédente (0). Dans ce cas, la période échantillonnage de la DPC doit être suffisamment faible pour ne jamais perdre le passage du flux rotorique entre deux secteurs adjacents. Cependant il peut noter que, dans un secteur quelconque, par exemple dans le  $i^{\text{ème}}$  secteur, les vecteurs  $V_i$  et  $V_{i+3}$  ne sont pas appliqués. Suite à ces conclusions, le tableau III.1 peut être repris en termes de puissance active et réactive afin d'obtenir le tableau III.4 ci-dessous.

Variable	Augmentation	Diminution
Puissance réactive	$V_{i+2}, V_{i-2}$	$V_{i+1}, V_{i-1}$
Puissance active	$V_{i-2}, V_{i-1}$	$V_{i+1}, V_{i+2}$

**Tableau III-4: Table généralisée des vecteurs de tension d'une commande par DPC.**

### III.4 DPC par la modulation vectorielle (DPC-SVM)

Dans cette section, nous examinerons une méthode modifiée du contrôle directe de puissance de la MADA. Cette commande diffère de la commande DPC-C par l'utilisation d'une modulation

vectorielle (également connue sous le nom de SVM pour Space Vector Modulation). La modulation vectorielle est utilisée afin d'assurer un fonctionnement à fréquence de modulation constante pour le convertisseur coté machine (CCM).

Dans cette stratégie de commande, la puissance active et réactive sont régulés par deux régulateurs de type PI classique en utilisant l'algorithme « SVM », alors, la table de commutation et les correcteurs à hystérésis ont été éliminés [53].

Cette commande DPC-SVM possède les avantages du contrôle vectoriel et du DPC classique pour surpasser le problème des fluctuations au niveau des puissances et des courants générés par la MADA au réseau électrique. Les régulateurs proportionnel-intégral (PI) et la technique de modulation vectorielle sont donc employés pour obtenir une fréquence de commutation fixe et moins de pulsations des puissances [3].

### III.4.1 Principe de la MLI vectorielle « SVM »

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possible du vecteur tension de référence. Cette technique de MLI suit les principes suivants [10] :

- Echantillonnage du signal de référence à intervalles réguliers  $T_e$  appelé période de modulation.
- Réalisation dans chaque période de modulation, d'une impulsion de largeur  $T$  centrée sur la période, et dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence au milieu de la période de modulation (MLI symétrique).
- Uniformisation des états de tous les interrupteurs d'un même demi-pont au centre et aux deux extrémités de la période.

Puisque le vecteur de commande de l'onduleur  $\vec{V}_r$  possède trois composantes booléennes et que chaque composante peut prendre le niveau 0 ou 1, donc il existe huit vecteurs de commande distincts. En adoptant le schéma équivalent simplifié où chaque bras est représenté par un interrupteur bipolaire, on définit les configurations possibles de l'onduleur (figure III.5). Les huit états définissent six vecteurs spatiaux non nuls limitant les six secteurs  $Z(i)$  ( $i=1,\dots,6$ ) et deux états de pause dans le plan  $(\alpha_r - \beta_r)$  (voir figure III.6). Les vecteurs des tensions sont représentés par la relation suivante :

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} & i = 1, \dots, 6 \\ \mathbf{0} & i = 0, 7 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Le principe de MLI vectorielle, consiste donc à projeter le vecteur de tension rotorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de convertisseur coté rotor (figure III.5) [54].

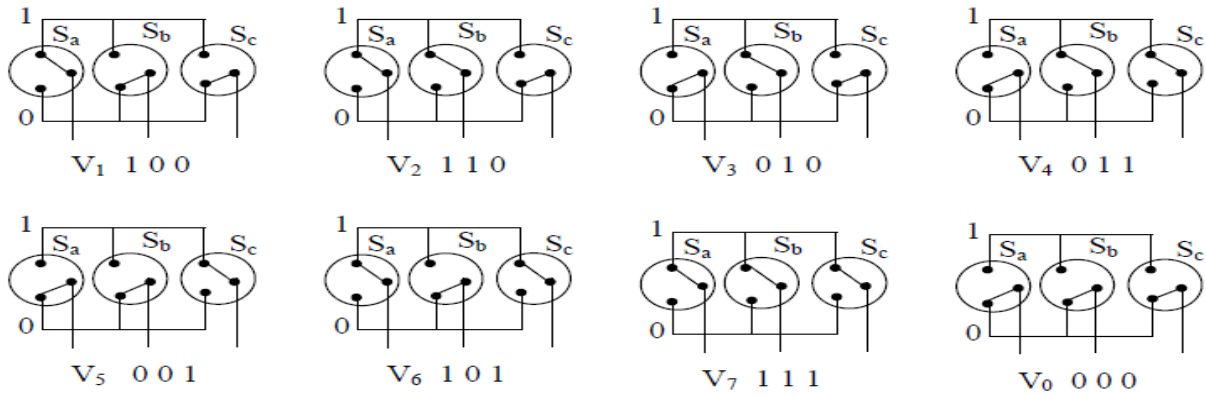


Figure III-5: États des interrupteurs pour chaque vecteur de tension.

Les valeurs de ces projections assurant le calcul des temps de commutations désirées correspondent à deux états non nuls de commutation du convertisseur. Si nous notons  $T_i$  et  $T_{i+1}$  ces deux temps, leur somme doit être inférieure à la période  $T_e$  de commutation du convertisseur. Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul du convertisseur CCM est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_e$  [54].

Un vecteur de tension de référence  $V_{r\_ref}$  est calculé globalement et approximé sur une période de modulation  $T_e$  par un vecteur de tension moyen  $V_{r\_moy}$ , ce dernier est élaboré par l'application des vecteurs tensions adjacents et des vecteurs nuls  $V_0$  et  $V_7$ . Les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan  $(\alpha_r - \beta_r)$  par la figure (III.6).

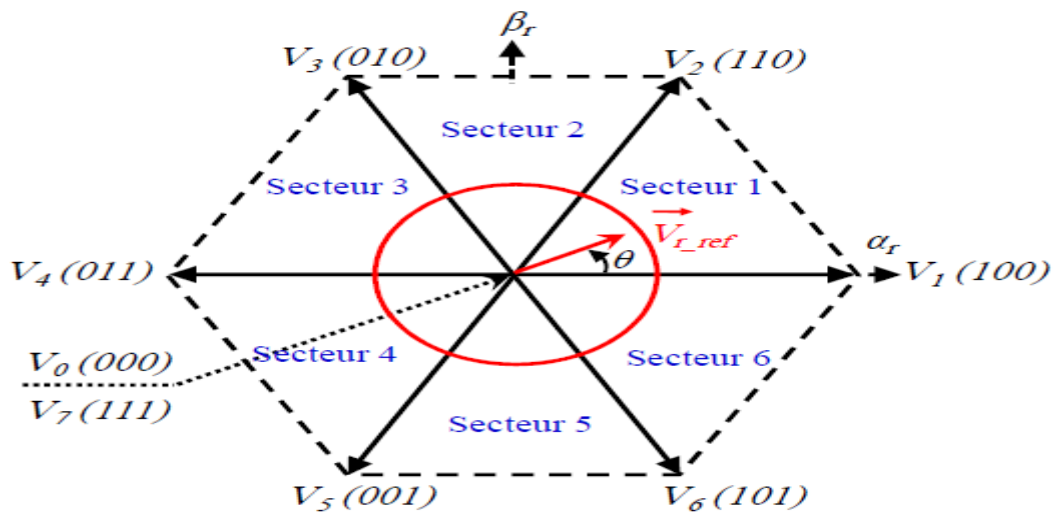


Figure III-6: Représentation des vecteurs de tension dans le repère  $(\alpha-\beta)$  [10].

