



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun – Tiaret –



Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière

Département des Sciences et de la Technologie

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE: **Génie électrique**

OPTION : **Commande des réseaux électriques**

Présenté par

KOUADRIA Selman

Ingénieur en Electrotechnique de l'Université Ibn Khaldoun – Tiaret –

SUJET DU MEMOIRE :

Etude et réalisation d'un émulateur d'une turbine éolienne

SOUTENU LE :/...../2012 Devant Le Jury Composé de :

Mr. A.TALHA	Professeur	USTHB	Président
Mr. E. M.BERKOUK	Professeur	ENP Alger	Rapporteur
Mr. Y. MESLEM	Maître de conférences classe A	U. Tiaret	Examineur
Mr. T. ALLAQUI	Maître de conférences classe A	U. Tiaret	Examineur

Mémoire préparé au sein du Laboratoire de Génie Electrique et des Plasmas – Tiare
Année Universitaire : 2011/2012

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu « ALLAH » le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes mes années d'études et c'est grâce à sa miséricorde que j'ai pu accomplir ce travail.

Ensuite un grand merci à mes parents qui se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir les conditions nécessaires pour atteindre ce stade. Qu'ils trouvent dans ce manuscrit toute ma reconnaissance et le signe que je suis enfin arrivée au bout. De même que mes frères et sœurs ainsi que ma sage tante et son mari pour leurs soutiens moral.

Aussi un grand merci à mon frère Mouadh et sa mère ainsi qu'à toute la famille HACHANI sans oublier les petits Abdelkader et Nouha, pour leur accueil et soutien durant tous mes séjours à Alger. Qu'ils trouvent eux aussi toute ma reconnaissance.

L'honneur et la passion qui ont accompagné à juste titre l'achèvement du présent travail sont entièrement notés, affichés et profondément exprimés vis-à-vis de mon encadreur monsieur E.M. BERKOUK, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger pour ses qualités humaines, ses idées, ses conseils, ainsi que ses critiques et encouragements pour y parvenir.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur A. TALHA professeur à l'université des sciences et de la technologie «H. BOUMEDIENNE» de m'avoir honoré par la présidence du jury.

Je tiens également à remercier messieurs Y. MESLEM et T. ALLAOUI, maîtres de conférences à l'université IBN KHALDOUN de Tiaret pour leurs soutiens ainsi que l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail sans oublier leur participation à son évaluation.

Je tiens aussi à remercier :

Mr M. MOUDJAHED, maître de conférences à l'université IBN KHALDOUN de Tiaret et chef de pôle de l'Ecole Doctorale de Tiaret.

Les membres du laboratoire de LGEP, surtout messieurs A. SAFA, A. GOUICHICHE, A. BELFEDHAL, R. OUARED, A. DIEB ainsi que B. BELABBAS et E. BENALI pour leurs encouragements, aides, assistance et disponibilité.

Tout le personnel enseignants de l'école doctorale du département "Génie Electrique" pour m'avoir insufflé les connaissances acquises à ce jour.

Tous mes chers amis, mes collègues de travail et comme il y a tant de personnes qui ont intervenu, pour lesquels je demande pardon en cas d'oubli.

Résumé

Dans ce mémoire, nous présentons l'étude et la réalisation d'un émulateur physique d'une turbine éolienne, basée sur la commande en couple d'une machine à courant continu à excitation séparée, alimentée par un hacheur à quatre quadrants commandé par le billet d'une carte d'acquisition (dSPACE1104). Cet émulateur permettra l'étude des chaînes de conversion éoliennes au laboratoire dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel.

Le travail traite la modélisation et la commande découplée des puissances active et réactive (P-Q) pour une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation dont l'enroulement rotorique est alimenté par un onduleur triphasé idéal.

Mots Clés : émulateur, turbine éolienne, MCC, dSPACE1104, hacheur à quatre quadrants, GADA.

Abstract

In this thesis, we presented the study and the realization of an emulator for a wind turbine using a separately excited DC motor, supplied with four quadrants chopper; this later is controlled by means of a dSPACE1104 board. This emulator will make it possible to study the wind chains conversion at the laboratory under conditions close to those of a real wind system.

The work treats the modilization and a decoupling control of the active and reactive power (P-Q), for a doubly fed induction machine (DFIG) for wind-turbine application. Proofs of concepts are by digital simulations. The rotor winding of the doubly fed induction generator (DFIG) is supplied with ideal voltage source inverter.

Key words: emulator, wind turbine, DCM, dSPACE1104, four quadrants chopper, DFIG.

تدرس هذه المذكرة انجاز محاك فيزيائي لناعورة هوائية لإنتاج الطاقة, قائم على التحكم في عزم محرك ذو تيار مستمر و تغذية مستقلة. تغذية هذا الأخير تتم عن طريق مقطع ذو أربع اتجاهات و الكل متحكم فيه بواسطة الحاسوب الذي يحوي بطاقة dSPACE1104 هذا المحاكي يسمح أيضا بدراسة آليات تحويل الطاقة الهوائية إلي طاقة كهربائية في المخبر في ظروف قريبة من الواقع.

وتطرقنا أيضا لدراسة نموذج وطريقة التحكم المستقل في الاستطاعات الكهربائية P و Q لماكنة لا تزامنية ثنائية التغذية، تغذية محرك الماكنة يتم عن طريق مموج مثالي.

كلمات مفتاحية : ناعورة هوائية، محاكي، محرك ذو تيار مستمر، مقطع ذو أربع اتجاهات، ماكنة لا تزامنية ثنائية التغذية، مموج مثالي.

Liste des symboles

θ	L'abscisse angulaire entre la phase statorique (A) et la phase rotorique (a)
\square	Le facteur d'affaiblissement sur le rotor de la turbine
S	L'opérateur de LAPLACE.
P	Le nombre de paires de pôles.
F	Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne
V	La vitesse moyenne du vent
G(S)	La fonction de transfert du filtre spatial
G	Le rapport du multiplicateur de vitesse
P	La densité de l'air
\square	La vitesse spécifique de la turbine
Cp	Coefficient de puissance
Ct	Coefficient du couple
$d\vec{D}$	Force de traînée (drag)
$d\vec{F}_a$	Force de poussée axiale
$d\vec{T}_a$	Couples élémentaires exercé sur chaque tronçon de la pale
A	Angle d'incidence
Ψ	Angle d'attaque
B	L'angle de calage des pales
R _T	Le rayon des pales de la turbine
Cp ($\lambda ; \beta$), Cq ($\lambda ; \beta$)	Le coefficient de puissance et le coefficient du couple respectivement
C _D , C _L	Coefficient de traînée et coefficient de portance respectivement
v _t (t)	La composante représentant la turbulence du vent
V ₀ (t)	La vitesse du vent
I _a	Le courant d'induit de la Machine à courant continue
I _e	Le courant d'excitation de la Machine à courant continue
$\Omega_{T,opt}$, $\Omega_{g,opt}$	La vitesse optimale de la turbine et du générateur respectivement
$\Omega_{T,g}$	La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur
Γ_r	Le couple résistant
$\Gamma_{T,opt}$, $\Gamma_{g,opt}$	Le couple optimal de la turbine respectivement du générateur

Γ_T, Γ_g	Le couple éolien et le couple électromagnétique
f_T, f_g	Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur
f_D, f_L	La portance et la traînée respectivement
θ_s	L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à l'axe de la phase statorique (A)
θ_r	L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à la phase rotorique (a)
G	La vitesse de glissement
V_s, V_r	La tension simple statorique et rotorique respectivement
V_{qr}, V_{qs}	La tension statorique directe et en quadrature
V_{dr}, V_{dq}	La tension rotorique directe et en quadrature
U_a, U_b, U_c	La tension composée des phases a, b et c respectivement
R_s, R_r	La résistance par phase statorique et rotorique respectivement
P_s, Q_s	Les puissances active et réactive statoriques
P_r, Q_r	Les puissances active et réactive rotoriques
M_{sr}, M_{rs}	Inductances mutuelles stator-rotor
M_s, M_r	La mutuelle Inductance entre les enroulements statoriques, respectivement rotoriques
L_s, L_r	L'inductance propre statorique et rotorique respectivement
J_T, J_g	L'inertie de la turbine et celle du générateur
I_s, I_r	Les courants de phase statorique et rotorique
I_{ds}, I_{qs}	Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK
I_{dr}, I_{dq}	Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK
ETE	Emulateur de Turbine Eolienne
EWEA	European Wind Energy Association
RTI	Real Time Interface
HILS	Hard hardware-in-the-Loop simulation
CAN	ConvertisseurAnalogiqueNumérique
CNA	ConvertisseurNumériqueAnalogique

Liste des figures

Figure I-1: Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours.4

Figure I-2: Développement de l'énergie d'éolienne dans le monde.6

Figure I-3: Ressources mondiales annuelles terrestres d'énergie éolienne en TWh (EWEA).....	7
Figure I-4: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	7
Figure I-5: Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol.(Automne, Hiver, Printemps et Eté).....	8
Figure I-6: Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	9
Figure I-7: L'éolienne à l'intérieur.....	9
Figure I-8: Taille des hélices en m et puissances en KW.....	11
Figure I-9: Directions du vent sur un tronçon de pale.....	12
Figure I-10: Forces appliquées sur un élément de pale.....	12
Figure I-11: Evolution des coefficients de portance C_L et de traînée C_D	14
Figure I-12: Structure générale de contrôle d'un système éolien.....	15
Figure I-13: Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine.....	16
Figure I-14: Décrochage aérodynamique passif.....	16
Figure I-15: Principe du décrochage aérodynamique actif.....	17
Figure I-16: Décrochage par contrôle de l'angle de calage β	17
Figure I-17: Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	18
Figure I-18: technologies d'éoliennes à axe vertical.....	20
Figure I-19: technologies d'éoliennes à axe horizontal.....	20
Figure I-20: Eoliennes en amont et en aval.....	21
Figure I-21: Génératrice asynchrone GAS à cage (souvent à deux enroulements statoriques souvent à deux enroulements statoriques 4et 6 pôles qvec multiplicateur et connexion directe au réseau).....	22
Figure I-22: Génératrice asynchrone GAS à bague directement connectée au réseau et contrôle electronique de glissement.....	23
Figure I-23: Génératrice Synchrone GS à attaque directe à excitation bobinée sans balais ou à aimant.....	24
Figure I-24: Génératrice Asynchrone GAS avec multiplicateur à variation de vitesse par le rotor.....	25
Figure II-1: Composants d'une éolienne.....	31
Figure II-2: Les différents types des Mâts.....	31
Figure II-3: Constitution d'une nacelle.....	32
Figure II-4: Rotor de turbine.....	34
Figure II-5: Les outils de mesure du vent.....	35
Figure II-6: Répartition des vitesses dans le tube de courant.....	37
Figure II-7: Coefficient de puissance.....	38
Figure II-8: Coefficient de puissance pour différentes éoliennes.....	38
Figure II-9: Paramétrisation de la courbe CP.....	40
Figure II-10: Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents β	40
Figure II-11: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	41

Figure II-12: Schéma de turbine éolienne.....	42
Figure II-13: Schéma bloc du modèle de la turbine	43
Figure II-14: Schéma bloc d'une turbine éolienne.....	44
FigureII-15: Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne.....	44
Figure II-16: Partie de la chaîne de conversion à émuler.	44
Figure II-17: Turbine réelle et émulateur équivalent.	44
Figure II-18: Modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée.....	45
Figure II-19: Schéma d'un hacheur à quatre quadrants.	46
Figure II-20: Fonctionnement de la machine dans les quatre quadrants.	46
Figure II-21: Formes de tension et de courant de la machine.....	46
Figure II-22: T1 et T4 conduisent.	47
Figure II-23: D2 et D3 conduisent.	47
Figure II-24: T2 et T3 conduisent.	47
Figure II-25: D1 et D4 conduisent.	47
Figure II-26: Pilotage de la machine en couple éolien.....	48
Figure II-27: Schéma bloc implanté sous Simulink™	48
Figure II-28: Profil du vent appliqué.	49
Figure II-29: Variation du coefficient lambda (rapport de vitesse).....	49
Figure II-30: Variation du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$	49
Figure II-31: Allure des courants $I_{réf}$ et I_a	50
Figure II-32: Allure de la vitesse de la machine (tr/mn).	51
Figure III-1: Dispositif expérimental.	52
Figure III-2: Photo du banc d'essai.	53
Figure III-3: Photo du Hacheur.	55
Figure III-4: Génération du couple éolien de référence.....	56
Figure III-5: Commande conventionnelle par hystérésis.....	58
Figure III-6: Principe de la commande par MLI.	58
Figure III-7: Composition de la carte DS1104.....	59
Figure III-8: Panneau multi-entrées/sorties dSPACE 1104.....	60
Figure III-9: Allure des courants de référence et mesuré.....	61
Figure III-10: Allure du courant mesuré et la tension appliquée.....	61
Figure III-11: Allure des courants de référence et mesuré.	62
Figure III-12: Allure du courant mesuré et la tension appliquée.....	62
Figure III-13: Profil du vent appliqué.	63
Figure III-14: Allure des courants de référence et d'induit.....	63
Figure III-15: Variation du rapport de vitesse λ	64

Figure III-16: Variation du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$.	64
Figure III-17: Allure de la vitesse de la machine (tr/mn).	64
Figure III-18: Allure des courants de référence et d'induit.	65
Figure III-19: Variation du rapport de vitesse λ .	65
Figure III-20: Variation du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$.	65
Figure III-21: Allure de la vitesse de la machine (tr/mn).	66
Figure III-22: La tension appliquée à la machine.	66
Figure IV-1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.	68
Figure IV-2: Représentation spatiale de la GADA.	68
Figure IV-3: Quadrants de fonctionnement de la GADA.	69
Figure IV-4: Passage du système triphasé au biphasé.	73
Figure IV-5: Principe de la commande vectorielle.	77
Figure IV-6: Position du référentiel par rapport au flux.	77
Figure IV-7: Schéma bloc de la GADA.	81
Figure IV-8: Schéma bloc de la commande directe.	82
Figure IV-9: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.	83
Figure IV-10: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.	84
Figure IV-11: Schéma de commande du générateur éolien.	85
Figure IV-12 : Puissances actives $P_{réf}$ et P_{mes} .	85
Figure IV-13 : Puissances réactives $Q_{réf}$ et Q_{mes} .	86
Figure IV-14: Courant I_{dr} .	86
Figure IV-15 : Courant I_{qr} .	86
Figure IV-16 : Couple de la génératrice.	86
Figure IV-17 : Tensions rotoriques.	87
Figure IV-18 : Courants rotoriques.	87
Figure IV-19 : Coefficient de puissance C_p optimale.	87
Figure IV-20 : Rapport de vitesse λ optimale.	87
Figure IV-21 : Puissances actives $P_{réf}$ et P_{mes} .	88
Figure IV-22: Puissances réactives $Q_{réf}$ et Q_{mes} .	88
Figure IV-23: Vitesse de l'émulateur.	88
Figure IV-24: Couple de la génératrice.	88
Figure IV-25: Courants rotoriques.	89
Figure IV-26: Tensions rotoriques.	89
Figure IV-27: Courants $I_{réf}$ et I_a .	89
Figure IV-28 : Puissances actives $P_{réf}$ et P_{mes} .	90
Figure IV-29 : Puissances réactives $Q_{réf}$ et Q_{mes} .	91

Figure IV- 30: Courants rotoriques $I_{qréf}$ et $I_{qmés}$	91
Figure IV- 31 : Courants rotoriques $I_{dréf}$ et $I_{dmés}$	91
Figure IV- 32: Couple de la génératrice.....	91
Figure IV- 33 : Courants rotoriques	92
Figure IV- 34 : Tensions rotoriques	92
Figure IV- 35 : Coefficient de puissance C_p optimale.....	92
Figure IV- 36 : Rapport de vitesse λ optimale	92
Figure IV-37: Couple de la génératrice.....	92
Figure IV-38: Puissance optimale de l'émulateur	92
Figure IV-39: Courants $I_{qréf}$ et $I_{qmés}$	93
Figure IV-40: Courants $I_{dréf}$ et $I_{dmés}$	93
Figure IV-41: Tensions rotoriques	93
Figure IV-42: Courants rotoriques	93
Figure IV-43: Vitesse de l'émulateur	94
Figure IV-44: Courants $I_{réf}$ et I_a	94
Figure IV- 45 : Puissances actives $P_{réf}$ et $P_{més}$	94
Figure IV-46: Puissances réactives $Q_{réf}$ et $Q_{més}$	95
Figure IV-47 : Courant rotoriques $I_{qrréf}$ et $I_{qmés}$	95
Figure IV- 48 : Courant rotoriques $I_{drréf}$ et I_{drmes}	95
Figure IV- 49: Couple de la génératrice.....	95
Figure IV- 50 : Courants rotoriques	96
Figure IV- 51 : Tensions rotoriques	96
Figure IV- 52 : Coefficient de puissance C_p optimale.....	96
Figure IV- 53 : Rapport de vitesse λ optimale	96
Figure IV-54: Courants rotoriques	96
Figure IV-55 : Tensions rotoriques	97
Figure IV-56: Puissances actives $P_{réf}$ et $P_{més}$	97
Figure IV-57: Puissances réactives $Q_{réf}$ et $Q_{més}$	97
Figure IV-58: Courants rotoriques $I_{rqréf}$ et $I_{rqmés}$	98
Figure IV-59: Courants rotoriques $I_{rdréf}$ et I_{rdmes}	98
Figure IV-60: Couple de la génératrice.....	98
Figure IV-61: Vitesse de l'émulateur	98
Figure IV-62: Courants $I_{réf}$ et I_a	98

Liste des tableaux

Tableau I-1: Comparatif Vitesse fixe et variable	21
Tableau I-2: Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes	26
Tableau II-1: valeurs des 7 paramètres nécessaires pour différentes valeurs de β	40
Tableau II-2: valeurs des 6 coefficients C1 à C6 de la turbine	41

Table des matières

Liste des symboles.....	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vii
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 - Introduction:.....	3
I.2 - Contexte historique.....	3
I.3 - L'énergie éolienne : « une filière en plein développement ».....	5
I.4 - Gisement éolien en Algérie.....	7
I.5 - Principaux composants d'une éolienne	9
I.6 - Fonctionnement d'une éolienne.....	9
I.7 - Taille des aérogénérateurs.....	11
I.8 - Efforts sur une pale	11
I.9 - Contrôle de la puissance	14
I.10 - Méthodes de contrôle de l'aéroturbine	15
I.10.1 - Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall)	16
I.10.2 - Contrôle par décrochage aérodynamique actif.....	17
I.10.3 - Contrôle par angle de calage variable des pales (pitch control).....	17
I.10.4 - Zones de fonctionnement.....	18
I.11 - Différents types d'éoliennes	19
I.11.1 - Selon la conception mécanique.....	19
I.11.1.1 - Eolienne à axe vertical.....	19
I.11.1.2 - Eolienne à axe horizontal	20
I.11.2 - Selon la technologie.....	21
I.11.2.1 - Système à vitesse fixe – Machine asynchrone à cage : structure MAS.....	22
I.11.2.2 - Systèmes à vitesse variable	23
I.11.2.2.a- Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage.....	23
I.11.2.2.b- Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone.....	24
I.11.2.2.c- Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation.....	24
I.12 - Synthèse des différents types d'éoliennes	26
I.13 - Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	27

I.13.1 – Avantages.....	27
I.13.2 – Inconvénients.....	28
I.14 – Conclusion.....	29

CHAPITRE II Conception et simulation de l'émulateur

II.1 – Introduction.....	30
II.2 - Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal.....	30
II.3 - Modélisation de la chaîne de production éolienne.....	35
II.3.1 - Modélisation du vent	35
II. 3.2 - Modélisation de la turbine éolienne.....	36
II.3.2.1 - Théorie du disque actuateur et limite de Betz	36
II.3.2.2 - Modélisations existantes du coefficient de puissance.....	39
II.3.2.2.a–1 ^{er} type de modélisation.....	39
II.3.2.2.b–2 ^{ème} type de modélisation	40
II.3.2.3 - Modélisation de la turbine	41
II.3.2.3.a–Le multiplicateur	42
II.3.2.2.b–Equation dynamique de l'arbre.....	43
II.4 - Model électrique équivalent	44
II.5 - Stratégie d'émulation	44
II.5.1 - Modélisation de la machine	45
II.5.2 - Alimentation de la MCC avec un hacheur à quatre quadrants :	45
II.6 - Stratégie de commande de la machine.....	47
II.7 - Résultats de simulation de l'émulateur.....	49
II.8 - Conclusion.....	51

CHAPITRE III Réalisation expérimentale de l'émulateur

III.1 - Introduction	52
III.2 - Présentation de la plate-forme d'essais	52
III.3 - Caractéristiques du banc d'essais	53
III.3.1 - Le banc machine.....	53
III.3.2 - Baie de puissance	54
III.4 - Cartes des mesures	54
III.5 - Encodeur incrémental.....	55
III.6 - Schéma et principe de la commande	55
III.6.1 - Implantation de la courbe $CP = f(\lambda, \beta)$	56
III.6.2 - Principe de la commande.....	57

III.6.2.1 - La commande conventionnelle par hystérésis	57
III.6.2.2 - Commande par MLI	58
III.7 - Caractéristiques du contrôleur numérique utilisé (dSPACE 1104).....	58
III.8 - Résultats expérimentaux	60
III.8.1 - Test du hacheur à quatre quadrants.....	60
III.8.2 - Résultats expérimentaux de l'émulateur.....	62
III.9 - Interprétation des résultats	66
III.10 – Conclusion	66

CHAPITRE IV Modélisation et Commande d'une GADA associée à une éolienne

IV.1 – Introduction	67
IV.2 - Description de la GADA	68
IV.3 - Modes de fonctionnement de la GADA	69
IV.4 - Modélisation de la GADA	70
IV.4.1 - Hypothèses simplificatrices.....	70
IV.4.2 - Equations électriques	71
IV.4.3 - Equations magnétiques	71
IV.4.4 - Equation mécanique.....	72
IV.5 - Modèle de la GADA dans le repère d-q.....	72
IV.6 - Choix du référentiel.....	74
IV.6.1 - Référentiel lié au stator	75
IV.6.2 - Référentiel lié au rotor	75
IV.6.3 - Référentiel lié au champ tournant.....	75
IV.7 - Mise sous forme d'équations d'état	76
IV.8 -Principe de la commande vectorielle.....	76
IV.9 - Variantes de la commande vectorielle	77
IV.10 - Commande vectorielle de la GADA par des puissances	78
IV.10.1 - Modèle de la GADA avec orientation du flux	78
IV.10.2 - Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	79
IV.10.3 - Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	80
IV.10.4 - Commande indirecte de la GADA.....	82
IV.10.4.1 - Commande sans boucle de puissance.....	82
IV.10.4.2 - Commande avec boucles de puissance.....	83
IV.11 - Type de régulateur.....	84
IV.12 - Le convertisseur.....	84

IV.13 – Simulations.....	84
IV.13.1 - Conditions de simulation	84
IV.13.2 - Résultats obtenus.....	85
IV.13.2.1 - Commande vectorielle directe de la GADA	85
IV.13.2.2 - Interprétation des résultats	90
IV.13.2.3 - Commande vectorielle indirecte de la GADA sans boucle de puissances.....	90
IV.13.2.4 - Interprétation des résultats	94
IV.13.2.5 - Commande vectorielle indirecte de la GADA avec boucle de puissances :	94
IV.13.2.6 - Interprétation des résultats	99
IV.14 – Conclusion :	101
Conclusion générale	100
Annexes	103
Références bibliographiques.....	109

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Dans le monde entier, le problème qui se pose quotidiennement est de répondre à la demande d'énergie qui augmente sans cesse. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés, l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé et la multiplication des appareils domestiques électriques conduisent à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande en croissance, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires, source d'énergie qui présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets restent des problèmes réels qui rendent cette source d'énergie peu attractive pour les futures générations; sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières et son installation coûte chère et peut être dangereuse au niveau écologique.

Face à ces problèmes, et afin de limiter l'emploi de centrales nucléaires, ainsi que pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays, aidés par la déréglementation, se sont dirigés vers de nouvelles formes d'énergies dites "renouvelables".[1][2]

Les ressources énergétiques renouvelables sont pourtant considérables et parfaitement capables de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Mais outre l'hydroélectricité, technologie parfaitement mature, les solutions de conversion des ressources renouvelables, que sont le soleil, le vent, la houle, la biomasse, etc..., sont encore en phase de décollage industriel et ne représentent qu'une faible part dans le bilan global. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis la crise pétrolière de 1973 à relancer de nouvelles recherches dans les filières de production d'électricité d'origine renouvelable.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources inépuisables en énergies renouvelables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Néanmoins, longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (fabrication, usage et recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.[3]

En Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

Le potentiel techniquement exploitable en énergies renouvelables dans notre pays est considérable et la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés pour leur développement. Ainsi, trois raisons principales plaident en faveur d'un développement de ces énergies renouvelables :

- ❖ Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées, notamment dans les régions du grand Sud;
- ❖ Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, ainsi que leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles ;
- ❖ La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut avoir que des retombées positives en matière d'équilibre régional et création d'emplois.[4]

Parmi ces énergies alternatives renouvelables, nous nous sommes intéressés dans notre travail à l'énergie d'origine éolienne qui est en plein essor dans le monde actuel. Dans ce cadre, le présent mémoire de thème : Etude et réalisation d'un émulateur d'une turbine éolienne est structuré de la manière suivante :

Premier chapitre : Présentation de généralités sur le système éolien. On donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (axe vertical et horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de protection, ainsi que les différents types de génératrices et convertisseurs qui leur sont associés.

Deuxième chapitre : Développement de l'émulateur d'une turbine éolienne à axe horizontal, basé sur une machine à courant continu, commandée par un hacheur à quatre quadrants. La turbine est modélisée et les variations de couple qu'elle génère sont appliquées à cette machine.

Troisième chapitre : Il consiste à la réalisation de l'émulateur décrit auparavant. Une "simulation analogique" expérimentale dans laquelle le modèle de la machine à courant continu et le hacheur sont remplacés par un système réel dont la commande du hacheur est assurée par une carte dSPACE.

Le quatrième chapitre : Il représente la simulation de type HIL (hardware-in-the-Loop) de la machine asynchrone à double alimentation lorsqu'elle est intégrée dans un système éolien. Cette simulation est parfois employée pour la validation des lois de commandes avant l'application sur des processus réels. Leur concept est strictement relié à la simulation en temps réel. Il a été introduit pour développer et tester la structure de contrôle associée aux équipements mécaniques.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES ÉOLIENS

I.1- Introduction :

Une source d'énergie est dite renouvelable, lorsque sa consommation ne limite pas son utilisation future. Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles qui est parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Plusieurs pays se sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne (utilisation de la force du vent pour produire de l'électricité). C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 23,903 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 16,740 GW et citons également le Danemark, qui produit près de 20 % de sa consommation d'électricité grâce à ses 3,180 GW installés à la fin de l'année 2008. Dans ce contexte, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance européen et mondial très élevé.[5][6]

Aujourd'hui, l'énergie éolienne fait beaucoup parler d'elle. Elle détient un peu le rôle de vedette des énergies renouvelables. Cela est dû sans doute à son dynamisme et à sa croissance très forte, du fait qu'elle touche un secteur sensible, la production d'électricité, qui est par ailleurs en pleine mutation structurelle. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire de l'électricité pratiquement sans émission de gaz polluants[7].

I.2- Contexte historique :

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique: pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives...), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, cependant il faut disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs.

A l'exception des régions plates, où l'énergie hydraulique s'est souvent révélée plus intéressante, ce qui explique la dominance de l'hydroélectricité. En outre l'eau s'accumule facilement dans des réservoirs et permet de stocker de l'énergie. Vers la moitié du XIX^{ème} siècle, il y avait environ 200 000 moulins à vent en Europe. C'est principalement l'arrivée des machines à vapeur industrielles qui a initié leur déclin.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que L'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Poul La Cour fut, sans doute, le pionnier, il a associé en 1891, une turbine éolienne à une dynamo. En France, contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30m et génératrice synchrone de 800 KW à Nogent le Roi, bipale de 35m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 KW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, réalisèrent une machine tripale de 54m pour une puissance de 2 MW. Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pilonnes et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XX^{ème} siècle. Diverses solutions de turbines furent explorées, notamment celles à axe vertical, connue sous le nom de Darrius (leur inventeur), mais ne subsistent aujourd'hui pratiquement plus que des machines à axe horizontal à 2 ou 3 pales.

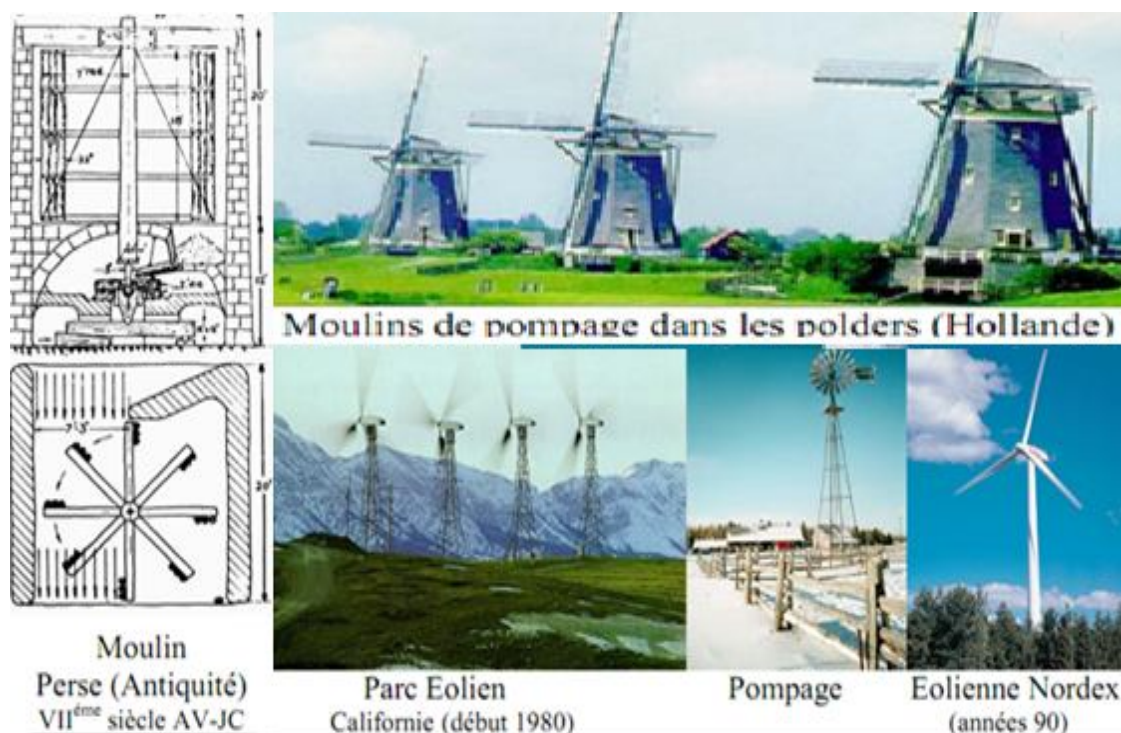


Figure I-1: Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours.

C'est principalement la crise pétrolière de 1973 qui relança les études et les expériences, à plus grande échelle: l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 KW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985. Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord.

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 KW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé)[8].

I.3- L'énergie éolienne : « une filière en plein développement »

L'énergie éolienne représente une part croissante de l'énergie fournie au réseau public d'électricité. En moyenne, depuis 1997, la capacité de production éolienne installée en Europe croît de 30% par an. Cette hausse est comparable à celle qu'a connue le nucléaire dans les années 1970. Dans une certaine mesure, ce fort taux de croissance est aidé par les politiques environnementales et les incitations fiscales des différents gouvernements nationaux. Toutefois, un autre facteur déterminant a été la baisse du coût de production des aérogénérateurs via leur industrialisation massive. L'énergie éolienne est désormais compétitive comme d'autres sources d'énergies électriques plus traditionnelles, telles que le charbon, le gaz et la production nucléaire.

Exemple: La figure I-2 montre que la puissance éolienne installée dans le monde a plus que doublé en 2008 par rapport à celle installée en 2005 et elle atteint près de 190 000 MW en 2010. Ainsi, le chiffre d'affaire mondial du secteur éolien s'élevait en 2008 à 40 milliards d'Euros. En parallèle, le marché des éoliennes neuves a montré une croissance de 42% pour atteindre un total de 27 000 MW, soit 10 fois plus qu'il y a dix ans (~ 2 000 MW).

En comparaison et selon l'IAEA (International Atomic Energy Agency), il faut noter qu'aucun réacteur nucléaire n'était entré en activité en 2008.

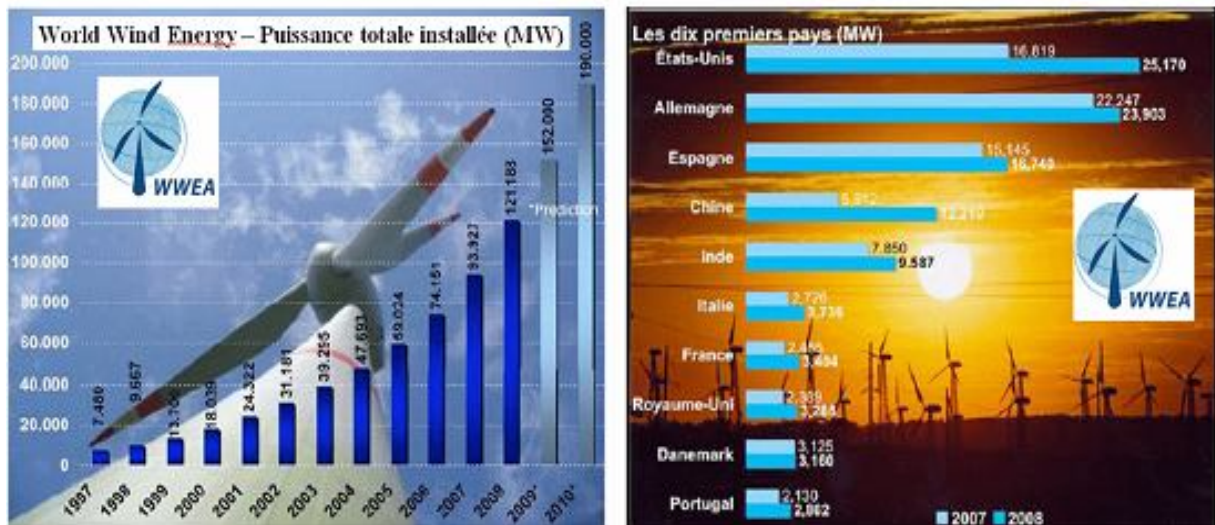


Figure I-2: Développement de l'énergie d'éolienne dans le monde.

En termes de développement de chaque pays, la figure I-2 illustre la croissance de la puissance installée entre deux années consécutives. Les Etats-Unis ont récemment pris la première place devant l'Allemagne en termes d'équipement total. La Chine demeurait en 2008 le marché le plus dynamique, en faisant plus que doubler ses installations pour la troisième année consécutive avec maintenant 12 GW installées. La France est un des pays en forte croissance, avec 4500 MW au printemps 2010, soit environ le double de sa capacité en 2007. Dans ce contexte, le passé récent et le futur sont marqués par le développement de l'éolien offshore dont les perspectives sont très significatives[9].

Les ressources du vent sont immenses et plus particulièrement en mer (offshore). La valeur de l'énergie annuellement récupérable, dépend de nombreux paramètres, telles que l'acceptabilité des populations concernées (résidents, pêcheurs...), la densité de machines implantées et les limites technico-économiques comme la distance des fermes offshore à la côte et la profondeur des fonds marins. Pour donner un ordre de grandeur, une estimation (sur la base d'une occupation inférieure à 10 % des surfaces) a montré que le potentiel éolien terrestre annuellement récupérable au niveau mondial est d'environ 53000 TWh, soit 4 fois la consommation mondiale actuelle d'électricité (Figure I-3). L'EWEA estime que l'énergie éolienne pourrait satisfaire 12 % des 25 800 TWh électriques mondiaux de 2020 soit environ 3100 TWh.

