

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande électriques**

## **THÈME**

**Etude et analyse de l'effet de déséquilibre de  
réseau sur une GADA**

*Préparé par :*  
**Mme BENSALAH. AMEL FATMA Mlle HEROUAL. SAMIRA**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Mr Y.MESSLEM</b>	<b>Pr</b>	<b>Président</b>
<b>Mr B.BELABBAS</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr A.TAHRI</b>	<b>MCB</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr S.KOUADRIA</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Mr A.SAFA</b>	<b>MCB</b>	<b>Co encadreur</b>

**2019-2020**

## REMERCIEMENTS

---

En préambule à ce mémoire, nous remercions **ALLAH** qui nous a aidé et donné la patience et le courage durant cette longue année d'étude.

En essayant continuellement, on finit par réussir. Donc : plus ça rate, plus on a de chances que ça marche." Cette devise s'applique parfaitement au travail de notre mémoire, à la rigueur qu'il faut pour pouvoir apporter sa contribution au monde de la Recherche. C'est grâce à cette qualité qu'il a été possible de rédiger ce mémoire.

Ce travail ne serait pas celui présenté dans ce mémoire sans la contribution de nombreuses personnes que nous tenons à remercier. Nous tenons à remercier tout d'abord le professeur **Mr Y.MESSLEM** de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. Nous remercions également les membres du jury **Mr B.BELABBAS** et **Mr A.TAHRI** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à **Mr S. KOUADRIA** pour avoir dirigé notre travail, pour sa présence, son soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Notre gratitude va aussi à **Mr A. SAFA**, pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

## DEDICACES

---

*Avant tous, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, mes sœurs et mon frère, qui m'ont toujours dirigé vers le chemin de la réussite, qui m'ont soutenu dans toutes mes aventures,*

*Qui m'ont donné l'énergie d'avancer dans la bonne direction. Que ALLAH leurs procure santé et longue vie.*

*Mes sœurs : Imen et Hiba pour leur aide.*

*Mes amis : Manel, Hania et Ismahen pour leurs soutiens et de précieux conseils.*

*HEROUAL Samira*

## DEDICACES

---

*A Mes Parents Qui M'ont Soutenu Pendant Toute La  
Durée De Ces Longues Etudes,*

*A Mon cher Marie pour tout l'encouragement que tu  
m'as offert, merci pour ton soutien plus que précieux.*

AMEL .BENSALAH

# SOMMAIRES

---

## Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	1

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

I-1.Introduction.....	3
I-2.Définition de l'énergie éolienne.....	3
I-3.Principe de fonctionnement d'un système éolien .....	3
I-4. Types d'aérogénérateurs selon leur axe .....	4
I-4-1. Aérogénérateurs à axe vertical .....	5
I-4-2. Aérogénérateurs à axe horizontal .....	5
I-4-2-1- Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal .....	6
I-5. Classification des éoliennes selon la vitesse .....	7
I-5-1. Les éoliennes à vitesse fixe .....	7
I-5-2. Les éoliennes à vitesse variable .....	8
I-6. Intérêt de la vitesse variable.....	9
I-7. Energie éolienne en chiffres.....	10
I-7-1. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde.....	10
I-7-2. Prévision de l'énergie éolienne en 2021 .....	10
I-8. L'énergie éolienne en Algérie.....	12
I-9. Avantages et inconvénients De l'énergie éolienne .....	13
I-9-1. Les Avantages .....	13
I-9-2. Les Inconvénients.....	13
I-10.Conclusion .....	14

### CHAPITRE II: Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

II-1. Introduction .....	15
II-2. Modélisation du vent .....	15
II-3. Modélisation de la turbine éolienne.....	15
II-3-1. Modèle de la turbine à étudier .....	15
II-3-2. Théorème de BETZ.....	16
II-3-3. Calcul de la vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio) .....	17
II-3-4. Coefficient de puissance $C_p$ .....	17
II-3-5. Modèle des pales : .....	17
II-3-6. Modèle de multiplicateur .....	17
II-3-7. Equation dynamique de l'arbre de transmission .....	18

# SOMMAIRES

---

II-4. Stratégie de commande de la turbine.....	18
II-4-1. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	18
III-5. Principe de M.P.P.T. ....	19
III-5-1. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.....	19
II-5-2. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.....	22
II-6. topologie et Modes de fonctionnement de la MADA:.....	23
II-6-1. Structure de la machine à double alimentations.....	23
II-6-2. Modes de fonctionnement de la MADA:.....	24
II-6-2-1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone :.....	24
II-6-2-2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone :.....	24
II-6-2-3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone :.....	24
II-6-2-4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone :.....	24
II-7. Modèle de la GADA dans le repère de Park.....	25
II-8. Conclusion.....	26

## **Chapitre III : Commande De la chaine éolienne à base d'une GADA**

III-1. Introduction.....	27
III-2. Description et architecture du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.....	27
III-3. Commande Vectorielle.....	28
III-3.1. But et principe de la commande vectorielle.....	28
III-3-2. Modèle de la GADA avec orientation du flux statoriques.....	28
III-3-2-1. Choix du référentiel pour le modèle de la GADA dans le repère dq.....	28
III-4. Commande du convertisseur côté MADA (CCM).....	32
III-5. Commande des puissances actives et réactives de la GADA.....	33
III-5-1. Commande vectorielle directe.....	33
III-5-2. Commande vectorielle indirecte.....	33
III-5-2-1. Commande Indirecte sans Boucles des Puissances.....	34
III-5-2-2. Commande Indirecte avec boucle de puissances:.....	34
III-6. Commande du convertisseur coté réseau (CCR) :.....	35
III-7-1. la tension du Bus continu $V_{bus}$ .....	36
III-7-1-1. Contrôle du Bus continu $V_{bus}$ .....	36
III-8. Synthèse du régulateur PI.....	37
III-9. Simulation du système éolien basé sur une GADA.....	37
III-10. Résultats de simulations.....	38
III-12. Interprétations des Résultats.....	45
III-12. Conclusion.....	45

# SOMMAIRES

---

## Chapitre IV : Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

IV-1. Introduction.....	46
IV-2. Transmission de l'énergie éolienne.....	46
IV-3. Les types de problème d'alimentation .....	46
IV-3-1. Les harmoniques de Tension .....	46
IV-3-2. Tension déséquilibrée du réseau .....	47
IV-3-3. LVRT (Low Voltage Ride Through).....	48
IV-3-3 -1 Examen des technologies LVRT basées sur la GADA .....	48
IV-4. Protection de GADA à l'aide du jeu de barre.....	49
IV-5. Simulation de la chaîne éolienne intégrée dans un réseau déséquilibré.....	50
IV-6. Conclusion .....	62
Conclusion générale. ....	63
Liste des références. ....	64
Annexe A.....	69
Annexe B.....	70
Résumé	

# LISTES DES FIGURES

## ➤ CHAPITRE I

Figure I-1: Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne. ....	3
Figure I-2 : L'éolienne à l'intérieur. ....	4
Figure I-3 : Technologies d'éoliennes à axe vertical. ....	5
Figure I-4: Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	6
Figure I-5: Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage. ....	7
Figure I-6 : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage.....	8
Figure I-7 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA .....	9
Figure I-8 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MS couplée à la turbine via un multiplicateur. ....	9
Figure I-9 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MS directement couplée à la turbine. ....	9
Figure I-10: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et $V_{vent}$ .....	10
Figure I-11 :Prévision (2017-2021) de la capacité d'énergie éolienne par région Annuelle , Cumulée:.....	11
Figure I-12 : Prévision globale de la capacité installée d'énergie éolienne entre 2017 et 2021. ....	12
Figure I-13 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol . ....	12

## ➤ CHAPITRE II

Figure II-1 : Evolution de la vitesse du vent .....	15
Figure II-2 : schéma de la turbine éolienne .....	16
Figure II-3: Tube de courant d'air autour d'une éolienne .....	16
FigureII-4: Schéma bloc du modèle des pales .....	17
Figure II-5 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse .....	18
Figure II-6: Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne .....	18
Figure II-7 : Zone de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable .....	19
Figure II-8: Schéma de la commande MPPT sans asservissement de vitesse.....	20
Figure II-9 : Résultats de la MPPT sans asservissement de vitesse .....	21
Figure II-10: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse .....	22
Figure II-11 : Résultats de la MPPT avec asservissement de vitesse.....	23
Figure II-12: le Structure du MADA a rotor bobiné.....	23
Figure-II-13 : Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants.....	24
Figure II-14: Passage de triphasé au biphasé.....	25

## ➤ CHAPITRE III

Figure III-1 : Architecture de commande du système éolien. ....	27
Figure III-2: Orientation du flux statoriques.....	29
Figure III-3: Schéma de principe de la structure PLL classique.....	32
Figure III-4 : Principe de contrôle du CCM.....	32
Figure III-5 : Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive .....	33
Figure III-6 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance (en BO).....	34
Figure III-7 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance (en BF).....	34
Figure III-8 : Schéma de commande du convertisseur CCR.....	35
Figure III-9 : Interconnexion des deux convertisseurs statiques via un bus continu.....	36
Figure III-10 : Contrôle du bus continu. ....	37
Figure III-11 : Modèle de la chaîne éolienne avec Simulink . ....	37
Figure III-12: Vitesse de rotation de la GADA et sa référence.....	38
Figure III-13 : Couple électromagnétique et leur référence.....	38
Figure III-14 : Courant rotoriques quadrature.....	38
Figure III-15 : Courant rotoriques direct . ....	39
Figure III-16 : Tensions statoriques triphasé de réseau. ....	39
Figure III-17 : Courants statoriques triphasés.....	39
Figure III-18 : Analyse en THD des courants $I_s$ .....	40
Figure III-19: Courant rotoriques triphasé coté rotor.....	40
Figure III-20 : Puissances active de la GADA.....	40
Figure III-21 : Tension de bus continu $V_{bus}$ . ....	41
Figure III-22 : Tension rotoriques direct et quadrature.....	41
Figure III-23 : Courant triphasé coté réseau. ....	41
Figure III-24: Courant rotoriques direct et quadrature.....	42
Figure III-25: Vitesse de rotation de la GADA et sa référence.....	42
Figure III-26 : Couple électromagnétique et leur référence.....	42
Figure III-27 : Courant rotoriques direct .....	43
Figure III-28: Courant rotoriques quadrature .....	43
Figure III-29 : Tension de bus continu $V_{bus}$ . ....	43



# LISTES DES FIGURES

Figure III-30 : Tension rotoriques direct et quadrature.....	44
Figure III-31 : Courant triphasé coté réseau. ....	44
Figure III-32: Courant rotoriques direct et quadrature.....	44

## ➤ CHAPITRE VI

Figure VI-1 : Représentation de l'effet d'un harmonique.....	47
Figure VI-2 : représentation des tensions déséquilibrée .....	48
Figure VI-3 : Courbe LVRT typique .....	49
Figure VI-4 : Représentation de la GADA avec Crowbar .....	49
Figure VI-5 : Tensions statoriques triphasées.....	50
Figure VI-6 : Analyses-en THD des courants Is après l'application des harmoniques de tension. ....	50
Figure VI-7 : Courant direct rotorique.....	51
Figure VI-8 : Couple électromagnétique .....	51
Figure VI-9 : Courant quadrature rotorique.....	51
Figure VI-10 : Courants rotoriques triphasés.....	51
Figure VI-11 : tension de bus continu.....	52
Figure VI-12 : Courant triphasé coté réseau .....	52
Figure VI-13 : La puissance active. ....	52
Figure VI-14 : La puissance réactive. ....	53
Figure VI-15 : Courants statoriques triphasés.....	53
Figure VI-16 : Analyses-en THD des courants Is après l'application des harmoniques de tension .....	53
Figure VI-17 : Tensions statoriques triphasées.....	54
Figure VI-18 : Tensions statoriques triphasées.....	54
Figure VI-19 : Courant quadrature rotorique.....	55
Figure VI-20 : Couple électromagnétique .....	55
Figure VI-21 : Courants rotoriques triphasés.....	55
Figure VI-22 : Courants triphasés coté réseau. ....	56
Figure VI-23 : Tension de bus continu .....	56
Figure VI-24 : La puissance active. ....	56
Figure VI-25 : La puissance réactive .....	57
Figure VI-26 : Courants statoriques triphasés.....	57
Figure VI-27 : Analyses-en THD des courants Is après l'application d'une tension déséquilibrée au réseau.....	57
Figure VI-28 : Tensions statoriques triphasées.....	58
Figure VI-29 : courant direct rotorique.....	58
Figure VI-30 : courant quadrature rotorique.....	59
Figure VI-31 : courant quadrature triphasés .....	59
Figure VI-32 : Couple électromagnétique .....	59
Figure VI-33 : courants statoriques cote réseau.....	60
Figure VI-34 : Courant crowbar .....	60
Figure VI-35 : courants statoriques triphasées.....	60
Figure VI-36 : Flux statoriques.....	61
Figure VI-37 : La puissance active .....	61
Figure VI-38 : la puissance réactive .....	61
Figure VI-39 : Tension de bus continu .....	61
Figure VI-40 : Analyses-en THD des tensions Vs dans la zone (I) lors de l'application d'un défaut LVRT.....	62
Figure VI-41 : Analyses-en THD des tensions Vs dans la zone (II) lors de l'application d'un défaut LVRT.....	62
Figure VI-42 : Analyse en THD des tensions Vs dans la zone (III) lors de l'application d'un défaut LVRT. ....	62

## Liste des tableaux

Tableau I.1: classification des éoliennes selon la puissance .....	5
--	---

## LISTE DES SYMBOLES

<b>C<sub>aero</sub></b>	Le couple aérodynamique
<b>CCM</b>	convertisseur coté machine
<b>CCR</b>	convertisseur coté réseau
<b>C<sub>f</sub></b>	Le couple résistant dû aux frottements.
<b>C<sub>g</sub></b>	Le couple issu du multiplicateur.
<b>C<sub>p</sub></b>	coefficient de puissance
<b>F</b>	coefficient de frottement.
<b>G</b>	gain du multiplicateur
<b>g</b>	glissement
<b>GADA</b>	génératrice asynchrone à double alimentation.
<b>J</b>	moment d'inertie
<b>L<sub>m</sub></b>	inductance mutuelle
<b>L<sub>r</sub></b>	inductance rotorique
<b>L<sub>s</sub></b>	inductance statorique
<b>m</b>	La masse d'air
<b>MADA</b>	machine asynchrone à double alimentation.
<b>MPPT</b>	point de puissance maximale(Maximum Power Point Tracking).
<b>MS</b>	Machine synchrone
<b>Ø<sub>r</sub></b>	Flux rotorique
<b>Ø<sub>s</sub></b>	Flux statorique
<b>P(θ)</b>	Matrice de transformation de park
<b>Paero</b>	La puissance aérodynamique
<b>PI</b>	régulateur proportionnel intégral
<b>PLL</b>	Boucle a verrouillage de phase (Phase Locked Loop)
<b>P<sub>r</sub></b>	puissance active rotorique
<b>P<sub>s</sub></b>	puissance active statorique
<b>Q<sub>r</sub></b>	puissance réactive rotorique
<b>Q<sub>s</sub></b>	puissance réactive statorique
<b>R</b>	Rayon de la surface
<b>R<sub>r</sub></b>	résistance rotorique
<b>R<sub>s</sub></b>	résistance statorique
<b>S</b>	Surface de l'aire balayée par la turbine

## LISTE DES SYMBOLES

---

$V_{bus}$	tension du bus continu
$V_v$	La vitesse du vent
$\beta$	angle de calage
$\theta_r$	angle rotorique
$\theta_s$	angle statorique
$\lambda$	le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.
$\lambda_{opt}$	La vitesse optimale
$\rho$	la densité de l'air.
$\sigma$	Coefficient de dispersion entre les enroulements
$\omega_e$	La pulsation électrique
$\omega_r$	La pulsation rotorique
$\omega_s$	La pulsation statorique
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine éolienne

# INTRODUCTION GENERALE

---

## I.INTRODUCTION GENERALE

Au cours des 10 dernières années, la société humaine consomme une énorme quantité d'électricité chaque année. Etant donné que la majeure partie de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles, l'augmentation et la consommation nette d'électricité entraînera d'importantes émissions de gaz à effet de serre, et ce peut provoquer un réchauffement climatique. La température moyenne de la surface de la terre a augmenté d'environ 0,74 °, ce qui peut provoquer l'élévation du niveau de la mer, généralisée la fonte de la neige et de la glace ou certains défis météorologiques extrêmes. De plus, brûler des combustibles fossiles produira de la poussière et d'autres matières chimiques nocives pour l'homme.

D'un autre côté, les réserves de combustibles fossiles sont limitées et non durables. Pétrole sera épuisé dans quelques décennies, suivi du gaz naturel et le charbon sera également utilisé en 200 à 300 ans. La crise énergétique provoquée par l'épuisement des énergies fossiles est un défi à long terme pour les êtres humains, de nombreux efforts ont été faits dans le monde pour essayer de trouver une énergie alternative[1].

Maintenant, avec l'aggravation de la crise énergétique et de la pollution environnementale[2], nous avons constaté des progrès significatifs dans le développement de la technologie et des applications de l'énergie éolienne. La production d'énergie éolienne a devenu l'une des plus importantes générations d'énergie renouvelable.

Cependant, l'utilisation de cette source d'énergie renouvelable se propage rapidement dans le monde en tant que une source respectueuse de l'environnement de manière plus propre, plus durable et partage de plus en plus de proportions de demandes d'énergie à l'échelle mondiale cela nécessite le transfert des connaissances théoriques et de l'expérience pratique accumulée sur les principaux marchés actuels de l'énergie éolienne aux acteurs de nouveaux marchés[3].

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres et c'est le choix qui semble avoir pris par nos politiques au niveau de la centrale éolienne d'Adrar au sud du pays. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la GADA, ce qui est en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple)[4],[5]. Ainsi que l'originalité de la commande de l'éolienne à vitesse variable est qu'elle permet d'extraire le maximum de puissance tel que le vent le permet, appelé (MPPT)[6], la régulation indépendante des puissances actives et réactives et le faible cout de conversion.

En effet, la GADA 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 rotoriques de la GADA et le réseau électrique[2],[4],[5].

Le système de production est très sensible aux défauts du réseau. Lorsque des défauts au niveau du réseau, tels que la pollution harmonique et les chutes de tension du réseau très symétriques / asymétriques se produisent, les éoliennes doivent se déconnecter du réseau défectueux afin de protéger leurs convertisseurs de puissance de surtension et de surintensité. D'autre part, selon aux derniers codes de réseau, les éoliennes devraient rester connecté dans certaines conditions de réseau non idéales afin d'éviter d'autres perturbations et des défauts ou dommages beaucoup plus graves dans le réseau [2].

Ce mémoire, s'intéresse principalement à l'étude et l'analyse d'un système de production d'énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) fonctionnent dans les conditions de tension de réseau non équilibrée.

# INTRODUCTION GENERALE

---

Dans ce contexte notre mémoire de master de thème : **Etude et analyse de l'effet de déséquilibre de réseau sur une GADA** est structurée de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présenterons un état de l'art actuel sur les systèmes de conversion éolienne. D'abord on s'intéresse essentiellement aux principes de fonctionnement d'un système éolien, une citation donnée sur la structure et les composants constituant les aérogénérateurs. Dans un second lieu, les nombreux types et stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable) sont également décrites, ainsi que l'intérêt de mettre en place quelques statistiques récentes sur la production mondiale de ce type d'énergie dans le cas d'Algérie, ont été évoquées, compte tenu des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne.

Le second chapitre est composé de deux parties :

- Une première partie est consacrée à la modélisation et la simulation de la partie mécanique de l'éolienne, où le modèle du vent et son évolution seront étudiés ainsi que les différentes lois établies tels que la loi de Betz., par la suite nous expliquerons comment appliquer la stratégie de commande MPPT avec et sans asservissement de vitesse, dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance. Enfin, en terminera la première partie par Les résultats de simulation dans l'objectif de vérifier la stratégie de contrôle de la MPPT.
- La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) à partir de laquelle sont repris les travaux de ce mémoire, à travers ce chapitre la structure de cette machine et les différents modes de fonctionnement seront présentés ainsi que son modèle dans un repère biphasé (le modèle adapté est basé sur la transformation de Park) lié au champ tournant.

Dans le troisième chapitre, nous allons mettre en œuvre la commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques de la génératrice asynchrone à double alimentation connectée aux réseaux électriques. Cette commande permet d'assurer le découplage des axes  $d$  et  $q$ , dont le but est d'améliorer le comportement statique et dynamique du système, en utilisant des régulateurs classiques de type Proportionnel Intégral (PI), Deux types de commandes vectorielles sont développés. La première appelée commande vectorielle directe (CVD) dans laquelle on effectue la régulation directement des puissances sans prendre en compte les couplages internes existants entre les énergies dans la GADA. La deuxième c'est la commande vectorielle indirecte (CVI) qui s'occupe d'abord du réglage des courants rotoriques de la GADA. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la génératrice ainsi que leurs interprétations validant la commande établie.

Dans le dernier chapitre, pour accueillir l'éolienne au défaut sur le réseau, on présentera le contrôle de la chaîne éolienne globale sous un réseau non idéal tel que la distorsion harmonique de la tension du réseau, la tension déséquilibrée du réseau et le LVRT (Low Voltage Ride Through). La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation pour montrer Les effets des différents types de défauts sur le comportement GADA.

Finalement une conclusion générale clôture notre travail.

# **CHAPITRE I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne**

## I-1. Introduction

Durant cette dernière décennie, Le développement des énergies renouvelables pose, en termes de planification, exploitation et gestion des futurs systèmes de fourniture d'énergie, des défis que la libéralisation du marché de l'électricité depuis des années n'a fait que renforcer suite à une forte croissance de la consommation énergétique mondiale.

L'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de faire le point sur les sujets de grande envergure liés à la production d'électricité à partir du vent, énergie propre et durable ou l'énergie éolienne occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie[7].

Le premier chapitre, a pour présenter un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale. Dans un premier temps, nous décrivons la structure et les composants constituant les aérogénérateurs, ainsi que les nombreux types et stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable). Dans un deuxième temps, sera réservé à l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies., des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, ainsi que les différents avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, enfin ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

## I-2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I-1)[8].

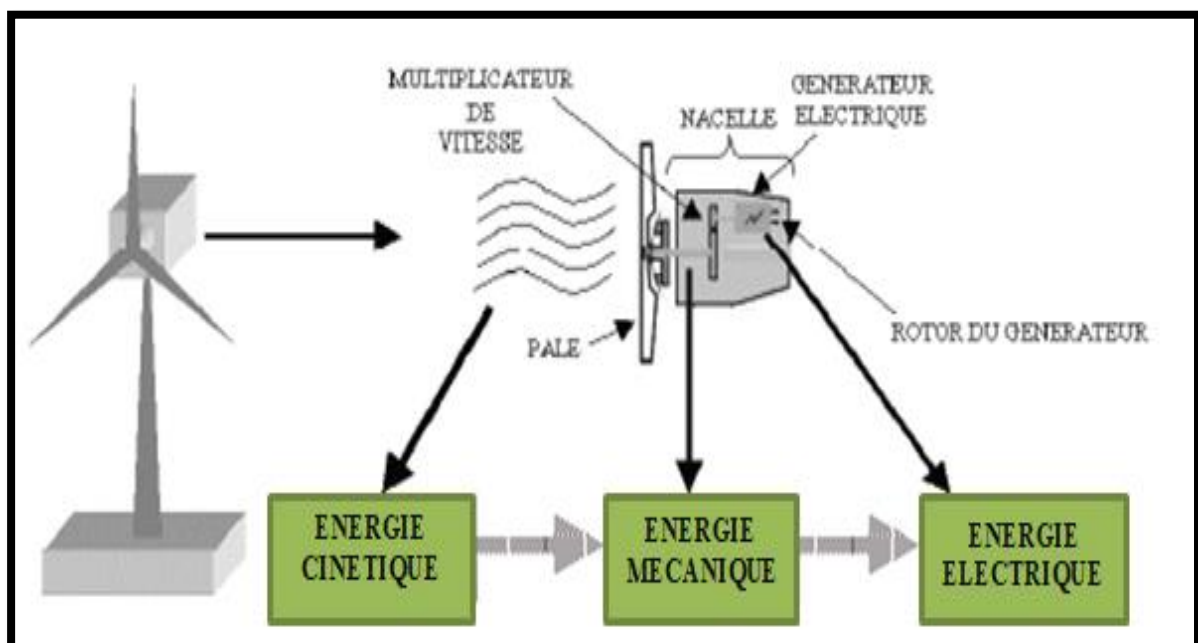


Figure I-1: Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne .

## I-3. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Le principe de fonctionnement des éoliennes a été largement présenté ces dernières années dans plusieurs travaux[9],[10].

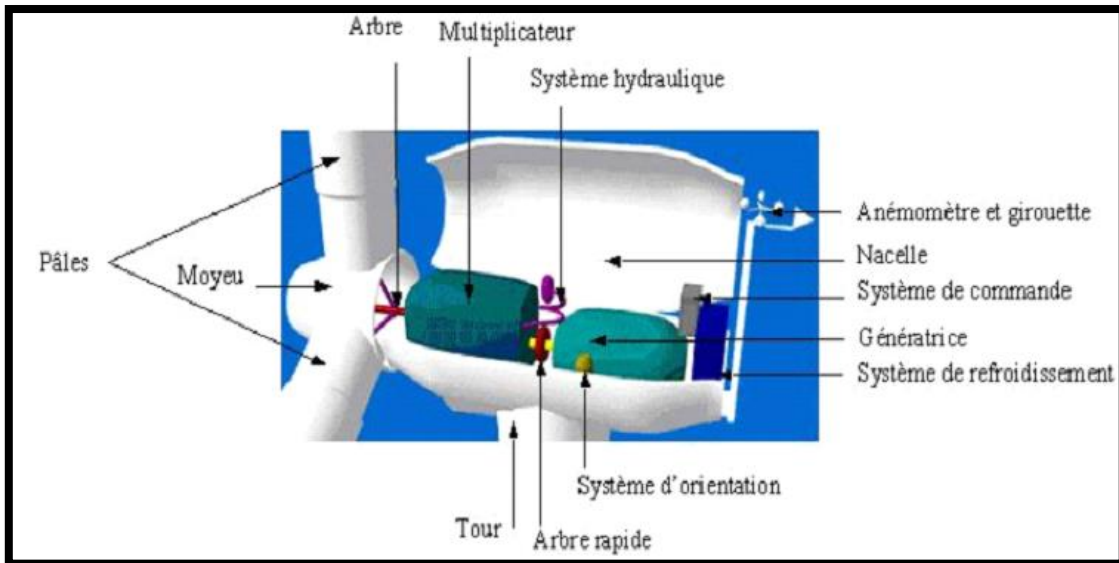


Figure I-2: L'éolienne à l'intérieur.

A la hauteur de la nacelle, (figure I-2), souffle un vent de vitesse  $V_{vent}$ . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance  $P_{vent}$  est alors captée et est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine.

On distingue alors deux cas, soit que l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit qu'elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques[9].

Pour des vitesses de vent égales au seuil de la vitesse de la turbine, la puissance est maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs roulements.

Lorsque la vitesse du vent dépasse le seuil, les pales sont mises en drapeau (parallèles à la direction du vent), leur portance devient quasiment nulle et l'éolienne cesse alors de tourner (Arrêt de production d'électricité). Tant que la vitesse du vent reste supérieure à celle du seuil, le rotor tourne « en roue libre » et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en production.

Toutes ces opérations sont automatisées. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque placé sur l'axe rapide permet de mettre l'éolienne en sécurité. Au pied de chaque éolienne, un transformateur convertit la tension produite en tension du réseau sur lequel toute l'électricité produite est déversée[11].

#### I-4. Types d'aérogénérateurs selon leur axe

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en trois catégories selon leur puissance nominale[7] :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW



- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW

Le tableau ci-dessous classe les turbines selon la puissance et le diamètre de leur hélice.

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

**Tableau I.1: classification des éoliennes selon la puissance**[12].

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

### I-4-1. Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation[7]. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenage sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et par conséquent économique[13],[14]. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol.

**Figure I-3 : Technologies d'éoliennes à axe vertical.**



**Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :**

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.

**Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants :**

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol[7].

### I-4-2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisqu'elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent [7].

## I-4-2-1- Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

Aujourd'hui, presque toutes les éoliennes connectées au réseau sont tripale et à axe horizontal. Dans ce contexte, nous essayons de présenter, dans cette section, les principaux éléments d'un aérogénérateur à axe horizontal.

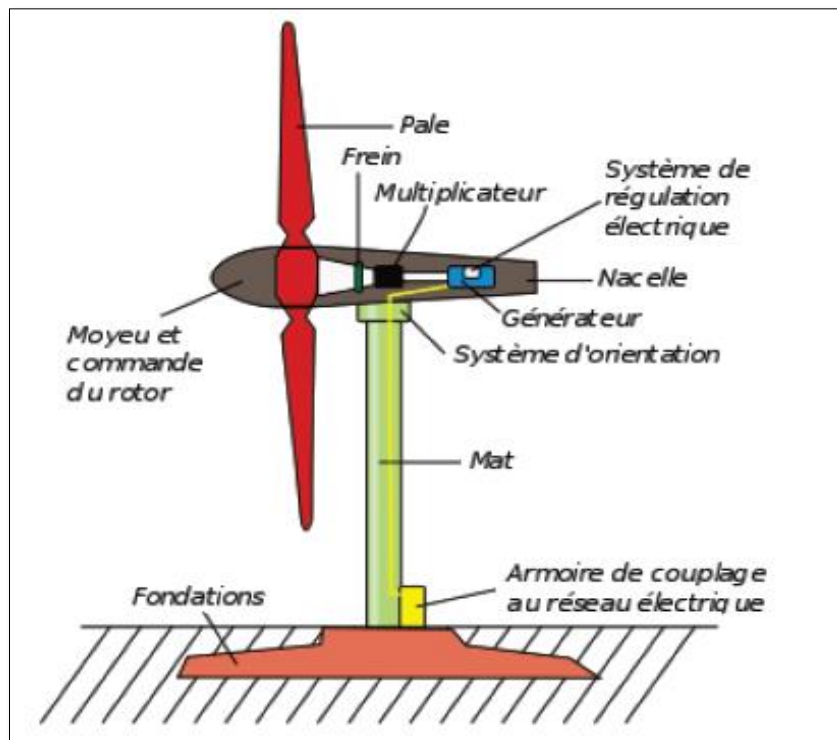


Figure. 1-4: Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal[15] .

En général, les éoliennes sont constituées par des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés dans la (Figure 1.4). Chacune de ces parties doit être bien étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

- **La fondation :** la fondation est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne et supporter le poids lourd des autres parties. Dans le cas des éoliennes offshore (installations maritimes), elle doit non seulement résister aux différentes contraintes, mais aussi celle créée par la force des vagues et des courants marins sur le mât.
- **Le rotor :** c'est l'élément mécanique qui transforme la force cinétique du vent captée par les pâles en rotation, ensuite transformée en électricité dans la nacelle. Généralement, il est composé de trois pâles et placé devant la nacelle.
- **Le multiplicateur :** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique[16] .
- **La tour ou le mât :** De 10 à 35 mètres qui permet de placer l'éolienne à une hauteur où la vitesse du vent est plus élevée et plus régulière qu'au sol. Pour être rentable, les premières installations d'éolienne domestique démarrent à 10 mètres. Les professionnels conseillent cependant des mâts d'éoliennes domestiques plus hauts pour maximiser la production.

- **La nacelle :** Au sommet du mât, équipé d'un rotor à axe horizontal, avec deux ou trois pales mises en rotation par le vent. Dans le cas du petit éolien domestique, le diamètre des pales varie de 2 à 10 mètres. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne domestique entre 10 et 25 tours par minute. Le mouvement de rotation est alors converti par le rotor en électricité.
- **Le système d'orientation** Qui oriente la nacelle face au vent[15].

## I-5. Classification des éoliennes selon la vitesse

### I-5-1. Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques.

Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%. Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité.

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes comme représenté sur la figure(I.5)[17].

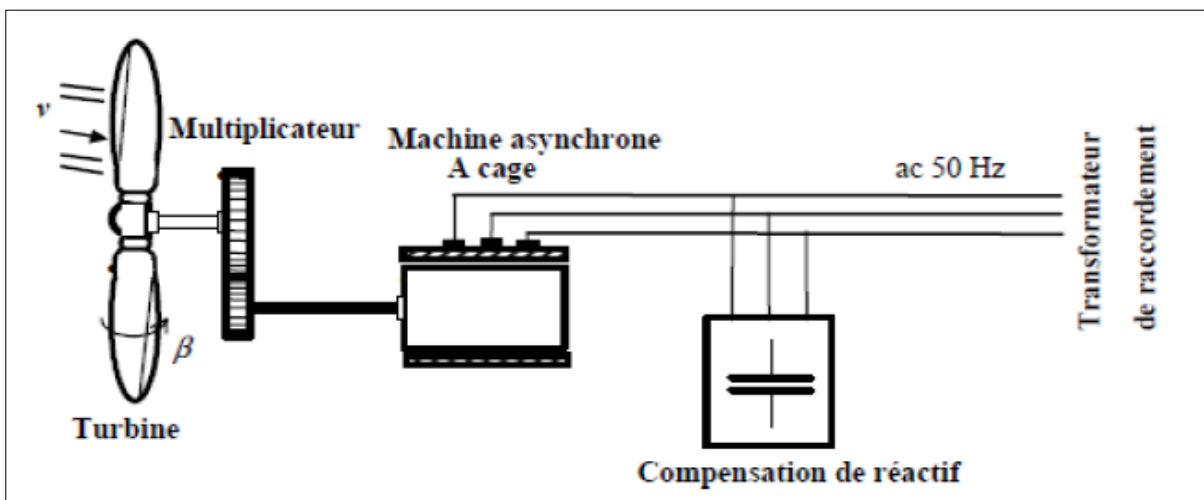


Figure. I-5: Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

Cette configuration présente les inconvénients suivants :

- Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone.
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.
- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau.
- Impossibilité de réglage de la puissance générée[7].

## I-5-2. Les éoliennes à vitesse variable

Les machines électriques qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrones à cage, à double alimentation et synchrone à aimant permanent. La machine asynchrone à cage ou à double alimentation est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse, (figure 1-6) et (figure 1-7), tandis que la machine synchrone à aimant permanent peut être couplée aussi à la turbine à travers un multiplicateur (figure 1-8), ou couplée directement à la turbine (figure 1-9), si la machine comporte un grand nombre de pôles évitant ainsi le multiplicateur de vitesse[10].

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant.

Le premier convertisseur assure le contrôle de la puissance générée en agissant sur la vitesse du générateur. Ceci permet de limiter le système d'orientation des pales à une fonction de sécurité par grand vent[18]. Le second permet avec une commande adéquate de délivrer des courants de fréquence fixe correspondant à celle du réseau, avec la possibilité de régler le facteur de puissance (puissance réactive). La puissance nominale de la machine détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Malgré le fonctionnement à vitesse variable, cette technologie d'éoliennes présente plusieurs inconvénients :

- ✚ Le dimensionnement des convertisseurs utilisés est effectué pour transiter la totalité de la puissance échangée entre la machine et le réseau ;
- ✚ Le dimensionnement des filtres est également réalisé pour transiter la puissance totale, ce qui engendre des problèmes de conception, d'encombrement et également une répercussion sur le coût [7], [19];
- ✚ L'augmentation des pertes des convertisseurs de puissance avec l'augmentation de la puissance des éoliennes, ce qui influe sur le rendement du système éolien et cela, sur la plage entière de fonctionnement.