La figure (III.7) représente le cas où le vecteur référence se trouve dans le secteur 1 et les vecteurs adjacents sont représentés par  $V_1$  et  $V_2$ . La MLI vectorielle (SVM) consiste à projeter le vecteur de tension rotorique de référence désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant  $V_1$  et  $V_2$ . Si nous notons par  $T_1$  et  $T_2$  les deux temps d'application de ces vecteurs,  $T_0$  le temps d'application des vecteurs nuls, leur somme doit être inférieure à la période de commutation du CCM [10].

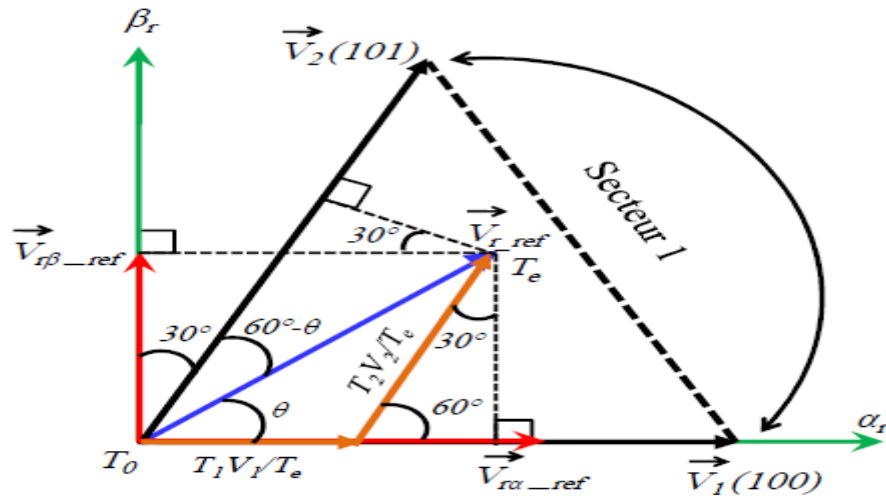


Figure III-7: Décomposition d'un vecteur de tension de référence  $V_{r\_ref}$  .

Dans le cas du secteur 1 (figure III.7), le vecteur de tension référence moyenne est donné comme suit:

$$V_i = \begin{cases} V_{r\_ref} T_e = T_0 V_0 + T_1 V_1 + T_2 V_2 \\ T_e = T_0 + T_1 + T_2 \end{cases} \quad (III.8)$$

Où :

$T_e$  : Représente la période de commutation ;

$T_1$  : Temps d'application du vecteur  $V_1$  ;

$T_2$  : Temps d'application du vecteur  $V_2$  ;

$T_0$  : Durée d'application de la séquence de roue-libre.

En supposant qu'initialement, le vecteur  $V_{r\_ref}$  coïncide avec le vecteur  $V_1$ , deux séquences sont actives. La séquence qui correspond au vecteur  $V_1$  est appliquée durant la durée  $T_1$  et la séquence de roue-libre est appliquée durant la durée  $T_0$ . La séquence qui correspond au vecteur  $V_2$  est inactive car la durée  $T_2$  est nulle. Au fur et à mesure que le vecteur  $V_{r\_ref}$  s'éloigne du vecteur  $V_1$  et on s'approche du vecteur  $V_2$ ,  $T_1$  diminue et  $T_2$  augmente. Quand le vecteur  $V_{r\_ref}$ , atteint le vecteur  $V_2$ ,  $T_1$  sera nul et  $T_2$ , sera maximale.

❖ **Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM)**

- 1) Détermination des vecteurs des tensions de références ( $V_{r\alpha}$   $V_{r\beta}$ ).
- 2) Détermination des secteurs.
- 3) Calcul des temps de commutation.
- 4) Génération des séries d'impulsions  $S_a, S_b$  et  $S_c$  .

III.4.2 Résultats de simulation de la commande DPC-SVM

Pour approuver la commande proposée (DPC-SVM) appliquée au système éolien (coté rotor). La structure de la commande DPC-SVM est représentée par le schéma bloc de la figure (III.8).

