

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

# UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Domaine : Sciences et Technologie*

*Filière : Génie Electrique*

*Spécialité : Automatisation et contrôle des systèmes industriels*

### THÈME

**Commande par retour d'état adaptative à modèle de référence d'un émulateur éolien**

*Préparé par : MEKKAOUI ABDEREZAK*

*ALI HICHAM*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
CHAALLAL Mokhtar	MAA	Président
MESSLEM Youcef	Pr	Examineur
BELABBAS Belkacem	MAA	Examineur
ALLAOUI Tayeb	Pr	Encadreur
TOUMI Djilali	MCB	Co-encadreur

## **REMERCIEMENT**

*Avant tout nous remercions Allah, maître de l'univers sans lui, nous n'aurons jamais pu congestionner ce travail, et grand salut sur notre prophète Mohamed que le salut soit sur lui.*

*Le travail que nous présentons dans ce mémoire a été effectué au laboratoire de Génie énergétique et Génie informatique de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret sous la direction des Enseignants **Mr. ALLAOUI Tayeb** et **Mr TOUMI Djillali** à qui nous exprimons notre gratitude pour leur suivi constant et les encouragements soutenus qu'ils n'ont cessé de me prodiguer jusqu'à l'achèvement de ce travail.*

*Je tiens à remercier vivement **Mr CHAALAL Mokhtar**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury d'examen.*

*Que **Mr MESSLEM Youcef** et **BELABBAS Belkacem**, sont vivement remerciés pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner.*

*Je remercie également :*

*- **Mr BOUZID Amine**, pour son aide précieuse.*

*-Tous les enseignants du Département de Génie Electrique de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret.*

*-Staff du **HALL de technologie** de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret.*

*-**Mr CHAHAD Tahar** et **Mme MADANI**, ingénieurs des laboratoires pédagogiques du département de génie électrique.*

*Nous n'oublions pas nos parents de leur soutien moral et matériel.*

*Qu'il soit de même pour tous nos ami(e)s dont le soutien indéfectible et leur fidélité en amitié,*

*Merci.*

*Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé, de près ou de loin durant notre travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, qu'Allah les garde*

*A mes frères qui éclairent ma vie,*

*Qui ont su m'éduquer, qui étaient toujours derrière moi*

*Et qui poussé me à aller de l'avant.*

*A tous mes frères et sœurs*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

*A tous ceux qui me sont chère*

*MEKKAOUi*

*Abderezak*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé*

*Jusqu'au bout et à qui je dois tout l'amour et le respect*

*A ma chère sœur.*

*A tous ma famille*

*A mon binôme Khaled et sa famille*

*A tous mes ami(e) s*

*A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à*

*La réalisation de mon travail*

*ALI Hicham*

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## **Chapitre I Généralités sur les systèmes éoliens**

I.1 Introduction : .....	4
I.2 Historique de l'éolienne : .....	4
I.3 Croissance de puissance des turbines : .....	5
I.4 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne : .....	6
I.4.1 Définition de l'énergie éolienne : .....	6
I.5 Constitution d'une éolienne : .....	6
I.5.1 Principe : .....	6
I.5.2 Constitution : .....	7
I.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne : .....	10
I.6.1 Les avantages : .....	10
I.6.2 Les désavantages : .....	10
I.7 Les différents types d'éoliennes : .....	11
I.7.1 Éoliennes à axe vertical : .....	11
I.7.2 Éoliennes à axe horizontal : .....	12
I.8 Conversion électromécanique dans systèmes éoliens : .....	13
I.8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone : .....	13
I.8.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil : .....	13
I.8.1.2 Machine asynchrone à double stator : .....	16
I.8.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné" : .....	17

I.8.1.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless" : .....	20
I.8.2 Systèmes utilisant la machine synchrone : .....	20
I.8.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné : .....	21
I.8.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) : .....	22
I.9 Conclusion .....	24

## **Chapitre II Modélisation de l'émulateur éolien**

II.1 Introduction : .....	26
II.2 Définition : .....	27
II.2.1 Un émulateur : .....	27
II.2.1.1 Un émulateur éolien (WTS) : .....	27
II.2.1.2 Structure du système WTS : .....	27
II.3 Modélisation de l'émulateur éolien : .....	28
II.3.1 Modélisation du vent : .....	28
II.3.2 Modélisation de la turbine éolienne : .....	30
II.3.2.1 Modèle du multiplicateur : .....	31
II.3.2.2 Implantation du Multiplicateur par MATLAB Simulink : .....	32
II.3.3 Modélisation de la MCC : .....	33
II.3.3.1 Modélisation d'un hacheur à quatre quadrants : .....	34
II.3.3.2 Simulation du hacheur à MLI et la turbine éolienne par MATLAB Simulink : ..	36
II.4 Simulation de la chaine de conversion éolienne : .....	37
II.4.1 Caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$ : .....	37
II.4.2 Le couple de référence et la vitesse de rotation : .....	38
II.5 Conclusion : .....	42

## **Chapitre III    Commande classique de l'émulateur éolien**

III.1 Introduction : .....	44
----------------------------	----

III.2 Régulation :.....	44
III.2.1 Régulateur :.....	44
III.2.2 Définitions :.....	44
III.3 Régulateur PID :.....	45
III.3.1 Principe général :.....	45
III.3.2 La commande de l'émulateur par PI : .....	46
III.3.3 Les résultats de simulation : .....	49
III.4 La commande de l'émulateur par retour d'état :.....	52
III.4.1 Représentations d'état d'un système : .....	52
III.4.2 Modélisation d'un système sous forme d'état :.....	53
III.4.3 Principe :.....	54
III.4.4 La Commandabilité : .....	55
III.4.5 Observabilité : .....	55
III.4.6 Calcul de la commande dans le cas générale :.....	56
III.4.7 Commande du moteur à courant continu par retour d'état :.....	56
III.4.7.1 Etude de la commandabilité :.....	58
III.4.7.2 Calcul de la Matrice d'état K :.....	58
III.4.8 Commande par retour d'état avec action intégrale :.....	59
III.4.8.1 Calcul de la Matrice d'état K :.....	61
III.4.9 Les résultats de simulation : .....	62
III.4.10 Interprétation : .....	65
III.5 Test de robustesse :.....	65
III.5.1 Régulateur PI : .....	66
III.5.2 Retour d'état action intégrale.....	67
III.6 Conclusion : .....	68

## **Chapitre IV Commande adaptative à un modèle de référence**

IV.1 Introduction.....	70
IV.2 La Commande adaptative .....	70
IV.2.1 Généralités sur la commande adaptative [30]: .....	70
IV.2.2 Fonctions des systèmes de commande adaptative :.....	71
IV.2.3 Théorie de la commande adaptative :.....	72
a) Principe :.....	72
b) Commande adaptative indirecte : .....	73
c) Commande adaptative directe : .....	74
IV.3 Commande adaptative à modèle de référence (MRAC) [30]:.....	75
IV.3.1 Erreur de poursuite : [31] .....	75
IV.3.2 Méthode basée sur la stabilité approche de LYAPOUNOV : [31] .....	76
IV.4 Simulation de la commande par retour d'état adaptative .....	78
IV.4.1 Schéma bloc du modèle de référence .....	78
IV.4.2 Schéma bloc de la commande adaptative :.....	79
IV.4.3 Simulation de la commande adaptative appliquée .....	79
IV.5 Les résultats de simulation :.....	80
IV.6 Test de robustesse.....	81
IV.7 Conclusion : .....	83

## **Chapitre V** Banc d'essai et expérimentation

V.1 Introduction :.....	85
V.2 Le matériel utilisé dans le banc d'essai .....	85
V.2.1 Convertisseur statique AC/DC .....	86
V.2.2 Moteur à courant continu :.....	87

V.2.3L'interfaçage Arduino-MATLAB/SIMULINK: .....	88
V.2.4 Carte Arduino Mega2560 : .....	89
V.2.5 L'environnement MATLAB/SIMULINK :.....	89
V.3 Utilisation du package Arduino Target.....	90
V.4 La mise en marche du banc d'essai : .....	90
V.4.2 Variation de la résistance d'induit .....	92
V.5 Les essais de réalisation : .....	93
V.5.1 Créé un single PWM :.....	93
V.5.2 Calcul un rapporte cyclique et gère single PWM :.....	93
V.5.3 Résultats expérimentaux .....	94
V.5.3.1 Commande de l'émulateur par PI :.....	94
V.5.3.2 Commande de l'émulateur par retour d'état avec action intégrale : .....	98
V.6 Conclusion : .....	103
Conclusion Générale.....	105
<b>Annexe</b> .....	107
<b>Bibliographie</b> .....	112

# Liste des figures

Figure I. 1 Représentation de puissance prévue d'énergie éolienne installée à l'échelle mondiale entre 2008 et 2012[7] .....	5
Figure I. 2 L'évolution de taille d'une éolienne en fonction de la puissance avec le temps[10]. .....	6
Figure I. 3 Principe de fonction d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne[7]. .....	7
Figure I. 4 Les différentes composantes d'une éolienne. ....	8
Figure I. 5 Éoliennes à axe vertical de type Savonius[14]. .....	11
Figure I. 6 Éoliennes à axe vertical de type Darieus[17]. .....	12
Figure I. 7 Éoliennes à axe Horizontal[13].....	13
Figure I. 8 Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles. ....	14
Figure I. 9 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau. ....	14
Figure I. 10 Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de Puissance .....	15
Figure I. 11 Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator .....	16
Figure I. 12 Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor. ....	17
Figure I. 13 MADA - structure Kramer. ....	18
Figure I. 14 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée. ....	18
Figure I. 15 Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique .....	19
Figure I. 16 Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. ....	19
Figure I. 17 Principe de fonctionnement de cyclo convertisseur. ....	20
Figure I. 18 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau. ....	20
Figure I. 19 Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande. ....	22
Figure I. 20 Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI. (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur .....	23
Figure I. 21 Système éolien à coût minimum basé sur GSAP. ....	24
Figure II. 1 Modèles réel et émulé de la turbine. ....	26
Figure II. 2 Schéma synoptique du simulateur éolien. ....	27
Figure II. 3 Le principe du WTS. ....	28
Figure II. 4 Profil du vent appliqué à la turbine.....	29
Figure II. 5 Profil du vent appliqué à la turbine (zoom). ....	30
Figure II. 6 Schéma bloc du modèle de la turbine .....	32
Figure II. 7 Réalisation du Multiplicateur par MATLAB Simulink .....	32
Figure II. 8 Schéma électrique de la MCC à excitation séparée. ....	33
Figure II. 9 Schéma bloc de la MCC à flux constant. ....	34

Figure II. 10 Schéma d'un hacheur a quatre quadrants et Fonctionnement de la machine dans les quatre quadrants. ....	34
Figure II. 11 Formes de tension et de courant de la machine. ....	35
Figure II. 12 Les différentes configurations des interrupteurs du hacheur à quatre quadrants. ....	36
Figure II. 13 Schéma bloc d'un hacheur à MLI. ....	37
Figure II. 14 Schéma de simulation du modèle la turbine éolienne. ....	37
Figure II. 15 Coefficient aérodynamique( $C_p$ ) en fonction de ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ ). ....	38
Figure II. 16 Forme du couple mécanique. ....	39
Figure II. 17 Variations du couple mécanique zoomé. ....	40
Figure II. 18 Variations de vitesse de la turbine ....	41
Figure II. 19 Coefficient de puissance en fonction du temps. ....	42
Figure III. 1 Structure de régulateur PID. ....	45
Figure III.2 Schéma bloc de la MCC régulée par un PI. ....	47
Figure III.3 Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine. ....	49
Figure III.4 Couple de référence et le couple mesuré ....	50
Figure III.5 Variations du courant de la MCC zoomé. ....	51
Figure III.6 Couple de referens et couple mesuré zoomé. ....	51
Figure III.7Vitesse de la MCC ( rad/s). ....	52
Figure III.8 Forme standard de représentation d'état. ....	53
Figure III.9 Schéma d'asservissement ....	54
Figure III.10 Schéma bloc de la MCC régulée par retour d'état. ....	56
Figure III.11 Retour d'état avec intégration de l'écart. ....	59
Figure III.12 Schéma bloc de la MCC régulée par router d'état avec intégration. ....	61
Figure III.13Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine. ....	62
Figure III.14 Formes du couple de référence et du couple mesuré de la machine. ....	63
Figure III.15Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine zoomé. ....	64
Figure III.16 Formes du couple de référence et du couple mesuré de la machine zoomé. ....	64
Figure III.17 Formes de la vitesse de vent et de vitesse d'émulateur. ....	65
Figure III. 18 Test de robustesse pour la variation de résistance pour régulateur PI classique. ....	66
Figure III. 19 Test de robustesse pour la variation de l'inductance pour régulateur PI classique ....	67
Figure III. 20 Test de robustesse pour la variation de résistance pour retour d'état integral classique. ....	67
Figure III. 21 Test de robustesse pour la variation de l'inductance pour retour d'état avec action integrale. ....	68

Figure IV. 1 Le principe de la commande adaptative. ....	73
Figure IV.2 Schéma de la commande adaptative indirecte. ....	73
Figure IV.3 Schéma de la commande adaptative directe. ....	74
Figure IV.4 Commande adaptative à modèle de référence. ....	75
Figure IV.5 Schéma bloc du modèle de référence .....	79
Figure IV.6 Schéma bloc de la commande adaptative. ....	79
Figure IV.7 Schéma bloc de la MCC avec sa commande adaptative.....	80
Figure IV. 8 Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine.....	80
Figure IV. 9 Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine (zoom). ....	81
Figure IV. 10 Test de robustesse pour la variation de résistance pour retour d'état integral classique. .....	82
Figure IV. 11 Test de robustesse pour la variation de l'inductance pour retour d'état avec action integrale.....	83
Figure V. 1 Photo du banc d'essai réalisé.....	85
Figure V. 2 Photo représente le matériel utilisé dans le banc d'essai. ....	85
Figure V. 3 Convertisseur statique AC/DC .....	86
Figure V. 4 Moteur à courant continu utilisé dans la banc d'essai.....	88
Figure V. 5 Plaque signalétique du moteur à courant continu .....	88
Figure V. 6 Arduino MATLAB/SIMULINK. ....	90
Figure V. 7 Programme de commande écrit en langage 'C' .....	91
Figure V. 8 Application du couple résistant avec génératrice.....	92
Figure V. 9 Rhéostat pour la variation de la résistance d'induit du MCC.....	93
Figure V. 10 Création de signal PWM par Arduino Target. ....	93
Figure V. 11 Modèle de PWM sous MATLAB.....	94
Figure V. 12 L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence imposée .....	95
Figure V. 13 Courant mesuré avec sa référence. ....	95
Figure V. 14 L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence similaire à celle obtenue par la turbine. ....	96
Figure V. 15 Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine .....	96
Figure V. 16 La chaîne complète de l'émulateur.....	97
Figure V. 17 Variation de courant du MCC avec la référence.....	98
Figure V. 18 L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence imposé.....	99
Figure V. 19 formes de courant référence et du courant mesuré.....	99
Figure V. 20 L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence périodique. ....	100
Figure V. 21 Variation de courant du MCC pour une référence périodique. ....	100

Figure V. 22 Modèle de régulateur par retour d'état implémenté sous MATLAB a fonction de vent..	101
.....	101
Figure V. 23 Variation de courant du MCC pour une référence forme de vent. ....	101
Figure V. 24 La chaine complète de l'émulateur. ....	102
Figure V. 25 Variation de courant du MCC pour une référence forme de vent. ....	102

# Glossaire et Nomenclature

Symbole et Abréviation	Signification	Unités
MATLAB	Matrix Laboratory (logiciel de simulation numérique)	
MLI (PWM)	Modulation de largeur d'impulsion	
MADA	Machine Asynchrone Double Alimentation	
MAS	Machine Asynchrone.	
GSAP	Générateur Synchrone à Aimants Permanents.	
WTS	Wind turbine simulator.	
MCC	Machine à courant continu.	
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor.	
$P_{mg}$	La puissance transmise par la génératrice.	[kW]
$P_{aer}$	La puissance aérodynamique.	[kW]
$P_v$	La puissance produite par le vent.	[kW]
$C_{em}$	Couple électromagnétique.	[N.m]
$C_p$	Le coefficient de la puissance	
$\Omega_s$	Vitesse de synchronisme.	[rad/s]
$\omega$	La pulsation de réseau.	[rad/s]
$\Omega_{tur}$	La vitesse de la turbine.	[rad/s]
$P$	Nombre de pair de pôles.	
$V_v$	La vitesse du vent.	[m/s]
$S$	La surface circulaire balayée par la turbine.	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$	La densité de l'air.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$R_p$	Rayon de la turbine (longueur de pale).	[m]
$\lambda$	Vitesse relative.	
$\beta$	Angle de calage des pales.	
G	Le gain de multiplicateur.	
$V_e$	Tension d'excitation.	[V]
$C_r$	Couple résistant.	[N.m]
$J$	Moment d'inertie.	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$\Omega$	Vitesse de rotation de la machine.	[Rad/s]
$f$	Coefficient de frottement.	[N.m.s <sup>2</sup> /Rad <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Rapport cyclique.	
$G_0$	Gain du convertisseur (hacheur).	
$T_0$	Constante de temps du convertisseur.	
f	La fréquence	[Hertz]
PI	Le régulateur PI (proportionnel intégral)	
MRAC	Commande par retour d'état adaptative avec un modèle de référence.	

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources. D'une autre part, des ressources énergétiques traditionnelles d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente[1].

D'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées. Parmi les elles, nous pouvons citer l'énergie de fission nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique. Cependant, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux, et pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années.

Une autre alternative consiste à exploiter les énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, 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 et augmenter leur efficacité énergétique[2]–[4]. Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social. Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie :

- 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, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles.
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière et plus précisément au comportement de la turbine éolienne par la mise en œuvre d'un émulateur de turbine éolienne à base de la commande en couple d'une MCC à excitation séparée, dans le but de reproduire parfaitement les variations qu'impose un vent réel. Le modèle de la turbine éolienne et de la commande sont implémentés sous MATLAB/SIMULINK. Cet émulateur va permettre d'étudier les chaînes de conversion éoliennes au laboratoire dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce mémoire comprend quatre (04) chapitres.

Le chapitre I donne des généralités sur les éoliennes, quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production renouvelable mondiale suivies par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées.

Le chapitre II est consacré à la conception de l'émulateur éolien à base d'une machine à courant continu ce que nécessite la modélisation des constituants de la turbine éolienne.

Le troisième chapitre présente la régulation de couple (courant) de l'émulateur éolien avec des commandes classiques basées sur le régulateur PI et la commande par retour d'état.

Le quatrième chapitre représentera la partie principale de cette étude. Il synthétisera une commande avancée basée sur un retour d'état adaptative avec un modèle de référence MRAC. Enfin les résultats de simulation du comportement dynamique du système étudié seront présentés, ce qui nous a permis de justifier la fiabilité du modèle proposé et de la commande élaborée.

Le dernier chapitre est consacré à l'essai expérimental. Un banc d'essai est réalisé. Il est basé sur la commande d'une machine à courant continu, avec un hacheur à quatre quadrants, qui permettra de reproduire le comportement réel d'une turbine éolienne. Les résultats expérimentaux seront relevés pour valider ceux obtenus par la simulation.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique. Des perspectives pour ce travail sont également exposées.

# **Chapitre I**

**Généralités sur les systèmes éoliens**

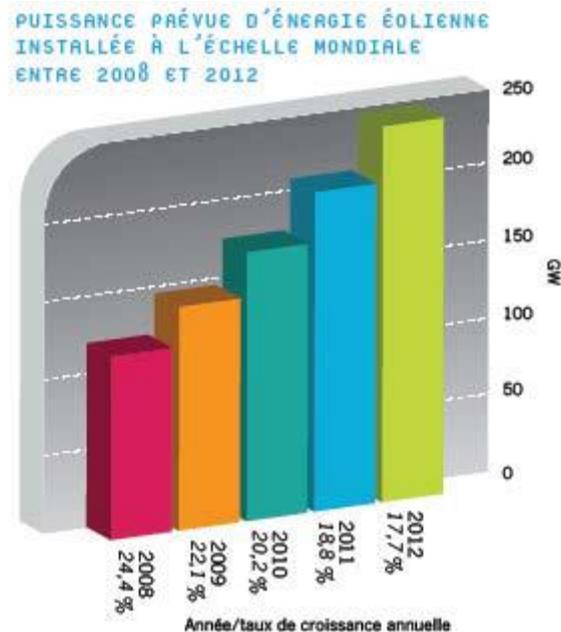
## I.1 Introduction :

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie d'une ressource infiniment renouvelable, le vent, en énergie électrique. Le concept paraît très simple. Une hélice tourne lorsque le vent souffle dessus. Derrière cette étonnante simplicité, nous allons, dans ce chapitre, découvrir et analyser l'ensemble des technologies intervenant dans le fonctionnement d'une éolienne. Des aspects électriques, aux paramètres aérodynamiques, nous verrons qu'une éolienne fait appel à un vaste champ de connaissances technologiques et scientifiques.

## I.2 Historique de l'éolienne :

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.-C. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés[3],[4]. Dès le XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice [5], Ainsi l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs [6].

Après un siècle de recherches, d'essais et de déconvenues, la crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [4], [5]. La génération éolienne a connu son premier marché avec le « wind rush » californien dans les années 1980. La figure I.1, montre la puissance prévue d'énergie éolienne installée à l'échelle mondiale entre 2008 et 2012.



**Figure I. 1** Représentation de puissance prévue d'énergie éolienne installée à l'échelle mondiale entre 2008 et 2012[7]

Les ressources du vent sont immenses et tout particulièrement en mer (offshore). On considère que l'énergie éolienne annuellement récupérable au niveau mondial vaut environ 53000 TWh soit environ 4 fois la consommation mondiale actuelle d'électricité. L'EWEA [8] estime une possibilité de production éolienne à hauteur de 10% de l'électricité mondiale en 2017, ce qui signifie 800GW installé.

### I.3 Croissance de puissance des turbines :

Depuis les années 80, les puissances moyennes unitaires des aérogénérateurs sont passées de 50 kW, à 200 kW (1990), 500 kW (1998) à plus de 1 MW en 2002 (1,4 MW en Allemagne). L'accroissement des puissances permet des réductions du coût du kW. Les aérogénérateurs les plus puissants en 2003 frôlent les 5 MW avec des diamètres de turbines proches de 120 m. Ces grandes puissances sont tout particulièrement destinées aux fermes offshore [9].

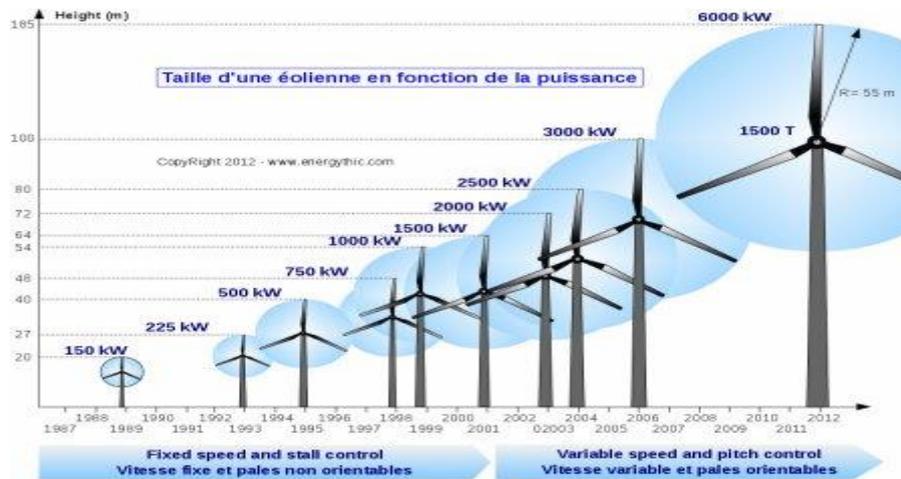


Figure I. 2 L'évolution de taille d'une éolienne en fonction de la puissance avec le temps[10].

## I.4 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :

### I.4.1 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences[11].

### I.4.2 Définition d'une éolienne :

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

## I.5 Constitution d'une éolienne :

### I.5.1 Principe :

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.3. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques et automatiques.

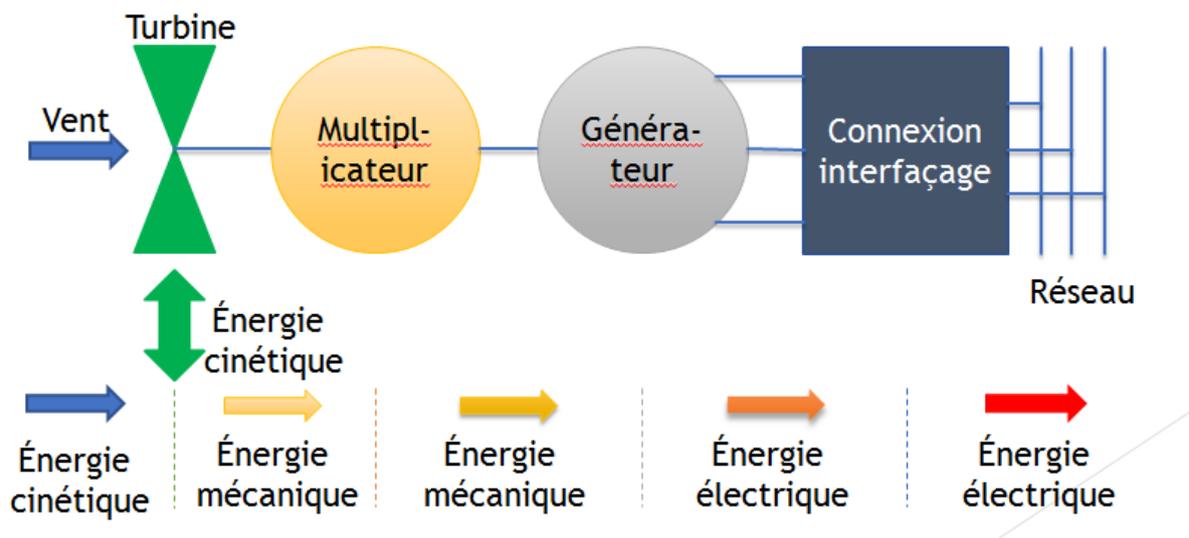
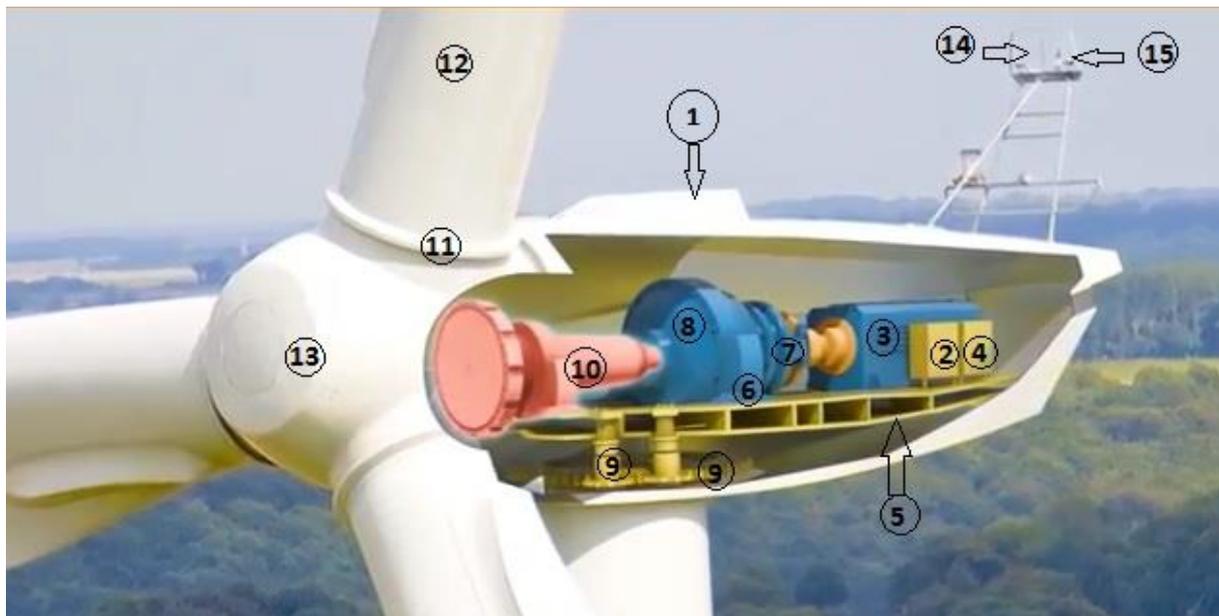


Figure I. 3 Principe de fonction d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne[7].