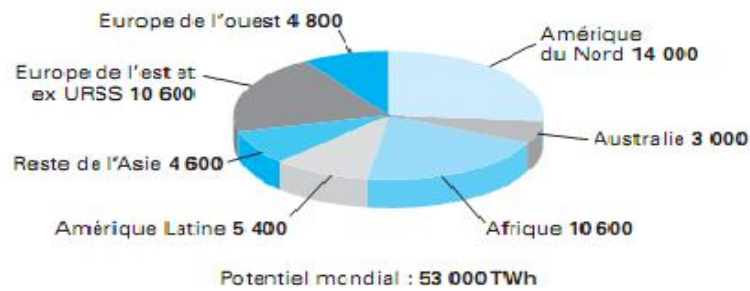


Figure I-3: Ressources mondiales annuelles terrestres d'énergie éolienne en TWh (EWEA).[10]

I.4- Gisement éolien en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à l'autre. Ceci 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 1200km 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, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le Sud Algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, 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 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.[11]

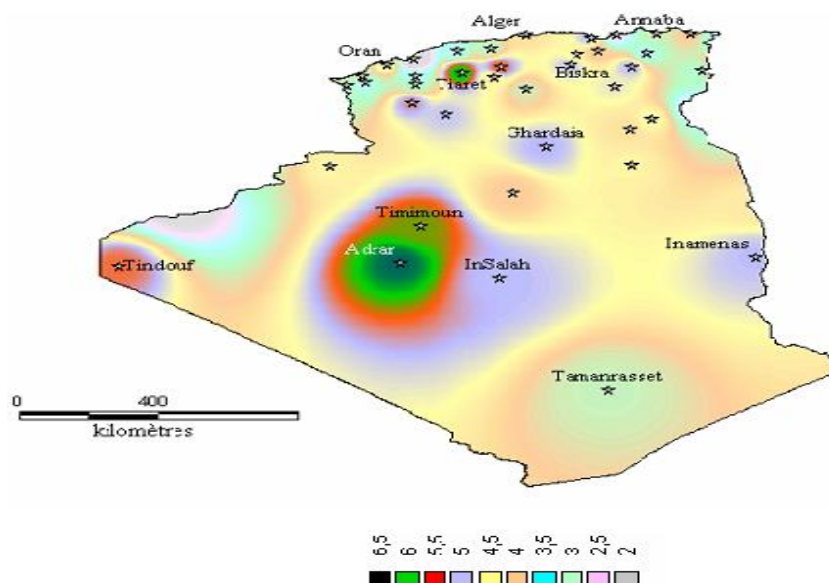


Figure I-4: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'il ne faut pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures I- 5 (Eté, Printemps, Hiver et Automne). On remarque en général, que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année.

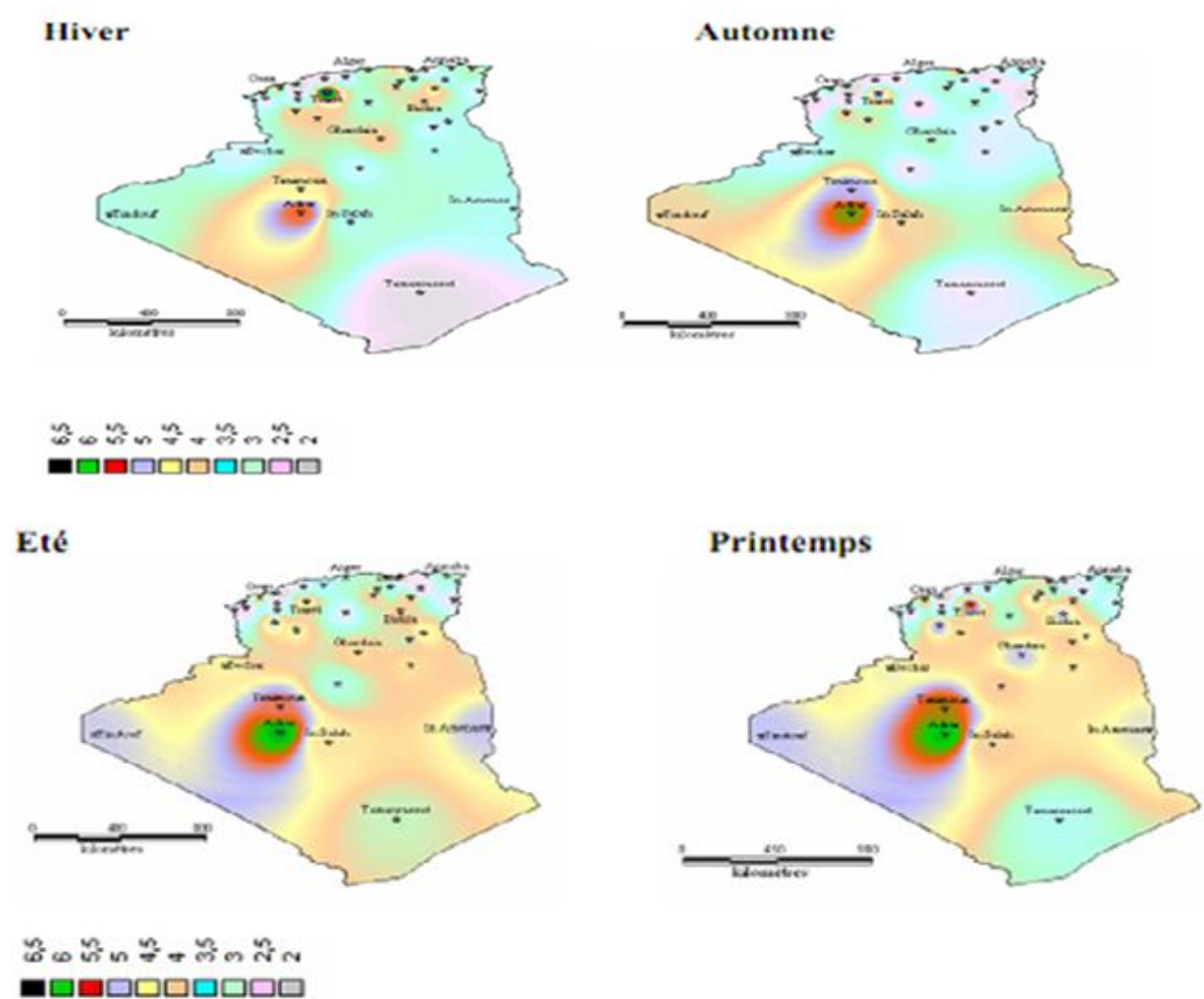


Figure I-5: Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol.

(Automne, Hiver, Printemps et Eté).[11][12]

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (Sud-Ouest), a été confiée le 21/01/2010 au groupe Français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ[7].

I.5- Principaux composants d'une éolienne :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré dans la figure I-6. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques et automatiques [3].

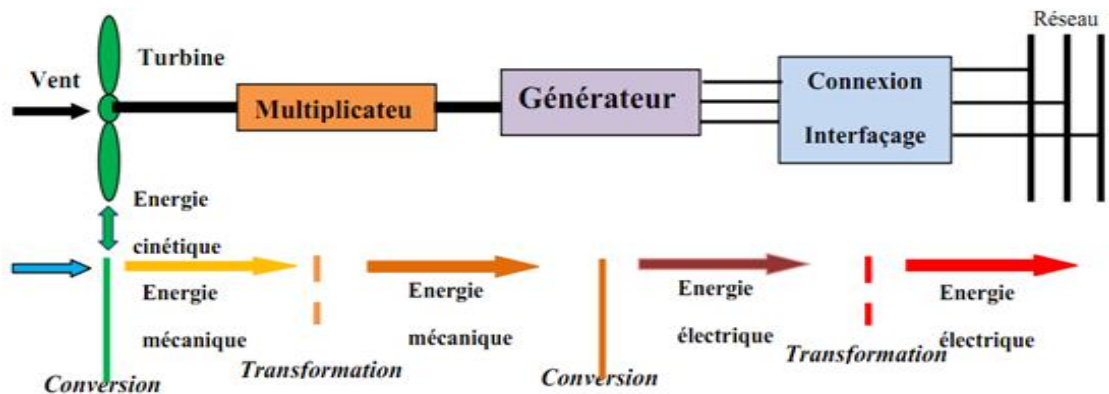


Figure I-6: Principe de la conversion de l'énergie éolienne.

I.6- Fonctionnement d'une éolienne :

Le principe de fonctionnement des éoliennes a été largement présenté ces dernières années dans plusieurs travaux [13][14][10][15].

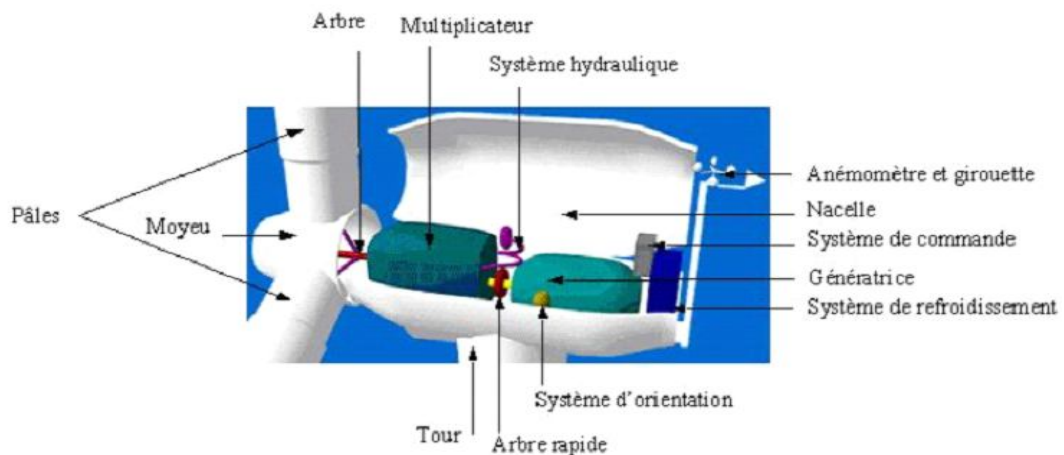


Figure I-7: L'éolienne à l'intérieur.

A la hauteur de la nacelle, 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 qu'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[13][14].

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 (figure I-7).

Les éoliennes sont classées selon leurs puissances nominales, où chaque type a sa propre utilisation :

- Eoliennes de petite puissance : Inférieure à 40 KW. Elles sont utilisées hors réseau dans des sites non interconnectés, soit pour chargement de batteries soit pour pompage d'eau.
- Eoliennes de moyenne puissance : De 40 à quelques centaines de KW. Elles sont utilisées dans des réseaux isolés, avec des systèmes hybrides éolien-diesel pour réduire les couts des productions dans les régions éloignées.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1MW. Elles sont connectées au réseau central qui peut être constitué de plusieurs machines.

I.7- Taille des aérogénérateurs :

Les chercheurs ont eu l'idée que pour exploiter le mieux possible la force du vent, il faut que l'hélice balaie la surface où le vent est maximum, c'est-à-dire le plus haut possible du sol, ce qui demande aux constructeurs des hélices hautes perchées, donc de grands diamètres.[16][15]

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante pour un vent donné. Actuellement la gamme des éoliennes disponibles sur le marché des éoliennes est très large, de 50 Watt (diamètre de 90Cm) à 5 MW et plus (+ de 124 m de diamètre). Les perspectives de l'avenir sont représentées dans la figure I-8.

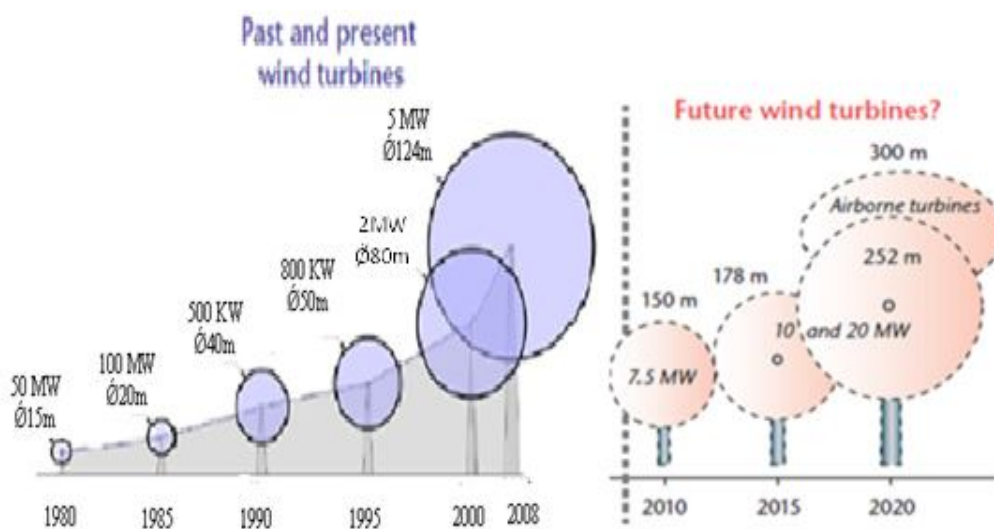


Figure I-8: Taille des hélices en m et puissances en KW. [3]

I.8- Efforts sur une pale : [3][17][1][18]

La figure I-9 illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse V du fait de la rotation. La pale est soumise en plus du vent incident de vitesse V à un vent relatif U dirigé dans le sens contraire de rotation de la turbine. La vitesse de ce vent relatif est donnée par :

$$U = r \cdot \Omega_T \quad (1.1)$$

Où, r : est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en m

Ω_T : est la vitesse de rotation de la turbine en rd/s.

La composition de vitesses de ces deux vents, incident V et relatif U donne la vitesse du vent réel $V_{\text{réel}}$ auquel est soumise la pale.

$$\vec{V}_{\text{rel}} = \vec{V} + \vec{U} \quad (1.2)$$

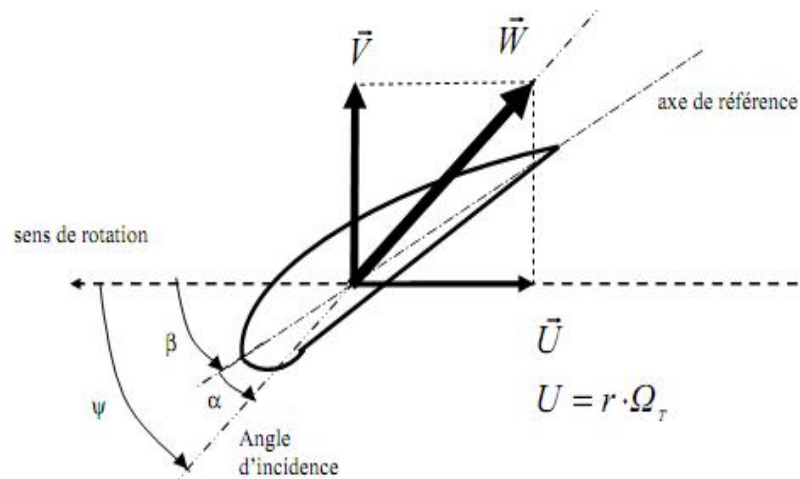


Figure I-9: Directions du vent sur un tronçon de pale.

La vitesse résultante du vent «apparent» \vec{W} fait un angle d'attaque ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit:

$$\psi = \arctan\left(\frac{V}{U}\right) \quad (1.3)$$

On introduit alors l'angle d'incidence, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent:

$$\alpha = \psi - \beta \quad (1.4)$$

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de la pale de largeur dr et de longueur de corde l à une distance r de l'axe de rotation, une force résultante \vec{dF} :

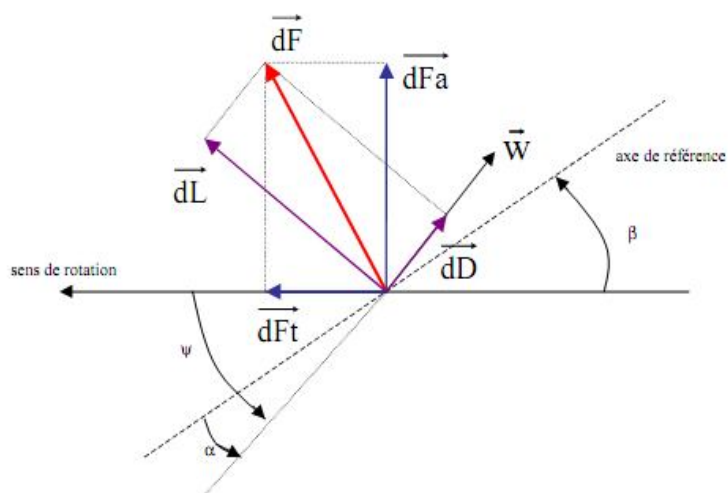


Figure I-10: Forces appliquées sur un élément de pale.

On peut décomposer la force résultante \overline{dF} de la manière suivante :

- ❖ la portance \overline{dL} , normale à la direction du vent apparent.
- ❖ la force de traînée \overline{dD} , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- ❖ la poussée axiale \overline{dF}_a , perpendiculaire au plan de rotation.
- ❖ la poussée tangentielle \overline{dF}_t , dans la direction de rotation.

On déduit

aisément

les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée à partir du schéma précédent :

$$\overline{dF}_t = \overline{dL} \cdot \sin(\psi) - \overline{dD} \cdot \cos(\psi) \quad (1.5)$$

$$\overline{dF}_a = \overline{dL} \cdot \cos(\psi) + \overline{dD} \cdot \sin(\psi) \quad (1.6)$$

C'est le couple résultant de l'ensemble des forces tangentielles qui provoque la rotation de la roue.

Les

modules des forces \overline{dL} et \overline{dD}

s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance C_L et le coefficient de traînée C_D :

$$dL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot dA \cdot C_L \quad (1.7)$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot dA \cdot C_D \quad (1.8)$$

Avec :

- ✓ $dA = l(r) \cdot dr$: surface du « tronçon » de la pale ;
- ✓ $l(r)$: longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation ;
- ✓ C_L : coefficient de portance (sans dimension) ;
- ✓ C_D : coefficient de traînée (sans dimension) ;
- ✓ w : module du vent apparent.

Ces coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α (figure I-11). Pour des angles α faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler.

Ici, elle «aspire» la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point, puis l'écoulement devient turbulent. Du coup, la portance résultante de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique.

Cependant,

les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles α importants.

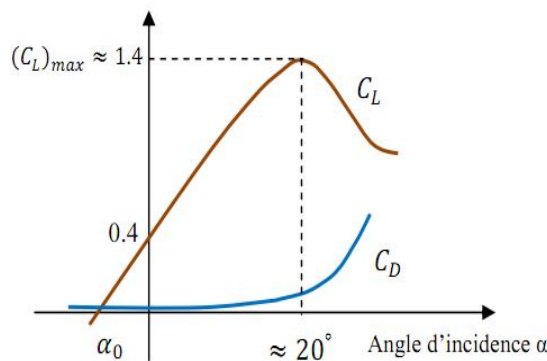


Figure I-11: Evolution des coefficients de portance C_L et de traînée C_D .

L'intégration

le long des N_p pales (généralement $N_p=3$) des couples élémentaires exercés sur chaque « tronçon »:

$$d\Gamma_t = N_p \cdot r \cdot dF_t \quad (1.9)$$

Permet d'obtenir après calcul le couple Γ_T puis l'expression de la puissance captée par:

$$P_T = \Gamma_T \cdot \Omega_T \quad (1.10)$$

I.9 - Contrôle de la puissance :

Comme nous venons de le voir dans le paragraphe précédent, le couple éolien est en fonction du carré de la vitesse du vent sur laquelle nous n'avons aucune action, mais aussi il est fonction de l'angle d'incidence α que nous pouvons modifier sa valeur. Le contrôle de puissance peut se faire donc à chacun des deux niveaux de conversion de l'énergie et de différentes manières suivant les conditions de fonctionnement :

- ✚ Au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance convertie pour les vents forts. Plusieurs méthodes sont utilisées ;
- ✚ Au niveau du générateur, en particulier pour les structures à vitesses variables, ce qui permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

Le système de contrôle d'un générateur éolien peut par ailleurs être séparé en trois niveaux fonctionnels essentiels [19] [1]:

- ✚ Le système de contrôle des grandeurs physiques. Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement des grandeurs autour des valeurs de consignes délivrées par le niveau de commande supérieur;
- ✚ Le système de gestion et d'élaboration des lois de consignes et de gestion des protections;
- ✚ Le système de gestion de l'ensemble dans un parc éolien. C'est le niveau de contrôle supérieur qui gère un certain nombre d'éoliennes en fonction de la demande provenant des contraintes d'utilisation du réseau électrique.

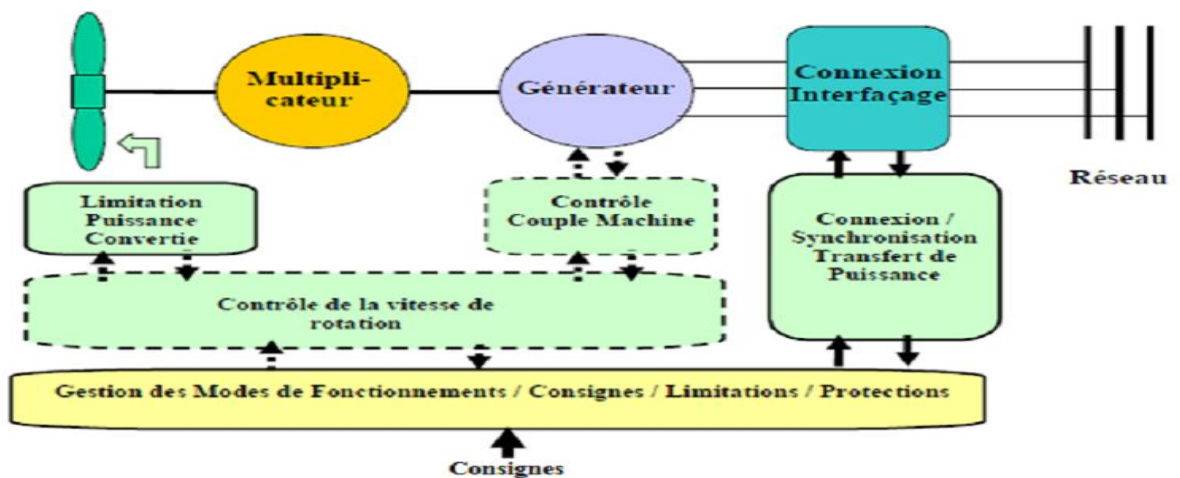


Figure I-12: Structure générale de contrôle d'un système éolien. [17][1]

I.10 - Méthodes de contrôle de l'aéroturbine :

Il est clair qu'à certain moment pour des vents forts, il faut limiter la puissance convertie par la turbine afin d'empêcher sa destruction. Le réglage de la puissance captée par la turbine se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend principalement de l'angle d'incidence α . La figure ci-dessous illustre les différentes techniques utilisées pour le contrôle des turbines éoliennes.

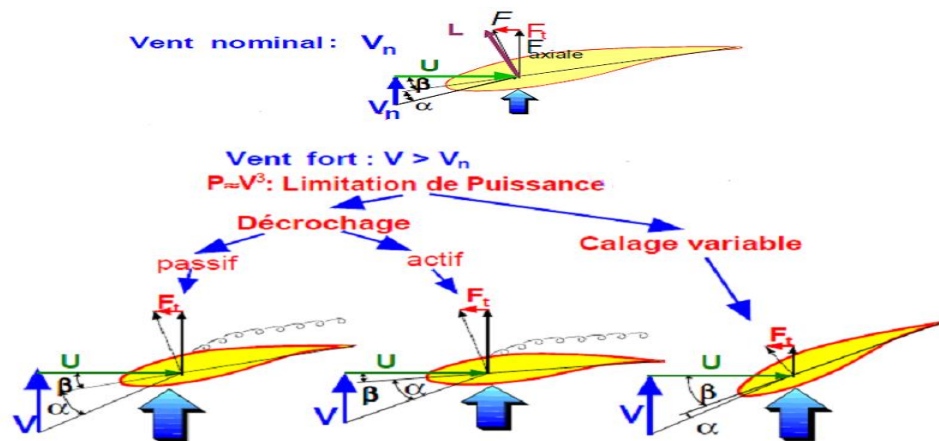


Figure I-13: Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine.

Il existe trois méthodes de contrôle qui sont décrites sur la figure I-13. Elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais certaines peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine [17][3].

I.10.1 - Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall) :

Cette technique est la forme la plus simple de commande de puissance des aéroturbines [20]. L'angle de calage β est fixe, alors que l'angle d'incidence α augmente naturellement avec la vitesse du vent incident (figure I-14). Cette augmentation provoque un accroissement de la trainée et un décrochage progressif de la pale apparaît si la vitesse de rotation est pratiquement constante [17][1].

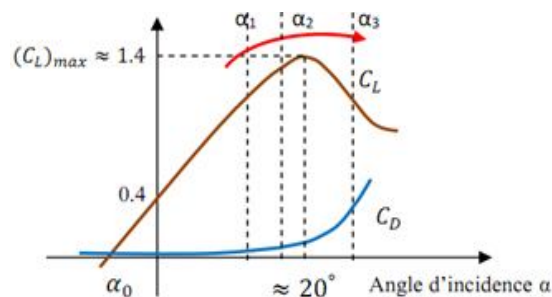


Figure I-14: Décrochage aérodynamique passif.

Ce concept simple et robuste ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine pour s'assurer, qu'à une certaine vitesse du vent, l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée [17]. En plus il faut disposer de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine en cas de panne empêchant la transmission de la puissance générée au réseau électrique.

I.10.2 - Contrôle par décrochage aérodynamique actif :

Cette technique, appelée aussi décrochage par calage négatif des pales (negative-pitch control), est basée sur le même principe que le décrochage actif, mais dans ce cas le décrochage est assuré en diminuant légèrement l'angle de calage β pour augmenter l'angle d'incidence α . Ainsi, le décrochage peut être légèrement avancé ou retardé (figure I-15).

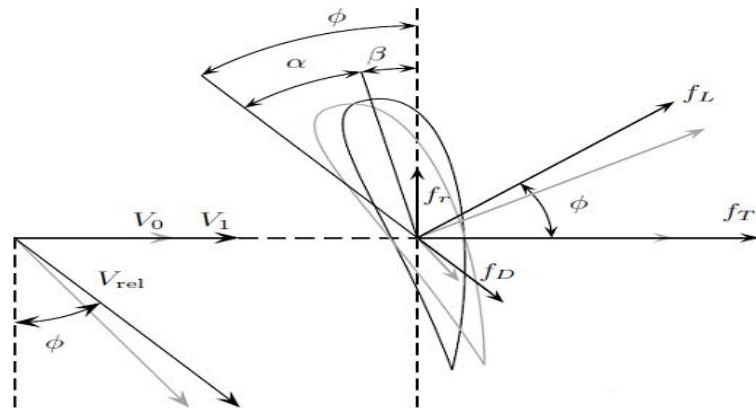


Figure I-15: Principe du décrochage aérodynamique actif.

Comme pour le décrochage passif, l'utilisation de la technique du décrochage actif nécessite une grande précision sur la géométrie et la vitesse de rotation de la turbine pour assurer le décrochage à une vitesse de vent voulue. En plus, il est nécessaire d'ajouter un système électrique ou hydraulique pour orienter les pales lorsque la vitesse de rotation nominale de la machine sera atteinte.

I.10.3 - Contrôle par angle de calage variable des pales (pitch control) :

Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales β , donc l'angle d'incidence α , de quelques dizaines de degrés en fonction de la vitesse du vent. Ainsi, les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales seront réduites (figure I-16), tout en maintenant un couple pratiquement constant qu'on peut l'annuler par mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$). La puissance est donc bien limitée [17][20].

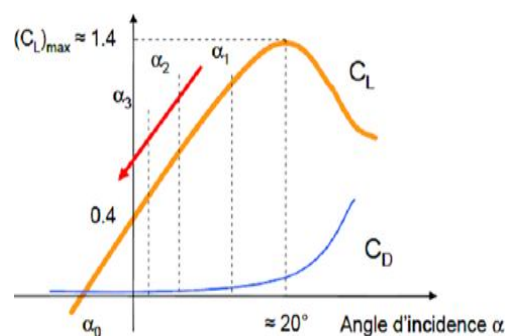


Figure I-16: Décrochage par contrôle de l'angle de calage β .

La diminution de l'angle d'incidence α jusqu'à une valeur nulle ou négative réduit considérablement et de manière efficace, tous les efforts sur les pales et la tour de l'éolienne (pratiquement nulle en position de drapeau). Rappelant que ces efforts doivent être supportés par les turbines à décrochage aérodynamique. Cet avantage majeur est une raison suffisante pour que cette technique soit la plus utilisée à nos jours[1].

I.10.4 - Zones de fonctionnement :

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent:

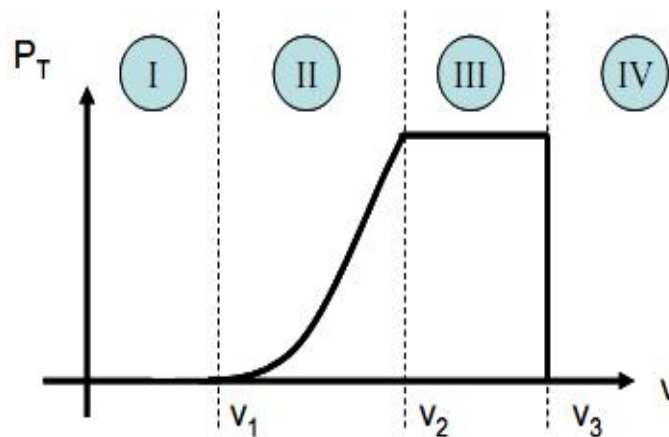


Figure I-17: Zones de fonctionnement d'une éolienne.

- ✓ V_1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
- ✓ V_2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.
- ✓ V_3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout des pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.
 - ❖ Zone I : $V < V_1$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

- ❖ Zone II : $V_1 < V < V_2$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle (C_p).
- ❖ Zone III : $V_2 < V < V_3$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (P_C).
- ❖ Zone IV : $V > V_3$: La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.[17][3]

I.11- Différents types d'éoliennes :

La classification des éoliennes peut se faire selon d'autres critères qui influencent beaucoup le procédé de conversion et qui aboutissent à des éoliennes totalement différentes que ce soit au niveau de la conception mécanique (axe horizontal ou vertical) ou leur technologie (vitesse fixe ou variable) pour la connexion au réseau[2][15].

I.11.1- Selon la conception mécanique :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. Bien qu'il existe des turbines à axe vertical (Darrieus, Savonius...), les machines à axe horizontal dominent très largement le marché de petites puissances (quelques W aux plus élevées, quelques MW).

I.11.1.1- Eolienne à axe vertical :

Le principe est identique à celui des roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation de la turbine. Le développement de ces éoliennes est fortement limité par rapport aux éoliennes à axes horizontaux, du fait de leur faible efficacité énergétique ainsi que leur implantation qui occupe une superficie importante. Aussi leur guidage est difficile, du fait que le palier supporte le poids de l'ensemble de la turbine [15].

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[21][22]. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol.

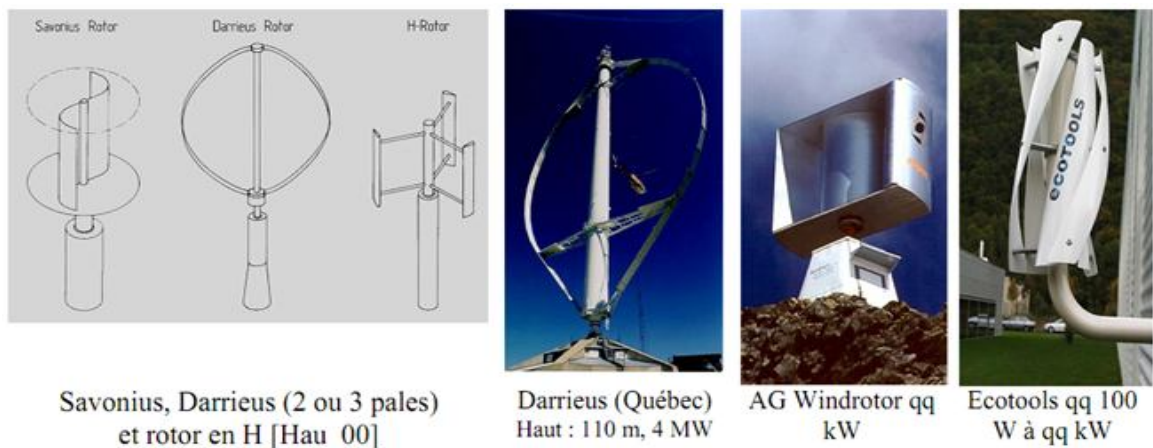


Figure I-18: technologies d'éoliennes à axe vertical.

I.11.1.2 - Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière, des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé, car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [2][16][7]

La caractéristique de puissance $C_p(\lambda)$ dépend principalement du nombre de pales et des propriétés aérodynamiques de la voilure[23].



Figure I-19: technologies d'éoliennes à axe horizontal.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (figure I-20):

- ❖ **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- ❖ **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée, car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances (pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité). Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.[24]

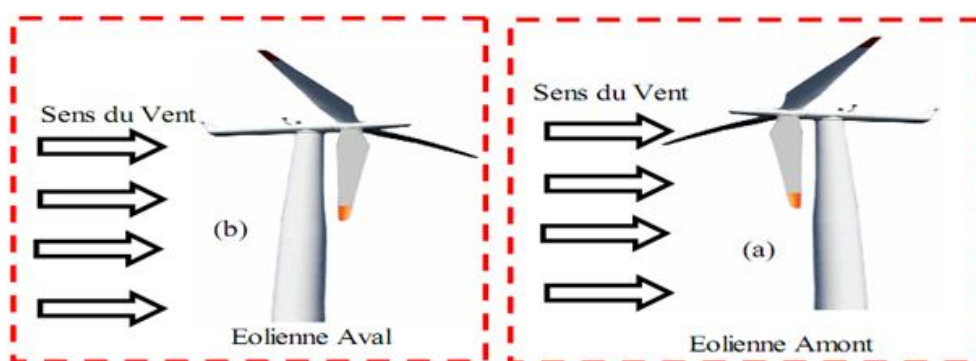


Figure I-20: Eoliennes en amont et en aval.[25]

I.11.2 - Selon la technologie :

Il s'agit de différents types de machines électriques utilisées. On distingue deux grandes familles : les éoliennes à vitesse fixe et celle à vitesse variable.

Le Tableau I-1 illustre un comparatif simple entre les différents fonctionnements.

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simplicité du système électrique ✓ Plus grande fiabilité ✓ Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. ✓ Moins cher. ✓ Fonctionnement a vitesse variable 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du rendement énergétique ✓ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. ✓ Réduction des efforts subis par le train de puissance.

(±30% de la vitesse nominale)	✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
-------------------------------	--

Tableau I-1: Comparatif Vitesse fixe et variable.[18]

I.11.2.1 - Système à vitesse fixe – Machine asynchrone à cage : structure MAS

Nous avons vu précédemment que la méthode de contrôle de puissance la plus simple au niveau de la turbine est le décrochage passif, qui nécessite pour bien agir une vitesse de rotation constante. Des systèmes éoliens se caractérisant par une vitesse de rotation pratiquement constante, indépendamment de la vitesse du vent, ont donc été développés [17][26]. Ils mettent en œuvre essentiellement des générateurs asynchrones tournant en hypersynchronisme à la vitesse $\omega_{sync}(1-g)$, où g est le glissement de la machine ($g < 0$ dans ce cas). La variation reste très faible, puisque le glissement nominal d'une génératrice asynchrone de 1.5 MW est de l'ordre de 1%. Pour des raisons d'encombrement et de prix de revient, la machine, standard, est le plus souvent dimensionnée pour une vitesse nominale de 1500 tours/min, ce qui impose la présence d'un multiplicateur de vitesse avec un rapport élevé de 30 à 100 environ suivant les puissances.