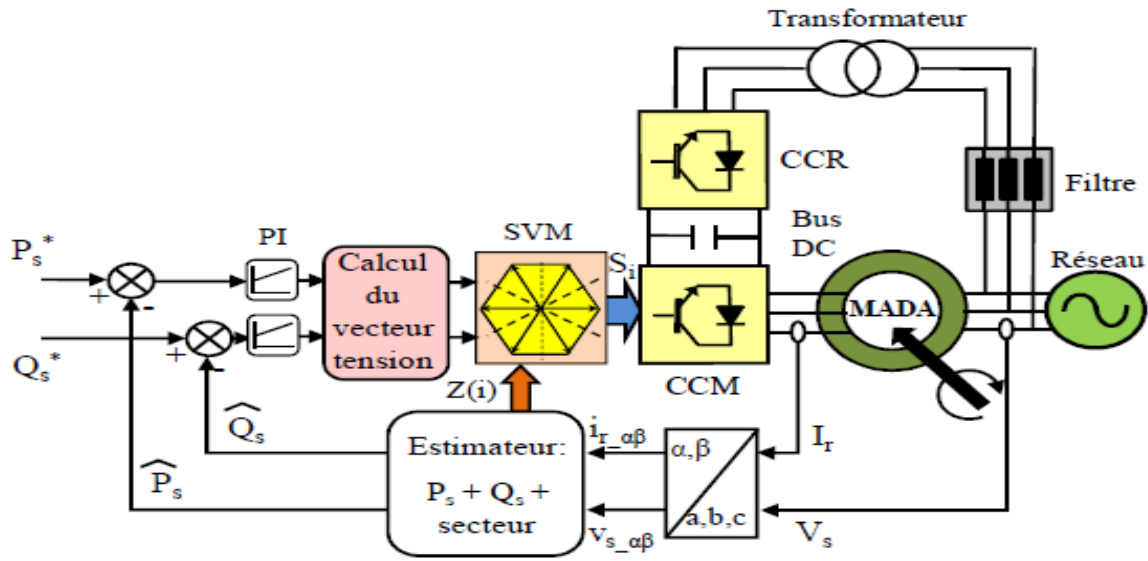


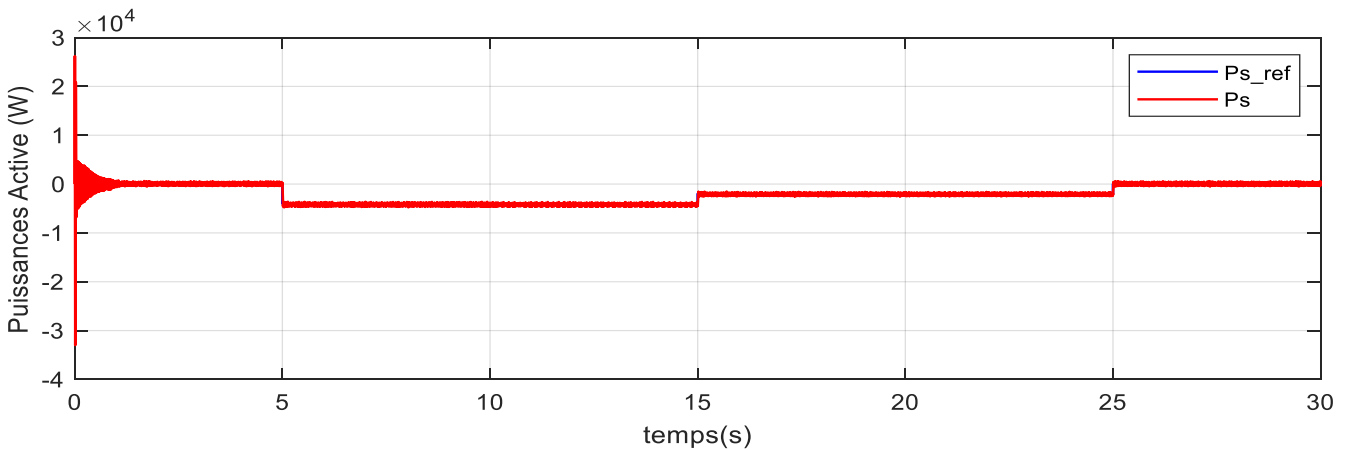
Figure III-8: Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA [10].

Dans cette partie la commande DPC-SVM de la MADA a été testée par simulation sous le logiciel MATLAB/Simulink. Deux types de tests ont été appliqués au système de la figure (III-8) afin d’observer le comportement de cette stratégie de contrôle :

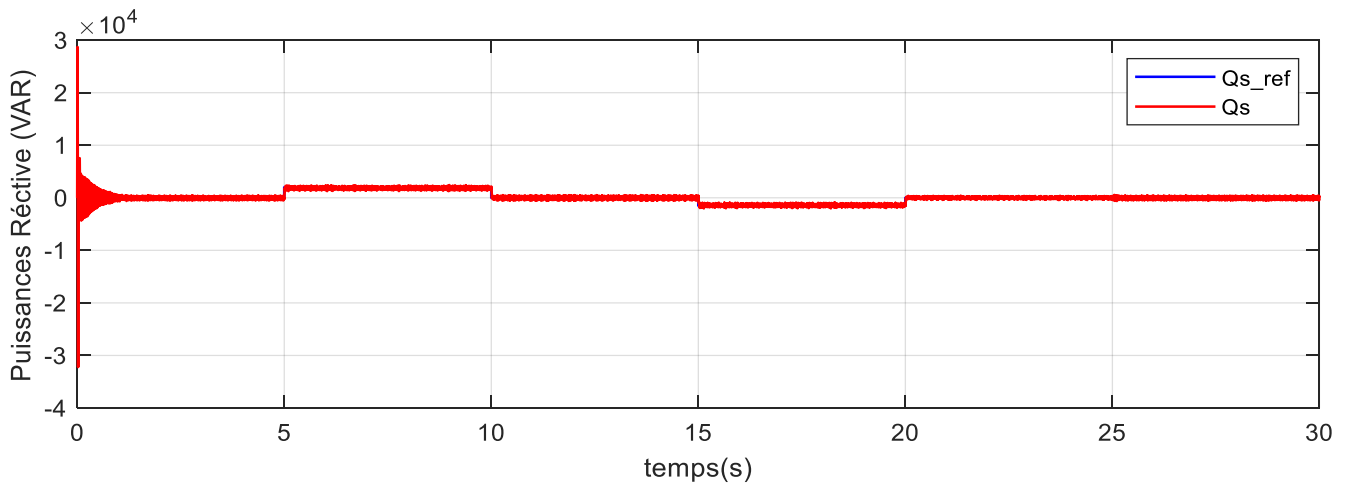
- 1- A vitesse du vent fixe ;
- 2- A vitesse du vent variable (avec contrôle MPPT).

III.4.3 Fonctionnement à vitesse du vent fixe

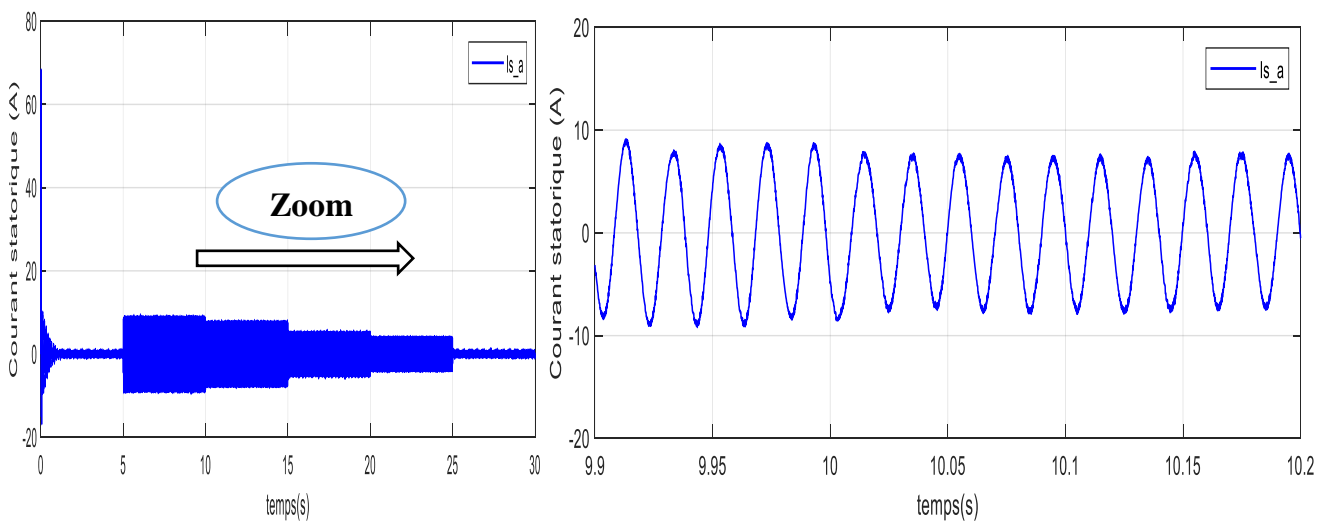
Dans cet essai, nous avons appliqué au système éolien une vitesse du vent fixe égale 9.5 m/s. Donc ce premier essai consiste à imposer des échelons de la puissance active et réactive, ce qui nous permet de vérifier le découplage entre les deux puissances de la MADA.