### I.5.2 Constitution :

Une éolienne est composée de plusieurs éléments dont sont présentés dans la figure I.4:



**Figure I. 4** Les différentes composantes d'une éolienne.

- 1 : Nacelle.
- 2 : Système de refroidissement.
- 3 : Génératrice
- 4 : Système de contrôle.
- 5: Armature métallique.

- 6 : Insonorisent.
- 7: Frein à disque.
- 8: Multiplicateur de vitesse.
- 9 : Servomoteurs.
- 10 : Arbre lent.
- 11 : Système d'orientation des pales.
- 12 : Les pales. 13 : rotor de la turbine
- 14 : Girouette.
- 15 : Anémomètre.

Un mat, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (10) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (2) à huile.

La turbine (16) possède trois pales (12) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique ou hydraulique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par "mise en drapeau" ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (9), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre ou bien deux anémomètres et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent [12].

## I.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne :

Le développement et la croissance d'utilisation de l'énergie éolienne sont liés aux avantages que présente ce type d'énergie. Cependant, cette source d'énergie présente également de désavantages qu'il faut étudier pour améliorer son exploitation[13].

### I.6.1 Les avantages :

- Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre, elle ne nécessite aucun carburant.
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre, chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs, la propriété des aérogénérateurs par des particuliers et la communauté permet aux gens de participer directement à la conservation de notre environnement.
- Selon EDF, l'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.
- L'énergie éolienne est une énergie économique. L'éolienne permet de capter l'énergie sur le lieu même de son utilisation, ce qui économise ainsi tous les circuits de distribution.

### I.6.2 Les désavantages :

- Le caractère imprévisible du vent. Pour cette raison, les compagnies d'électricité éprouvent beaucoup de difficulté à accepter cette source d'énergie. Dans la plupart des cas, une turbine éolienne est installée avec une génératrice diesel.
- Dans certaines communautés, l'apparence de la turbine est très importante. Les turbines sont souvent de taille monumentale et de ce fait, il est difficile de faire accepter un tel appareil au sein de la population.
- Le bruit mécanique qui est créé par les différents organes en mouvement comme les engrenages.
- Le bruit aérodynamique. Le freinage du vent et son passage autour des pales engendrent un son caractérisé, comme un souffle.

## I.7 Les différents types d'éoliennes :

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

### I.7.1 Éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation.

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres, les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur[2], [11]

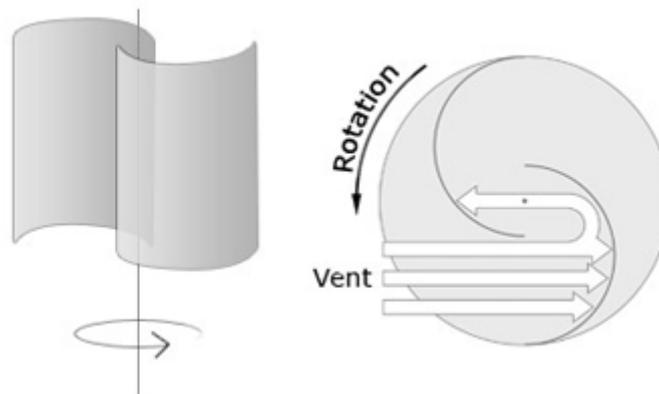


Figure I. 5 Éoliennes à axe vertical de type Savonius[14].

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 1930). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles[15], [16] est soumis à des forces de direction et d'intensité variables.

La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas se déclencher d'elle-même.

Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [11].

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisées, à cause des contraintes mécaniques au niveau du sol et occupent plus d'espace.

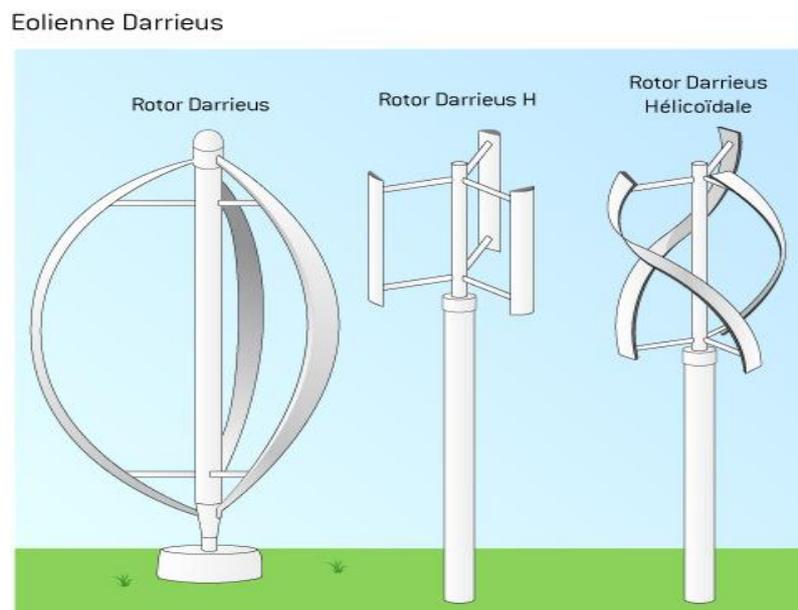


Figure I. 6 Éoliennes à axe vertical de type Darrieus[17].

### I.7.2 Éoliennes 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 de façon aérodynamique 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.

Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [11], [15], [18], [19] Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal[16]

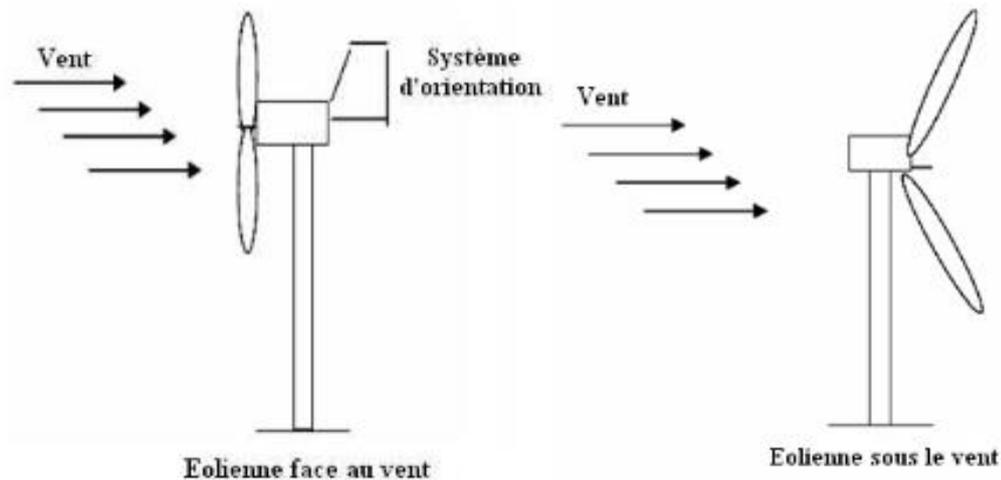


Figure I. 7 Éoliennes à axe Horizontal[13]

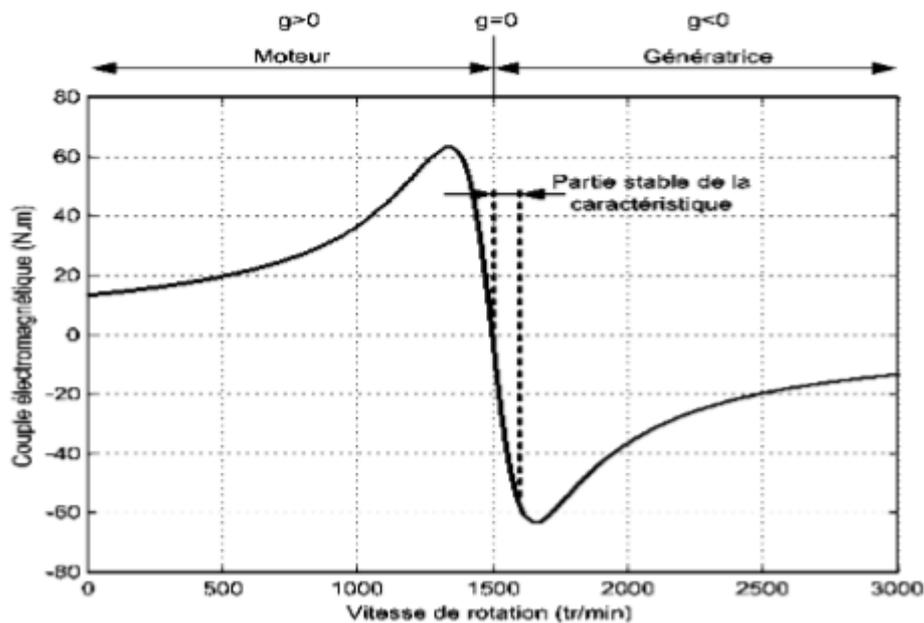
## I.8 Conversion électromécanique dans systèmes éoliens :

### I.8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone :

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator

#### I.8.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :

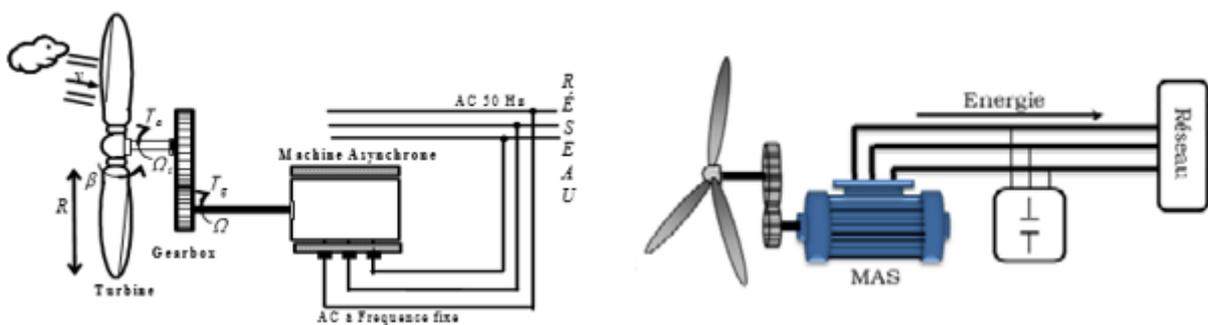
La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la FigureI.8[20]



**Figure I. 8** Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure I.9)



**Figure I. 9** Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

La machine à un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure I-9 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- Il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor.
- Elle ne permet pas une vitesse variable.
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du couple.
- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs.

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance, voir Figure I.10.

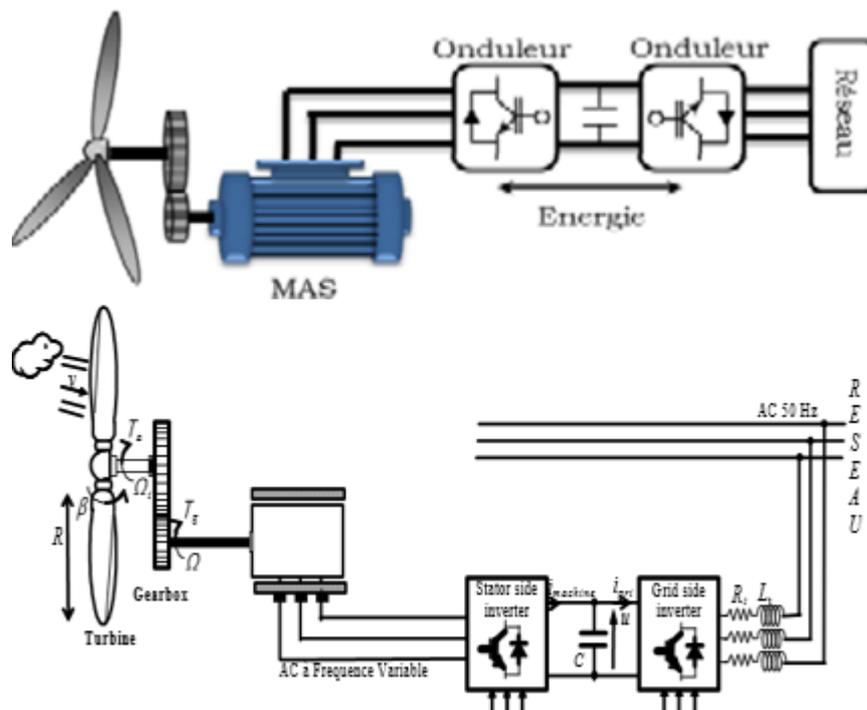


Figure I. 10 Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de Puissance

### I.8.1.2 Machine asynchrone à double stator :

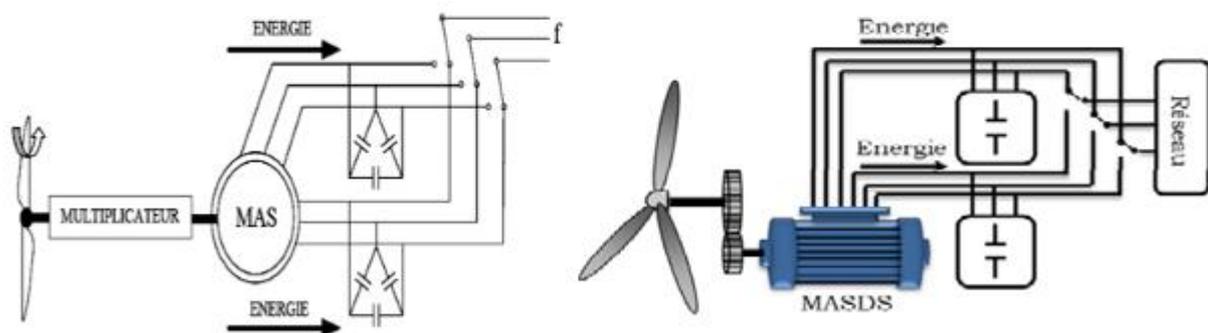
Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Figure I.11) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (\text{I.1})$$

A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{P} \quad (\text{I.2})$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs[21]



**Figure I. 11** Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées

### I.8.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné" :

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique Figure I.12. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage).

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.

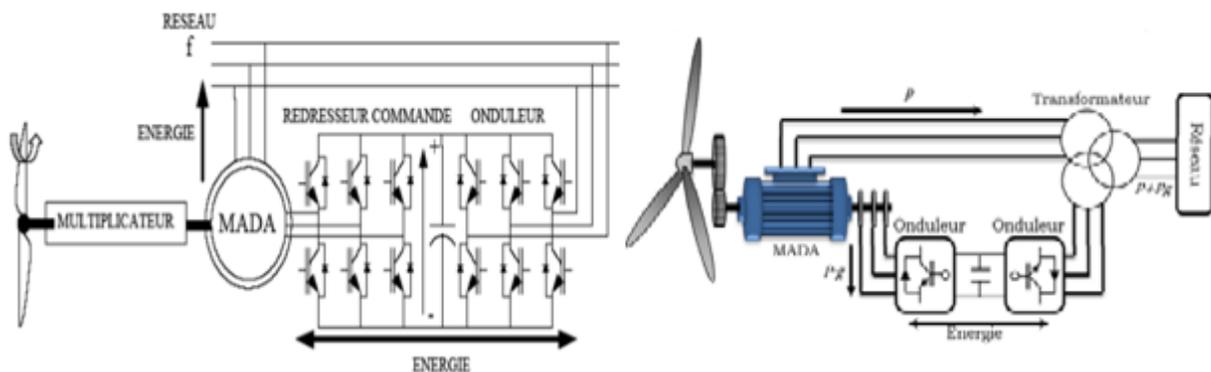


Figure I. 12 Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.

#### a) MADA – structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure I.13[22], le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine.

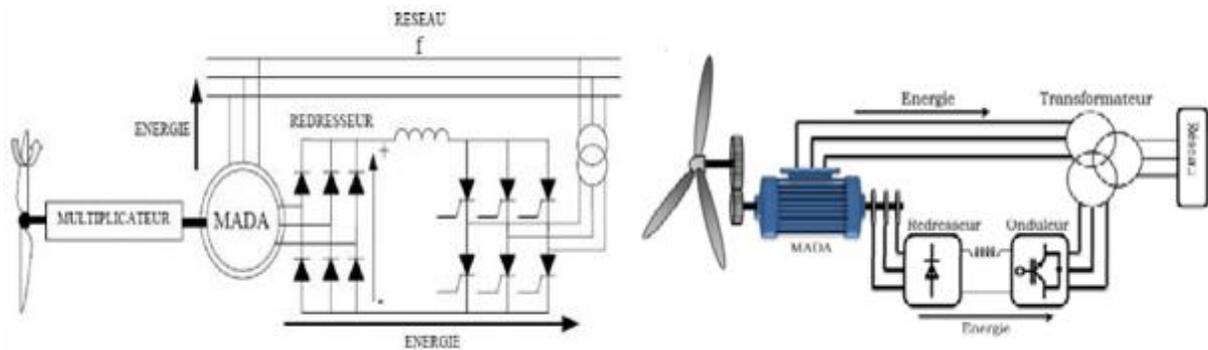


Figure I. 13 MADA - structure Kramer.

### b) MADA à énergie rotorique dissipée :

La Figure I.14 représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO[23]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone

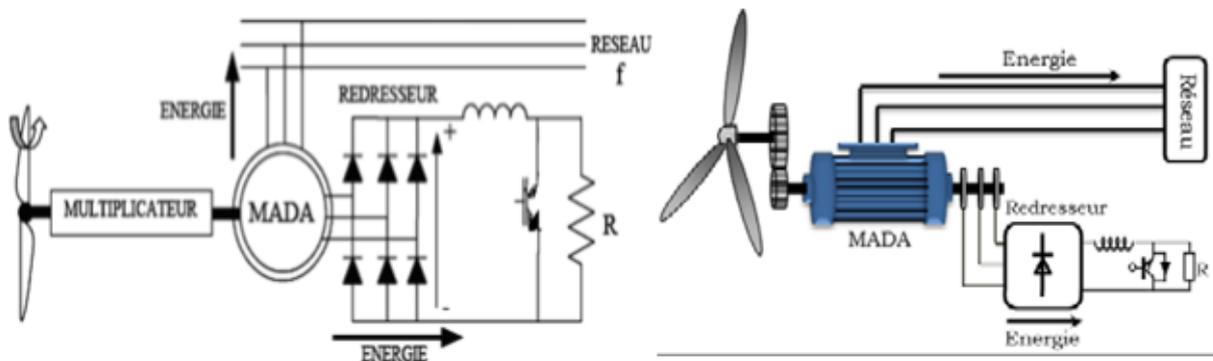


Figure I. 14 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande.

Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

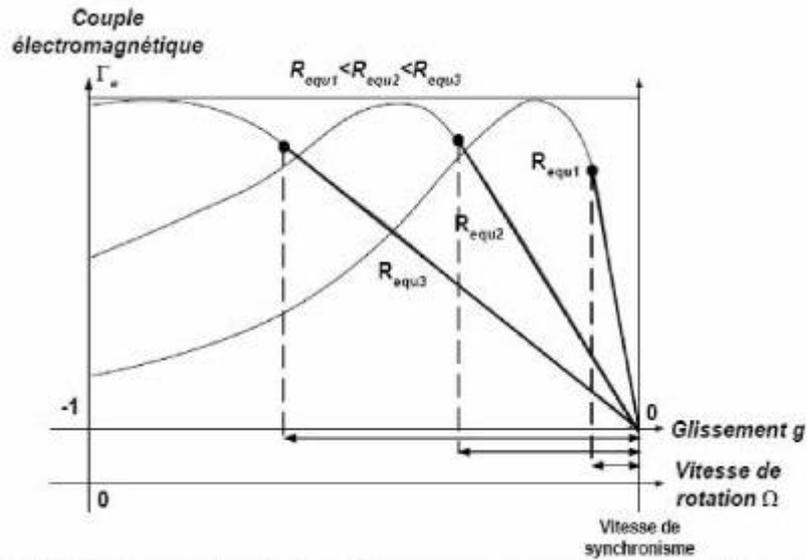


Figure I. 15 Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

### c) MADA – structure de « Scherbius » avec cyclo convertisseur :

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cyclo convertisseur figure (II.23) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius » [24]. La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure I.16.

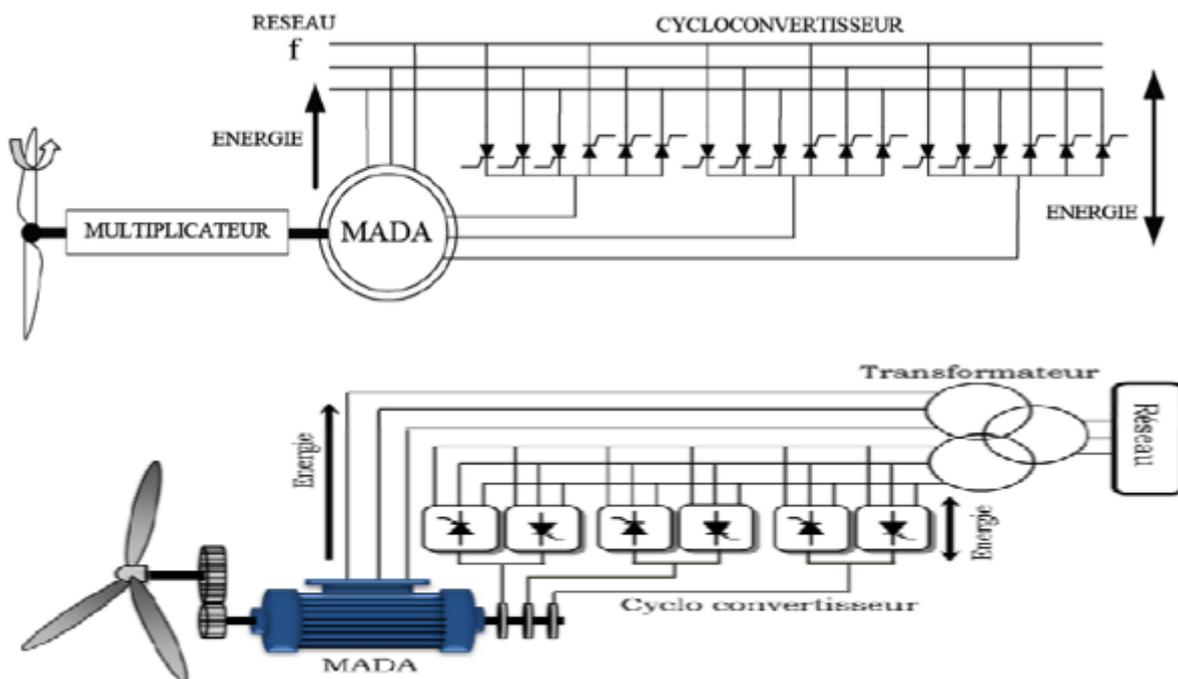


Figure I. 16 Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.

Le principe du cyclo convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure figure I.17 [11]. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI

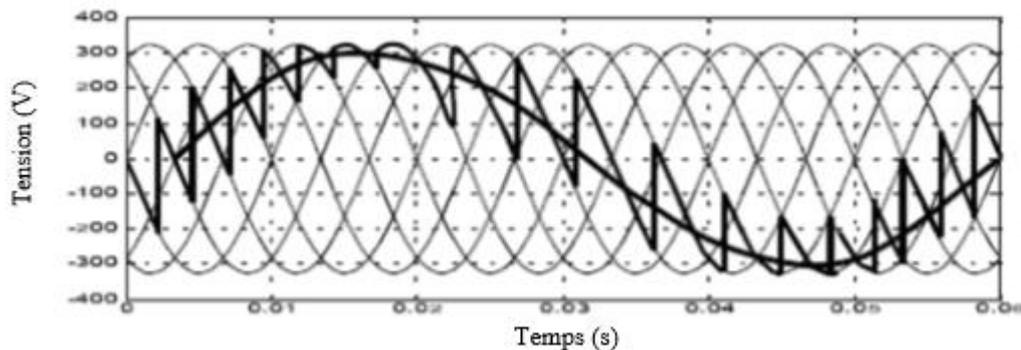


Figure I. 17 Principe de fonctionnement de cyclo convertisseur.