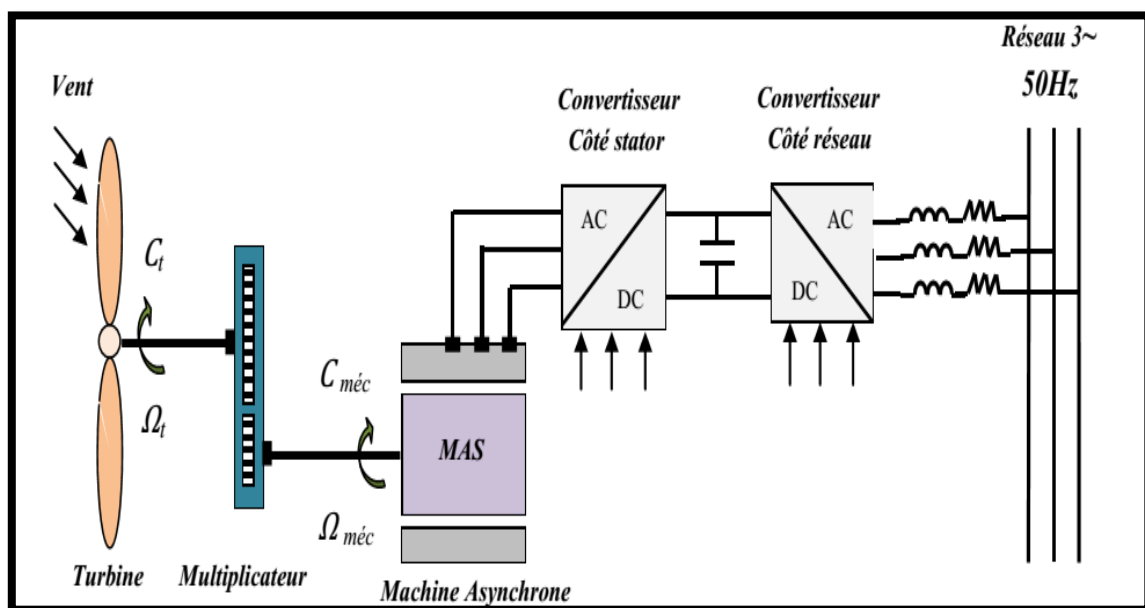


Figure I-6 : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage

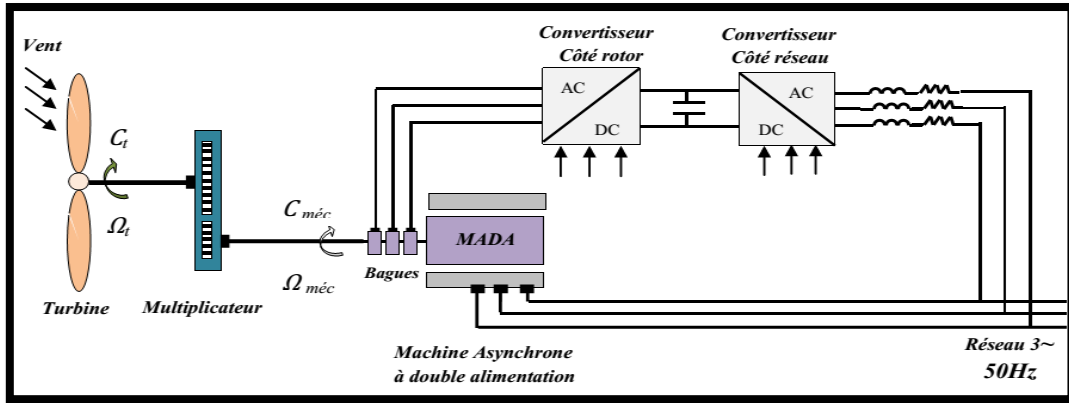


Figure I-7 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA

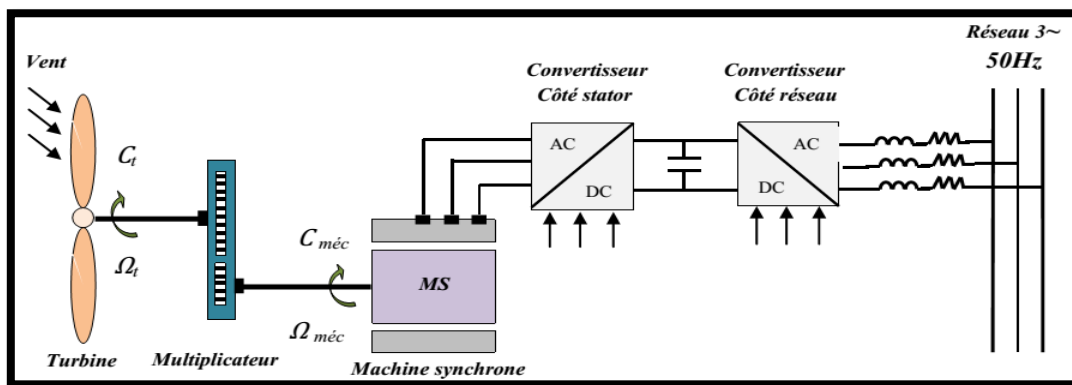


Figure I-8 : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.

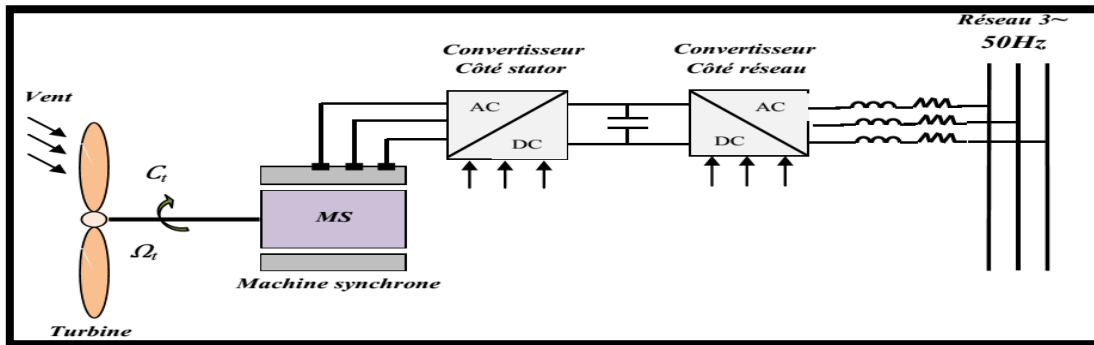


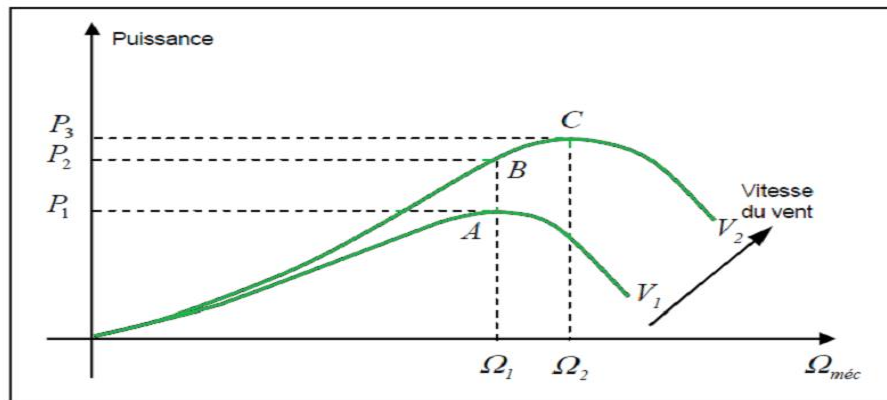
Figure I-9 : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone directement couplée à la turbine.

Actuellement la production d'énergie éolienne est effectuée en utilisant des éoliennes à vitesse variable et cela pour de nombreuses raisons, nous avons donc choisi d'étudier dans ce mémoire l'éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA)[20].

### I-6. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure 1-10. Pour une vitesse de vent  $V_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$  ; on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe

de  $V_1$  à  $V_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence  $\Omega_{ref}$  calculée pour maximiser la puissance extraite[21],[22].



**Figure I-10 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.**

## I-7. Energie éolienne en chiffres

### I-7-1. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

L'exploitation de l'énergie éolienne a connu depuis environ 30 ans un grand essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. D'après des sources spécialisées dans le secteur d'énergie éolienne comme le GWEC \_Global Wind Energy Council\_, le parc mondial s'élève à 486,8 GW fin 2016 contre 432,42 GW en 2015, enregistrant une croissance de 12.6%. En 2005, la puissance du parc était de 59 084 MW. Les investissements mondiaux dans le secteur s'élèvent à 109 milliards \$ contre 99 milliards \$ en 2014. En effet, le marché mondial est fortement tiré par l'Asie, d'ailleurs la Chine a installé en 2015 plus de 30 500MW, soit la moitié de la progression mondiale. Son parc, qui a progressé de plus de 22% en un an, s'élève fin 2016 à 168 732 MW. Celui de l'Inde à 28 700 MW, avec 3 612 MW installés en 2016. Aux Etats-Unis, 8 203 MW ont été raccordés en 2016, le parc compte désormais 82 184 MW.

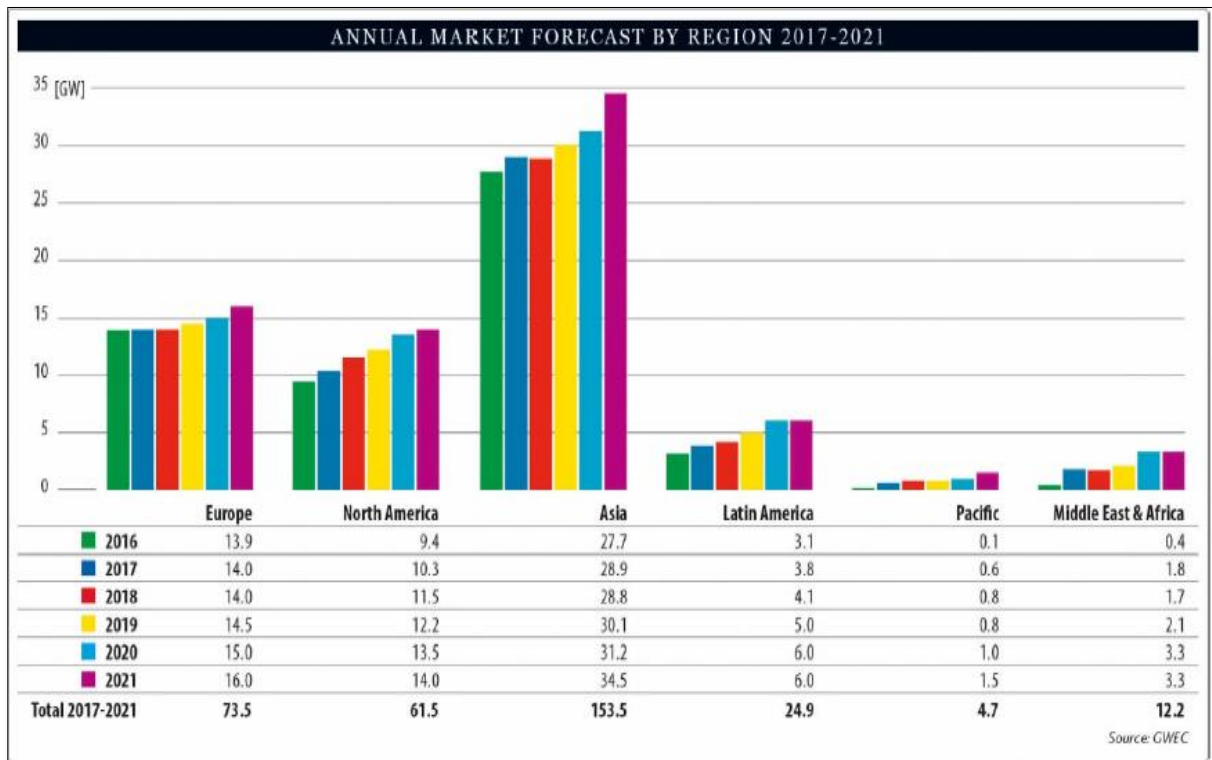
En Amérique du Sud, la dynamique du marché éolien repose sur le Brésil qui a vu son parc une augmentation de 2 754 MW en un an et représente en fin 2016 un total de 10 740 MW, contre 8 715 MW fin 2015.

### I-7-2. Prévision de l'énergie éolienne en 2021

En se basant sur les statistiques et les prévisions faites par le GWEC, la capacité globale de l'énergie éolienne installée sera presque le double dans les prochaines années.

Une fois encore, l'Asie représentée par la Chine qui est l'élément acteur de cette augmentation, malgré le ralentissement de l'économie mondiale. Elle a pu installer une étonnante capacité de 30.8 GW au bout de l'année 2015 et 23.37 GW en fin 2016, aussi bien pour l'Europe, les Etats Unis et l'Amérique latine. De ce fait, pour avoir une idée sur l'avancement du marché éolien dans toutes les régions du monde, les figures I.11 et I.12 illustrent les prévisions générales jusqu'à 2021[16].

(a)



(b)

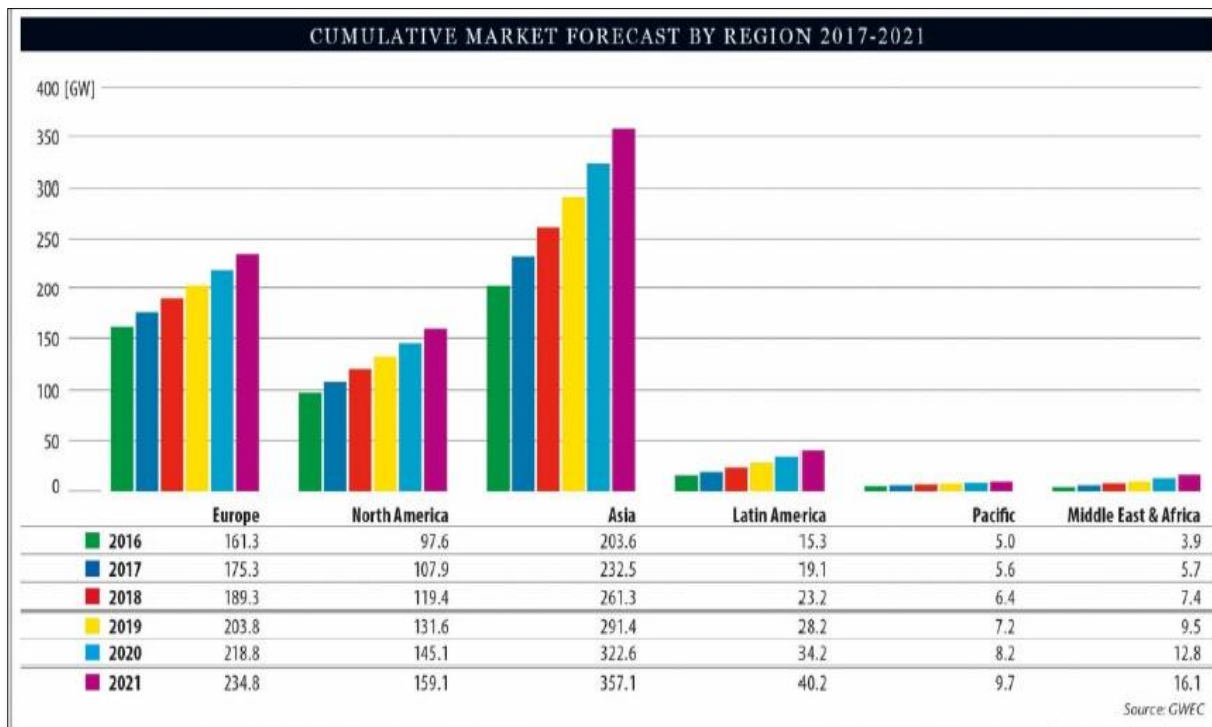


Figure I-11 : Prédiction (2017-2021) de la capacité d'énergie éolienne par région:  
a) Annuelle, b) Cumulée.



Figure 1-12 : Prévision globale de la capacité installée d’énergie éolienne entre 2017 et 2021[16],[23].

### I-8. L’énergie éolienne en Algérie

En ce qui concerne l’Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d’un endroit à l’autre. Ce qui est dû principalement, à la diversité de la topographie et du climat. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen qui est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief, représenté par deux grandes chaînes de montagnes : l’Atlas Tellien et l’Atlas Saharien. Entre elles, s’intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, qui constitue la majorité du pays avec sa grande étendue, se caractérise par un climat saharien.

Le Sud Algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, (figure 1-13) surtout du côté Sud-Ouest où les vitesses sont supérieures à 4m/s, et dépassent les 6m/s dans la région d’Adrar. Concernant le Nord, on remarque que la vitesse moyenne du vent est globalement peu élevée. On note cependant, l’existence de microclimats sur les sites côtiers d’Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au Sud.

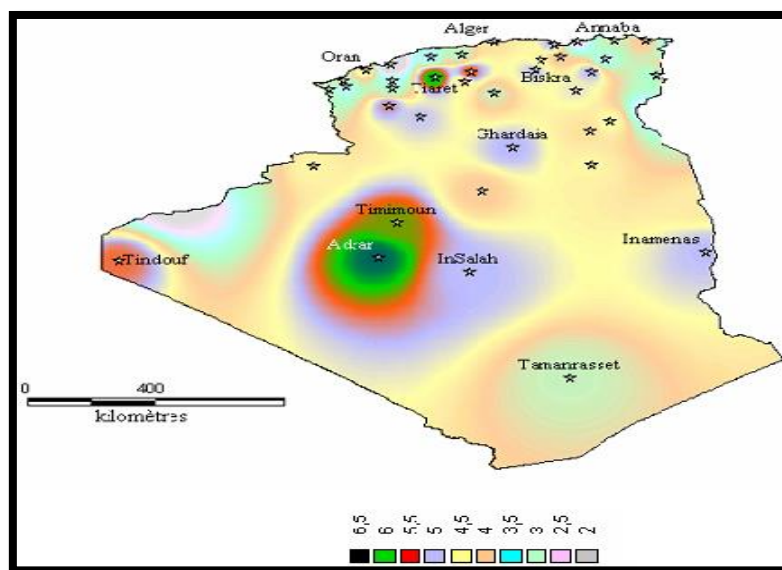


Figure I-13: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l’Algérie estimée à 10 m du sol[24].



Après la chute brutale ces dernières années du prix du baril, l'Algérie affiche de grandes ambitions pour investir dans le secteur des énergies renouvelables. Outre l'installation de plusieurs centrales photovoltaïques dans les hauts plateaux et le Sud. En effet, l'Algérie avait réceptionné en 2014 la ferme éolienne pilote de Kabertène à Adrar (10 MW) et des études ont été menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2017-2030 pour une puissance d'environ 22 GW[16].

## I-9. Avantages et inconvénients De l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après[25].

### I-9-1. Les Avantages

- Provision pour une source d'énergie propre. La nature presque sans pollution de l'énergie éolienne est l'une des raisons impérieuses de son développement. Il fournit de l'électricité sans produire de dioxyde de carbone. Le relativement une petite quantité d'émissions de GES associées aux éoliennes est produite dans la fabrication et le transport des turbines et pales. C'est également exempt de particules qui constituent un problème majeur avec l'énergie au charbon stations. Les particules ont été blâmées pour la montée de l'asthme et peut-être La maladie d'Alzheimer dans notre société, donc toute réduction de ces particules fines flotter dans l'atmosphère est un avantage majeur pour la santé.
- Durabilité. Chaque fois que le soleil brille et que le vent souffle, l'énergie peut être exploité et envoyé à la grille. Cela fait du vent une source durable d'énergie et une autre bonne raison d'investir dans des parcs éoliens.
- Emplacement. Les éoliennes peuvent être érigées presque partout, par exemple sur des fermes. Très souvent, les bons sites venteux ne sont pas en concurrence avec les zones urbaines aménagement ou autre utilisation des terres ; ces zones comprennent les sommets des montagnes ou dans les ravins entre les collines.
- Sécurité nationale. Le vent est une source d'énergie gratuite. Être indépendant des sources étrangères de combustibles (par exemple, les combustibles fossiles et même l'électricité) est un avantage. Cela ne signifie pas de hausses de prix sur lesquelles nous n'avons aucun contrôle et aucun embargo sur l'importation de carburant ou même d'électricité de pays étrangers.
- Réduction de l'exploitation minière destructrice. Le pompage de pétrole et de gaz (en particulier des fonds marins) et l'extraction de charbon ou d'uranium ont tous de graves impacts sur la mer ou la terre. Les parcs éoliens sont relativement bénins ce respect et l'agriculture et d'autres activités peuvent avoir lieu autour des turbines car l'action réelle est à plus de cent mètres au-dessus du sol ou de la mer.
- Stabilité du coût de l'électricité. Une fois le parc éolien en place, le coût de l'électricité aux clients doit être stable. Ce n'est pas une fonction du prix des carburants importés[26].

### I-9-2. Les Inconvénients

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs[27]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines.

- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien[25] .

### I-10. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons décrit en premier lieu une description sur les systèmes éoliens, les types des aérogénérateurs ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur, ensuite, nous avons présenté les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. A la fin du chapitre, une partie a été ajoutée qui consiste sur quelques statistiques récentes sur la production mondiale de ce type d'énergie dans les pays leaders, ainsi dans le cas d'Algérie, ont été évoquées.

**CHAPITRE II :**  
**Modélisation de la turbine**  
**éolienne et la GADA**

## CHAPITRE II Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

### II-1. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Dans ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation de la turbine éolienne basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation qui reste la machine la plus utilisée dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

Dans un premier temps, on note que les différentes parties qui constituent une éolienne seront modélisées. La deuxième étape est consacrée à l'utilisation d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec et sans asservissement de vitesse, dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance et ce quel que soit le vent qui lui est appliqué. Ce contrôle nous permet d'avoir une production optimale de puissance électrique quelque soient les conditions du vent.

La dernière partie de ce chapitre a pour modélisé la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie renouvelable[20],[28],[29].

### II-2. Modélisation du vent :

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Les propriétés du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, puisque sa puissance, dans les conditions idéales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour connaître les caractéristiques d'un site, il est indispensable d'avoir des mesures de la vitesse du vent et de sa direction, sur une grande période du temps[30].

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent par l'application d'un step dans un intervalle de temps (de  $t = 0$  à  $t = 3s$ ,  $V_{vent} = 7.5m/s$  /  $t = 3s$  à  $t = 6s$ ,  $V_{vent} = 11m/s$ ).

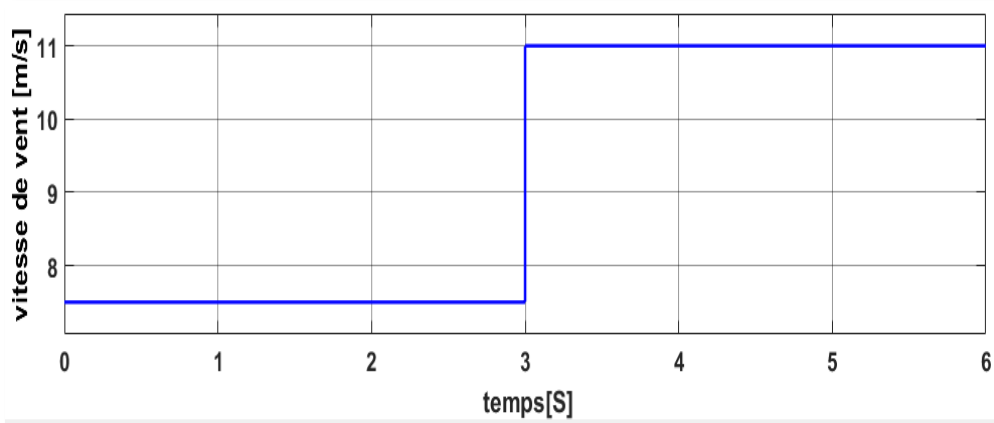


Figure II-1 : Evolution de la vitesse du vent.

### II-3. Modélisation de la turbine éolienne

#### II-3-1. Modèle de la turbine à étudier :

La turbine que nous allons étudier est une éolienne de 2MW. C'est un modèle tripale à axe horizontal dont la longueur d'une pale est de 42m et le rapport du multiplicateur de gain  $G=100$ .

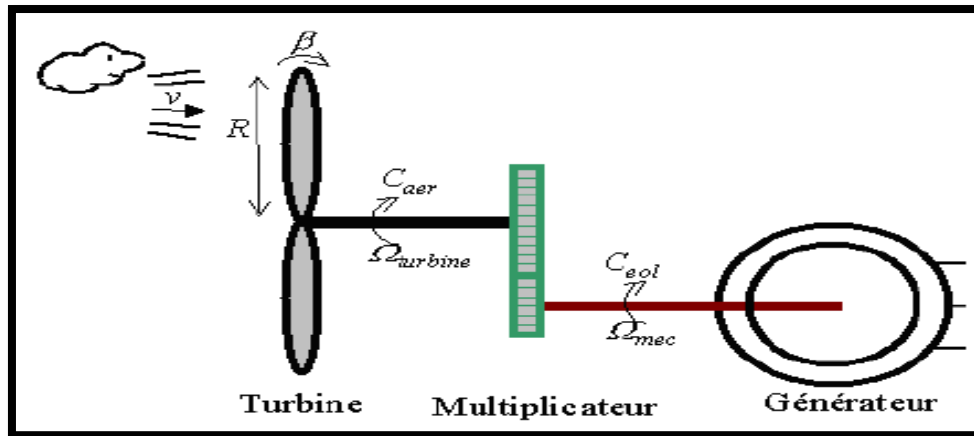


Figure II-2 : schéma de la turbine éolienne[31],[32].

### II-3-2. Théorème de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il 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  $V_2$  ».

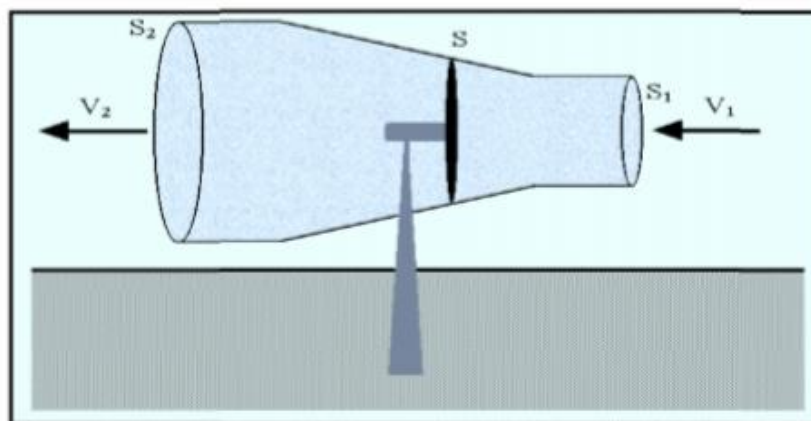


Figure II-3: Tube de courant d'air autour d'une éolienne[33].

#### ✓ Loi de BETZ :

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:[34].

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad \text{II.1}$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [35]:

$$P_m = \frac{m_0 (V_1^2 + V_2^2)}{2} \quad \text{II.2}$$

## CHAPITRE II Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

### II-3-3. Calcul de la vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio)

On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire au bout de pales de la turbine  $R_t \Omega_t$  sur la vitesse instantanée de vent et donné par l'expression suivante [35]:

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{V_v} \quad \text{II.3}$$

### II-3-4. Coefficient de puissance $C_p$

D'après Betz, le coefficient de puissance  $C_p$  ne peut être supérieur à  $16/27$ . Le coefficient  $C_p$  diffère pour chaque éolienne, il dépend de l'angle d'inclinaison des pales  $\beta$  et du rapport de vitesse  $\lambda$ .

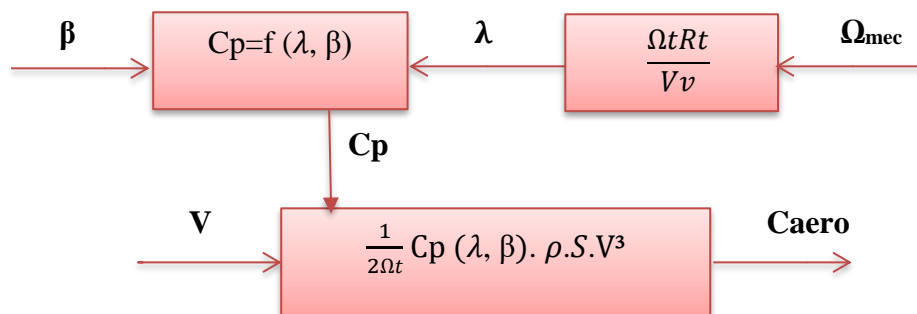
Dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$  dont l'expression a pour origine des travaux de Siegfried Heier. Ce dernier présente une formule analytique pour le calcul de  $C_p = f(\lambda, \beta)$  pour des éoliennes à rotation rapide à 2 ou 3 pales, basée sur des données expérimentales[36]. Cette expression empirique est donnée par[31]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda \quad \text{II.4}$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_i + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad \text{II.5}$$

### II-3-5. Modèle des pales :

- Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure (II.4)[37] :



**Figure II-4: Schéma bloc du modèle des pales.**

-La puissance aérodynamique captée par une turbine éolienne s'écrit sous la forme suivante[30]:

$$P_{aero} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{II.6}$$

-Le couple aérodynamique apparaissant au niveau de la turbine est donc en fonction de cette puissance:

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2\Omega_t} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad \text{II.7}$$

### II-3-6. Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_t$ , assez lente, à celle que nécessite la génératrice  $\Omega$ . Il est modélisé par les deux équations suivantes [37]:

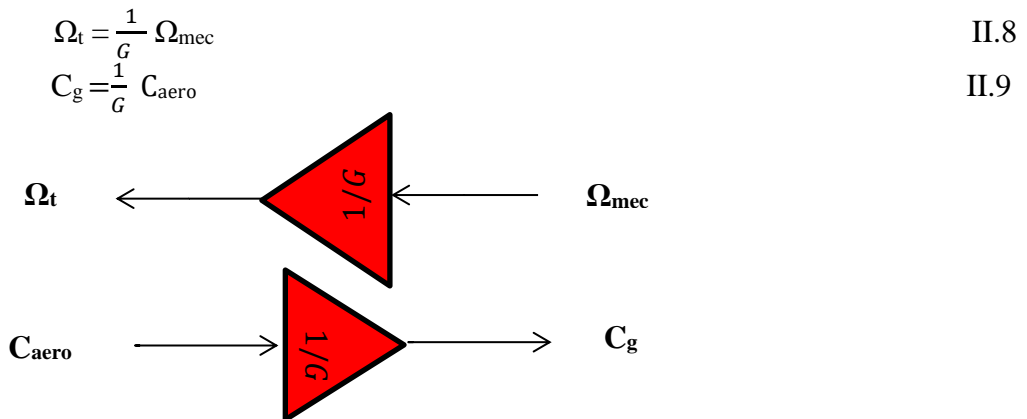


Figure II-5 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse[38] .

### II-3-7. Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor [37]:

$$j \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_t - f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{II.10}$$

- Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad \text{II.11}$$

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{II.12}$$

- Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ [37] .

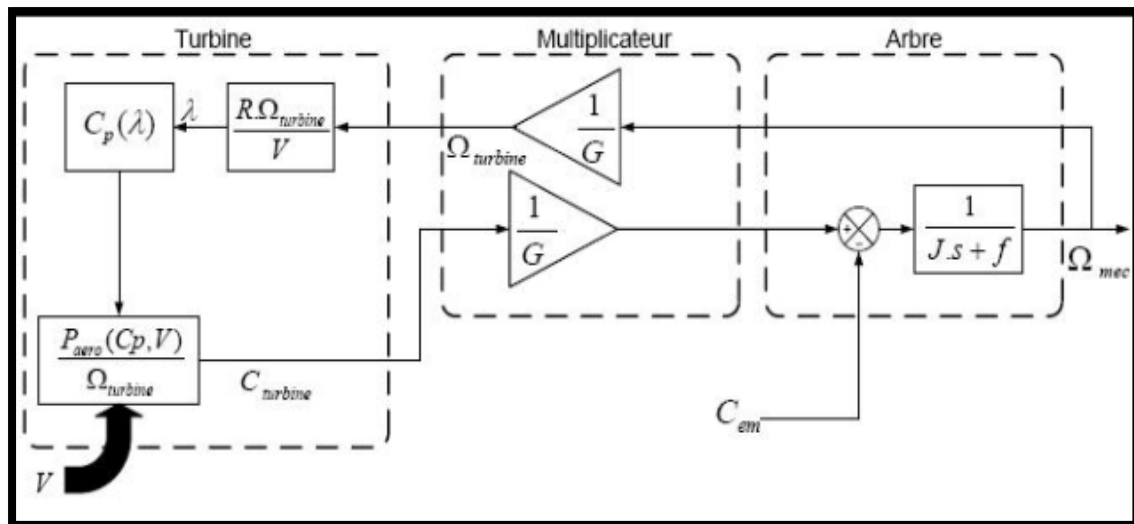
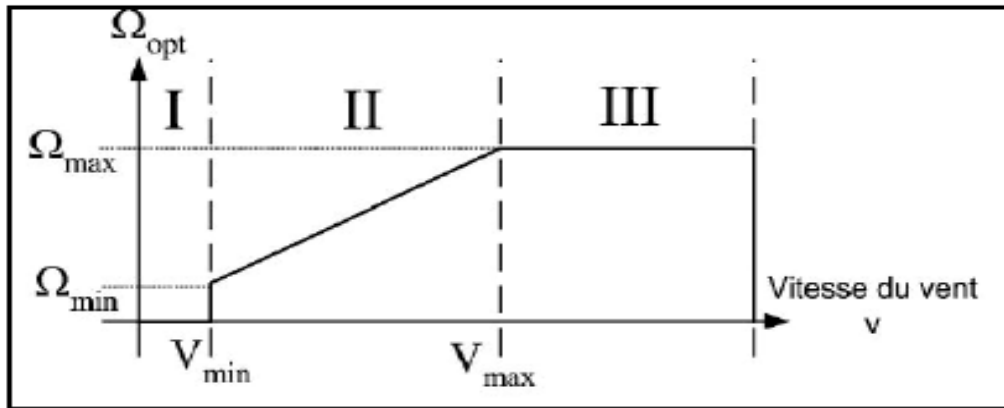


Figure II-6: Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne [39].

### II-4. Stratégie de commande de la turbine

#### II-4-1. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Il y a trois zones d'opération pour une éolienne à vitesse variable (figure II.7), qui sont:



**Figure II-7 : Zone de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable**

- **Zone 1** : les vitesses du vent sont très faibles, par conséquent insuffisantes pour faire tourner la turbine.
- **Zone 2** : le vent atteint une vitesse minimale permettant le démarrage de l'éolienne ; la vitesse de rotation est ajustée par l'intermédiaire du couple électromagnétique.  
Un algorithme est utilisé pour l'extraction du maximum de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking) est alors nécessaire.
- **Zone 3** : la vitesse du vent est au-dessus de la vitesse nominale, ce qui implique un risque d'endommagement de la turbine, un système d'orientation des pales (Pitch control) est utilisée pour réguler la vitesse de la turbine [12].