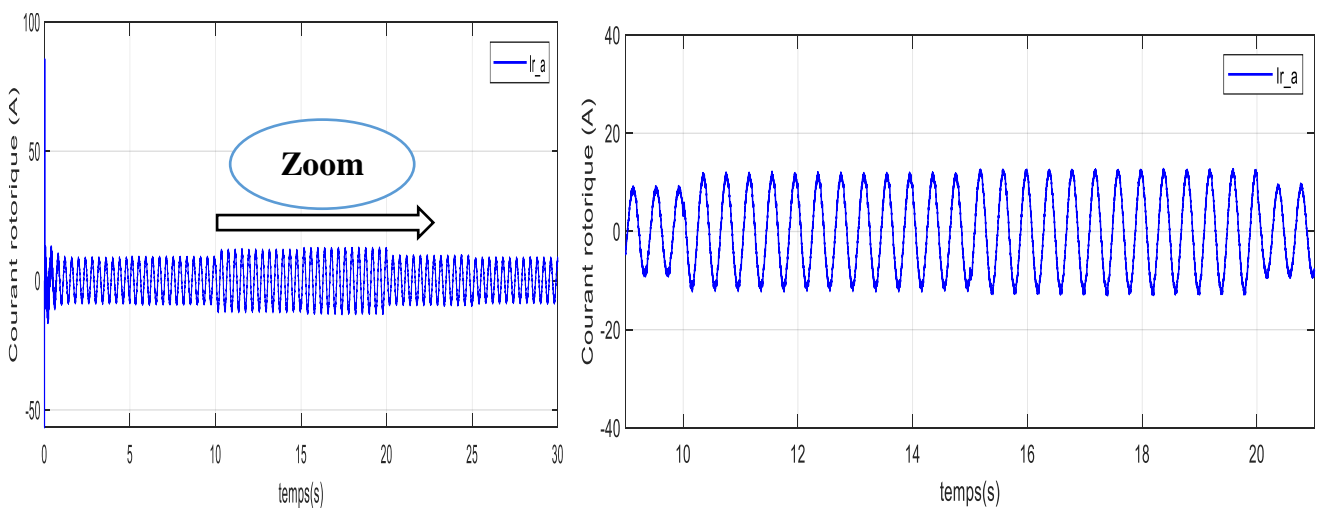
a) La puissance active statorique



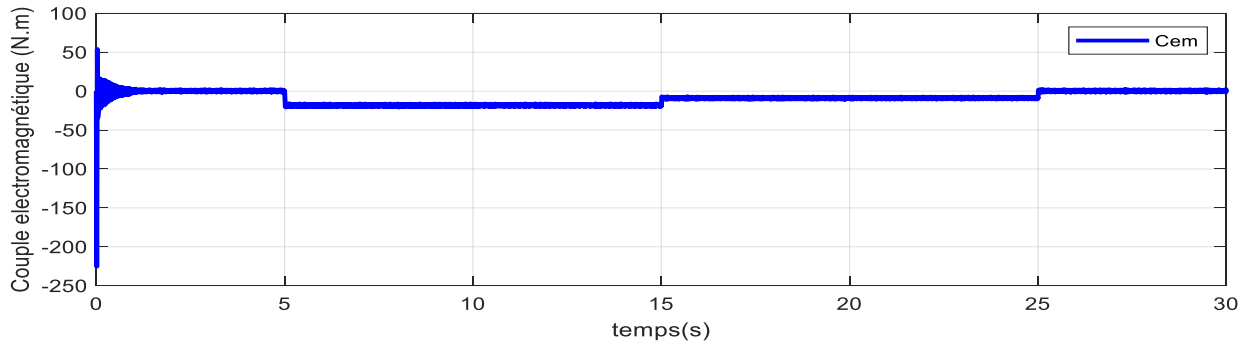
**b) La puissance réactive statorique**



**c) Le courant statorique de phase a**



**d) Le courant rotorique de phase a**



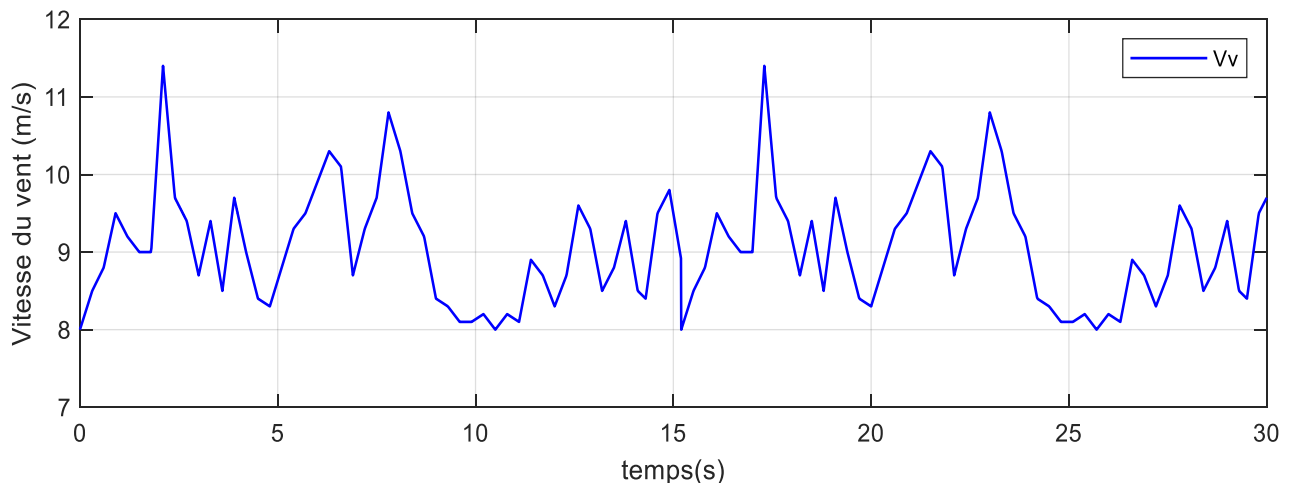
e) Couple électromagnétique de MADA

**Figure III-9: Résultats de simulation de la DPC-SVM de la MADA pour vitesse du vent fixe.**

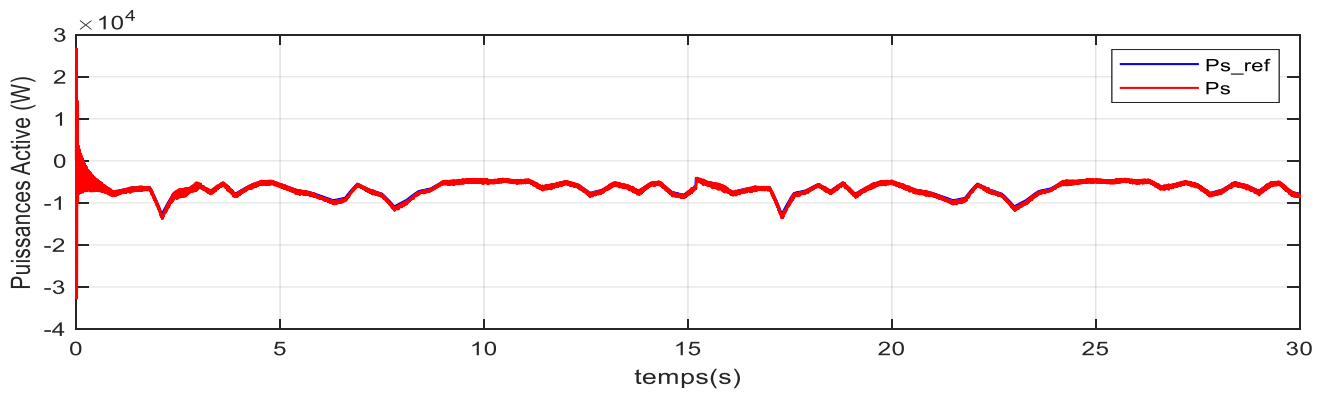
#### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus à la figure (III-9) montrent que la stratégie DPC-SVM réalisée est capable de fournir de bonnes performances. On peut dire d'après les résultats que le découplage entre la puissance active et réactive est toujours réalisé avec des