#### I.8.1.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless" :

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau Figure I.18[25]

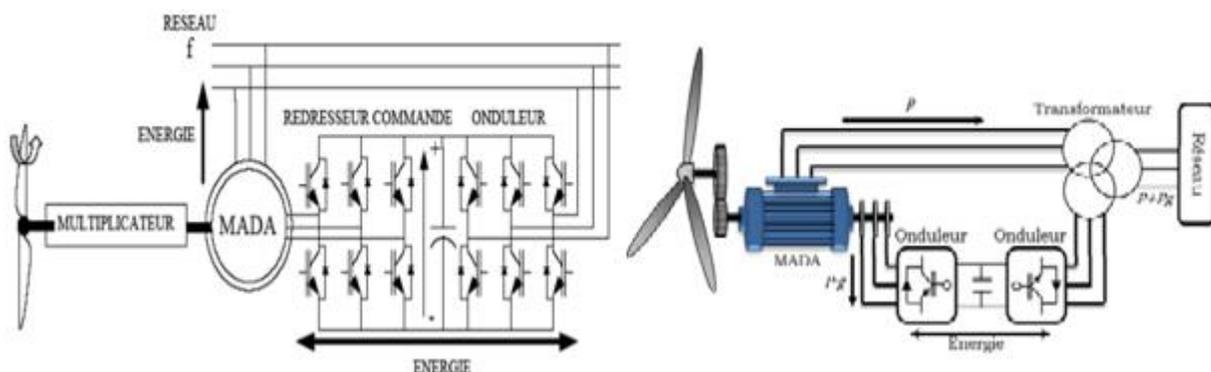


Figure I. 18 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

#### I.8.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

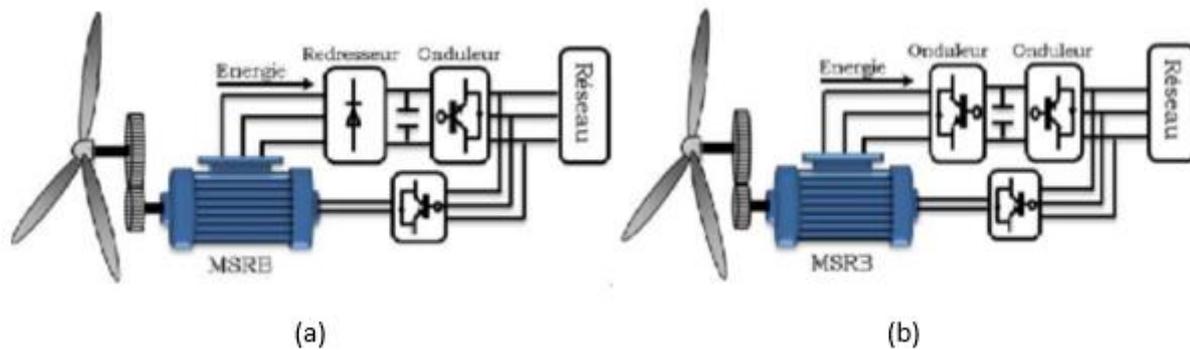
L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être

obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente

### **I.8.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné :**

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.19) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation[23].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau



**Figure I. 19** Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande.

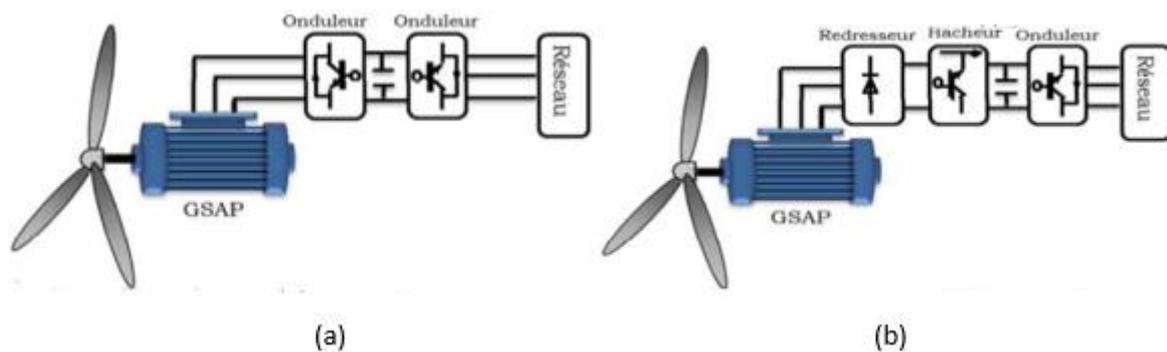
### I.8.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais Figure I.20. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).

La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.



**Figure I. 20** Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI. (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

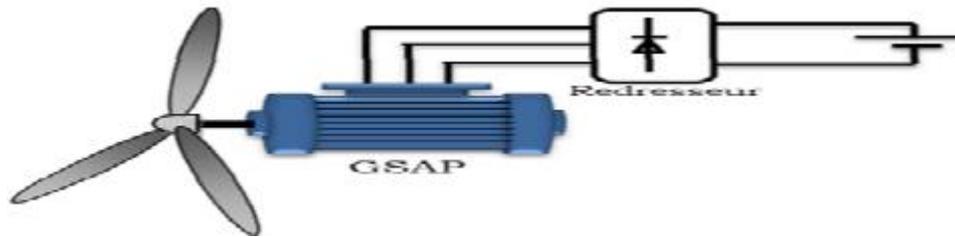
Dans la configuration de la GSAP de la Figure I.20(b), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique.

La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance.

L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW).

Dans la configuration de la Figure I.20(a), un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI.

L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Figure I.21, un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut-être obtenu[11]



**Figure I. 21** Système éolien à coût minimum basé sur GSAP.

## I.9 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de faire un aperçu général sur les systèmes éoliens. On a commencé par des définitions concernant l'énergie éolienne, les avantages et les désavantages de l'énergie éolienne et les composants ainsi que les différents types d'une éolienne. Après ce rappel et descriptif des notions élémentaires, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations électriques qui sont utilisées dans le domaine éolien.

On s'intéresse dans le chapitre qui suit, à la modélisation des différents composants constituant notre émulateur éolien à savoir : le vent, la turbine, le multiplicateur, le hacheur et le MCC.

# **Chapitre II**

**Modélisation de l'émulateur éolien**

## II.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons abordé la structure externe d'une éolienne, que sert à capter l'énergie du vent, et la structure interne chargée de la transformer en énergie électrique.

Dans ce chapitre nous allons établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de la chaîne de conversion éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini. Ensuite, on va développer un simulateur de la turbine éolienne (sous MATLAB/SIMULINK).

Dans un système réel, la chaîne de conversion éolienne composée par les pales, arbre lent, multiplicateur et l'arbre rapide. Dans ce chapitre et afin de réaliser notre émulateur éolien, on va remplacer tout la chaîne de conversion par un moteur à courant continu commandé en couple afin de reproduire le comportement réel de la turbine éolienne (figure II.1).

Un système physique est un ensemble de sous-système ce qui permet de s'intéresser à chaque partie séparément afin de simplifier l'étude avant de faire une synthèse de toutes les parties constituant le système global. Tout d'abord, nous présenterons brièvement la modélisation de chaque élément de cet émulateur : modèle du vent, de la turbine éolienne, de la machine à courant continu ainsi que sa commande. Nous terminerons par la simulation de l'ensemble modélisé (sous MATLAB) qui est organisé de la manière suivante : les variations du vent sont appliquées au modèle de la turbine dont les variations du couple sont appliquées en référence à une machine à courant continu

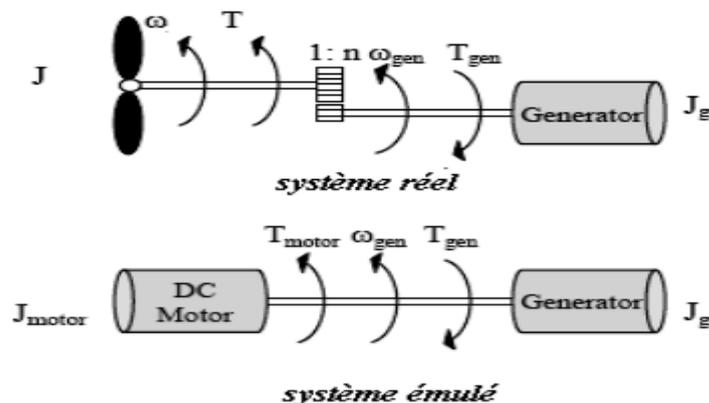


Figure II. 1 Modèles réel et émulé de la turbine.

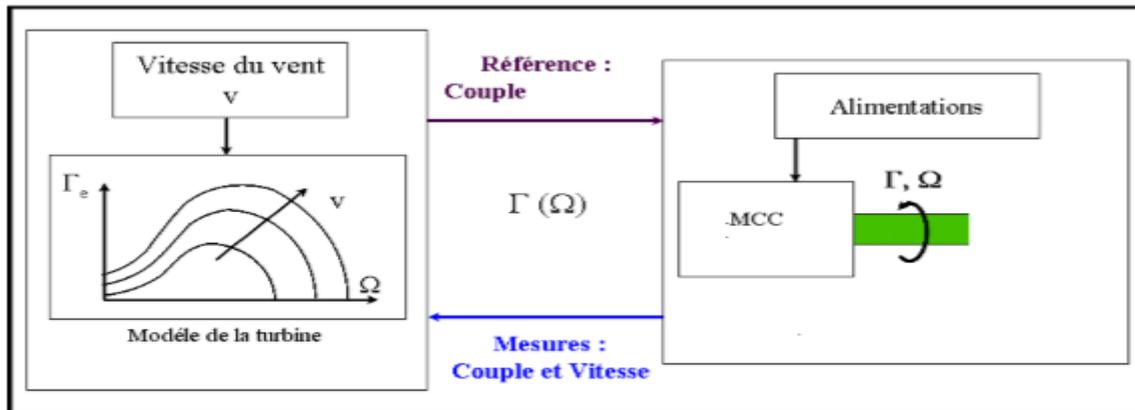


Figure II. 2 Schéma synoptique du simulateur éolien.

## II.2 Définition :

### II.2.1 Un émulateur :

L'émulateur reproduit le comportement d'un modèle dont toutes les variables sont connues, alors que le simulateur tente de reproduire un modèle mais en devant extrapoler une partie des variables qui lui sont inconnues. Le recours à un émulateur, selon le contexte, permet de faciliter le développement ou le débogage d'un système ou de remplacer un système obsolète ou inutilisable par un autre. Dans ce cadre, il est possible de faire fonctionner le nouveau système, l'émulateur, de la même manière que le système imité.

#### II.2.1.1 Un émulateur éolien (WTS) :

L'énergie éolienne c'est l'énergie produite par le vent. La vitesse du vent est difficile à reproduire sur un site. La solution est donc un simulateur éolien: WTS, qui est un équipement important pour le développement de la conversion des systèmes d'énergie éolienne. WTS fournit un environnement de test contrôlé qui permet l'évaluation et l'amélioration des systèmes de contrôle pour les générateurs qui sont difficiles à atteindre avec une véritable éolienne que la vitesse du vent varie de façon aléatoire. Le vent d'émulateur consiste essentiellement en un moteur électrique commandé par un microcalculateur et un couple de référence. Ceci reproduit généralement le couple moyen de l'éolienne.

#### II.2.1.2 Structure du système WTS :

La structure du simulateur d'éolienne est représentée sur la figure suivante.

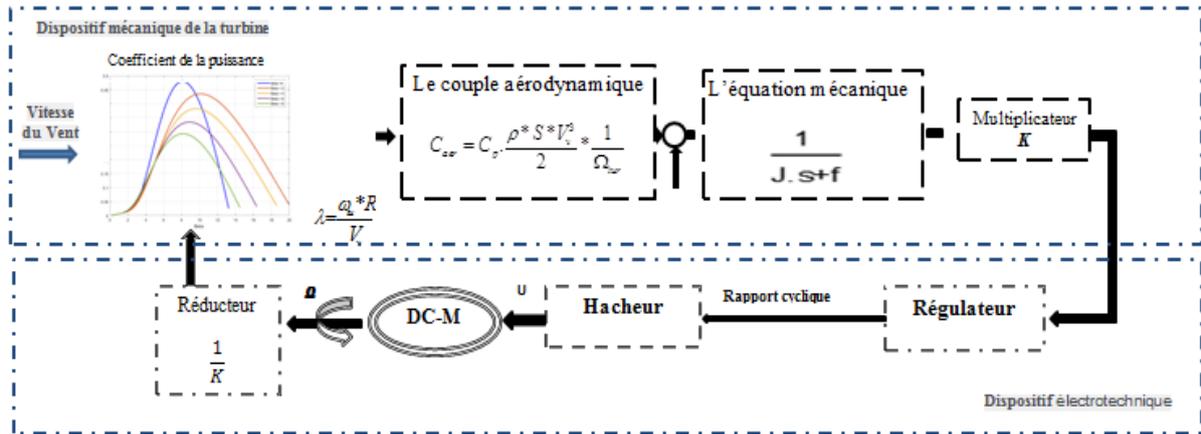


Figure II. 3 Le principe du WTS.

### II.3 Modélisation de l'émulateur éolien :

Afin d'aborder toute étude de simulation sur cette chaîne, il est primordial de connaître les modèles des différentes parties qui la composent.

Pour cela, nous présentons les modèles :

1. Du vent.
2. De la turbine éolienne.
3. De la MCC.
4. Du hacheur à MLI.

#### II.3.1 Modélisation du vent :

Le vent, source de l'énergie électrique produite par l'éolienne. Tout en étant l'entrée et la raison d'être du système éolien, c'est également la perturbation principale. Le vent est une grandeur stochastique même si certaines de ses caractéristiques sont déterministes. Il existe deux méthodes qui sont les mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique. Dans notre cas on utilisera la deuxième méthode pour sa flexibilité à envisager plusieurs scénarios. Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent, celle qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven[26], [27], [1], est la plus répandue. La vitesse du vent  $V_v$  est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps[26].

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

Cette fonction du vent peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations[27],[1]:

$$V_v = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{II.2})$$

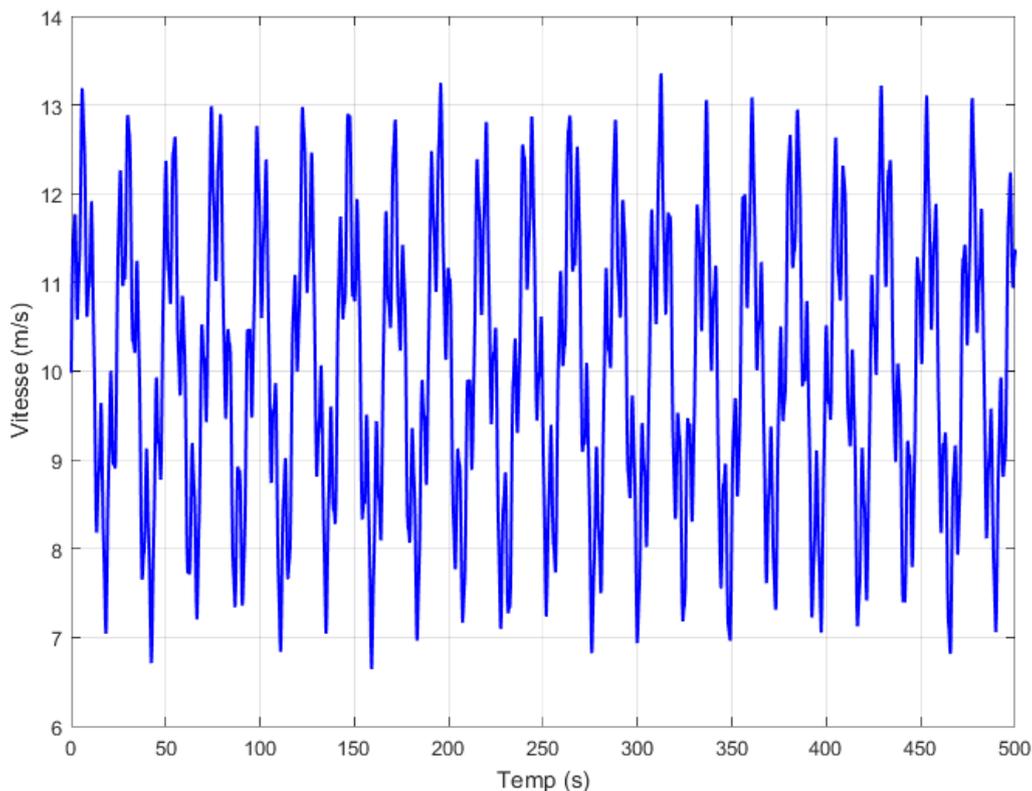
Tel que :

$V_0$  : est la composante moyenne.

$A_i$ ,  $\omega_i$  et  $\varphi_i$  sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

L'équation de vent est donnée par :

$$V_v(t) = 6.5 + \left( \begin{array}{l} 0.2 * \sin\left(2.5 * t - \frac{180}{5}\right) + 2 * \sin\left(4 * t - \frac{180}{3}\right) + \\ 1.5 * \sin\left(5.4 * t - \frac{180}{12}\right) + 0.5 * \sin\left(2.5 * t - \frac{180}{12}\right) \end{array} \right) \quad (\text{II.3})$$



**Figure II. 4** Profil du vent appliqué à la turbine.

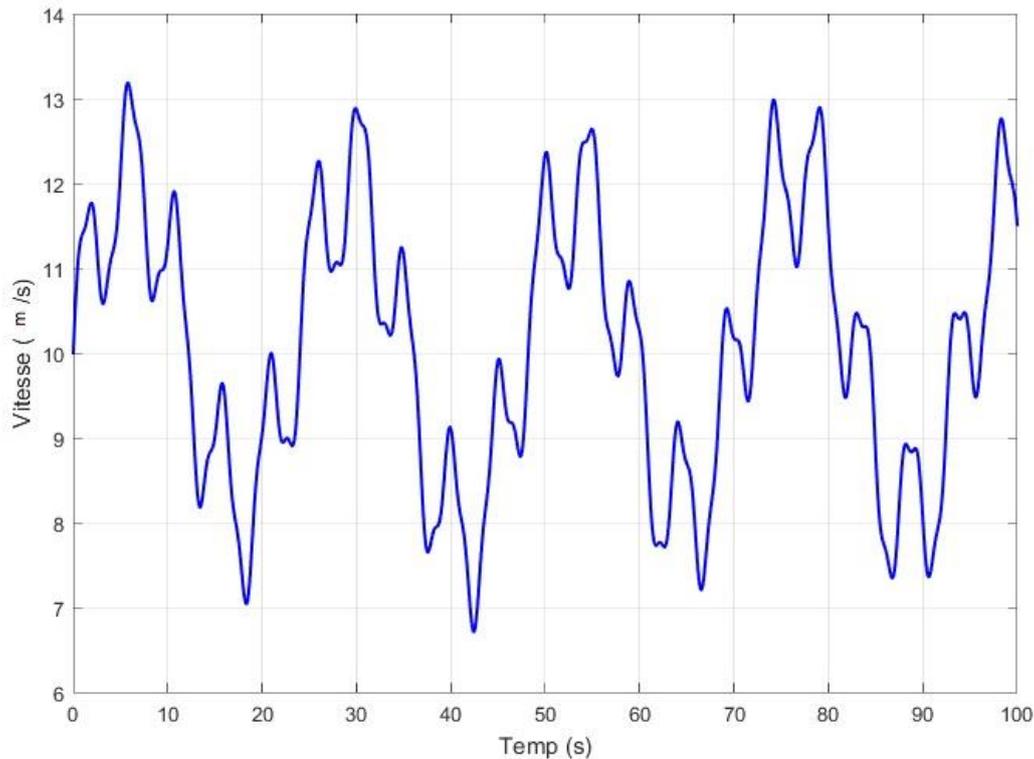


Figure II. 5 Profil du vent appliqué à la turbine (zoom).

### II.3.2 Modélisation de la turbine éolienne :

Le dispositif concerné par notre étude est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ .

On a vu que la puissance produite par un vent traversant une surface  $S$  dépend du cube de la vitesse du vent  $V_v$  et de la densité de l'air  $\rho$ . Cette puissance est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} * S * \rho * V_v^3 \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Où : } S = \pi * R_p^2 \quad (\text{II.5})$$

$R_p$  : Rayon de la turbine (longueur de pale).

En multipliant ( $P_v$ ) par le coefficient de la puissance, on obtient la puissance aérodynamique donnée par :

$$P_{aer} = P_v * C_p = \frac{1}{2} * S * \rho * C_p(\lambda, \beta) * V_v^3 \quad (\text{II.6})$$

Le couple aérodynamique aura donc pour expression :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}} = C_p * \frac{\rho * S * V_v^3}{2} * \frac{1}{\Omega_{tur}} \quad (\text{II.7})$$

L'expression du coefficient de la puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_\tau} - C_3 * \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_\tau}} + C_6 * \lambda \quad (\text{II.8})$$

Le paramètre  $\lambda_\tau$  dépend également de  $\lambda$  et  $\beta$

$$\frac{1}{\lambda_\tau} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Avec ; } \lambda = \frac{\omega_{tur} * R}{V_v} \quad (\text{II.10})$$

L'exemple donné ci-dessous correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur Allemand ENERCON [27], [28], dont la puissance nominale est de 500kW .

Coefficient	Valeur
C1	0.5
C2	116
C3	0.4
C4	0
C5	5
C6	21

**Tableau I. 1** Coefficient définissant l'évolution de  $C_p$

### II.3.2.1 Modèle du multiplicateur :

La figure (II.6) génère le couple aérodynamique qui est appliqué 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 couple mécanique.

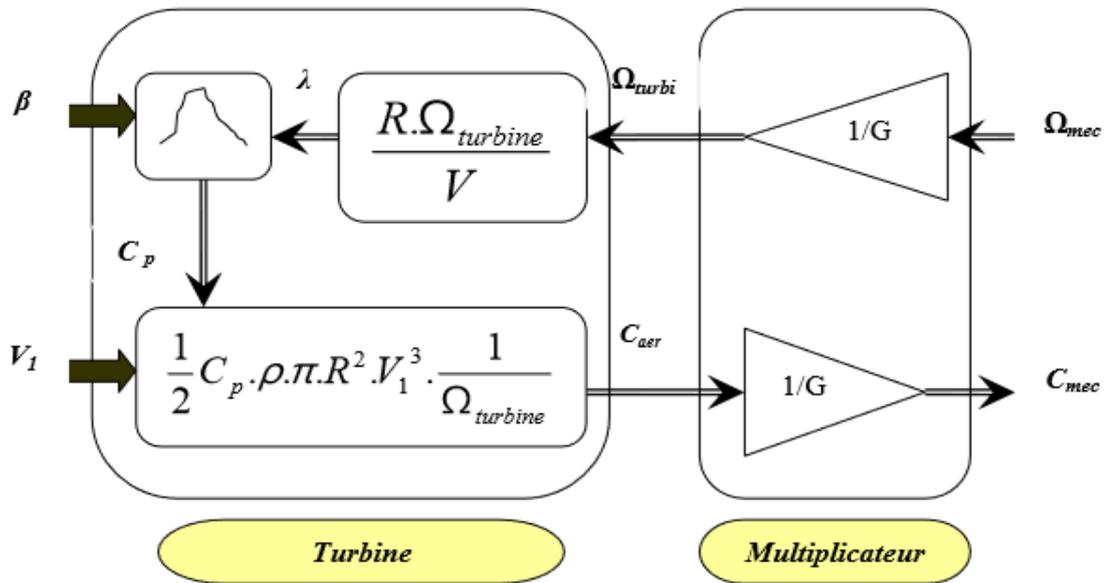


Figure II. 6 Schéma bloc du modèle de la turbine

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

$$C_{aer} = \frac{C_g}{G} \tag{II.11}$$

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II.12}$$

### II.3.2.2 Implantation du Multiplicateur par MATLAB Simulink :

La figure qui suit représente le schéma bloc du multiplicateur par MATLAB Simulink. Le Gain1 et le Gain2 contient un constant G.

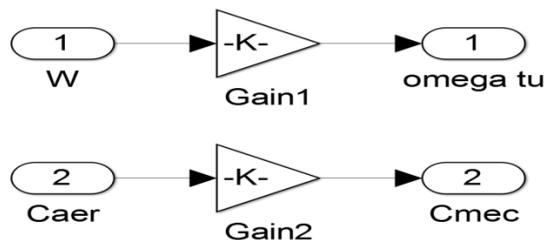
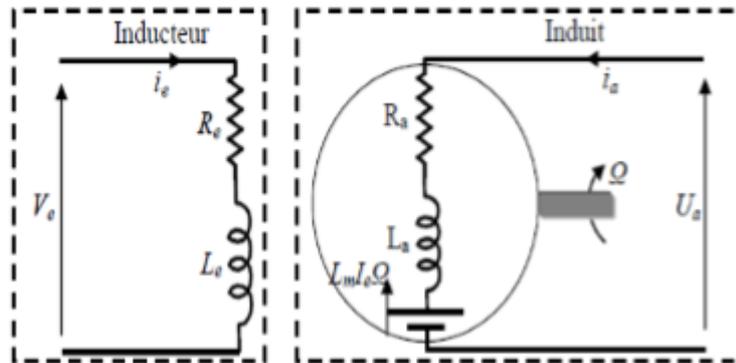


Figure II. 7 Réalisation du Multiplicateur par MATLAB Simulink

### II.3.3 Modélisation de la MCC :

Le modèle électrique de la MCC à excitation séparée est donné par :



**Figure II. 8** Schéma électrique de la MCC à excitation séparée.

Les équations électriques de la machine sont :

$$V_e = R_e * I_e + L_e * \frac{di_e}{dt} \quad (\text{II.13})$$

$$V_a = R_a * I_a + L_a * \frac{di_a}{dt} + E \quad (\text{II.14})$$

$$E = L_m * i_e * \Omega \quad (\text{II.15})$$

L'équation mécanique :

$$C - C_r = J_{mcc} * \frac{d\Omega}{dt} + f * \Omega \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- $C$  : Couple électromagnétique.
- $C_r$  : couple résistant.
- $\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine.
- $f$  : Coefficient de frottement.
- $J_{mcc}$  : Moment d'inertie

A partir des équations, électrique (induit) et mécanique, on peut construire le schéma bloc du modèle de la machine à courant continu, voir figure (II.9) :

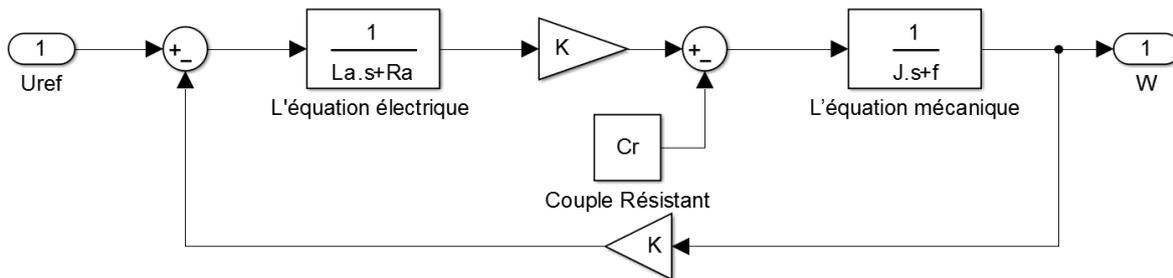


Figure II. 9 Schéma bloc de la MCC à flux constant.

### II.3.3.1 Modélisation d'un hacheur à quatre quadrants :

De nos jours, l'association des hacheurs aux machines à courant continu, est très largement utilisée 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 quel que soit le signe de la valeur moyenne du courant.

Le hacheur à quatre quadrants, présenté par la figure (II.10), à une structure en "H" est à commande complémentaire permet un fonctionnement dans les "quatre quadrants" du plan vitesse– couple.