### II-5. Principe de MPPT.

Le principe de M.P.P.T. (Maximum Power Point Tracking) consiste (pour un angle de pale donné) à ajuster, en fonction de la vitesse du vent  $V_{vent}$ , la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence  $\Omega_t$  pour maintenir une vitesse relative optimale  $\lambda_{opt}$  et donc un coefficient de puissance maximal  $C_{pmax}$ . Nous pouvons donc réécrire l'équation (II-13) de la façon suivante :

$$\Omega_{Turb}^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad \text{II.13}$$

C'est l'action sur le couple électromagnétique (et donc sur la puissance convertie par la génératrice) qui va permettre d'obtenir  $\Omega_t$  et ainsi maximiser la puissance extraite avec le maintien de  $C_{pmax}$ [8].

#### II-5-1. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varie très peu en régime permanent. Ceci, nous conduit à déduire à partir de l'équation dynamique de la turbine en régime permanent que le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul en régime permanent [10].

$$C_{mec} = J \left( \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \right) = 0 \quad \text{II.14}$$

- Si on néglige l'effet du couple visqueux. ( $C_{visq} \approx 0$ ) on obtient :

$$C_{mec} = C_{em} \quad \text{II.15}$$

- Donc le couple électromagnétique de référence est estimé en fonction du couple aérogénérateur :



## CHAPITRE II Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

$$C_{ém\_ref} = \frac{C_{aero}}{G} \quad \text{II.16}$$

- Le couple aérogénérateur est lui-même estimé en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine :

$$C_{aero\_estimé} = C_p(\lambda, \beta) S \frac{1}{2\Omega_t} \cdot \rho \cdot v_{v\_estime}^3 \quad \text{II.17}$$

- L'estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{Turbine\_estimé}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine\_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.18}$$

- La mesure de la vitesse du vent étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent\_estime} = \frac{\Omega_t - estimé \cdot R}{\lambda} \quad \text{II.19}$$

- On obtient donc une relation globale de commande[11] :

$$C_{em\_ref} = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega^2_{mec}}{G^3 \lambda^3} \quad \text{II.20}$$

- Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda$  sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . La valeur du couple électromagnétique de référence doit alors être réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} (\lambda, \beta) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega^2_{mec}}{G^3} \quad \text{II.21}$$

En posant :

$$K_{opt} = \frac{C_{pmax}}{G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} (\lambda, \beta) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad \text{II.22}$$

- L'expression (II-21) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em\_ref} = K_{opt} \cdot \Omega^2_{mec} \quad \text{II.23}$$

- L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse du générateur.

Le schéma de ce mode de contrôle est illustré sur la figure (II-8) :

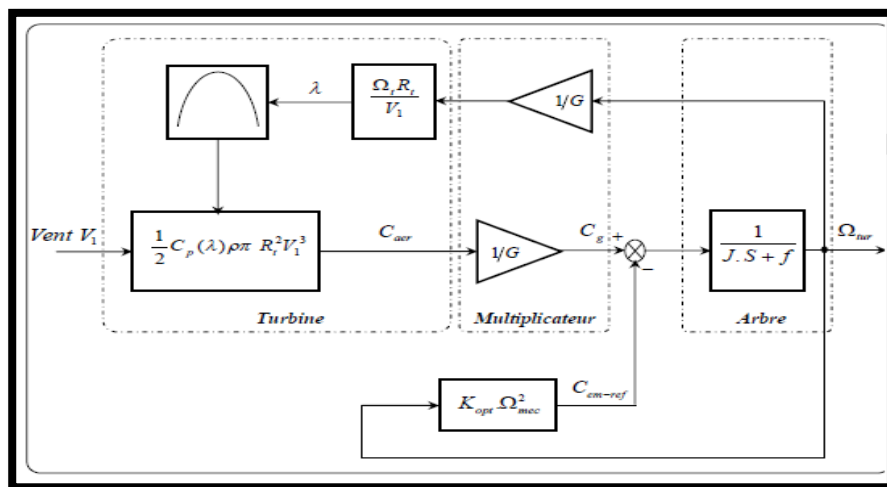
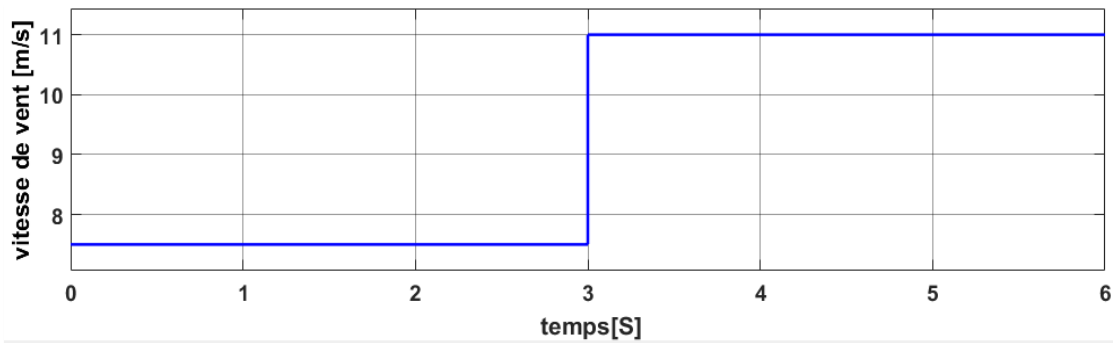


Figure II-8: Schéma de la commande MPPT sans asservissement de vitesse[10].

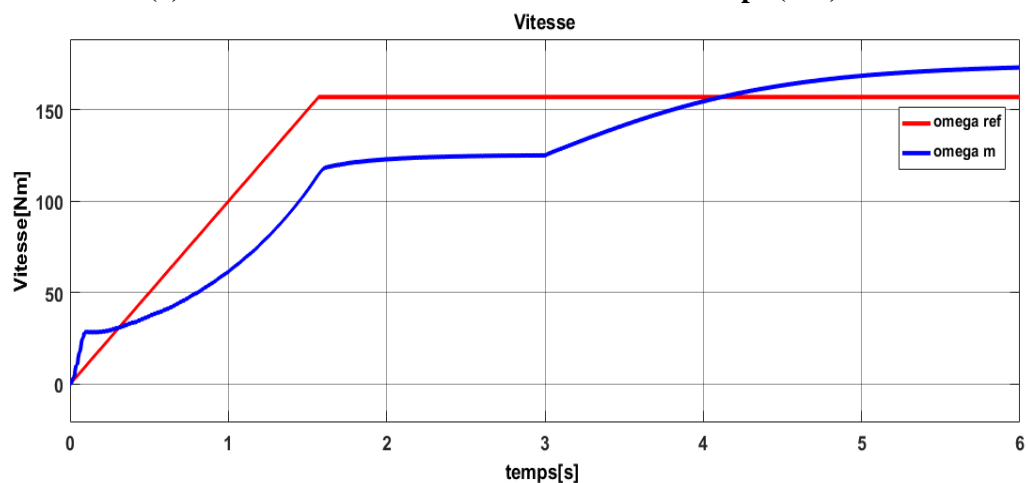
## CHAPITRE II Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

### ➤ Résultats de la simulation :

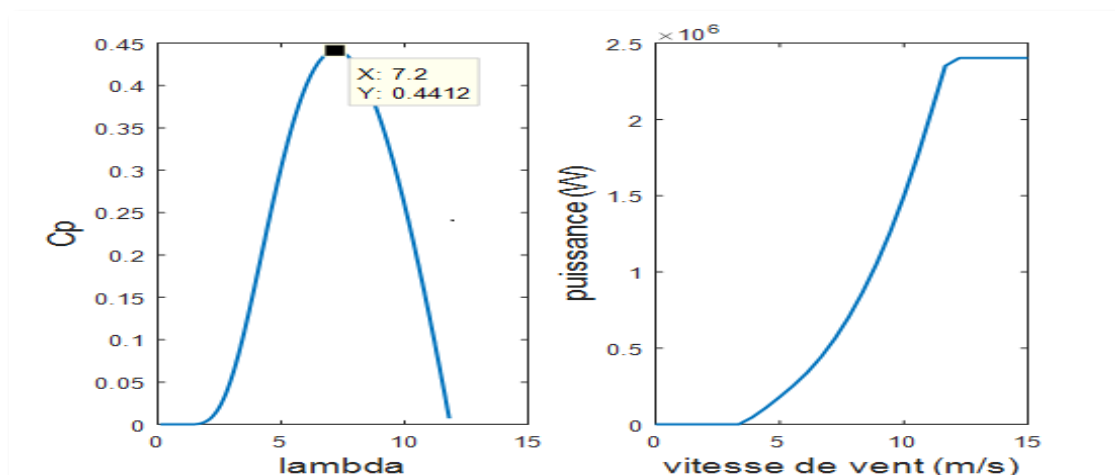
Les figures (II-9[a, b, c]) ci-après représentent les résultats de la turbine de 2MW après lui avoir appliqué un step de vent pendant 6s, les figures (II-9[a, b, c]) illustrent le comportement dynamique des différentes grandeurs regissant le fonctionnement de la turbine éolienne avec la techniques MPPT sans asservissement de vitesse. D'après la figure (II.9.b), on remarque que l'allure de la vitesse mécanique ne suit pas sa référence, donc une stratégie de commande doit être établi afin d'adapter la vitesse de mécanique avec sa référence.



(a) : Evolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s).



(b) : Vitesse mécanique et sa référence.



(c) : Caractéristiques de l'éolienne par rapport à ces coefficients.

Figure II-9 : Résultats de la MPPT sans asservissement de vitesse.

## CHAPITRE II Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

### II-5-2. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Cette stratégie de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique de la génératrice de manière à fixer la vitesse de rotation mécanique à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), la puissance mécanique est maximale si la valeur maximale du coefficient  $C_p$  est atteinte. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$ .

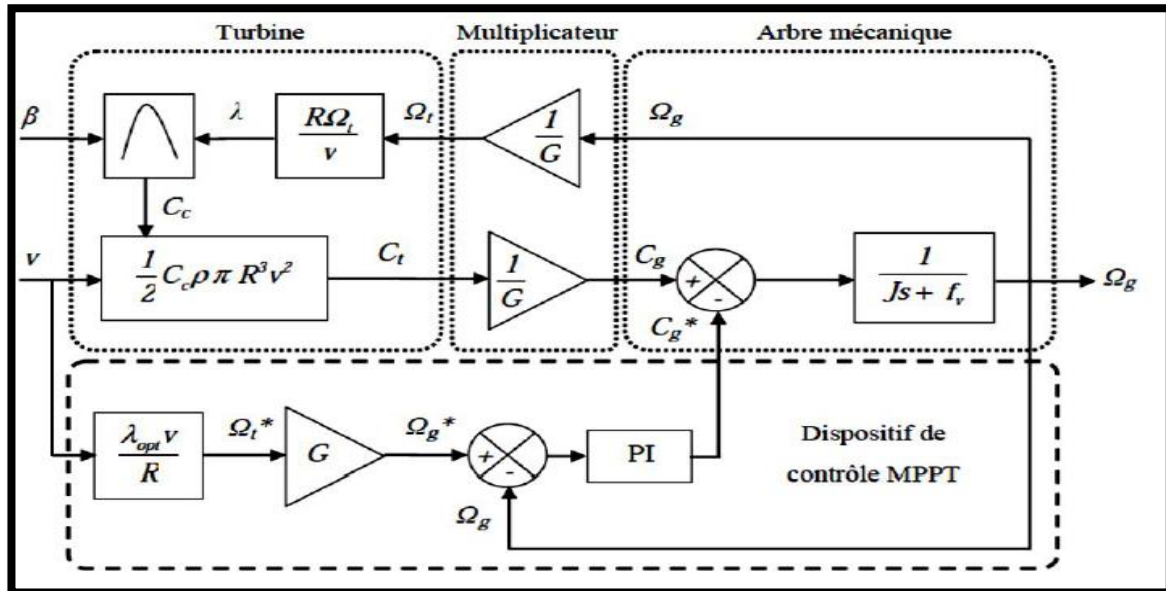
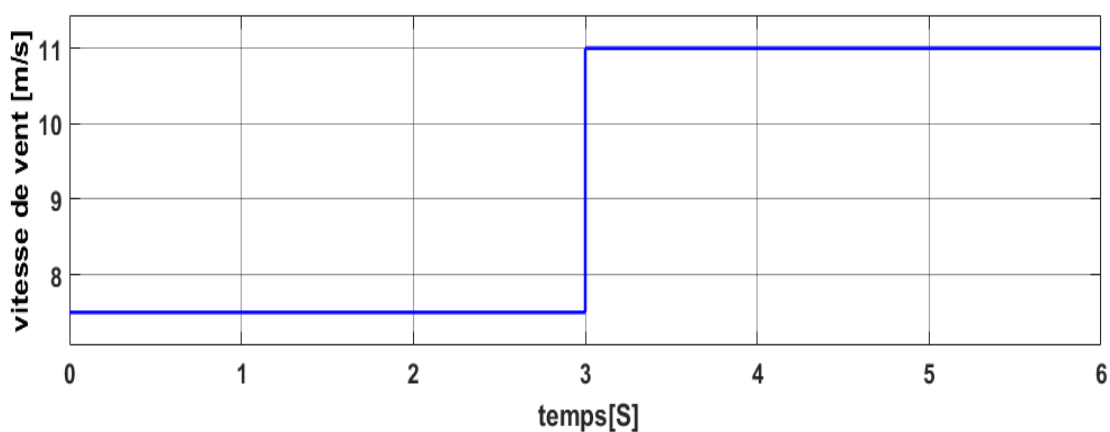


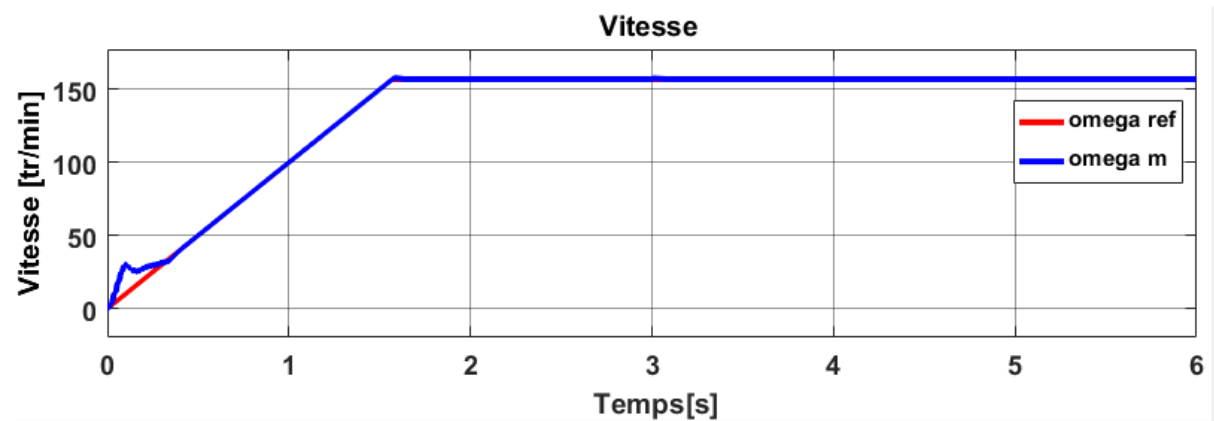
Figure II-10: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse[32].

#### ➤ Résultats de simulation :

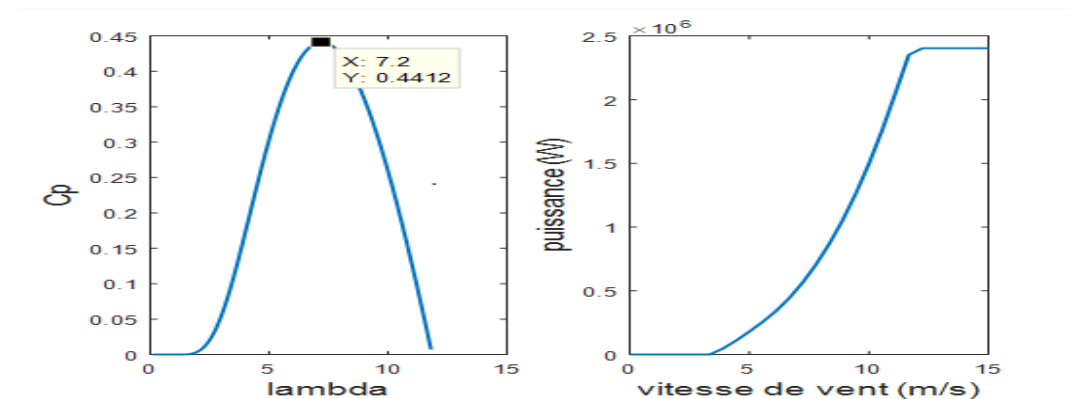
Les figures II-11[a, b, c] présentent le comportement dynamique des différentes grandeurs de la turbine éolienne par l'utilisation de la technique MPPT avec asservissement de vitesse en adoptant un régulateur de type PI. On remarque que la réponse de la vitesse mécanique présente une dynamique plus rapide par rapport à celle obtenue par la MPPT sans asservissement de vitesse. Le coefficient de puissance et le rapport de vitesse sont ajustés à leurs valeurs optimales ( $C_p=0.44$ ,  $\lambda=7.2$ ).



(a) : Evolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s).



(b): Vitesse de mécanique et sa référence.



(c) : Caractéristiques de l'éolienne par rapport à ces coefficients.

Figure II-11 : Résultats de la MPPT avec asservissement de vitesse.

### II-6. Topologie et mode de fonctionnement de la Machine Asynchrone Double Alimentation

#### II-6-1. Structure de la machine à double alimentations

La machine asynchrone à double alimentation présente 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.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil, 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[40].

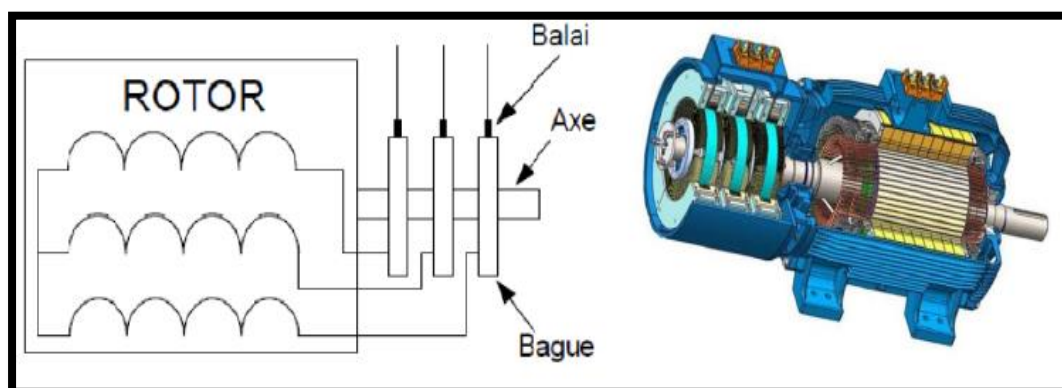


Figure II-12: le Structure du MADA a rotor bobiné[32] .

## CHAPITRE II Modélisation de la turbine éolienne et la GADA

### II-6-2. Modes de fonctionnement de la MADA :

#### II-6-2-1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone :

La puissance est fournie par le réseau au stator, et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme, figure (II.13.A). La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

#### II-6-2-2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone :

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme, figure (II.13.B). La machine à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

#### II-6-2-3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone :

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme, figure (II.13.C). La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

#### II-6-2-4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone :

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.13.D). La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

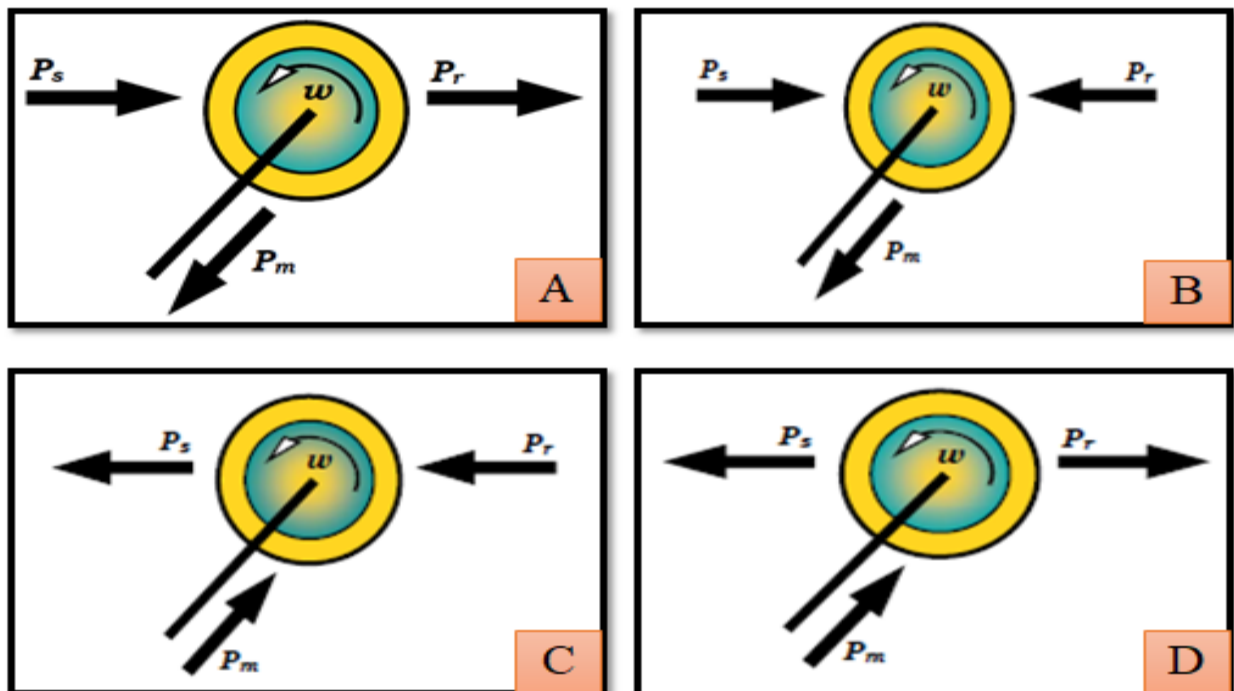


Figure-II-13 : Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants[41] .

## II-7. Modèle de la GADA dans le repère de Park

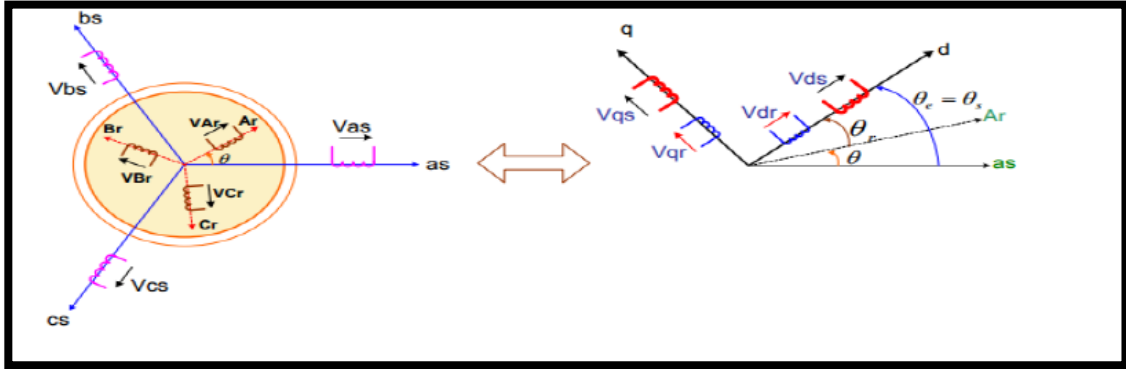
La transformation de PARK est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q (figures (II-14)) continu.

L'application de la transformation de PARK sur les enroulements statoriques et rotoriques conduit à l'écriture des équations du système comme élaborées ci-dessous [42].

Avec :

d : axe directe stator et rotor.

q: axe en quadrature stator et rotor.



**Figure II-14: Passage de triphasé au biphasé.**

- Les tensions de statoriques et rotoriques sont[43]:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [p(\theta)]^t \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = [p(\theta)]^t \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.24}$$

- Les équations dynamiques de la génératrice sont exprimées par:

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \dot{\theta}_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \dot{\theta}_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = -R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = -R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \dot{\theta}_r \phi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.25}$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = -L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \phi_{sq} = -L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} - L_m I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} - L_m I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.26}$$

- Le couple électromagnétique est exprimé par:

$$C_{em} = p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad \text{II.27}$$

- Les puissances active et réactive statoriques et rotoriques de la GADA sont respectivement données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \\ P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad \text{II.28}$$

- La fréquence de la tension statoriques étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par[44]:

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad \text{II.29}$$

### II-8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du modèle aérodynamique et mécanique de la turbine. Ensuite, nous avons considéré que l'éolienne se situait dans sa zone de fonctionnement optimale et qu'elle fonctionnait en régime permanent quelle que soit la vitesse du vent appliquée sur les pales. Nous avons donc centré notre étude sur la commande dans cette zone de fonctionnement permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible au sein du vent. A cet effet deux méthodes de contrôle MPPT ont été examinées et détaillées (avec ou sans asservissement de la vitesse de rotation). L'asservissement de vitesse est réalisé par un régulateur de type PI. En dernier, nous avons développés les modèles de la GADA.

**CHAPITRE III :**  
**Commande de la chaîne**  
**éolienne à base d'une**  
**GADA**



# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

## III-1. Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne[17].

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisie d'étudier la commande de la chaîne éolienne complète basée sur la génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) principalement au niveau de l'amélioration de la commande en puissance. Le contrôle vectoriel de la GADA sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau [45].

Dans la première partie du chapitre, nous présenterons l'architecture du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA connectée au réseau électrique, la deuxième partie, sera consacré à l'orientation du flux statoriques pour le contrôle des puissances active et réactive générées par la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) à base de régulateur PI. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la génératrice, validant ainsi la commande établie.

## III-2. Description et l'architecture du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA

La machine à induction à double alimentation (MADA) ou la machine à induction à rotor bobiné sont des termes couramment utilisé pour décrire une machine électrique, qui a été utilisée pendant plusieurs décennies dans diverses applications, souvent dans la gamme de mégawatts de puissance et aussi moins fréquemment dans la gamme d'un quelques kilowatts. Il peut être avantageux dans les applications qui ont une plage de vitesse limitée, permettant une réduction de la taille du convertisseur électronique d'alimentation comme, par exemple, génération à vitesse variable, pompage de l'eau et ainsi de suite[46].

L'architecture du dispositif de commande est présentée par la Figure III.1. Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien. La figure III.1 est constituée d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre triphasé de courant. La turbine éolienne entraîne la GADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques également connu dans la littérature sous le nom de convertisseur réversible ou bidirectionnel[47], mis en cascade à travers un bus continu [7].

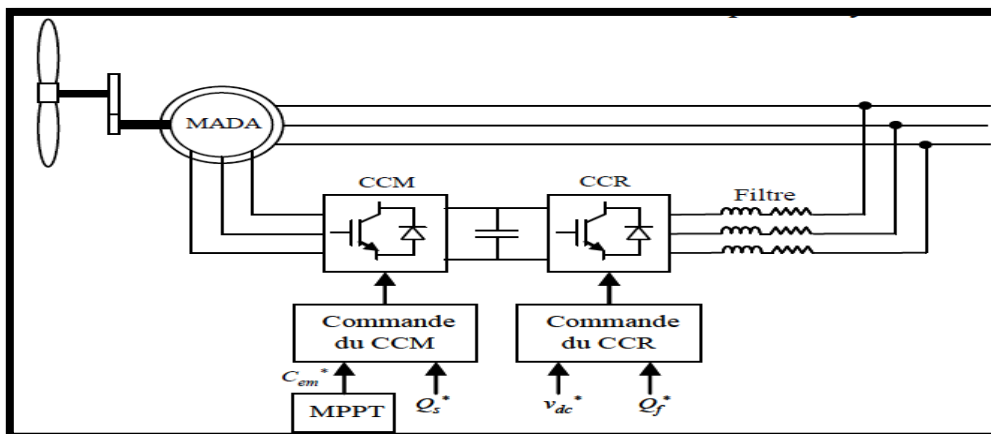


Figure III-1 : Architecture de commande du système éolien.

# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

D'après la Figure III.1, trois commandes sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit "MPPT" (Maximum Power Point Tracking),
- la commande du CCM en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive statoriques de la GADA,
- la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau[5].

## III-3. La commande Vectorielle

### III-3-1. But et principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle de la machine asynchrone a pour objectif d'égaliser les performances qu'offre la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. En effet dans cette dernière le découplage entre le flux et le couple est naturellement réalisé. Ainsi, pour arriver à des situations de commande similaire à celles de la machine à courant continu, il faut, par un système de commande extérieur à la MAS, réaliser un découplage du flux et du couple, ce évitera l'interférence des transitoires du flux avec ceux du couple. Cela réalise aujourd'hui par la commande vectorielle à flux orienté ou par champ orienté (de l'anglais, Field Oriented Control ou FOC)[48].

### III-3-2. Modèle de la GADA avec orientation du flux statoriques :

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d - q) suivant le flux statoriques. Pour établir cette commande, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques et rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaires sont nulles[49].

#### III-3-2-1. Choix du référentiel pour le modèle de la GADA dans le repère dq

Le champ statoriques tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statoriques qui donne une idée visuelle de la phase et de l'amplitude du flux.

En choisissant le référentiel diphasé dq lié au champ tournant statoriques et en plaçant le vecteur flux statoriques  $\theta_s$  sur l'axe d. Le référentiel choisi est celui lié au champ tournant et le flux statoriques est orienté sur l'axe d, ce qui nous donne[5],[12] :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_s = \omega_s \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{\theta}_e = \omega_e = \omega_s - \omega_r = p\Omega_m \end{cases} \quad \text{III.1}$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Avec :

$\omega_s$  : La pulsation statoriques.

$\omega_r$  : La pulsation rotoriques.

$\omega_e$  : La pulsation électrique entre les bobinages statoriques et rotoriques.

## CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

Ainsi, la figure (III-2) nous montre le principe d'orientation de ce flux statoriques.

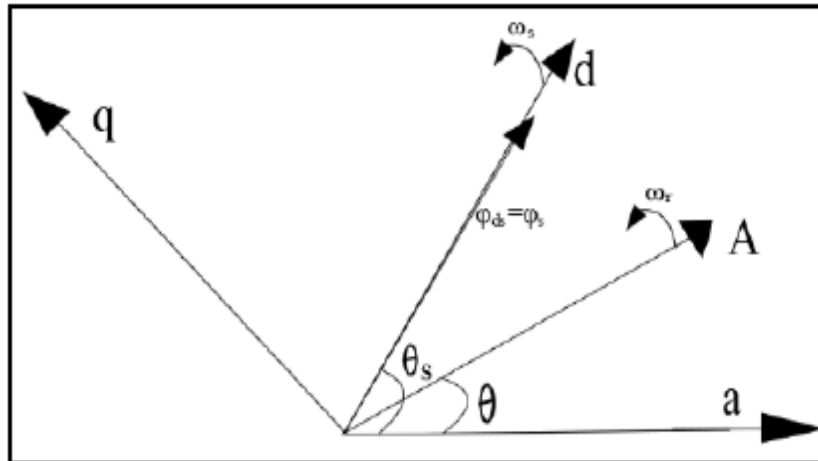


Figure III-2 : Orientation du flux statoriques[12].

- les composantes directe et en quadrature des flux de la GADA s'écrivent :

$$\text{Pour le stator : } \begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} = 0 \end{cases} \quad \text{III.3}$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} \varphi_{rd} = L_r \sigma I_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \sigma I_{rq} \end{cases} \quad \text{III.4}$$

Avec :  $\sigma$ : est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q. Il est égal à[49]: .

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad \text{III.5}$$

- A partir des équations des composantes directes et quadratures du flux statoriques on obtient[44] :

$$\begin{cases} I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ I_{sd} = -\frac{\varphi_{sd} - L_m I_{rd}}{L_s} \end{cases} \quad \text{III.6}$$

- L'expression du couple devient alors[19] :

$$C_{em} = -p \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \varphi_{sd} I_{rq} \quad \text{III.7}$$

- L'expression des tensions statoriques et rotoriques de la GADA s'écrivent :

$$\text{Pour le stator : } \begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad \text{III.8}$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - e_q \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{rq} + e_d + e_\varphi \end{cases} \quad \text{III.9}$$

Avec[7] :

## CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

$$\begin{cases} e_d = L_r \omega_r \sigma I_{rd} \\ e_q = -L_r \omega_r \sigma I_{rq} \\ e_\phi = \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad \text{III.10}$$

- A partir du système d'équation (III. 9), les expressions des tensions rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - L_r \omega_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{rq} + L_r \omega_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad \text{III.11}$$

- En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - L_r \omega_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \omega_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad \text{III.12}$$

- En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd}(s) = [R_r + (L_r \sigma)s] I_{rd} - \omega_r \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq}(s) = [R_r + (L_r \sigma)s] I_{rq} + L_r \omega_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad \text{III.13}$$

- A partir des équations des tensions rotoriques (III.13) on tire les expressions des courants rotoriques d'axe d-q[12]:

$$\begin{cases} I_{rd}(s) = \frac{V_{dr} + \omega_r \sigma L_r I_{rq}}{R_r + (L_r \sigma)s} \\ I_{rq}(s) = \frac{V_{qr} - \omega_r \sigma L_r I_{rd}(s) - \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s}{R_r + (L_r \sigma)s} \end{cases} \quad \text{III.14}$$

- Dans le repère triphasé a, b, c, la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s I_{ns} + \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad \text{III.15}$$

- Si l'on néglige la résistance  $R_s$ , cette relation devient [50]:

$$V_{ns} = \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad \text{III.16}$$

- Dans la plupart du temps, les générateurs utilisés dans des applications éoliennes sont de forte ou de moyenne puissance. Ceci nous permettra de négliger la résistance statoriques et de supposer constant le flux statoriques. Cette considération associée à l'équation (III.7) montre que le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant rotoriques en quadrature[51], Ainsi la tension statoriques devient[12] :

$$V_{sd} = 0 ; \quad \text{III.17}$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_{sd} \quad \text{III.18}$$

- Les puissances active et réactive du stator et du rotor des GADA sont respectivement données par :

## CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

$$\text{Pour le stator : } \begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{III.19}$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad \text{III.20}$$

- Les expressions des puissances active et réactive peuvent être simplifiées comme suit :

$$\text{Pour le stator : } \begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad \text{III.21}$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} P_r = g \frac{V_s L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_r = g \frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{III.22}$$

Avec :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad \text{III.23}$$

- Les puissances de sortie actives et réactives totales du vent générateur sont donnés par[52]:

$$\begin{cases} P_t = P_s + P_r = (g - 1) V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_t = Q_s + Q_r = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} + (g - 1) \frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{III.24}$$

- Les expressions de la puissance active et réactive vont nous permettre d'établir la commande du convertisseur côté machine. Tous les paramètres décrivant la commande sont connus[12].
- Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques [49]:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \left( \frac{L_m}{L_s} \right) I_{dr} \\ I_{sq} = - \left( \frac{L_m}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad \text{III.25}$$

- Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statoriques ( $\theta_s$ ) et pour les grandeurs rotoriques ( $\theta_r$ ), nous avons utilisé une boucle à verrouillage de phase appelée plus communément PLL (Phase Locked Loop), comme L'illustre la Figure III-3. Cette PLL permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau[5].

# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

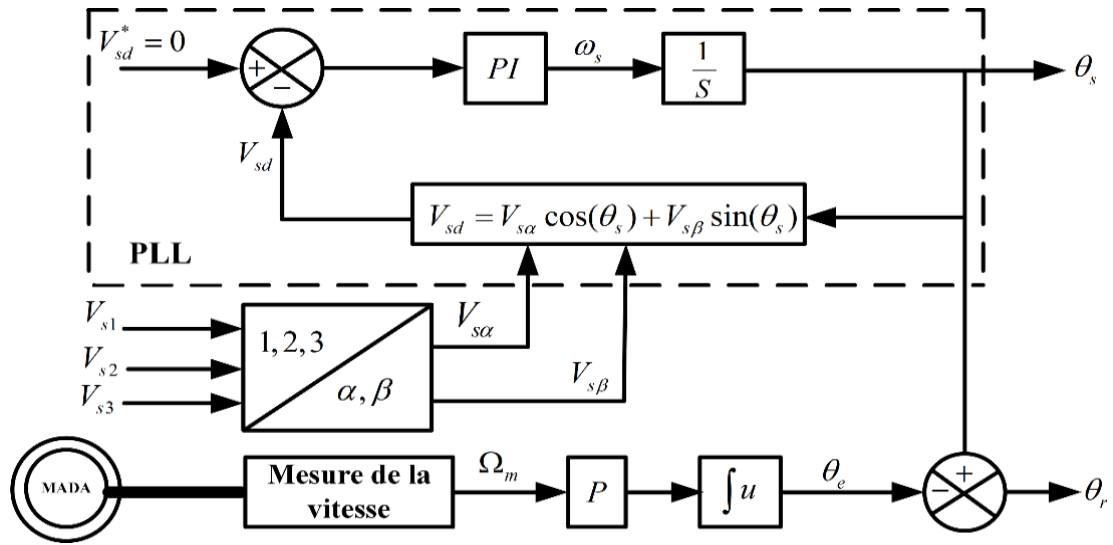


Figure III-3 : Schéma de principe de la structure PLL classique[53] .

## III-4. Commande du convertisseur côté GADA (CCM)

Le principe de commande du convertisseur côté rotor (CCM) est de régler le transfert des puissances actives et réactives à travers le stator de la GADA vers le réseau électrique. Il reçoit les puissances actives et réactives de référence ( $P_s$  \_ réf,  $Q_s$  \_ réf) de l'unité de supervision locale de chaque éolienne et envoie les ordres de commande au convertisseur. Comme montré sur la figure III-4, le schéma bloc du contrôle du convertisseur coté GADA[7],[15].

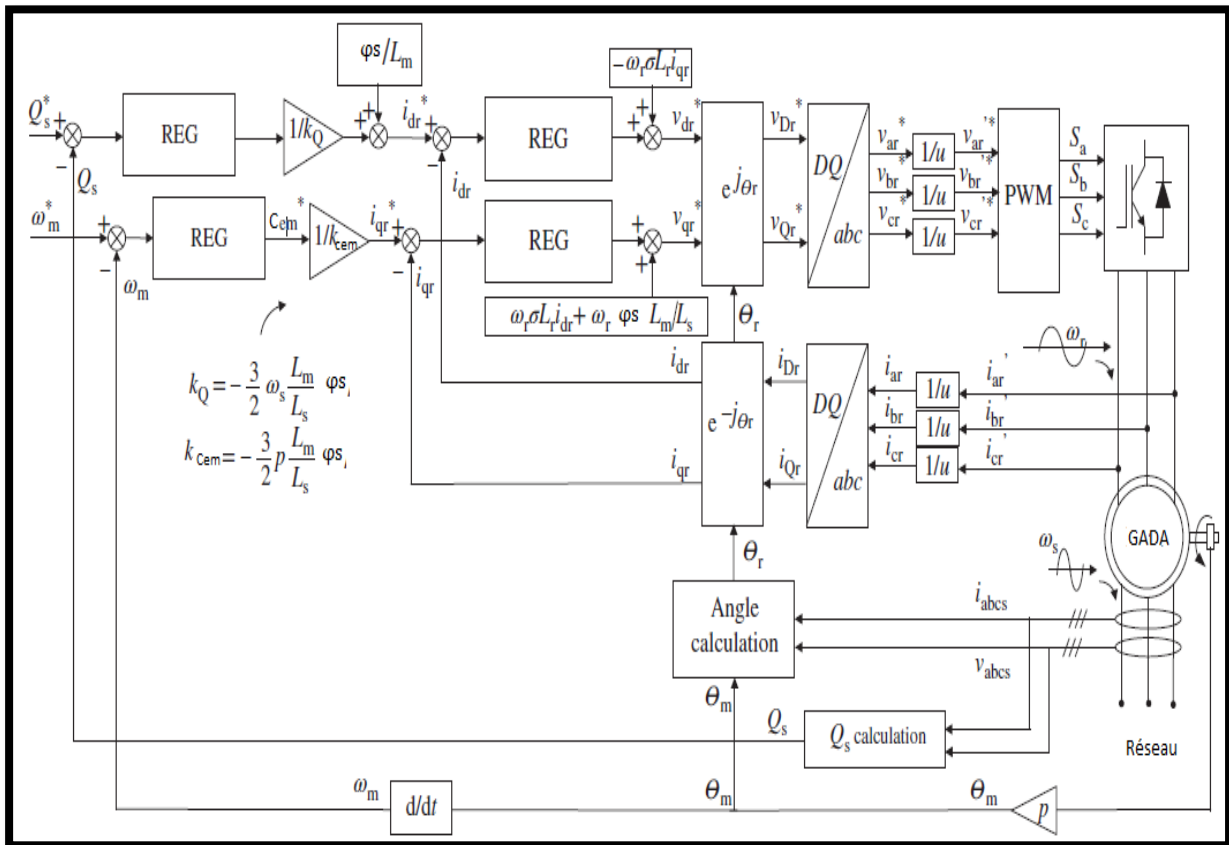


Figure III-4 : Principe de contrôle du CCM[46],[54].

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

## III-5. Commande des puissances active et réactive de la GADA

Le contrôle des puissances actives et réactives produites par la GADA a été largement traité dans la littérature [55]. Il existe deux solutions pour effectuer la commande en puissance de la GADA.

- ✚ La commande vectorielle Directe, qui consiste à négliger les termes de couplage ;
- ✚ La commande vectorielle Indirect, qui consiste à tenir compte des termes de couplage.

### III-5-1. Commande vectorielle directe

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (figure III.5) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. La commande des puissances de sortie de la GADA dépendent des tensions rotoriques  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  à contrôler. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{M V_s}{L_s}$  [4],[19], [56].

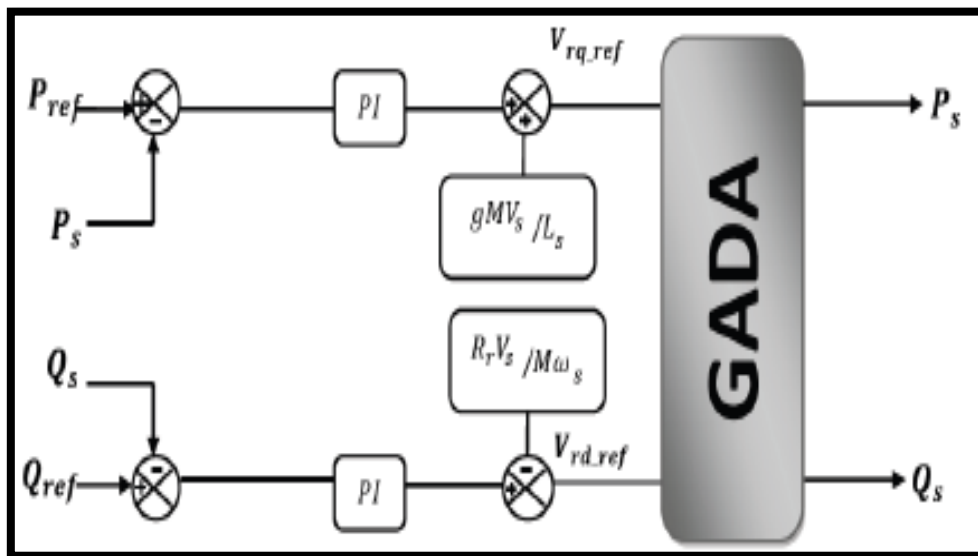


Figure III-5: Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive[45].

### III-5-2. Commande vectorielle indirecte :

La méthode indirecte a été introduite par K. Hasse. Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [19].

# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

## III-5-2-1. Commande Indirecte sans Boucles des Puissances :

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine[4].

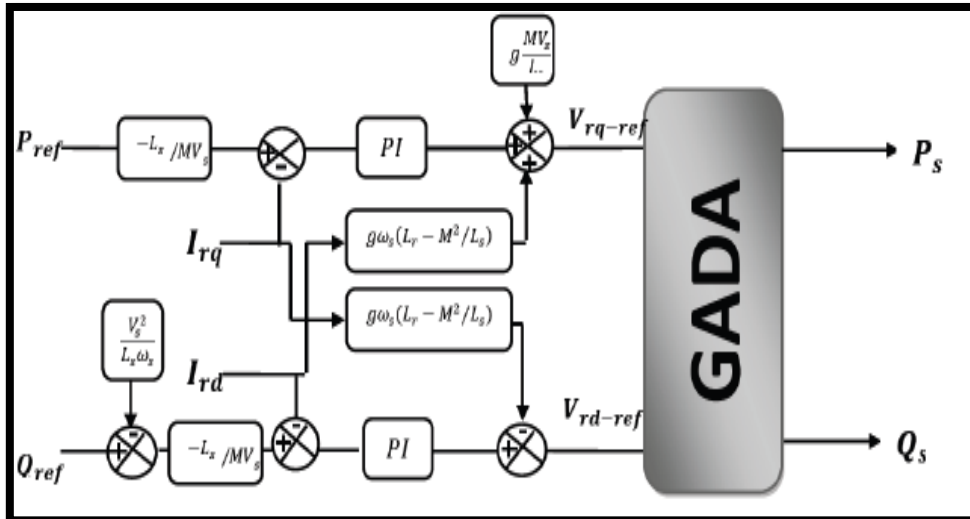


Figure III-6: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance (en BO) [45].

## III-5-2-2. Commande Indirecte avec boucle de puissance :

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotoriques avec un retour du système qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotoriques pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  et les puissances  $Q_s$  et  $P_s$  en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure III.7

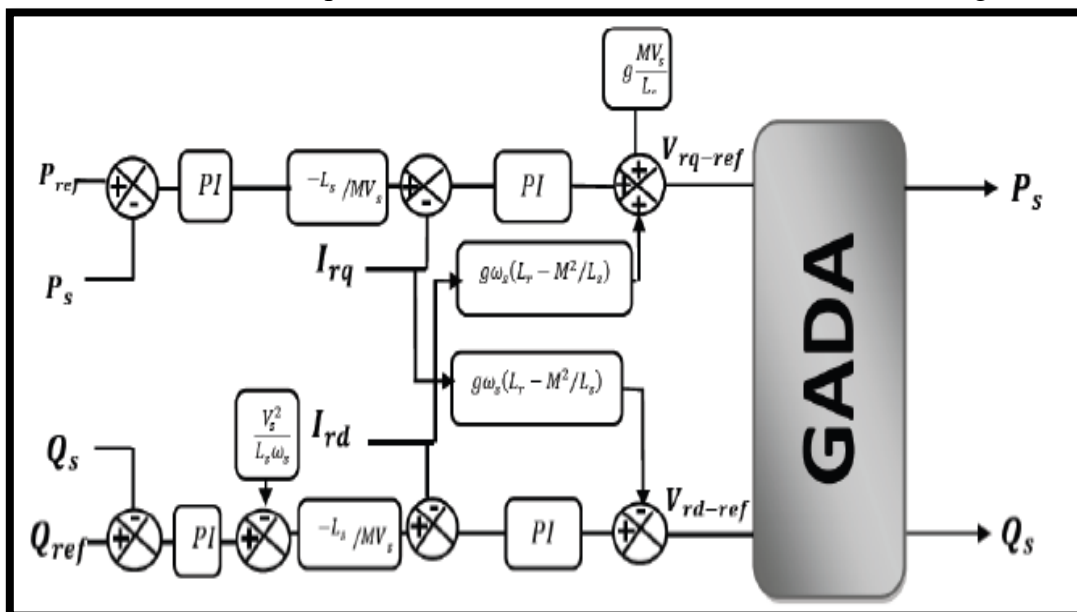


Figure III-7: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance (en BF) [45].



# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

## III-6. Commande du convertisseur coté réseau (CCR) :

Le CCR est connectée au réseau à travers un filtre RL. Ce convertisseur a pour objectif de maintenir la tension constante aux bornes du bus continu ainsi que régler le facteur de puissance au point de connexion avec le réseau. Le système côté réseau est composé du convertisseur côté réseau et du filtre côté réseau. La figure (III-8) illustre un modèle simplifié du système côté réseau [57].

- Le CCR est un convertisseur bidirectionnel modélisé avec des commutateurs bidirectionnels idéaux qui fonctionne comme un redresseur lorsque le ou les glissements sont positifs (mode hypo synchrone) et comme onduleur lorsque le glissement est négatif (mode hyper synchrone)[54].
- L'interrupteur idéal est normalement créé par un semi-conducteur contrôlé avec une diode en antiparallèle pour permettre la circulation du courant dans les deux directions. Dans cette exposition, le semi-conducteur contrôlé utilisé est un IGBT.
- Le filtre côté réseau est normalement composé d'au moins trois inductances (L), qui sont le lien entre chaque phase de sortie du convertisseur et la tension du réseau. Lorsqu'une exigence de filtre élevée est nécessaire, chaque inductance peut être accompagnée d'un condensateur (LC) ou même d'un condensateur et d'une inductance de plus (LCL).
- La tension du réseau est normalement fournie par un transformateur. Cette tension alternative est censée être équilibrée et sinusoïdale dans des conditions de fonctionnement normales[57].

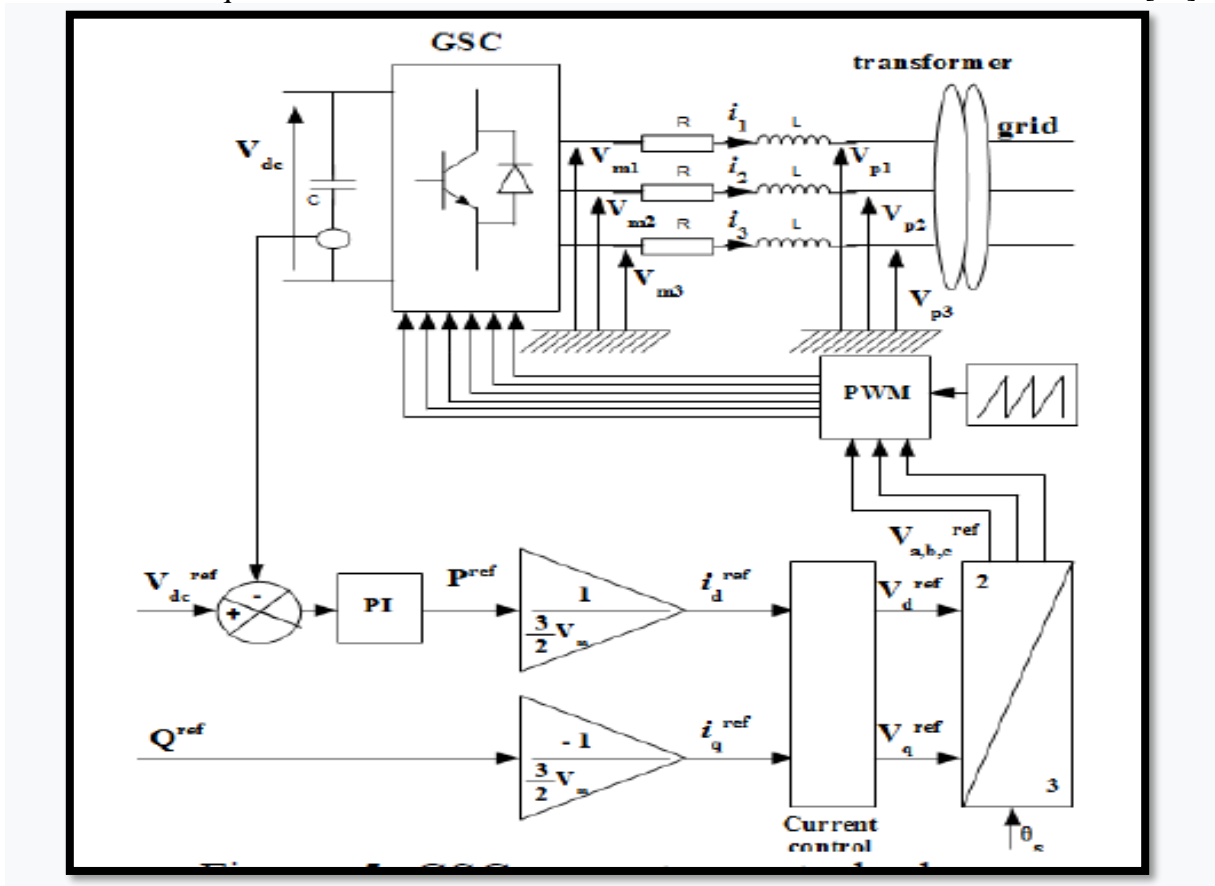


Figure III-8 : Schéma de commande du convertisseur CCR.

Les puissances active et réactive côté réseau s'écrit respectivement comme suit[54] :

$$P = \frac{3}{2} V_m I_d$$

III.26

## CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

$$Q = -\frac{3}{2} V_m I_q \quad \text{III-27}$$

Où :  $V_m$  : est l'amplitude de la tension de phase.

### III-7-1. la tension du Bus continu $V_{bus}$

Les deux convertisseurs du système éolien (côté MADA et côté réseau) sont interconnectés par l'intermédiaire d'un bus continu qui autorise ainsi un transfert de puissance entre deux sources à fréquences différentes (figure. III-9). Les deux courants modulés ( $I_{ond}$ ,  $I_{red}$ ) sont respectivement issus du convertisseur coté MADA et de celui coté réseau[7], [19].

- L'évolution de la tension du bus continu est donnée par les formules suivantes :

$$V_{bus} = \frac{1}{C_{bus}} \int i_c dt \quad \text{III-28}$$

- Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (figure III-9) :

$$I_C = (I_{red} - I_{ond}) \quad \text{III-29}$$

$C$  : Représente la capacité du bus continu[19] .

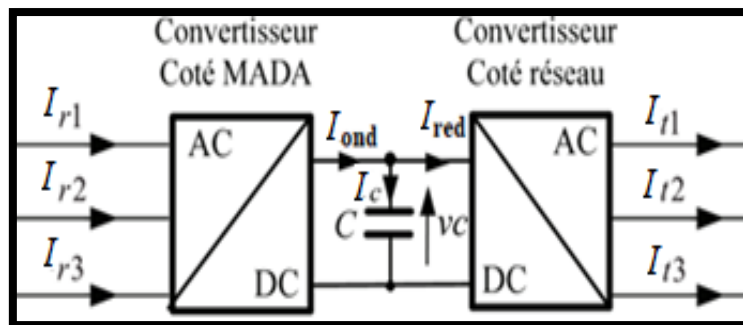


Figure III-9: Interconnexion des deux convertisseurs statiques via un bus continu

#### III-7-1-1. Contrôle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur  $C$  est donnée par l'équation (III-28). La tension de référence du bus continu  $V_{dc}^*$  est comparée à celle mesurée aux bornes du condensateur équivalent  $\widehat{V}_{dc}$ . Le correcteur Proportionnel Intégral (PI) permet de maintenir une tension constante du bus continu en générant la référence du courant à injecter dans le condensateur  $I_c^*$ . La puissance nécessaire pour charger ce condensateur  $P_C^*$  est obtenue simplement par la multiplication du courant de charge  $I_c^*$  et la tension  $\widehat{V}_{dc}$ .

$$P_C^* = I_c^* \cdot \widehat{V}_{dc} \quad \text{III-30}$$

En négligeant les harmoniques dues aux commutations et les pertes dans la résistance du filtre et dans les convertisseurs statiques, la puissance active de référence transitant par le convertisseur coté réseau  $P_t^*$  est obtenue par la soustraction de la puissance  $P_C^*$  de la puissance active apparaissant dans le rotor de la MADA  $\widehat{P}_r$ .

# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

$$P_t^* = \hat{P}_r - P_c^*$$

III-31

Le schéma bloc du contrôle du bus continu est montré dans la figure III-10.

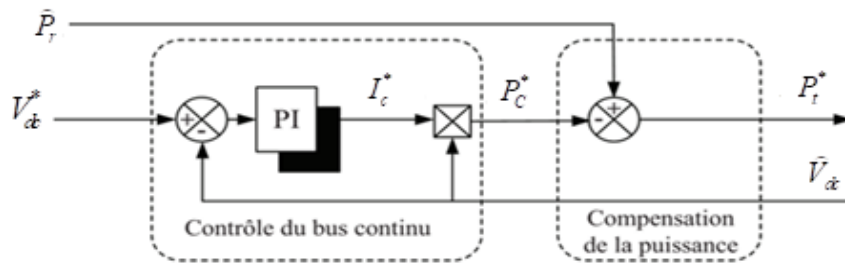


Figure III-10 : Contrôle du bus continu[19],[5].

## III-8. Synthèse du régulateur PI

La stratégie de commande de la GADA utilise un régulateur proportionnel intégral *PI*. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance. Le régulateur *PI* résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions :

- ✓ une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité ou la dynamique du système.
- ✓ une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir.

Sa fonction de transfert est[54] :

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

III-32

## III-9. Simulation du système éolien basé sur une GADA

Dans cette partie, nous présentons le bloc de la chaîne éolienne complète basé sur une GADA. Le système global a été simulé dans un environnement Matlab / Simulink avec les paramètres donnés dans l'annexe A avec les résultats obtenus et leurs interprétations.

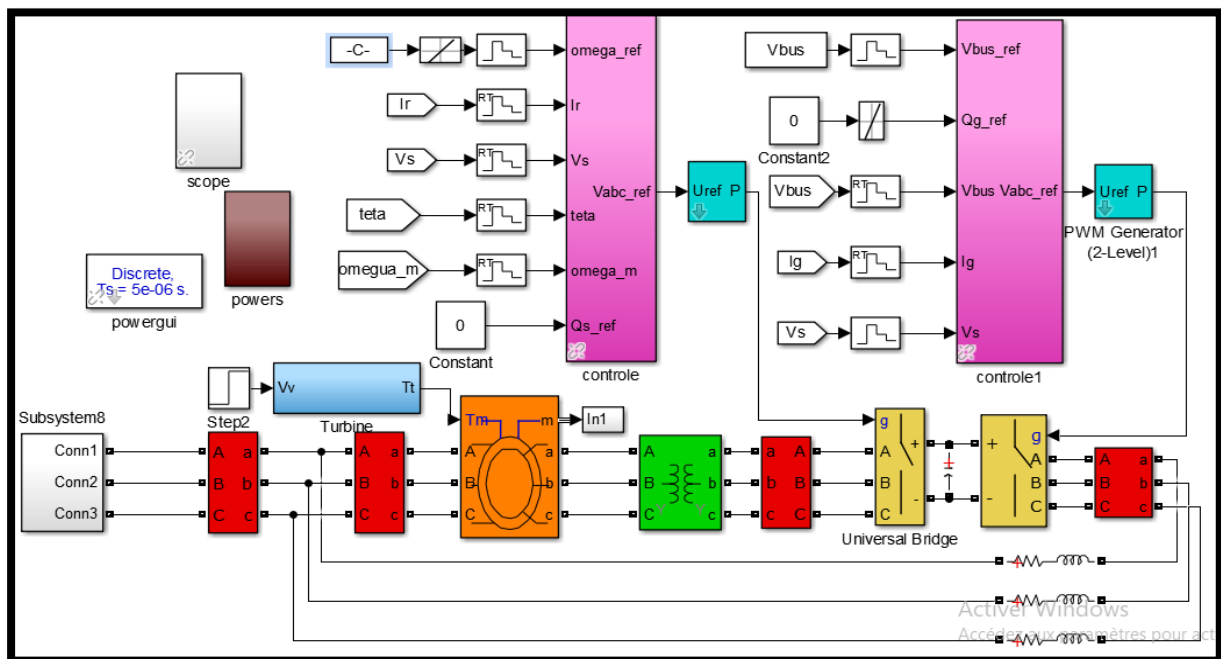


Figure III-11 : Modèle de la chaîne éolienne avec Simulink.

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

## III-10. Résultats de simulations

Afin d'évaluer la structure de contrôle proposée pour la chaine de conversion éolienne à base de la GADA connecté au réseau électrique. Une étude de simulation présentée dans cette section Le système est simulé avec un profil de vitesse du vent ( $t=0$   $V_{vent}=7.5m/s, t=3s$   $V_{vent}= 11m / s$ ) appliqué sur les pales de l'éolienne, ce qui correspond à une vitesse de la GADA à 1500 tr/min par la commande MPPT avec asservissement de vitesse et sans. Pour toute la durée de simulation, la consigne de puissance réactive imposée au stator et au réseau est nulle ( $Q_{s\_ref}=0VAR, Q_{g\_ref}=0VAR$ ).

➤ Résultats de simulation par la commande MPPT avec asservissement de vitesse:

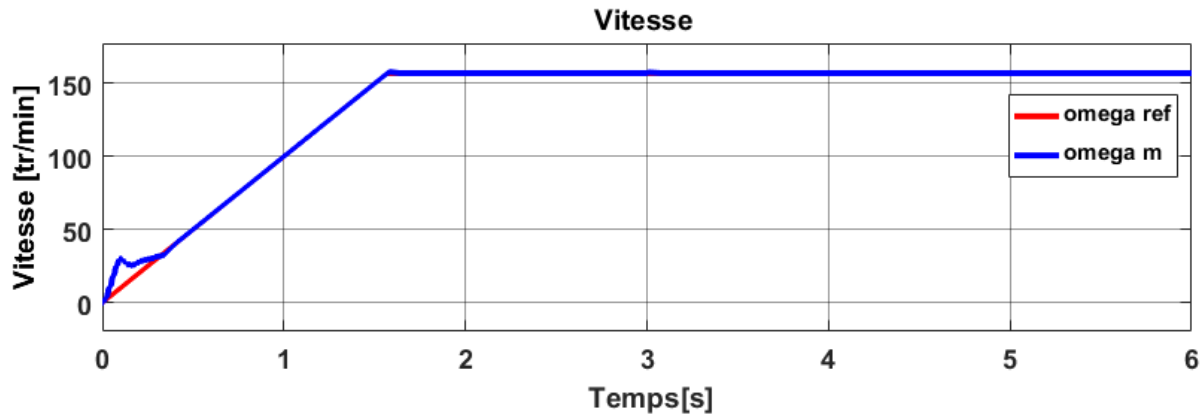


Figure III-12: Vitesse de rotation de la GADA et sa référence.

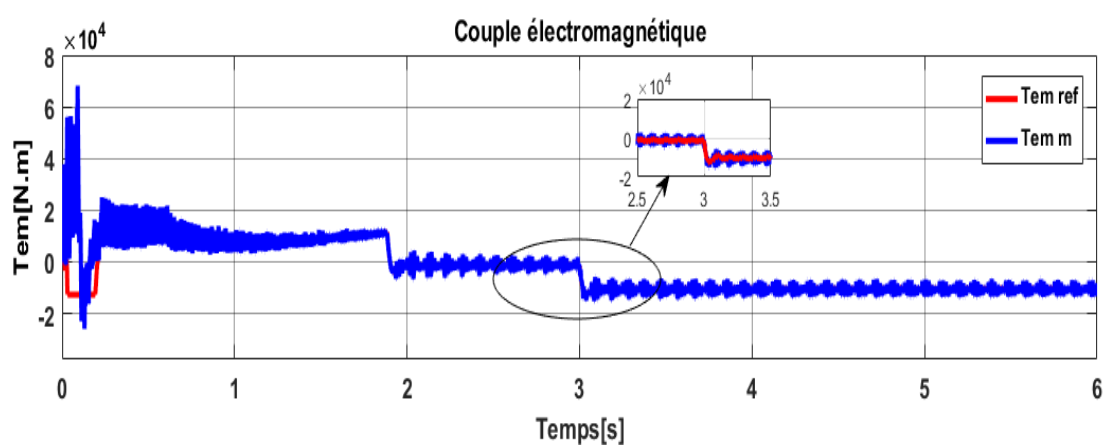


Figure III-13 : Couple électromagnétique et leur référence.

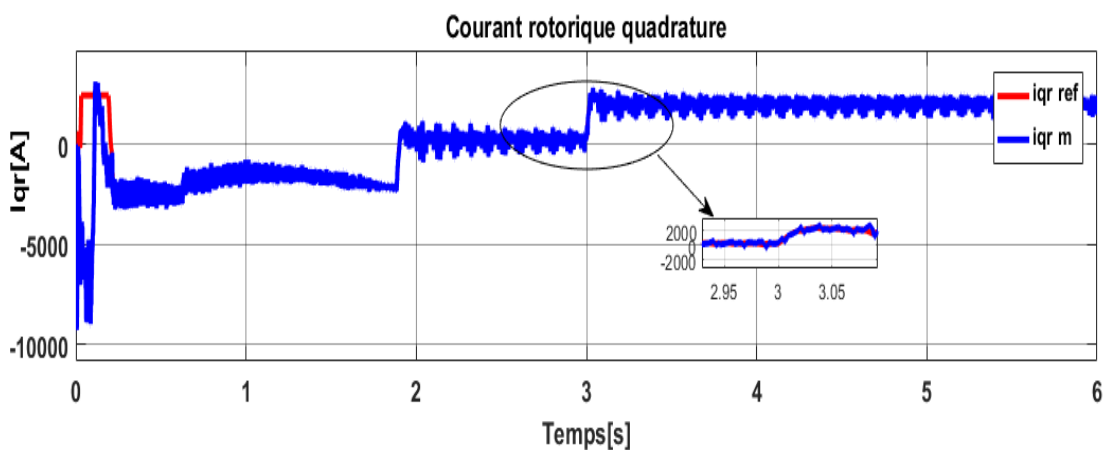


Figure III-14 : Courant rotoriques quadrature.

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

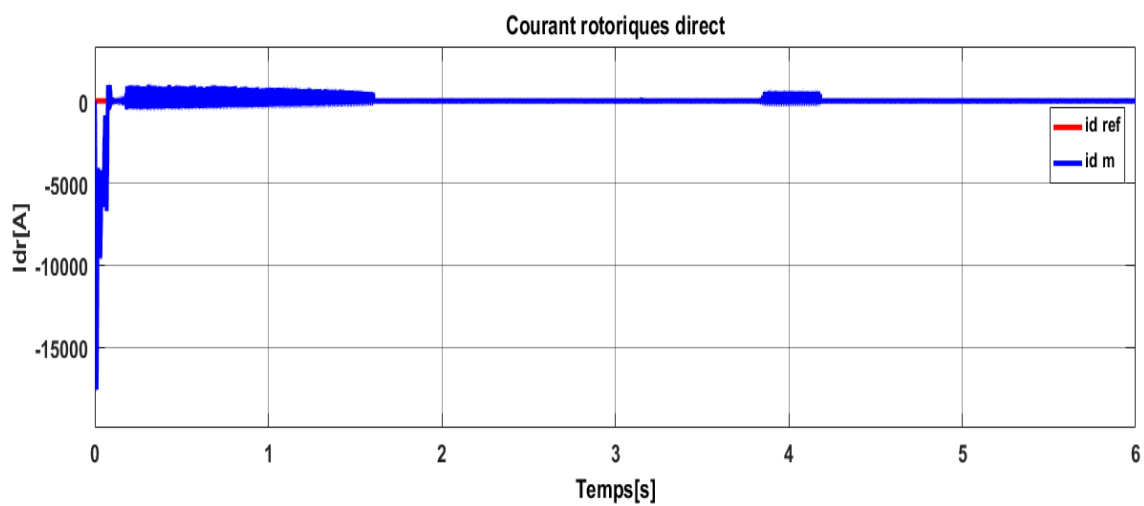


Figure III-15: Courant rotoriques direct.

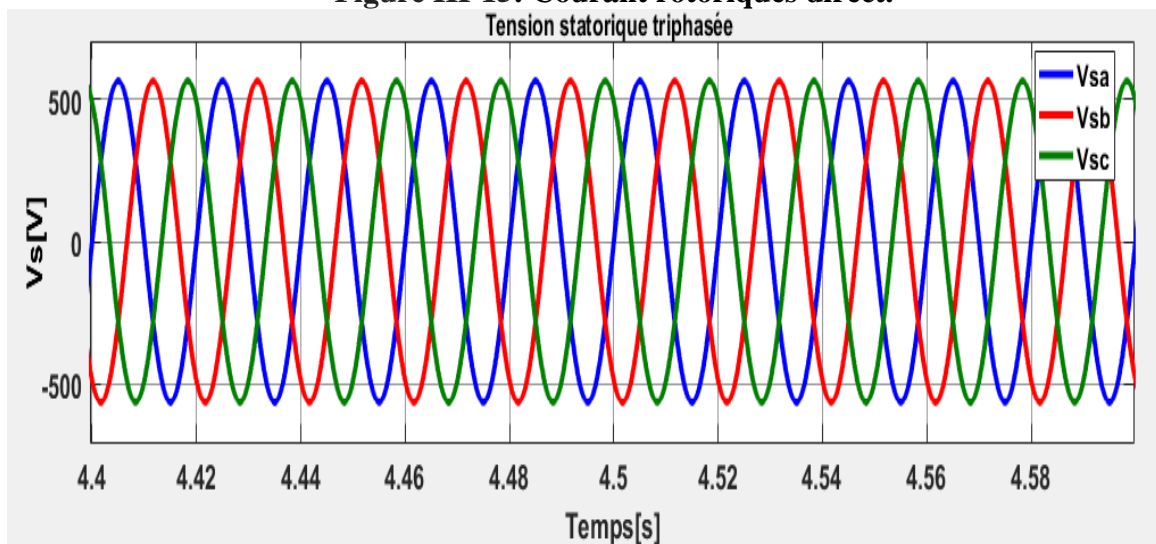


Figure III-16 : Tensions statoriques triphasé de réseau.

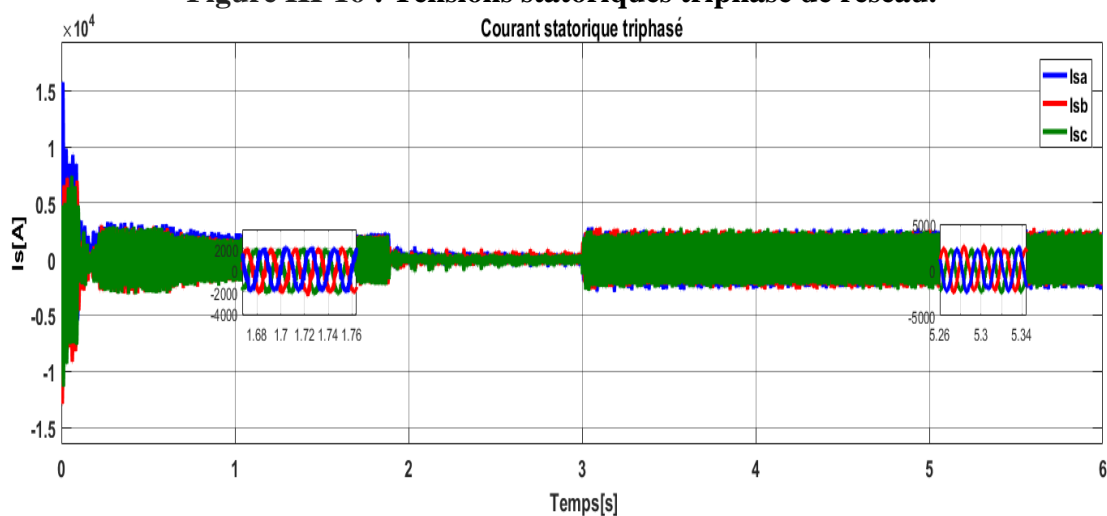


Figure III-17 : Courants statoriques triphasés.