On qualifie également de systèmes éoliens à vitesse fixe, les systèmes comportant une machine asynchrone à deux enroulements statoriques avec nombre de pôles différents (généralement 4 et 6), l'un étant utilisé pour les faibles vitesses de vent (faible puissance) et l'autre pour les plus fortes vitesses de vent (forte puissance). C'est le cas pour les constructeurs danois NEG MICON, BONUS et NORDEX [17].

Structure du système :

Cette structure est communément appelée le concept danois. Elle est simple et robuste.

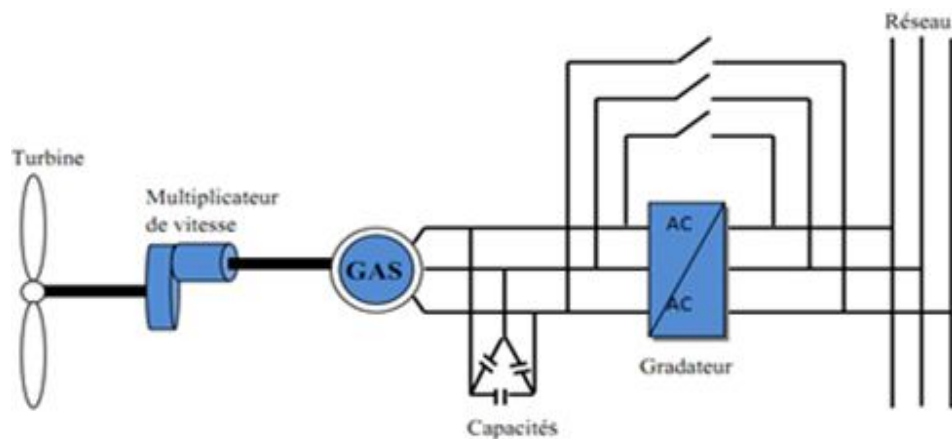


Figure I-21: Génératrice asynchrone GAS à cage (souvent à deux enroulements statoriques 4 et 6 Pôles avec multiplicateur et connexion directe au réseau).[3]

On peut noter la présence du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice et celle éventuelle d'un système de contrôle de l'angle de calage des pales. On note également la présence d'un convertisseur qui est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine ce qui détériore le facteur de puissance globale du réseau utilisé de façon temporaire pour le couplage et non l'interfaçage de la génératrice [17].

I.11.2.2 - Systèmes à vitesse variable :

Dessystèmes éoliens, à vitessederotationvariable, vontpermettre d'optimiser les conditions defonctionnementdelaturbine.

Trois structures différentes sontproposées :

- ✚ La première est l'utilisation d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance permettant le fonctionnement à vitesse variable;
- ✚ La deuxième utilise une machine synchrone à rotor bobiné ou à aimant ;
- ✚ La troisième est l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée au rotor par un convertisseur électronique [15].

I.11.2.2.a - Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage :

La figure I-22 montre la structure concernée.

Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que

peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée[2][15].

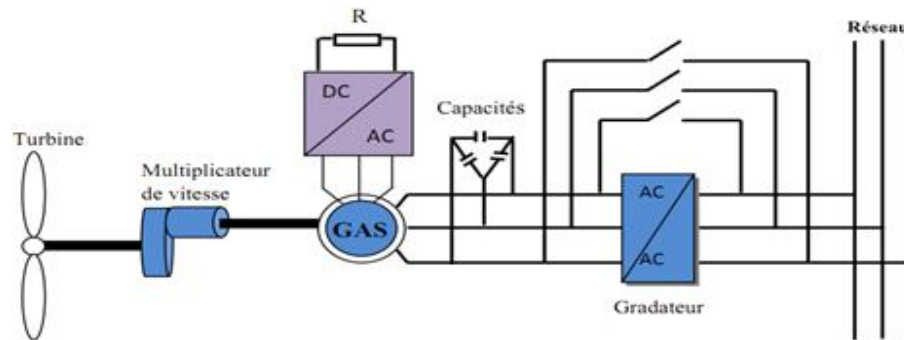


Figure I-22: Génératrice asynchrone GAS à bague directement connectée au réseau
Et contrôle électronique de glissement. [3]

De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations de tension importantes, qui peuvent réduire leur durée de vie [2][17]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

I.11.2.2.b - Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone :

Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone, représentent une alternative significative aux génératrices asynchrones à rotor bobiné nécessitant des bagues et des balais, ainsi des multiplicateurs surtout dans les projets offshore qui induisent un coût élevé de maintenance.

Elles sont développées en utilisant des machines à aimant à grand nombre de paires de pôles couplées directement à la turbine, éliminant à la fois le système de bagues, de balais et le multiplicateur, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes.

Leurs inconvénients se résument du fait que l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent. Ainsi le coût de l'interface électronique est important du fait qu'elle est dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice (figure I-23).

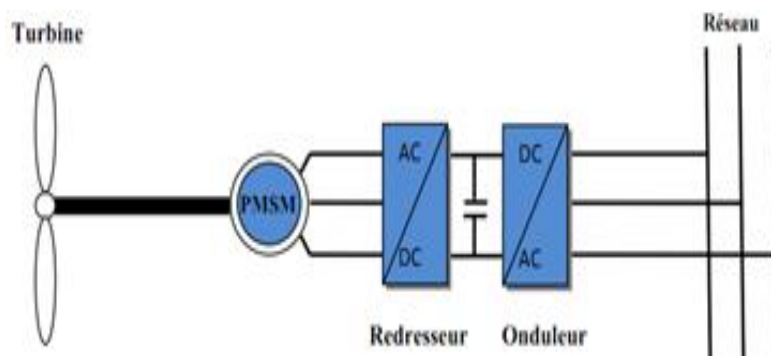


Figure I-23: Génératrice Synchronique GS à attaque directe à excitation bobinée
Sans balai ou à aimant.[3]

I.11.2.2.c - Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation :

C'est une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes.

La structure (Figure I-24) dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur électronique fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor[22].

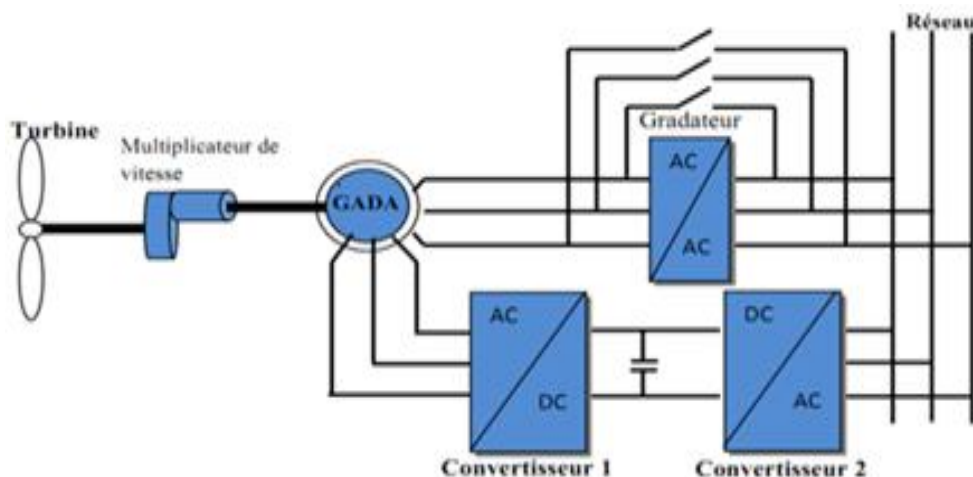


Figure I-24: Génératrice Asynchrone GAS avec multiplicateur à variation de vitesse par le rotor.[3]

On peut citer parmi les avantages de ce système :

- ✓ Sa capacité de commander la puissance réactive, et de cette façon de découpler la commande des puissances active et réactive ;
- ✓ Il peut se magnétiser à partir du rotor, sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire;
- ✓ Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension ;
- ✓ La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

I.12 - Synthèse des différents types d'éoliennes :

Nous résumons dans le tableau I-2 les avantages et les inconvénients de chaque type

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Machinestandard ▪ Robuste ▪ Faiblecoût ▪ Pasd'EPpourl'interfaçage 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puissanceextraitenonoptimisée ▪ Maintenanceboîtedevitesse ▪ Pas de gestion de l'énergie réactive pargénérateur ▪ Magnétisation de la machine non gérée

<p>GADA</p> <p>Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à vitesse variable ▪ Puissance extraite optimisée ▪ Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ▪ Machine standard ▪ Connexion de la machine plus facile à gérer ▪ Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maintenance boite de vitesse ▪ Prix de l'électronique de puissance. ▪ Contrôle – commande complexe ▪ Contact glissant bagues – Balais
<p>MSAP</p> <p>Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse ▪ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. ▪ Connexion de la machine facile à gérer ▪ Possibilité d'absence de boite de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prix de l'électronique de puissance ▪ Machine spécifique ▪ Grand diamètre de machine ▪ Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

Tableau I-2: Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes.[27]

I.13 - Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne : [28][29]

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

I.13.1 – Avantages :

L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.

- Bien que ne puissions pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂,etc...
- C'est une énergie renouvelable propre, et inépuisable.
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie en permanence même lorsqu'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percés technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût

d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

I.13.2 – Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
- 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 un gêne, même proche des machines (50-60dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.
- 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 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.
- Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.14 – Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une brève description du domaine des énergies renouvelables en se basant sur la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits.

Ensuite nous avons présenté les différentes techniques utilisées pour le contrôle des turbines éoliennes, ainsi que les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Enfin nous avons présenté les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien que ce soit les machines asynchrones à cage ou à rotor bobiné et les machines synchrones à rotor bobiné ou à aimants permanents.

CHAPITRE II
CONCEPTION ET SIMULATION
DE L'ÉMULATEUR

II.1– Introduction :

La modélisation d'un système est une étape essentielle pour la compréhension de son fonctionnement afin d'élaborer des stratégies de commande adéquates. Pour simuler le fonctionnement de ce système, ou encore, pour étudier sa commande en régime transitoire ou en régime permanent, il faut choisir un modèle aussi simple que possible mais qui représente fidèlement l'évolution des grandeurs caractéristiques de la machine[7].

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales. Le vent étant par nature imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne.

Ce chapitre est un préalable à l'étude de machines fonctionnant à vitesse variable. Il présente la synthèse de la commande d'une machine à courant continu en vue de reproduire le comportement d'une éolienne à vitesse variable. A partir d'une reproduction des variations du vent, un modèle simple d'une éolienne de 10 KW est établi en utilisant les équations classiques du Chapitre 1. Le couple ainsi généré est appliqué en référence à la machine à courant continu[2].

II.2 - Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal est composée de trois éléments essentiels (figure: II-1) :

- ❖ La tour ou le mât ;
- ❖ Le rotor ;
- ❖ La nacelle : Son rôle est d'abriter les composants transformant l'énergie mécanique en énergie électrique notamment le générateur.

Dans la suite de ce paragraphe nous présenterons les différents composants d'une éolienne.

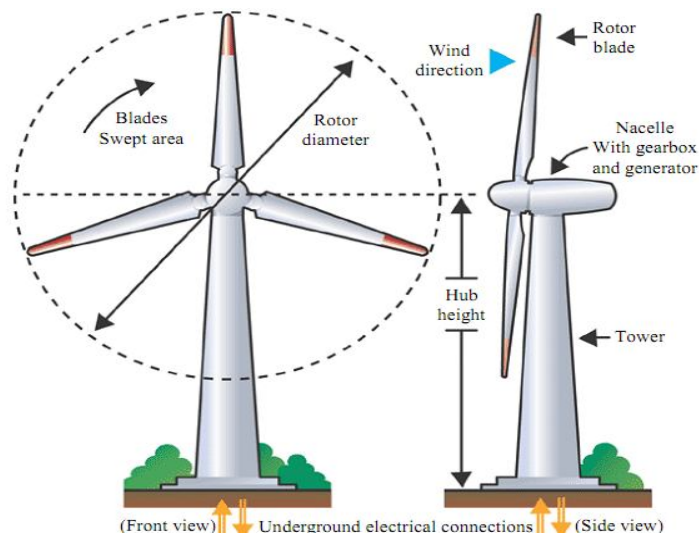


Figure II-1: Composants d'une éolienne.[18]

✚ Le mat :

C'est un élément porteur en forme de tour cylindrique en acier supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. D'une hauteur comprise entre 60 et 100 mètres, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques deraccordement au réseau[28][25].



Pylône tubulaire

Pylône en treillis. Mât haubané.

Figure II-2: Les différents types des Mâts. [18][16]

✚ La nacelle :

La nacelle est située en haut de la tour, elle comporte toute l'installation permettant la production d'électricité: le multiplicateur, les outils de mesure du vent, le (ou les) générateur(s), le système de refroidissement, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne[25].

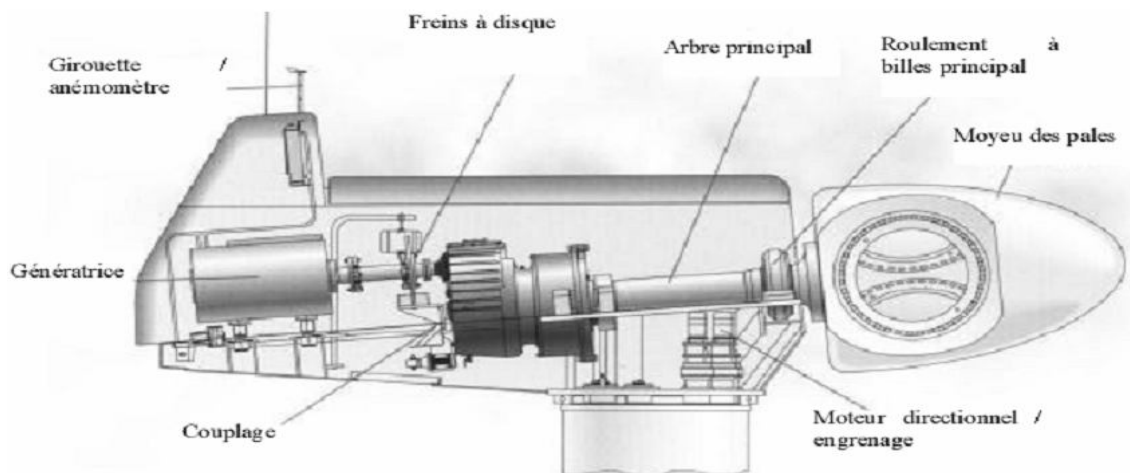


Figure II-3: Constitution d'une nacelle.[28][14][30][31]

Les différents composants d'une nacelle[13][4][7]:

✚ **Le moyeu :**

Le moyeu est une pièce en acier moulé, Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle.

✚ **Les pales :**

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. Leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m). Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor.

De leur nature dépendront le bonfonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien.

Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations.

Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- ✓ la longueur ;
- ✓ la largeur ;
- ✓ le profil ;
- ✓ les matériaux ;
- ✓ le nombre.

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat[25][4].

➤ **Longueur :**

Le diamètre de l'hélice est en fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour

limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

➤ **Largeur :**

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

➤ **Le profil :**

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (100 KW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

➤ **Les matériaux :**

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté, mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- ❖ **Le bois :** il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et il est réservé pour des pales assez petites.
- ❖ **Le lamellé-collé :** c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales de 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- ❖ **Les alliages d'aluminium :** pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

- ❖ **Les matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil[4][11].

✚ Le rotor :

Le rotor est constitué de 1 à 3 pales, il est relié à la nacelle par son moyeu. Son rôle est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.



Figure II-4: Rotor de turbine.[28]

✚ La génératrice :

La génératrice est un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être synchrone ou asynchrone.

✚ Le multiplicateur :

Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.

✚ L'arbre de transmission :

Il est composé de deux arbres:

- **L'arbre primaire** : cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20 - 40 tr/min).
- **L'arbre secondaire** : il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tours/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.

✚ Le système de refroidissement :

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre.

✚ Les outils de mesure du vent :

Nous avons deux types: une girouette pour évaluer la direction du vent et un anémomètre pour en mesurer la vitesse.

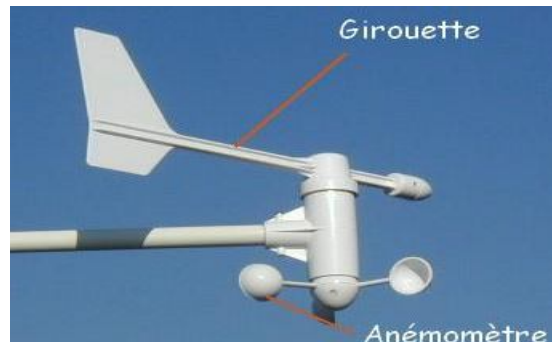


Figure II-5: Les outils de mesure du vent.

✚ Système d'orientation de la nacelle :

Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.

✚ Système de contrôle :

C'est un dispositif qui surveille l'état et le dispositif d'orientation. En cas de défaillance le système stop l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique[25].

II.3 - Modélisation de la chaîne de production éolienne :

II.3.1 - Modélisation du vent :

Le vent est la source de l'énergie éolienne qu'il convient donc de bien connaître. Il résulte de différentes influences qui sont étudiées par les météorologues et climatologues : son énergie provient des différences de rayonnement solaire et de refroidissement entre l'équateur et les pôles. Les variations de température induites créent des zones de basses et hautes pressions entre lesquelles se déplacent les masses d'air. Pour l'application éolienne, la principale étape consiste à connaître localement la nature des vents de l'endroit où l'on souhaite implanter des machines. On détermine ainsi la valeur moyenne du vent, mais aussi le niveau de turbulence, l'amplitude des rafales rencontrées etc... En premier lieu, ces données permettent de définir le potentiel du site ainsi que la nature des éoliennes à utiliser et leur répartition optimale. Mais ces données sont aussi fondamentales pour le fonctionnement de la machine (prévision à court terme, lois de contrôle etc...) ou les aspects « simulation » et « modélisation »[32].

Le principal acteur d'une source d'énergie renouvelable, économique, exploitable avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement, est le vent. Dans le monde entier, les ressources d'énergie éolienne sont pratiquement illimitées. Les récents développements technologiques dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, en électronique de puissance et en commande de machines électriques tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile[21][22].

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent (formule (I.5)).

Mathématiquement, la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent pour la petite éolienne tripale n'est pas prise en compte dans le modèle de la voilure éolienne car elle est réglée par la dérive sur la queue de la turbine.

L'évolution de la vitesse du vent en fonction du temps est modélisée par une fonction analytique ou générée par une loi statistique à partir des données de mesure pour un site donné. Dans un contexte de la modélisation théorique, le profil du vent doit satisfaire 2 critères :

- La durée du profil doit être limitée pour réduire le temps de simulation
- Le profil du vent doit être représentatif des caractéristiques du gisement (intensité, variabilité, distribution statistique...).

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à[23][9][33] :

$$V_{\text{vent}}(t) = 6 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (2.1)$$

L'évolution temporelle du vent est tracée dans la figure II. 28.

II. 3.2 - Modélisation de la turbine éolienne :

II.3.2.1 - Théorie du disque actionneur et limite de Betz:[2][23][13][3][34][5][35]

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



Figure II-6: Répartition des vitesses dans le tube de courant.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure II-6 sur lequel on a représenté la vitesse du V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit

$$\frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.2)$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (2.3)$$

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

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2.4)$$

Soit en remplaçant m par son expression

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (2.5)$$

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

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (2.6)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (2.7)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure II-7), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\frac{16}{27}$ soit 0.59; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, exprimé en fonction de l'angle de l'orientation de la pale β et la vitesse relative λ qui représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V} \quad (2.8)$$

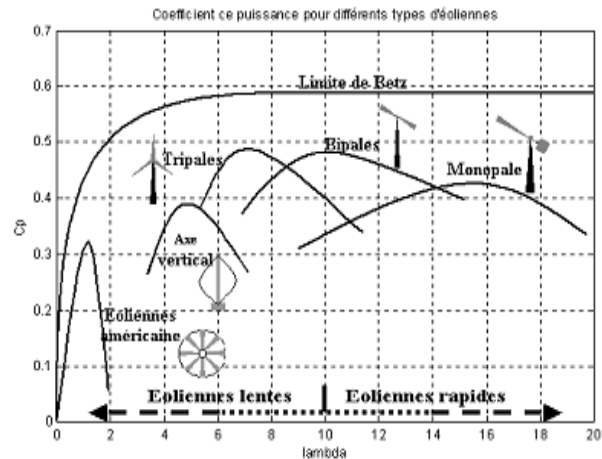
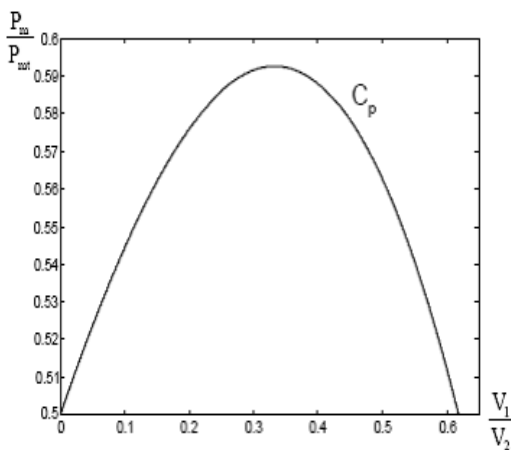


Figure II-7: Coefficient de puissance. Figure II-8: Coefficient de puissance pour différentes éoliennes.[2]

La figure (II-8) donne un aperçu sur les coefficients de puissance (C_p) en fonction de la vitesse réduite (λ) pour différents types d'éoliennes.

Sachant que les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m.

D'après la figure (II-8) on remarque que leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

En ce qui concerne les éoliennes à marche rapide, elles sont les plus utilisées et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus répandues, car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur.

De plus, d'après la figure (II-8) on remarque que leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Ce type d'éolienne fonctionne rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3m/s [25].

II.3.2.2 - Modélisations existantes du coefficient de puissance : [17][26]

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance. Souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière; chaque turbine a un comportement spécifique et les constructeurs sont peuvant bavarder sur leurs propres produits. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance. Néanmoins, l'allure des réseaux de courbes est toujours la même et le handicap de modélisation peut être relevé.

II.3.2.2.a - 1^{er} type de modélisation :

Cette première modélisation propose une expression analytique de la courbe CP (λ , β) en utilisant que 7 paramètres : 3 couples (CP, λ) et une pente (m) en l'un des points. Trois zones sont définies pour cette modélisation:

Zone 1 : $0 \leq \lambda \leq \lambda_p$

$$C_p(\lambda) = A \cdot \lambda^n \cdot e^{\lambda^n \cdot \beta} \quad (2.9)$$

Zone 2 : $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_m$

$$C_p(\lambda) = C(\lambda) \cdot C_{P_p} + D(\lambda) \cdot C_{P_m} + E(\lambda) \cdot (C_{P_p})^n + F(\lambda) \cdot (C_{P_m})^n \quad (2.10)$$

Zone 3 : $\lambda_m \leq \lambda \leq \lambda_0$

$$C_p(\lambda) = G + H \cdot \lambda + I \cdot \lambda^2 \quad (2.11)$$

Ces 3 zones sont définies sur la figure II-9:

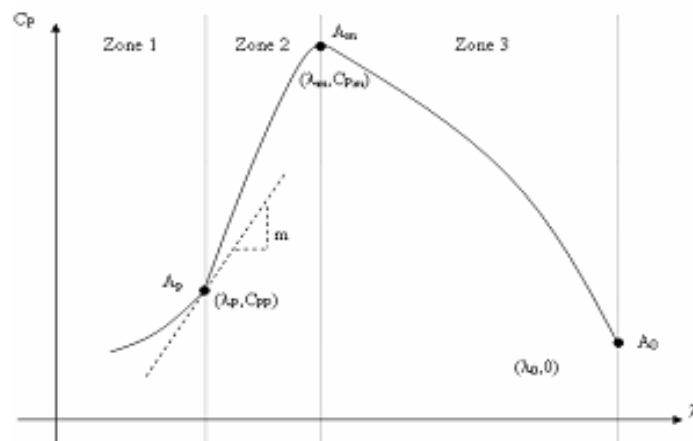


Figure II-9: Paramétrisation de la courbe Cp.

Pour déterminer les paramètres A_p, \dots, I , les conditions suivantes sont imposées:

- ❖ La courbe $C_p(\lambda)$ doit passer par les points $A_p(\lambda_p, C_{p_p}), A_m(\lambda_m, C_{p_m}), A_0(\lambda_0, C_{p_0})$.
- ❖ La courbe $C_p(\lambda)$ doit présenter au point A_p une pente m .
- ❖ La courbe $C_p(\lambda)$ doit présenter au point A_m une pente nulle (au maximum de la courbe)

Le Tableau II-1 donne pour différentes valeurs de β les 7 paramètres nécessaires pour déterminer les courbes $C_p(\lambda, \beta)$.

Ils correspondent à une turbine de 660 KW.

β°	C_p	λ_p	C_{p_m}	λ_m	λ_0	m	N
0	0.20	5	0.44	11	16	0.120	3
1	0.18	5	0.42	12	17	0.108	3
2	0.17	5	0.40	12	18	0.102	3
3	0.16	5	0.38	12	21	0.096	3
5	0.20	5	0.30	8	17	0.120	3
10	0.15	4	0.17	5	10	0.112	3
20	0.02	2	0.08	2.5	4.5	0.030	3
30	0.01	1	0.04	1.75	03	0.030	3

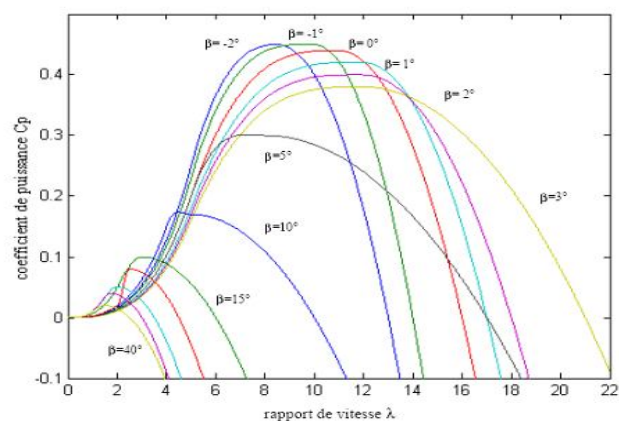


Tableau II-1: Valeurs des 7 paramètres nécessaires pour différentes valeurs de β . Figure II-10: Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents β .

II.3.2.2.b - 2^{ème} type de modélisation :

Cette modélisation al'avantagede seprésentersouslaformed'une seuleéquation, valablequelquesoitl'angledecalageβetlerapportdevitesseλ. L'expression du coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \cdot \frac{1}{\Lambda} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\Lambda}} + C_6 \cdot \lambda \tag{2.12}$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

C1 à C6, coefficientsde la turbine considérée sont consignés dans le tableau suivant :

Coefficient	Valeur
C1	0.5176
C2	116
C3	0.4
C4	5
C5	21
C6	0.068

Tableau II-2: Valeurs des 6

coefficients C1 à C6 de la turbine.

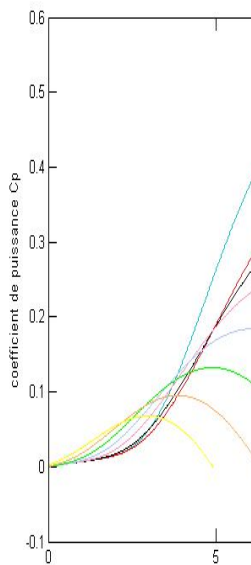


Figure II-11: Coefficient de puissance Cp en fonction de λ pour différents β. [36][1][37][38]

II.3.2.3 - Modélisation de la turbine : [28][14][30][13][4][39][15][40]

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure II-12)

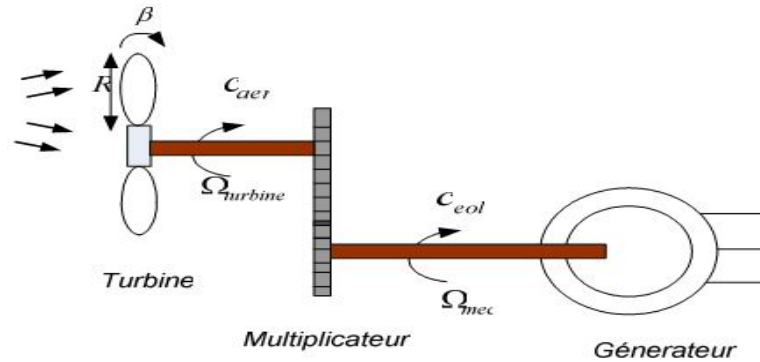


Figure II-12: Schéma de turbine éolienne.

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie comme :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.13)$$

Où:

- ✓ ρ est la densité de l'air ($\sim 1.22 \text{ Kg/m}^3$) à la pression atmosphérique et à une température de 15°C .
- ✓ S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- ✓ v est la vitesse du vent.

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

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.14)$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.15)$$

II.3.2.3.a -Le multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (II-12). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.16)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.17)$$

II.3.2.3.b -Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J turbine et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.18)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.19)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{mec} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.20)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.21)$$

Le schéma de la figure (II-13) illustre les grandeurs qui interviennent au niveau de la turbine. Cettedernière génère le couple aérodynamique (équation 2.15) qui est appliquée au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (équations 2.16 et 2.17).Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées: les couples du multiplicateur et électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme perturbation.

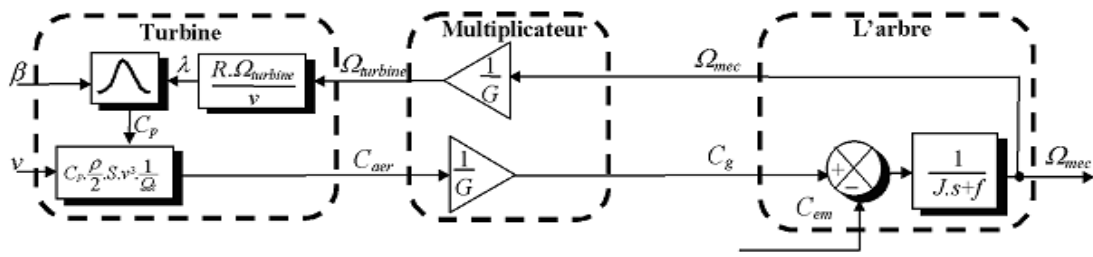


Figure II-13: Schéma bloc du modèle de la turbine.[15][34]

II.4 - Model électrique équivalent :[23]

Le schéma synoptique de l'arbre de transmission de la turbine est donné par la figure II.14. L'équivalence électrique d'un tel système inertiel est montrée sur le schéma de la figure II.15.

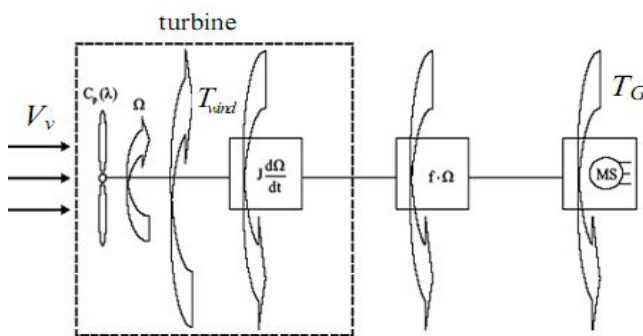


Figure II-14: Schéma bloc d'une turbine éolienne.

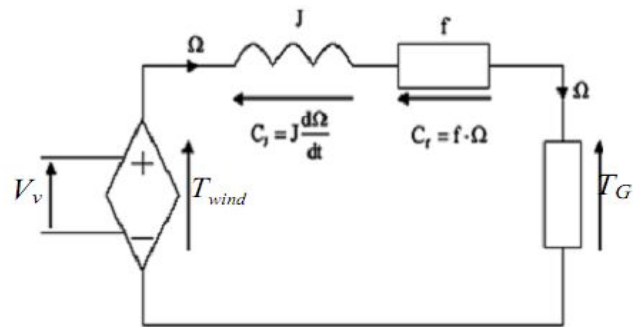


Figure II-15: Schéma électrique équivalent

II.5 -Stratégie d'émulation :

La fonction du moteur à courant continu est d'émuler le comportement aérodynamique et mécanique de l'éolienne. Cela correspond à l'émulation des éléments grisés de la figure II.16 où les principaux composants du système éolien réel sont présentés. Cette partie grisée est donc remplacée par le moteur à courant continu avec sa commande.

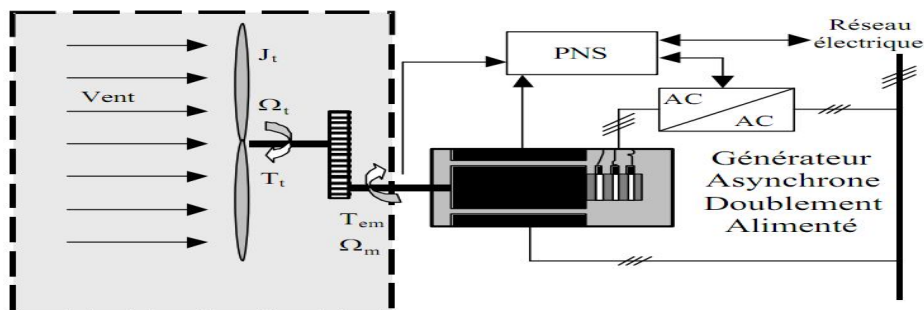


Figure II-16: Partie de la chaîne de conversion à émuler.[41][26][42]

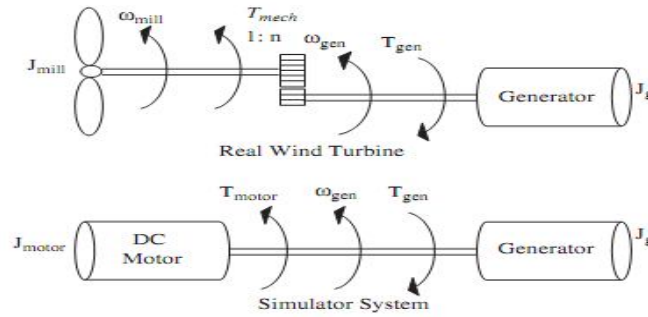


Figure II-17: Turbine réelle et émulateur équivalent.[43][17]

II.5.1 - Modélisation de la machine :[2][26]

Le modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée est donné sur la figure (II.18).

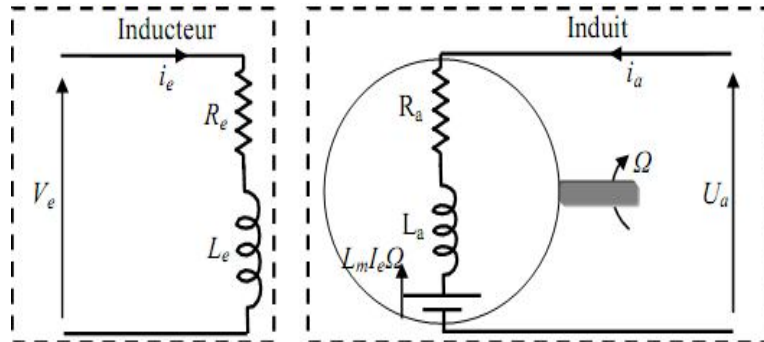


Figure II-18: Modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée.

Les équations régissant le fonctionnement de la machine à courant continu sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 U_a &= R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + L_m \cdot I_e \cdot \Omega \\
 \Gamma_{em} &= \Gamma_r + f_{mcc} \cdot \Omega + J_{mcc} \cdot \frac{d\Omega}{dt} \\
 \Gamma_{em} &= K_c \cdot I_a; \quad K_e = L_m \cdot I_e; \quad K_c = K_e
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Avec : Γ_{em} : couple électromagnétique, L_m : inductance mutuelle inducteur-induit, K_c et K_e , constantes de couple et de f_{em} , Γ_r couple résistant imposé à la machine f_{mcc} et J_{mcc} coefficient de frottements visqueux et moment d'inertie de la machine.