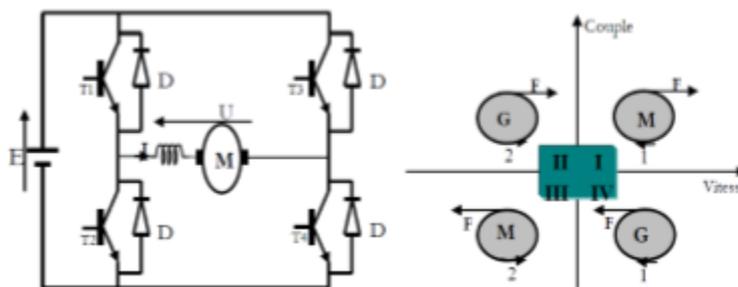


Figure II. 10 Schéma d'un hacheur a quatre quadrants et Fonctionnement de la machine dans les quatre quadrants.

Les principaux modes de fonctionnement sont résumés comme suit :

- **Dans l'intervalle [0, αT] :** Les deux transistors qui conduisent sont T1 et T4, la tension de sortie du convertisseur dans ce cas est alors :  $U=E$ .

- 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 :  $U = -E$ .

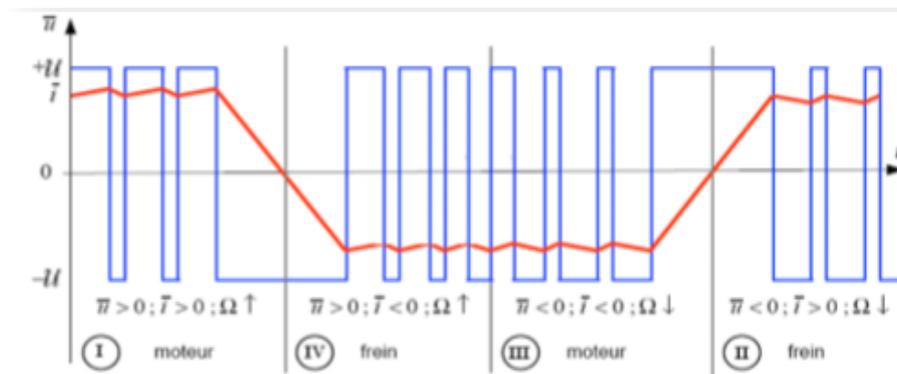
La tension moyenne à la sortie de ce convertisseur est alors donnée comme suit :

$$V_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E(t) \cdot dt \quad (\text{II.17})$$

$$V_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\alpha T} E(t) \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_{\alpha T}^T -E(t) \cdot dt \quad (\text{II.18})$$

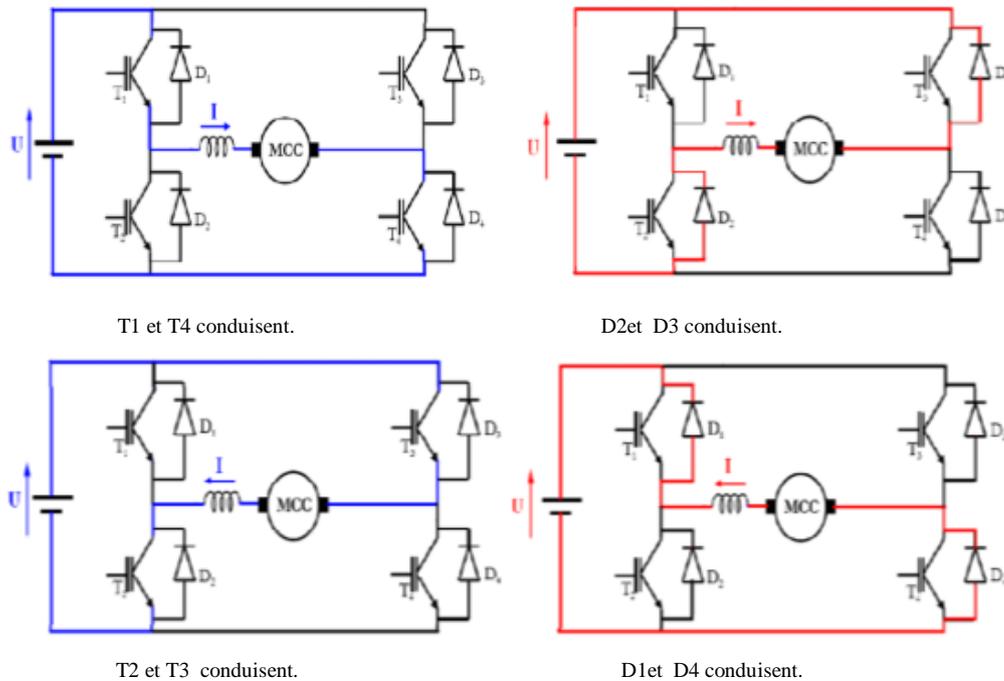
On obtient :  $V_m = (2 \cdot \alpha - 1) \cdot E$  (II.19)

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 sur la figure II.11.



**Figure II. 11** Formes de tension et de courant de la machine.

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



**Figure II. 12** Les différentes configurations des interrupteurs du hacheur à quatre quadrants.

En régime continu le convertisseur se modélise par un simple gain  $G_0$ . En régime dynamique, le modèle de ce convertisseur étant échantillonné, cela se traduit par un retard variable entre l'instant où a lieu une variation de la commande et son effet sur le convertisseur.

Ce retard varie entre 0 et  $T$ , période du convertisseur. Pour tenir compte de cet effet, on introduit un "retard moyen" ou "constante de temps statistique".

On introduit alors dans la fonction de transfert : soit un retard pur (utilisable pour l'analyse), soit par une constante de temps (très simple pour la synthèse des correcteurs) :

$$G(s) = G_0 \cdot \exp(-T_0 \cdot s) = \frac{G_0}{1 + T_0 \cdot s} \quad (\text{II.20})$$

### II.3.3.2 Simulation du hacheur à MLI et la turbine éolienne par MATLAB

#### Simulink :

Les figures II.13 et II.14 présentent respectivement la simulation du hacheur à quatre quadrants avec la commande MLI et la turbine éolienne :

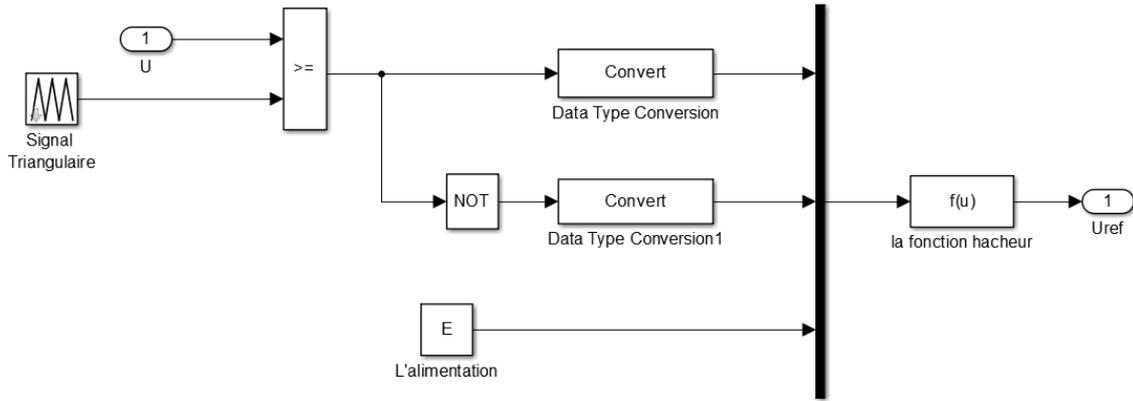


Figure II. 13 Schéma bloc d'un hacheur à MLI

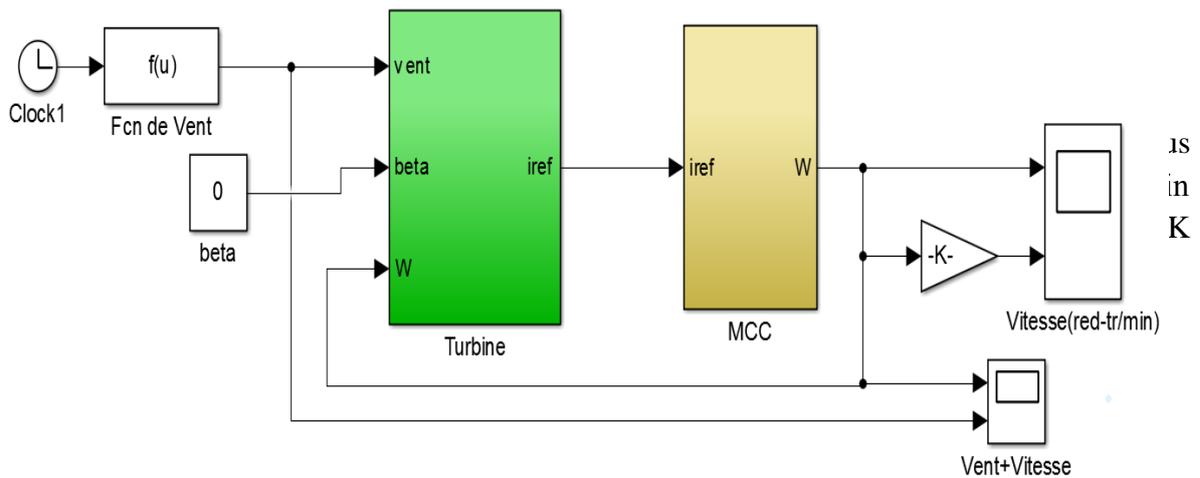
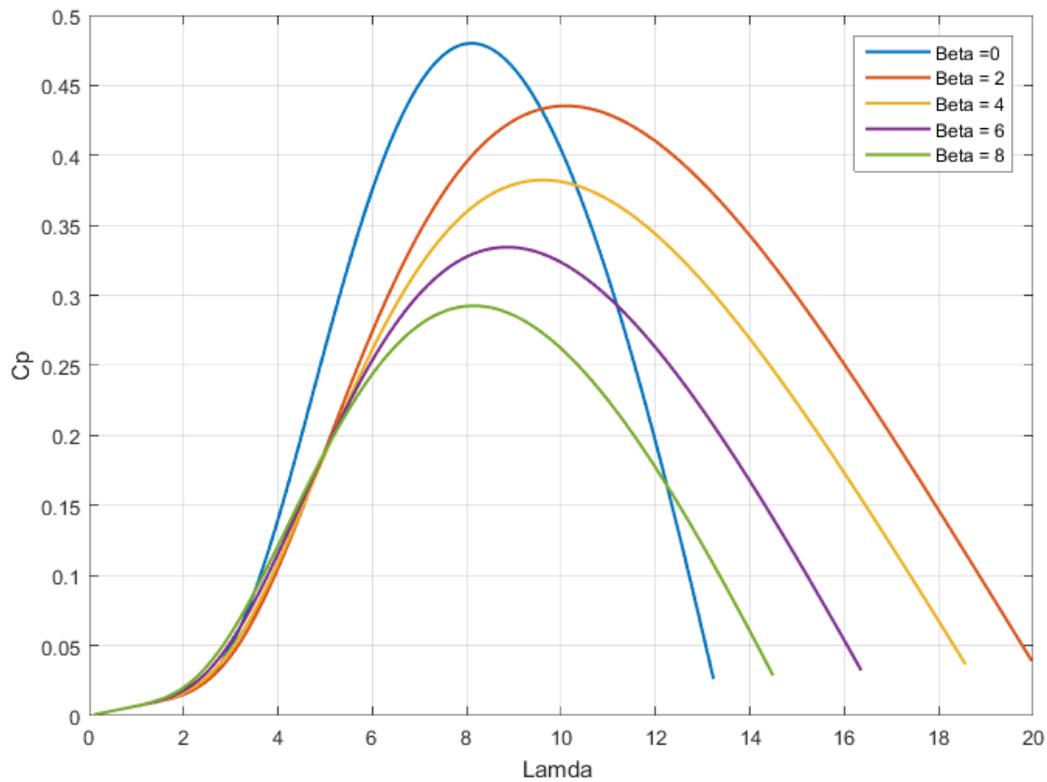


Figure II. 14 Schéma de simulation du modèle la turbine éolienne.

### II.4.1 Caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$ :

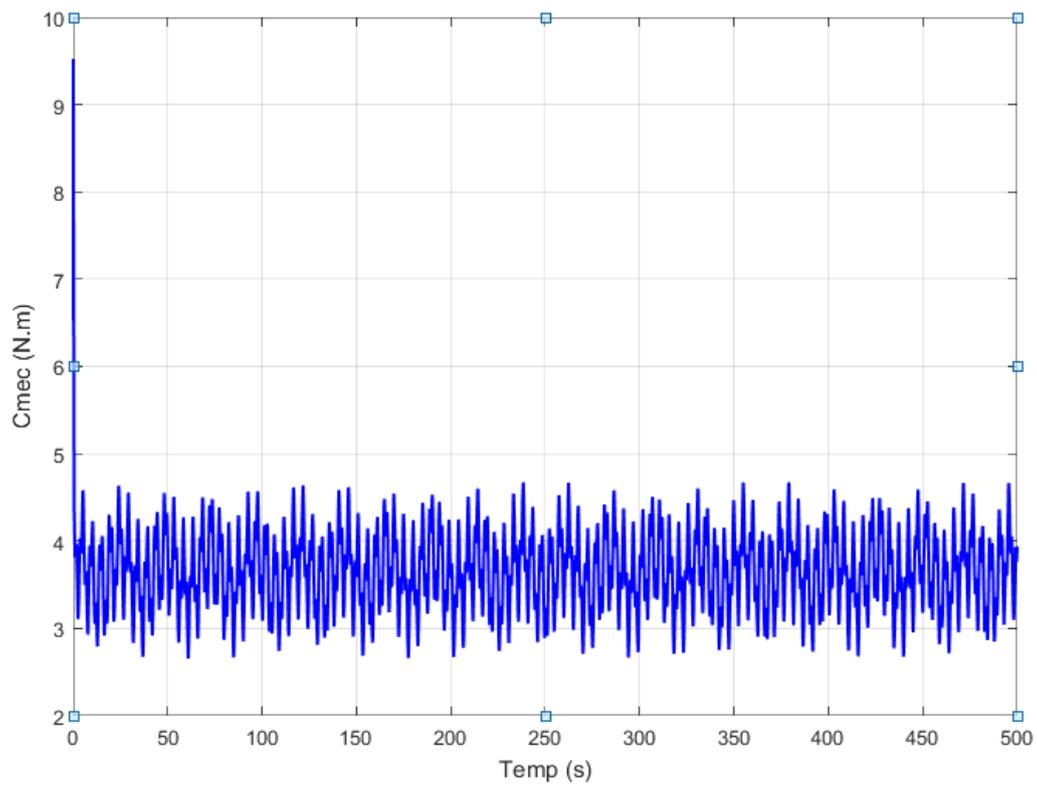
Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.15) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$ , et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$



**Figure II. 15** Coefficient aérodynamique( $C_p$ ) en fonction de ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ ).

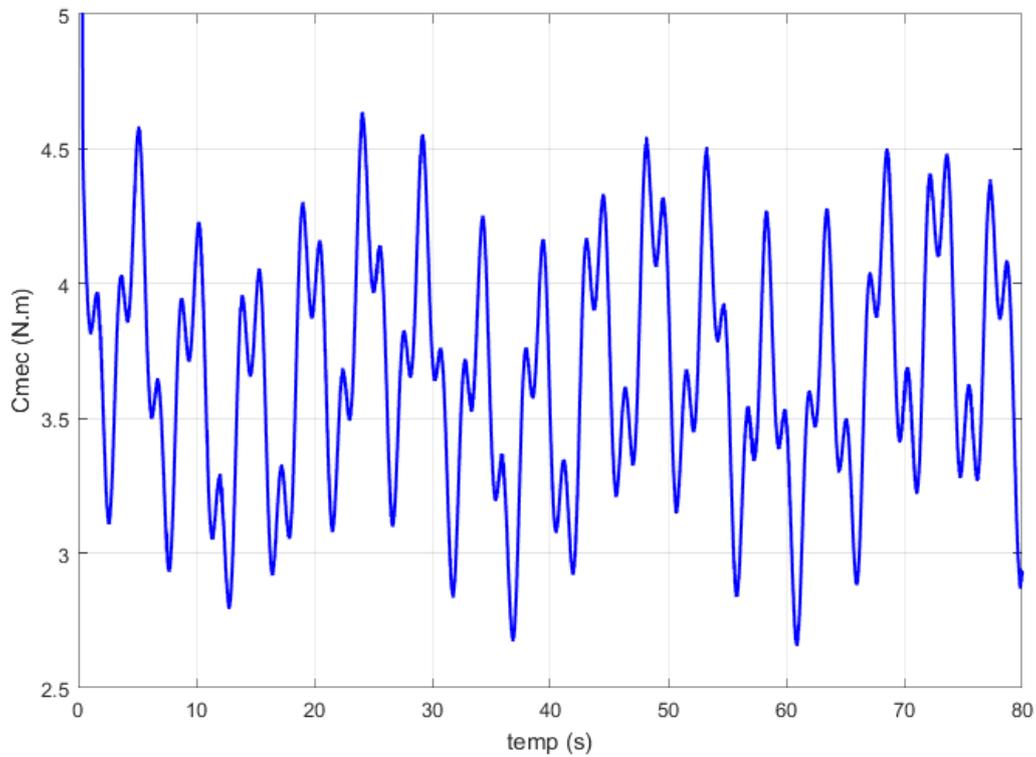
#### II.4.2 Le couple de référence et la vitesse de rotation :

Comme nous l'avons mentionné avant, nous allons faire l'étude d'un émulateur éolien alors on va commander le MCC par le couple qui sort de la turbine. En appliquant le profil du vent précédent (figure II.4) on obtient les allures, du couple de référence et de la vitesse de rotation de la turbine, voir les figures II.16, II.17 et II.18 :



**Figure II. 16** Forme du couple mécanique.

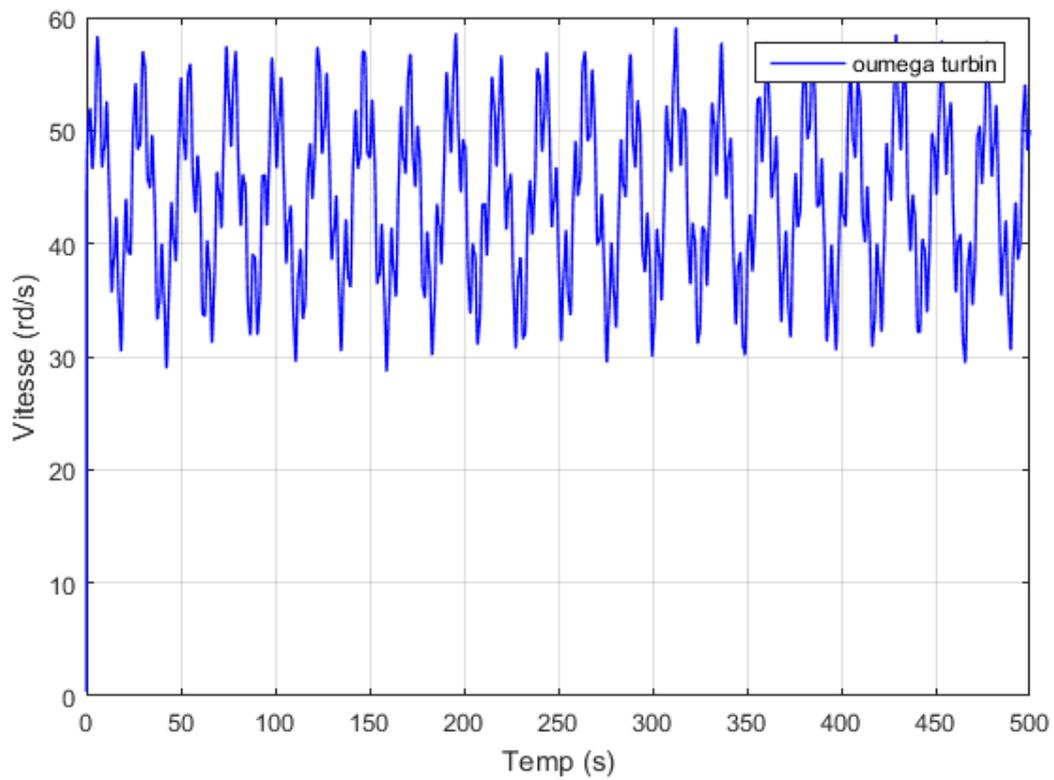
Pour mieux observer les variations du couple mécanique, on effectue un zoom sur l'allure du couple de référence de la figure précédente, voir figure II.17.



**Figure II. 17** Variations du couple mécanique zoomé.

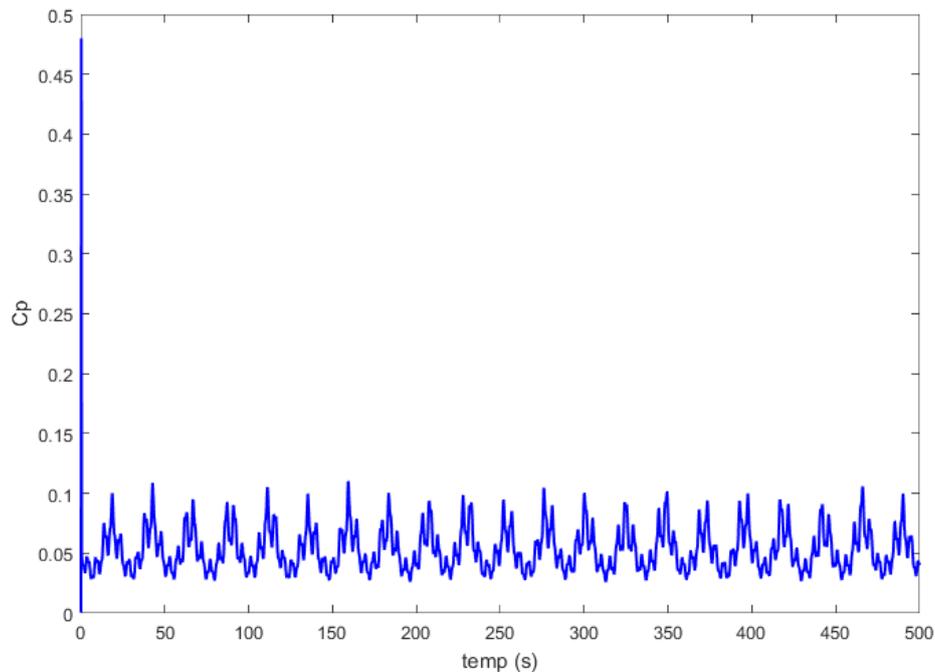
Les résultats de cette simulation montrent que le couple mécanique et la vitesse de rotation obtenus à la sortie du multiplicateur sont fluctuants et ils sont adaptés aux variations de la vitesse du vent qu'on a appliqué au modèle de la turbine.

La variation de vitesse de la turbine éolienne en fonction de temps est illustrée par la figure suivante :



**Figure II. 18** Variations de vitesse de la turbine

Les variations du coefficient de puissance dans le temps sont représentées par la figure ci-dessous :



**Figure II. 19** Coefficient de puissance en fonction du temps.

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a développé la modélisation des différents éléments constituant un émulateur d'une turbine éolienne.

Nous avons d'abord établi un modèle permettant de reproduire des variations de la vitesse du vent, puis on a passé à la modélisation de la turbine où on a choisi la turbine E-40 proposée par le constructeur Allemand. Les modèles du MCC et d'un hacheur à quatre quadrants ont été bien expliqués.

A la fin de ce chapitre on a présenté quelques résultats de la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink. Ces résultats, concernant le couple de référence produit par la turbine et la vitesse de rotation.

Dans le chapitre prochain on va entamer la régulation classique du MCC pour obliger notre émulateur de reproduire parfaitement les variations qu'impose un vent réel. Deux régulateurs classiques seront appliqués à savoir, un régulateur PI et un autre basé sur le retour d'état.

# **Chapitre III**

**Commande classique de l'émulateur éolien**

### III.1 Introduction :

Après avoir dans le chapitre précédent la modélisation mathématique des différents composant d'un émulateur éolien, à savoir : la turbine, le MCC et le hacheur à quatre quadrants, on va intéresser dans ce chapitre à la commande en couple du MCC afin d'obliger celui-ci de donner le fonctionnement de la turbine éolienne. C'est-à-dire, on va asservir le courant du moteur à celui produit par la turbine afin de reproduire le comportement réel de celle-ci.

Deux méthodes de commande seront utilisées.

- Commande par un régulateur PI.
- Commande par retour d'état.

### III.2 Régulation :

Le terme de régulation renvoie dans son sens concret à une discipline technique, qui se rattache sur le plan scientifique à l'automatique. La régulation est un cas spécifique de rétroaction où le système tend à réduire ses écarts à la commande.

#### III.2.1 Régulateur :

Un régulateur est un dispositif qui est capable, de maintenir une grandeur physique à une valeur la plus proche possible de la valeur désirée.

#### III.2.2 Définitions :

- **La grandeur réglée** : C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation.
- **La consigne** : C'est la valeur désirée que doit avoir la grandeur réglée.
- **Les grandeurs perturbatrices** : sont les grandeurs physiques susceptibles d'évoluer au cours du processus et d'influencer la grandeur réglée.
- **La grandeur réglant** : est la grandeur de commande qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée.

### III.3 Régulateur PID :

Le **régulateur PID**, appelé aussi **correcteur PID** (proportionnel, intégrateur, dérivateur ou proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle, permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé ». C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques.

#### III.3.1 Principe général :

Un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure.

Le correcteur PID agit de trois manières :

- Action **proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain  $G$  ;
- Action **intégrale** : l'erreur est intégrée et divisée par un gain  $T_i$  ;
- Action **dérivée** : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain  $T_d$ .

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici une architecture parallèle

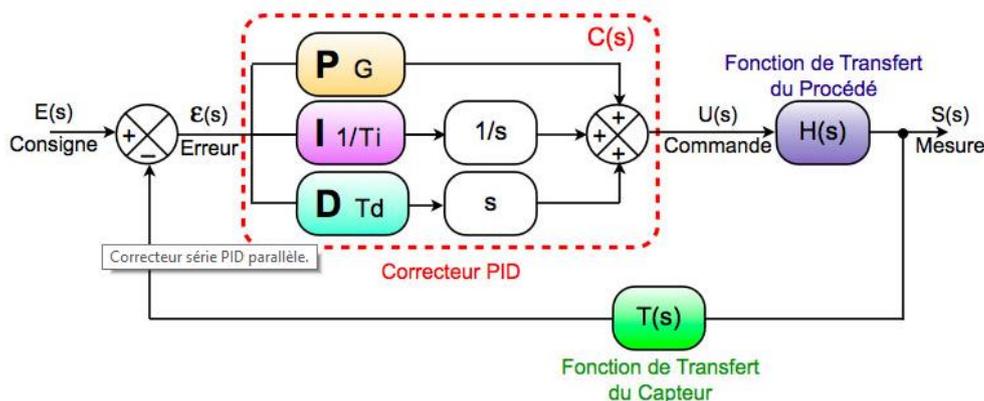


Figure III. 1 Structure de régulateur PID.