grandes performances (suivi des consignes, temps de réponse très rapide, erreur statique minimale). Les allures des courants statorique et rotorique dans la figure III.9-c et III.9-d, nous a donné une aide claire sur la réduction de taux d'harmonique des puissances et des courants injectés par la MADA dans le réseau électrique. Ces courants présentent moins d'ondulations, avec des formes sinusoïdales, ceci est due à la fréquence de commutation fixe imposée aux interrupteurs par la technique SVM. La figure (III.9-e) montre l'allure du couple électromagnétique de la MADA, ce dernier représente une image de la puissance active.

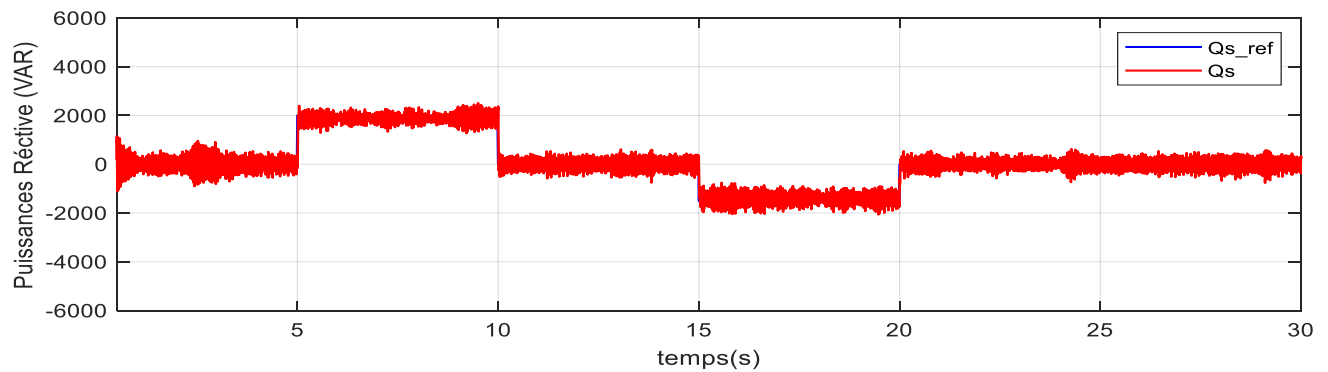
#### III.4.4 Fonctionnement à vitesse du vent variable (contrôle MPPT)