Dans notre cas, la machine est à excitation séparée, le flux créée par le bobinage inducteur est donc constant, on a alors :

$$\Phi_e = L_m \cdot I_e = K_e \tag{2.23}$$

II.5.2 - Alimentation de la MCC avec un hacheur à quatre quadrants :

De nos jours, l'association des hacheurs aux machines à courant continu, est très largement utilisées dans les systèmes d'entraînement électrique. La machine à courant continu est intrinsèquement réversible. Le hacheur à quatre quadrants est lui aussi réversible, car la valeur moyenne de la tension peut être positive ou négative suivant le rapport cyclique imposé, ceci quelque soit le signe de la valeur moyenne du courant.

Le hacheur à quatre quadrants a une structure en "H" et est à commande complémentaire (figure II.19) ce qui permet son fonctionnement dans les "quatre quadrants" du plan vitesse – couple, (figure II.20).

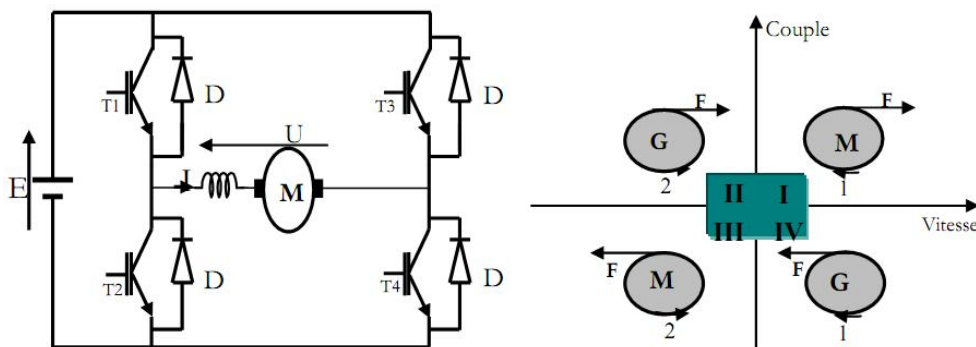


Figure II-19: Schéma d'un hacheur à quatre quadrants. Figure II-20: Fonctionnement de la machine dans les quatre quadrants.

Les principaux modes de fonctionnement sont résumés comme suit :

- ❖ Dans l'intervalle $[0, \alpha T]$: Les deux transistors qui conduisent sont T1 et T4. La tension de sortie du convertisseur dans ce cas est alors: $V = U$.
- ❖ Dans l'intervalle $[\alpha T, T]$: Les deux transistors qui conduisent sont T2 et T3. La tension de sortie du convertisseur dans ce cas est alors : $V = -U$.

La tension moyenne à la sortie de ce convertisseur est alors donnée comme suit :

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E(t) dt - \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T E(t) dt \quad (2.24)$$

On obtient :

$$V_m = (2\alpha - 1) \cdot E \quad (2.25)$$

Les différentes configurations possibles que peut avoir une machine à courant continu associée à un hacheur à quatre quadrants avec la forme de tension et du courant correspondant sont présentées ci-après (figures II.21- II.25).

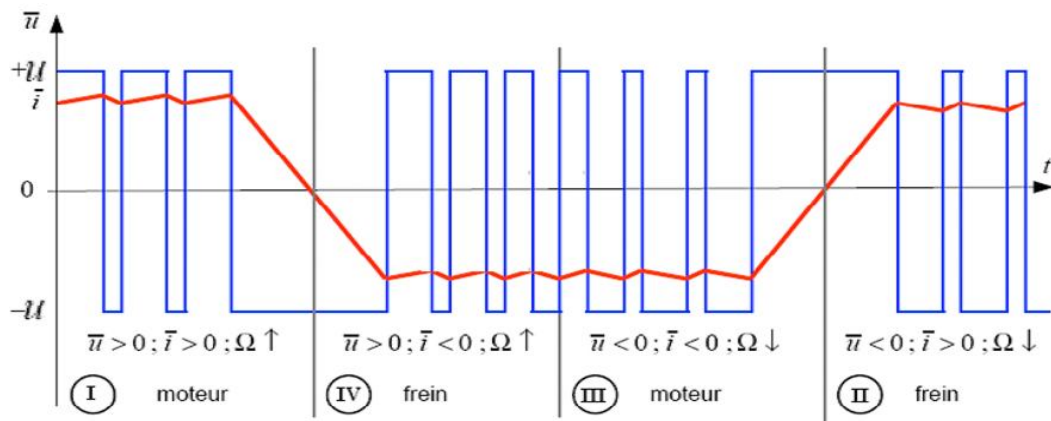
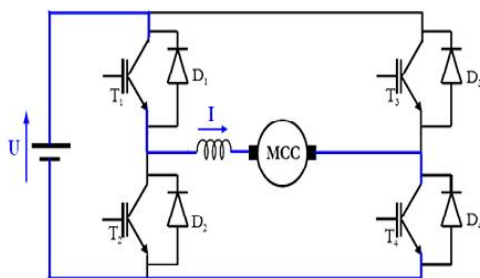


Figure II-21: Formes de tension et de courant de la machine.

Les différentes configurations des interrupteurs du hacheur à quatre quadrants sont les suivantes :

Configuration I:



Configuration II:

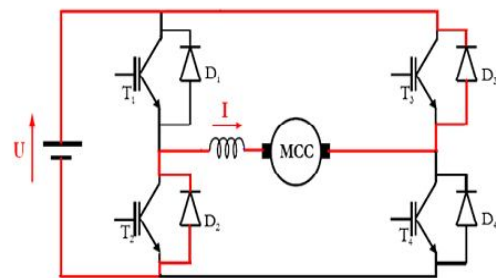
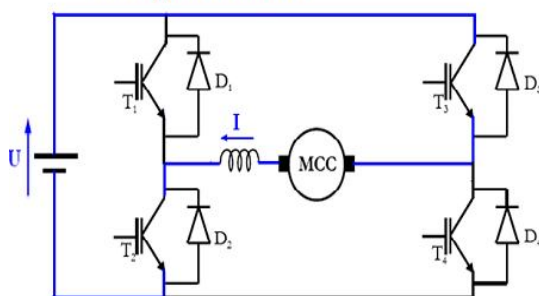


Figure II-22: T1 et T4 conduisent. Figure II-23: D2 et D3 conduisent.

Configuration III:



Configuration IV:

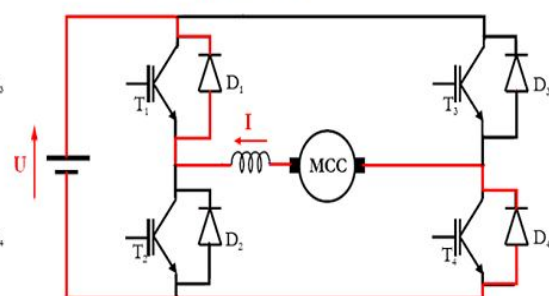


Figure II-24: T2 et T3 conduisent. Figure II-25: D1 et D4 conduisent.

II.6 - Stratégie de commande de la machine :

Deux principaux types de stratégie d'émulation existent. La première consiste à générer la vitesse de rotation Ω_m donnée par le simulateur numérique, et à contrôler le moteur à courant continu en vitesse, en prenant cette vitesse de rotation Ω_m comme référence. Dans cette stratégie

appelée « Model Speed Tracking » ou « Poursuite de la Vitesse du Modèle », la valeur du couple électromagnétique produit par la génératrice (ou la valeur de sa référence) est utilisée par l'émulateur pour générer la valeur de Ω_m . Dans la seconde stratégie, l'émulateur utilise le signal de vitesse de rotation de la machine pour générer une référence de couple pour le moteur à courant continu. Cette seconde stratégie est celle utilisée dans notre travail.

La machine est commandée en couple, le couple de référence C_{ref} à laquelle on souhaite asservir le courant (image du couple) de la machine provient du modèle de l'émulateur donnée précédemment.

Le régulateur utilisé pour cette commande est un régulateur proportionnel intégral, car il est simple et rapide à synthétiser et mettre en œuvre (annexe B).

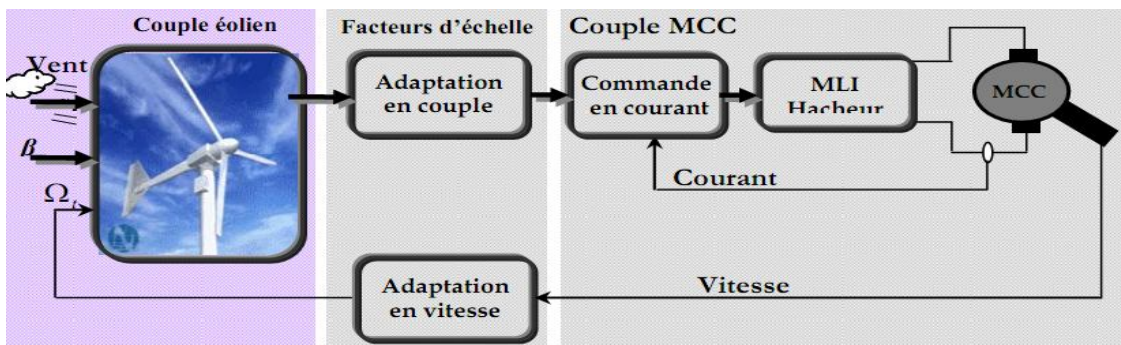


Figure II-26: Pilotage de la machine en couple éolien.[41][26]

Afin de simuler le comportement de la turbine éolienne, il est nécessaire de déterminer le couple que cette dernière exerce sur l'arbre mécanique.

Le couple de la turbine peut alors être obtenu en divisant l'expression de la puissance (2.14) par la vitesse de rotation de l'arbre mécanique Ω_t :

$$C_{em_{mcc}} = \frac{P}{\Omega_t} = \frac{\rho \cdot S \cdot C_p \cdot v^3}{2 \cdot \Omega_t} \quad (2.26)$$

L'expression (2.26) n'est pas satisfaisante dans la mesure où une indétermination du couple $C_{em_{mcc}}$ au démarrage existe: en ce point de fonctionnement, la vitesse Ω_t est nulle, ainsi que le coefficient C_p .

L'introduction du ratio de vitesse λ dans l'équation (2.26) mène à l'écriture (2.27):

$$C_{em_{mcc}} = \frac{\rho \cdot S \cdot C_p \cdot v^2 \cdot R_t}{2 \cdot \lambda} \quad (2.27)$$

Ou encore à l'expression (2.29) en posant :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.28)$$

$$Cem_{mcc} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot C_m \cdot v^2 \quad (2.29)$$

Le schéma bloc de la figure II-27 est introduit afin d'élaborer la consigne du couple électromagnétique permettant de reproduire sur l'arbre mécanique de la MCC le couple d'une turbine éolienne.

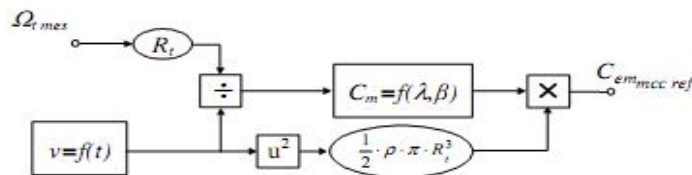


Figure II-27: Schéma bloc implémenté sous Simulink™.

Le bloc $v=f(t)$ est un tableau numérique reprenant des valeurs de vents[44][27][45].

II.7 - Résultats de simulation de l'émulateur :

Après que les variations du vent sont reconstruites, elles sont ensuite appliquées à un modèle d'émulateur de turbine éolienne dont les variations de couple ainsi obtenues sont appliquées en référence à une machine à courant continu et à son régulateur synthétisé.

L'ensemble, modèle de la turbine éolienne associée à une machine à courant continu commandée par un hacheur, a été simulé sous MATLAB/SIMULINK dont les paramètres sont donnés en annexe A.

Un essai de simulation est réalisé pour le modèle du vent donné au moyen de la figure (II.28). Les figures (II.29), (II.30) présentent respectivement l'allure de variation du rapport de vitesse λ (vitesse spécifique) et le coefficient de puissance C_p . Sur la figure (II.30), il s'est avéré que les valeurs du coefficient de puissance n'atteignent pas la valeur théorique maximale déclarée par Betz (0,59).

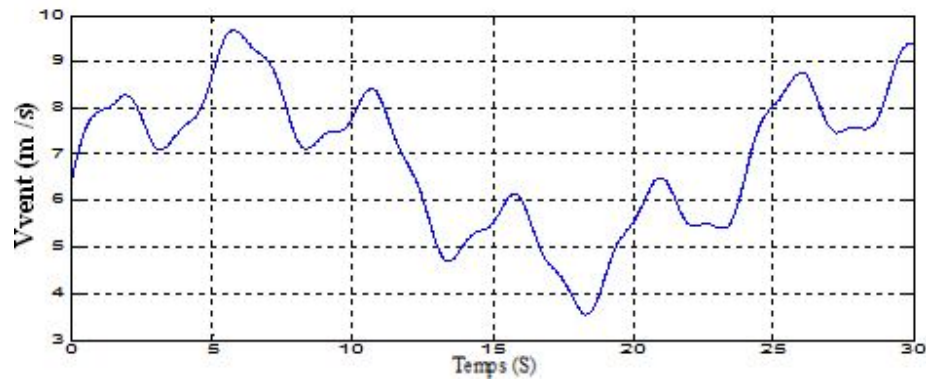


Figure II-28: Profil du vent appliqué.

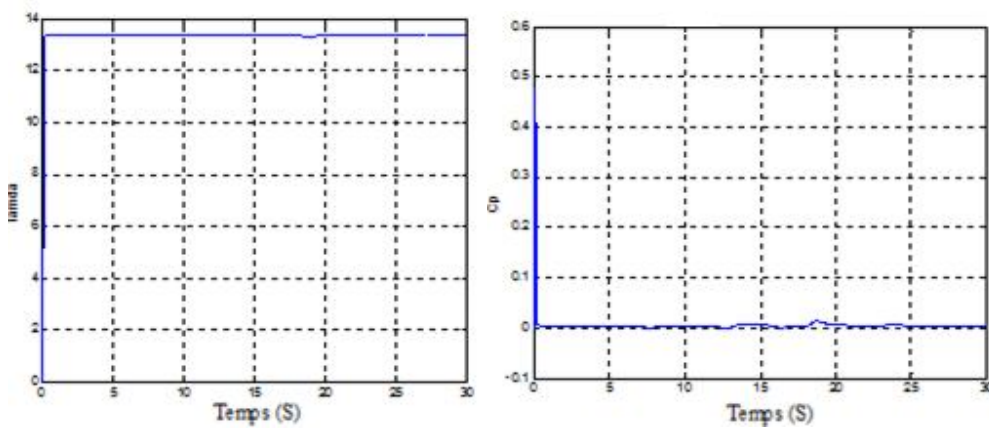
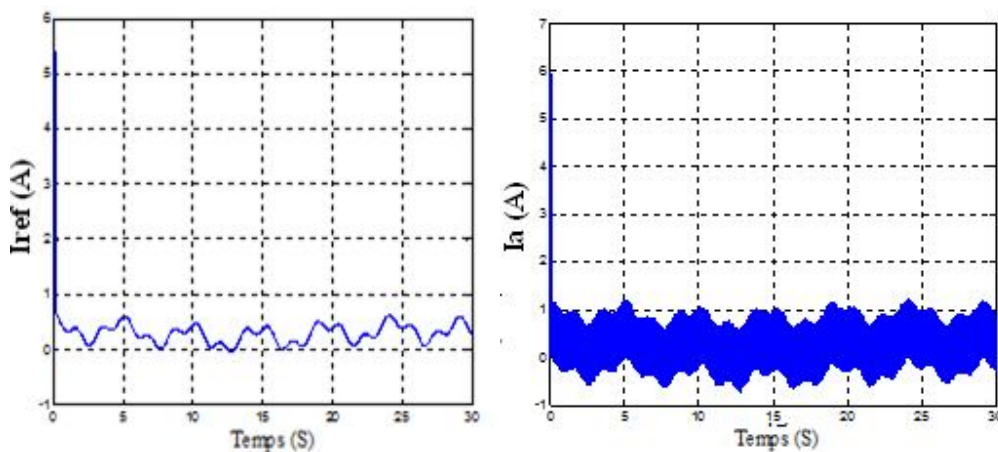


Figure II-29: Variation du coefficient lambda (rapport de vitesse).
 Figure II-30: Variation du coefficient de puissance Cp (λ, β).

Après simulation, on a obtenu les formes du couple de référence, couple de la machine représentée par les deux figures (II.31).



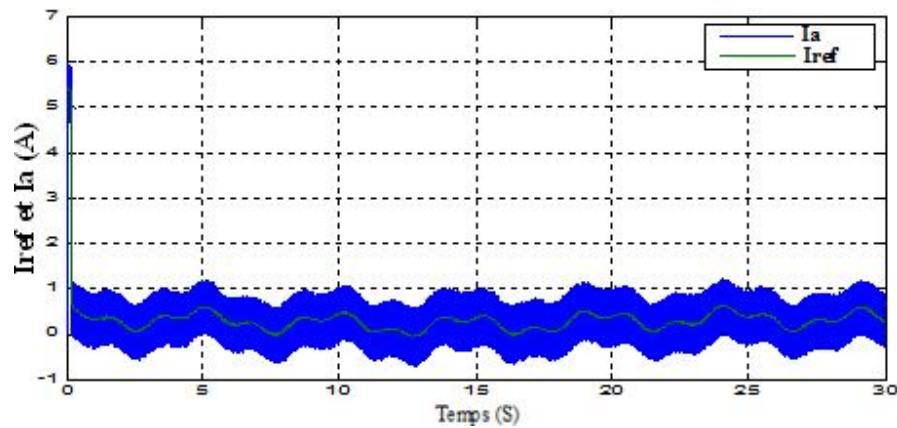


Figure II-31: Allure des courants I_{ref} et I_a

Le relevé du courant de la figure II-31, montre une valeur moyennement faible puisque la machine est à vide, avec toutefois des impulsions importantes correspondant aux brusques variations de vent.

On constate que, le couple mesuré suit très bien les variations du couple de référence qui lui a été imposé par le modèle de la turbine éolienne, ce qui montre l'efficacité du régulateur proportionnel intégral en termes de poursuite de trajectoires.

On a également relevé la forme de la vitesse de rotation de la machine à courant continu, qui est représentée sur la figure II.32.

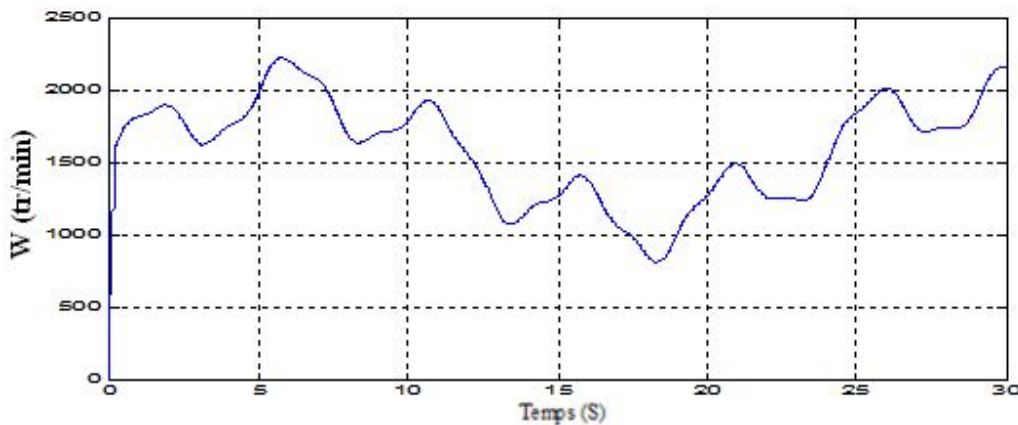


Figure II-32: Allure de la vitesse de la machine (tr/mn).

Les figures (II.31) et (II.32) montrent le caractère aléatoire du couple de la turbine ainsi que celui de la vitesse de rotation, qui occasionne des variations de la puissance moyenne disponible sur l'arbre de la turbine. Ces variations font modifier le couple résistant vu par la génératrice, ce qui donne une puissance maximale issue de la génératrice non constante dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne.

II.8 - Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche d'étude sur l'émulateur d'une turbine éolienne, où l'ensemble des éléments de conception fut définis. Aussi nous avons abordé le principe d'émulation par les deux types de commande de la machine à courant continu par un hacheur quatre quadrants dans le but de reproduire les variations de courant (couple) et variation de vitesse.

Ainsi, les résultats obtenus de la simulation, ont révélé que la machine à courant continu associé au modèle de la turbine éolienne reproduit parfaitement les variations qu'impose un vent réel.

CHAPITRE III

RÉALISATION EXPÉRIMENTALE DE L'ÉMULATEUR

III.1 - Introduction :

Ce chapitre montre les étapes de la réalisation d'un émulateur physique de turbine éolienne. Les variations du vent évoquées auparavant, sont d'abord reconstruites et appliquées à un modèle de turbine éolienne de 10 kW. Une adaptation est réalisée simplement à travers le gain

$$K = \frac{P_{MCC-nom}}{P_{T-npm}}$$

qui représente le rapport entre la puissance nominale de la machine (1 kW) et celle de la turbine (10 kW). Ceci permet de reproduire la forme d'onde réelle du couple aérodynamique de la turbine éolienne mais à échelle réduite, appliqué en référence à une machine à courant continu et dont la MCC est contrôlée en couple grâce à une commande.

L'émulateur est testé dans le chapitre précédent avec un modèle de machine à courant continu puis validé sur une machine réelle du laboratoire de 1 kW. L'intérêt de cette étude est de pouvoir disposer d'un émulateur physique "universel" auquel nous pouvons accoupler différentes génératrices électriques de façon à tester leur intégration et leur efficacité dans un système éolien et sur un réseau électrique[2].

Dans une seconde partie, nous étudierons plus particulièrement la modélisation et la commande pour chacune de ces parties de l'Emulateur de Turbine Eolienne (ETE), des relevés expérimentaux réalisés sur ce banc d'essais seront présentés[44][27].

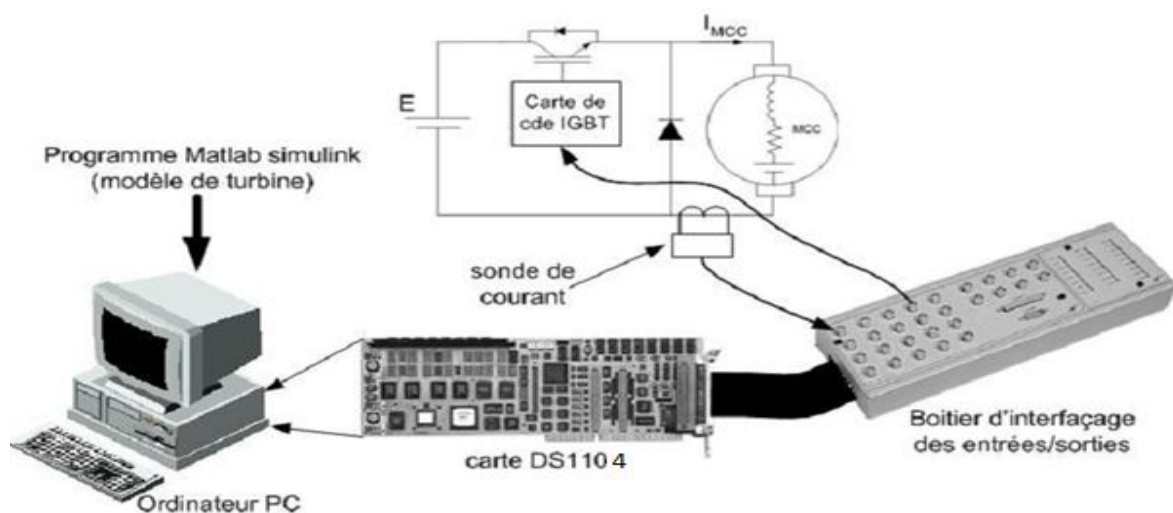


Figure III-1: Dispositif expérimental.

III.2 - Présentation de la plate-forme d'essais :

Le banc expérimental que nous avons utilisé a été développé au sein du laboratoire de Génie Electrique Et des Plasmas (LGEP) à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret. La photo donnée en figure (III.2) présente le banc du test employé.

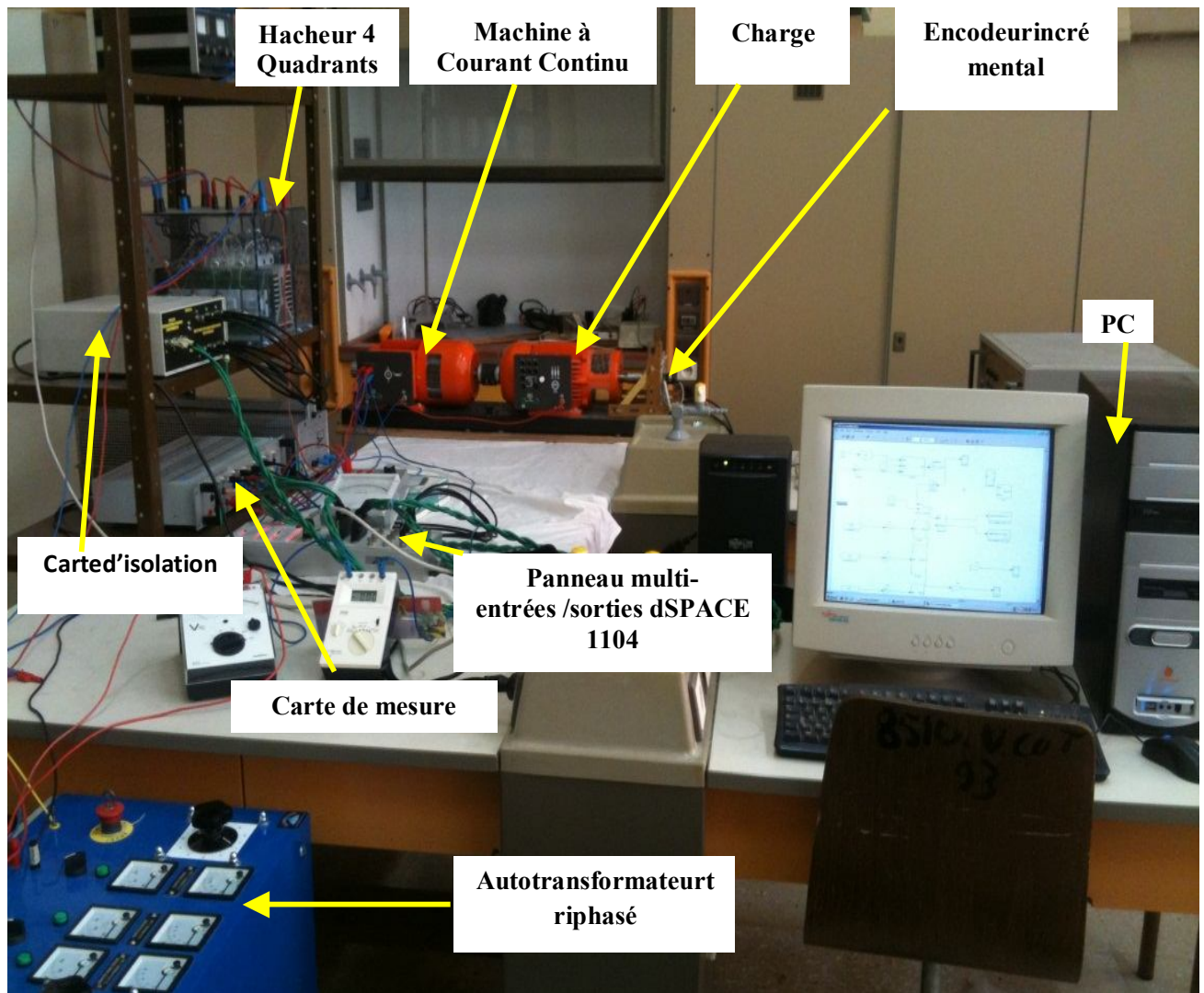


Figure III-2: Photodu banc d'essai.

III.3 -Caractéristiques du banc d'essais :

Le banc expérimental de l'émulateur se compose de deux parties principales :

III.3.1 - Le banc machine :

Le banc de test ainsi utilisé comporte un actionneur composé d'une machine à courant continu associé à une génératrice synchrone utilisée comme charge.

La structure électromécanique émulant le couplage de la turbine éolienne avec la génératrice éolienne est constituée de :

L'émulateur de la turbine éolienne :

La base de cet émulateur est une machine à courant continu, du constructeur Lucas Nulle (Germany). Cette machine dont les paramètres sont cités en annexe (A) est à excitation séparée de 1 kW, 4000 Tr/min, alimentée par un convertisseur à MLI construit autour d'IGBT

1200V/ 30A et utilisé comme un hacheur à quatre quadrants. L'induit de la machine est alimenté par deux bras du convertisseur et l'excitation par le réseau via un autotransformateur. La commande de cet ensemble est assurée par une carte dSPACE 1104 (PowerPC603e/TI DSPTMS320F240). Une interface de commande est placée entre cette carte et les drivers des IGBT, afin d'adapter les signaux présentés où sont reçus des organes de commande (ordre de commutation et signaux d'erreur) et de réaliser de façon matérielle, les ordres complémentaires de commutation des interrupteurs. Une interface de mesure, composée de trois capteurs de tension et de trois capteurs de courant LEM™ à effet Hall, permet les relevés nécessaires à la commande de la machine. Enfin, une mesure de vitesse est réalisée grâce à un codeur incrémental implanté sur la machine synchrone, connecté à un port dédié sur la carte DS 1104.

III.3.2 - Baie de puissance :

Une baie de puissance contenant le convertisseur (Hacheur à quatre quadrants), à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), de marque SEMIKRON™, est à base d'IGBT pilotés à 10 kHz. La carte DS 1104 sort directement les six signaux MLI centrés. La liaison entre la carte dSPACE et le convertisseur électronique de puissance sont faites par quatre interfaces dont le rôle est d'adapter les niveaux de tension. Le bornier de carte dSPACE travaille dans le domaine ± 5 V tandis que les circuits de commande des convertisseurs travaillent dans le domaine ± 15 V [46].

La carte d'isolation entre la dSPACE et le hacheur permet d'attaquer les IGBT avec des niveaux de tension adéquats et d'ajouter une commande d'inhibition.

III.4 - Cartes des mesures :

La mesure et la numérisation des courants se font par une chaîne d'acquisition classique. Ainsi, la carte de mesure utilisée est dotée de modules pour la capture des courants et tensions. La mesure du courant de la MCC est réalisée à l'aide d'un capteur de courant de type: LEMLA 55-P. Celui-ci génère une tension de faible amplitude qui est l'image du courant mesuré. Ce signal est filtré ensuite par un filtre analogique anti-repliement, dont la fréquence de coupure est de l'ordre de 500 Hz. L'introduction de ce filtre nous permet, d'une part, d'éviter les perturbations créées par des signaux hautes fréquences sur l'échantillonnage (repliement de spectre) et d'autre part de lisser le courant haché. Le signal est ensuite introduit vers le boîtier d'entrées/sorties (carte dSPACE 1104) via le convertisseur analogique numérique. Nous signalons également que la carte est équipée de modules pour capter les tensions. Ainsi, les capteurs employés sont de type: LEMLV 25-P. Ces capteurs sont caractérisés par un temps de réponse

très faible, c'est ainsi qu'aucun temps de retard n'est pris en compte lors de la modélisation de ces capteurs qui se réduit finalement à un gain pur[47].

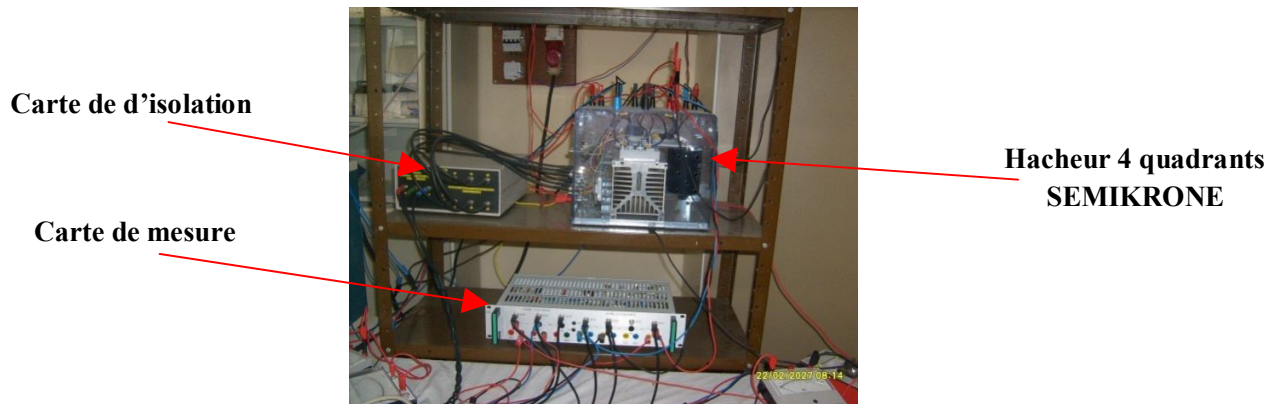


Figure III-3: photo du Hacheur.

III.5 - Encodeur incrémental :

Le codeur incrémental utilisé pour capter la vitesse mesurée de la machine à courant continu offre une résolution de 512 pas par tour.

III.6 - Schéma et principe de la commande :

Le modèle de la turbine est implémenté dans l'environnement MATLAB/SIMULINK, installé sur le PC, faisant office d'unité de traitement et de calcul.

MATLAB/SIMULINK est utilisé à deux niveaux. Il permet de modéliser l'ensemble du système physique étudié, pour la compréhension du système et la mise au point de la commande envisagée. Les stratégies de commande sont ensuite directement implémentées sur le banc d'essai à travers la carte d'acquisition dans le même environnement.

Dans ce paragraphe, nous allons tout d'abord présenter les étapes nécessaires à la réalisation d'un essai expérimental à l'aide du système dSPACE. Ces étapes sont:

1- La carte dSPACE et le logiciel Matlab/Simulink qui doivent être installés dans le PC. En effet, le système de développement de la société dSPACE est intégré à l'environnement Simulink, afin de bénéficier d'un chaînage complet de la simulation à la validation expérimentale.

2- Un modèle Simulink du système étudié (Emulateur) qui doit être réalisé à l'aide des blocs de la bibliothèque Matlab/Simulink. Ce modèle ne doit pas inclure les éléments de puissance (machine, charge, IGBT, ...etc.) mais seulement modéliser la partie commande à tester expérimentalement (Commande de l'émulateur et simulation de la GADA). Ensuite, on ajoute

des blocs entrées/sorties d'interfaces (CAN, CNA) de la bibliothèque dSPACE au modèle Simulink précédent afin de faire la liaison entre le système physique et la carte dSPACE.

3- Le modèle précédent doit alors être implanté sur la carte DS1104. Cela est réalisé à l'aide de l'outil d'interface temps réel RTI (Real-Time Interface). Cet outil traduit d'abord le modèle Simulink en code C, puis le code C est compilé afin de générer un fichier exécutable pour le processeur résidant sur la carte dSPACE DS1104. Enfin, le fichier exécutable est téléchargé. Cette étape associe le modèle Simulink au système dSPACE à travers le bloc RTI Data qui apparaît alors au niveau du fichier Simulink.

4- Une fois le modèle téléchargé dans dSPACE, un nouveau fichier doit être établi (via ControlDesk Layout) pour contrôler le système étudié. Cela nous permet de réaliser différentes fonctions de contrôle telles que démarrer/arrêter l'expérimentation, changer en ligne les valeurs des paramètres du système et visualiser les signaux mesurés.

5- Lancement de l'essai expérimental.

III.6.1 - Implantation de la courbe $CP = f(\lambda, \beta)$:

La modélisation du coefficient de puissance a été détaillée au cours du chapitre II. L'implantation de cette courbe est faite de la même manière que celle présentée en simulation. L'algorithme général de génération du couple éolien de référence est présenté sur la figure III.4.