Sur le schéma ci-dessus, la fonction de transfert exprimée dans le domaine de Laplace (où  $s$  désigne la variable de Laplace, de dimension  $[T^{-1}]$ , dans la suite de l'article cette notation anglo-saxonne est remplacée par  $p$ ) du régulateur PID parallèle est la somme des trois actions :

$$C(p) = G + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{p} + T_d \cdot p \quad (\text{III.1})$$

En régulation des procédés, on préfère implanter la fonction de transfert du PID sous la forme mixte :

$$C(p) = G \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p \right) \quad (\text{III.2})$$

Où  $T_i$  et  $T_d$  sont des constantes de temps (différentes de  $T_i$  et  $T_d$  dans la formulation précédente) et  $G$  est le gain de la partie proportionnelle.

Les différents paramètres à trouver sont  $G$ ,  $T_i$  et  $T_d$  pour réguler la grandeur physique du procédé ayant pour fonction de transfert  $H(s)$ . Il existe de nombreuses méthodes pour trouver ces paramètres. Cette recherche de paramètre est communément appelée *synthèse*.

La fonction de transfert du contrôleur **PID** présenté est idéale. En fait, elle est irréalisable car le degré du numérateur est supérieur au degré du dénominateur. Dans la réalité, on filtre toujours l'action dérivée comme suit :

$$T_d p \rightarrow \frac{T_d p}{1 + \frac{T_d}{N} p} \quad (\text{III.3})$$

Avec  $N > 1$  on obtient alors une nouvelle fonction de transfert réalisable pour notre régulateur. Le choix de  $N$  résulte d'un compromis : pour  $N$  très grand, l'action dérivée n'est pratiquement plus filtrée, ce qui se traduit par une grande sensibilité du signal de commande par rapport au bruit de mesure. Si l'on prend  $N$  trop petit, l'effet de l'action dérivée devient quasiment inexistant. Une étude théorique permet de préciser que  $3 < N < 10$ .

### III.3.2 La commande de l'émulateur par PI :

Le régulateur de courant utilisé pour la commande en couple de la machine à courant continu est un régulateur proportionnel intégral, car il est simple et rapide à synthétiser et mettre en œuvre.

Dans cette partie on va développer la synthèse du régulateur proportionnel-intégral (PI).

La fonction de transfert du régulateur est donnée par l'équation suivante :

$$H(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

- $K_p$  : Gain proportionnel du régulateur.
- $K_i$  : Gain intégral du régulateur.

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.

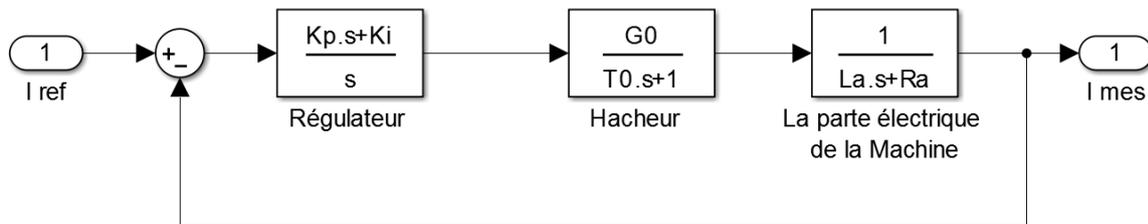


Figure III.2 Schéma bloc de la MCC régulée par un PI.

Avec :

- $K_i$  : Gain intégral.
- $K_p$  : Gain proportionnel.
- $G_0$  : Gain du convertisseur (hacheur).
- $T_0$  : Constante de temps du convertisseur.
- $R_a$  : Résistance d'induit de la machine.
- $L_a$  : Inductance d'induit de la machine.

D'après la figure (III.2) la fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{G_0}{T_0 \cdot s + 1} \right) \left( \frac{1}{L_a \cdot s + R_a} \right) \tag{III.5}$$

$$FTBO(s) = \frac{K_i \left( 1 + \frac{K_p}{K_i} s \right)}{s} \frac{G_0}{T_0 \cdot s + 1} \frac{1}{1 + \frac{L_a}{R_a} s} \tag{III.6}$$

En utilisant la méthode de compensation des pôles et on suppose que :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_a}{R_a} \tag{III.7}$$

On peut compenser le pôle de la fonction de transfert précédente par son zéro, on obtient la fonction suivante :

$$FTBO(s) = \frac{\frac{K_i}{R_a} G_0}{s T_0 \cdot s + 1} = \frac{\frac{K_i G_0}{R_a}}{s(T_0 \cdot s + 1)} \quad (III.8)$$

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

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{\frac{\frac{K_i G_0}{R_a}}{s(T_0 \cdot s + 1)}}{1 + \frac{\frac{K_i G_0}{R_a}}{s(T_0 \cdot s + 1)}} \quad (III.9)$$

On remplace  $\frac{K_i G_0}{R_a}$  par  $G$  :  $G = \frac{K_i G_0}{R_a}$

$$FTBF(s) = \frac{\frac{G}{s(T_0 \cdot s + 1)}}{1 + \frac{G}{s(T_0 \cdot s + 1)}} = \frac{G}{s(T_0 \cdot s + 1) + G} = \frac{G}{T_0 \cdot s^2 + s + G} \quad (III.10)$$

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

$$FTBF(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot s + w_n^2} \quad (III.11)$$

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

Le gain de la fonction de transfert est optimal pour un amortissement.

$$\xi = 0.707 \Leftrightarrow w_n = 10 \quad (III.12)$$

D'où

$$w_n = \frac{1}{2 \cdot T_0 \cdot \xi} \Rightarrow w_n^2 = \frac{1}{4 \cdot (T_0 \cdot \xi)^2} \quad (III.13)$$

On obtient alors le système suivant :

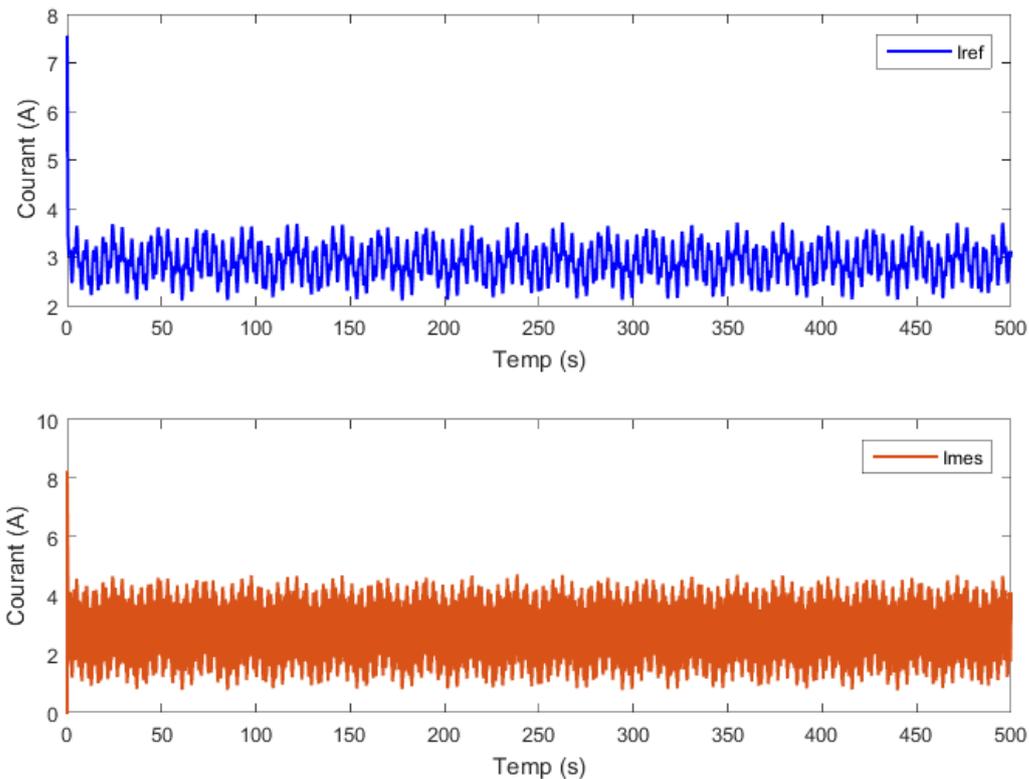
$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{K_p}{K_i} = \frac{L_a}{R_a} \\ G = \frac{1}{T_0 \cdot \omega_n^2} \Rightarrow G = \frac{1}{T_0 \cdot \frac{1}{4 \cdot (T_0 \cdot \xi)^2}} \Leftrightarrow \frac{K_i G_0}{R_a} = \frac{1}{T_0 \cdot \frac{1}{4 \cdot (T_0 \cdot \xi)^2}} \end{cases} \quad (III.14)$$

Les expressions des gains intégral et proportionnel du régulateur sont :

$$\Rightarrow \begin{cases} K_p = \frac{L_a \cdot K_i}{R_a} \\ K_i = \frac{4 \cdot R_a \cdot T_0 \cdot \xi^2}{G_0} \end{cases} \quad (III.15)$$

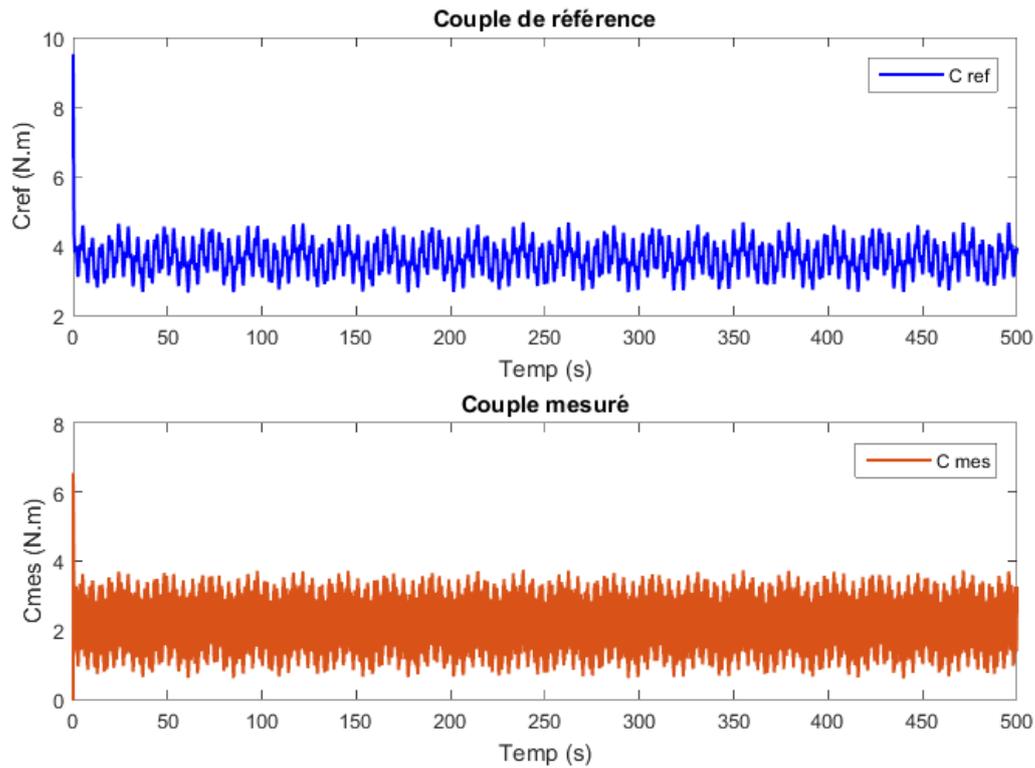
### III.3.3 Les résultats de simulation :

Après simulation on a obtenu les formes, du courant et du couple de la machine ainsi que sa vitesse, représentées par les figures suivantes :



**Figure III.3** Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine.

La figure suivante illustre la forme du couple mesuré avec sa référence.



**Figure III.4** Couple de référence et le couple mesuré

Afin de mieux analyser la forme du courant et le couple, un zoom, comme le montre la figure III.5 et figure III.6, a été établie.

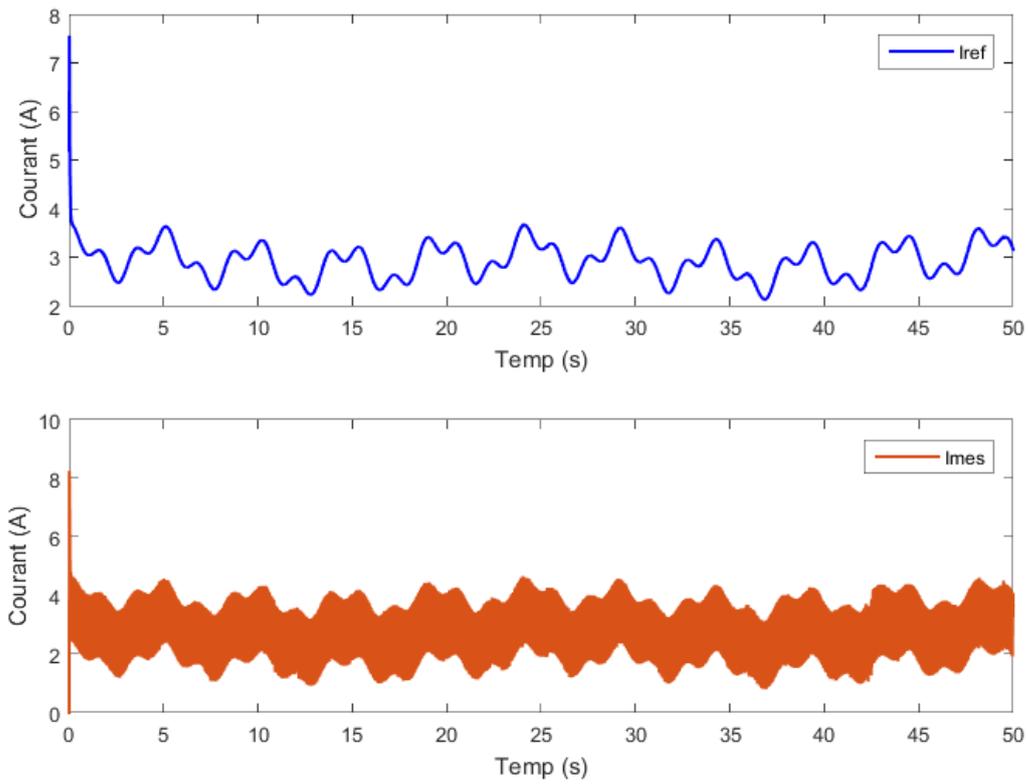


Figure III.5 Variations du courant de la MCC zoomé.

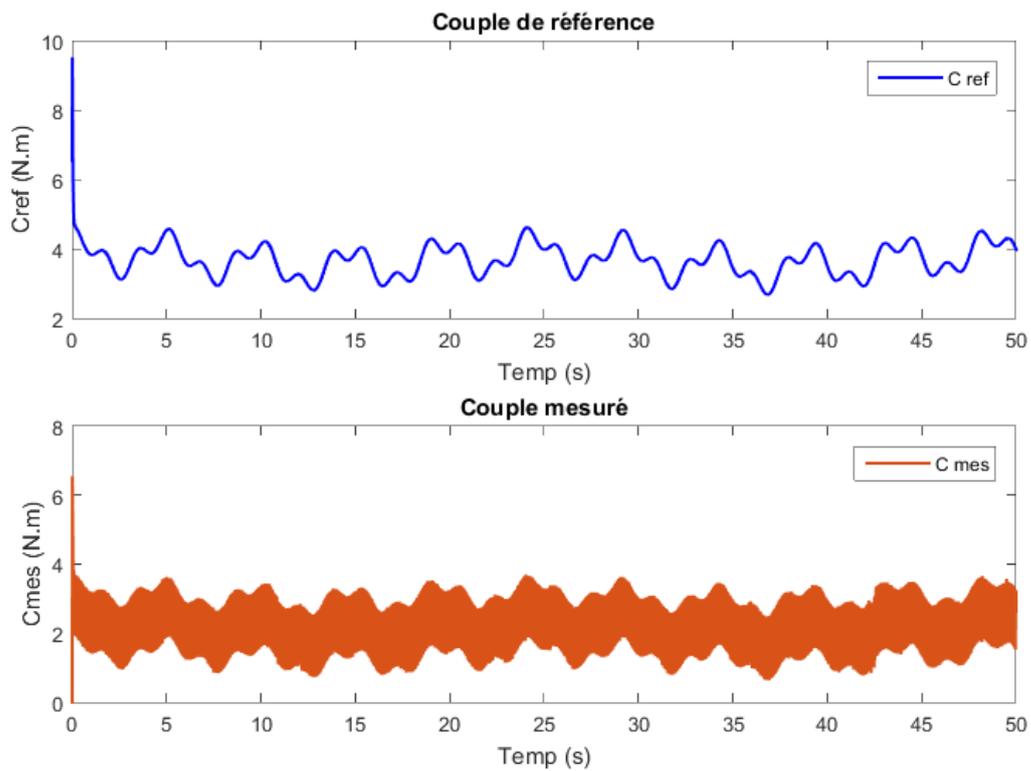
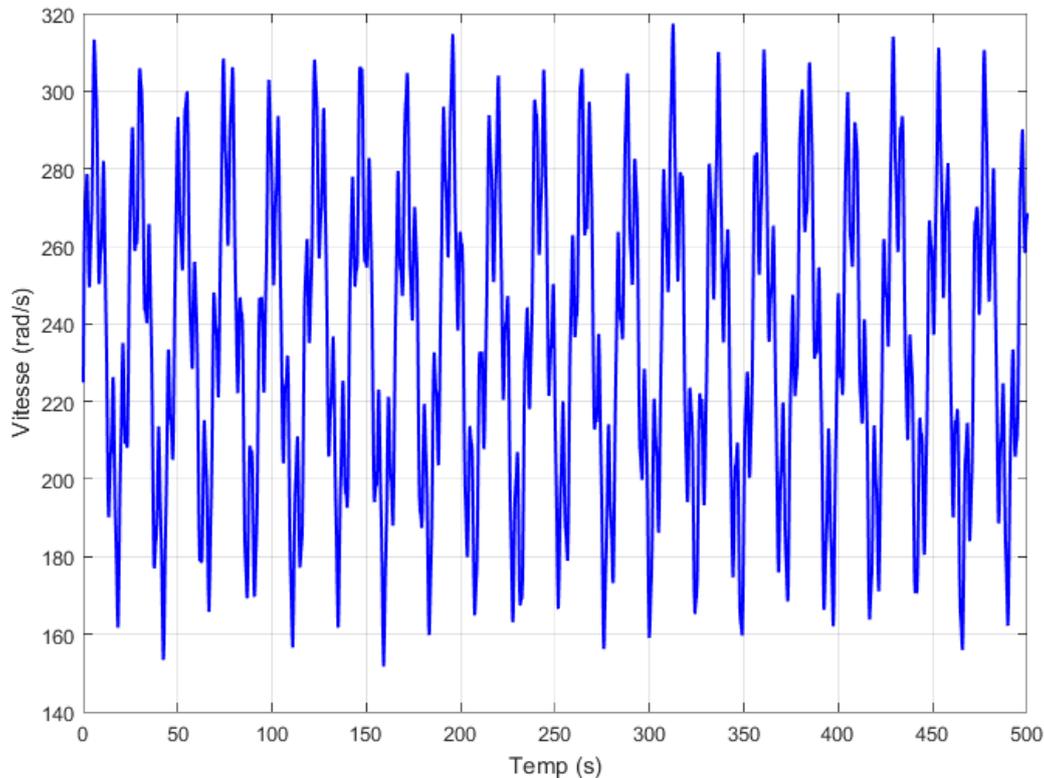


Figure III.6 Couple de referens et couple mesuré zoomé.

On constate que, le couple mesuré suit très bien les variations de sa 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. Et on peut aussi remarquer qu'il est fluctuant tout en suivant les variations du vent appliqué.

On a également relevé la forme de la vitesse de rotation de la machine à courant continu. Elle est représentée sur la figure III.7.



**Figure III.7** Vitesse de la MCC ( rad/s).

Comme pour le couple, la vitesse de rotation de la machine est très fluctuante suivant les variations du vent appliqué à la turbine. En effet, la turbine étant libre de tout couple résistant, les variations de vitesse de rotation suivent directement les variations du vent.

### **III.4 La commande de l'émulateur par retour d'état :**

#### **III.4.1 Représentations d'état d'un système :**

Soit un système multi-entrées (m entrées), multi-sorties (p sorties), dont le modèle est décrit par une ou plusieurs équations différentielles linéaires à coefficients constants.

Ce modèle peut s'écrire sous la forme d'un système d'équations matricielles différentielles du premier ordre :

$$\dot{X}(t) = A.x(t) + B.u(t) \quad \text{Équation de commande} \tag{III.16}$$

$$Y(t) = C.x(t) + D.u(t) \quad \text{Équation d'observation} \tag{III.17}$$

Où  $X(t)$  est le vecteur d'état dont le nombre d'éléments  $n$  dépend de la complexité du système,  $U(t)$  est le vecteur de commande,  $Y(t)$  est le vecteur de sortie, et  $A(n, n)$ ,  $B(n, m)$ ,  $C(p, n)$  et  $D(p, m)$  sont des matrices à coefficients constants. Le modèle sous cette forme est appelé représentation d'état du système. Cette représentation d'état n'est pas unique et dépend du vecteur d'état choisi.

### III.4.2 Modélisation d'un système sous forme d'état :

La modélisation d'un système est une série d'équations mathématiques obtenue grâce à l'étude du comportement physique d'un système. Elle permet d'estimer le comportement de ce système en fonction d'une certaine commande ou de déterminer la commande permettant d'obtenir un comportement précis pour ce système. L'écart entre le comportement attendu du système et son comportement réel dépendra bien entendu de la fidélité au système du modèle choisi.

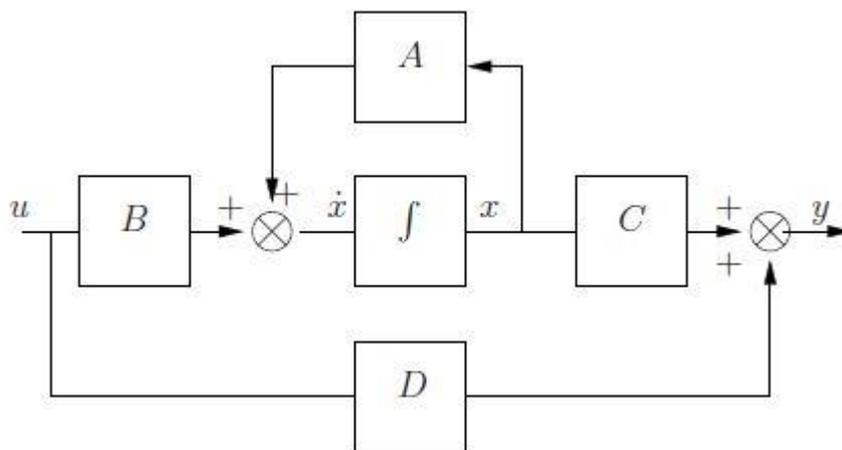


Figure III.8 Forme standard de représentation d'état.

### III.4.3 Principe :

Le retour d'état est le moyen le plus classique d'envisager la commande d'un système modélisé par une représentation d'état. Il suppose que toutes les composantes  $x_i$  du vecteur d'état  $x$  sont accessibles à la mesure. Une loi de commande possible est alors :

$$U(t) = H.y_c(t) - K.x(t) \tag{III.18}$$

Où  $K \in R^n$  est un vecteur ligne de  $n$  composantes qu'il est convenu d'appeler «vecteur de retour d'état »,  $H$  est un scalaire dit de précommande et  $Y_c$  est la consigne, c'est-à-dire l'entrée du système en boucle fermée. Si on regarde attentivement l'équation (III-18), on comprend que ce type de loi de commande ne correspond plus au schéma d'asservissement classiquement rencontré dans l'approche fréquentielle mais à un nouveau schéma de commande, comme indiqué sur la figure (III.9).

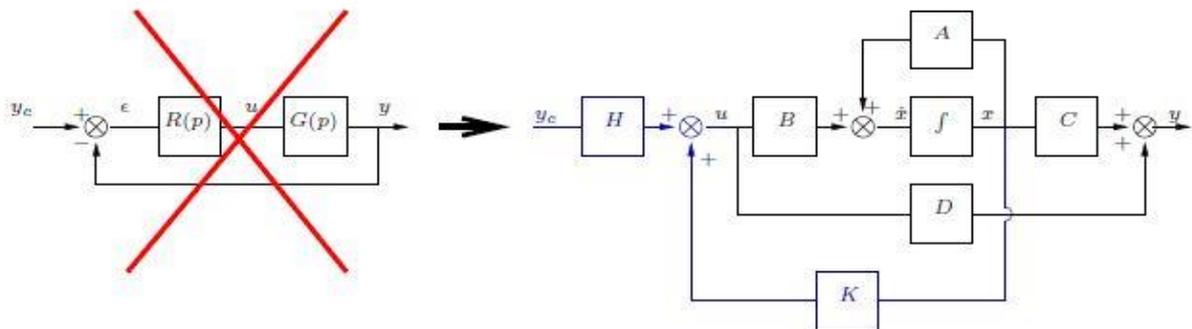


Figure III.9 Schéma d'asservissement

$K$  : la matrice de retour d'état

L'équation d'état du système en boucle fermé s'écrit :

$$\dot{X}(t) = A.x(t) + B[Hy_c(t) - Kx(t)] \tag{III.19}$$

$$\dot{X}(t) = \underbrace{[A - BK]}_{A_f} x(t) + BHy_c(t) \tag{III.20}$$

$A_f = A - BK$  ..... La matrice d'état du système en boucle fermé vaut  $A_f$

### III.4.4 La Commandabilité :

Un système est dit commandable lorsque, pour tout état initial  $X_{ini}$ , il existe une commande  $U(t)$  permettant d'atteindre n'importe quel état final  $X_{fin}$  en un temps fini.

Concrètement, pour déterminer la commandabilité d'un système, on peut calculer la matrice de commandabilité d'une de ses représentations d'état, définie de la manière suivante :

$$C(A;B) = \begin{bmatrix} B & AB & A^2 B & \dots & A^{n-1} B \end{bmatrix} \tag{III.21}$$

Où : n est le nombre de variables d'état.

Le système est alors commandable si et seulement si la matrice de commandabilité est de rang plein, c'est-à-dire que son déterminant est non nul dans le cas d'une matrice carrée.

Si :  $\text{Rang}(C) = n$  le système est commandable.

$\text{Rang}(C) < n$  le système est partiellement commandable.

### III.4.5 Observabilité :

Un système est dit observable lorsqu'il est possible de reconstruire l'état X de ce système à un instant donné t à partir de la connaissance de son entrée U et de sa sortie Y pour des temps au-delà de t.