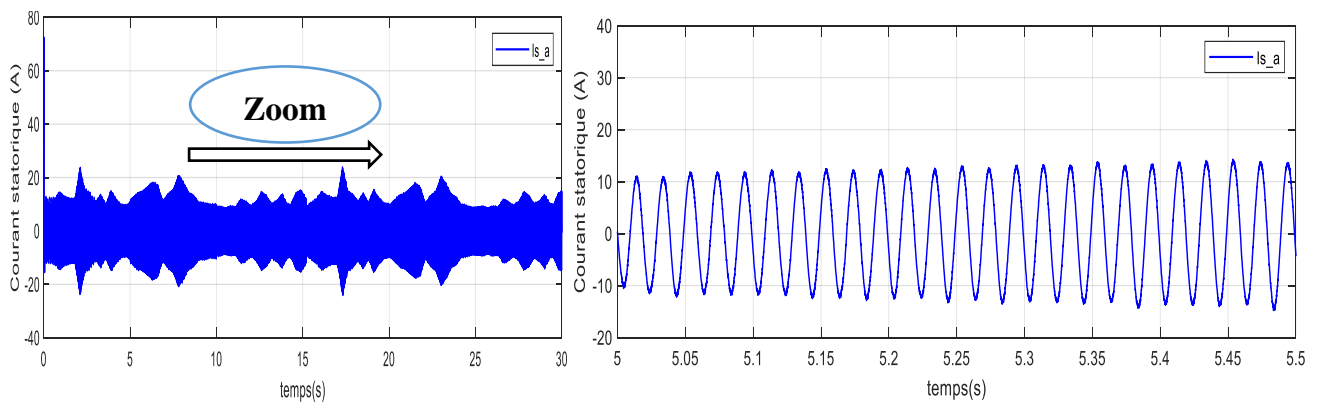
a) Profil du vent appliqué au système



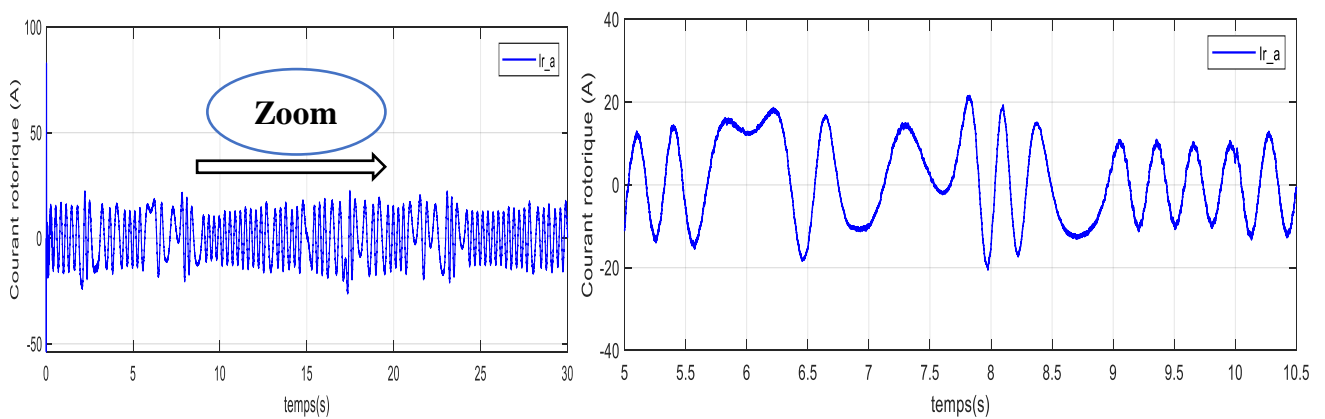
b) La puissance active statorique



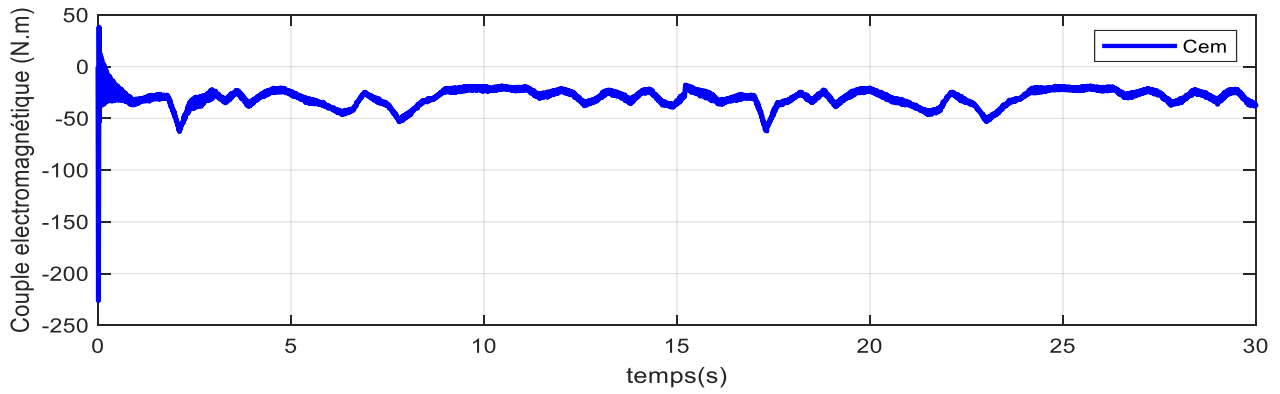
c) La puissance réactive statorique



d) Courant de phase statorique a



e) Courant de phase rotorique a



#### f) Couple électromagnétique

**Figure III-10: Résultats de simulation de la DPC-SVM de la MADA pour vitesse du vent variable.**

#### ❖ Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation obtenus à la figure (III-10), on constate que la puissance active suit sa référence générée par le bloc MPPT avec une dynamique très rapide et des harmoniques plus faibles. La consigne de puissance réactive est souvent maintenue à zéro afin d'assurer un facteur de puissance unitaire et d'améliorer la qualité de l'énergie restituée au réseau. Ces résultats de simulation montrent les grandes performances de la DPC-SVM développée. Les objectifs, à savoir la minimisation des pulsations des puissances et les harmoniques des courants présentés par la commande DPC-C sont achevés.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'apport de la loi de commande DPC pour le découplage entre la puissance active et réactive de la MADA. La DPC classique (DPC-C) offre des hautes performances dynamiques avec une structure simple. Cependant, cette stratégie de contrôle due à la fréquence de commutation variable présente un inconvénient majeur, qui est les oscillations des puissances et les harmoniques des courants élevée générés par la MADA. Afin de fixer la fréquence de commutation des interrupteurs du convertisseur coté machine « CCM » et dont le but de réduire les ondulations des puissances et les harmoniques des courants délivrées par la MADA au réseau électrique, la technique MLI vectorielle (SVM) a été combinée avec la DPC. Selon les résultats de simulation obtenus, la DPC-SVM fournit une solution en évitant les inconvénients de la DPC classique (DPC-C). Ainsi, l'objectif commun de cette stratégie de contrôle (DPC-SVM) a été achevé, à savoir : le prélèvement des courants sinusoïdaux, tout en réduisant le taux d'harmoniques et en assurant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive.

---

# **CONCLUSION**

# **GÉNÉRALE**

---

## *Conclusion générale*

Le travail ici présenté avait pour principal objectif d'étudier, modélisé, et de réaliser par la simulation numérique une commande directe de puissance (DPC) d'une MADA intégrée dans un système éolien, en vue d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Afin d'atteindre cet objectif, Le premier chapitre de ce travail a été consacré au recueil des généralités sur les systèmes éoliens, nous avons présenté quelques notions sur l'énergie éolienne ainsi que les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons abordé les modes de fonctionnement des systèmes éoliens ainsi que leurs avantages et inconvénients, les stratégies de régulation de leur puissance et la production optimale de l'énergie, jusqu'aux systèmes de stockage.

Dans le deuxième chapitre, on a mené une modélisation globale de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation. Au début, nous avons fait une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa description, ses classifications, son principe de fonctionnement et tout ce qu'il faut savoir à la base, jusqu'à ses domaines d'application, en particulier dans notre domaine de travail. Ensuite, Les modèles analytiques des différents constituants du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA ont été établis en adoptant un modèle simplifié de cette dernière, Nous avons également simulé séparément chacune de la turbine éolienne avec sa stratégie de contrôle (MPPT indirecte) et le générateur (GADA), les résultats ont montré ce qui suit : pour la turbine avec l'MPPT, les résultats nous ont permis de vérifier l'efficacité et la fiabilité de stratégie de contrôle MPPT. Pour la partie génératrice, les résultats de simulation ont montré la variation des grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques, ce qui nous permet de bien comprendre son comportement, puis d'appliquer la commande pour augmenter l'efficacité et le rendement.

Dans le troisième chapitre, on a proposé la stratégie de contrôle DPC (Direct Power Control) appliquée au convertisseur CCM de MADA et qui est initialement inspirée du contrôle direct du couple (DTC). La stratégie DPC classique (DPC-C) propose de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à l'aide des comparateurs à hystérésis et une table de commutation. Cette stratégie de contrôle possède des inconvénients, tels que : la fréquence de commutation variable et les fluctuations de puissances. Donc pour s'affranchir des contraintes sévères de temps de calcul et améliorer les inconvénients du contrôle DPC-C, nous avons choisi une technique DPC-SVM qui repose sur l'utilisation d'une modulation MLI vectorielle (SVM). Les tests de simulation montrent les améliorations apportées par la DPC-SVM par rapport à la DPC classique (DPC-C) dans la commande du système de conversion d'énergie éolienne.

**ANNEXES****Paramètres du système éolien**

1. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée [1]:

Paramètres de la turbine	Symboles	Valeur numérique
Puissance nominale	$P_n$	5 KW
Nombre des pales	$N_p$	3
Diamètre d'une pale	$R$	3m
Gain du multiplicateur	$G$	5.4
Inertie	$J_t$	3.15 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	$f$	0.0024 N.m.s/rd
Vitesse du vent de démarrage	$v_{min}$	3 m/s
Vitesse du vent de l'arrêt	$v_{max}$	25 m/s