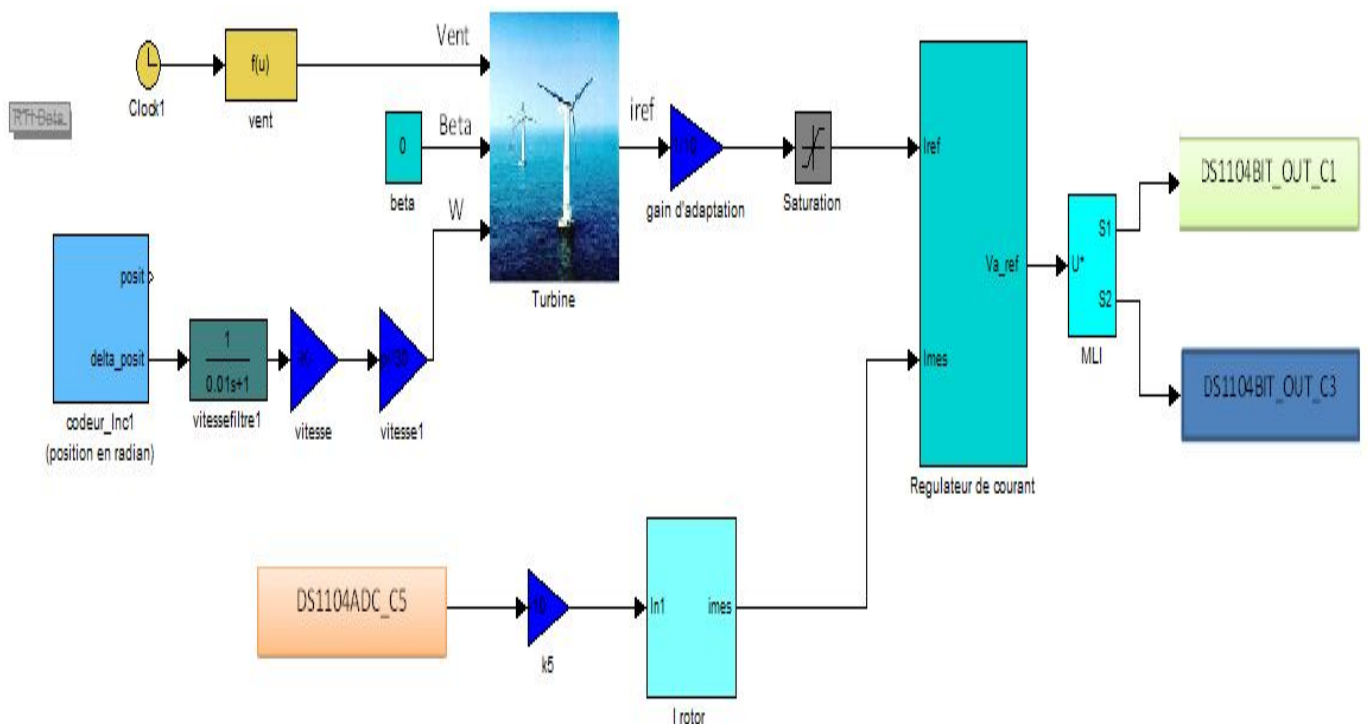


Figure III-4: Génération du couple éolien de référence.

La boucle de commande commence par l'acquisition du courant d'induit I_{mes} et de la vitesse de rotation w_{mes} (tr/min) de la machine. Cette dernière est convertie en (rd/s) lorsqu'elle passe par un gain de $\frac{2.\pi}{60}$. Elle est ensuite injectée dans le modèle de l'émulateur éolien qui, en tenant compte du modèle du vent, donne en sortie un courant de référence I_{ref} qui passe par une adaptation de la grandeur du couple et est réalisée simplement à travers le gain $K = \frac{P_{MCC-nom}}{P_{T-npm}}$ qui représente le rapport entre la puissance nominale de la machine et celle de la turbine. Ceci permet de reproduire la forme d'onde réelle du couple aérodynamique de la turbine éolienne mais à échelle réduite[48].

Le courant mesuré I_{mes} est alors comparé avec I_{ref} . Un bloc MLI vient enfin comparer la tension de commande à un signal dent de scie, générant ainsi les impulsions de commande des gâchettes transmises au circuit de commande du hacheur à quatre quadrants par une sortie numérique de la carte dSPACE 1104.

III.6.2 - Principe de la commande :

Dans cette partie de réalisation, on a envisagé deux types de commande, la première est une commande à hystérésis, la seconde est la commande à MLI.

III.6.2.1 - La commande conventionnelle par hystérésis :

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure III-5 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, la différence entre le courant de référence i_{r*} et le courant réel i_f . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

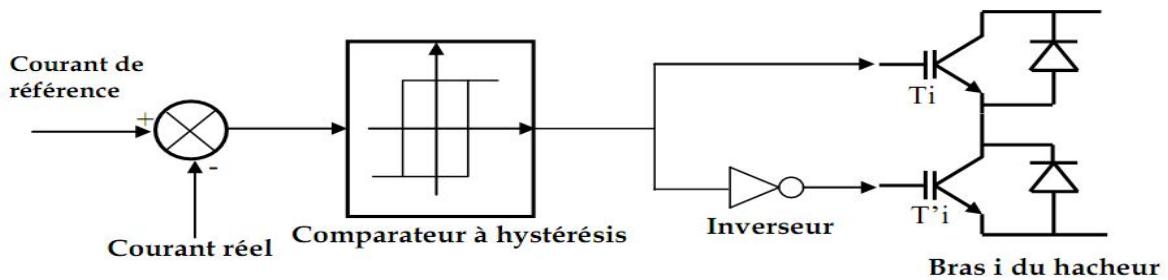


Figure III-5: Commande conventionnelle par hystérésis.

III.6.2.2 - Commande par MLI :

Le principe du contrôle par MLI est décrit sur la figure III.6. Dans ce cas, la différence entre le courant de référence i_f^* et le courant réel i_f est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance.

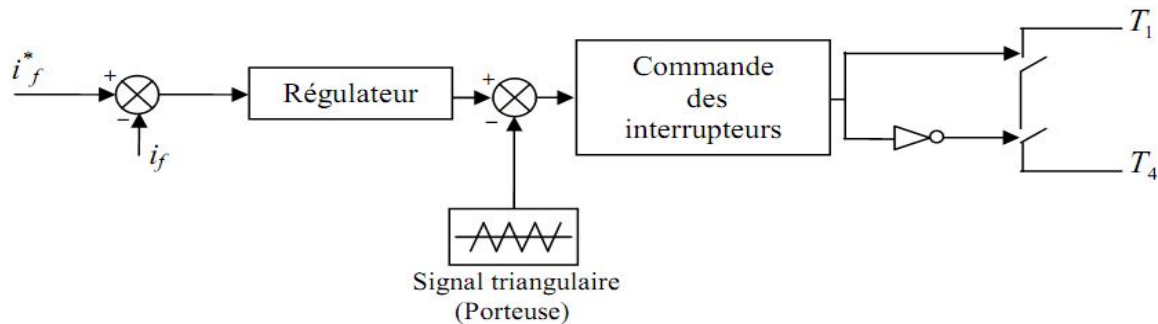


Figure III-6: Principe de la commande par MLI.

Le contrôle par MLI est d'une complexité réduite; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis[49].

Un régulateur PI peut être utilisé pour générer les références de la MLI, dont les paramètres sont affinés pour obtenir une meilleure poursuite.

III.7 - Caractéristiques du contrôleur numérique utilisé (dSPACE 1104) :

De nos jours, les contrôleurs numériques utilisant des cartes de prototypage dSPACE à base des DSPs sont de plus en plus utilisés vu leurs performances et leurs rôles cruciaux dans le monde des entraînements. Parmi leurs avantages, on peut citer entre autres:

- ✚ Une grande souplesse d'utilisation au niveau des développements des commandes,
- ✚ La réalisation des lois de commande après avoir mis l'algorithme sous Matlab/Simulink.

Comme cela est décrit au sein de la figure III-1, l'identification de la partie commande de tout le système d'essai est réalisée à l'aide du système numérique dSPACE (carte de prototypage DS1104), relié aux outils Matlab/Simulink par le bloc d'interface Real Time Interface (RTI). Le système DS1104 se compose des éléments suivants :

- La carte mère DS1104, montée dans l'ordinateur. Elle gère le fonctionnement global du système et exécute le programme principal. Cette carte est plus précisément décrite dans la figure III-7.

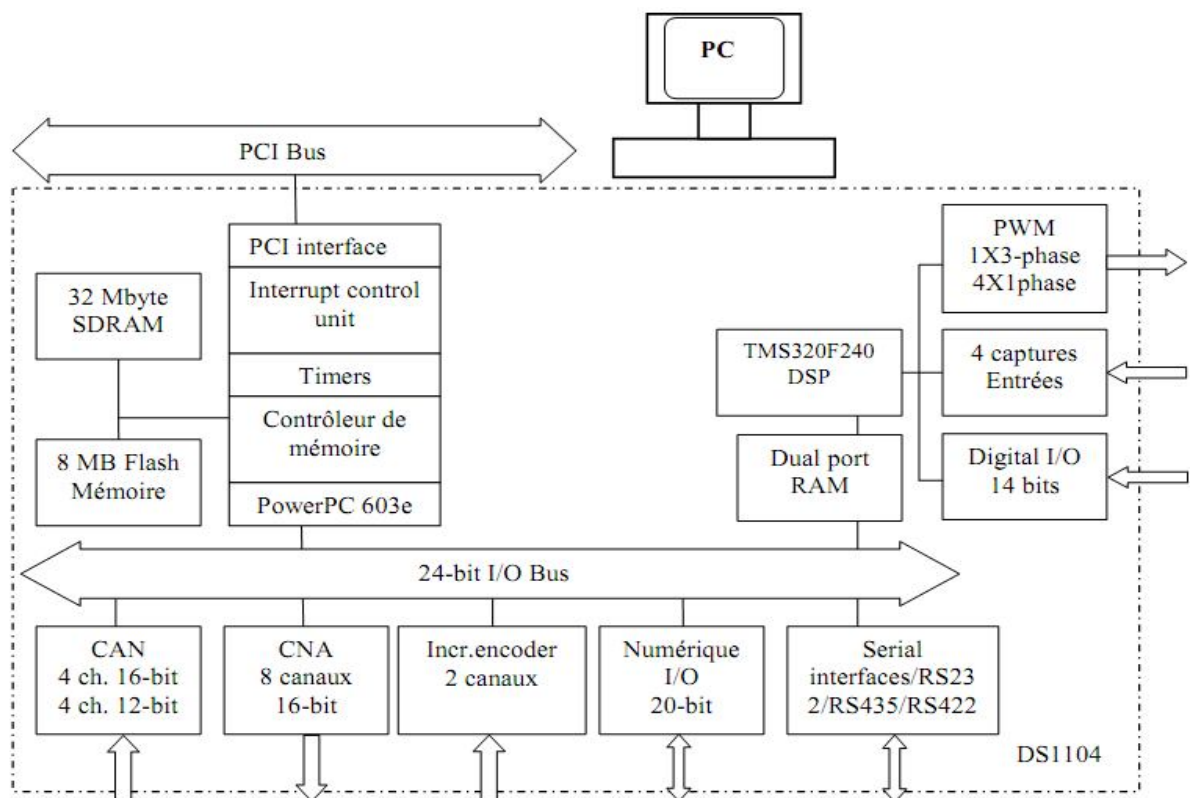


Figure III-7: Composition de la carte DS1104.

- Des entrées/sorties numérique 20 bits,
- Quatre sorties MLI monophasées plus une sortie MLI triphasée,
- Deux codeurs incrémentaux,
- Des entrées numériques 14 bits,
- Un panneau de connexion multi-entrées, multi-sorties qui assurent la liaison entre les différentes sorties des capteurs et la carte DS1104 (PC). La figure III-8 présente la photographie de ce panneau.

- Quatre convertisseurs analogiques numériques (ADC) de 12 bits,
- Quatre convertisseurs analogiques numériques (ADC) de 16 bits,
- Huit convertisseurs numériques analogiques (DAC) de 16 bits,
- Un microprocesseur Motorola PowerPC 603e (250 MHz) et un DSP de Texas Instruments TMS 320F240 (20 MHz) qui gère les entrées-sorties digitales,



Figure III-8: Panneau multi-entrées/sorties dSPACE 1104.

Ce panneau est composé des éléments suivants :

- ❖ Deux groupes de quatre entrées BNC liées à la carte de conversion analogique – numérique (CAN). Il faut noter que les signaux d'entrées doivent être multipliés par 10 car les convertisseurs (CAN) divisent automatiquement les entrées par 10.
- ❖ Deux groupes de quatre sorties BNC liées à la carte de conversion numérique - analogique. De même, il faut diviser les signaux de sorties par 10 car les convertisseurs (CNA) multiplient automatiquement les sorties par 10. Les sorties sont comprises dans la plage $\pm 10V$ [49][47].

III.8 -Résultats expérimentaux :

III.8.1 - Test du hacheur à quatre quadrants :

Dans le but de commander la machine à courant continu, on est amené à varier sa vitesse. Pour ceci, il suffit d'utiliser un convertisseur statique DC/DC (hacheur à quatre quadrants). Le hacheur utilisé est un Convertisseur à Modulation de Largeur d'Impulsion.

Afin de vérifier le bon fonctionnement du hacheur à quatre quadrants qu'on veut tester et assurer son fonctionnement dans différents cas possibles, on a effectué deux essais simples en boucle fermée sur une charge RL. La tension continue est obtenue à partir d'une alimentation à courant continu.

Le premier essai consiste à imposer à la charge un courant continu de valeur constante (1A). Le régulateur utilisé est un régulateur PI, sur la figure III.9 nous présentons l'allure des courants de référence et mesuré dans la charge.

La figure III.10, présente la tension appliquée à la charge pour forcer le courant dans la charge RL à suivre le courant de référence.

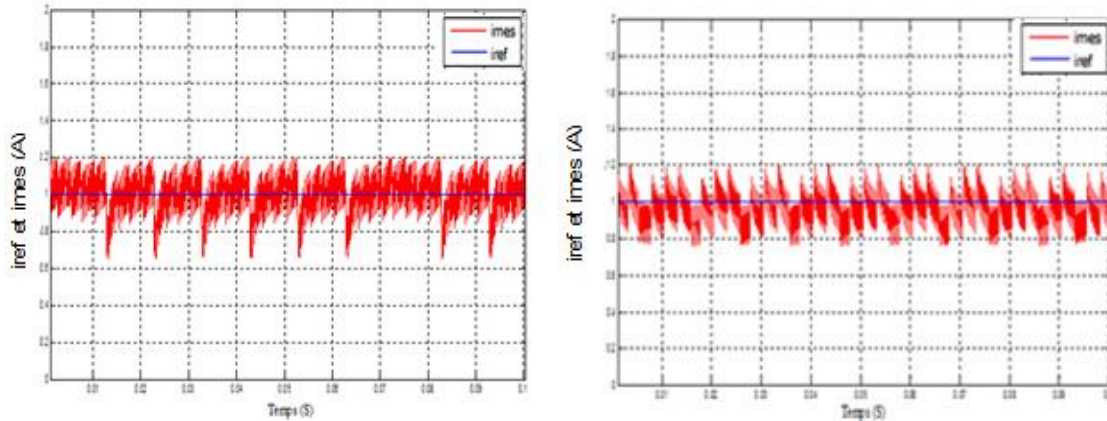


Figure III-9: Allure des courants de référence et mesuré.

L'utilisation d'un oscilloscope GW- INSTEK modèle GDS 2104 avec une fréquence 1G échantillon par seconde, nous a permis non seulement de visualiser les résultats, mais aussi de capturer l'écran. En effet, cet oscilloscope donne la possibilité d'enregistrer le signal visualisé sous différents formats. Cette option nous a permis de récupérer les données des signaux visualisés et la possibilité de les retracer.

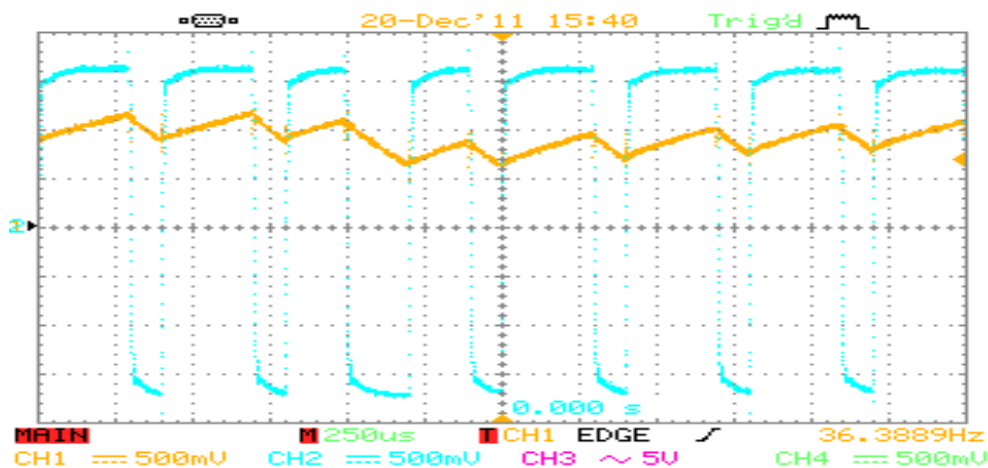


Figure III-10: Allure du courant mesuré et la tension appliquée.

Le deuxième essai effectué sur la charge RL, consiste à fonctionner le convertisseur (hacheur à quatre quadrants) comme un onduleur monophasé, en imposant dans la charge un courant de référence de forme sinusoïdale d'amplitude (1A) et de fréquence 50hz.

La figure III-11, présente l'allure des courants de référence et mesuré dans la charge. Sur la figure III-12, on présente la tension appliquée à la charge RL et le courant mesuré.

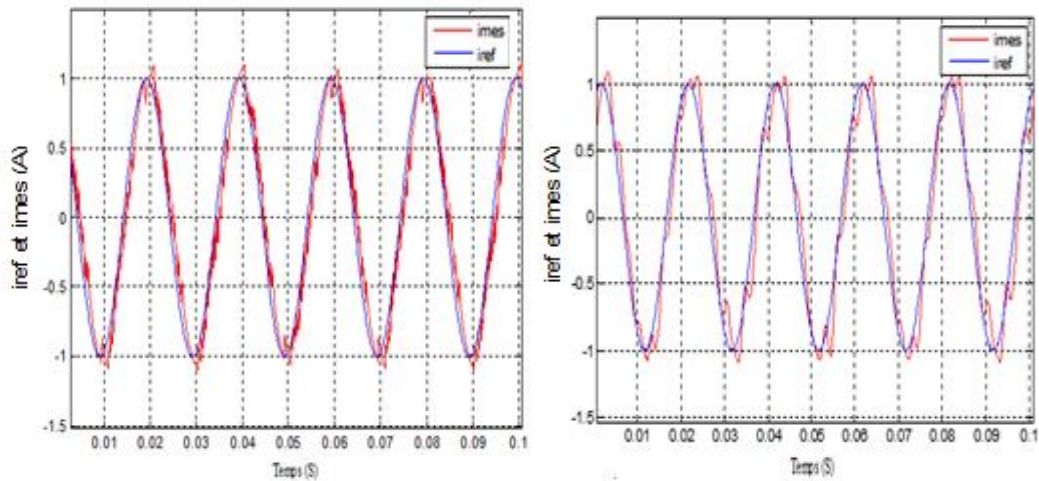


Figure III-11: Allure des courants de référence et mesuré.

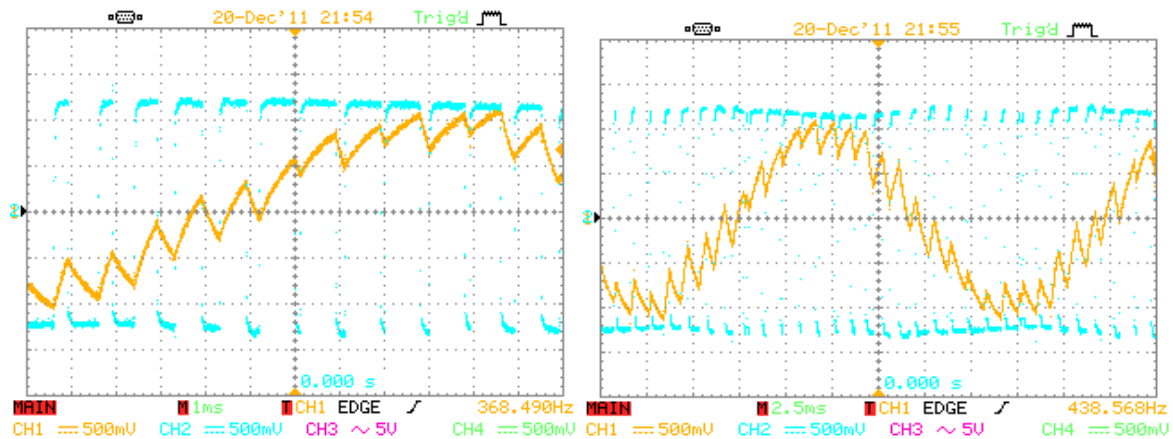


Figure III-12: Allure du courant mesuré et la tension appliquée.

À travers ces deux essais, on a confirmé le bon fonctionnement du convertisseur, maintenant on passe aux résultats expérimentaux de l'émulateur qui est l'objectif de ce chapitre.

III.8.2 - Résultats expérimentaux de l'émulateur :

Dans cette partie, on présente les résultats expérimentaux de la commande en courant de la machine à courant continu pour les deux types de régulateurs: hystérésis et PI; dont le but est d'asservir le couple de la machine à un couple de référence donnée par le modèle de la turbine. Pour le faire nous avons appliqué le modèle de vent donné sur la figure III-13.

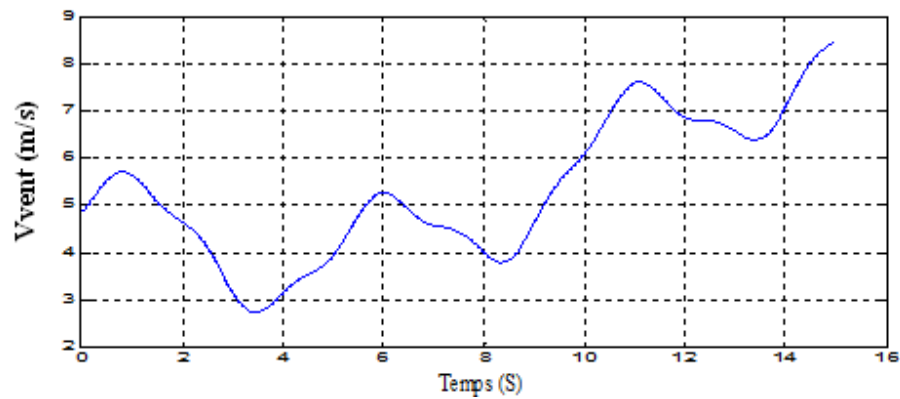


Figure III-13: Profil du vent appliqué.

En premier lieu on présente sur la figure III-14 le courant de référence qui est l'image du couple de la turbine et le courant de la machine, avec un régulateur à hystérésis,

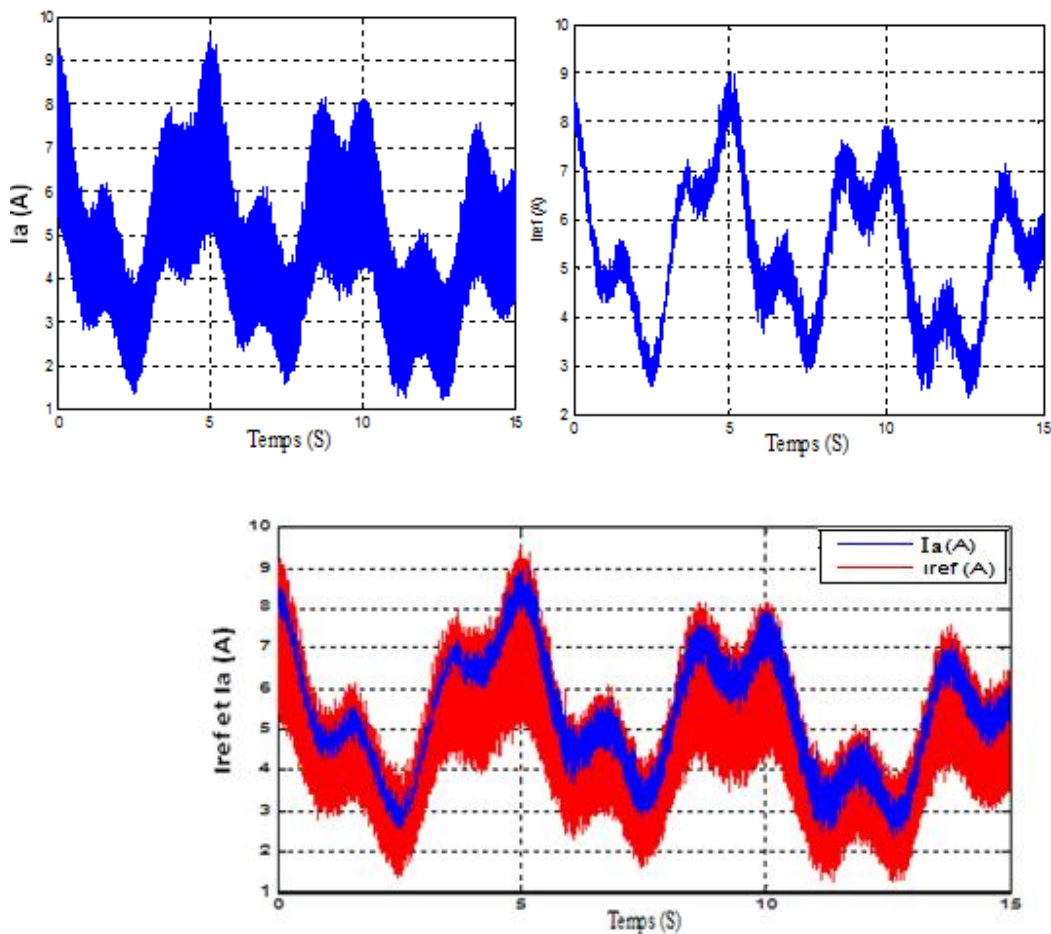


Figure III-14: Allure des courants de référence et d'induit.

Après avoir présenté les allures du courant de référence et le courant d'induit de la machine qui détermine bien la qualité d'émulation, il est important de présenter les allures principales qui caractérisent la turbine éolienne c'est à dire. la courbe de variation de λ qui est le rapport de la vitesse linéaire de la turbine à celle du vent donnée sur la figure III-15, et la courbe donnant le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ illustrée sur la figure III-16, aussi nous avons présenté dans la figure III-17 l'allure de variation de la vitesse mécanique de la machine.

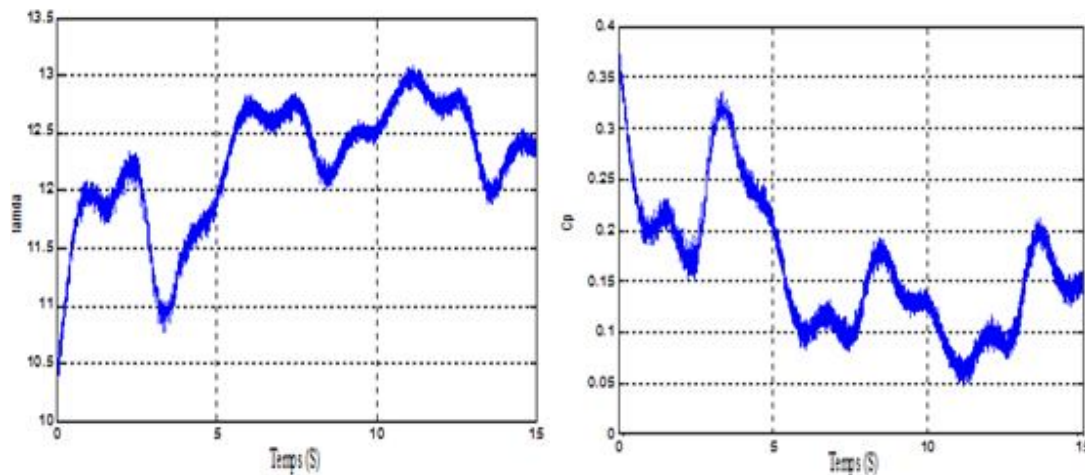


Figure III-15: Variation du rapport de vitesse λ . Figure III-16: Variation du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$.

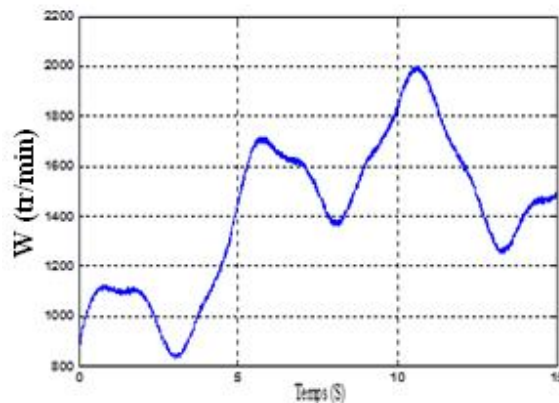


Figure III-17: Allure de la vitesse de la machine (tr/mn).

Dans cette deuxième partie, nous présentons les résultats illustrant la validation de l'émulateur avec une commande par un régulateur PI.

La figure III.18 présente l'allure du courant de référence et le courant de la machine.

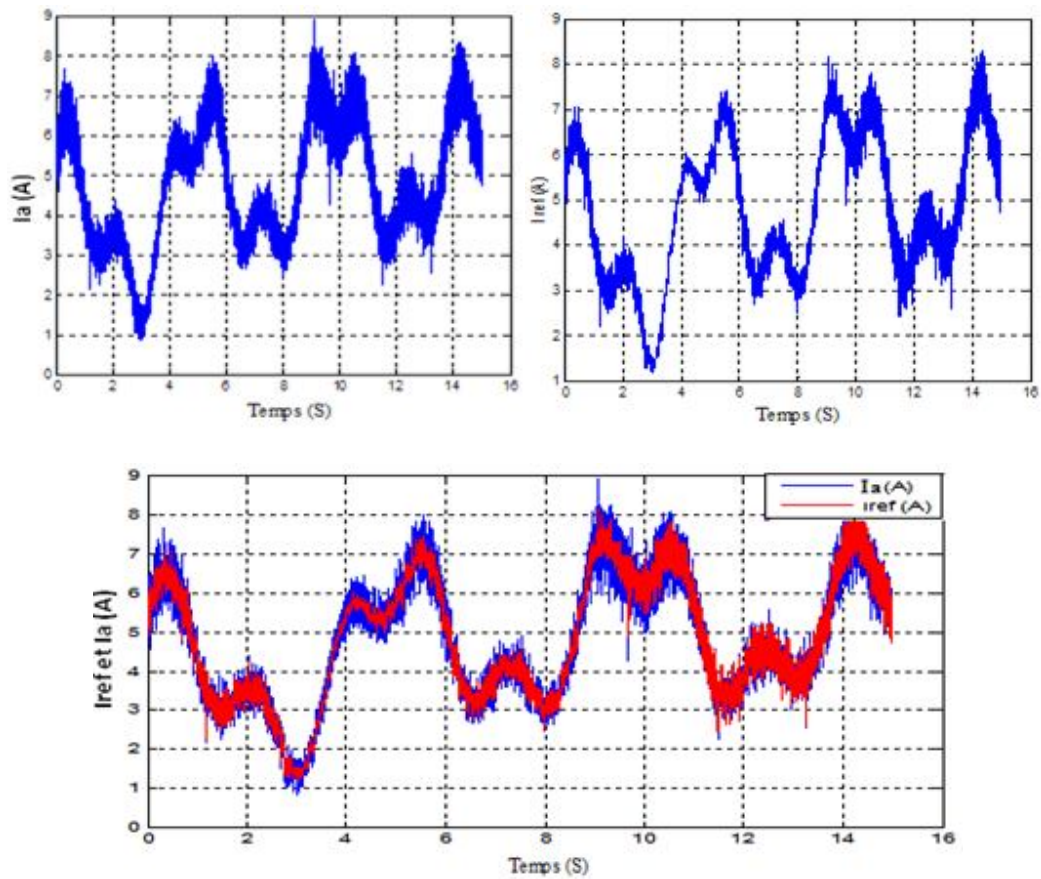


Figure III-18: Allure des courants de référence et d'induit.

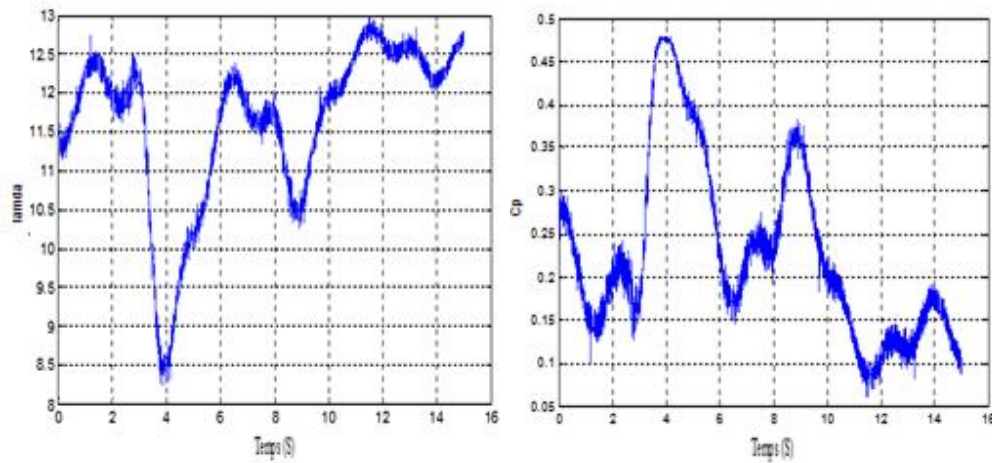


Figure III-19: Variation du rapport de vitesse λ . Figure III-20: Variation du coefficient de puissance C_p (λ, β).

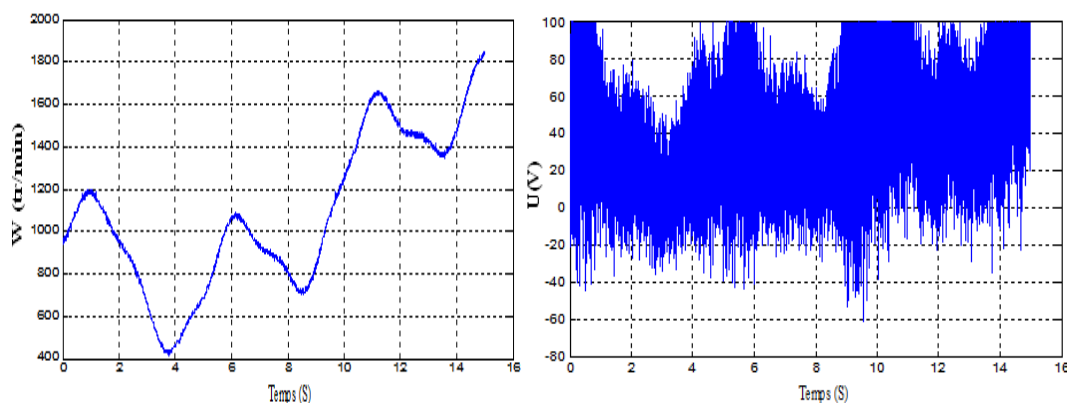


Figure III-21: Allure de la vitesse de la machine (tr/mn). Figure III-22: La tension appliquée à la machine.

III.9 - Interprétation des résultats :

Les résultats expérimentaux présentés confirment bien l'efficacité et les performances de la commande de l'émulateur. On constate qu'il existe une bonne corrélation entre la théorie et la pratique.

A partir des résultats expérimentaux obtenus, on remarque que le régulateur PI assure une poursuite plus meilleure que celle donnée par le régulateur à hystérésis. Ce dernier a une fréquence de commutation variable, et présente l'avantages d'être de très grande simplicité et il ne nécessite pas la connaissance des paramètres du système. L'inconvénient majeur réside dans l'absence de contrôle de la fréquence de commutation des transistors, ce qui rend délicat leur dimensionnement.

III.10 – Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la plateforme d'essai qui permet d'émuler le comportement d'une turbine éolienne, dont le fonctionnement est basé sur la commande en couple d'une machine à courant continu par un hacheur à quatre quadrants.