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

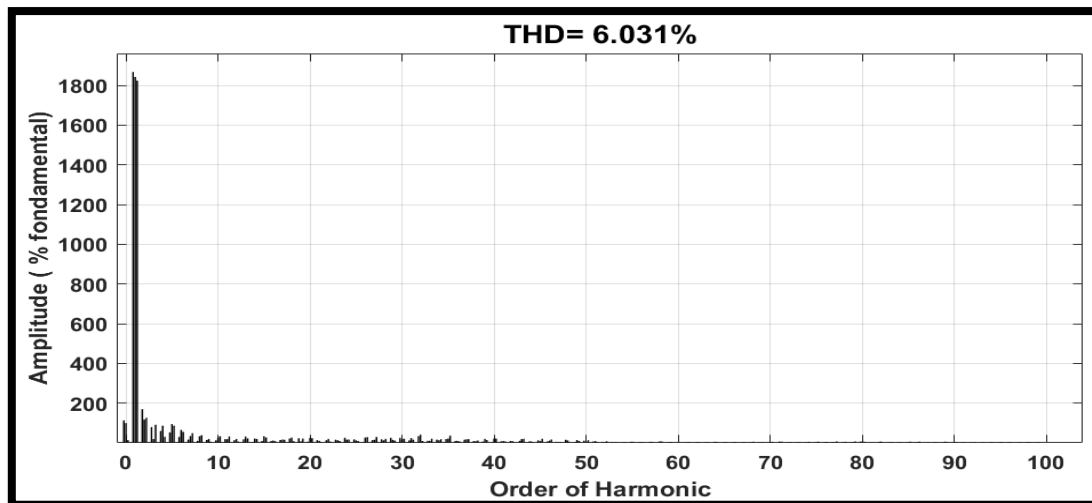


Figure III-18 : Analyse en THD des courants  $I_s$

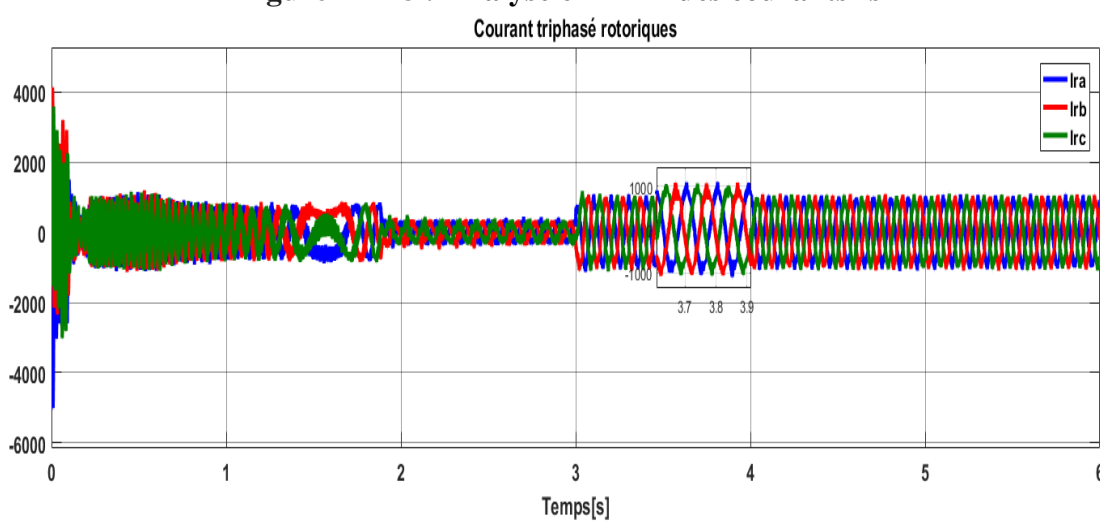


Figure III-19 : Courant rotoriques triphasé coté rotor.

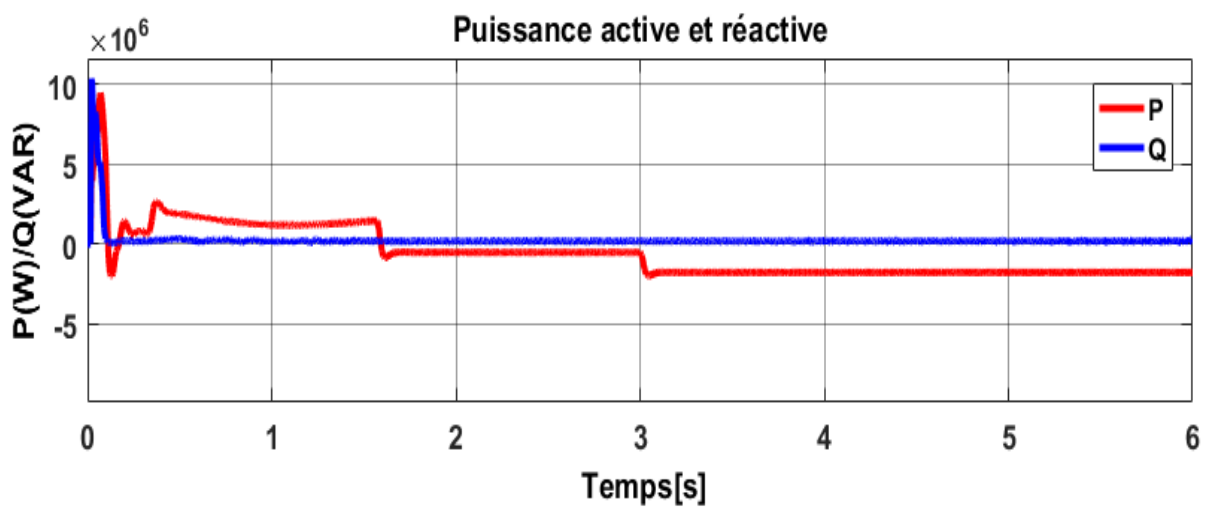


Figure III-20 : Puissances active et réactive de la GADA.

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

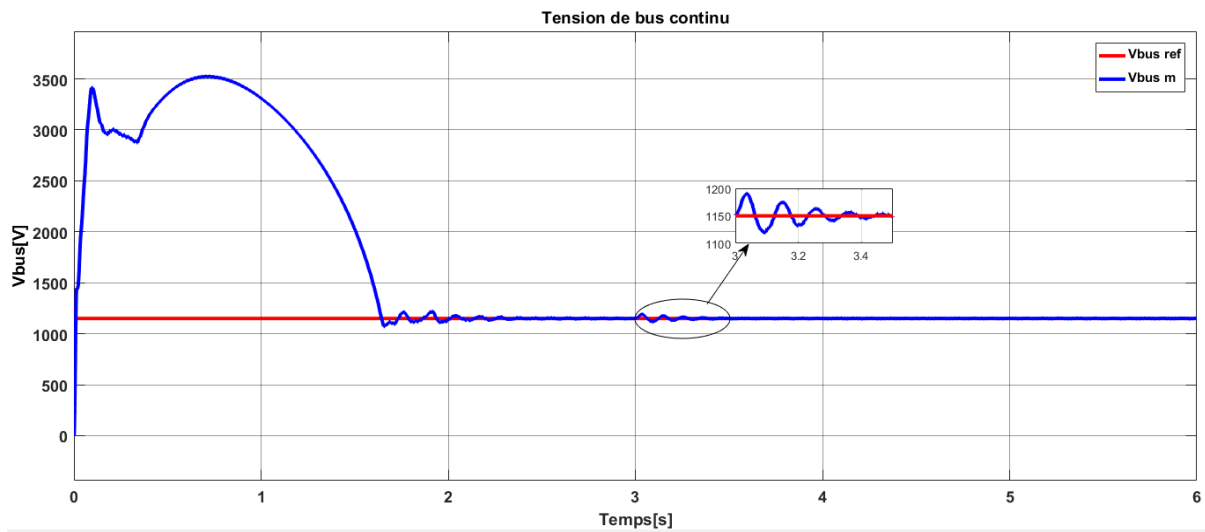


Figure III-21 : Tension de bus continu  $V_{bus}$ .

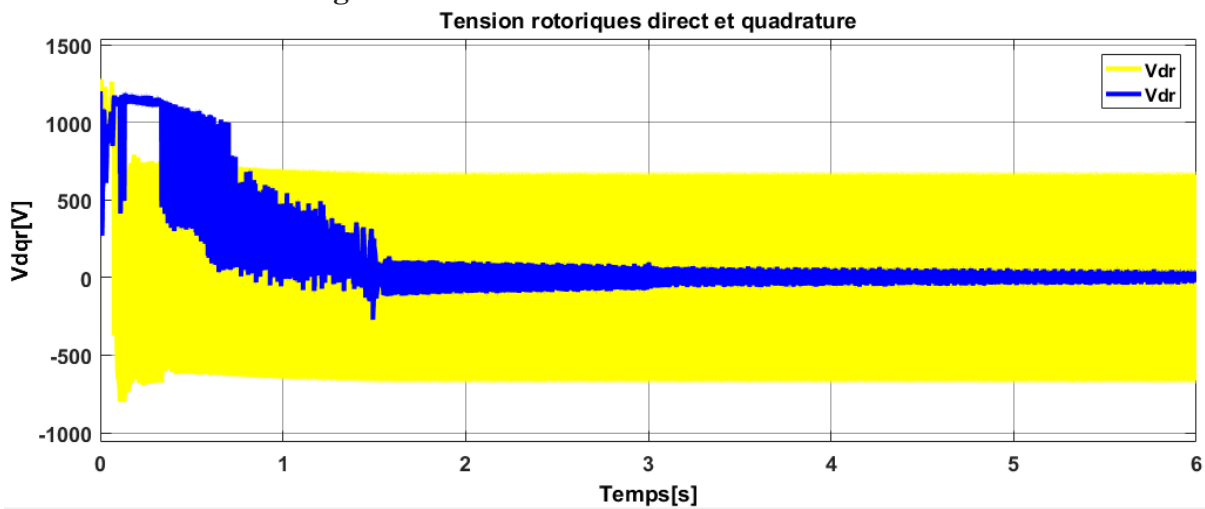


Figure III-22 : Tension rotoriques direct et quadrature.

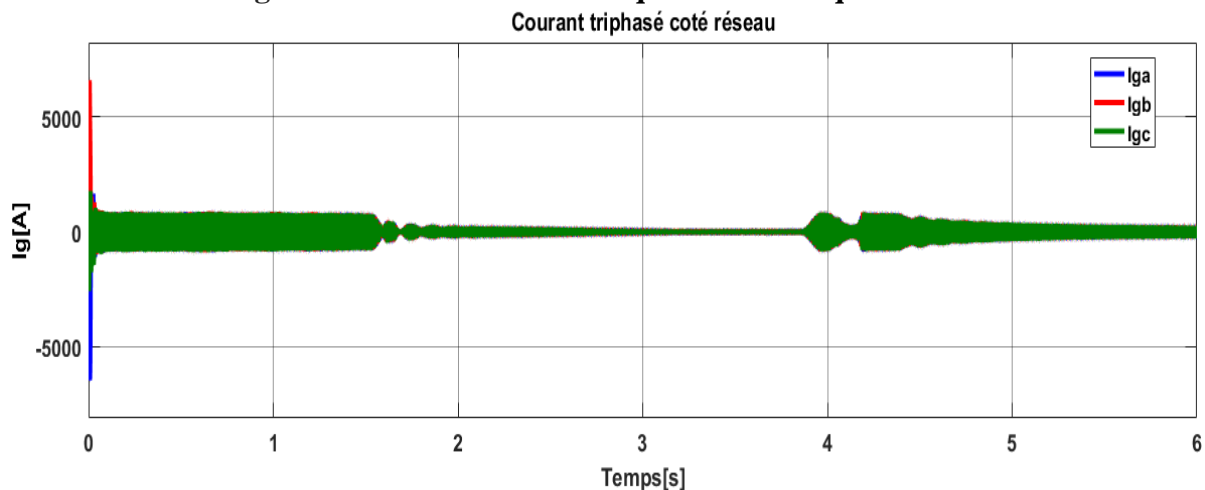


Figure III-23 : Courant triphasé coté réseau.

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

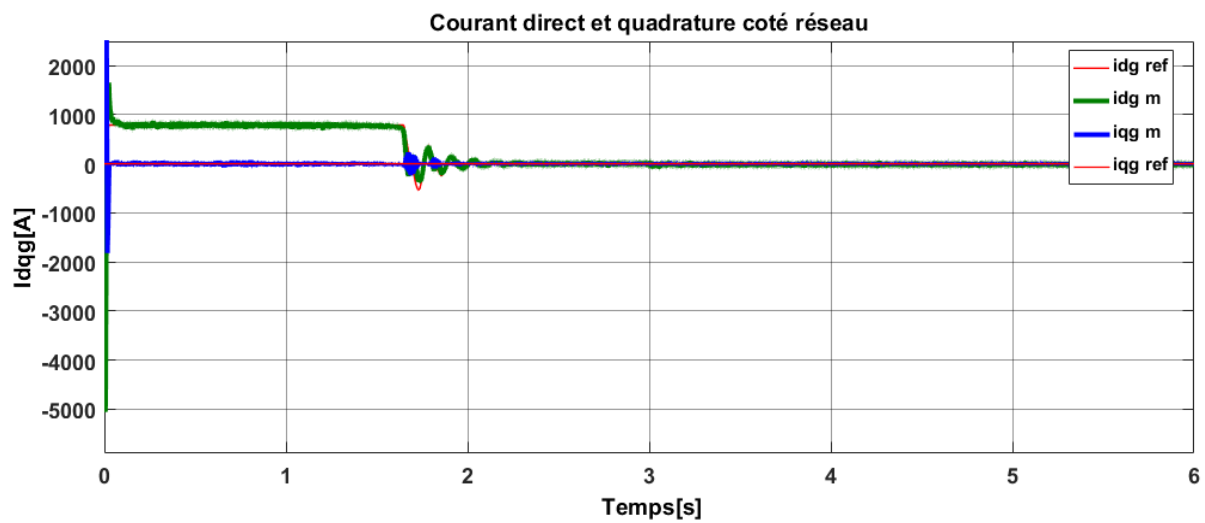


Figure III-24 : Courant direct et quadrature Coté réseau.

➤ Résultats de simulation par la commande MPPT sans asservissement de vitesse:

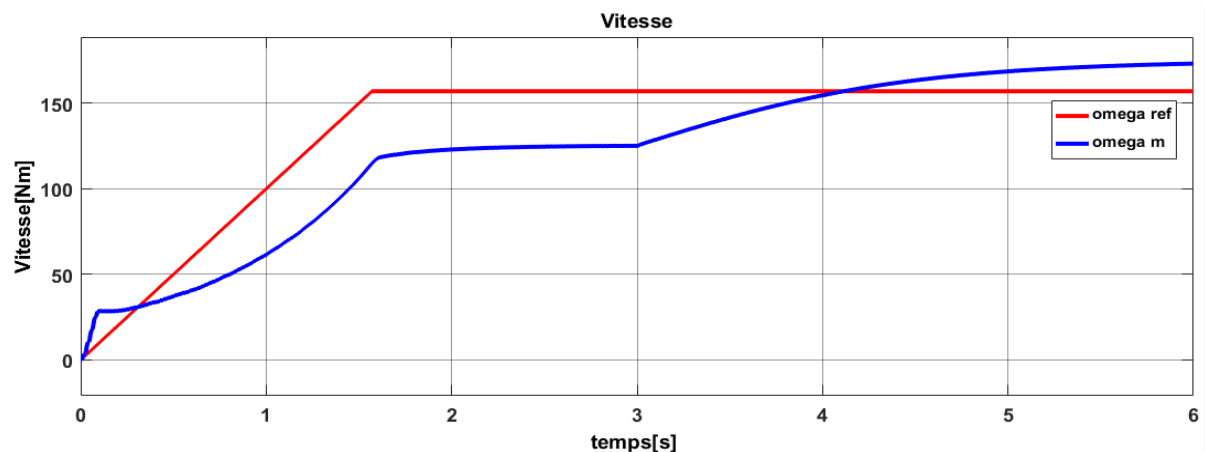


Figure III-25: Vitesse de rotation de la GADA et sa référence.

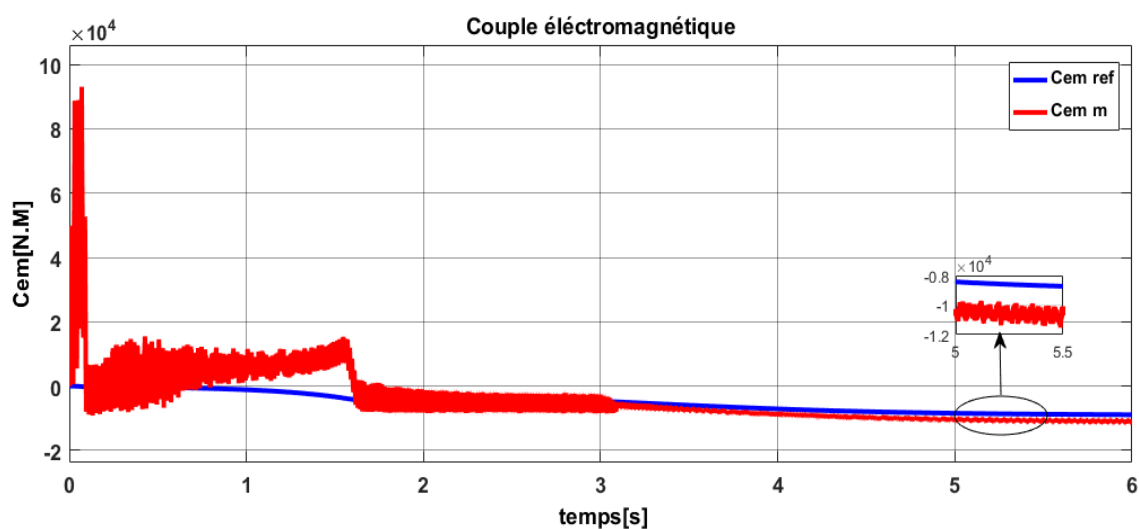


Figure III-26 : Couple électromagnétique et leur référence.



# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

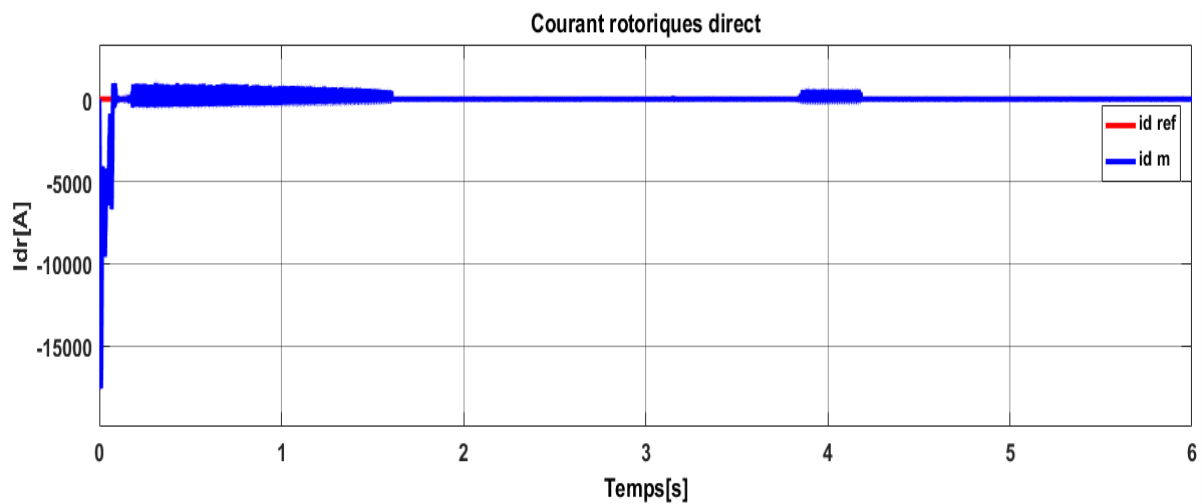


Figure III-27 : Courant rotoriques direct référentielle et mesuré.

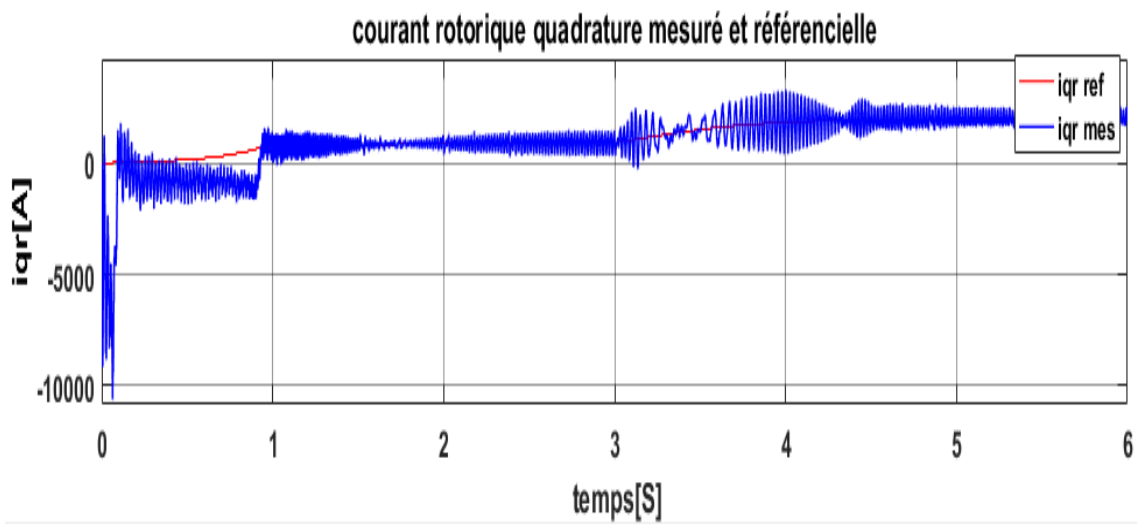


Figure III-28 : Courant quadrature mesuré et référentielle.

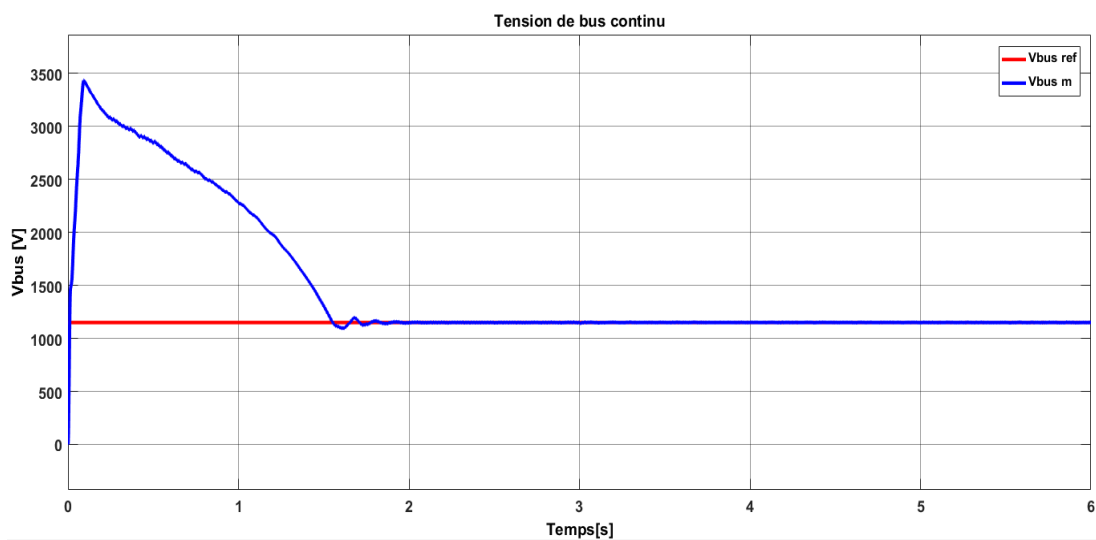


Figure III-29 : Tension de bus continu  $V_{bus}$ .

# CHAPITRE III Commande de la chaine éolienne à base d'une GADA

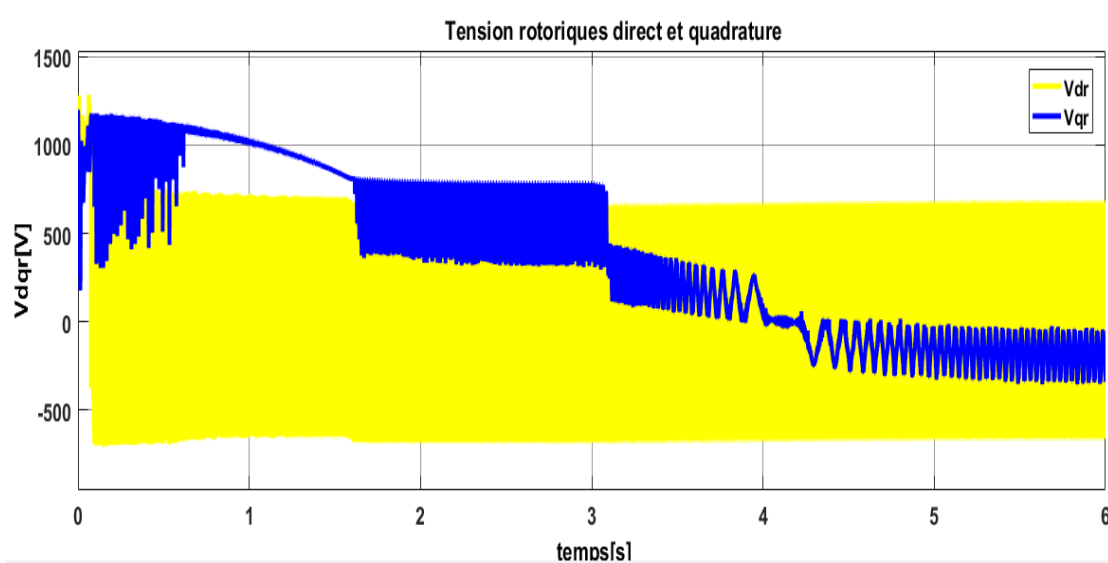


Figure III-30 : Tension rotoriques direct et quadrature.

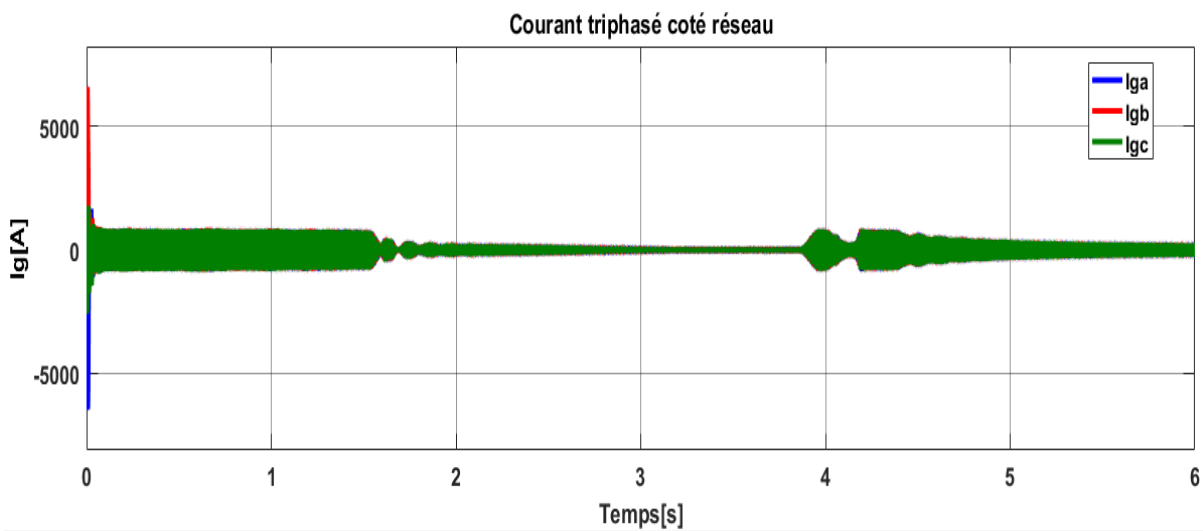


Figure III-31 : Courants triphasés côté réseau.

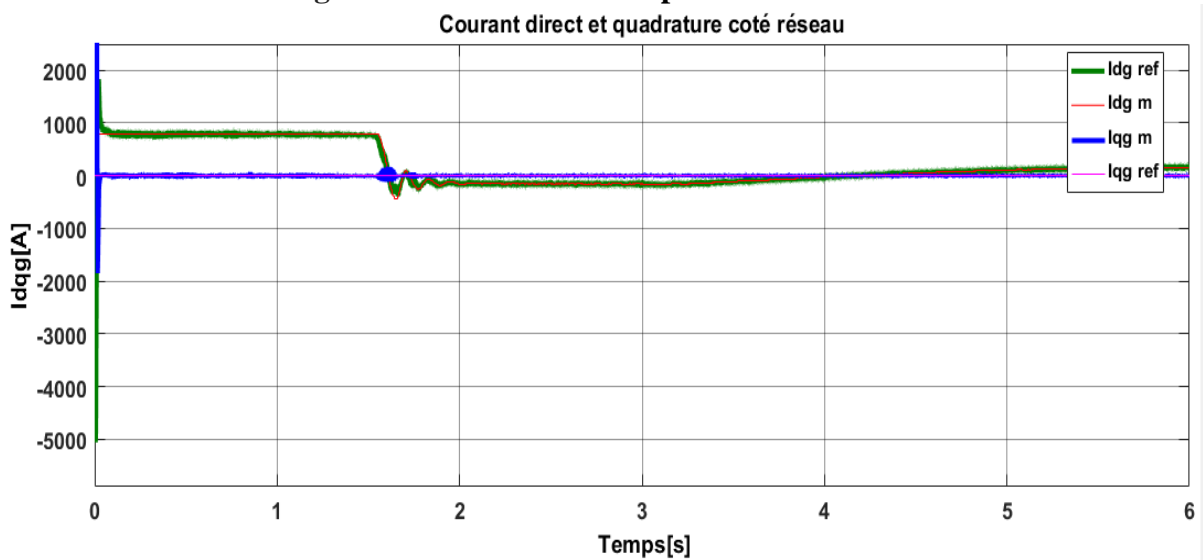


Figure III-32 : Courant direct et quadrature côté réseau

# CHAPITRE III Commande de la chaîne éolienne à base d'une GADA

---

## III-11. Interprétations des Résultats

Les figures illustrent le comportement dynamique de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau électrique.

- La vitesse de rotation suit parfaitement sa référence avec une dynamique souhaitable (figure III-12), le temps de repense est rapide avec un petit dépassement. On voit bien que les régulateurs PI nous donnent une bonne précision et bon suivi de référence. Par rapport à la commande MPPT sans asservissement de vitesse (figure III-25).
- Le couple électromagnétique et la puissance réactive fournis par la GADA suivent leurs références (figures (III-13), (III-20)). Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la GADA.
- La variation du couple électromécanique en fonction du temps de la machine qui est dans un sens négatif et qui représente le fonctionnement en génératrice de la GADA, ainsi qu'il réagit spontanément lorsqu'il y a une demande de puissance active.
- On remarque bien que la forme des courants de phases ( $I_{sabc}$ ), ( $I_{rabc}$ ) de la GADA est presque sinusoïdale (figures (III-17), (III-19)), ainsi que l'analyse du spectre d'harmoniques montrée dans la figure (III-18) avec un THD=6.031%.
- On remarque bien que la forme des tensions de phases ( $V_{sabc}$ ) de la GADA (figure III-16) est purement sinusoïdale.
- On remarque bien que le courant rotorique direct  $I_{dr}$  de la machine (figure III-15) est superposé sur sa référence, la composante directe contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.
- Le courant rotorique quadrature  $I_{qr}$  (figure III-14) de la machine est superposé sur sa référence, la composante quadrature du courant rotorique contrôle la puissance active, donc le courant en quadrature est à l'image du couple.
- La figure (III-20) des puissances montrent clairement que la dynamique de la puissance active et réactive réagit rapidement. Le signal de la puissance active est négative, c'est-à-dire la machine délivre la puissance dans le réseau.
- Nous observons que la tension continue  $V_{dc}$  suit sa référence avec un régime transitoire un peu lent et un dépassement (figure III-21). Cela est dû à la charge du condensateur et à la variation importante d'énergie réactive au rotor, puis  $V_{dc}$  se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande  $V_{dc}=1150V$ .

On distingue donc pour la commande par MPPT avec asservissement de vitesse la régulation est mieux par rapport à la commande par MPPT sans asservissement de vitesse, les régulateurs PI nous donnent une bonne précision et bon suivi de références ce qui justifie le choix de la méthode MPPT pour le contrôle de la turbine. La présence d'une boucle des courants dans la commande permettant la limitation des courants rotoriques pour protéger la machine.

## III-12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la commande de la chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation, dans un premier temps, nous avons donné une description des différentes parties constituant le système éolien. Ensuite, nous avons présenté la synthèse de la commande vectorielle par orientation du flux statoriques dont le but est le contrôle indépendant des puissances active et réactive en utilisant des régulateurs classiques de type Proportionnel Intégral (PI). Nous avons présenté les résultats de simulations où un profil de vent a été appliqué dans le but de tester la validation de notre système éolien.

**CHAPITRE IV : Intégration  
de la chaîne éolienne sous une  
tension déséquilibrée**

# CHAPITRE IV            Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

---

## IV-1. Introduction

Dans l'industrie, vu la modernisation des processus avec la prolifération des automates et de l'électronique d'une manière générale les perturbations électriques ont des conséquences de plus en plus nombreuses.

L'électricité, sauf cas particuliers pour les faibles puissances, ne se stocke pas, sa production est en permanence adaptée pour satisfaire la demande. Elle parvient au client par l'intermédiaire d'un système de production, de transport et de distribution. Chaque élément constitutif du système peut être l'objet de dommages ou d'avaries. Soulignons en particulier l'incidence des conditions climatiques sur les paramètres qui définissent les caractéristiques du produit électricité. De plus, de nombreuses caractéristiques peuvent perturber ou endommager les équipements des clients. Notons que certaines de ces caractéristiques sont liées à des phénomènes transitoires inhérents au réseau lui-même, causés par des défauts.

Le contrôle des éoliennes basées sur GADA doit accorder une attention particulière au scénario de fonctionnement en tension déformée. Outre le fonctionnement normal de l'éolienne, la commande conçue doit être préparée pour faire face aux situations problématiques dérivées des perturbations de la tension du réseau. Ces perturbations de la tension du réseau peuvent être de natures différentes (LVRT (Low Voltage Ride-Through), déséquilibres, harmoniques, etc.) en fonction des caractéristiques du réseau électrique lui-même [58],[59].