Concrètement, pour déterminer l'observabilité d'un système, on peut calculer la matrice d'observabilité  $\Theta$  d'une de ses représentations d'état, définie de la manière suivante :

$$\Theta_{A,C} = \begin{bmatrix} C \\ C.A \\ C.A^2 \\ \vdots \\ C.A^{n-1} \end{bmatrix} \tag{III.22}$$

Où n est le nombre de variables d'état. Le système est alors observable si et seulement si la matrice d'observabilité est de rang plein, c'est à dire que son déterminant est non nul.

### III.4.6 Calcul de la commande dans le cas générale :

Dans le cas général, le retour d'état peut modifier notablement la forme de la matrice d'état et le calcul n'est pas aussi simple que dans le cas de la forme compagne pour la commande. Les étapes du calcul de la commande sont alors les suivantes :

- ✓ Calcul de la matrice (A-BK) en boucle fermé.
- ✓ Calcul du polynôme caractéristique de (A-BK). Il vaut  $\det(PI-(A-BK))$ .
- ✓ Identification du polynôme caractéristique de (A-BK) avec le dénominateur de la fonction de transfert de la boucle fermée :

$$\det(PI-(A-BK)) = (P-\gamma_0)(P-\gamma_1)\dots(P-\gamma_{n-1}) \tag{III.23}$$

D'où  $(\gamma_0), (\gamma_1), \dots, \dots, \gamma_{n-1})$  sont les poles que l'on veut imposer.

### III.4.7 Commande du moteur à courant continu par retour d'état :

Dans cette section, nous cherchons à montrer comment procéder lors de la conception de la commande par retour d'état, afin de commander un moteur à courant continu en revenant à la modélisation de notre système, nous choisissons comme variable d'état le courant de l'induit **I** et la vitesse **Ω**.

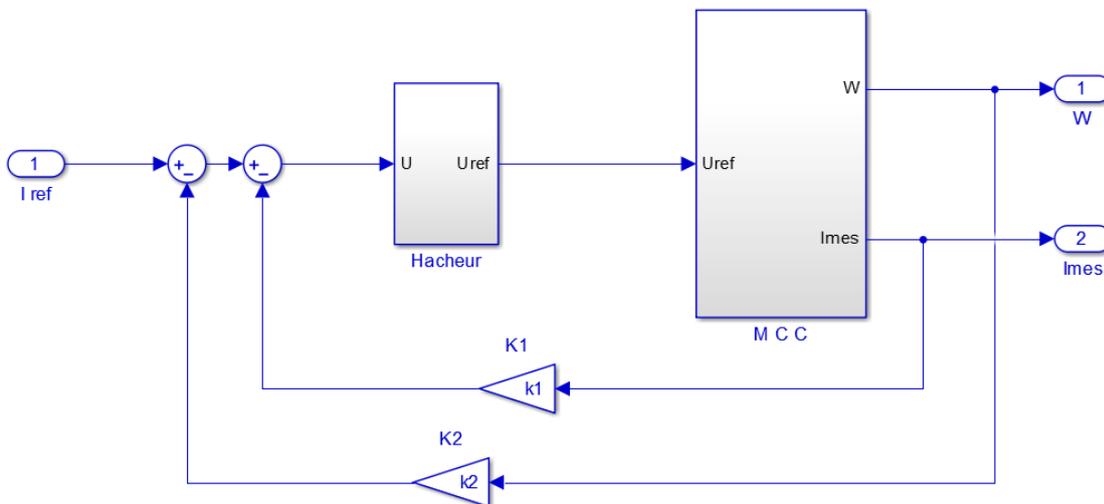


Figure III.10 Schéma bloc de la MCC régulée par retour d'état.

Alors notre vecteur d'état devient :

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Les équations électriques :

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{III.25})$$

Ou  $E = K \cdot \Omega$  avec  $K = K_e \cdot \Phi_{\max} = C_t$

On obtient :  $\dot{I} = -\frac{R_a}{L_a} I - \frac{K}{L_a} \Omega + \frac{1}{L_a} U$  (III.26)

Les équations mécaniques du moteur sont :

$$C_e - \sum C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.27})$$

Avec  $\sum C_r = f \cdot \Omega + Cr$  (III.28)

On obtient  $\dot{\Omega} = \frac{K}{J} I - \frac{f}{J} \Omega - \frac{1}{J} C_r$  (III.29)

D'après les équations mécaniques et électriques du moteur on obtient la représentation interne suivante :

On pose :  $a_1 = \frac{Ra}{La}$      $a_0 = \frac{K}{La}$      $b_0 = \frac{1}{La}$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ \frac{K}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} C_r(t) \\ Y(t) = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} I(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Ou  $C_r(t)$  : est une grandeur de perturbation.

Trouvons le gain du régulateur par retour d'état qui assure les spécifications suivantes :

$\xi = 0.707$  et  $w_n = 80 \text{rad} / \text{s}$ .

Alors l'équation désirée est : 
$$FT = \frac{w_n^2}{s^2 + 2.\xi.w_n.s + w_n} \tag{III.31}$$

**III.4.7.1 Etude de la commandabilité :**

Un système est dit commandable si est seulement si le  $\det(C(A, B))$  différent de zéro.

$$A = \begin{bmatrix} -91.4153 & -18.4223 \\ 81.0204 & -0.1327 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 23.2019 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C(A, B) = \begin{bmatrix} 23.2019 & -2121 \\ 0 & 1879.8 \end{bmatrix}$$

$\det(C(A, B)) = 43615$  Comme le déterminant est différent de zéro, alors le système est commandable.

**III.4.7.2 Calcul de la Matrice d'état K :**

D'après le cahier de charge, la réponse désirée est donnée par :

$$\dot{x} = A_m x_m + B_m u_c \tag{III.32}$$

$$\text{Où : } A_m = \begin{pmatrix} -2.\xi.\omega & -\omega^2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad B_m = \begin{pmatrix} \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Alors le polynôme caractéristique désiré est :

$$P = S^2 + 2.\xi.\omega_n.S + \omega_n^2 \tag{III.33}$$

$$P = S^2 + 113.12S + 6400 \tag{III.34}$$

La commande par retour d'état est alors représentée par :

$$u = -Kx = -k_1 x_1 - k_2 x_2 \tag{III.35}$$

La conséquence d'utiliser une telle entrée est de modifier l'équation d'état à :

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \tag{III.36}$$

Les pôles de la matrice  $A - BK$  sont simplement les valeurs propres de celle-ci.

Les valeurs propres sont les valeurs de solutionnant :

$$P_{\text{désiré}} = \det(SI - (A - BK)) \tag{III.37}$$

Avec  $I$  : matrice d'identité

Les coefficients obtenus après les calculs sont :

$$k_1 = 1.6981 \text{ et } k_2 = 0.0091$$

### III.4.8 Commande par retour d'état avec action intégrale :

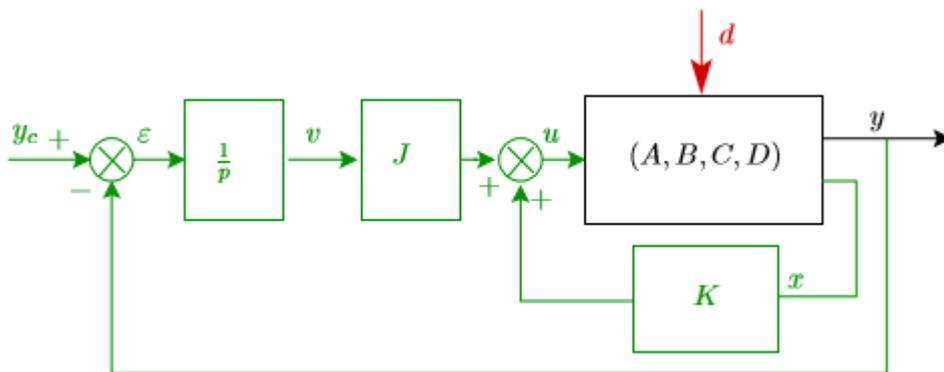


Figure III.11 Retour d'état avec intégration de l'écart.

Une perturbation exogène  $d$  vient s'ajouter comme entrée non maîtrisable du système agissant directement sur la dynamique de  $x$ . Cette perturbation peut résulter d'un vrai phénomène exogène ou résumer approximativement l'effet de dynamiques négligées, d'imprécisions sur le modèle du système. La loi de commande s'exprime

$$u(t) = Kx(t) + Jv(t) = Kx(t) + J \int_0^t \varepsilon(\theta) d\theta \tag{III.38}$$

Où  $K$  appartient à  $R^n$  et  $J$  est un scalaire. L'écart  $\varepsilon$  est tout simplement, comme dans l'approche fréquentielle, définie par  $\varepsilon = y_c - y$ . En considérant l'état  $x' = [x \ v]'$ , il est assez facile de voir que ce dernier vérifie le système algébro-différentiel.

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varepsilon} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{pmatrix}}_{A'} \begin{pmatrix} x \\ \varepsilon \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix}}_{B'_1} u + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}}_{B'_2} y_c + \underbrace{\begin{pmatrix} I_n \\ 0 \end{pmatrix}}_{B'_3} d \\ y = \underbrace{[C \quad 0]}_{C'} \begin{pmatrix} x \\ \varepsilon \end{pmatrix} + \underbrace{D}_{D'} u \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

Il est ici supposé que la paire de matrices  $(A', B')$  soit commandable. Quant à la loi de commande (III.38), elle peut se récrire :

$$U = -\underbrace{[K \quad -J]}_{K'} \begin{bmatrix} x \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (\text{III.40})$$

En injectant (III.40) dans (III.39), il vient :

$$\begin{cases} \dot{x} = (A' + B'_1 K') x + B'_2 y_c + B'_3 d \\ \dot{\varepsilon} = (C' + D' K') x \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Il apparaît clair, à la vue de (III.41) que le vecteur  $K'$  (c'est-à-dire la concaténation de  $K$  et  $J$ ) peut être choisi par une méthode de placement de pôles. La procédure s'applique alors à la paire  $(A', B'_1)$  de manière à placer les valeurs propres de la matrice d'évolution  $A'_f = A' + B'_1 K'$ . Ce placement est possible dès lors que la paire  $(A', B'_1)$  est commandable. Il faut bien sûr penser à spécifier un pôle de plus (donc  $(n + 1)$  en tout) pour prendre en compte la présence de l'intégrateur. La procédure n'est pas redétaillée ici puisqu'elle se rapproche des algorithmes précédemment introduits,

L'écart de poursuite  $\varepsilon$  est la dernière composante du vecteur  $v = x'$ . C'est pourquoi il est utile d'analyser la dynamique de  $v$ .

$$\dot{v} = (A' + B'_1 K') v + B'_2 y_c' + B'_3 d' \quad (\text{III.42})$$

Si l'on considère que la consigne  $y_c$  est un échelon (ou` une succession lente d'échelons), alors  $y_c' = 0$  pour à peu près chaque instant du temps (sauf à l'instant de commutation de  $y_c$ ). Si l'on considère que  $d$  est aussi une perturbation en échelon, il vient également  $d' = 0$

$$v' = (A' + B_1'K')v \tag{III.43}$$

Puisque le vecteur  $K'$  est choisi de telle sorte que  $(A' + B_1'K')$  soit Hurwitz-stable, alors

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (v) = 0 \tag{III.44}$$

Ce qui implique nécessairement

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\varepsilon) = 0 \tag{III.45}$$

Ceci signifie que l'erreur de position est nulle ou encore que le gain statique du système augmenté bouclé soit unitaire. La consigne en échelon est donc suivie en régime permanent. Les perturbations de type échelon situées en aval de l'intégrateur dans la chaîne directe sont rejetées en régime permanent

### III.4.8.1 Calcul de la Matrice d'état K :

D'après le cahier de charger président :

$$K = [2.1486 \quad 4.5157] \quad C, a, d \quad k_1 = 2.1486 \text{ et } k_2 = 4.5157 \text{ et } k_j = 1500.$$

Le schéma de simulation de la commande par retour d'état avec action intégrale du système est présenté par la figure III.12

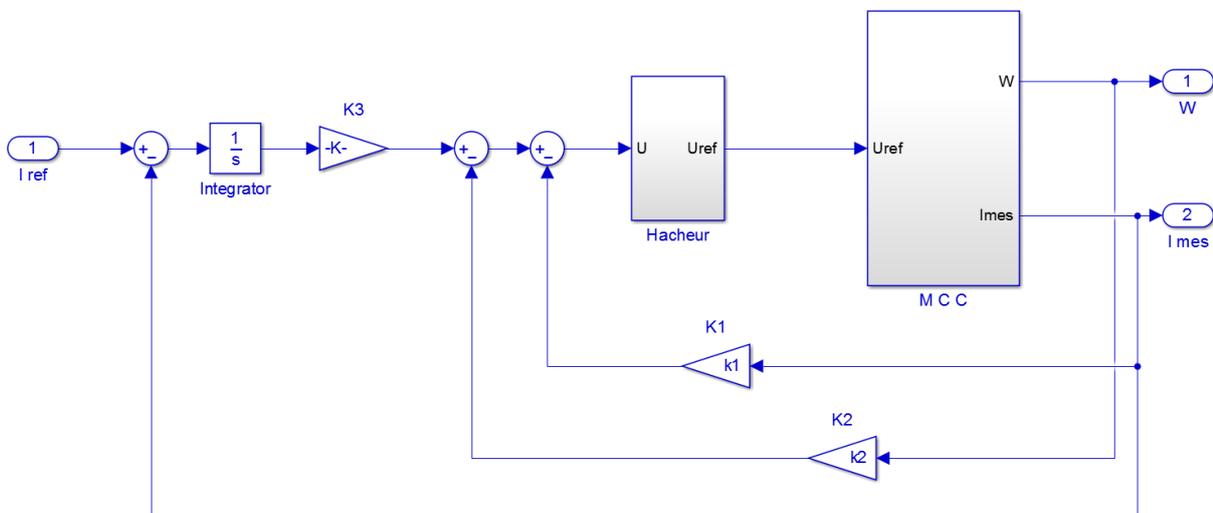
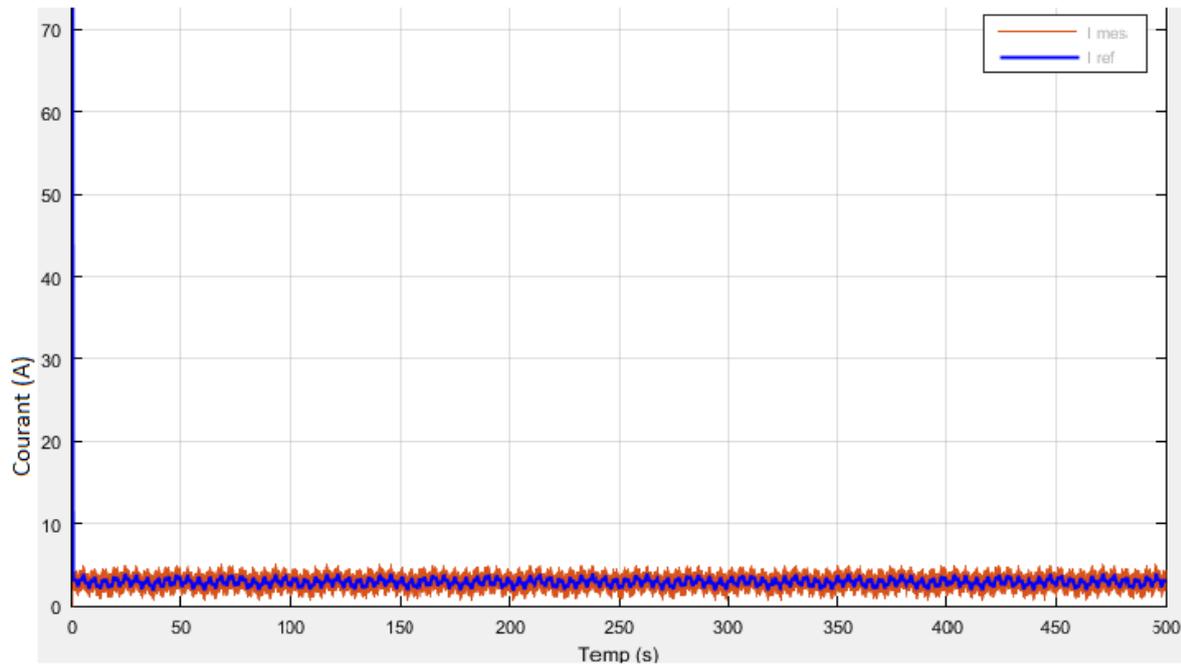


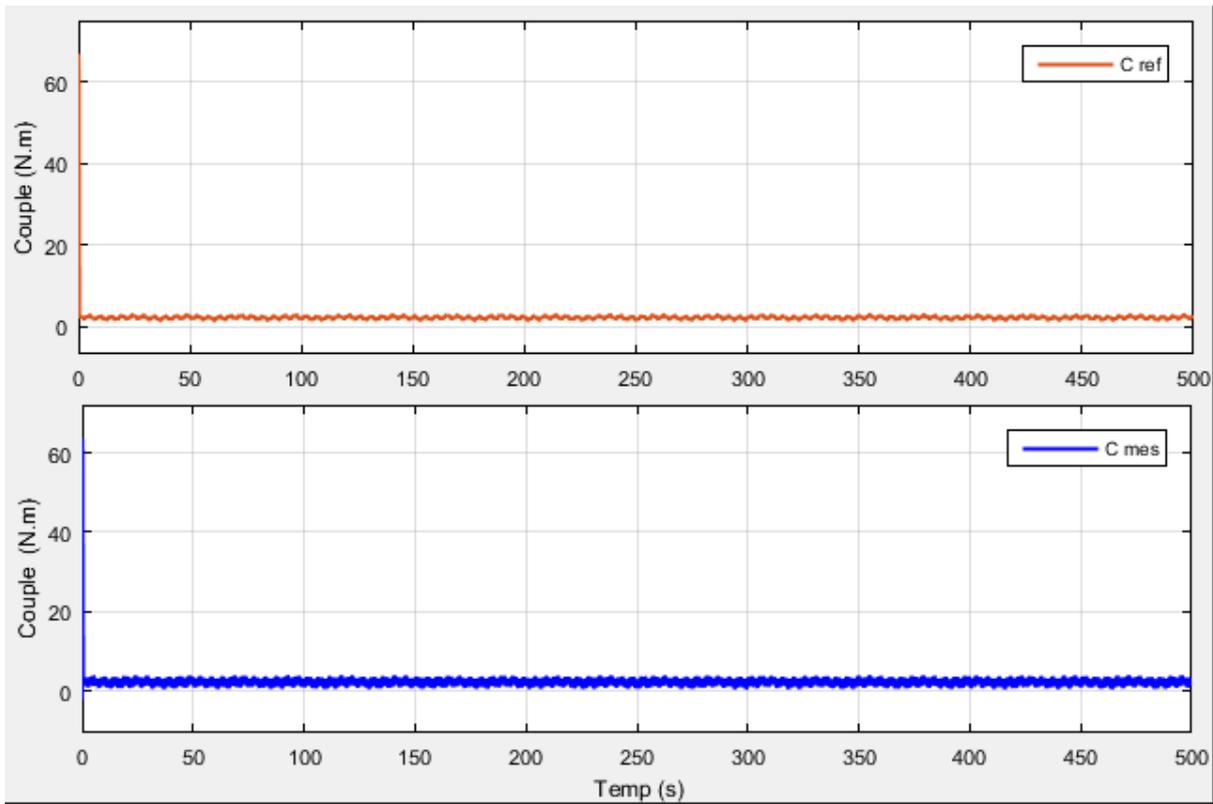
Figure III.12 Schéma bloc de la MCC régulée par router d'état avec intégration.

### III.4.9 Les résultats de simulation :

Les figures III.13 jusqu'à III.17 montrent le comportement dynamique de l'émulateur éolien avec le régulateur par retour d'état avec action intégrale.



**Figure III.13** Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine.



**Figure III.14** Formes du couple de référence et du couple mesuré de la machine.

Afin de mieux analyser la forme du courant et le couple on fait un zoom comme le montre la figure III.15 et figure III.16,

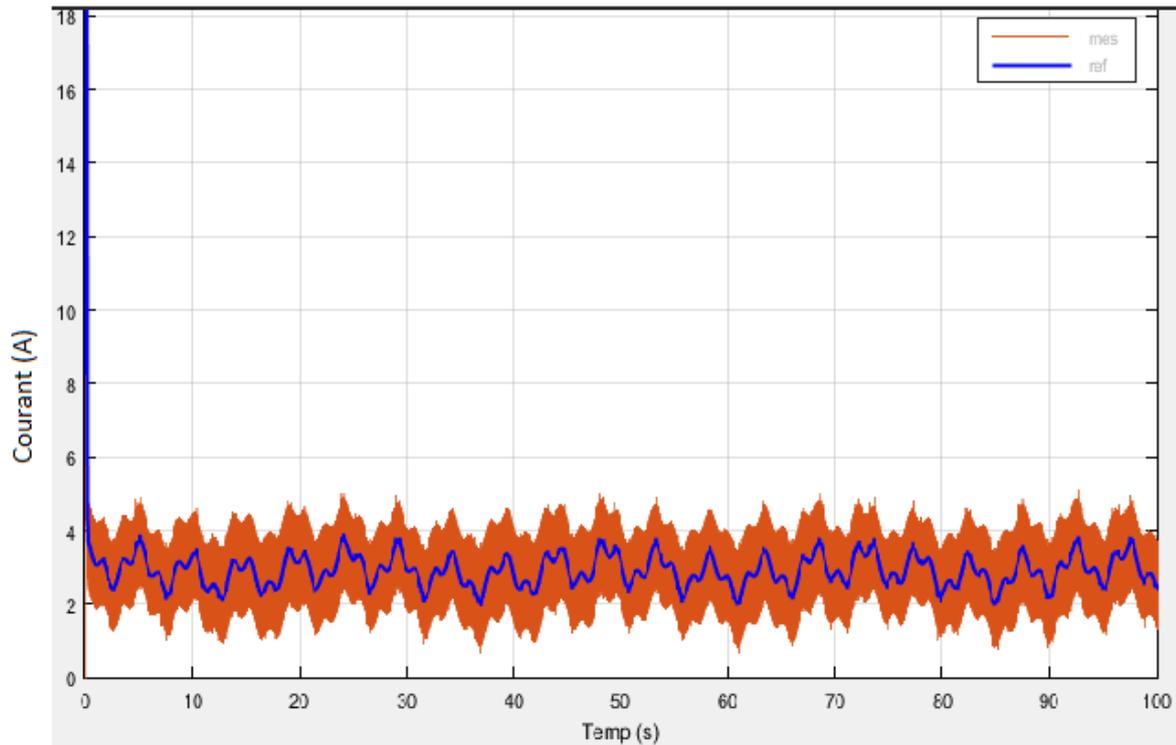


Figure III.15 Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine zoomé.

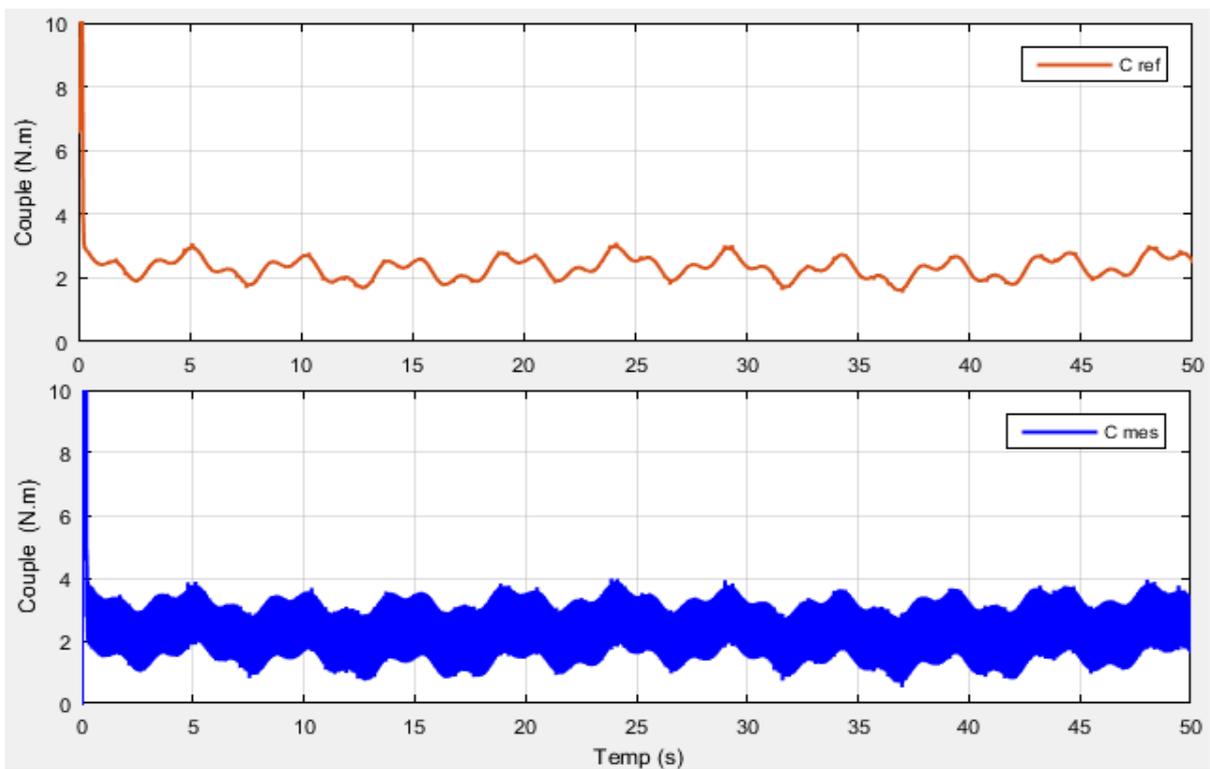


Figure III.16 Formes du couple de référence et du couple mesuré de la machine zoomé.