Des tests ont été effectués avec une machine réelle faisant partie du banc d'essai réalisé au laboratoire. Les résultats obtenus ont montré une bonne corrélation entre la théorie et la pratique du point de vue du comportement de la MCC et du courant qu'elle absorbe. On note des amplitudes plus élevées en pratique, en ce qui concerne les pointes de courant relatant les rafales de vent. Ces différences peuvent s'expliquer par les imprécisions des paramètres de la MCC utilisés pour le calcul du régulateur qui diffèrent des paramètres réels ainsi que par la fréquence d'échantillonnage des convertisseurs analogique/numérique de la carte dSPACE. De plus, la MCC est reliée à une machine synchrone utilisée comme une charge, montée sur son arbre l'encodeur incrémental pour le relevé de la vitesse, ces deux derniers présents dans le dispositif expérimental ne sont pas pris en compte dans les simulations.

CHAPITRE IV
MODÉLISATION ET
COMMANDE D'UNE GADA
ASSOCIÉE À UNE ÉOLIENNE

IV.1 – Introduction :

Maintenant que nous disposons d'une modélisation mécanique, il nous faut choisir et modéliser la génératrice. Après avoir présenté les différentes chaînes de conversion au chapitre I, nous cherchons un type de génératrice qui nous permettra de commander indépendamment des puissances actives et réactives.

Ainsi, nous nous sommes orientés vers le choix d'une machine asynchrone à double alimentation qui est aujourd'hui, le système de génération d'énergie éolienne le plus utilisé, afin de permettre une production optimale d'électricité quel que soient les conditions de vent et de vitesse de l'éolienne. De plus, nous avons pu noter au chapitre I que la plupart des éoliennes de forte puissance étaient équipées de GADA (Génératrice Asynchrone à Double Alimentation). Cette machine présente des avantages de par son Contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus de son prix compétitif et de sa grande robustesse[16].

L'intérêt porté à la GADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [2].

Son circuit statorique est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

C'est la raison principale pour laquelle cette génératrice est utilisée dans la production électrique en forte puissance. La seconde raison réside en la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice.

Nous allons commencer ce chapitre par une description générale de la GADA, ainsi que son principe de fonctionnement. Ensuite, nous allons présenter son modèle mathématique en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale. Enfin nous terminerons par l'étude de la commande vectorielle de la GADA accompagnée d'une interprétation des résultats de simulation de cette dernière[25].

IV.2 - Description de la GADA :

La Génératrice Asynchrone à Double Alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. (Voir figure.IV-1).

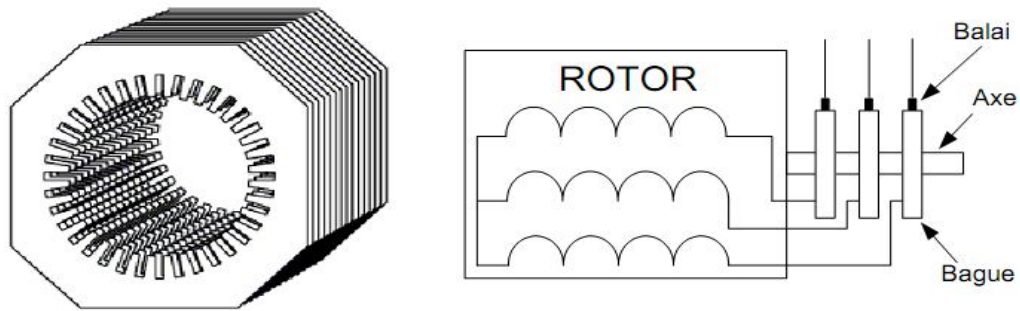


Figure IV-1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne[2][40][15].

La Génératrice Asynchrone à Double Alimentation comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$, et aussi trois bobines rotoriques identiques et similaires à celles du stator.

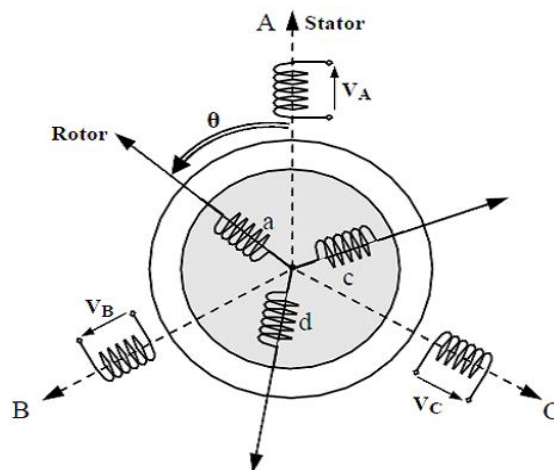


Figure IV-2: Représentation spatiale de la GADA. [25][1]

IV.3 - Modes de fonctionnement de la GADA :

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

Comme la machine asynchrone classique, la GADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement[2][16].

Seuls les quadrants 3 et 4 sont exploitables pour la production de l'énergie électrique, donc nous nous intéressons dans notre étude à ces deux quadrants pour la production d'énergie éolienne[1].

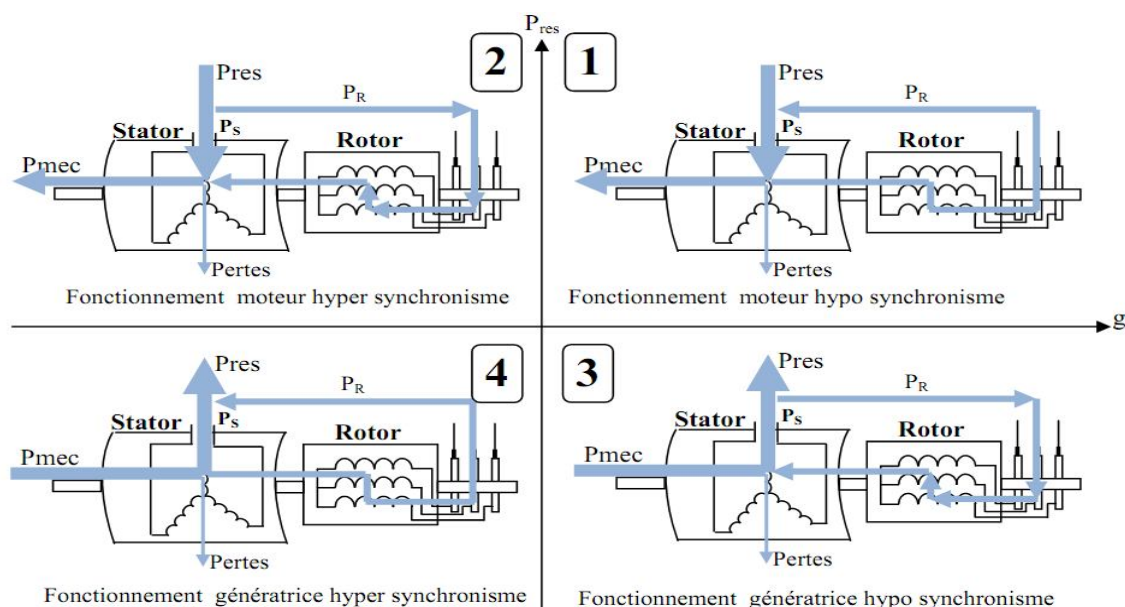


Figure IV-3: Quadrants de fonctionnement de la GADA.

1- Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme, la puissance électrique du stator est transformée en partie en puissance mécanique et le reste peut être réinjectée au réseau à travers le rotor. La MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules.

2- Lorsque la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme, elle peut recevoir de la puissance électrique du côté stator et du rotor. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

3- Lorsque la machine reçoit de la puissance du côté mécanique et du rotor, celle-ci tourne en dessous de la vitesse de synchronisme. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

4- Lorsque la machine tourne au-dessus de la vitesse de synchronisme, la puissance mécanique est réinjectée au réseau à travers le stator et le rotor. La MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules[17][15][3][35][34][50].

IV.4 - Modélisation de la GADA :[16][51][13][18][2][40][1][15]

La modélisation de la machine asynchrone en tenant compte de la répartition de ses enroulements et sa géométrie réelle est une tâche très complexe. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices.

IV.4.1 - Hypothèses simplificatrices :[25][15]

Nous considérons les hypothèses suivantes :

- ✚ La machine est de constitution symétrique ;
- ✚ On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire) ;
- ✚ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température ;
- ✚ On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants ;
- ✚ On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale ;
- ✚ L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

IV.4.2 - Equations électriques :

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; & [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; & [I_s] &= \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; & [I_r] &= \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \\ [\Phi_s] &= \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; & [\Phi_r] &= \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; & [R_s] &= \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix}; & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

V_s, V_r : Tensions statoriques et rotoriques ;

I_s, I_r : Courants statoriques et rotoriques ;

Φ_s, Φ_r : Flux statoriques et rotoriques ;

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

IV.4.3 - Equations magnétiques :

Les flux sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} [\Phi_s] \\ [\Phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix}$$

Avec : (4.2)

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

L_s, L_r : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques ;

M_s, M_r : Inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

En remplaçant (4.2) dans (4.1), on obtient le système suivant:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad (4.4)$$

IV.4.4 - Equation mécanique :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante:

$$Cem = P[I_s]^t + \frac{d}{d\theta}([M_{sr}][I_r]) \quad (4.5)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(Cem - Cr - Fr.\Omega) \quad (4.6)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

IV.5 - Modèle de la GADA dans le repère d-q :

La transformation de PARK est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées qui dépendent du temps et de l'espace; les grandeurs variables deviennent des grandeurs constantes et indépendantes de la position rotorique. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q) (figure (IV-4)) continu.[30]

Les repères de la transformation de PARK des grandeurs statoriques et ceux des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation : $\theta_s = \theta + \theta_r$.

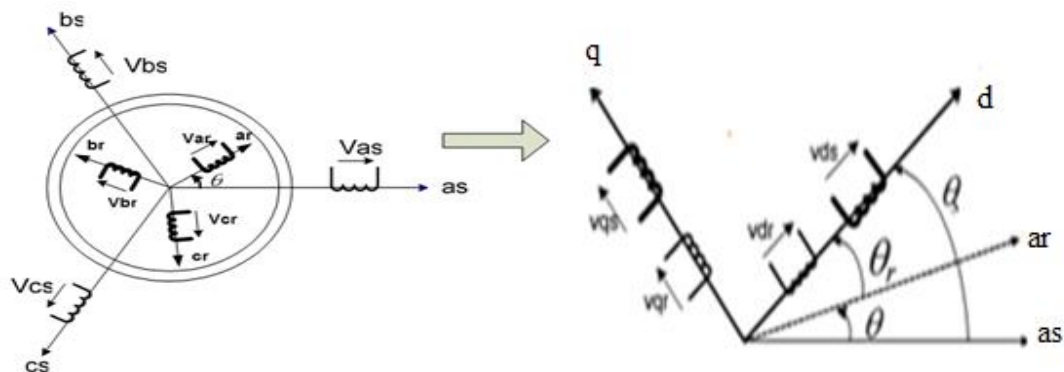


Figure IV-4: Passage du système triphasé au biphasé. [14]

La matrice de transformation est définie par:

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

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

Le fait que $[P(\theta)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T.$$

$[P(\theta)]$ Est Orthonormée ce qui permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé, et inversement.

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.

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante:

$$\begin{cases} [V_{s(dq)}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s(abc)}] \\ [V_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{r(abc)}] \\ [I_{s(dq)}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{s(abc)}] \\ [I_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{r(abc)}] \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} [\Phi_{s(dq)}] = [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_{s(abc)}] \\ [\Phi_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\Phi_{r(abc)}] \end{cases}$$

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constantes L_s, L_r, M et reliés aux courants par la relation:

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (4.9)$$

Tel que:

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

En remplaçant les équations des flux (4.9) dans les équations des tensions (4.8), on aura:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (4.10)$$

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

Equation du couple électromagnétique:

$$C_{em} = \frac{PM}{L_S} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) \quad (4.11)$$

IV.6 - Choix du référentiel : [25][30][15][1]

Les équations de la machine peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié. Donc il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit à l'une des armatures, soit au champ tournant, selon les objectifs de l'application.

IV.6.1 - Référentiel lié au stator :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (4.12)$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

IV.6.2 - Référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est caractérisé par $\omega = \omega_e$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante. Il se traduit par la condition:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (4.13)$$

IV.6.3 - Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par :

$$\omega_s = \omega_r + \omega = g.\omega_s + \omega \quad (4.14)$$

Où : g est le glissement définit par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (4.15)$$

Il est préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine car les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent.

Nous allons considérer tout au long de ce mémoire que l'axe d du repère de Park est lié au champ tournant, donc les seules équations (ci-dessous) qui seront utilisées.

Le modèle mathématique de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentations'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r.I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (4.16)$$

Avec

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{PM}{L_s} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) \\ \frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \end{cases} \quad (4.17)$$

IV.7 - Mise sous forme d'équations d'état : [51][25][50]

Etant donné la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation sous forme d'équation d'état, nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, I_{qr}, I_{dr}, \omega]^T$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande.

Après calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot I_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - P \cdot \beta \cdot \omega \cdot \Phi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot I_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot I_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{qs} + P \cdot \beta \cdot \omega \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{qs} - \omega_s \cdot \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot I_{qr} + V_{qs} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P\mu}{J} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) - \frac{F}{J} \omega - \frac{1}{J} Cr \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Avec

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_r}; \quad \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right); \quad \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s \cdot M^2}{L_s^2 \cdot \sigma_r}; \quad \beta = \frac{M}{L_s \cdot \sigma_r}; \quad \mu = \frac{3 \cdot M^2}{2 \cdot L_s}$$

IV.8 - Principe de la commande vectorielle :

L'objectif de ce type de commande est d'aboutir à un modèle simple de la machine asynchrone susceptible d'assurer le contrôle séparé des grandeurs flux et courant. La commande vectorielle de la machine asynchrone consiste à orienter les vecteurs courant et flux afin de rendre le comportement de cette dernière similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (figure IV-5), où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit donc de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) (figure IV-6); ceci implique que le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par la composante quadrature [52][53][50].

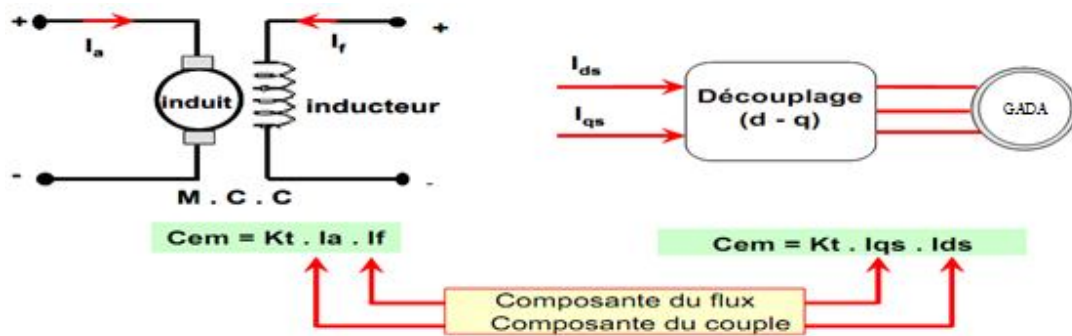


Figure IV-5: Principe de la commande vectorielle.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu:

$$\begin{aligned} C_{em} &= Kt \Phi_f \cdot I_a \\ \Phi_f &= K \cdot I_f \end{aligned} \quad (4.19)$$

Couple électromagnétique de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation:

$$C_{em} = \frac{3PM}{2L_r} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (4.20)$$

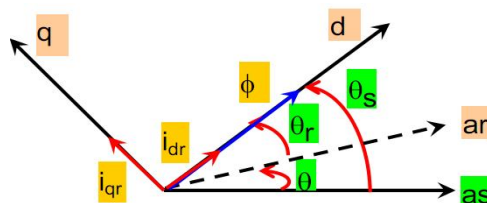


Figure IV-6: Position du référentiel par rapport au flux.[25]

IV.9 - Variantes de la commande vectorielle :

De nombreuses variétés ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer, suivant la source d'énergie [54][51]:

- ❖ Commande en tension (Voltage Source Inverter) ;
- ❖ Commande en courant (CurrentControlledInverter).

Il existe trois choix possibles pour l'orientation du flux selon l'axe d du repère tournant :

➤ Orientation du flux rotoriques :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

➤ Orientation du flux statoriques :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_s \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (4.22)$$

➤ Orientation du flux magnétisant (d'entrefer) :

$$\begin{cases} \Phi_{dm} = \Phi_m \\ \Phi_{qm} = 0 \end{cases} \quad (4.23)$$

Suivant la détermination de la position du flux :

- ❖ Directe par mesure ou observation du vecteur flux (Module, phase).
- ❖ Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

Dans le cadre de ce chapitre nous étudions la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant la tension statorique.

L'objectif de ce type d'orientation est d'obtenir un modèle simple de la machine asynchrone à double alimentation qui tient compte d'un réglage découplé des puissances active et réactive[55].

IV.10 - Commande vectorielle de la GADA par des puissances :

L'un des avantages le plus important de l'utilisation de la GADA, outre la taille du convertisseur, est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne. Dans le cas d'une éolienne la GADA sera utilisée en mode génératrice donc nous allons nous intéresser au contrôle des puissances actives et réactives de la machine.

IV.10.1 - Modèle de la GADA avec orientation du flux :

Le modèle de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit:

Les équations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (4.24)$$

Les équations des flux :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (4.25)$$

On oriente le flux statorique Φ_s afin qu'il soit aligné sur l'axe d du repère (d-q), ceci implique:

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

L'équation du flux statorique

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (4.27)$$

L'équation du couple électromagnétique

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (4.28)$$

Dans l'hypothèse où le réseau connecté au stator est stable, ceci conduit à un flux statorique constant; en appliquant cette hypothèse à l'équation (4.28) on remarque que le couple électromagnétique produit par la machine dépend uniquement du courant rotorique de l'axe q.

De plus si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (4.29)$$

Avec ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

A l'aide de l'équation (4.27) on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (4.30)$$

IV.10.2 - Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances actives et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (4.31)$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation (4.31) on obtient:

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (4.32)$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions (4.30) dans l'équation (4.32), on obtient:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (4.33)$$

En approximant par $\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q devient alors:

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (4.34)$$

IV.10.3 - Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux (4.25) les courants statoriques par l'expression (4.30) on obtient:

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \end{cases} \quad (4.35)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (4.35) par leurs expressions dans l'équation (4.24), on obtient:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r.I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g.\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g.\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g.\omega_s \frac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \end{cases} \quad (4.36)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r.I_{dr} - g.\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + g.\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g.\omega_s \frac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \end{cases} \quad (4.37)$$

Où g correspond au glissement de la GADA.

A partir des systèmes d'équations (4.33), (4.34) et (4.37) nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloqué ci-dessous figure (IV-7).

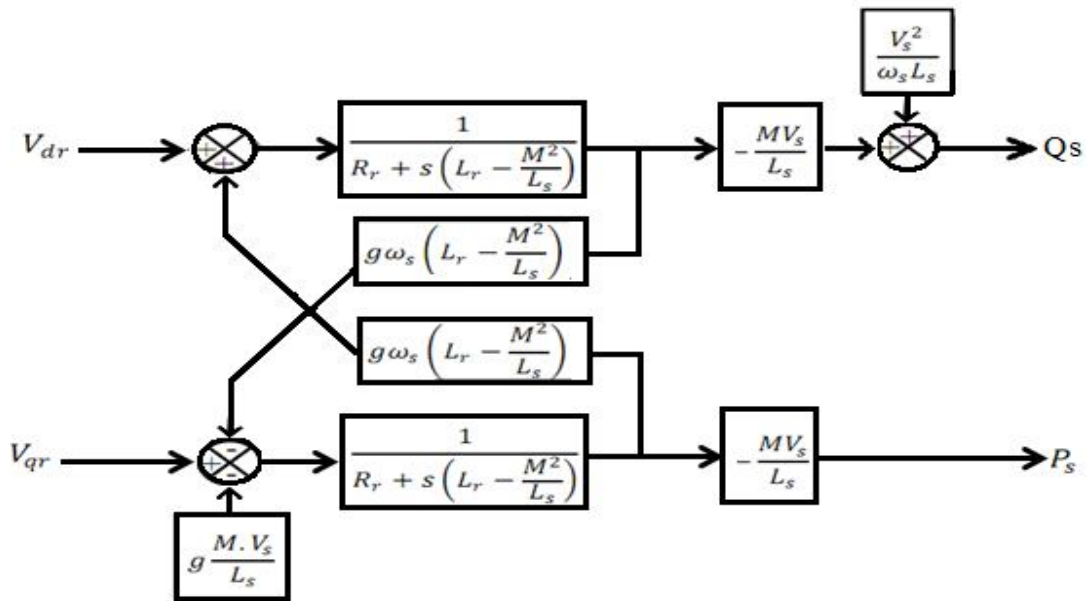


Figure IV-7:Schéma bloc de la GADA.

L'effet du terme de couplage $g \cdot \omega \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. En revanche, le terme $g \frac{M \cdot V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs[16][25][1][15].

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine:

- 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.

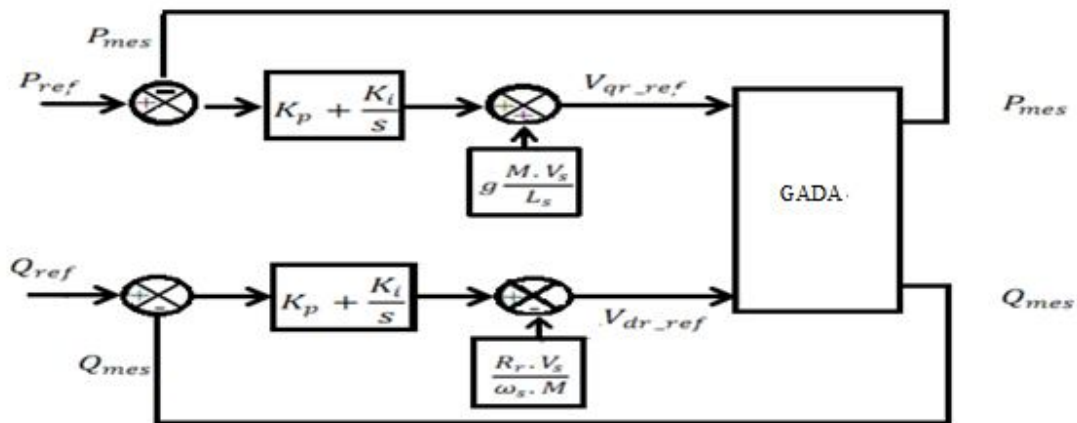


Figure IV-8: Schéma bloc de la commande directe.

- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

IV.10.4 - Commande indirecte de la GADA :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler est présenté dans la figure (IV-7). En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens.

IV.10.4.1 - Commande sans boucle de puissance :

Pour obtenir une bonne stabilité du système on introduit une boucle de régulation des courants rotoriques figure (IV-9) dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

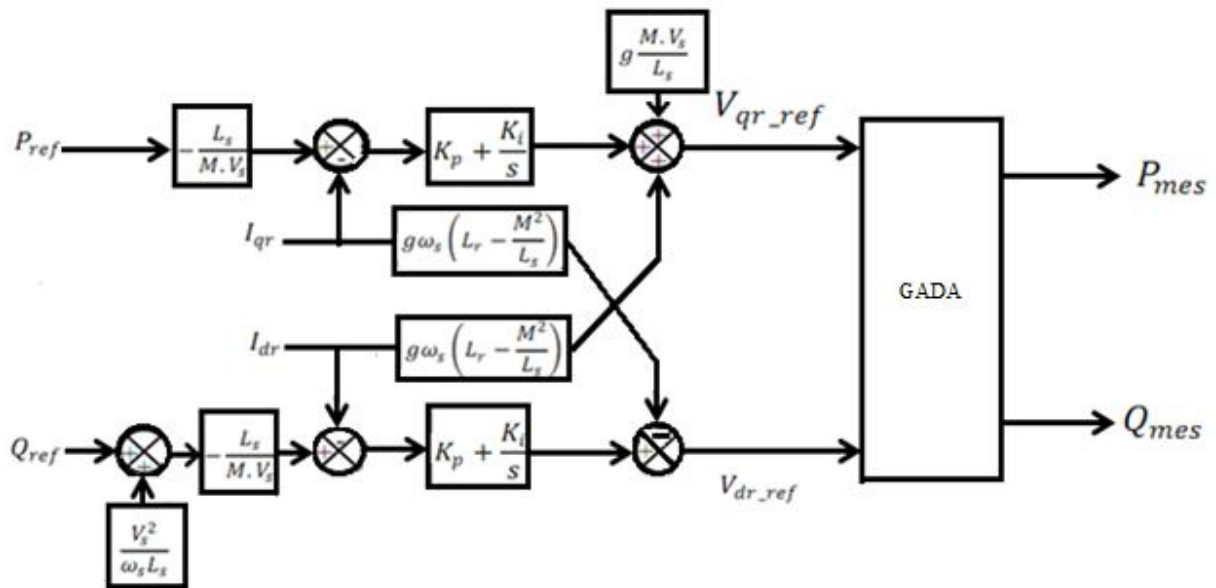


Figure IV-9: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance rotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Pour cela et pour conserver l'orientation du flux exigé par la commande vectorielle, on doit étudier une boucle de régulation de courant. Ainsi, nous allons mettre en place une boucle de régulation en puissance indépendante, tout en compensant les termes de perturbations

$\left(g \frac{M.V_s}{L_s} \text{ et } \frac{V_s^2}{\omega_s.L_s} \right)$ Afin d'obtenir un bon fonctionnement avec amélioration des performances du système.

IV.10.4.2 - Commande avec boucles de puissance :

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté dans la figure (IV-10) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

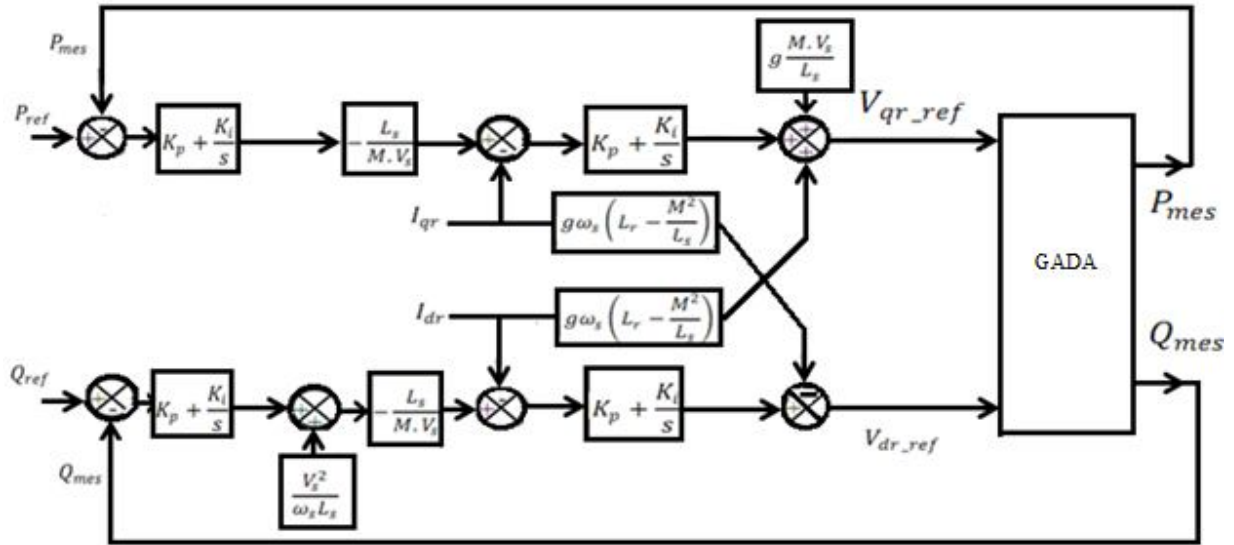


Figure IV-10: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

IV.11 - Type de régulateur :

Dans plusieurs structures de commande telles que celles utilisées dans [16][15][30], des régulateurs PI sont utilisés pour commander la GADA. On adopte l'utilisation de ces derniers pour leurs simplicité, rapidité et facilité à mettre en œuvre, du fait que leurs performances sont suffisamment acceptables. Le calcul de leurs gains est représenté dans l'annexe (C), dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives, ainsi que les courants rotoriques.

IV.12 - Le convertisseur :

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor (figure IV-11) où les signaux de commande résultent de l'application de la commande vectorielle de la GADA, afin de régler simultanément la fréquence et la tension. Dans notre étude, l'onduleur est supposé parfait.

IV.13 – Simulations :

Le modèle de la machine, ainsi que celui du convertisseur sont implantés dans Matlab Simulink afin de montrer et analyser les performances de la commande vectorielle à flux statorique orienté, en faisant une comparaison des différentes méthodes étudiées auparavant.

IV.13.1 - Conditions de simulation :

La machine est entraînée à une vitesse fixe de 800 tr/min, alimentée au rotor par un convertisseur à deux niveaux dont la tension continue est fixée à 600V.

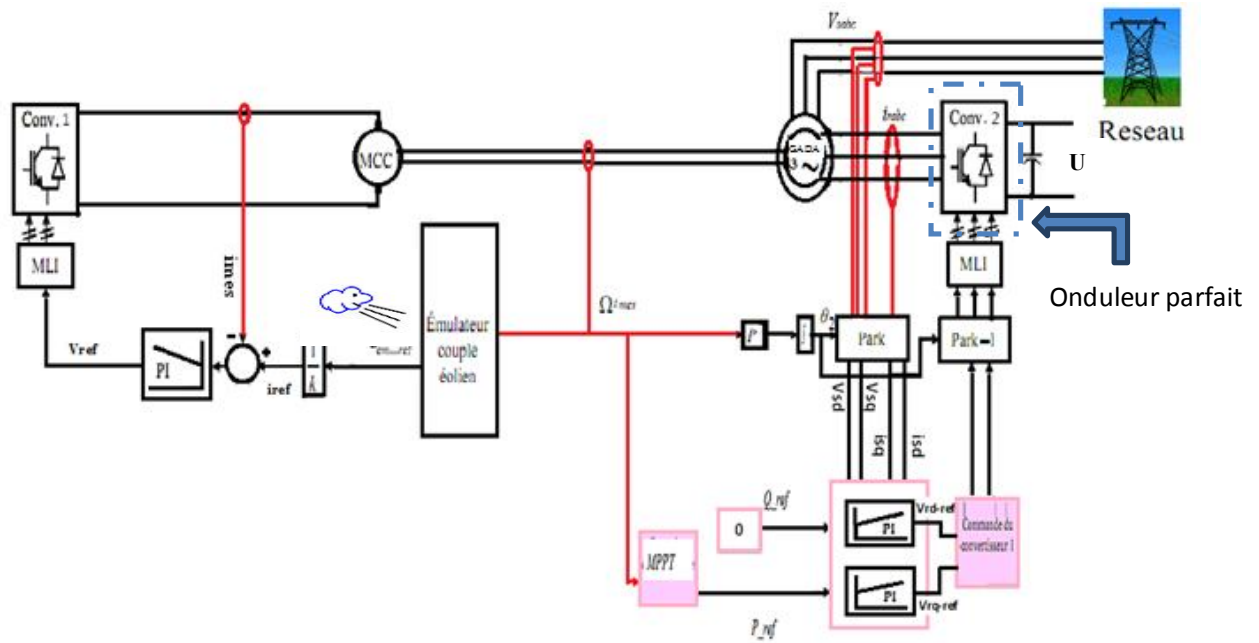


Figure IV-11: Schéma de commande du générateur éolien.

IV.13.2 - Résultats obtenus :

IV.13.2.1 -Commande vectorielledirecte de la GADA :

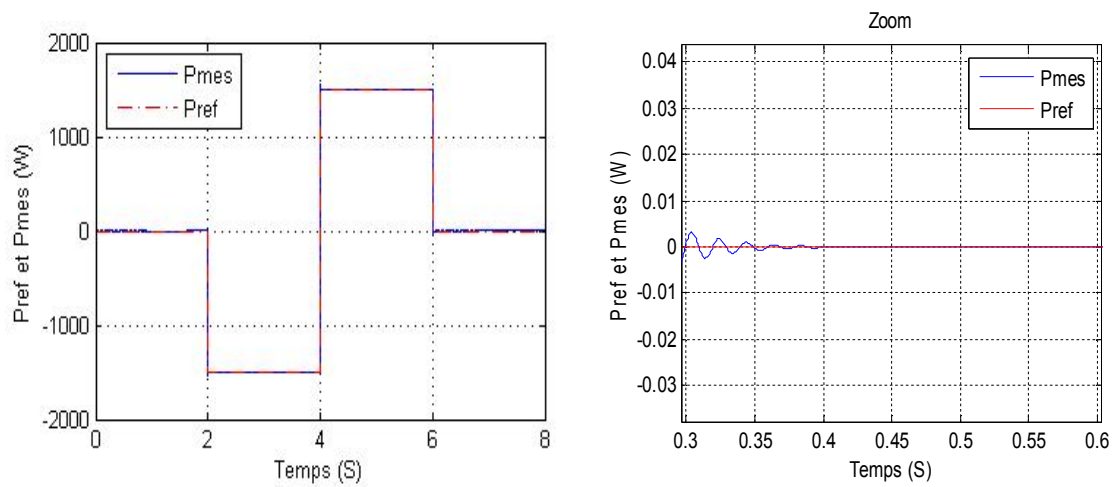


Figure IV- 12 : Puissances actives Préf et Pmes

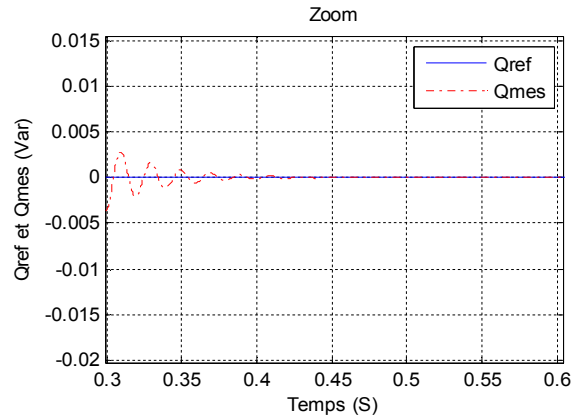
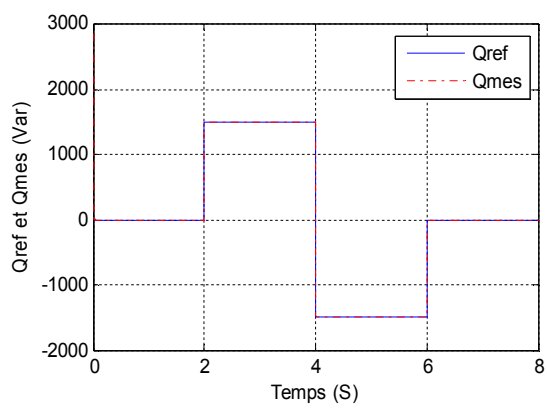


Figure IV-13 :Puissances réactives Qréf et Qmes.