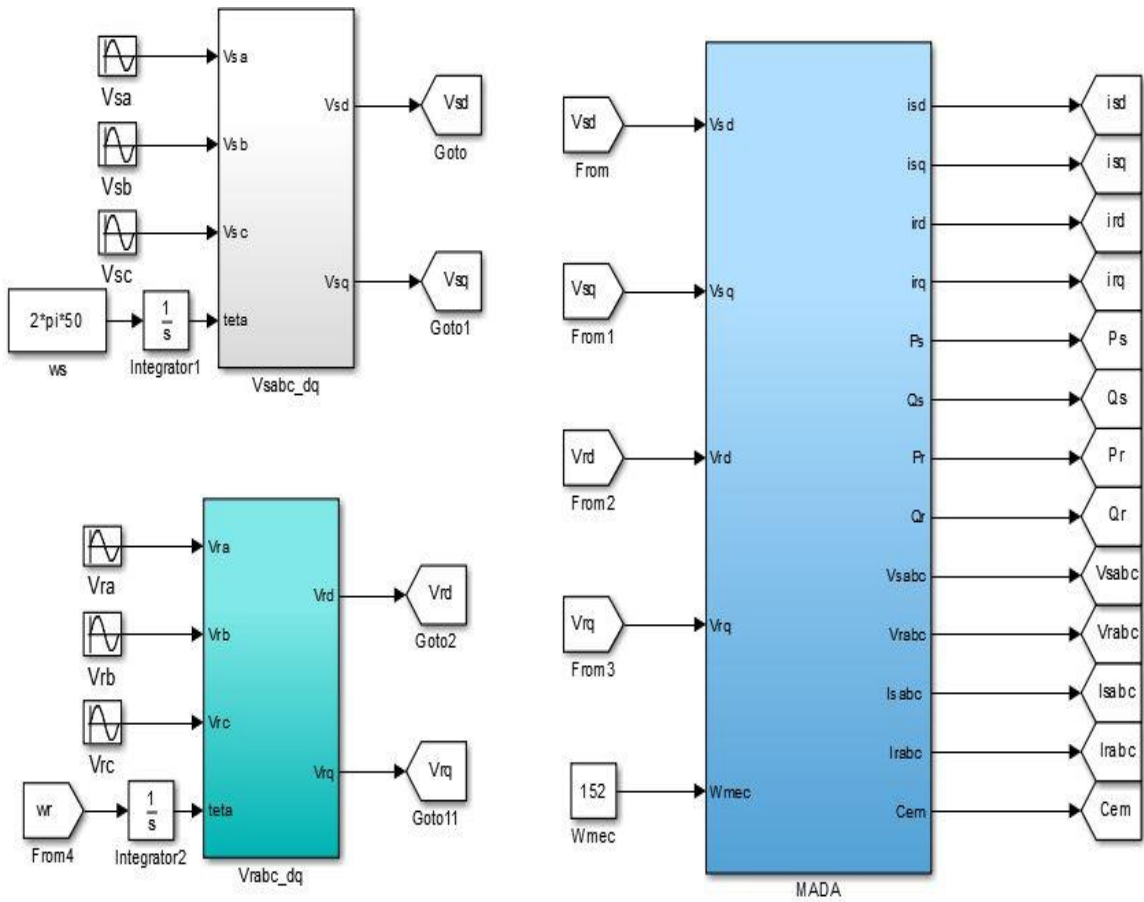
**Tableau A-1: Paramètres de la turbine éolienne.**

2. Les paramètres de la machine asynchrone double alimentée [1]:

Paramètres de la machine	Symboles	Valeur numérique
Puissance nominale	$P_n$	4 KW
Tension nominale	$v/U$	220/380V
Courant nominal	$i/I$	15/8.6 A
Fréquence nominale statorique	$f$	50 Hz
La vitesse nominale	$\Omega_n$	1440 tr /min
Nombre de paires de pôles	$P$	2
Résistance du stator	$R_s$	1.2 $\Omega$
Résistance du rotor	$R_r$	1.8 $\Omega$
Inductance du stator	$L_s$	0.1554 H
Inductance du rotor	$L_r$	0.15 68 H
Inductance Mutuelle	$M$	0.15 H
Moment d'inertie	$J$	0.2 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement visqueux	$f$	0.001N. m. s/rd.

**Tableau A-2: Paramètres de la MADA.**

3. Le modèle de la GADA sous Simulink/MATLAB.



## ***Références Bibliographiques***

- [1] BELOUNIS Ouassila, « Gestion optimale d'une MADA associée à une éolienne », Thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie, 2017.
- [2] Dekhane Azzedine, « Modélisation et contrôle d'une chaîne éolienne de conversion de l'énergie » Thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie, 2017.
- [3] YAICHI Ibrahim, « Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA » Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 2019.
- [4] TOUAL Belkacem, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [5] MOREAU Luc, « Modélisation, Conception et Commande de génératrices à reluctance variable basse vitesse », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2005.
- [6] MURDOCK, Hannah E., et al. , « Renewables 2021-Global status report. », 2021.
- [7] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, and M. Narimani, « High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies », *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 5, p. 740–788, 2015.
- [8] ZOUGGAR El Oualid, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones », Thèse de doctorat, Université de Batna2, Algérie, 2021.
- [9] Guerri Ouahiba, « L'énergie éolienne en Algérie: un bref aperçu », *Bulletin des Energies Renouvelables*-N° 21, 2011.
- [10] Djeriri Youcef, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 2015.
- [11] ROUMMANI Khayra, « Contribution à des commandes robustes à des sources d'énergie nouvelle et à leur connexion aux réseaux électriques », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf USTOMB, Algérie, 2020.
- [12] YAICHI Hayat, GUENDOOUZ Sarah, « Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia-ADRAR, Algérie, 2018.
- [13] POITIERS Frédéric, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de L'université de Nantes, France, (2003).
- [14] ALLAM Mohamed, « Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 2017.
- [15] REDJEM Radia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magistère, Université Mentourie De Constantine, Algérie, (2009).
- [16] « Étude d'un aérogénérateur », [http://technicalillustrators.org/files/2009/11/jhatch\\_WindTurbine\\_Orig1.jpg](http://technicalillustrators.org/files/2009/11/jhatch_WindTurbine_Orig1.jpg)
- [17] Vestas V52/850 sur [fr.wind-turbine.com](http://fr.wind-turbine.com)
- [18] BRAHIMI Oussama, MECHERNENE Mohammed Walid, « Commandes d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une chaîne éolienne », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd–Tlemcen, Algérie, 2017.

- [19] KENDOULI Fairouz, « Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique », Thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie, 2012.
- [20] BOUMARAF Farid, « Commande d'un aérogénérateur-Aport des techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de Magister, Université de Batna 2, Algérie, 2014.
- [21] Armand Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2006.
- [22] Billah, Md Maruf, Mehran Motamed Ektesabi, and Nasser Hosseinzadeh. « Modelling and Simulation of Fuzzy-PI Control System for a Variable Speed Wind Power Generator », A thesis submitted for the fulfillment of a Master of Engineering, Swinburne University of Technology Hawthorn, Victoria, Australia, 2012.
- [23] Abu-Tabak Nesmat, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines: modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2008.
- [24] MAYOUF Messaoud, « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2014.
- [25] BENKHALED Bilal, « Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, Algérie, 2013.
- [26] BEN AMAR Asma, « ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA », Mémoire de Magister, Université de Batna 2, Algérie, 2016.
- [27] Belounis Ouassila, and Hocine Labar, « Fuzzy sliding mode controller of DFIG for wind energy conversion », International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.10, N°2, p: 163-172, 2017.
- [28] ZEMMIT Abderrahim, « Commandes en Tension d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, Algérie, 2013.
- [29] KRIM Soufiane, HACHI Elkhier, « Commande Hybride Glissant Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, Algérie, 2019.
- [30] Paul-Etienne Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [31] Bebboukha Ali, Hechifa Abdel Moumene, Sakhr yahya yahya naji, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à double alimentation (MADA) », Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Algérie, (2020).
- [32] Ben kadem Somia ,Ben mebarek Dalila, « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia-Adrar, Algérie, 2018.
- [33] Gaillard Arnaud, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, France, 2010.
- [34] BEKAKRA Youcef, « Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 21/10/2014.
- [35] ROUABHI Riyadh, « Étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application: énergie éolienne », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-SETIF, Algérie, 2012.