## IV-2. Transmission de l'énergie éolienne

La puissance électrique générée par chaque éolienne et transmise au réseau électrique à grande échelle. L'intégration de l'énergie éolienne influencera sur le système électrique. Ainsi que les perturbations du système électrique, tels que les défauts de réseau, les déséquilibres de tension et les distorsions auront un impact sur le système éolien, en particulier le système éolien basé sur la génératrice asynchrone à double alimentation GADA[1].

## IV-3. Les problèmes de l'interconnexion de l'éolien au réseau électrique

La restructuration de l'industrie de l'électricité a un impact significatif sur le processus d'interconnexion de l'énergie éolienne. L'une des principales questions abordées dans toutes les normes internationales en matière de systèmes connectés au réseau électrique est la qualité de l'énergie distribuée. Selon les normes dans ce domaine, le courant injecté dans le réseau ne doit pas avoir une distorsion harmonique totale de plus de 5 %. En outre, la plupart des normes font pression pour que les énergies renouvelables demeurent connectées au réseau pour certains défauts ou déséquilibres dans les tensions d'alimentation. En plus, La capacité d'une éolienne à survivre à une chute de tension transitoire sans déclenchement est souvent dénommée la capacité de maintien d'alimentation en creux de tension *LVRT*. La capacité *LVRT* est une partie importante de l'interconnexion de la ferme éolienne au réseau électrique. Si le parc éolien décroche lorsque la tension descend en raison d'un défaut sur une ligne électrique à proximité, cette défaillance peut entraîner la perte de deux composants majeurs du système, c.-à-dire la ligne et le parc éolien [60] et cela pour de nombreuses raisons, nous avons donc choisi d'étudier dans ce mémoire les différents types de problème d'alimentation intégré dans le réseau électrique en fonction des caractéristiques de la GADA :

### IV-3.1. Les harmoniques de tension

Les harmoniques de tension sont des distorsions périodiques de la tension d'alimentation qui peuvent provoquer une surchauffe des équipements tels que les transformateurs ou les lignes électriques[3], ainsi que perturber le fonctionnement des appareils électroniques sensibles qui

## CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

ont été conçus pour fonctionner à partir d'une source sinusoïdale. Les harmoniques de tension résultent de l'écoulement des courants harmoniques générés par des charges non linéaires ou des générateurs à travers l'impédance de la source à l'emplacement de l'appareil non linéaire[60].

### ➤ Le taux Global de distorsion

Le taux global de distorsion en courant ou THDI (Total Harmonic Distorsion - I pour courant), mesure l'importance des harmoniques de tous les rangs par rapport au fondamental.

- Le THD est exprimé comme suit [61]:

$$\text{THD} = 100 \times \frac{\sum_{h=2}^H V_h^2}{\sum_{h=1}^H V_h^2} \quad \text{IV. 1}$$

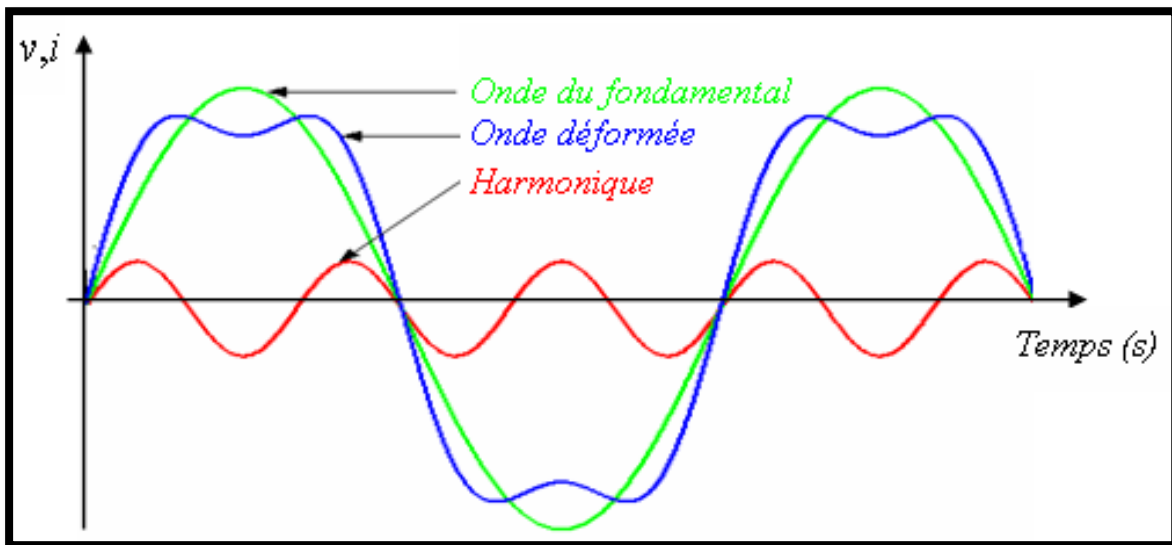


Figure IV-1: Représentation de l'effet d'un harmonique [62].

### IV-3.2. Tension déséquilibrée du réseau

Le déséquilibre de tension est défini comme le rapport de la composante de séquence négative ou zéro à la composante de séquence positive. En termes simples, il s'agit d'une variation de tension dans un système d'alimentation dans lequel les amplitudes de tension ou les différents angles de phase entre elles ne sont pas égales. Il s'ensuit que ce problème de qualité de puissance n'affecte que sur les systèmes polyphasés (par exemple triphasés).

Les tensions sont rarement exactement équilibrées entre les phases. Cependant, lorsque le déséquilibre de tension devient excessif, cela peut créer des problèmes pour les moteurs polyphasés et d'autres charges. De plus, les variateurs de vitesse peuvent être encore plus sensibles que les moteurs standards.

Le déséquilibre de tension est principalement dû à des charges inégales sur les lignes de distribution ou à l'intérieur d'une installation. En d'autres termes, les tensions de séquence négative ou homopolaire dans un système d'alimentation résultent généralement de charges déséquilibrées provoquant la circulation de courants de séquence négative ou nulle[63].

- Le degré d'asymétrie  $\tau$  dans le réseau est généralement utilisé pour décrire le déséquilibre de réseau, il est défini comme suit[1] :

## CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

$$\tau_u = \left| \frac{V_{ne}}{V_p} \right| \times 100\%$$

III.2

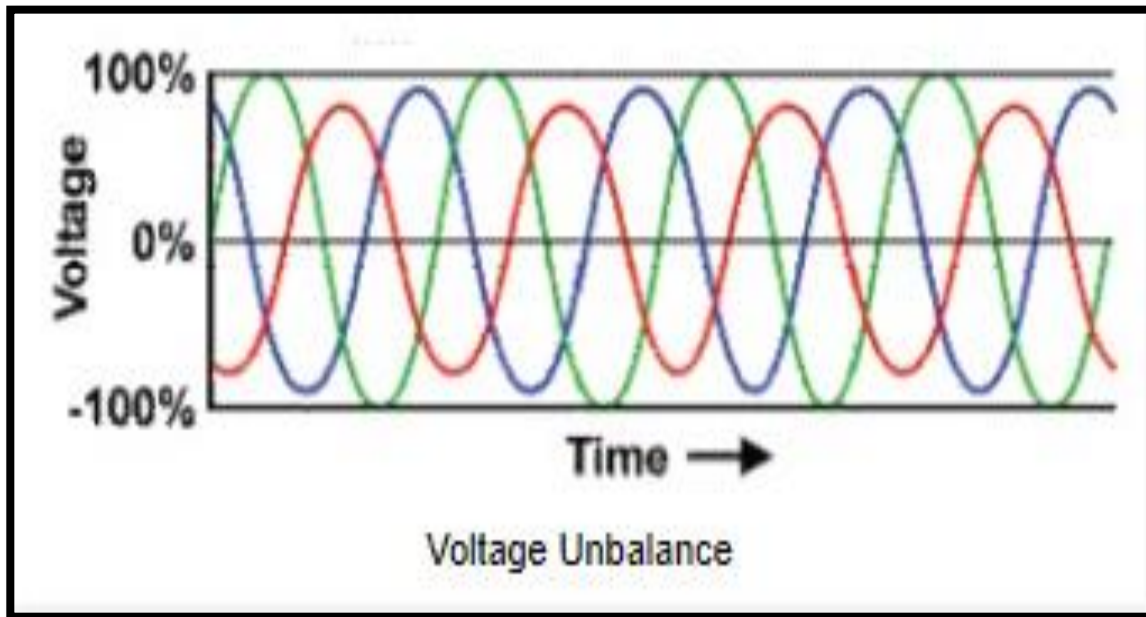


Figure IV-2 : représentation des tensions déséquilibrées [63].

### IV-3-3. LVRT (Low Voltage Ride Through)

LVRT (Low Voltage Ride Through) et HVRT (High Voltage Ride Through), tous les deux également connus sous le nom de FRT - Fault Ride Through) sont devenus une caractéristique cruciale des systèmes de contrôle et de conversion de la puissance des éoliennes.

Le terme LVRT capture la capacité d'une éolienne (ou en fait un parc éolien) à rester connecté au réseau pendant une courte chute de tension de ligne (une chute de tension) ou une panne de ligne (une panne de courant), la fonction HVRT permet l'éolienne de rester connectée pendant les situations de surtension temporaires.

Lorsque la tension du réseau baisse, il est essentiel qu'un parc éolien reste en ligne pour éviter les pannes majeures. De même, il est essentiel que la flotte travaille activement pour compenser l'état défectueux du réseau[64].

Le LVRT (Low Voltage Ride-Through) est l'une des exigences de connexion au réseau les plus dominantes auxquelles doivent répondre les systèmes de conversion d'énergie éolienne. En présence de baisses de tension du réseau, une discordance est produite entre la puissance active générée et la puissance active délivrée au réseau. Les exigences de conduite à basse tension exigent la gestion de cette inadéquation, ce qui constitue un défi pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Conformément aux exigences du LVRT, lors de la chute, la centrale éolienne doit rester connectée au réseau et en outre, elle doit fournir de la puissance réactive au réseau pour aider le service public à maintenir la tension du réseau. L'abaissement de tension s'avère être le problème de qualité de l'énergie le plus important et l'effet de l'abaissement de tension sur différentes topologies d'éoliennes a été étudié [65].

#### IV-3-3-1 Examen des technologies LVRT basées sur la GADA

Plusieurs contre-mesures discutées dans les littératures ont abordé l'amélioration des capacités LVRT dans les génératrices asynchrones à double alimentation (figure IV-3) :

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

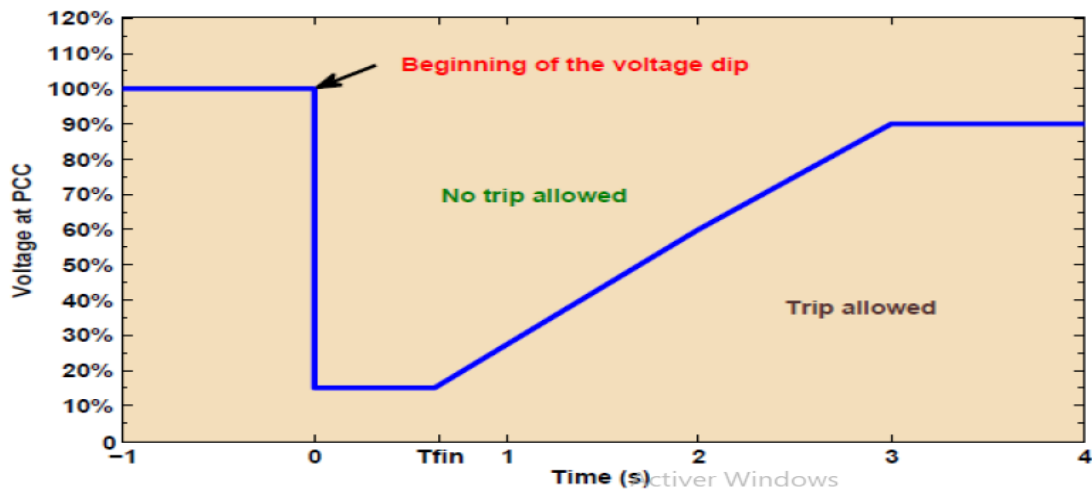


Figure IV-3 : Courbe LVRT typique.

## IV-4. Protection de GADA à l'aide d'un Crowbar

La solution classique à remplir Les exigences LVRT sont l'utilisation de la méthode du Crowbar à rotor comme illustré à la Fig.4. C'est le schéma général adopté par les fabricants pour surmonter les défauts du réseau. Bien que le Crowbar soit une méthode rentable capable de protéger générateur et le convertisseur pendant les pannes, il a désavantagé à ne pas négliger. Son majeur *l'inconvénient* est que la GADA perd sa contrôlabilité une fois le Crowbar est déclenché, en raison du convertisseur côté rotor désactivation. Dans une telle situation, la GADA absorbe une grande quantité de puissance réactive du réseau, conduisant à un réseau supplémentaire dégradation de la tension. De plus, la résistance du Crowbar doit également être soigneusement calculée afin de fournir amortissement et consommation d'énergie minimale. Considérant ces inconvénients, un autre arrangement de Crowbar a été proposé, où le Crowbar est en série avec les enroulements du stator Néanmoins, il y a des pertes de conduction des commutateurs bidirectionnels en fonctionnement normal. Par conséquent, une attention particulière doit être prise lors de la conception du l'électronique de puissance, pour minimiser ces pertes [66].

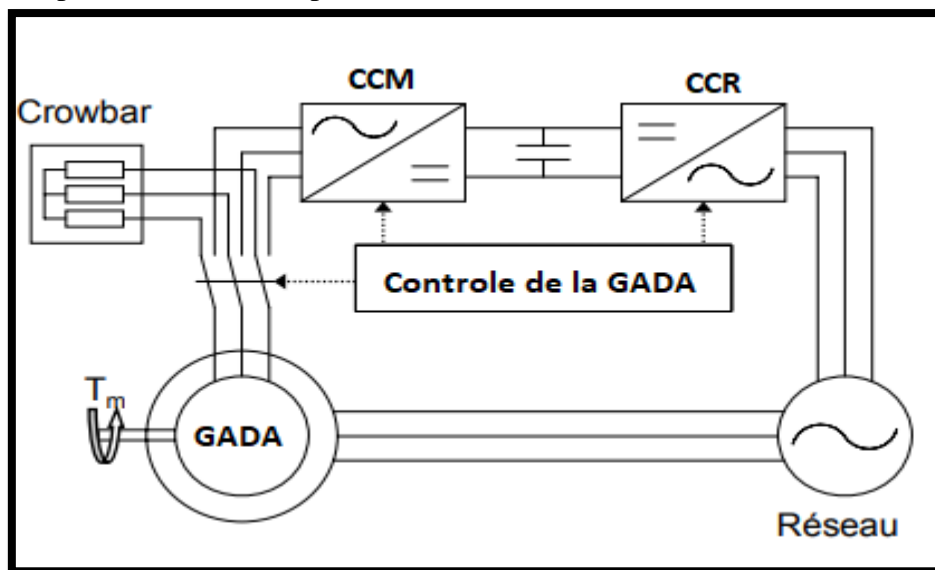


Figure IV-4 : Représentation de la GADA avec Crowbar [67].



# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

## IV-5. Simulation de la chaîne éolienne intégrée dans un réseau déséquilibré.

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation en régime permanent de la chaîne éolienne complète basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation sous l'effet de trois défauts : les harmoniques de tension, déséquilibres de tension et LVRT qui sont appliqués au niveau de réseau. Le système global a été simulé dans un environnement Matlab / Simulink avec les paramètres donnés dans l'annexe A.

- **Les résultats de simulation avec application des harmoniques de tension de rang 5 et de rang 7 au réseau**

On a appliqué les harmoniques de rang 5 et rang 7 au niveau de réseau dans un intervalle de  $t=0.05s$  à  $t=3s$ , pour voir l'effet des harmoniques sur les grandeurs de notre GADA et comparer ces résultats avec les résultats du chapitre précédent. Nous avons judicieusement choisi les harmoniques 5 et 7. L'harmonique 5 est une composante négative c'est-à-dire qu'elle tourne à l'inverse de la composante fondamentale ; de ce fait elle va engendrer des vibrations dans les appareils électromécaniques. L'harmonique 7 est une composante positive, elle tourne dans le même sens que la fondamentale ; elle va dissiper sous forme d'effet joule. Le fait que ces deux harmoniques sont du faible ordre, leur atténuation est très difficile donc ils ont plus de chance d'être présentes dans le réseau.

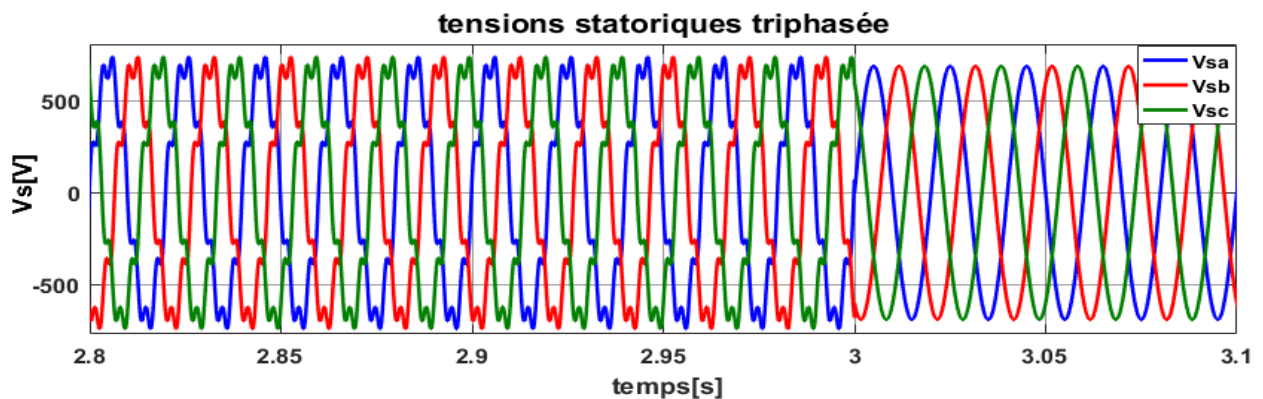
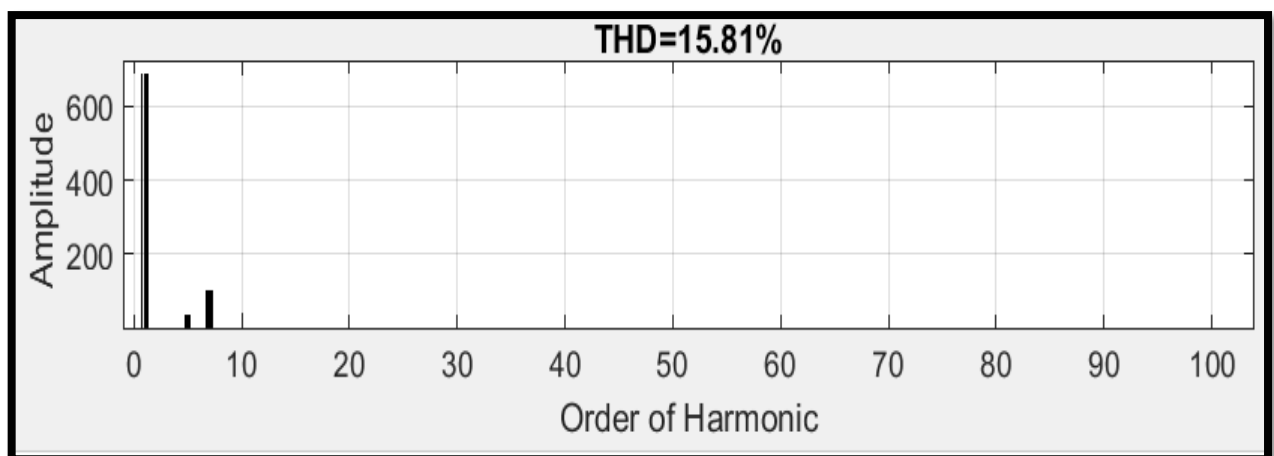


Figure IV-5 : Tensions statoriques triphasées



FigureIV-6 : Analyses-en THD de la tension  $V_s$  après l'application des harmoniques de tension

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

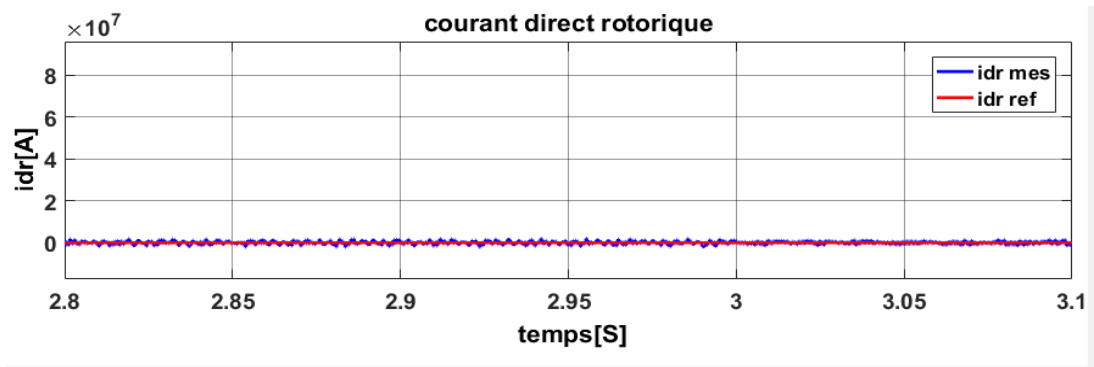


Figure IV-7 : Courant direct rotorique.

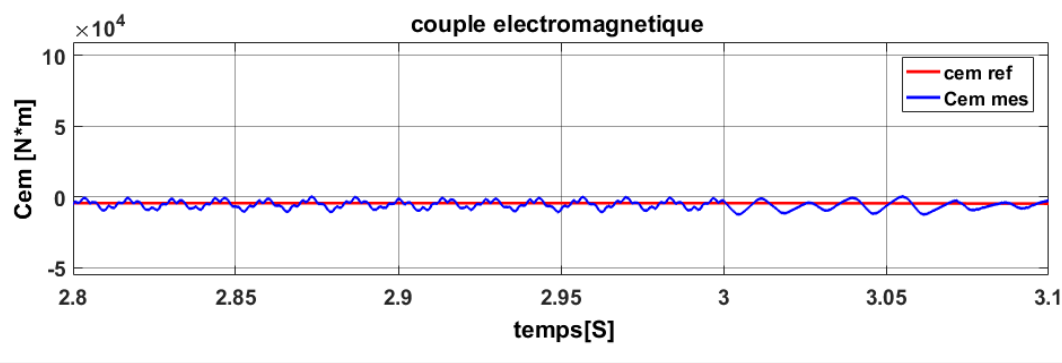


Figure IV-8 : Couple électromagnétique

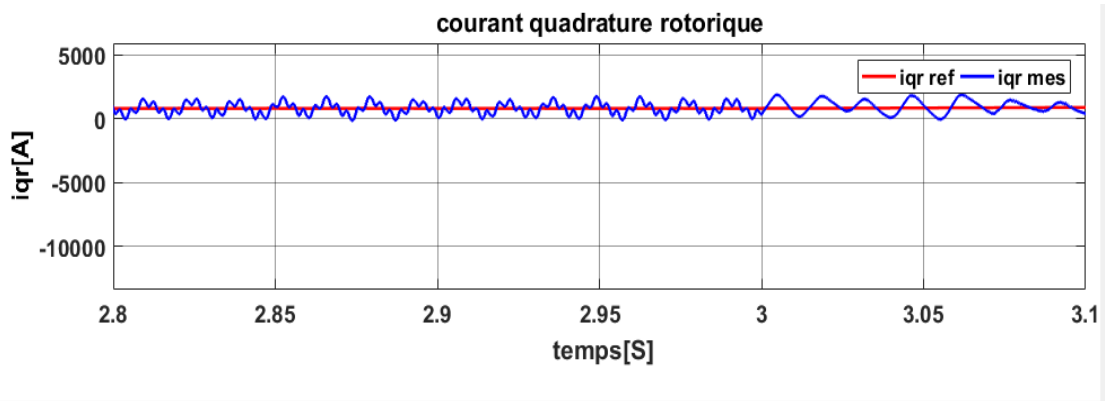


Figure IV-9 : Courant quadrature rotorique.

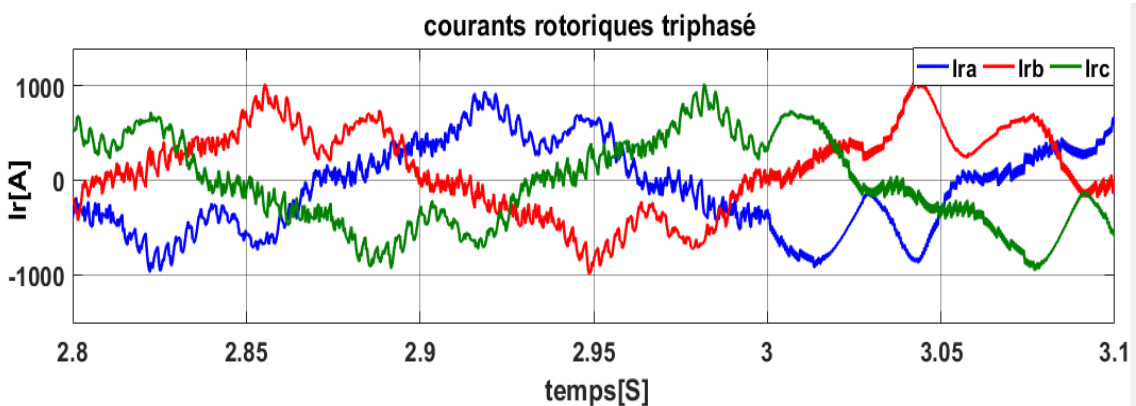


Figure IV-10 : Courants rotoriques triphasés.

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

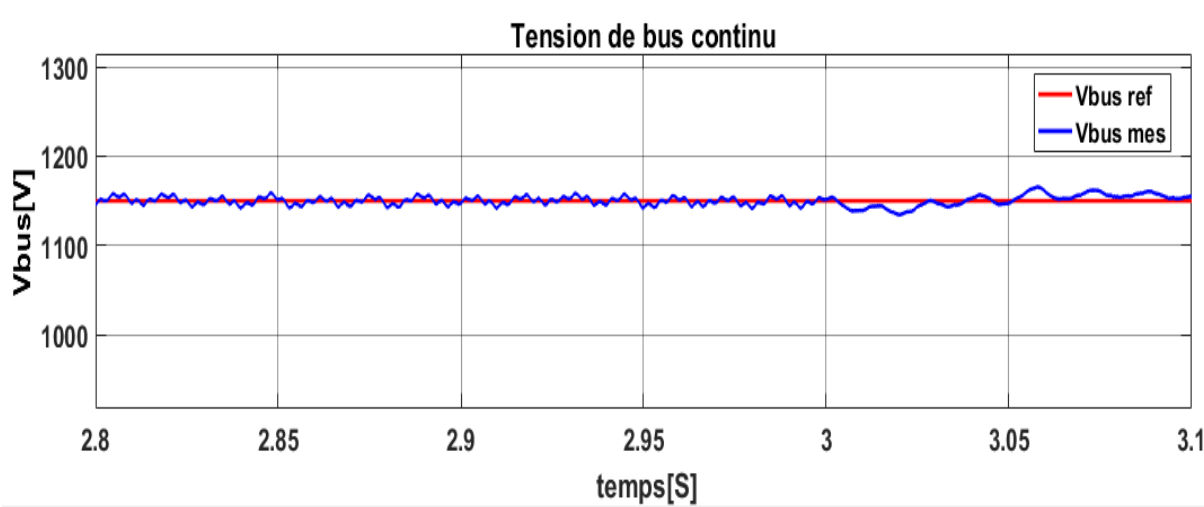


Figure IV-11 : tension de bus continu

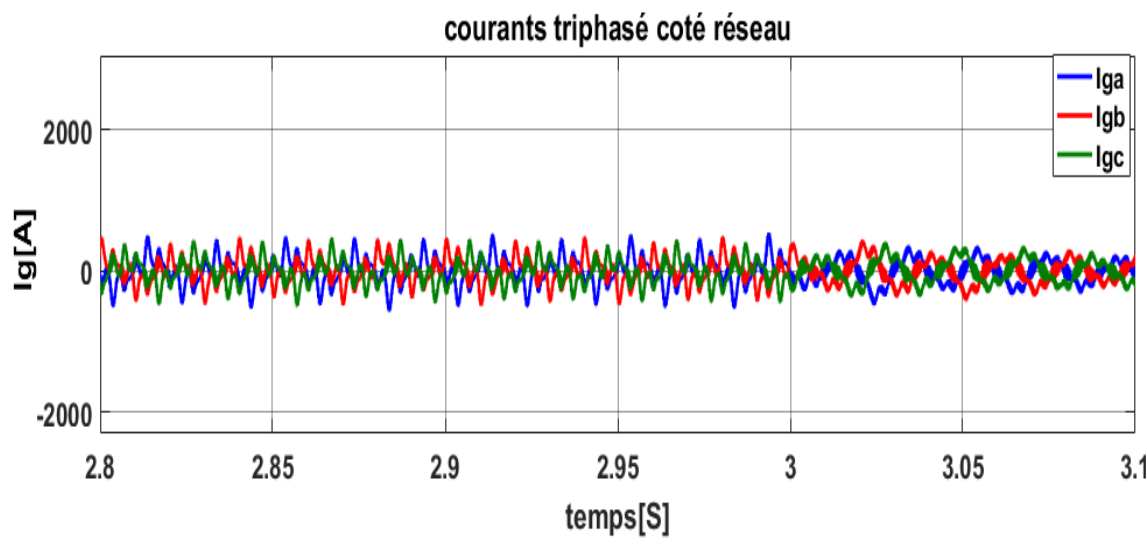


Figure IV-12 : Courant triphasé coté réseau.

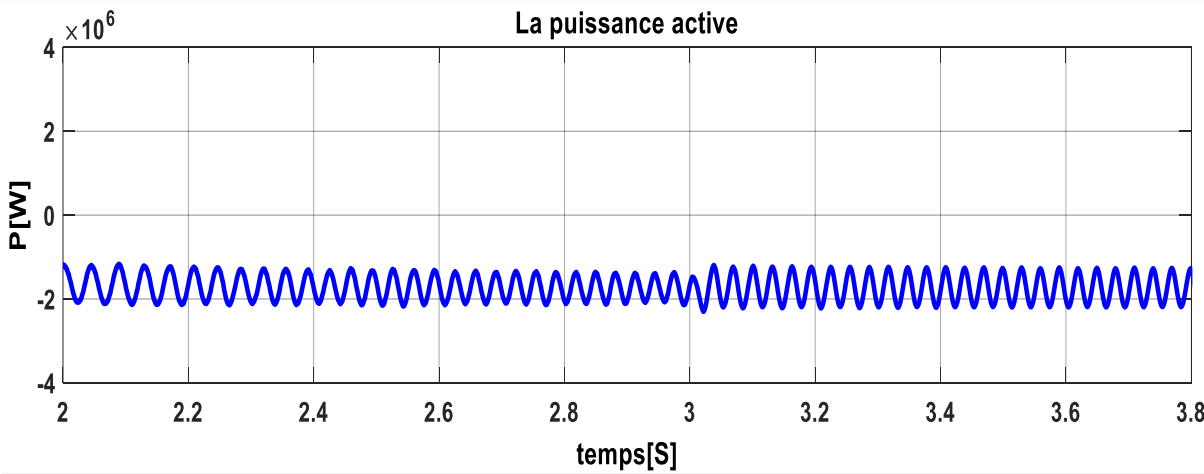


Figure IV-13 : La puissance active.

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

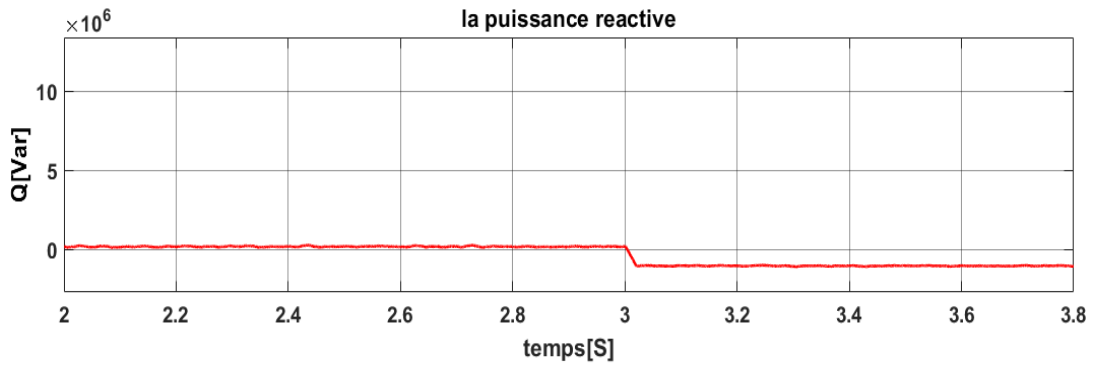
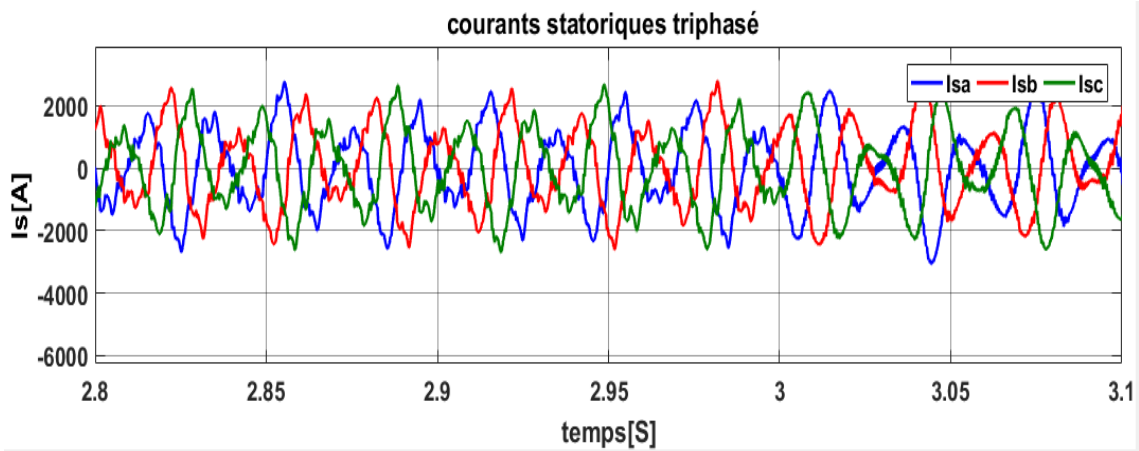
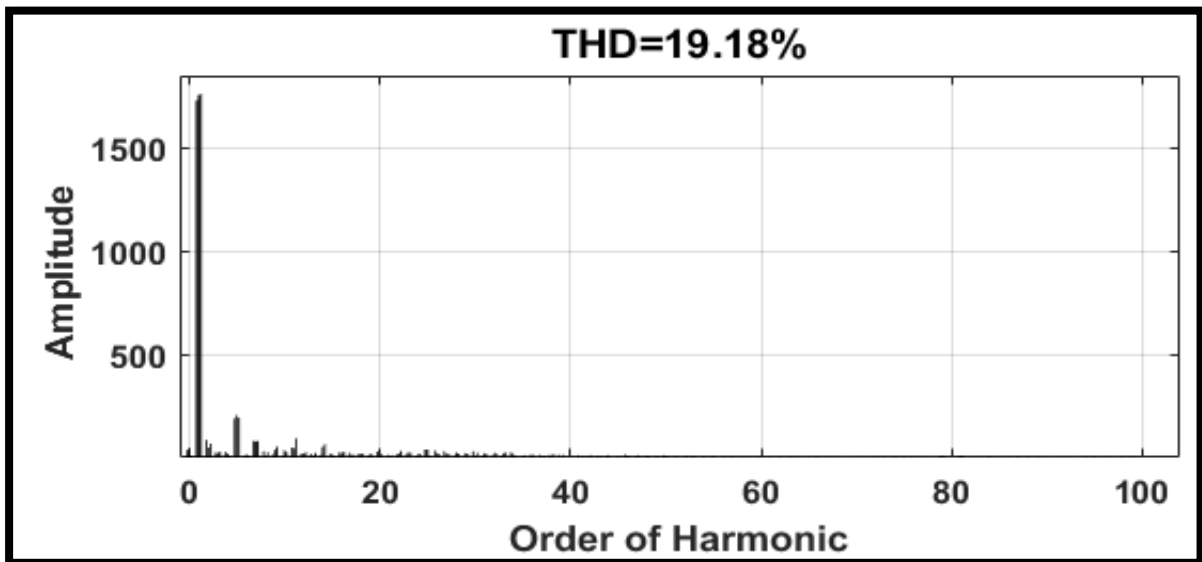


Figure IV-14 : La puissance réactive



FigureIV-15 ; Courants statoriques triphasés



FigureIV-16 : Analyses-en THD des courants Is après l'application des harmoniques de tension.