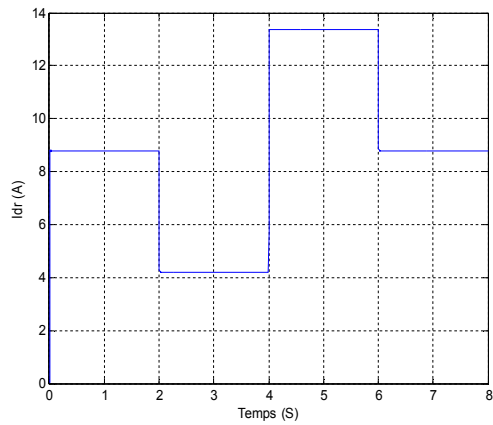


Figure IV-14: Courant Idr

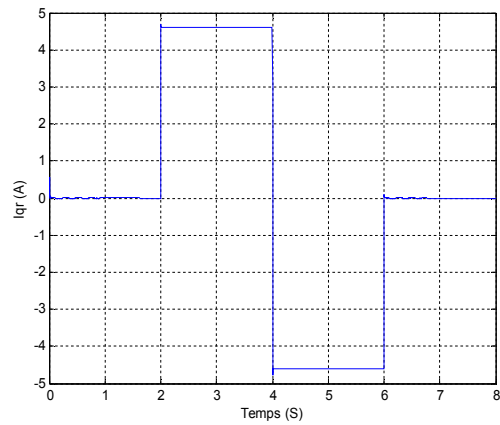


Figure IV-15 :Courant Iqr

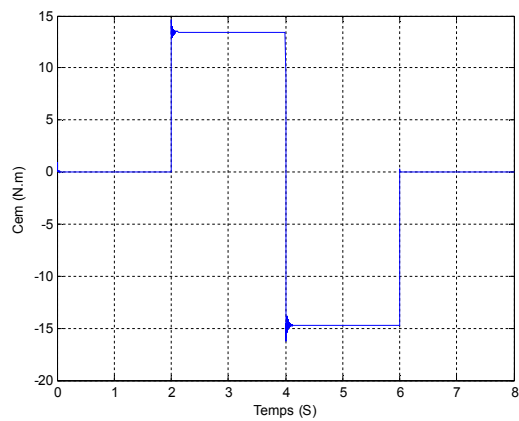


Figure IV-16 :Couple de la génératrice.

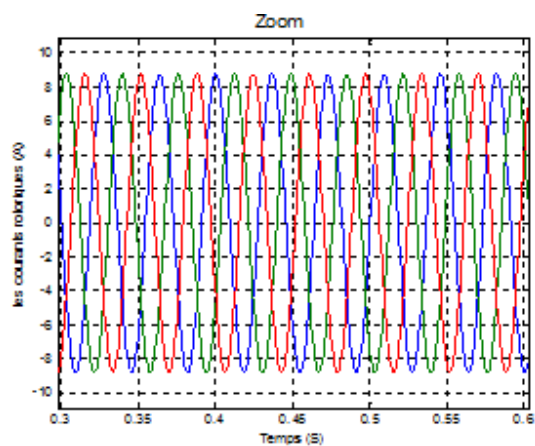
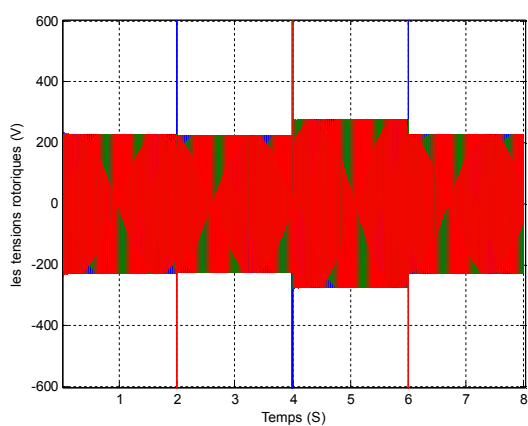


Figure IV-17 : Tensions rotoriques.

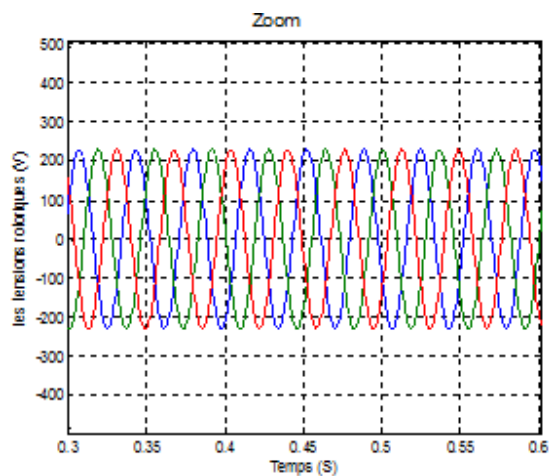
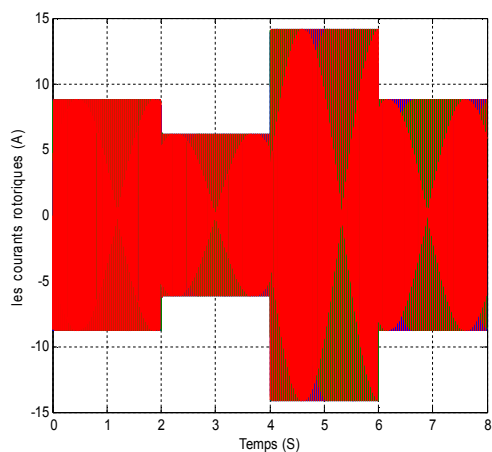


Figure IV-18 : Courants rotoriques.

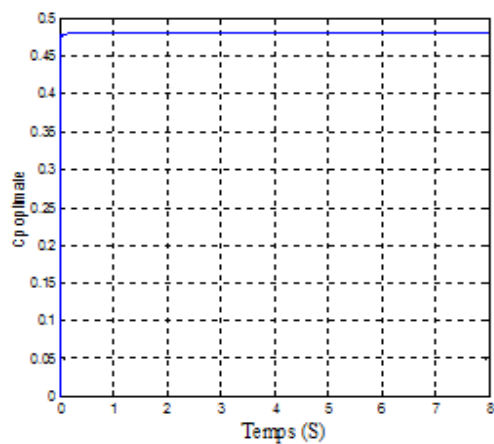


Figure IV-19 : Coefficient de puissance C_p optimale.

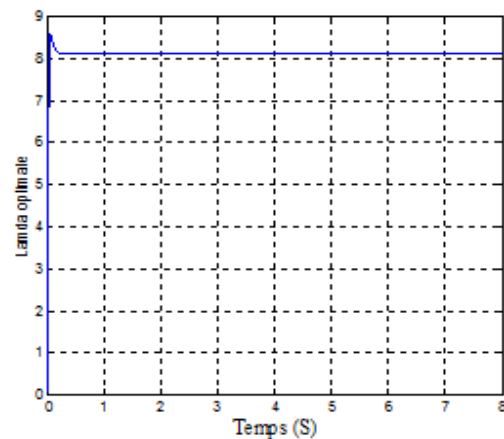


Figure IV-20 : Rapport de vitesse λ optimale.

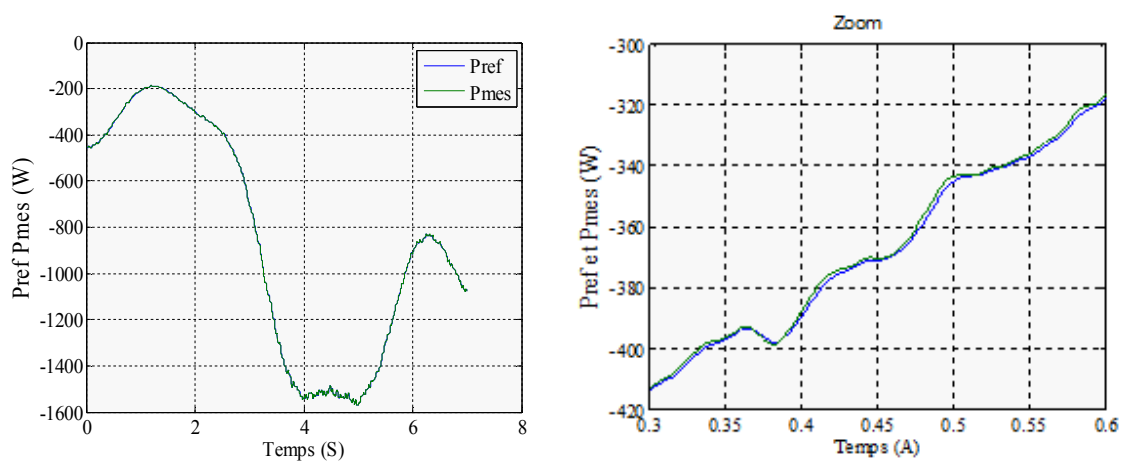


Figure IV-21 :Puissances actives Préf et Pmes.

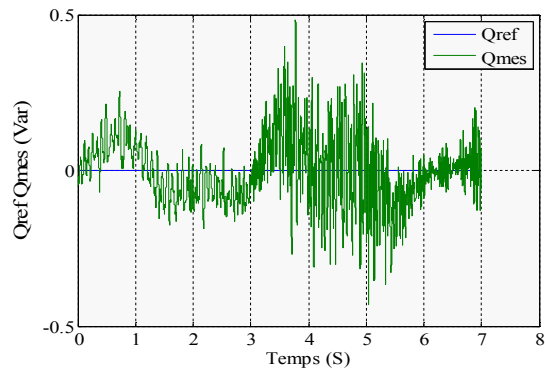


Figure IV-22:Puissances réactivesQréf et Qmes

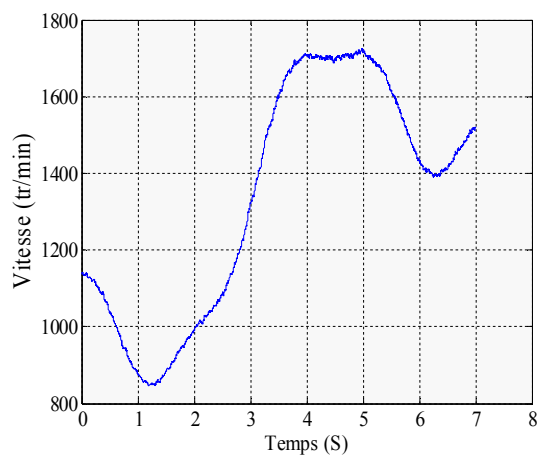


Figure IV-23: Vitesse de l'émulateur

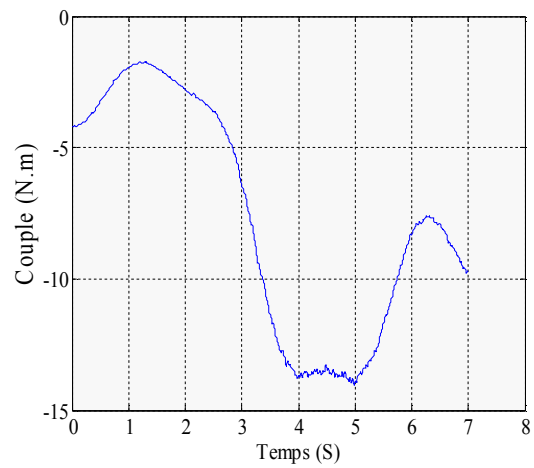


Figure IV-24:Couple de la génératrice.

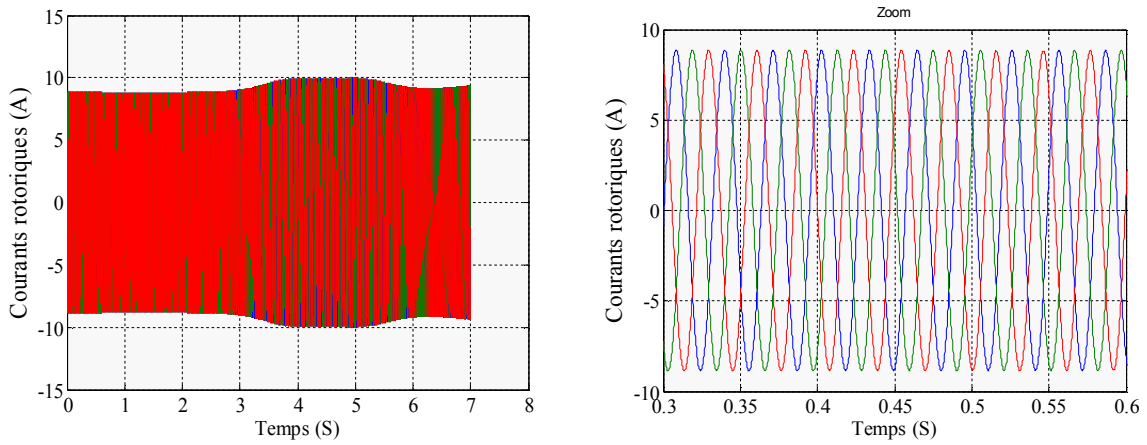


Figure IV-25: Courants rotoriques

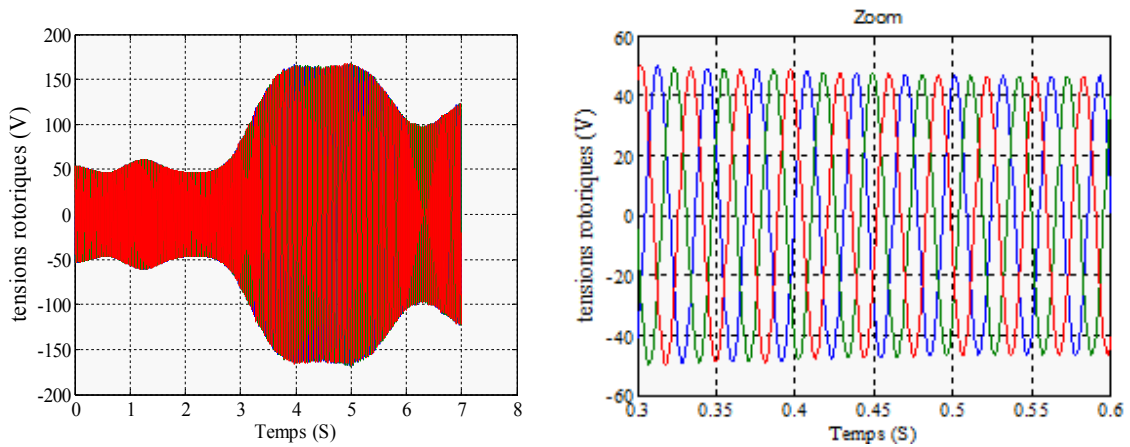


Figure IV-26: Tensions rotoriques.

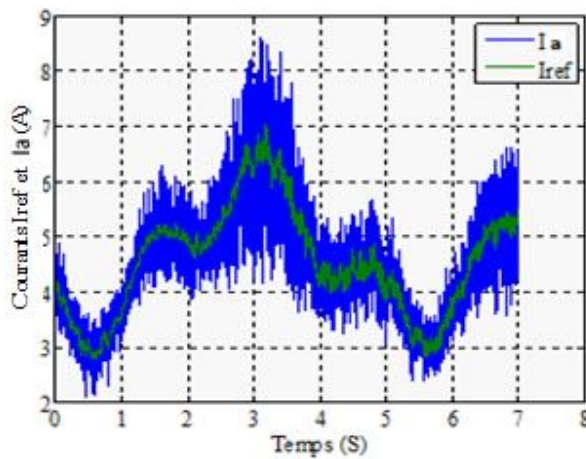


Figure IV-27: Courants Iréf et Ia

IV.13.2.2 -Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation présentent différentes courbes, obtenues par la commande directe des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la GADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances du générateur.

D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant les régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactives au niveau du stator.

Après le régime transitoire, on note une bonne poursuite des allures aux valeurs de références imposées dans le cas d'un entraînement à vitesse constante.

On remarque que les échelons des puissances sont bien suivis par la génératrice pour les deux puissances (active et réactive), cependant on observe l'effet de découplage entre ces dernières, car un échelon imposé à l'une des deux puissances (P ou Q) induit de faibles oscillations sur la seconde.

En outre, une proportionnalité apparaît entre le courant rotorique en quadrature I_{qr} et la puissance active, d'autre part le courant direct I_{dr} est l'image de la puissance réactive.

On note que le couple électromagnétique réagit spontanément quand il y a une demande en puissance active, indépendamment de la puissance réactive.

IV.13.2.3 - Commande vectorielle indirecte de la GADA sans boucle de puissances :

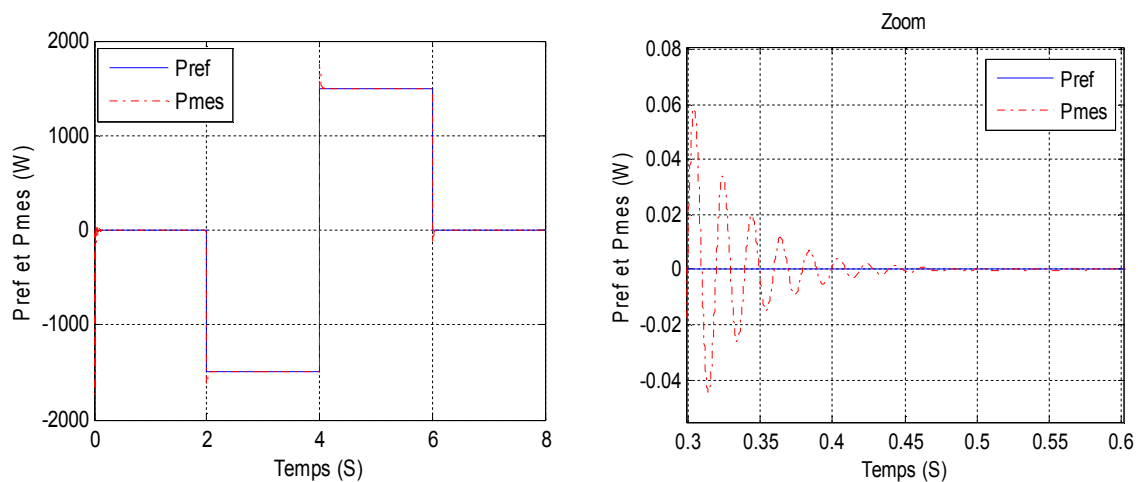


Figure IV- 28 : Puissances actives Préf et Pmes

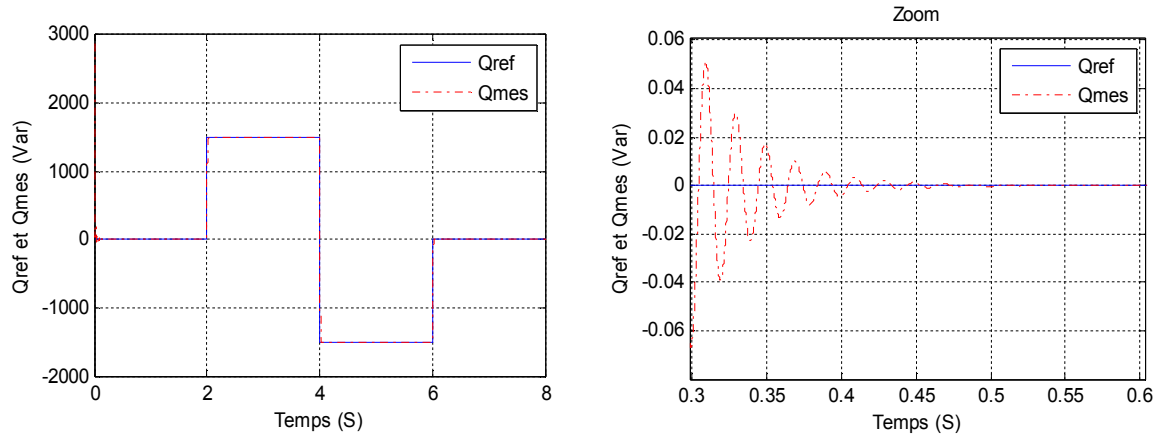


Figure IV-29 :Puissances réactives Q_{ref} et Q_{mes}

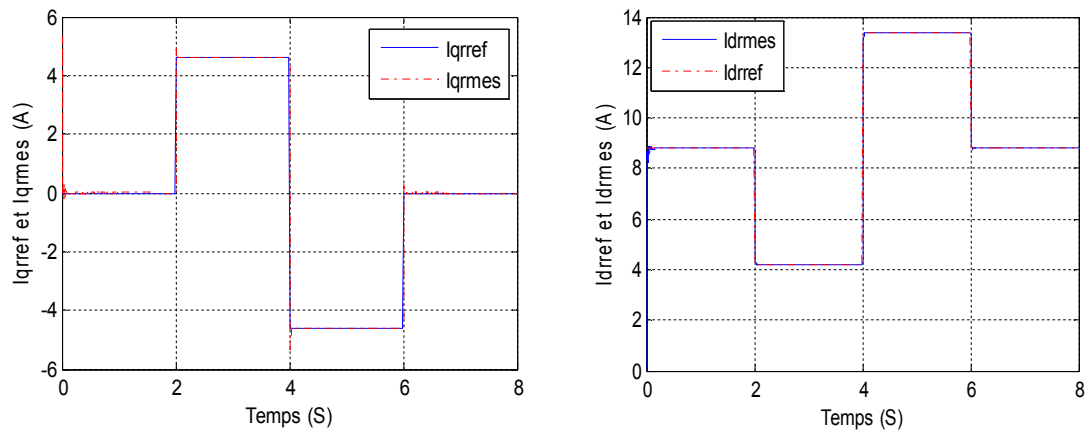


Figure IV-30: Courants rotoriques I_{qref} et I_{qmes} Figure IV-31 : Courants rotoriques I_{dref} et I_{dmes}

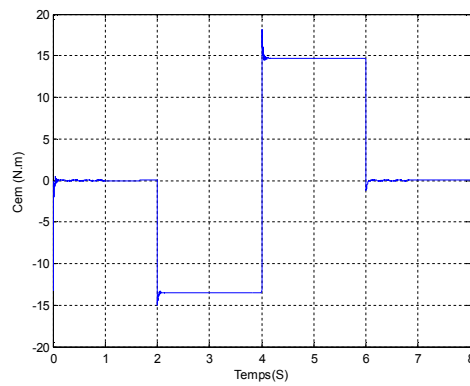


Figure IV-32: Couple de la génératrice.

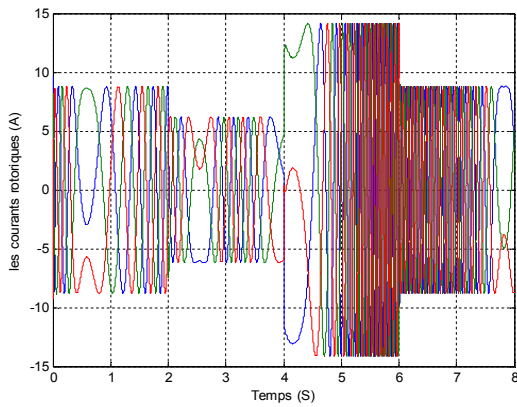


Figure IV-33 : Courants rotoriques

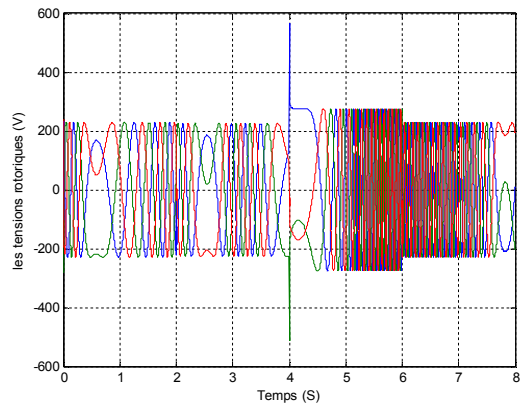


Figure IV-34 : Tensions rotoriques

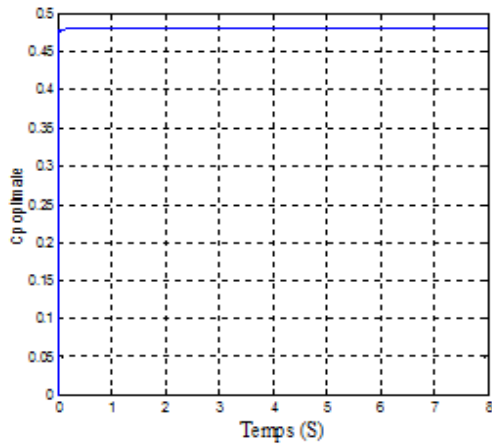


Figure IV-35 : Coefficient de puissance C_p optimale

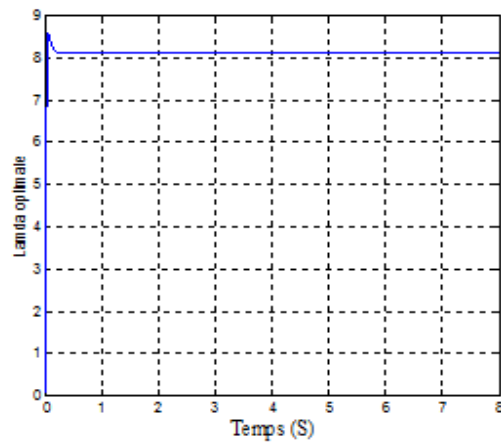


Figure IV-36 : Rapport de vitesse λ optimale

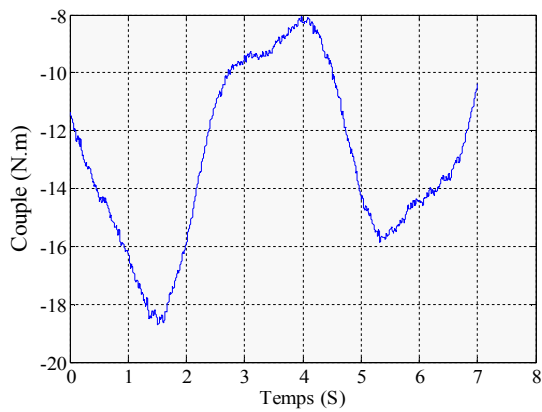


Figure IV-37: Couple de la génératrice.

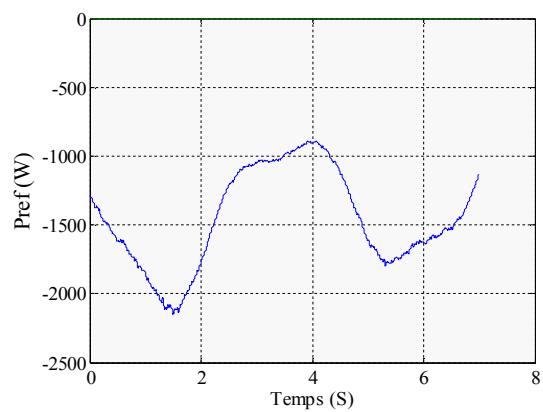


Figure IV-38: Puissance optimale de l'émulateur.

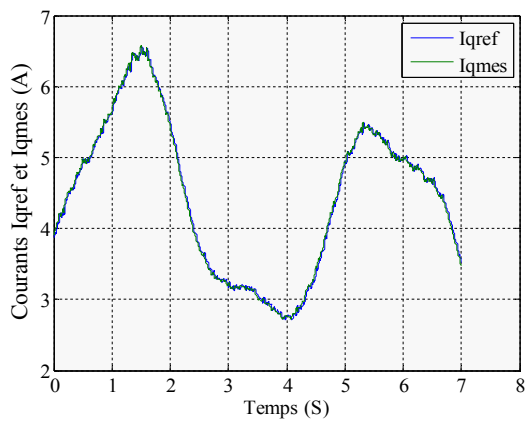


Figure IV-39: Courants I_{qref} et I_{qmes}

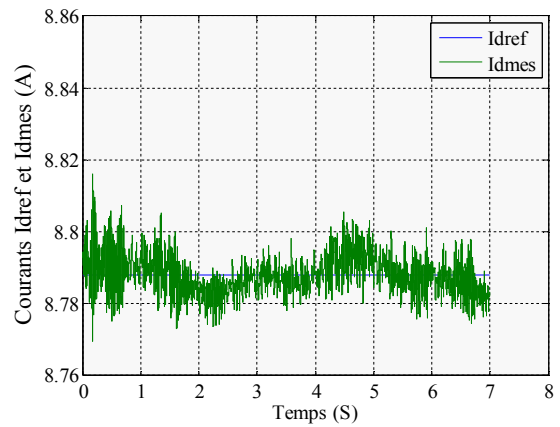


Figure IV-40: Courants I_{dref} et I_{dmes}

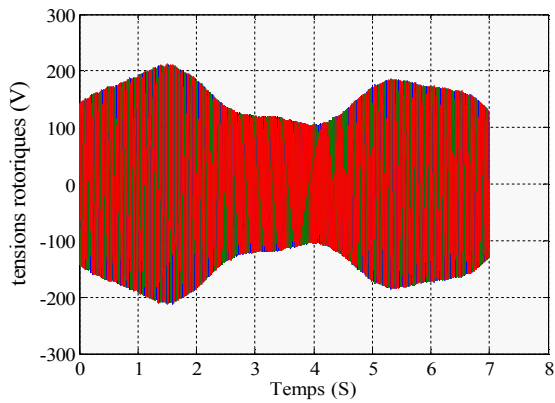


Figure IV-41: Tensions rotoriques

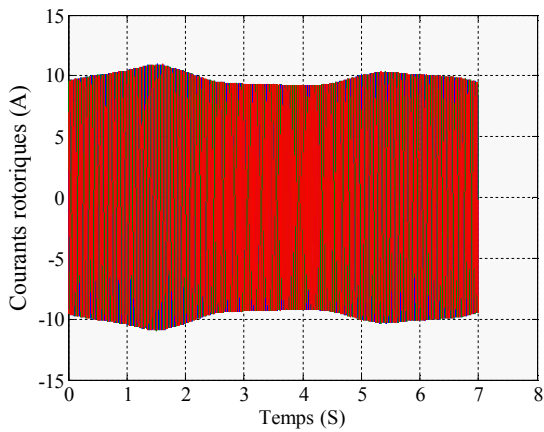
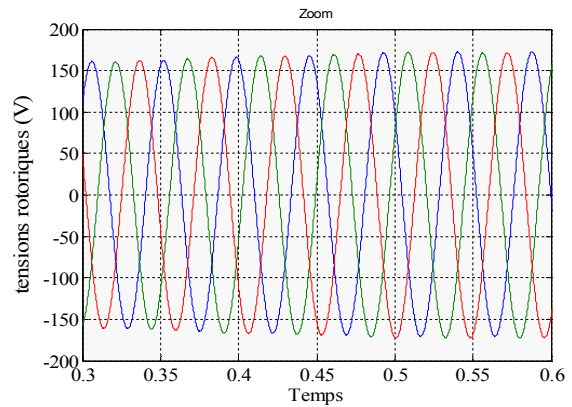
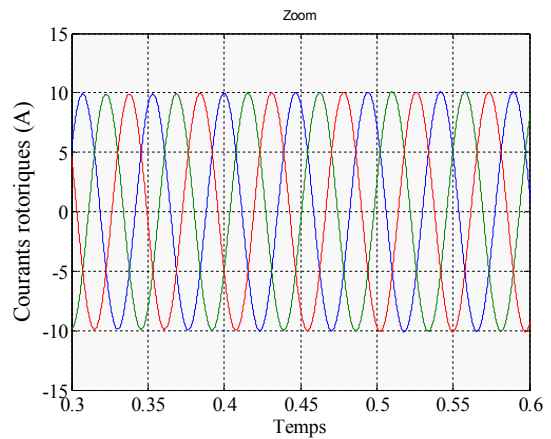


Figure IV-42: Courants rotoriques



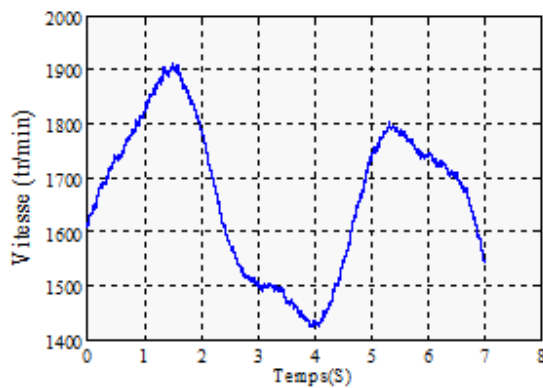


Figure IV-43: Vitesse de l'émulateur

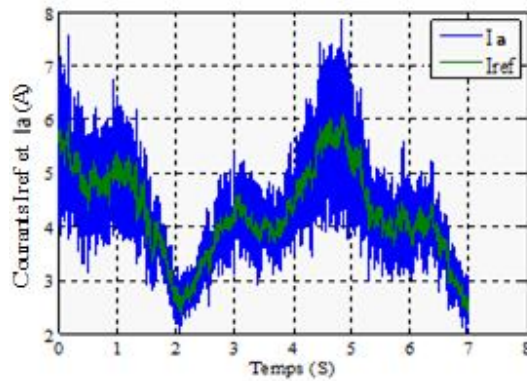


Figure IV-44: Courants Iréf et Ia

IV.13.2.4 -Interprétationdes résultats :

Les résultats obtenus de la simulation, montrent bien les grandes performances du contrôle indirecte des puissances (actives et réactives) sans boucle de puissance. Ce qui est confirmé par le découplage parfait, la bonne poursuite des allures de puissances (active et réactive) ainsi que les allures de courant avec ces références.

Nous pouvons également observer l'effet ducouplage entre ces deux puissances, car un échelon imposé à l'une des deuxpuissances induit de faibles oscillations sur la seconde. Ceci est due au fait que dans ce mode de contrôle, les puissances ne sont pas mesurées directement, mais plutôt reconstruite à partir de la mesure des courants rotoriques, c'est-à-dire que les puissances sont restées en boucle ouverte. Ce sont en effet ces mêmes courants qui sont asservis.

IV.13.2.5 - Commande vectorielle indirecte de la GADA avec boucles de puissances :

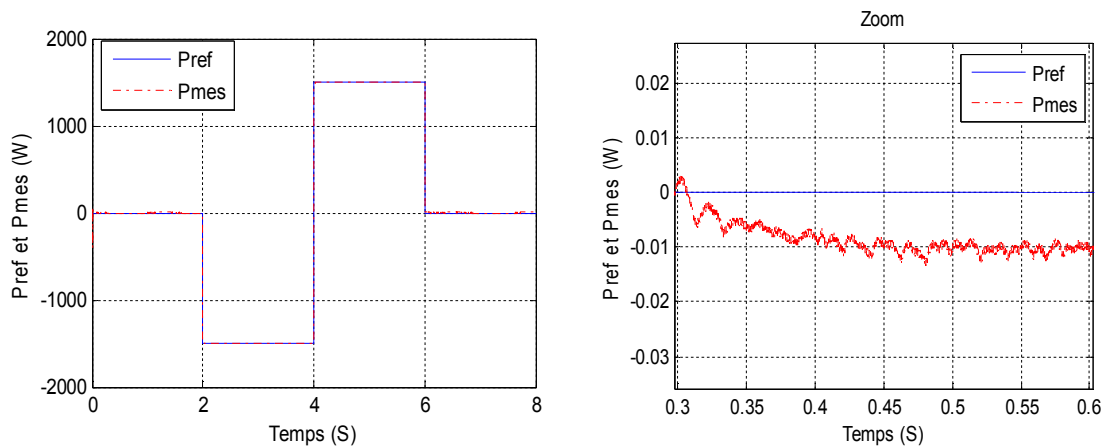


Figure IV-45 : Puissances actives Préf et Pmes

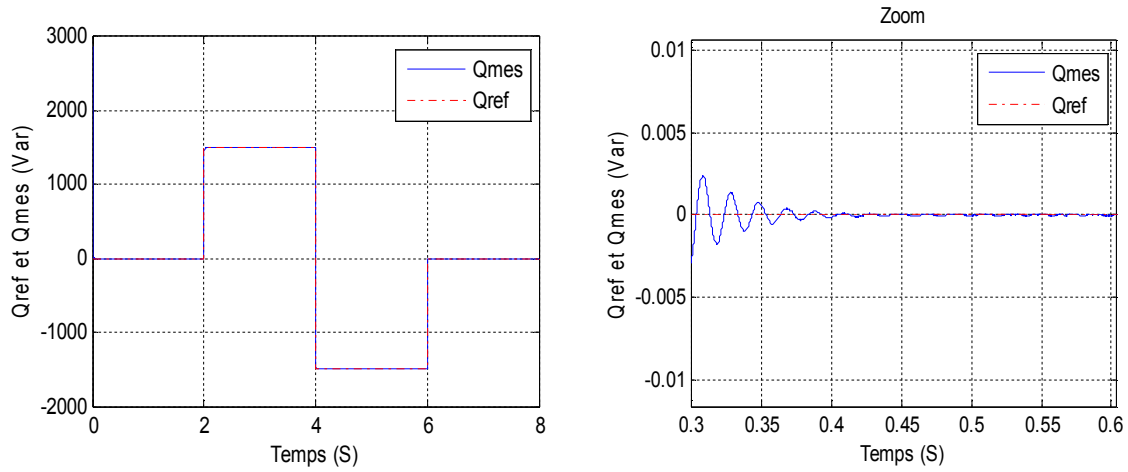


Figure IV-46: Puissances réactives Q_{ref} et Q_{mes}

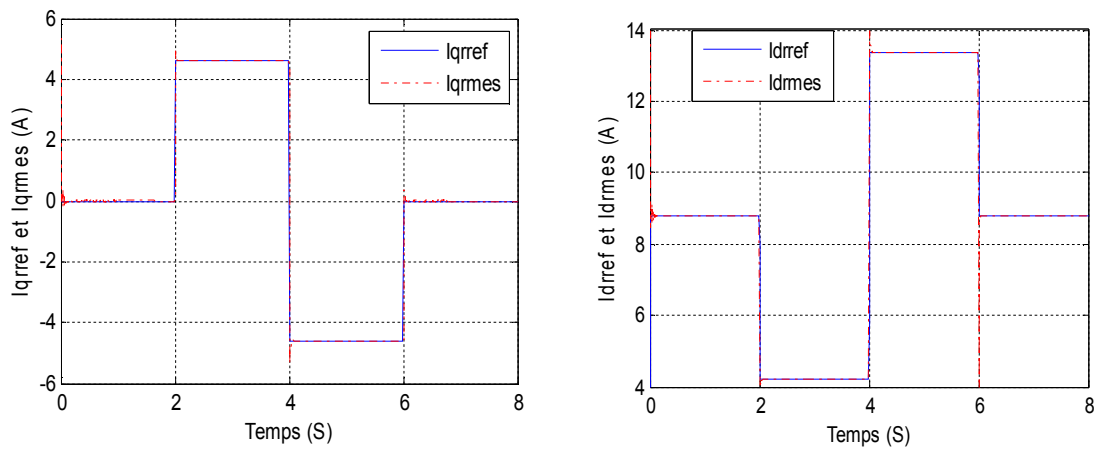


Figure IV-47 : Courant rotoriques i_{qref} et i_{qmes} Figure IV-48 : Courant rotoriques i_{dref} et i_{dmes}

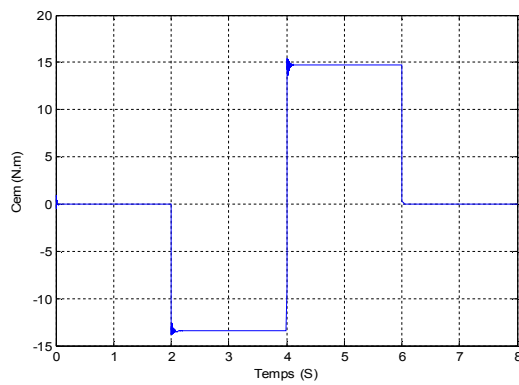


Figure IV-49: Couple de la génératrice.