On a également relevé la forme de la vitesse de rotation de la machine à courant continu. Elle est représentée sur la figure III.17

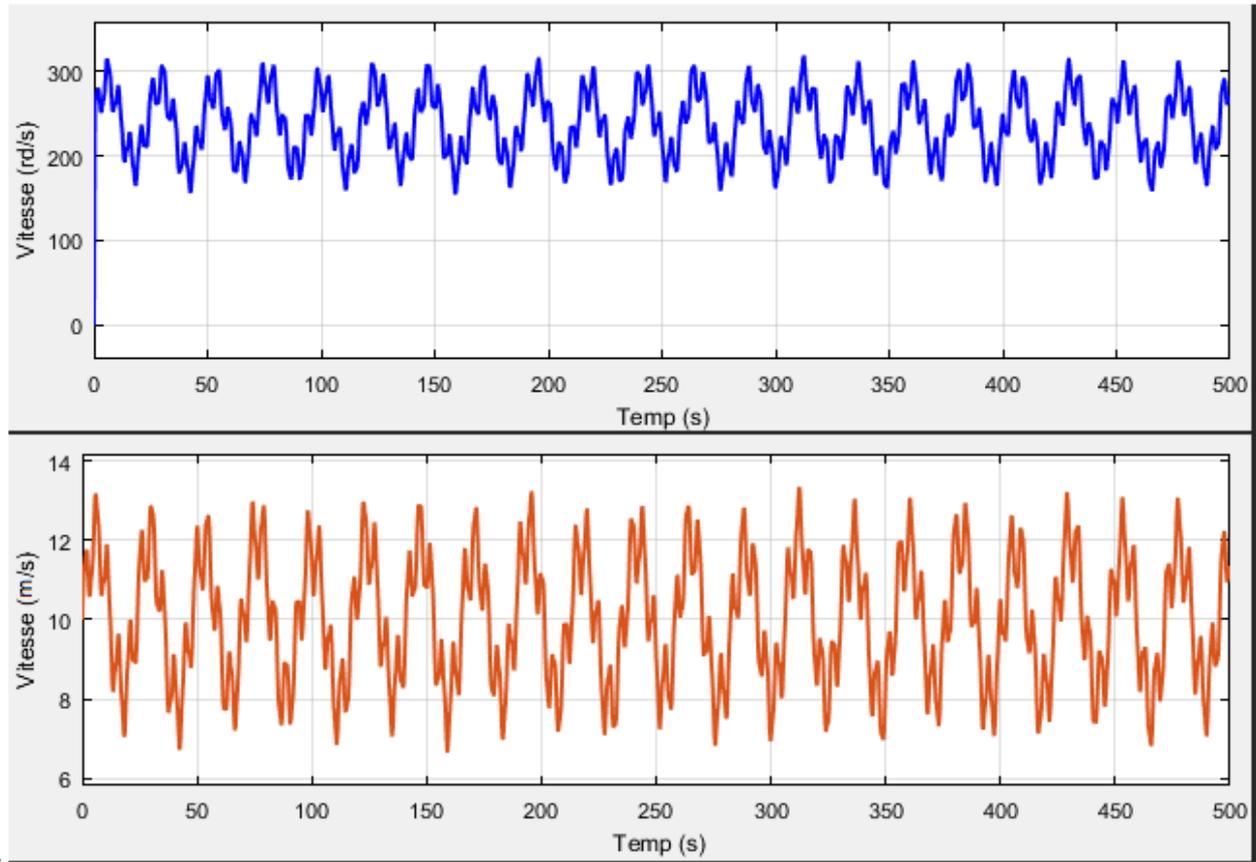


Figure III.17 Formes de la vitesse de vent et de vitesse d'émulateur.

#### III.4.10 Interprétation :

D'après les résultats de simulation obtenus avec le retour d'état on voit que le système est plus rapide et élimine la perturbation ( $C_r$ ) ainsi que lors de l'introduction d'une perturbation le système réagit et corrige immédiatement le courant pour revenir à la consigne d'origine. On peut constater aussi que la vitesse d'émulateur et l'image de vitesse de vent ce qui montre que l'émulateur éolien avec cette commande reproduit parfaitement les variations qu'impose un vent réel.

#### III.5 Test de robustesse :

Pour une évaluation plus juste de la méthode de contrôle, on fait appel à des tests de robustesses qui seront l'objectif de cette section.

L'évaluation de la robustesse des systèmes de contrôle est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres, ainsi que dans le cas où la mesure des paramètres demeure des incertitudes importantes. L'objectif de l'essai de robustesse est d'examiner la sensibilité de la commande face aux éventuelles variations des paramètres du système [29]

Pour tester la robustesse de notre régulateur, on va créer des variations paramétriques telle que : la résistance et l'inductance et on va maintenir les coefficients du régulateur obtenus dans le cas des paramètres nominales.

### III.5.1 Régulateur PI :

- **Variation de la résistance**

Dans ce test, on va augmenter la résistance de 25%, 50% puis 75% de la valeur nominale.

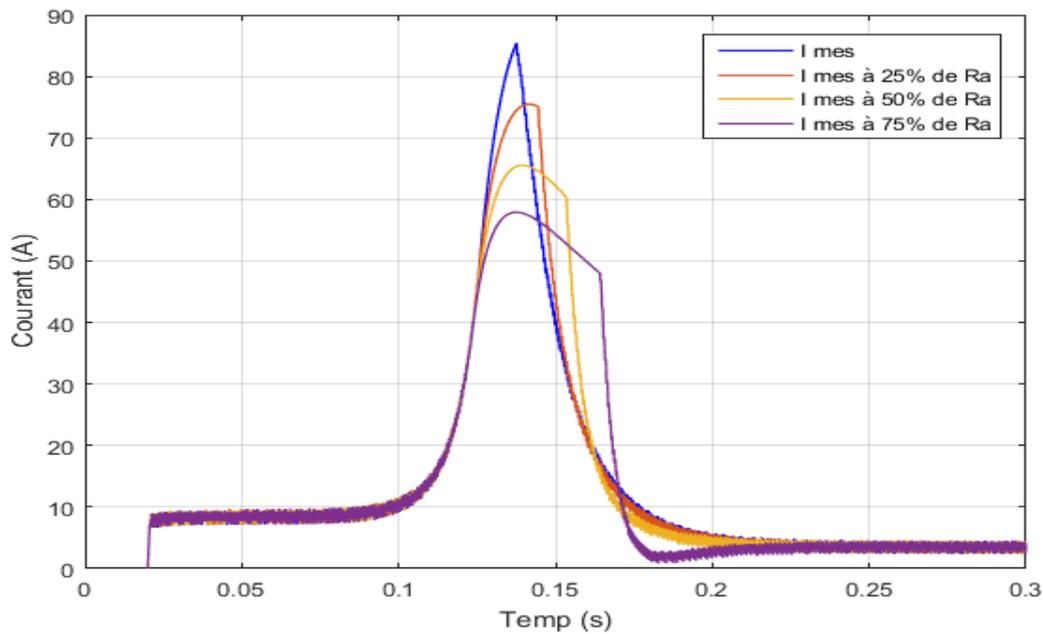


Figure III. 18 Test de robustesse pour la variation de résistance pour régulateur PI classique.

- **Variation de l'inductance**

Dans ce test, on va augmenter l'inductance de 25%, 50% puis 75% de la valeur nominale.

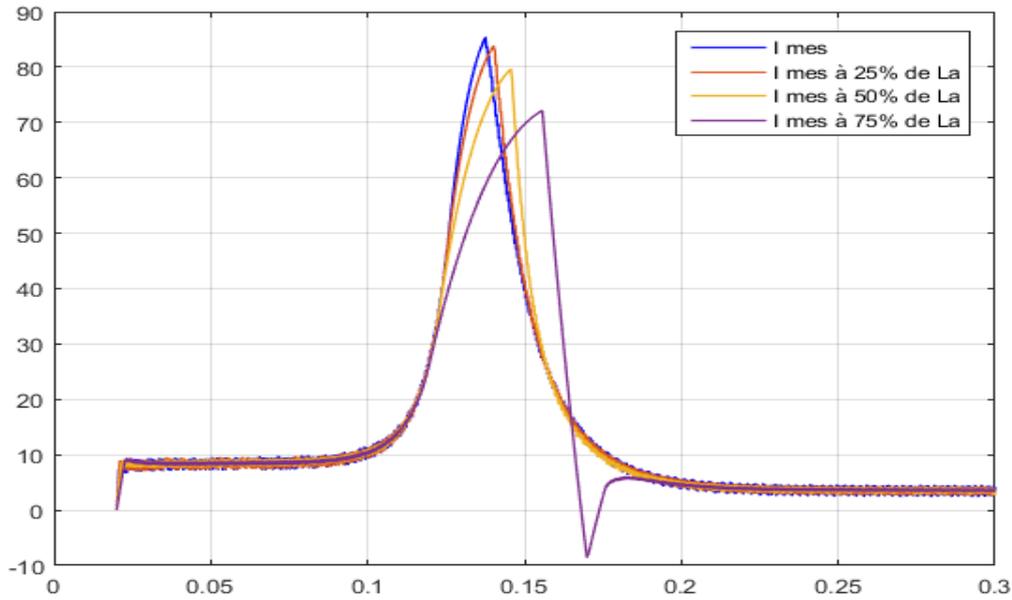


Figure III. 19 Test de robustesse pour la variation de l'inductance pour régulateur PI classique

### III.5.2 Retour d'état action intégrale

- **Variation de la résistance**

Dans ce test, on va augmenter la résistance de 25%, 50% puis 75% de la valeur nominale.

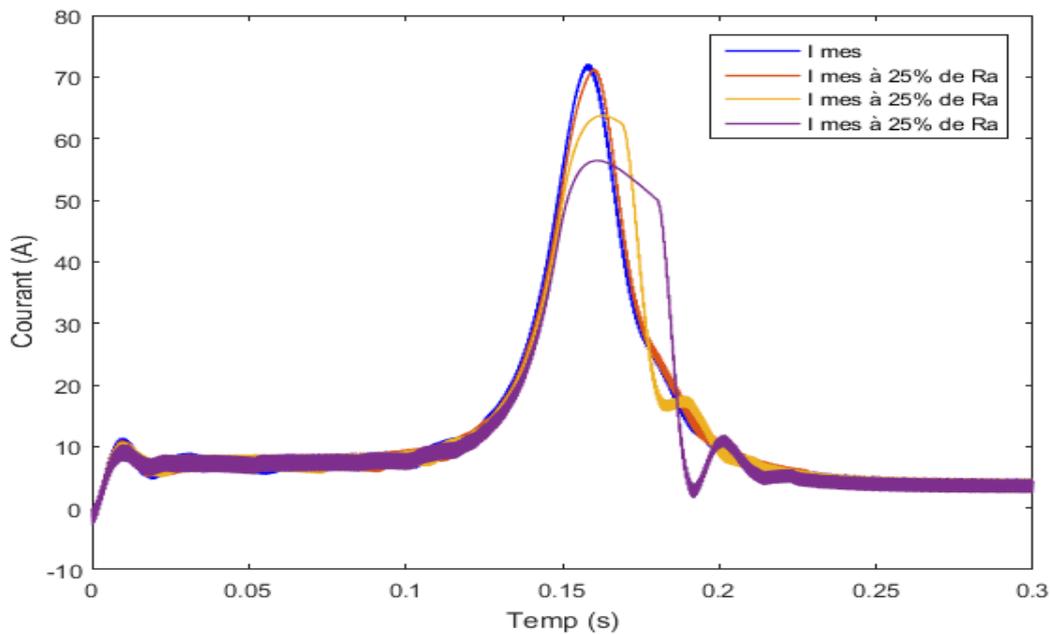
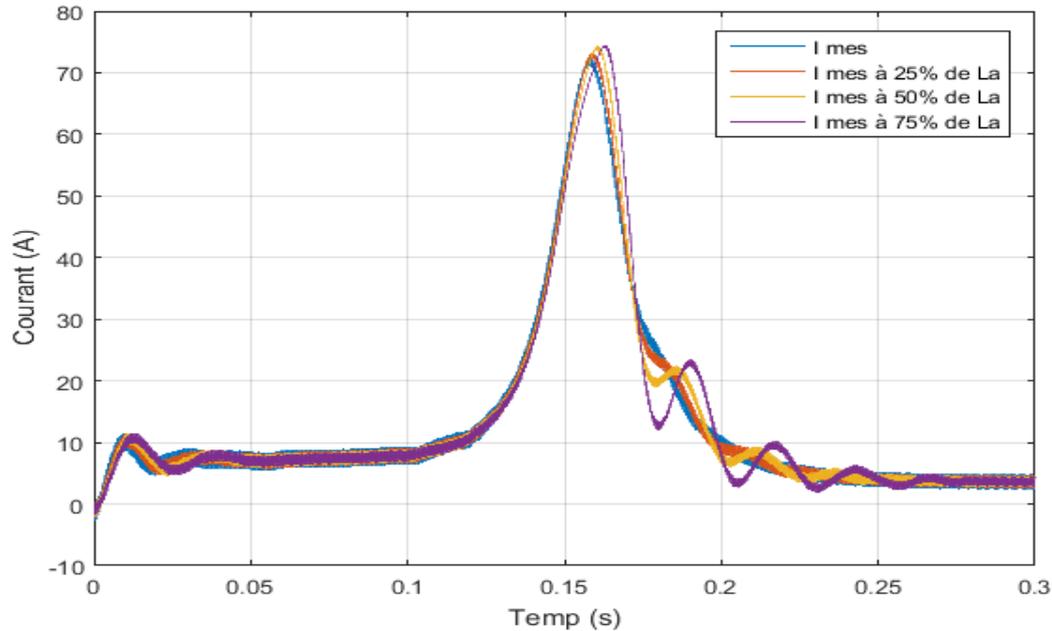


Figure III. 20 Test de robustesse pour la variation de résistance pour retour d'état integral classique.

- **Variation de l'inductance**

Dans ce test, on va augmenter l'inductance de 25%, 50% puis 75% de la valeur nominale.



**Figure III. 21** Test de robustesse pour la variation de l'inductance pour retour d'état avec action intégrale

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a commandé l'émulateur éolien avec deux régulateurs classiques, un régulateur PI et un autre basé sur le régulateur d'état avec action intégrale.

Les résultats obtenus montrent que la machine à courant continu associée au modèle de la turbine, reproduit parfaitement les variations qu'impose un vent réel. Les deux régulateurs donnent des meilleures performances en termes de poursuite.

Pour améliorer encore ces performances et en particulier en termes de robustesse, on va introduire une commande adaptative basée sur le retour d'état avec modèle de référence.

# **Chapitre IV**

**Commande adaptative à un modèle de référence**

## IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent on a essayé de réguler notre système avec des commandes classiques mais on a constaté que ces dernières ne sont pas robustes vis-à-vis la variation paramétrique, pour cette raison, d'autres commandes avancées sont utilisées et apparaissent comme une alternative à la régulation classique.

Parmi les différentes commandes, la commande adaptative est une autre manière de résoudre le problème de la commande (tels que : éviter l'exigence de la connaissance explicite de la dynamique du système qui n'est pas toujours possible, réduire les influences des paramètres inconnus ...etc.).

Dans ce chapitre, on va illustrer le développement de la commande adaptative à modèle de référence (MRAC) de la MCC dans un environnement MATLAB/SIMULINK, dans le but d'améliorer les performances de la régulation en termes de rapidité, stabilité et robustesse.

## IV.2 La Commande adaptative

### IV.2.1 Généralités sur la commande adaptative [30]:

Les variations paramétriques d'un processus réel dans le temps suivant les changements de l'environnement sont influées sur la régulation du système bouclé avec des contrôleurs à paramètres fixe. Dans ces conditions, il faut trouver un régulateur qu'il est le pouvoir de l'adaptation devant ces variations, parmi ces régulateurs on trouve les régulateurs adaptatifs qui sont basés essentiellement sur l'identification en ligne des paramètres du procédé. Ces techniques d'estimation sont connues depuis les années soixante. Elles permettent d'obtenir un modèle mathématique qui représente le plus fidèlement possible le comportement dynamique d'un processus. Donc, la commande adaptative fait partie d'un ensemble de techniques destinées à ajuster automatiquement les paramètres du correcteur des systèmes de commande lorsque les caractéristiques du processus et les perturbations sont inconnues ou varient dans le temps. Par principe, ce type de commande est non-linéaire puisqu'il comporte deux boucles de contre-réaction imbriquées : la boucle de correction et la boucle d'adaptation. Comme les preuves de stabilité sont extrêmement difficiles à établir, on utilise une générale de commande adaptative définie à partir du théorème de LYAPUNOV.

Le début des recherches sur la commande adaptative (destinées à l'aéronautique) date des années 1950. Cependant à cause de l'insuffisance de résultats théoriques et de l'absence de moyens techniques performants, ces recherches furent très vite abandonnées. Les progrès rapides de l'électronique et les résultats théoriques fondamentaux établis dans les années 1960 (variables d'état, analyse de la stabilité, commande stochastique) devaient susciter de nouveau l'intérêt pour ce sujet durant les années 1970. Depuis lors des études considérables ont été réalisées et d'aujourd'hui elles sont mises en œuvre à l'aide de microprocesseurs, micro-ordinateurs ou circuits spécialisés (Digital Signal Processors).

La commande adaptative prend en compte deux types de problèmes :

- Les paramètres du système constants mais inconnus sont auto-ajustés.
- Les paramètres qui dérivent dans le temps seront adaptés.

La loi de variation des paramètres des correcteurs donne un caractère non linéaire aux commandes adaptatives, la recherche de stabilité et la synthèse du correcteur reposeront donc sur des techniques spécifiques à ces systèmes en particulier, elles mettent en œuvre les critères de LYAPUNOV.

Dans cette partie, nous allons présenter la méthode de commande adaptative à modèle de référence que nous allons appeler [MRAC], puis on appliquera cette commande sur un Moteur à courant continu.

#### **IV.2.2 Fonctions des systèmes de commande adaptative :**

Les principales fonctions des systèmes de commande adaptative :

- La détection des variations anormales des caractéristiques du système à commander.
- Le maintien des performances du système de commande quand les caractéristiques du système à commander changent.
- La détermination automatique des paramètres optimaux des régulateurs dans divers points de fonctionnement.
- L'ajustement automatique des paramètres au cours du fonctionnement.
- La possibilité de mise au point des régulateurs complexes est plus performante que le PID (comme conséquence de l'ajustement automatique).

- La commande de nouveaux procédés technologiques dont les modèles sont connus avec beaucoup d'imprécisions.

### IV.2.3 Théorie de la commande adaptative :

#### a) Principe :

Dans les systèmes classiques de réglage, le régulateur à paramètres fixes est utilisé pour réduire ou éliminer l'effet des perturbations agissantes sur les grandeurs à régler. Pour atteindre ce but, les variables réelles sont mesurées et comparées aux valeurs désirées, leurs différences sont injectées à l'entrée du régulateur pour générer le signal de commande.

Par contre un système de commande adaptative traite l'écart entre l'indice de performance désiré et celui qui est mesuré dans le système réel. Lorsqu'il y a un écart entre ces deux grandeurs, un mécanisme d'adaptation ajuste un organe de commande qui agit sur le système de façon à éliminer cet écart.

Il y a deux structures de base pour ce type de commande :

- La structure parallèle.
- La structure série.

Du point de vue de la synthèse de la commande il y a deux méthodes :

- La méthode d'adaptation paramétrique.
- La méthode d'adaptation par synthèse de signal.

La figure suivante montre le principe :

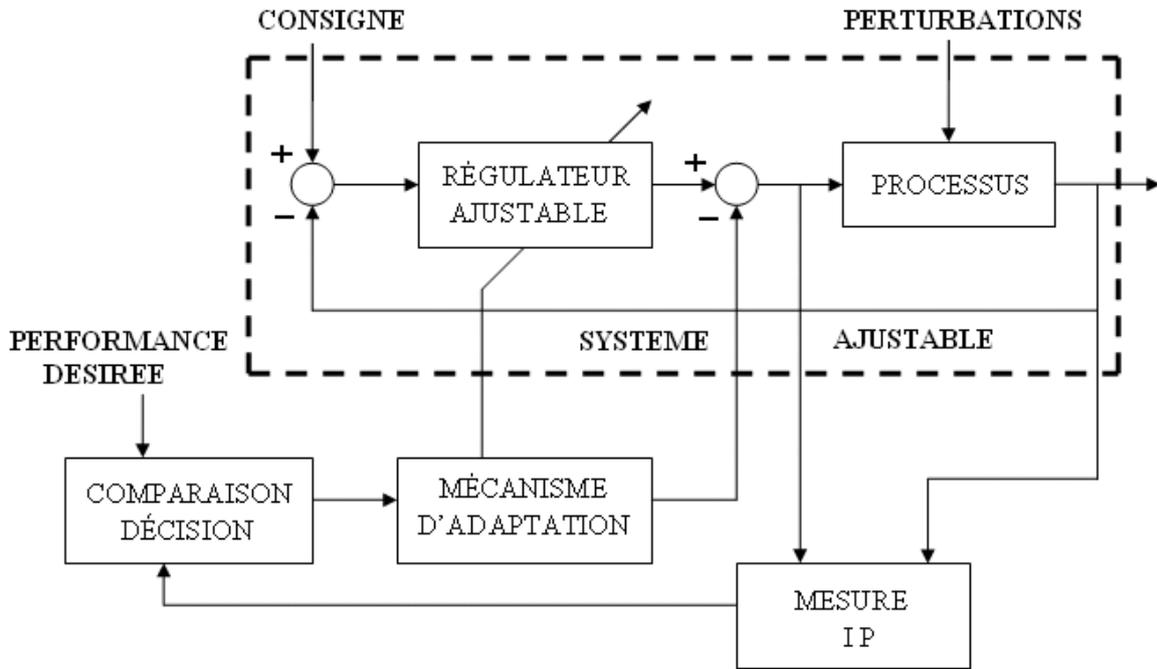


Figure IV. 1 Le principe de la commande adaptative.

**b) Commande adaptative indirecte :**

Un modèle de comportement d'entrée-sortie du système à commander  $y$  est continuellement mis à jour et utilisé pour la synthèse du régulateur comme s'il était le meilleur modèle de commande que l'on aurait utilisé. Les paramètres du régulateur sont ainsi adaptés de manière à réaliser les performances requises. Toutes les méthodes de commande et d'indentification basées sur un modèle de commande linéaire par rapport aux paramètres peuvent être combinées pour la synthèse de système de commande adaptative comme en témoignent les nombreux algorithmes de commande linéaire adaptative et ceux de la commande adaptative des robots.

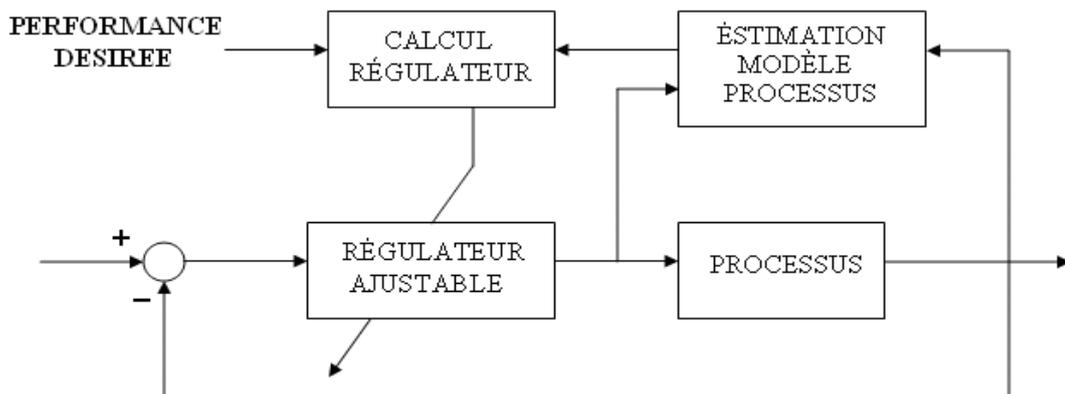


Figure IV.2 Schéma de la commande adaptative indirecte.

### c) Commande adaptative directe :

Les paramètres du régulateur sont directement adaptés avec un algorithme d'adaptation paramétrique approprié. La phase de détermination des paramètres du régulateur à partir de ceux du modèle de commande est ainsi contournée. Tous les objectifs de la commande pour lesquels il est possible de réécrire le comportement d'entrée-sortie du système à commander sous une forme linéaire par rapport aux paramètres du régulateur peuvent être considérés, en l'occurrence la commande à variance minimale, la commande avec modèle de référence et la commande avec modèle interne. Le traitement des données et la supervision sont utilisés pour la même considération que la commande adaptative indirecte. L'ultime motivation du concept de la commande adaptative est de maintenir les performances requises quand la dynamique du comportement d'entrée-sortie du système à commander varie dans le temps, la stabilité et la robustesse des algorithmes de commande adaptative ne permettent pas de répondre d'une manière définitive à une telle motivation.

En effet, un système de commande adaptative est composé de deux boucles à contre-réaction :

Le système de commande sous-jacent, soit la boucle à contre-réaction ordinaire formée par le système à commander en contre-réaction avec le régulateur, et une boucle d'adaptation des paramètres du régulateur constituée d'un algorithme d'adaptation paramétrique et d'une méthode de système dans le cas d'une commande adaptative indirecte. Les performances requises sont ainsi réalisées pour le modèle de commande en temps réel engendré par l'algorithme d'adaptation paramétrique. Elles ne sont pas nécessairement satisfaisantes pour le système à commander.

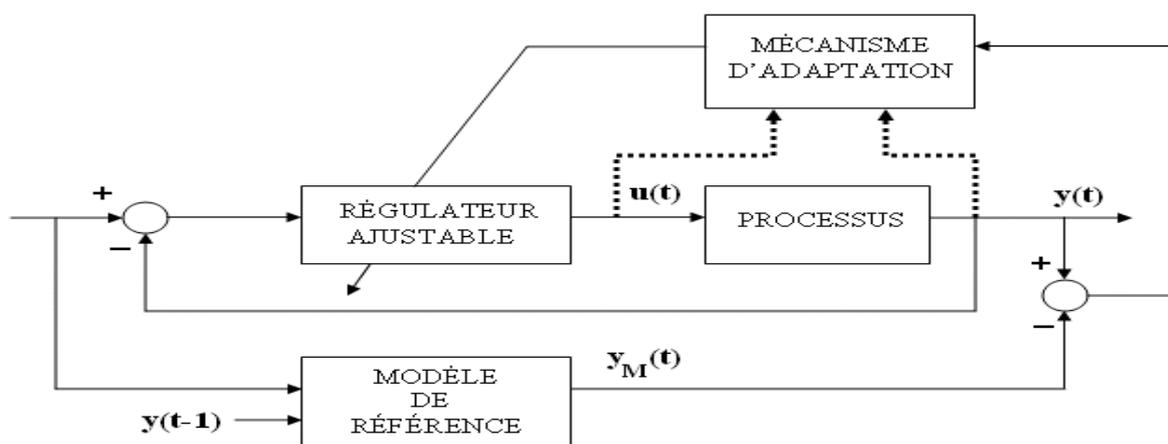


Figure IV.3 Schéma de la commande adaptative directe.

### IV.3 Commande adaptative à modèle de référence (MRAC) [30]:

Elle se présente comme l'une des principales méthodes de la commande adaptative, elle est généralement utilisée en présence des incertitudes, de la perturbation structurale et la variation de l'environnement.