Les figures illustrent l'effet néfaste des harmoniques sur la GADA. Une simple comparaison visuelle des courants dans le repère synchrone par rapport à l'état sain (figure 7 du chapitre III) nous montre une présence importante du chattering. L'étude quantitative et qualitative est faite à l'aide de transformation de Fourier. Le spectre de courant de stator Is nous montre une présence importante des harmoniques figure (IV-16). Non seulement les harmonique 5 et 7 ont considérablement augmenté, mais tout le spectre est contaminé par des harmoniques d'ordre

## CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

inferieur. Le THD quand a lui a passé de 6.031% à 19.18%. La contamination du courant  $I_s$  avait un effet domino, suivant l'équation (III-25) le courant statoriques a une influence directe sur le courant rotorique. Ce dernier est responsable de la génération de couple électromagnétique qui, à son tour, génère la puissance injecte dans le réseau. La tension d'alimentation agit donc- d'une façon indirecte- sur la qualité de puissance injecte. Cette puissance a des fluctuations très importantes. Ces fluctuations vont perturber la fréquence dans la proximité (la zone de perturbation est proportionnelle à la puissance de la GADA/chaine éolienne) de la GADA générant ainsi des flicker qui va perturber toute équipement présent dans cette proximité. La compensation de la puissance réactive et aussi affecte par ces harmoniques. On peut remarquer que la puissance du réseau n'est pas entièrement compensée.

### ➤ Les résultats de simulation avec l'application d'une tension déséquilibrée au réseau

Les problèmes associés à la réponse d'une GADA au déséquilibre de tension du réseau sont analysés et interprété en régime permanent. Dans cette partie, on a appliqué un default dans un intervalle [de 3s à 3.9s] et les résultats peuvent être observés dans les figures ci-dessous :

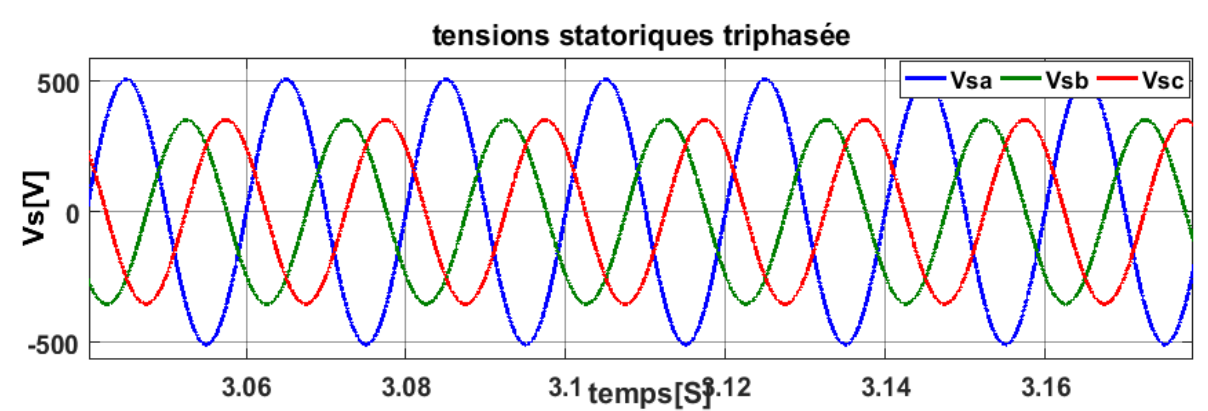


Figure IV-17 : Tensions statoriques triphasées

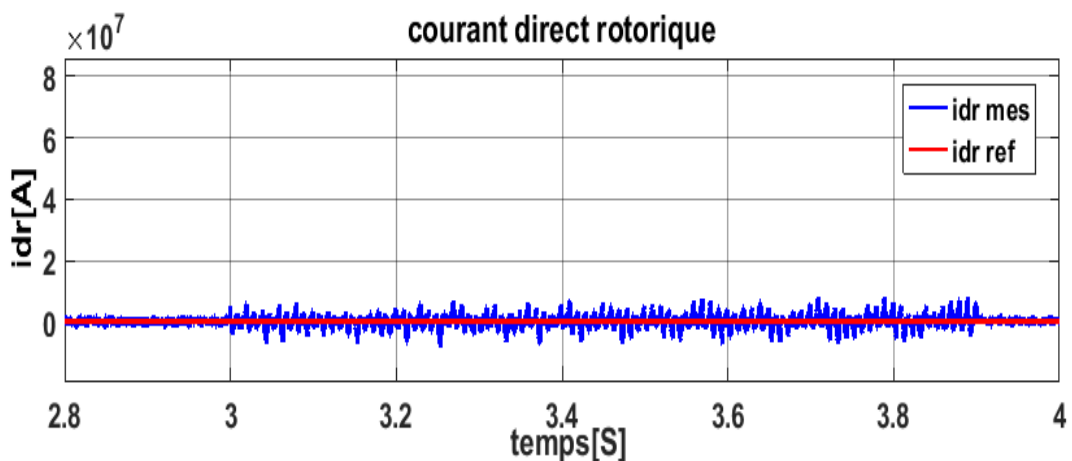


Figure IV-18 : Tensions statoriques triphasées

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

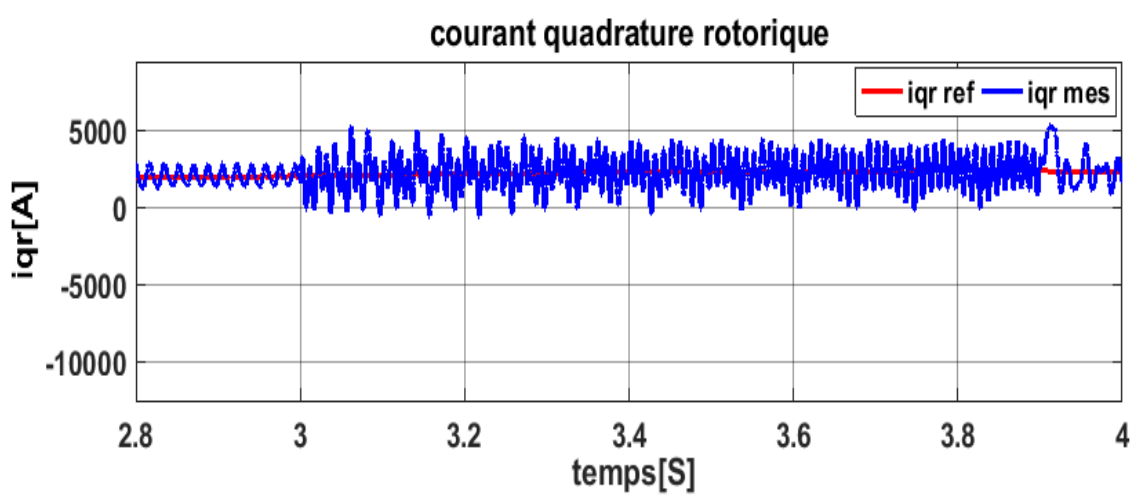


Figure IV-19 : Courant quadrature rotorique.

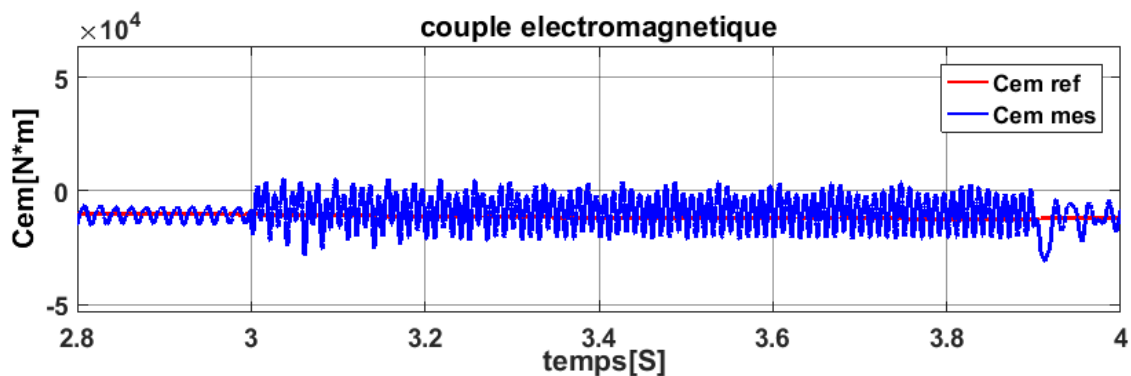


Figure IV-20 : Couple électromagnétique

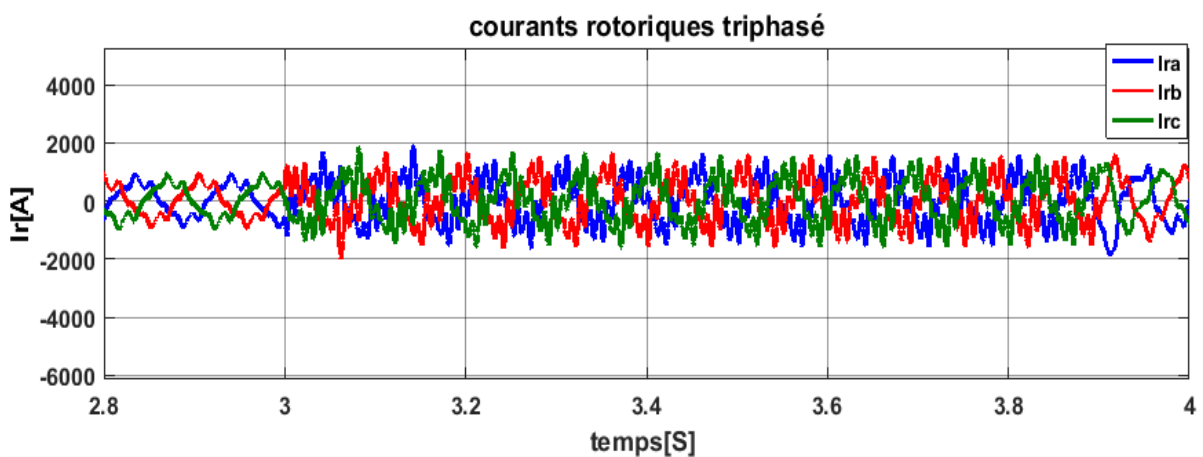


Figure IV-21 : Courants rotoriques triphasés.

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

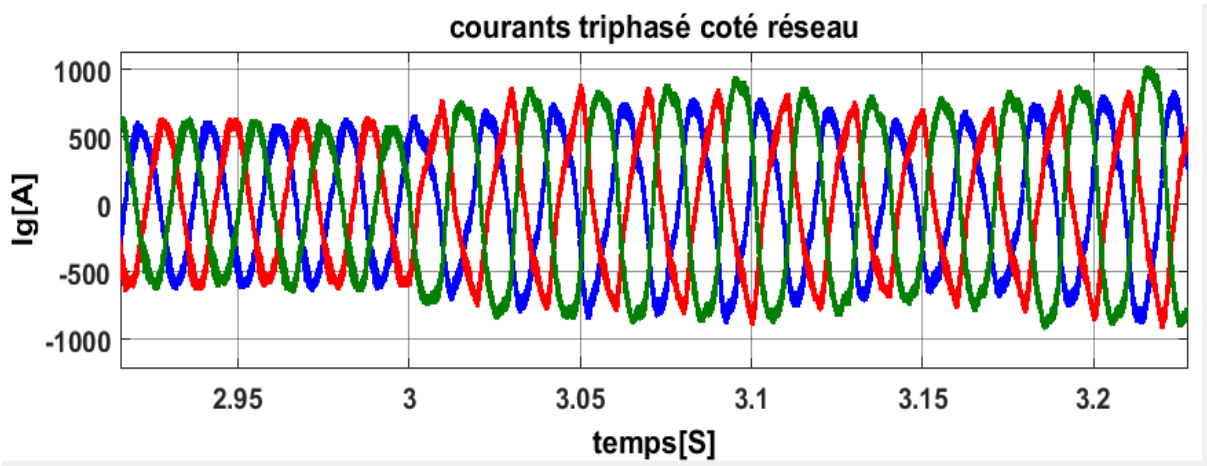


Figure IV-22 : Courants triphasés coté réseau.

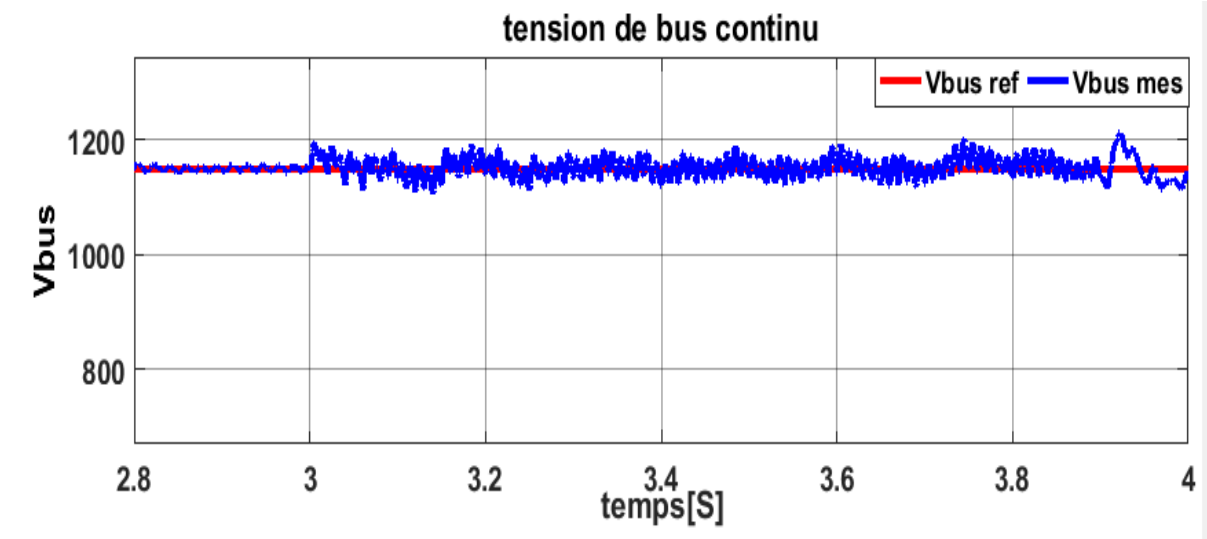


Figure IV-23 : Tension de bus continu.

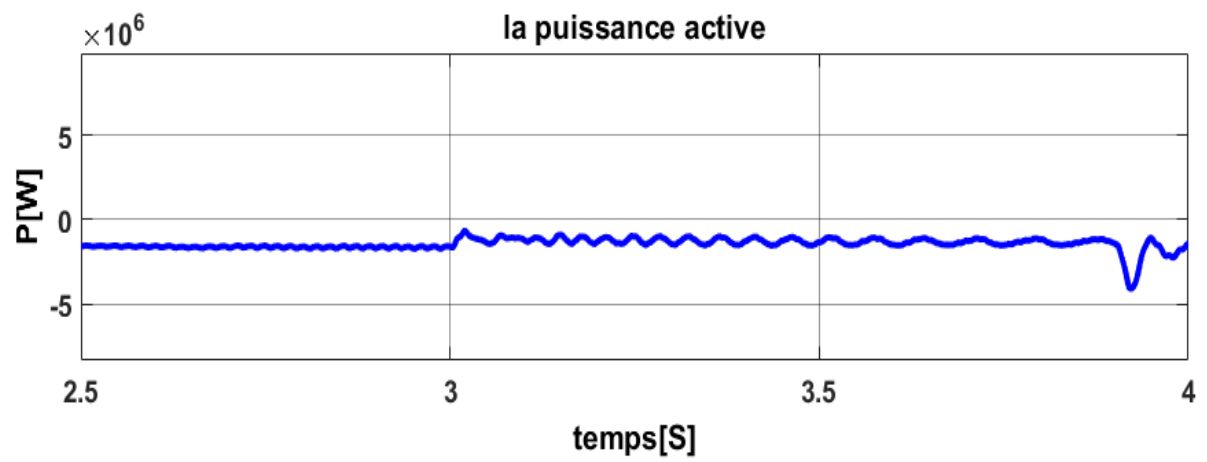


Figure IV-24 : La puissance active.

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

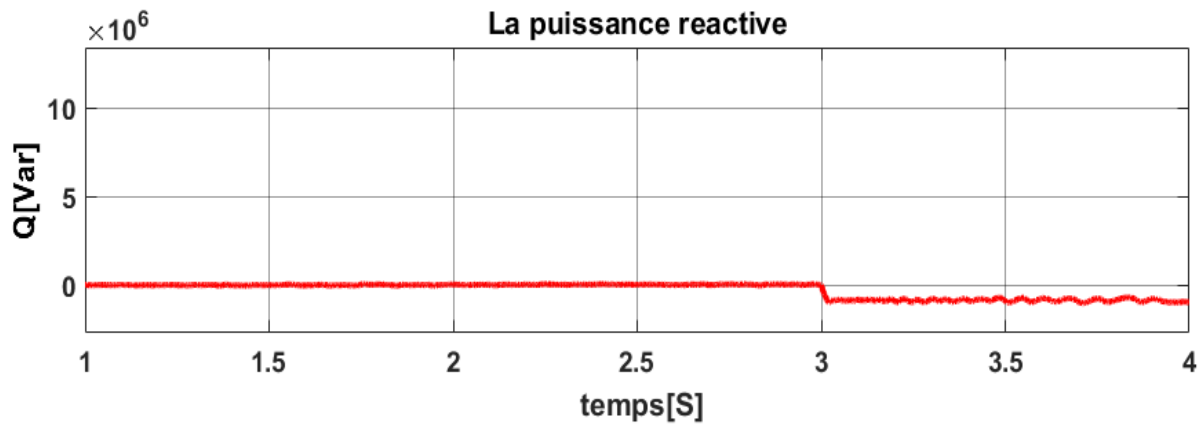
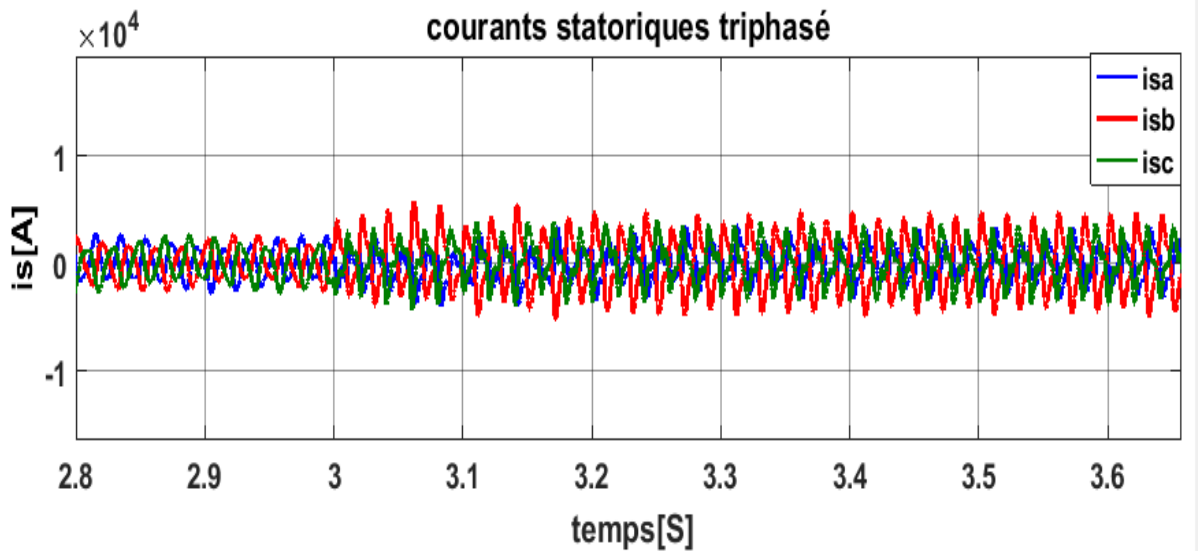
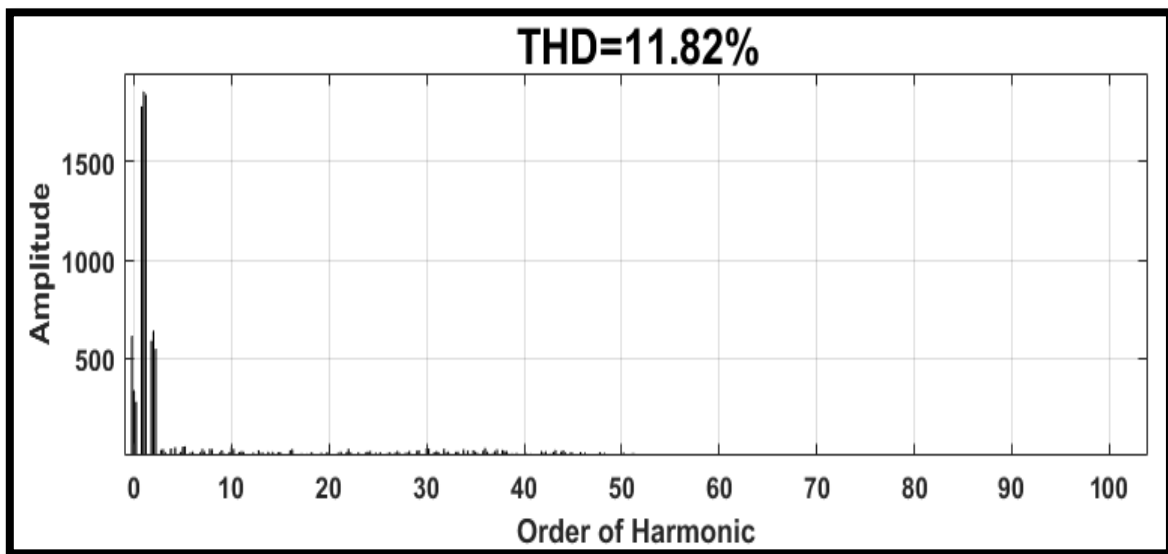


Figure IV-25: La puissance réactive .



FigureIV-26 : Courants statoriques triphasés.



FigureIV-27 : Analyses-en THD des courants  $I_s$  après l'application d'une tension déséquilibrée au réseau.



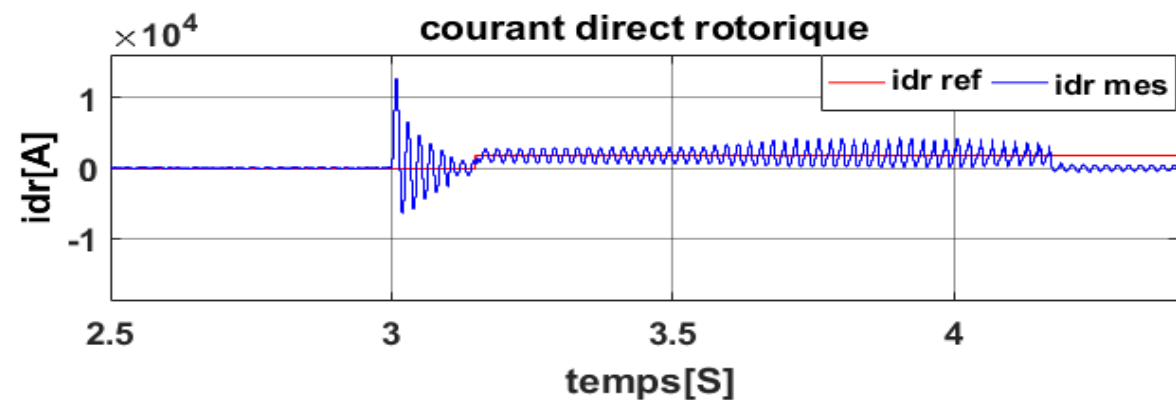
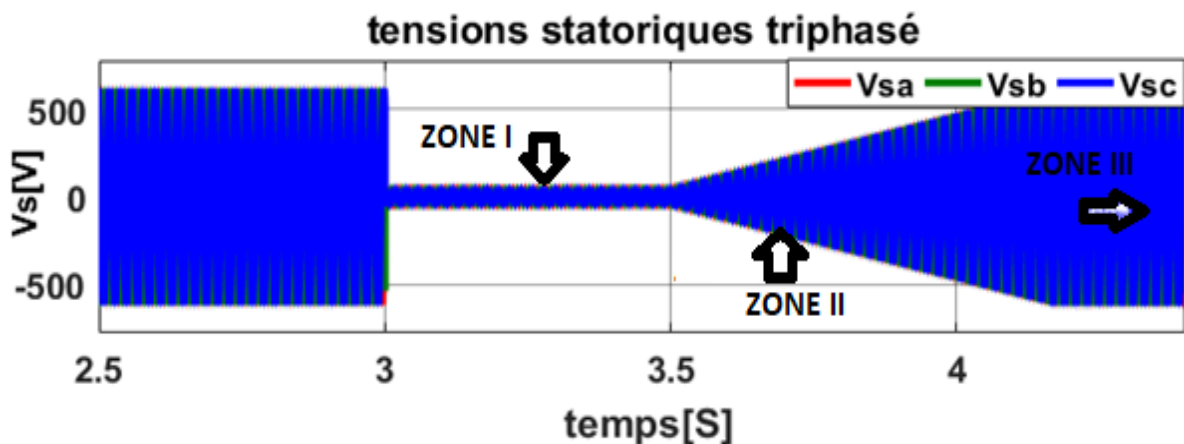
## CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

Pour les appareils électromécaniques les NEMA [68], recommande un taux de déséquilibre de moins de 2%. Au-delà, la vibration devient très importante. Pour voir clairement les effets de déséquilibre, on a perturbé la tension avec un déséquilibre  $\tau_u$  de valeur 29%. Contrairement à la distorsion, l'effet est propagé sur la tension de bus continu (figure IV-23) créent des fluctuations sur la tension continue. Le couple électromagnétique (figure IV-20) est fortement perturbé – cela est traduit par des vibrations dans la machine.

La puissance active injectée (figure IV-24) présente moins de fluctuation par rapport au cas de contamination avec des harmoniques. Mais il est toujours difficile de compensé la puissance réactive. Le THD du courant  $I_s$  a augmenté à 11.82% (figure IV-27), mais cela ne signifie pas nécessairement que le  $I_s$  est très pollue. Ce THD est dû essentiellement de la composante négative qui génère une harmonique d'ordre 2 (l'harmonique 2 a une amplitude de 638.7). Avec un degré d'asymétrie  $\tau_u$  de valeur 27.10%.

### ➤ Les résultats de simulation après l'application de LVRT au réseau :

Dans cette partie, On a appliqué au niveau de réseau un défaut LVRT dans un intervalle de  $t=3s$  à  $t=3.9s$  pour voir l'effet de LVRT sur les grandeurs de notre GADA :



# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

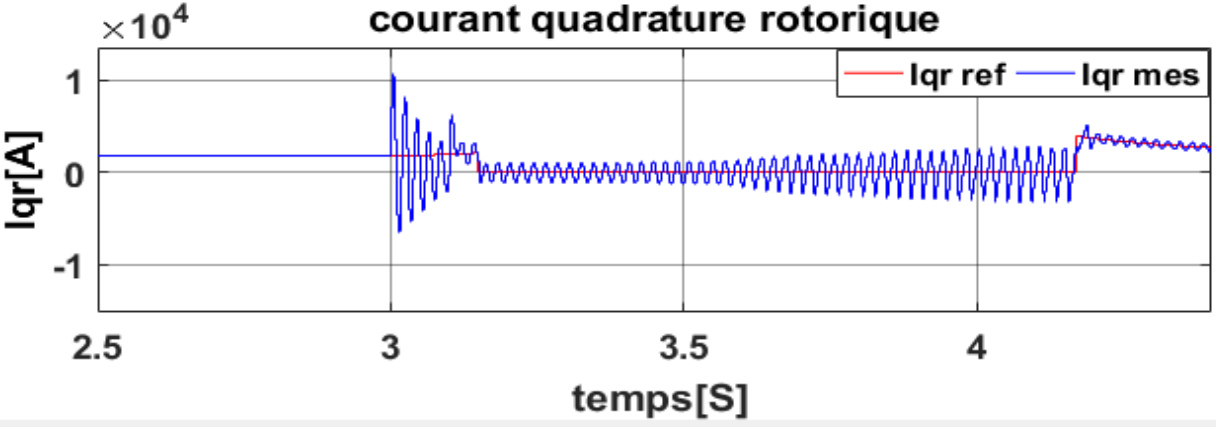


Figure IV-30 : courant quadrature rotorique

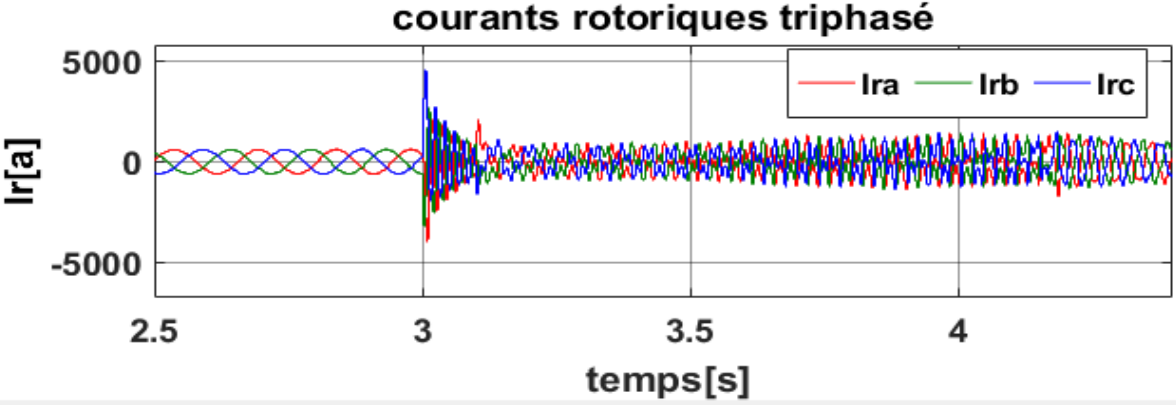


Figure IV-31 : courant quadrature triphasés

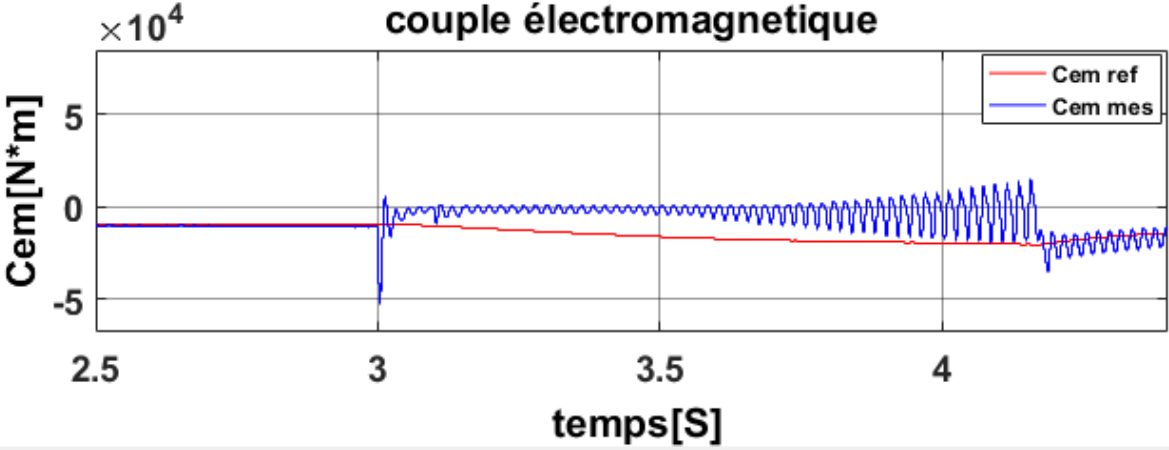


Figure IV-32 : Couple électromagnétique

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

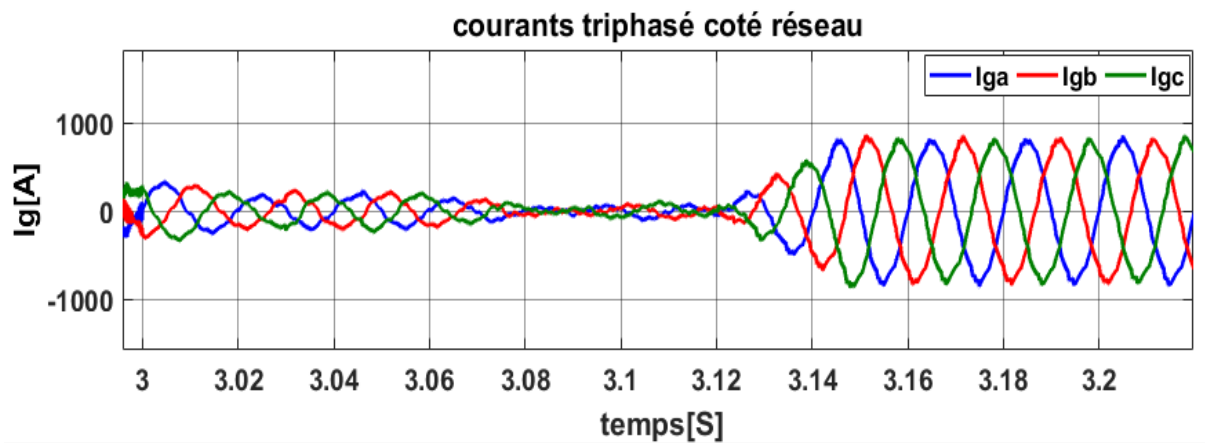


Figure IV-33 : courants statoriques cote réseau

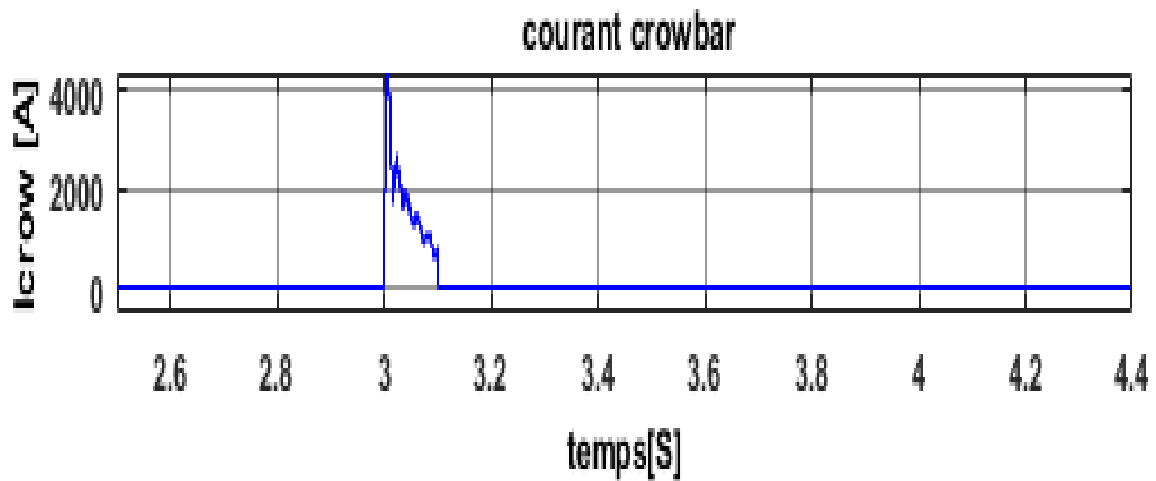


Figure IV-34: Courant crowbar

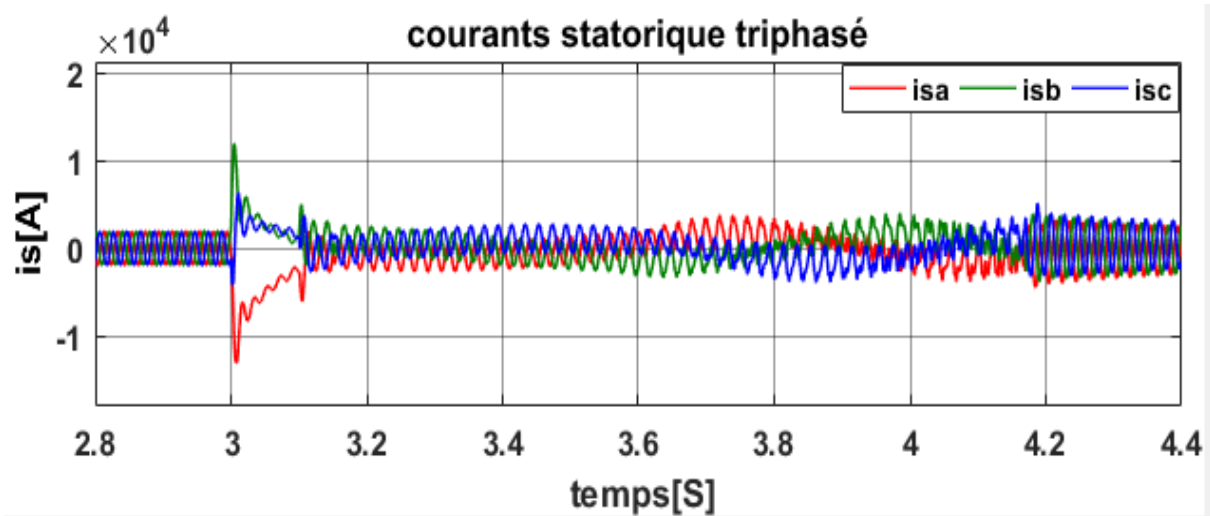


Figure IV-35 : courants statoriques triphasées

# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

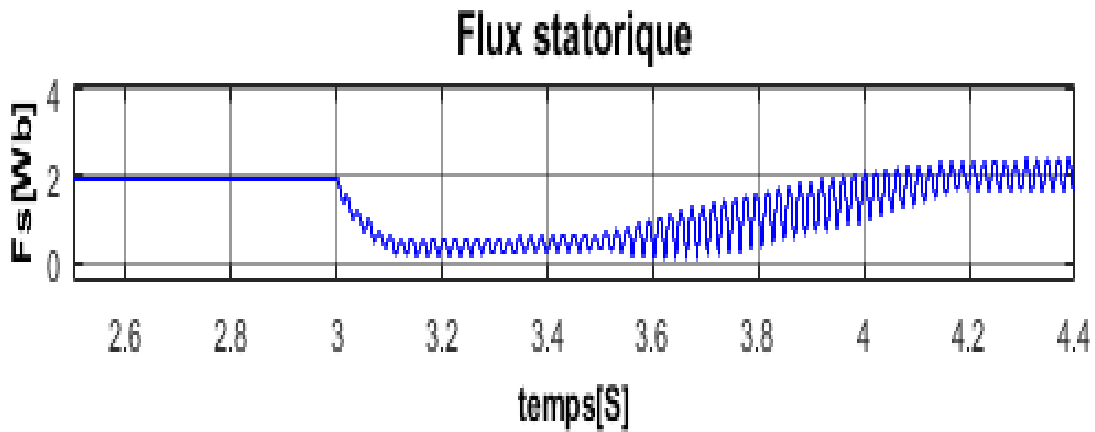


Figure IV-36 : Flux statoriques

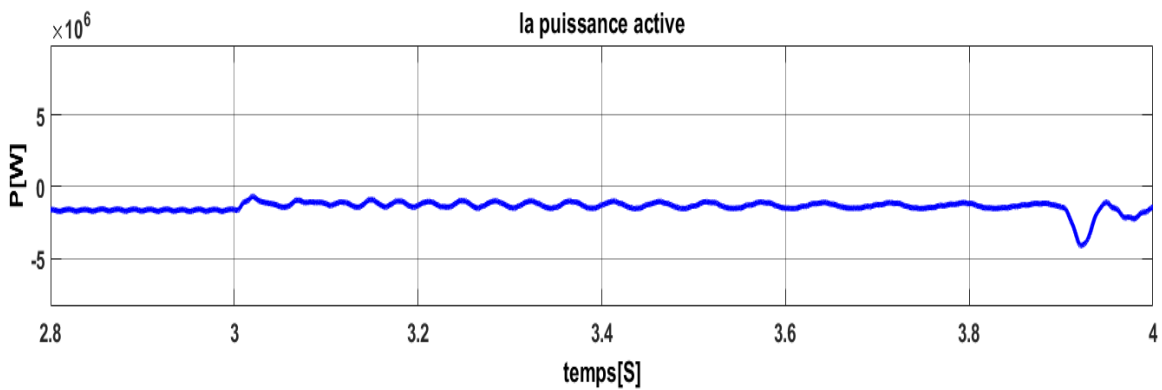


Figure IV-37 : La puissance active

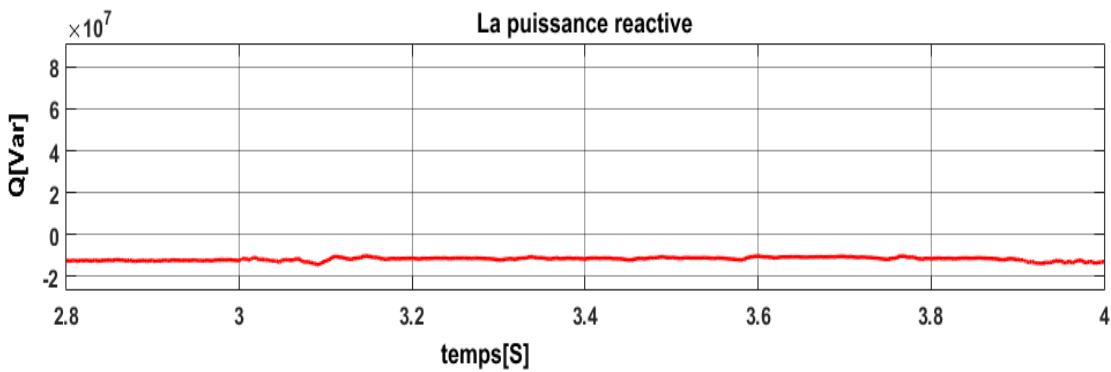


Figure IV-38 : la puissance réactive

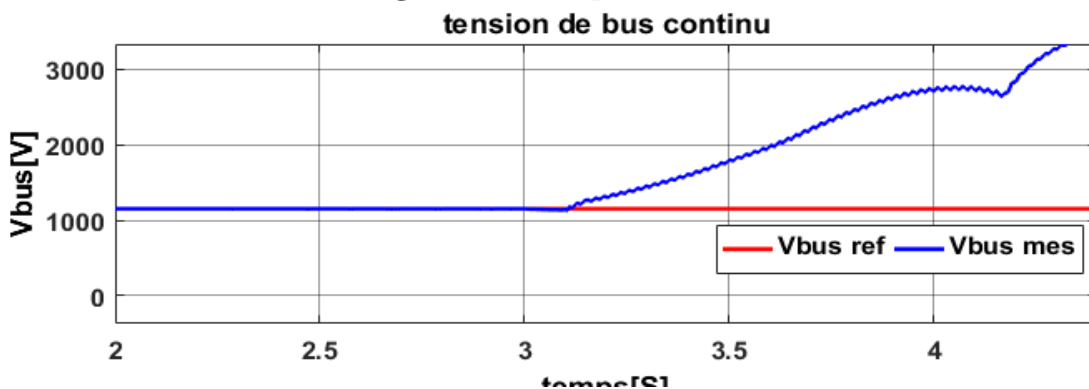
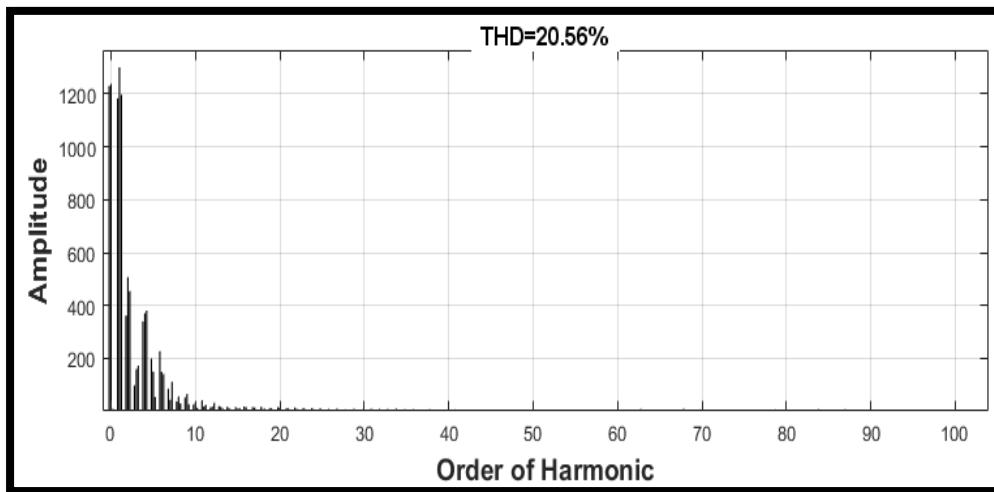
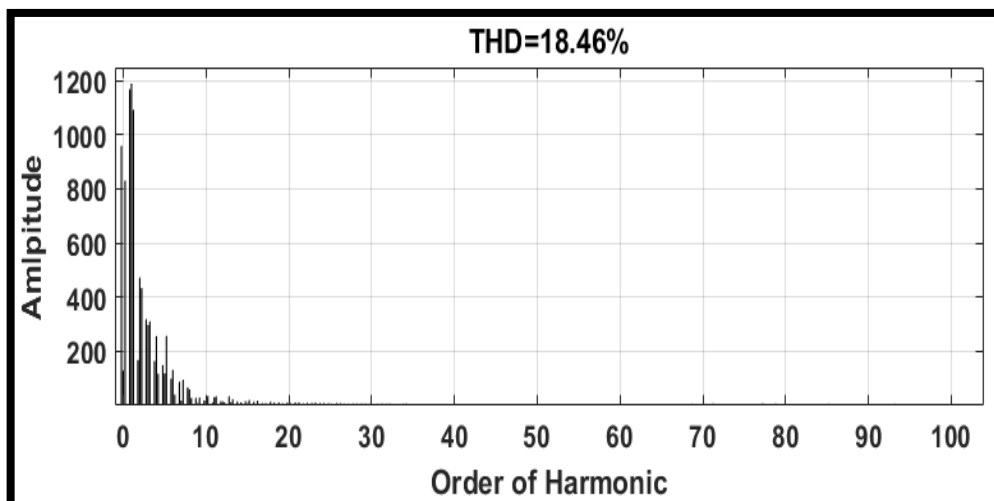


Figure IV-39 : Tension de bus continu

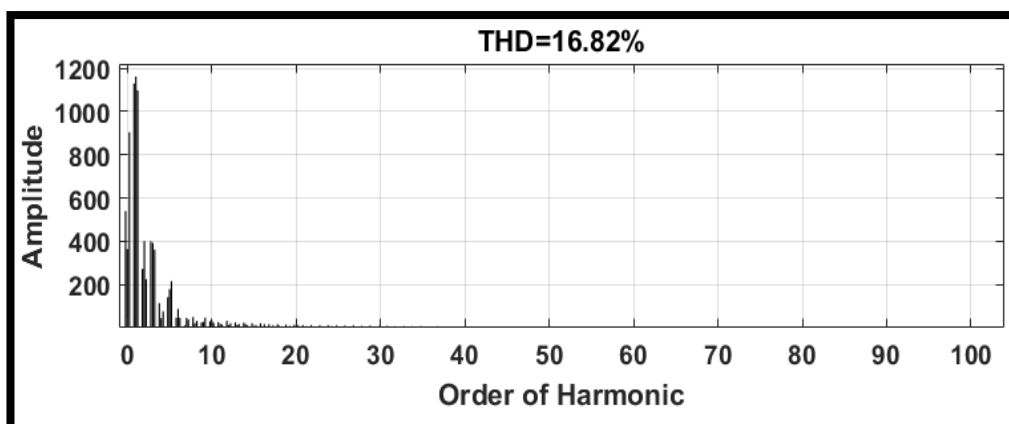
# CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée



FigureIV-40 : Analyses-en THD des tensions Vs dans la zone (I) lors de l'application d'un défaut LVRT.



FigureIV-41 : Analyse en THD des tensions Vs dans la zone (II) lors de l'application d'un défaut LVRT.



FigureIV-42 : Analyse en THD des tensions Vs dans la zone (III) lors de l'application d'un défaut LVRT.

## CHAPITRE IV Intégration de la chaîne éolienne sous une tension déséquilibrée

---

D'après la figure ci-dessus, la chute de tension du stator a commencé à 3 s, et à cet instant, le courant de défaut augmente. Au fur et à mesure que la tension du stator  $V_s$  (figure IV-28) diminuait, le flux du stator diminuait également et il revenait à la valeur normale après un certain temps lorsque le courant de défaut se dissipait. au moment de la condition de défaut symétrique.

On observe qu'il y a apparition d'un pic, juste après 3s, sur la courbe des courants statoriques (figure IV-35) Plus l'intensité augmente plus l'amplitude des pics de courants augmente.

On remarque Au début de la rotation, il y a un dépassement du courant de l'axe q. À l'instant de 3 s, par conséquent, le courant de l'axe q conduit à zéro. Au moment où le défaut s'est produit, le courant du rotor est réduit à zéro. Ainsi que le courant sur l'axe q ( $I_{qr}$ ), montrent que la valeur plus élevée de  $I_d$  exigée par le code de réseau pour accomplir la fourniture de puissance réactive à travers le stator. Lorsque le flux statoriques diminue, la puissance réactive diminue également. Par conséquent, le courant élevé du rotor augmente la puissance réactive.

La tension aux bornes du condensateur  $V_{bus}$  (figure IV-39) est presque constante, à l'instant  $t=3s$ , la tension du bus continu augmente (car une quantité de puissance supplémentaire est introduite dans le convertisseur) lors de défaut LVRT.

La variation de couple avec le temps (figure IV-32) La valeur de couple indique que la machine est toujours en mode génération après l'apparition du défaut. Plus l'intensité augmente l'amplitude des oscillations du couple augmente.

Afin de protéger les convertisseurs de puissances de la GADA pendant le défaut, une solution classique à remplir est l'utilisation d'une protection matérielle dite « Crowbar » comme montré sur la Figure 4 ci-dessus. La clé de cette solution est de limiter le courant dans le rotor ainsi que la tension élevée dans le bus continu. Le Crowbar est une méthode rentable capable d'améliorer le maintien de la production (et sa connexion) en régime perturbé et l'assistance de la production éolienne durant une chute importante de tension.

### IV-6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'analyse et la simulation d'un système de production d'énergie éolienne basée sur un générateur à induction à double alimentation (GADA) fonctionnant dans des conditions de tension de réseau non équilibrée. La qualité d'énergie est ainsi d'une importance majeure lors de l'intégration de l'éolien au réseau électrique. Une mauvaise qualité d'onde peut nuire à la stabilité de réseau et pourrait conduire à de grands courants de défaut dans le stator. En raison du couplage magnétique entre le stator et le rotor, la perturbation du stator est par conséquent transmise au rotor sur ce contexte Les résultats de la simulation ont montré les effets du différents types de défauts sur la GADA qui entraîne une déformation de qualité de signaux dans le régime permanent sur les grandeurs de la GADA (couple, vitesse, courants, tension).

## CONCLUSION GENERALE

---

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et d'analyser le système de production d'énergie éolienne basée sur un générateur à induction à double alimentation (GADA) fonctionnant dans des conditions de tension de réseau non équilibrée.

Tout d'abord dans le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur l'énergie éolienne. Ensuite, nous avons décrit l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes définies, ainsi que leurs différents composants. Puis, nous avons présenté les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable), ainsi que les différents avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé la conception et la modélisation de la turbine éolienne qui constitue un élément fondamental dans la conversion d'énergie éolienne en énergie électrique. un modèle simplifié de la turbine a été développé. Après avoir identifié les différentes zones de fonction du système et définir l'objectif pour chaque zone. On a utilisé la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec et sans asservissement de vitesse, dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance et ce quel que soit le vent qui lui est appliqué. En se basant sur le mode de fonctionnement de la MADA. Ensuite, nous avons modélisé la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur la transformation de PARK.

Dans le troisième chapitre, nous avons utilisé la commande vectorielle pour contrôler l'échange de puissances actives et réactive entre la machine et le réseau. La structure à mettre en œuvre est à base de GADA avec deux convertisseurs idéals (CCM et CCR) connectés entre eux par un bus continu. Puis, nous avons abordé les résultats de simulation du système global de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation grâce aux stratégies de commande étudiée précédemment, la stratégie de commande MPPT, la commande du convertisseur côté machine CCM (la régulation de la puissance réactive pour avoir un facteur de puissance unitaire côté stator) et le convertisseur côté réseau CCR avec la commande de la tension du bus continue.

Dans le dernier chapitre nous avons étudié les différents types de défauts au niveau du réseau (Harmonique, tension déséquilibrée et LVRT). A travers les simulations, nous avons saisi les défauts appliqués dans notre mémoire, les résultats ont illustré l'impact sensible du déséquilibre de réseau sur les grandeurs de  $I_q$ , machine. Les perturbations du réseau peuvent conduire à de grands courants de défaut dans le stator. En raison du couplage magnétique entre le stator et le rotor, la perturbation du stator est par conséquent transmise au rotor. En perspective, nous avons conclu qu'une protection est nécessaire, pour répondre aux nouvelles normes imposées aux parcs éoliens, comme pouvoir d'assurer la continuité de l'énergie électrique durant les défauts.

## LISTE DES REFERENCES

---

- [1] D. Xu, F. Blaabjerg, W. Chen, et N. Zhu, Advanced control of doubly fed induction generator for wind power systems. IEEE Press , John Wiley & Sons, 2018.
- [2] H. Xu, J. Hu, et Y. He, « Operation of wind-turbine-driven DFIG systems under distorted grid voltage conditions: Analysis and experimental validations », IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, n° 5, p. 2354–2366, 2011.
- [3] T. Ackermann, Wind power in power systems. John Wiley & Sons, 2005.
- [4] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », PhD Thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2006.
- [5] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », PhD Thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- [6] M. Mahboub, « Modélisation et commande d'un système éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais », PhD Thesis, 2018.
- [7] T. Ghennam, « 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 », 2020.
- [8] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau », PhD Thesis, 2003.
- [9] S. El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », PhD Thesis, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [10] B. FRANCOIS, B. ROBYNS, E. DE JAEGER, et F. MINN, « Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension: L'Energie éolienne », REE Rev. L'électronique, n° 5, p. 65–74, 2005.
- [11] C. Said, « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne Par », PhD Thesis, Université de Annaba, 2017.
- [12] A. CHEMIDI, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », PhD Thesis, 2015.
- [13] M. Lopez, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », PhD Thesis, 2008.
- [14] S. Mathew, Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. Springer, 2006.
- [15] A. Adjeroud, F. Boudjellaba, « étude d'une éolienne en fonctionnement autonome », Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira De Bejaïa 2015.
- [16] Chikha Said, « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne », Thèse De Doctorat Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouagh 03/07/2017.



## LISTE DES REFERENCES

---

- [17] M. Malki et S. A. Belarbi, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine+ MADA+ Réseau) en mode continu et discret », PhD Thesis, 2014.
- [18] B. Multon et al. Etat de l'art des aérogénérateurs. 2002.
- [19] A. MOUALDIA, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Ecole Nationale polytechnique D'ALGER, 2014.
- [20] M. ALLAM, « Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable », PhD Thesis, 2017.
- [21] M. Adjoudj, « commande d'une machine asynchrone à double alimentation », IRECOM Lab., 2011.
- [22] K. Zaabta, « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne », PhD Thesis, 2012.
- [23] S. M. BOUDIA, « Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'atlas des vents en Algérie », PhD Thesis, Citeseer, 2013.
- [24] M. BENMEDJAHED, « Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement. », PhD Thesis, 2013.
- [25] M.-T. Latreche, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », PhD Thesis, 2018.
- [26] T. M. Letcher, Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines. Academic Press, 2017.
- [27] R. Radia, « Etude d'une chaine de conversion d'energie eolienne », 2017.
- [28] K. Lotfi, " Modélisation et simulation des différents aérogénérateurs éoliens», Mémoire de Master, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès Juin 2018.
- [29] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed, et H. Benalla, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation », Rev. Energ. Renouvelables, vol. 14, n° 1, p. 109–120, 2011.
- [30] B. Benyachou &F. Ait Ouhrouch &K. Gueraoui, B. 2Bahrar, " Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA, 1Equipe de Simulation en Mécanique et Energétique Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat 2Equipe de Mécanique, Energétique et environnement ENSET Mohammédia, Université Hassan II, Casablanca .11 - 14 Avril 2017 (Meknès, MAROC).
- [31] M. Takieddine, H. Noureddine, "Commande d'une chaine éolienne en utilisant un convertisseur matriciel ", Mémoire de Master, Université de Tiaret 2016/2017.
- [32] A. Zaimi, « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents » Energie électrique. 2014. dumas-01222261.

## LISTE DES REFERENCES

---

- [33] K. Mohamed, "Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative", Mémoire de Magister, Université du 20 aout 1955 Skikda, 2011/ 2012.
- [34] S. Hamecha, « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents », PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [35] K. Mohamed, "Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aiment permanant", Mémoire de Magister, Université de Batna 20 Avril 2014.
- [36] B. Moussa, K. Hadjer, " Commandes hybrides de la machine asynchrone à double alimentation destinée aux systèmes de conversion d'énergie éolienne ", Mémoire de Master , Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès Juillet 2019.
- [37] F. Lourad, « Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », PhD Thesis, Thèse présenté pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Annaba ..., 2016.
- [38] A. NOUARI et B. AKKOUICHE, « COMMANDE D'UNE MSAP DÉDIDEE A UNE ÉOLIENNE PAR LA MÉTHODE DE BACKSTEPPING », PhD Thesis, Université Akli Mouhand Oulhadj-Bouira, 2018.
- [39] Hicham, « électronique: Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne », électronique, févr. 25, 2011. <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/modelisation-du-systeme-de-conversion.html>.
- [40] H Sebti, " Commande vectorielle appliquée à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne ", Mémoire de Master, Université Batna 2 2016/2017.
- [41] A. Chaiba, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle », PhD Thesis, Université de Batna 2, 2010.
- [42] R. Kezerli, « Alimentation et commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux », PhD Thesis, 2009.
- [43] El. Kabira, " Modélisation et Commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ", Mémoire de Master, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah 2012/2013.
- [44] M. K. Touati, « Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique ", Mémoire de Master, Université de Batna 2015.
- [45] S. Ben kadem, D. Ben mebarek, «Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne ». Mémoire Master, Université Ahmed Draïa Adrar 19/06/2018.
- [46] H. Abu-Rub, M. Malinowski, et K. Al-Haddad, Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications. John Wiley & Sons, 2014.
- [47] G. Abad, M. Á. Rodriguez, et J. Poza, « Three-Level NPC Converter-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Machine at Low Constant Switching Frequency », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, n° 12, p. 4417-4429, déc. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2007829.

## LISTE DES REFERENCES

---

- [48] N. Mesbahi, « Etude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte d'une machine asynchrone », Mém. Magister Univ. Annaba, 2007.
- [49] F. Merrahi, « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (Application à l'énergie éolienne) », PhD Thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [50] M. A. HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », PhD Thesis, 2016.
- [51] R. Dembri, « Modélisation et Commande d'un Système Eolien Connecté au Réseau », PhD Thesis, 2018.
- [52] P. Krafczyk, « Modélisation et mise en oeuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA », Mém. Présentée Pour L'obtention Diplôme D'ingénieur En Electrotech. Cent. D'enseignement Nancy, vol. 10, 2013.
- [53] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, et J. R. Saenz, « Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator », IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, n° 2, p. 194–204, 2003.
- [54] K. Belmokhtar, M. L. Doumbia, et K. Agbossou, « Modelling and Power Control of Wind Turbine Driving DFIG connected to the Utility Grid », in Proc. of the International Conference on Renewable energies and Power Quality, ICREPQ, 2011, p. 1–6.
- [55] D. Kairous et R. Wamkeue, « DFIG-based fuzzy sliding-mode control of WECS with a flywheel energy storage », Electr. Power Syst. Res., vol. 93, p. 16–23, 2012.
- [56] M. S. BRAHIM, « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone », PhD Thesis, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [57] K. Tedjani, M.T. GUITOUBI, «La Commande Vectorielle De La Machine Asynchrone Double Alimentée En Tension Par Régulateur PI Et RST ». Mémoire Master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [58] « New Page ». [http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=19130&language\\_code=FRA](http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=19130&language_code=FRA)
- [59] R. OTT, « Qualité de la tension - Introduction », Ref: TIP302WEB - « Réseaux électriques et applications », nov. 10, 2002. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/problematiques-communes-des-reseaux-electriques-du-fonctionnement-au-comptage-42266210/qualite-de-la-tension-d4261>.
- [60] I. Abderrahim, « Amélioration de la qualité d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation et connecté au réseau électrique », PhD Thesis, École de technologie supérieure, 2015.
- [61] B. D. Guendoud ; « Filtrage actif de puissance », mémoire de Master, Université mouloud Mammeri, Tizi-Ouazou , 21/07/2016.
- [62] Y. nmiri dit, « Harmoniques : à l'origine de perturbation sur le réseau électrique », Le blog MaterielElectrique.com, févr. 26, 2017. <https://blog.materielelectrique.com/harmoniques-reseau-electrique>.
- [63] « Power Quality In Electrical Systems ». <http://www.powerqualityworld.com/2011/06/voltage-unbalance-power-quality-basics.html>.

## LISTE DES REFERENCES

---

- [64] « LVRT - Low Voltage Ride Through | Wind Power ». <https://www.deif.com/wind-power/technology/lvrt---low-voltage-ride-through>.
- [65] S. Mali, S. James, et I. Tank, « Improving low voltage ride-through capabilities for grid connected wind turbine generator », *Energy Procedia*, vol. 54, p. 530–540, 2014.
- [66] M. Ezzat, M. Benbouzid, S. M. Muyeen, et L. Harnfors, « Low-voltage ride-through techniques for DFIG-based wind turbines: state-of-the-art review and future trends », in *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, p. 7681–7686.
- [67] D. H. Marin, « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires », 2020.
- [68] A. von Jouanne et B. Banerjee, « Assessment of voltage unbalance », *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, n° 8, p. 64–64, 2001.

## ANNEXE A

Les paramètres du système de conversion d'énergie éolienne :

❖ Paramètres de la turbine :

$P_{n-aéro}$	2MW
$R$	42 m
$G$	100
F	0.001 Nm/S
J	127Kg. m <sup>2</sup>
C1	151
C2	0.58
C3	0.002
C4	13.2
C5	18.4

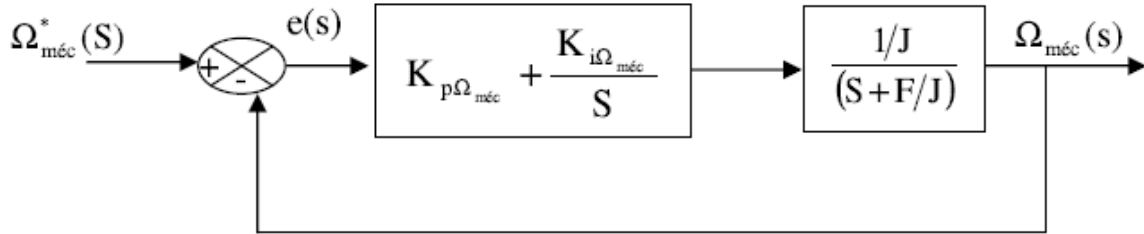
❖ Paramètres de la GADA

$V_s$	<b>690V</b>
$V_r$	<b>2070V</b>
$f$	<b>50 Hz</b>
$P_s$	<b>2MW</b>
$I_s$	<b>1760 A</b>
$n$	<b>1500 tr/min</b>
$p$	<b>2</b>
$F$	<b>127 Nm/S</b>
$J$	<b>0.001Kg. m<sup>2</sup></b>
$g$	<b>1/3</b>
$C_{em}$	<b>12732 N.m</b>
$R_s$	<b>0.0026 Ω</b>
$L_{si}$	<b>0.000087 H</b>
$L_m$	<b>0.0025 H</b>
$R_r$	<b>0.0029 Ω</b>
$f_{sw}$	<b>4000</b>

## ANNEXE B

### ANNEXE B : Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT)

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure suivante.



Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p\Omega_{méc}}}{S} \left( S + \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \right) \quad (B.1)$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (B.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{méc}^*} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} S + 1} \quad (B.3)$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (B.4)$$

Le régulateur de la vitesse  $\Omega_{méc}$ , est :

$$\begin{cases} K_{p\Omega_{méc}} = \frac{J}{\tau} \\ K_{i\Omega_{méc}} = \frac{F}{\tau} \end{cases} \quad (B.5)$$

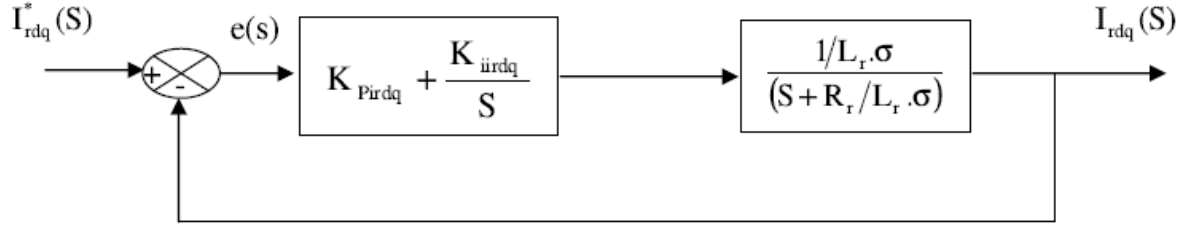
## ANNEXE B

### Dimensionnement des régulateurs de la commande indirecte avec boucle de puissance

Pour cela on a deux boucles de réglage une boucle interne (boucle des courants rotoriques) et boucle externe (boucle des puissances)

#### Boucles internes : Calcul des régulateurs des courants rotoriques

La figure suivante montre le schéma fonctionnel du régulateur PI utilisé pour contrôler les courants de rotor de la MADA. La synthèse et la détermination des gains de régulateur sont détaillée dans cette partie.



Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{pirdq}}{S} \left( S + \frac{K_{iirdq}}{P_{pirdq}} \right) \quad \text{B.6}$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{iirdq}}{K_{pirdq}} \quad \text{B.7}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{pirdq}} S + 1} \quad \text{B.8}$$

Le système du premier ordre, sa fonction de transfert s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{K}{\tau_1 S + 1} \\ \tau_1 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{pirdq}} \end{cases} \quad \text{B.9}$$

Le régulateur du courant rotorique dans les deux axes est :

$$\begin{cases} K_{pirdq} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_1} \\ K_{iirdq} = \frac{R_r}{\tau_1} \end{cases} \quad \text{B.1}$$

## Résumé

L'objectif principal des travaux réalisés dans ce mémoire est ainsi d'introduire les problèmes liés à la qualité d'énergie lors de l'intégration du système de production éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) fonctionnant dans des conditions de tension de réseau non équilibrée. La recherche permet de sélectionner la commande vectorielle par orientation du flux statoriques à la GADA pour assurer un découplage naturel entre la grandeur commandant la puissance active et réactive. En même temps, le rendement énergétique de la chaine de conversion éolienne doit être amélioré en faisant extraire le MPPT. Pour y arriver à ces objectifs. L'ensemble de la chaine éolienne à base de GADA est simulé dans MATLAB SIMULINK réseau triphasée équilibrée puis déséquilibrée.

**Mots-clés :** Energie éolienne, commande, modélisation, GADA, réseau électrique, défauts.

## Abstract

The main objective of the work carried out in this thesis, is how to introduce the problems associated with the wave quality of energy during the integration of the wind power system based on a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) operating in unbalanced grid voltage conditions. Searching allows us to select vector control by stator flux orientation of the DFIG to ensure a natural decoupling between the magnitude controlling active and reactive power. At the same time, the energy efficiency of wind power conversion chain should be improved by extracting the MPPT. To achieve these objectives. the wind power system based on a DFIG is simulated in MATLAB SIMULINK three-phase network, balanced and then unbalanced.

## Keywords:

Wind energy, control, modeling, DFIG, network, faults.

**ملخص :**

الهدف الرئيسي للعمل المنفذ في هذه الأطروحة هو تقديم المشكلات المتعلقة بجودة الطاقة أثناء تكامل سلسلة إنتاج طاقة الرياح بناءً على مولد غير متزامن مزود بمصدر طاقة مزدوج يعمل تحت ظروف الجهد وشبكة غير متوازنة. يتيح البحث إمكانية تحديد عنصر التحكم في القوة الموجهة من خلال توجيه تدفق الجزء الثابت في مولد الطاقة المزدوجة غير المتزامن لضمان الفصل الطبيعي بين الكمية التي تتحكم في القوة النشطة والمتفاعلة. في الوقت نفسه، يجب تحسين كفاءة الطاقة لسلسلة تحويل عفة الرياح من خلال تتبع نقطة الطاقة القصوى. لتحقيق هذه الأهداف. يتم محاكاة سلسلة الرياح بالكامل المستندة مولد الطاقة المزدوجة غير المتزامن في شبكة ما تلاب ثلاثية الطور، متوازنة ثم غير متوازنة.

**الكلمات المفتاحية:**

طاقة الرياح، التحكم، النمذجة، مولد الطاقة المزدوجة غير المتزامن، الشبكة، الأعطال.