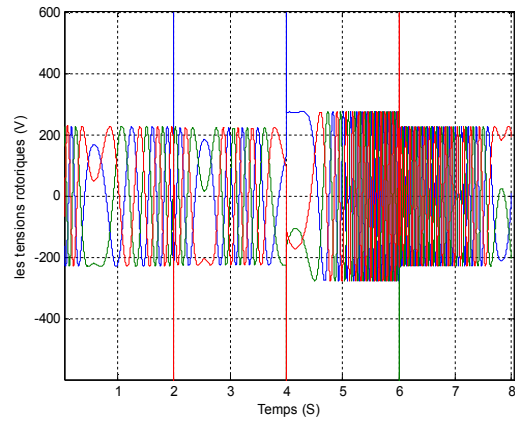
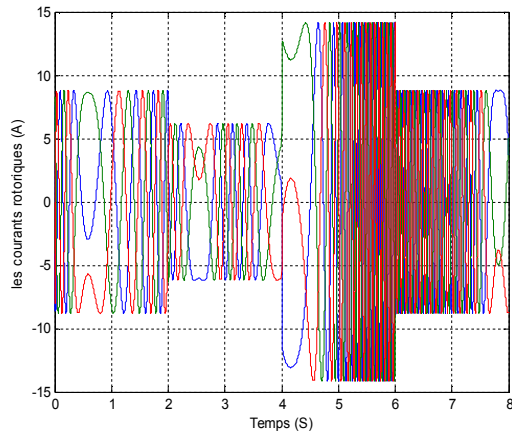


Figure IV-50 :Courants rotoriques Figure IV-51 :Tensions rotoriques

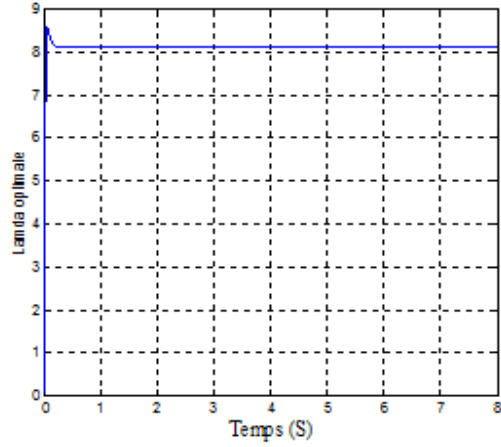
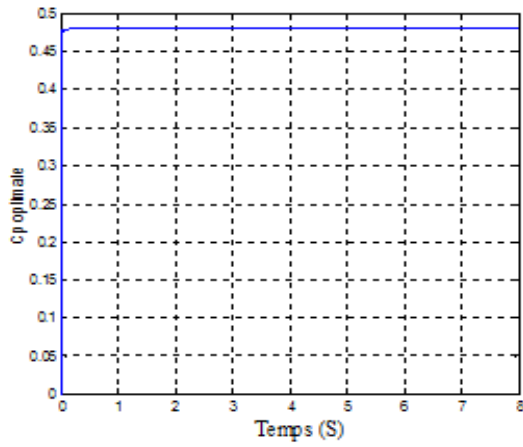


Figure IV-52 :Coefficient de puissance Cp optimale Figure IV-53 :Rapport de vitesse optimale

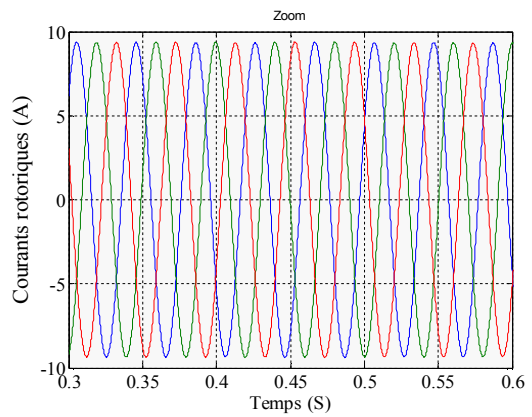
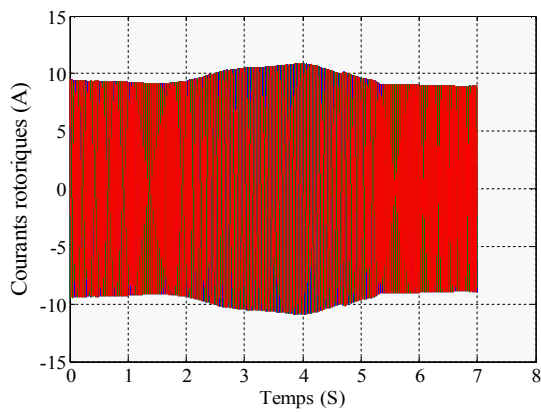


Figure IV-54: Courants rotoriques

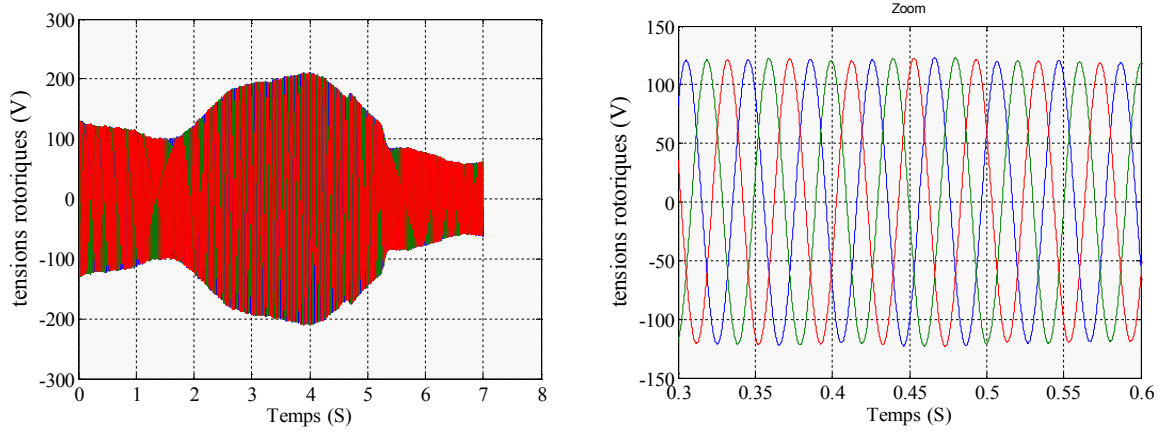


Figure IV-55 :Tensions rotoriques.

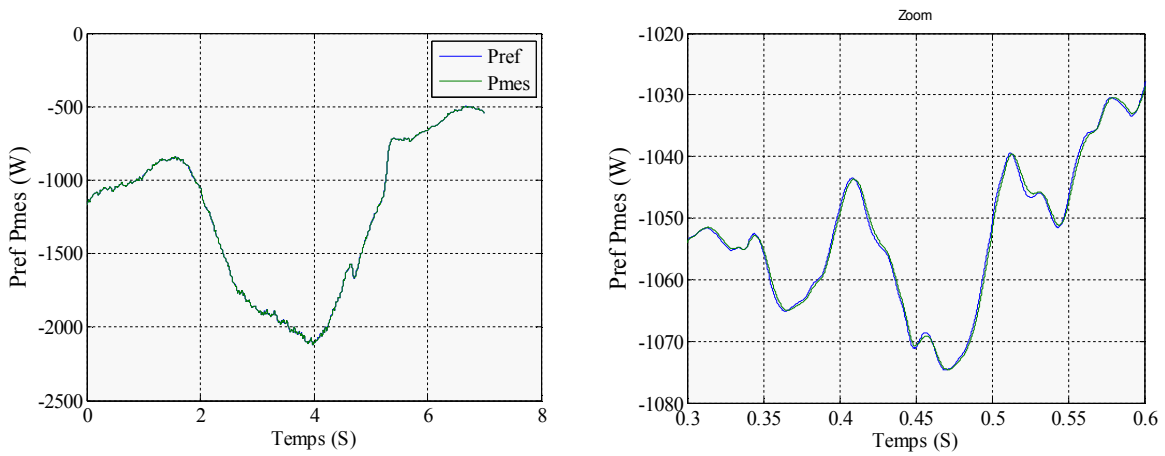


Figure IV-56: Puissances actives Préf et Pmes.

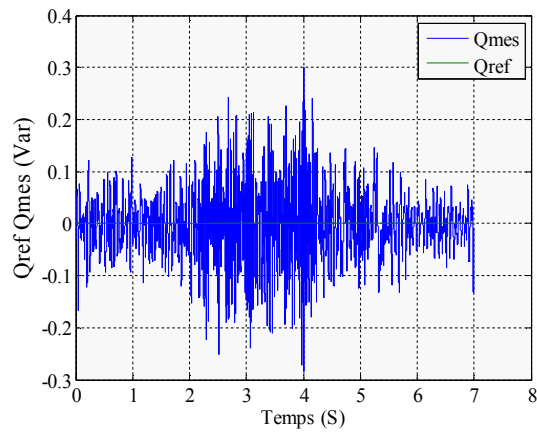


Figure IV-57:Puissances réactivesQréf et Qmes.

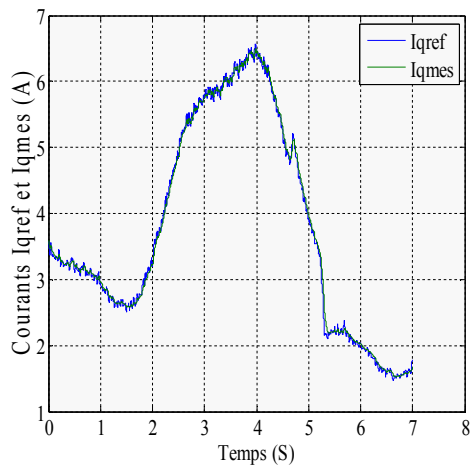


Figure IV-58: Courants rotoriques I_{qref} et I_{qmes}

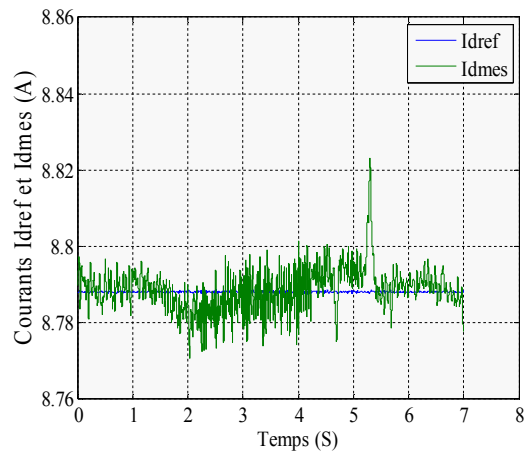


Figure IV-59: Courants rotoriques I_{dref} et I_{dmes}

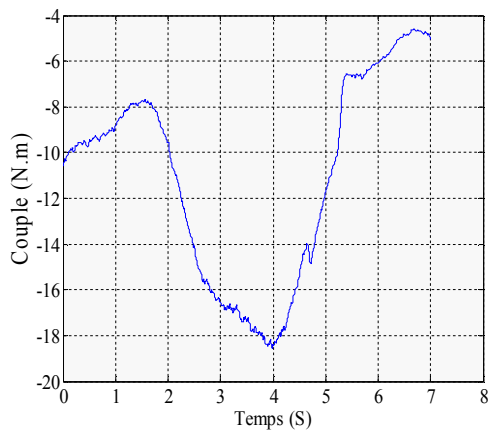


Figure IV-60: Couple de la génératrice.

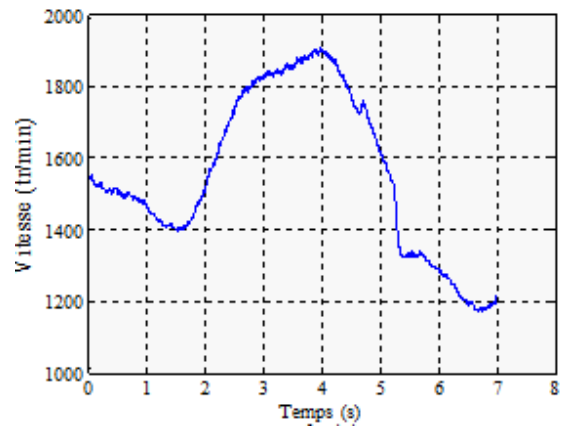


Figure IV-61: Vitesse de l'émulateur.

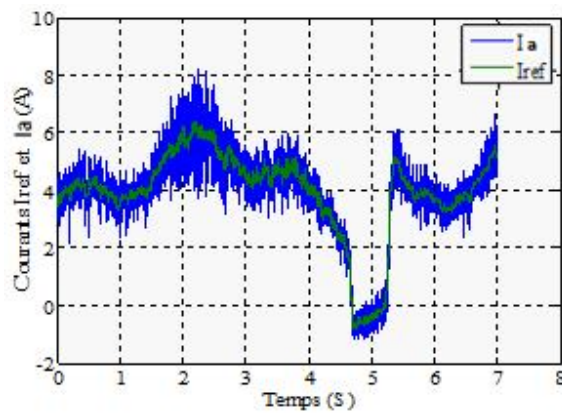


Figure IV-62: Courants I_{ref} et I_a .

IV.13.2.6 -Interprétation des résultats :

Cette commande est plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances (active et réactive).

Les figures ci-dessus montrent les performances du contrôle indépendant des puissances active et réactive appliquées à une Génératrice Asynchrone Doublement Alimenté.

On constate que ces puissances suivent correctement leurs références, ainsi que les courants rotoriques (I_{rd} , I_{rq}).

En outre, une proportionnalité apparaît entre le courant rotorique en quadrature I_{qr} et la puissance active, d'autre part le courant direct I_{dr} est l'image de la puissance réactive.

On note que le couple électromagnétique réagit spontanément quand il y a une demande en puissance active, indépendamment de la puissance réactive.

Les figures présentées dans cette section démontrent que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle. Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreurs sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est annulé et peu perceptible par rapport au constat des commandes direct et indirect sans boucle de puissance.

Le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance négative (mode capacitif), nulle ou positive (mode inductif).

Nous avons vu que la commande vectorielle directe, la plus simple à mettre en œuvre, présentait des résultats convenables. En revanche, la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance nous permet d'obtenir un système plus performant. Cette commande est plus complexe à mettre en œuvre, mais elle permet un fonctionnement optimal outre qu'elle protège la machine des surintensités.

IV.14 – Conclusion :

Ce chapitre fournit une analyse théorique, modélisation et simulation détaillées de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation. Le caractère spécifique de la GADA qui

s'apparente à celui des machines synchrone et asynchrone, donne lieu à des difficultés de modélisation et de commande.

En premier lieu, nous avons vu brièvement une description générale de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation précisant ainsi sa constitution, sa structure, son principe et son mode de fonctionnement.

Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale qui est obtenu par des transformations de passage d'un système triphasé à un système biphasé. Du point de vue de la modélisation, le modèle d'état de la machine obtenu est un modèle non linéaire fortement couplé.

En ce qui concerne la deuxième partie de ce chapitre qui nous a permis d'établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation. Trois modes de contrôles sont détaillés en utilisant un régulateur proportionnel intégral (PI). La commande directe, est basée sur l'hypothèse d'un découplage parfait entre les deux axes directs et en quadratures et la commande indirecte avec et sans boucle de puissances, tiennent compte du couplage entre les axes et utilise des termes de compensation pour la corriger.

Le développement de différentes méthodes de commande a permis de mettre en évidence des aspects intéressants pour la poursuite de l'étude du système éolien. Effectivement, nous avons pu voir que la commande directe nous a donné des résultats satisfaisants avec une facilité de mise en service. En revanche, la commande indirecte avec boucle de puissance reste plus complexe à mettre en œuvre.

Annexe A

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude et l'exploitation de nouvelles sources d'énergie non polluantes. L'objectif visé est la modélisation d'un système éolien, ainsi que la réalisation d'un émulateur de turbine éolienne à base de la commande en couple d'une machine à courant continu. Cet émulateur est associé à une Génératrice Asynchrone à Double Alimentations dont le fonctionnement est étudié dans un contexte éolien.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion éolienne. Les différents composants d'une turbine éolienne sont présentés et expliqués en premier lieu, ensuite un aperçu est donné sur les différentes associations machines électriques-convertisseurs statiques pouvant être accouplées à une éolienne pour expliquer la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique tout en mettant en relief les avantages et inconvénients de chaque dispositif.

Dans la seconde partie de ce mémoire, nous avons décrit les étapes de modélisation d'une turbine éolienne dans le but d'entraîner une machine à courant continu destinée à reproduire les variations de couple d'une éolienne. Dans un premier temps nous avons généré un modèle permettant de reproduire les variations de la vitesse du vent. Ces variations sont appliquées ensuite à un modèle de turbine basé sur les équations donnant le couple éolien en fonction de la densité de l'air, du coefficient de puissance de l'éolienne, de la vitesse du vent et de la longueur d'une pale.

Nous avons présenté les résultats de simulation numériques de la commande du modèle de la turbine. Ces résultats viennent montrer que le couple mécanique et la vitesse de rotation obtenus à la sortie de l'émulateur sont fluctuants suivent les variations du vent appliqué au modèle de la turbine.

Notre étude s'est focalisée sur la conception de l'émulateur de la turbine éolienne en utilisant le principe connu par: HILS (Hardware In the Loop Simulation), sur lequel le développement des stratégies de commandes est effectué. Pour compléter nos investigations expérimentales, le comportement dynamique d'une telle turbine a été reproduit de façon simplifiée sur « un émulateur physique ».

Des résultats expérimentaux ont été présentés pour illustrer la fonctionnalité de l'émulateur de la turbine éolienne à base d'une association machine à courant continu - hacheur à quatre quadrants, qui sont comparés avec des résultats de simulation.

Annexe A

Comme perspectives de ce travail nous proposons :

- L'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la GADA ;
- Elaboration de système de stockage et voire son effet sur la régulation des puissances injectés aux réseaux ;
- Etude de la possibilité d'utilisation des systèmes éoliens comme étant des compensateurs de puissances réactives ;
- L'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis des déséquilibres du réseau électrique ;
- Etude des systèmes de production hybride tels queles systèmes(éolienne-photovoltaïque).

Annexe A

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

[Titre du document]

- [1] S. METATLA, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de Magister, École nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [2] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [3] G. AGGOUN, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », Mémoire de Magister, Université Mouloud MAMMOURI, Tizi-Ouzou.
- [4] L. KHETTACHE, « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2007.
- [5] L. LOUZE, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », Thèse de Doctorat, Université MENTOURI - Constantine, 2010.
- [6] O. GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [7] A. MAAFA, « Etude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2011.
- [8] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, et others, « Etat de l'art des aérogénérateurs », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », 2002.
- [9] D. H. TRAN, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne 'passive': analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [10] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, et H. B. Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », *Techniques de l'Ingénieur*, D 3 960, 2004.

Annexe A

- [11] HASSINI née BELGHITRI Houda, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [12] N. K. MERZOUK, « Evaluation du Gisement Energétique Eolien-Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie », Thèse de Doctorat, Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2006.
- [13] S. Al AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées à un réseau de distribution moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille; Université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [14] I. HAMZAOUI, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [15] A. S. BELFEDHAL, « Modélisation et commande d'une chaîne éolienne avec intégration du stockage inertiel », Mémoire de Magister, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2010.
- [16] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.
- [17] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [18] B. BELTRAN, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat, Université de BRETAGNE OCCIDENTALE, 2010.
- [19] E. HAU, « *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* ». Birkhäuser, 2006.
- [20] I. MUNTEANU, « *Optimal control of wind energy systems: towards a global approach* ». Springer Verlag, 2008.
- [21] S. MATHEW, « *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics* ». Springer Verlag, 2006.
- [22] M. LOPEZ, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, 2008.

Annexe A

- [23] A. MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [24] K. FERKOUS, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister, Université MENTOURI- Constantine, 2009.
- [25] R. KEZERLI, « Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux », Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie « HOUARI BOUMEDIENE », 2009.
- [26] F. AKEL, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire de Magister, Ecole militaire polytechnique d'Alger, 2009.
- [27] A. DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, 2008.
- [28] R. REDJEM, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de Constantine, 2009.
- [29] T. DOUADI, « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone », Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [30] F. MERRAHI, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) », Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [31] L. CHANG, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », *IEEE Canadian Review*, p. 1-5, 2002.
- [32] M. Rapin et J.-M. Noël, « *Energie éolienne: principes, études de cas* ». Dunod, 2010.
- [33] T. DUC-HOAN, « Conception simultanée par optimisation d'une chaîne éolienne « passive »: Analyse de robustesse, validation expérimentale » Université de Toulouse Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, UMR CNRS-INPT-UPS n°5213
- [34] N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de Constantine, 2008.
- [35] B. TOUAL, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2010.

Annexe A

- [36] B. BOUKHEZZAR, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Université ParisXI Orsay, 2006.
- [37] R. I. Ovando, J. Aguayo, et M. Cotorogea, « Emulation of a low power wind turbine with a DC motor in Matlab/Simulink », in *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE*, 2007, p. 859–864.
- [38] Y. HASNI et M. CHAABENE, « Réseau électrique hybride autonome: Supervision et gestion des sources » International Renewable Energy Congress November 5-7, 2010 – Sousse, Tunisia.
- [39] L. LECLERCQ, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2004.
- [40] K. GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale polytechnique d'Alger, 2008.
- [41] H. CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003.
- [42] F. J. Poza Lobo, « Modélisation, Conception et Commande d'une Machine Asynchrone sans Balais Doublement Alimentée pour la Génération à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [43] M. Monfared, H. Madadi Kojabadi, H. Rastegar, « Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor », *Renewable Energy*, vol. 33, n^o. 5, p. 906–913, 2008.
- [44] V. COURTECUISSSE, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [45] C. Saudemont, L. Leclercq, B. Robyns, G. Cimuca, et M. M. Radulescu, « Développement d'un émulateur Temps Réel d'un Système de Génération Eolienne Associé à un Stockage Inertiel d'Énergie », *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique ISSN*, p. 1265–6534, 2004.

Annexe A

- [46] G. O. CIMUCA, « Système inertiel de stockage d'énergie associé a des générateurs éoliens »,Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2005.
- [47] A. GOUICHICHE, « Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone à Base d'Observateur. Etude expérimentale », Mémoire de Magister, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2010.
- [48] 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 », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille et l'Ecole militaire polytechnique d'Alger, 2011.
- [49] M. M. ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [50] A. CHAIBA, « commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle »,Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [51] R. AZAIZIA, « Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux »,Mémoire de Magister, Université M'hamedBOUGARA Boumerdes, 2008.
- [52] L. BAGHLI, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques, », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 1999.
- [53] A.L. IMAD, « Contribution à la commande sans capteur de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2004.
- [54] B. AKIN, « State estimation techniques for speed sensorless field oriented control of induction motors », The Degree ofMaster of Science, Middle East technical University, 2003.
- [55] S. KHOJET EL KHIL, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) Optimisation des pertes dans les convertisseurs Reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé », Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse et L'Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, 2006.

ANNEXES

Annexe A

Annexe A

Caractéristiques des machines :

1- Caractéristiques de la machine à courant continu :

Les caractéristiques de la machine à courant continu sont données sur le tableau suivant :

Constructeur	Lucas – Nulle (Germany)
Type	SE2662-5E
Puissance nominale	1 KW
Vitesse nominale	4000 tr/mn
Courant nominal	8.3 A
Tension nominale	220V

Tableau A.3: Caractéristique de la machine à courant continu.

2- Paramètre de la machine à courant continu :

Les paramètres de la machine à courant continu sont résumés dans le tableau suivant :

Résistance d'induit R_a	1.9914 Ω
Inductance d'induit L_a	0.0881 H
Coefficient de frottements	0.00093 N.m.s ⁻¹
Moment d'inertie J_{mcc}	0.0114 kg.m ²
Constante de couple K	0.3434 Nm/A

Tableau A.4: Paramètres de la machine à courant continu.

3- Paramètre de la turbine :

Puissance	10kw
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale R	3m
Gain du multiplicateur G	5.4

Annexe A

L'inertie de la turbine J	0.042 Kg.m ²
Coefficient de viscosité f	0.017 N.m. s ⁻¹

Tableau A.5: Paramètre de la turbine

Annexe B

Synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI) :

Après avoir présenté les paramètres de la machine à courant continu, nous allons, dans cette annexe, développer la synthèse du régulateur proportionnel-intégral (PI) utilisé pour la commande de la machine à courant continu.

Le régulateur PI est un régulateur rapide et simple à mettre en œuvre. La figure suivante montre une boucle fermée du régulateur avec la machine à courant continu.

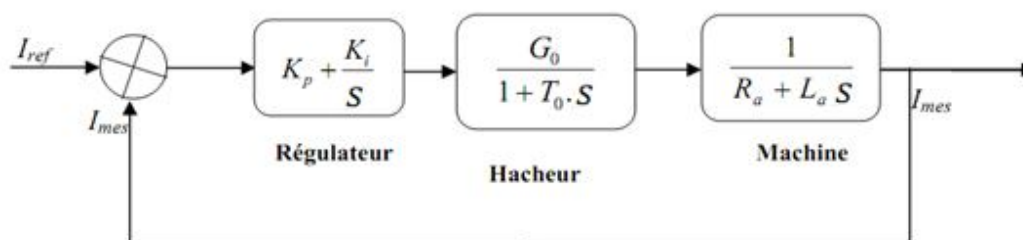


Figure B.25: Schéma bloc de la MCC régulée par un PI.

Avec :

K_i : Gain intégral.

T_0 : Constante de temps du convertisseur.

K_p : Gain proportionnel.

R_a : Résistance d'induit de la machine.

G_0 : Gain du convertisseur (hacheur).

L_a : Inductance d'induit de la machine.

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) \left(\frac{1}{R_a + S.L_a} \right) \quad (B.1)$$

$$FTBO = \frac{K_i \cdot \left(1 + \frac{K_p}{K_i} \cdot S \right)}{S} \cdot \frac{G_0}{1 + T_0 \cdot S} \cdot \frac{1}{R_a + \frac{L_a}{R_a} \cdot S} \quad (B.2)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_a}{R_a}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte deviendra alors :

Annexe B

$$FTBO = \frac{K_i}{S} \cdot \frac{G_0}{1+T_0 \cdot S} \quad (B.3)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$FTBO = \frac{FTBO}{1+FTBO} = \frac{\frac{G_0}{S(1+T_0 \cdot S)}}{1 + \frac{G_0}{S(1+T_0 \cdot S)}} \quad (B.4)$$

Avec $G = \frac{G_0 \cdot K_i}{R_a}$

$$FTBF = \frac{G_0}{S(1+T_0 \cdot S) + G} = \frac{G_0}{T_0 \cdot S^2 + S + G} \quad (B.5)$$

Cette fonction de transfert est du second ordre, elle est de la forme :

$$FTBF = \frac{w_n^2}{S^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot S + w_n^2} \quad (B.6)$$

Avec $w_n^2 = \frac{G}{T_0}$ et $\xi = \frac{1}{2\sqrt{G \cdot T_0}}$

Le gain de la fonction de transfert est optimal pour un amortissement $\xi = 0.7$.

$$\xi = 0.7 \Leftrightarrow \frac{1}{2\sqrt{G \cdot T_0}} = 0.7$$

D'où:

$$G = \frac{1}{2 \cdot T_0}$$

On obtient alors le système suivant :

$$\frac{G_0 \cdot K_i}{R_a} = \frac{1}{2 \cdot T_0} \quad (B.7)$$

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_a}{R_a}$$

Les expressions des gains intégral et proportionnel du régulateur sont :

$$K_i = \frac{R_a}{2 \cdot T_0 \cdot G_0} \quad (B.8)$$

$$K_p = \frac{1}{2 \cdot T_0 \cdot G_0} \cdot L_a$$

Annexe B

Paramètres de la GADA :

Puissance nominale	1.4 KW
Tension nominale	380V
Courant nominal	5.2 A
Vitesse nominale	880 tr/min
Couple nominal	15 Nm
Résistance statorique	4.7Ω
Résistance rotorique	5.3Ω
Inductance cyclique rotorique	0.161H
Inductance mutuelle	0.138H
Nombre de pair de pôles	3
Moment d'inertie	0.07kg/m ²
Coefficient de frottement	0.45N.m.s ⁻¹

Tableau C.1: PARAMETRES DE LA GADA

B.1 Synthèse du régulateur proportionnel intégral :

La stratégie de commande de la GADA décrite au chapitre IV utilise un régulateur proportionnel intégral PI. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance. La Figure C.1 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

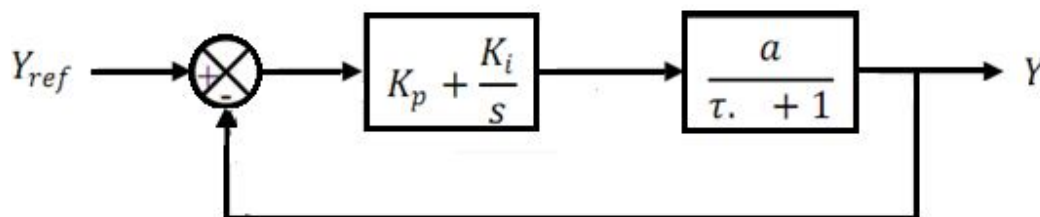


Figure C.1: Système régulé par un régulateur proportionnel intégral.

Où :

$K_p + \frac{K_i}{S}$ est la fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral.

$\frac{a}{\tau.S + 1}$ est la fonction de transfert du système à réguler.

Annexe B

τ est la constante de temps du système.

La fonction de transfert de l'ensemble système-régulateur s'écrit alors sous la forme suivante.

$$FTBO = \frac{K_i \cdot \left(1 + \frac{K_p}{K_i} \cdot S\right)}{S} \cdot \frac{a}{1 + \tau \cdot S} \quad (C.1)$$

Nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur afin de compenser le pôle de la fonction de transfert du système par un zéro de la fonction de transfert du régulateur. Ceci conduit à l'égalité suivante.

$$\frac{K_p}{K_i} = \tau$$

Si on considère que le pôle est parfaitement compensé, la fonction de transfert devient alors :

$$FTBO = \frac{K_i \cdot a}{S} \quad (C.2)$$

Ce qui donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{\tau_r S + 1} \tau_r = \frac{1}{K_i \cdot a} \quad (C.3)$$

Avec τ_r est le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide pour l'application envisagée de la GADA. Nous choisissons un temps de repense en boucle fermée égale à 10 ms, qui est une valeur suffisante pour l'application de la GADA en génératrice éolienne.

Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

$$K_i = \frac{1}{\tau_r \cdot a} \quad (C.4)$$
$$K_p = \frac{\tau}{\tau_r \cdot a}$$

Cette méthode de synthèse sera utilisée pour la détermination des gains des différents régulateurs utilisés dans la commande de la GADA. Rappelons que la symétrie du système compensé nous permet de calculer un seul régulateur pour les deux axes pour les puissances et pour les courants.

Boucle des courants :

Si on considère l'hypothèse d'un couplage entre l'axe direct et l'axe en quadrature négligeable pour la commande directe, et parfaitement compensé pour les commandes indirectes

Annexe B

en boucle ouvert et en boucle fermé, ainsi que tous les termes de perturbation compensés on obtient le système corrigé de la figure ci-dessous.

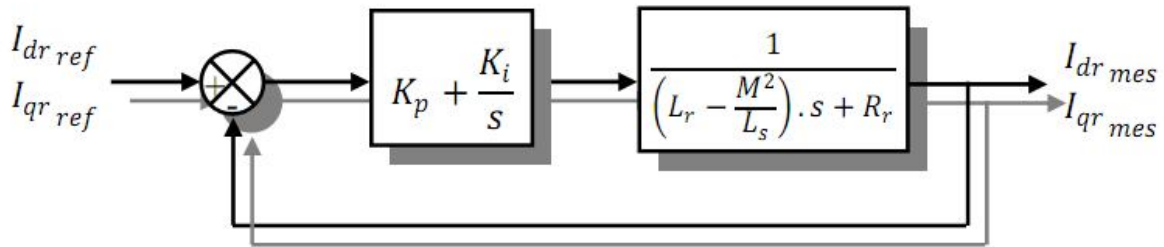


Figure C.2: Schéma de la régulation des courants rotoriques.

🚩 Boucle des puissances :

Sous les mêmes hypothèses que pour la boucle des courants, on obtient la fonction de transfert à corriger pour le contrôle des puissances comme sur la figure suivante.

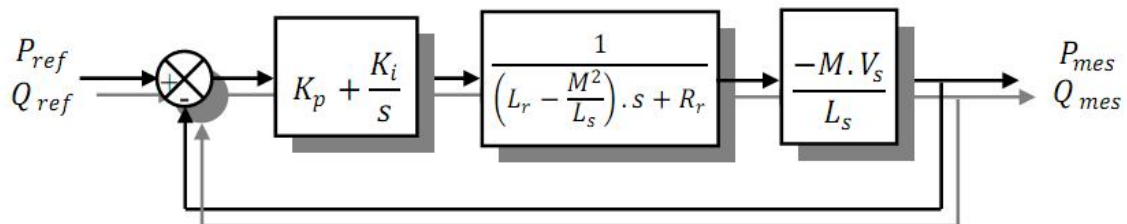


Figure C.3: Schéma de la régulation des puissances statoriques.