- [36] GHENNAM Tarak, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille de France et de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [37] KERBOUA Abdelfettah, « Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 2013.
- [38] CHERFIA Naim, « Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne », Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, Algérie, 2018.
- [39] ZEGHLACHE Hemza, BETKA Khalid, « Etude Comparative Entre Différents Techniques de Commande Appliquée sur un Système Eolien à Vitesse Variable à Base d'une MADA », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, Algérie, 2019.
- [40] Z. Gadouche, C. Belfedal, T. Allaoui, B. Belabbas, « Commande de Puissance Active et Réactive d'une MADA utilisée dans un système éolien », 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa–Algérie Octobre (2014): 13-14.
- [41] ROUABHI Riyadh, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2016.
- [42] MASSOUM Sarra, « Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2018.
- [43] MEHDI Adel, « Contribution à l'étude des redresseurs à commande par DPC pour une qualité de l'énergie », Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, Algérie, 2017.
- [44] GHOUZILI A, ACHOUR D, and BENBOUHENNI H, « Etude comparative entre la commande DPC, DPC-HYN et DPC-RNA de la GSAP », Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No.2, p. 735-752, 2018.
- [45] Y. DJERIRI, A. MEROUFEL and Z. BOUDJEMA, « Direct power control of a doubly fed induction generator based wind energy conversion systems including a storage unit », Journal of Electrical Engineering, Vol.14, No.2,p. 1-8, 2014.
- [46] A. Lopez De Heredia Bermeo, « Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie: de la basse tension à la montée en tension », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, France, 2006.
- [47] TREMBLAY Etienne, « Contribution à la commande de l'éolienne à MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique », M. ING, École de technologie supérieure, Montréal, Canada, 2009.
- [48] YAICHI I, SEMMAH A, and WIRA P., « Control of doubly fed induction generator with maximum power point tracking for variable speed wind energy conversion systems », Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 64, No.1, p. 87-96, 2020.
- [49] Yaichi Ibrahim, Abdelhafid Semmah, and P. Wira, « Direct power control of a wind turbine based on doubly fed induction generator », European Journal of Electrical Engineering, Vol. 21, No.5, p. 457-464, October 2019.
- [50] Benbouhenni Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi, « DPC based on ANFIS super-twisting sliding mode algorithm of a doubly-fed induction generator for wind energy system », Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 53, No.1, p. 69-80, February 2020.

- [51] R. Datta, and V.T. Ranganathan, « Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors », In: IEEE Trans. Power Electron., Vol.16, No.3, p.390-399, May 2001.
- [52] L. Xu, P. Cartwright, « Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation »; IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.2, No.3, p.750-758, September 2006.
- [53] C. Belfedal, S. Moreau, G. Champenois, T. Allaoui and M. Denai, « Comparison of PI and Direct Power Control with SVM of Doubly Fed Induction Generator »; Istanbul University, Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 8, No.2, p. 633-641, 2008.
- [54] YOUSFI Ismail, BAKOU Ebd Elhakim, « commande direct du couple DTC-SVM d'une GADA intégré dans un système éolien », Mémoire de Master, UNIVERSITE AHMED DRAYA-ADRAR, Algérie, 2021.
- [55] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum and H. Hammoumi, « Using space vector modulation technique to improve direct power control strategy of doubly fed induction generator based wind energy conversion systems » ; 7th International Conference on Electrical Engineering, Batna, Algérie, p.481-487,08-10, October 2012.

**Résumé :**

Le but principal du travail présenté dans ce mémoire est l'étude de la modélisation et le contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée directement au réseau par son stator et pilotée par son rotor par deux convertisseurs statiques. L'idée consiste à implémenter un système de contrôle découplé de la MADA pour assurer une meilleure qualité d'énergie et rendre le système insensible aux perturbations. Après la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne complète avec l'utilisation de la commande MPPT indirecte, une technique DPC classique est proposée pour le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA à l'aide des comparateurs à hystérésis et une table de commutation. Cependant, la présence des correcteurs à hystérésis pose le problème de fluctuations sur les différentes grandeurs de sortie de la MADA. La technique MLI vectorielle (SVM) a été combinée avec DPC pour remédier ce problème. Les résultats de simulation obtenus montrent les améliorations apportées par la technique DPC-SVM par rapport à la technique DPC classique.

**Mots clés :**

Energie renouvelable, Turbine éolienne, MADA, MPPT, DPC, DPC-SVM.

**ملخص :**

الهدف الرئيسي من العمل المقدم في هذه المذكرة هو دراسة النمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية (MADA) متصلة مباشرة بالشبكة عن طريق الجزء الثابت بينما الدوار فهو مغذى بواسطة محولين ثابتين. تكمن الفكرة في تطبيق نظام تحكم منفصل عن MADA لضمان جودة أفضل للطاقة وجعل النظام غير حساس للاضطرابات. بعد نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح كاملة مع وحدة التحكم غير المباشر MPPT، تم اقتراح تقنية DPC الكلاسيكية للتحكم في القدرة النشطة والمتفاعلة لـ MADA باستخدام مصححات التباطؤ وجدول التبديل. ومع ذلك، فإن وجود مصححات التباطؤ يثير مشكلة التقلبات في كميات الإنتاج المختلفة من MADA. تم دمج تقنية (SVM) مع DPC لمعالجة هذه المشكلة. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها التحسينات التي أدخلتها تقنية DPC-SVM مقارنة بتقنية DPC الكلاسيكية.

**كلمات مفتاحية:**

الطاقة المتجددة، توربينات الرياح، MADA، MPPT، DPC، DPC-SVM.

**Abstract :**

The main purpose of the work presented in this thesis is the study of the modelling and control of a wind energy conversion system based a doubly fed induction machine (DFIM) connected directly to the grid by its stator and controlled by its rotor by back-to-back converter. The idea consists to implement a decoupled control system of the DFIM to ensure a better quality of energy and make the system insensitive to disturbances. After modelling the complete wind energy conversion chain with operation of the indirect MPPT control, a conventional DPC technique is proposed for the control of the active and reactive power of the DFIM using hysteresis comparators and a switching table. However, the presence of hysteresis correctors poses the problem of fluctuations on the different output quantities of the DFIM. The vector technique (SVM) has been combined with DPC to address this problem. The simulation results obtained show the improvements made by the DPC-SVM technique compared to the classical DPC technique.

**Key words :**

Wind energy, Wind turbine, DFIM, MPPT, DPC, DPC-SVM.