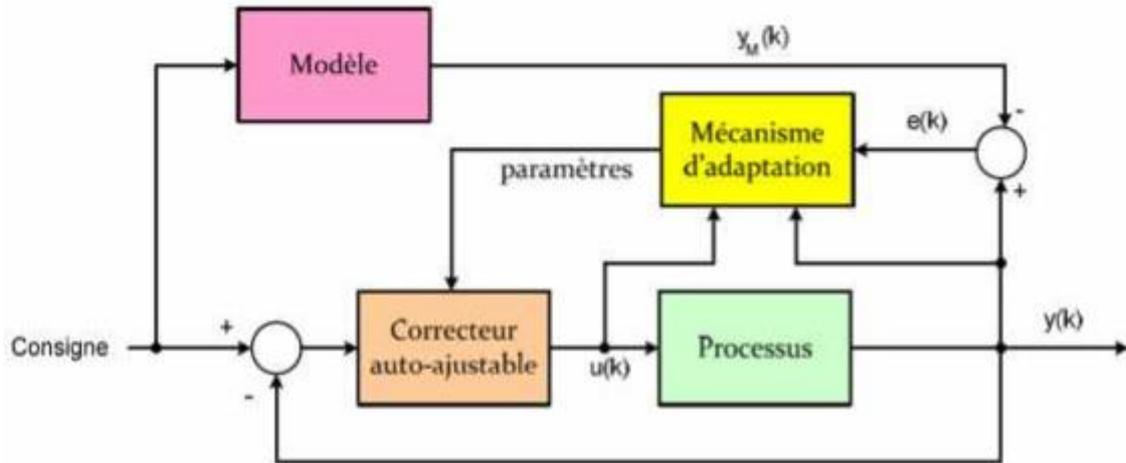


Figure IV.4 Commande adaptative à modèle de référence.

#### IV.3.1 Erreur de poursuite : [31]

On rappelle que l'erreur de poursuite est définie par :

$$e = x - x_m \tag{IV.1}$$

On aura :

$$e' = x - x_m = Ax + Bu_c - A_m x_m - B_m u_c = A_m e + (A - A_m)x + (B - B_m)u_c \tag{IV.2}$$

Cette erreur tend vers zéro (0) si  $A_m$  est stable et

$$A(\theta) - A_m = 0 \tag{IV.3}$$

$$B(\theta) - B_m = 0 \tag{IV.4}$$

### IV.3.2 Méthode basée sur la stabilité approche de LYAPOUNOV : [31]

Le problème de stabilité mène plusieurs chercheurs en 1960 à considérer la synthèse des contrôleurs adaptatifs utilisant la théorie de la stabilité et en particulier la seconde méthode de LYAPOUNOV.

L'approche de LYAPOUNOV offre les propriétés de stabilité globale pour n'importe quelle restriction, soit en utilisant les conditions initiales de l'erreur ou les entrées du système, l'avantage que présente cette approche est la nécessité de trouver une fonction de LYAPONOV appropriée. La méthode de LYAPOUNOV est appliquée pour la synthèse d'une commande adaptative à modèle de référence.

La fonction de LYAPOUNOV est donnée par :

$$V = e^T P e + tr(A - A_m)^T Q_a (A - A_m) + tr(B - B_m)^T Q_b (B - B_m) \quad (IV.5)$$

Où  $tr$  : est l'opérateur trace de la matrice carrée A.

$tr(A) = \sum a_{ii}$ , avec  $a_{ii}$  sont les éléments diagonaux de la matrice carrée A.

Notons que :  $tr(A + B) = trA + trB$

$$x^T A x = tr(x x^T A) = tr(A x x^T) \quad (IV.6)$$

$$tr(AB) = tr(BA) \quad (IV.7)$$

P est une matrice symétrique définie positive et qui est la solution de l'équation de LYAPUNOV

On aura :

$$\frac{dV}{dt} = tr(P e' e^T + P e e'^T + A^T Q_a (A - A_m) + (A - A_m)^T Q_a A' + B^T Q_b (B - B_m) + (B - B_m)^T Q_b B') \quad (IV.8)$$

A partir de (IV.6) on peut écrire :

$$P e' e^T = P (A_m e + (A - A_m) x + (B - B_m) u_c) e^T \quad (IV.9)$$

$$P e e'^T = P e (A_m e + (A - A_m) x + (B - B_m) u_c)^T \quad (IV.10)$$

Introduisons (IV.9) et (IV.10) dans (IV.8) et sélectionnons les termes proportionnels à  $(A - A_m)^T$  nous trouvons qu'ils sont :

$$2tr(A - A_m)^T (Q_a A' + Pex^T) \quad (IV.11)$$

Similairement, les termes proportionnels à  $(B - B_m)^T$  sont :

$$2tr(B - B_m)^T (Q_b B' + Peu_c^T) \quad (IV.12)$$

Alors, on aura :

$$\frac{dV}{dt} = e^T P A_m e + e^T A_m^T P e + 2tr(A - A_m)^T (Q_a A' + Pex^T) + 2tr(B - B_m)^T (Q_b B' + Peu_c^T) \quad (IV.13)$$

Si la matrice symétrique P est choisie de telle sorte que

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (IV.14)$$

Et si on choisit les lois d'adaptations des paramètres :

$$\begin{cases} (A - A_m)^T (Q_a A' + Pex^T) = 0 \\ (B - B_m)^T (Q_b B' + Peu_c^T) = 0 \end{cases} \quad (IV.15)$$

Nous aurons :

$$\frac{dV}{dt} = -e^T Q e \leq 0 \quad (IV.16)$$

Cette inégalité ( $V'E 0$ ) garantit que  $(t)$ ,  $A(\theta) - A_m$  et  $B(\theta) - B_m$  sont bornées, ce qui prouve la stabilité de la structure de commande adaptative. Et, selon le lemme de Barbalat, l'erreur de poursuite  $e(t)$  et celles sur les paramètres  $A(\theta) - A_m$  et  $B(\theta) - B_m$  tendent vers 0

$$\text{Avec : } A(\theta) = \begin{pmatrix} -a_1 - b_0 \theta_1 & -a_0 - b_0 \theta_2 \\ \frac{K}{J} & -\frac{f}{J} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B(\theta) = \begin{pmatrix} b_0 \theta_3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nous avons :

$$(A(\theta) - A_m)^T = \begin{pmatrix} 2\xi w_n - a_1 - b_0 \theta_1 & \frac{K}{J} \\ w_n^2 - a_0 - b_0 \theta_2 & -\frac{f}{J} \end{pmatrix} \quad (IV.17)$$

$$(B(\theta) - B_m)^T = (b_0\theta_3 - w_n^2 \quad 0) \quad (\text{IV.18})$$

A partir des lois d'adaptations, on peut écrire

$$\begin{pmatrix} 2\xi w_n - a_1 - b_0\theta_1 & \frac{K}{J} \\ w_n^2 - a_0 - b_0\theta_2 & -\frac{f}{J} \end{pmatrix} \left( Q_a \begin{pmatrix} -b_0\dot{\theta}_1 & -b_1\dot{\theta}_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \right) (x_1 \quad x_2) \quad (\text{IV.19})$$

$$(b_0\theta_3 - w_n^2 \quad 0) \left( Q_b \begin{pmatrix} b_0\dot{\theta}_3 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} u_c \right) \quad (\text{IV.20})$$

Posons :

$$Q_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad Q_b = 1$$

Donc, on aura :

$$\dot{\theta}_1 = \frac{1}{b_0} (P_{11}e_1 + P_{12}e_2)x_1 \quad (\text{IV.21})$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{1}{b_0} (P_{11}e_1 + P_{12}e_2)x_2 \quad (\text{IV.22})$$

$$\dot{\theta}_3 = -\frac{1}{b_0} (P_{11}e_1 + P_{12}e_2)u_c \quad (\text{IV.23})$$

On évalue la matrice P à l'aide de l'équation de LYAPUNOV  $A_m^T P + P A_m = -Q$ , ainsi

$$P = [201.3396 \quad 199.9396; 199.9396 \quad 290.6398] \quad \text{pour} \quad Q = [2.8 \quad 10; 10 \quad 200]$$

## IV.4 Simulation de la commande par retour d'état adaptative

### IV.4.1 Schéma bloc du modèle de référence

La figure IV.5 représente le modèle de référence sous MATLAB/SIMULINK

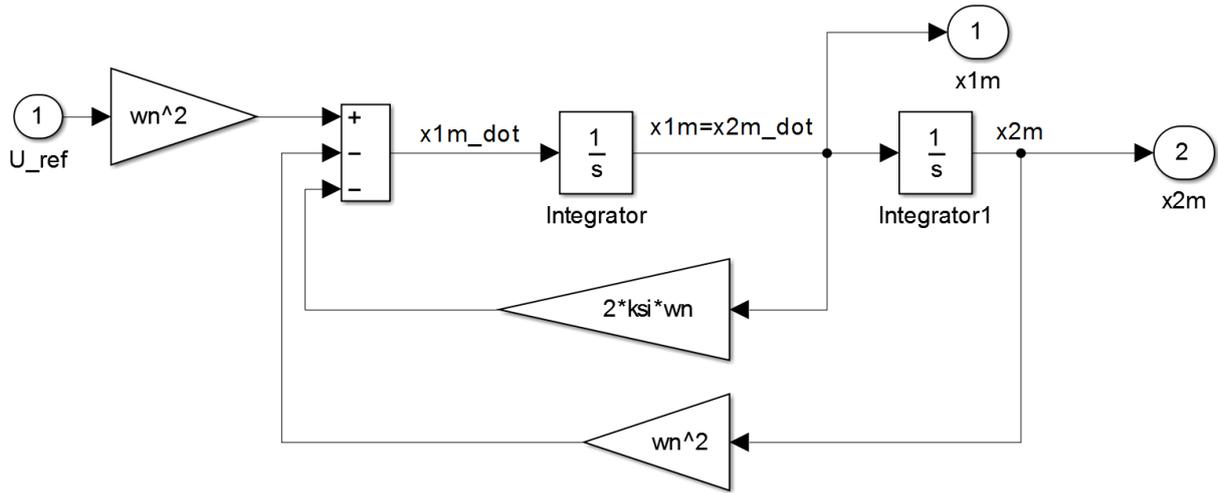


Figure IV.5 Schéma bloc du modèle de référence

### IV.4.2 Schéma bloc de la commande adaptative :

Le schéma bloc de la commande adaptative est représenté par la figure IV.6.

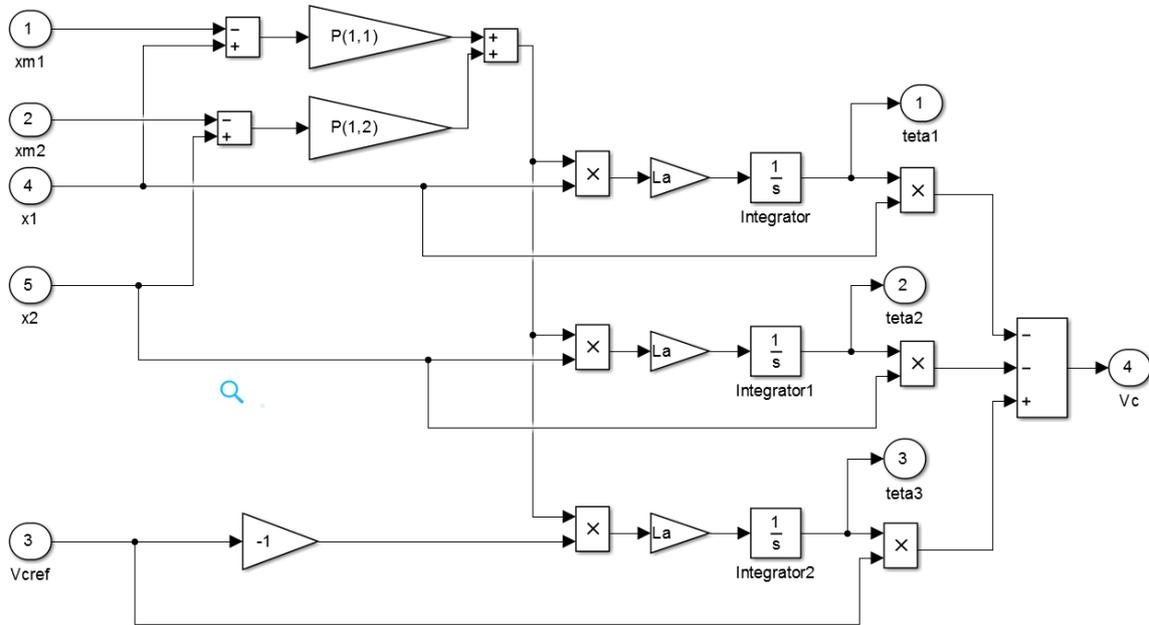


Figure IV.6 Schéma bloc de la commande adaptative.

### IV.4.3 Simulation de la commande adaptative appliquée

La figure IV.7 représente la commande adaptative appliquée au moteur à courant continu pour contrôler son courant.

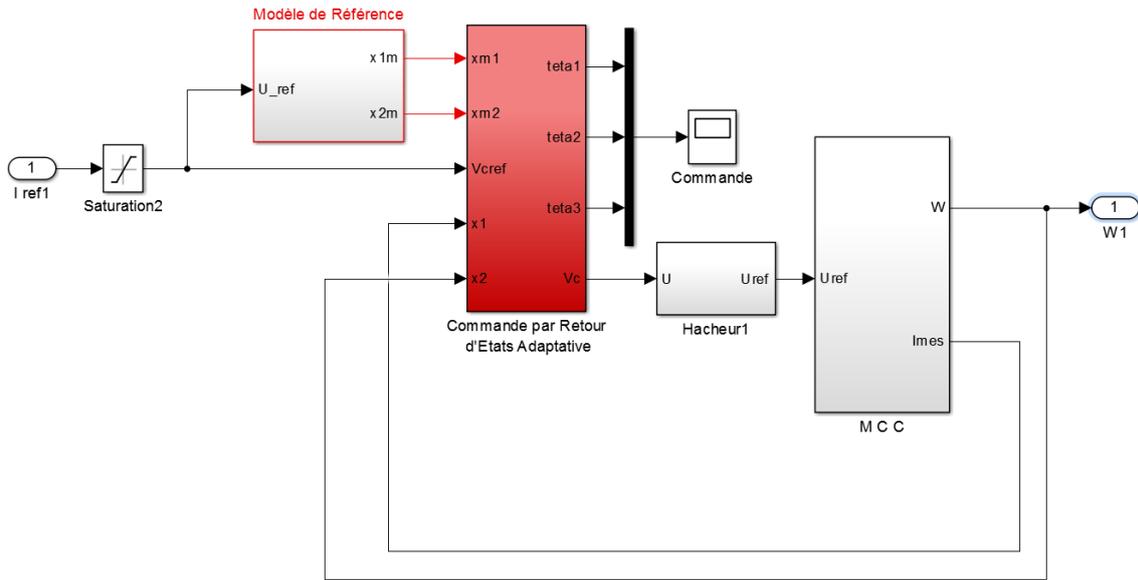


Figure IV.7 Schéma bloc de la MCC avec sa commande adaptative

### IV.5 Les résultats de simulation :

Les résultats obtenus lors de l'application de la commande adaptative avec un modèle de référence, sont représentés sur les figures suivantes.

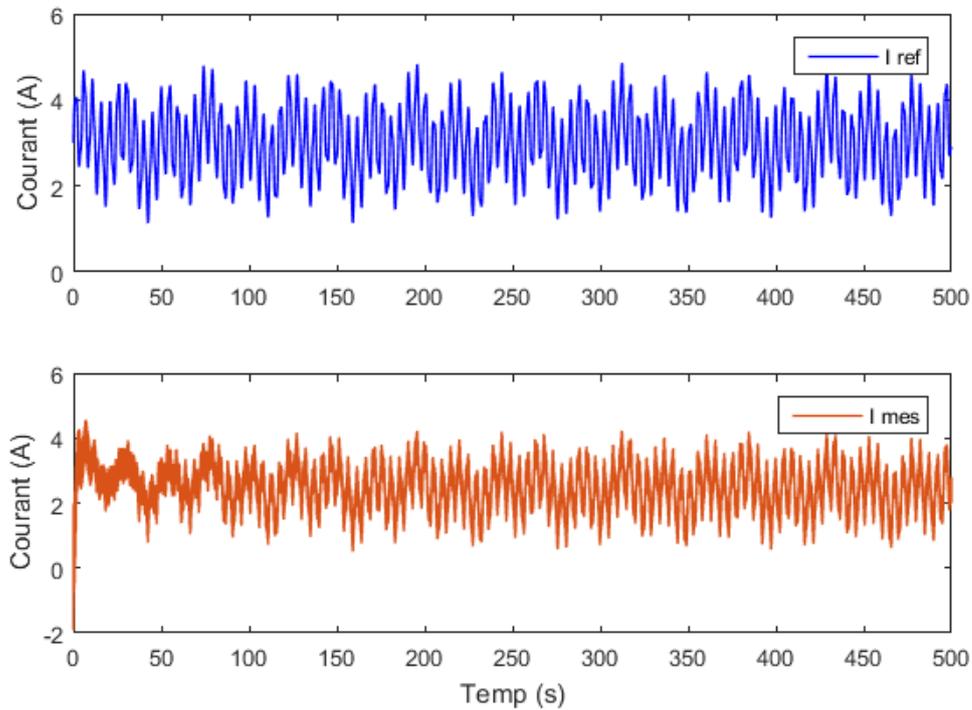
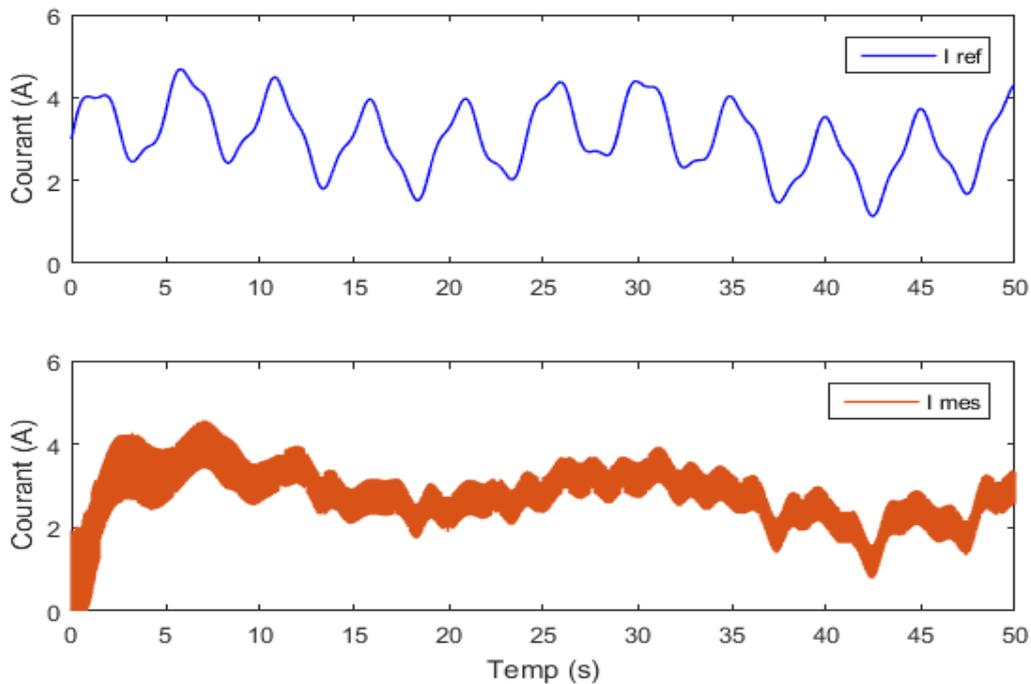


Figure IV. 8 Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine.

Afin de mieux analyser la forme du courant et le couple on fait un zoom, comme le montre dans la figure IV.9.



**Figure IV. 9** Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine (zoom).

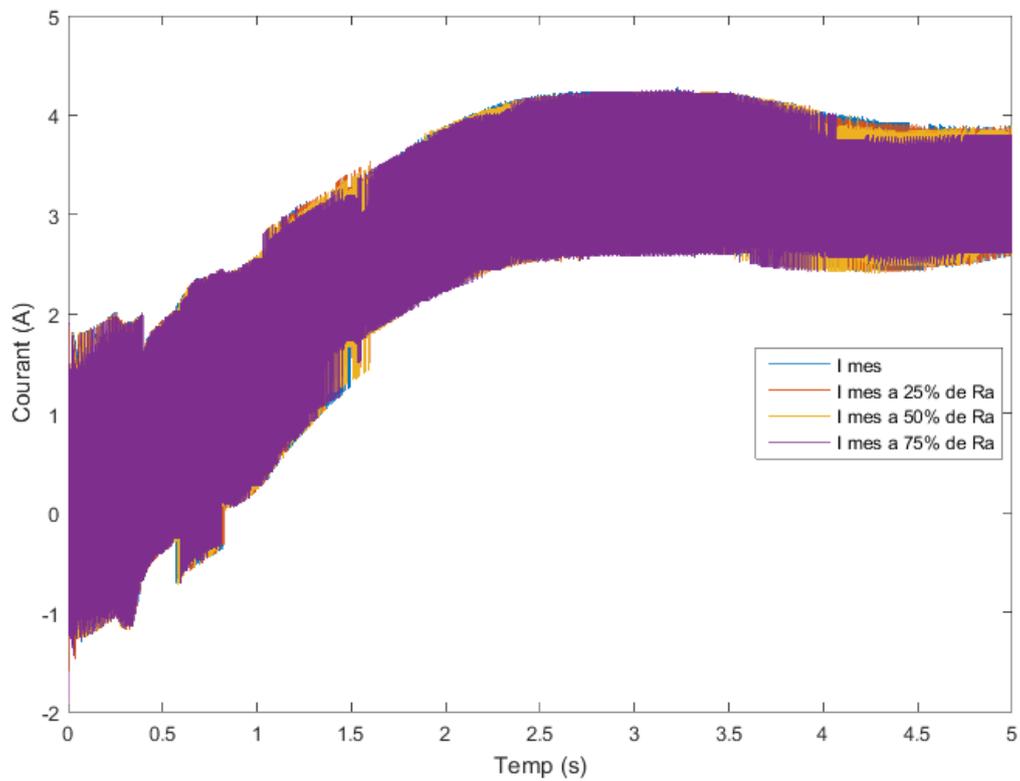
D'après les résultats de simulation obtenus avec cette commande adaptative, on peut constater les mêmes remarques que celles des deux régulateurs précédents, mais cette fois la dynamique du courant est rapide et sans dépassement.

## IV.6 Test de robustesse

Pour tester la robustesse de régulée MRAC ou va faire les mêmes tests effectués pour les régulateurs classique

- **Variation de la résistance**

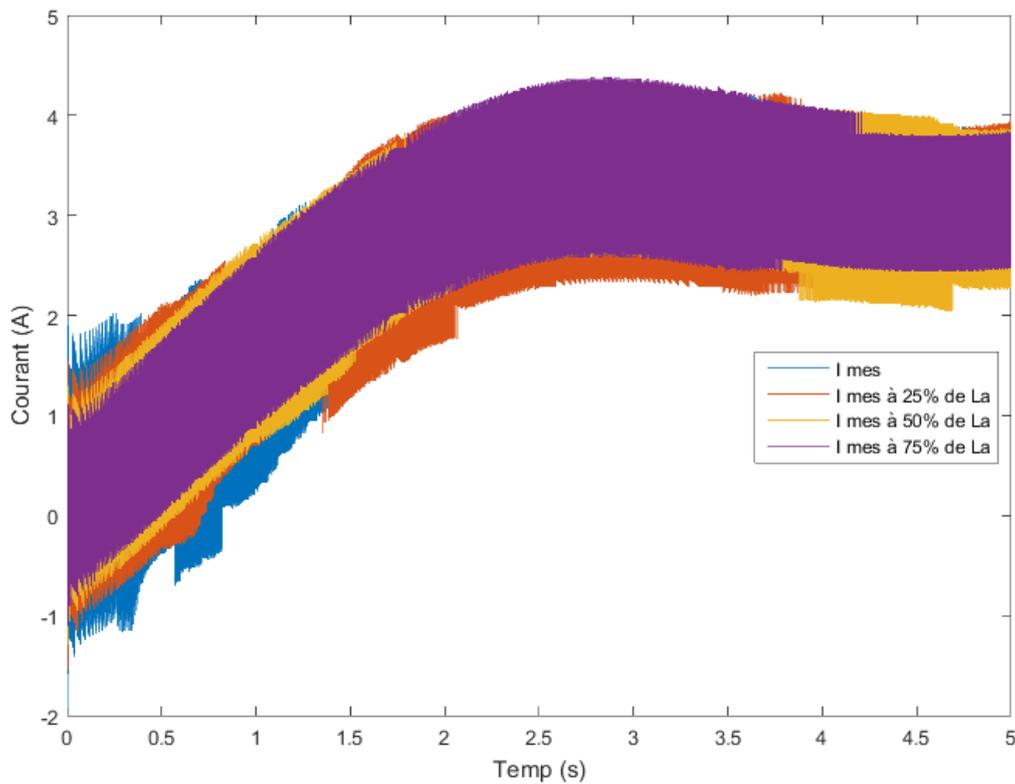
Dans ce test, on va augmenter la résistance de 25%, 50% puis 75% de la valeur nominale.



**Figure IV. 10** Test de robustesse pour la variation de résistance pour retour d'état integral classique.

- **Variation de l'inductance**

Dans ce test, on va augmenter l'inductance de 25%, 50% puis 75% de la valeur nominale.



**Figure IV. 11** Test de robustesse pour la variation de l'inductance pour retour d'état avec action intégrale

On remarque que le régulateur MRAC donne de meilleurs performances même avec les variations paramétriques.

Ceci nous permet de dire que ce régulateur est robuste vis-à-vis des incertitudes de système comparativement aux régulateurs PI et retour d'état avec action intégrale qui ne tolèrent pas les incertitudes.

### IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons développé une commande par retour d'état adaptative à un modèle de référence basée sur l'approche de stabilité de LYAPONOV appliquée au moteur à courant continu. La contribution proposée est l'introduction des gains adaptatifs variables pour le calcul de la loi de commande, ce qui permettra d'augmenter les performances du système.

Les résultats de simulation obtenus dans les chapitres précédents seront suivis d'un essai expérimental pour les valider et mieux s'assurer de la fiabilité du modèle établi, ce sera le but du prochain chapitre.

# **Chapitre V**

**Banc d'essai et expérimentation**

## V.1 Introduction :

Afin de valider les résultats de simulation des chapitres précédents, le développement d'un banc expérimental est indispensable. Un banc d'essai à base d'une association machine à courant continu - hacheur à quatre quadrants a donc été réalisé dans ce but.

Dans un premier temps, nous décrivons le banc d'essai en spécifiant le matériel retenu pour sa réalisation. Ensuite, nous procéderons à l'analyse des résultats obtenus.

Cette réalisation est faite au sein du laboratoire de génie énergétique et génie informatique -L2GEGI-de l'université Ibn Khaldoun - Tiaret.



Figure V. 1 Photo du banc d'essai réalisé.

## V.2 Le matériel utilisé dans le banc d'essai

Le matériel utilisé pour cette réalisation pratique est présenté sur la Figure V.2.



Figure V. 2 Photo représente le matériel utilisé dans le banc d'essai.

1. Alimentation 220 continu pour la partie induit.
2. Convertisseur AC/DC de la marque SEMIKRON (Redresseur +Filtre+ Hacheur).
3. Alimentation 220 continu pour l'excitation du moteur.
4. Moteur à courant continu (voir son paramètre dans l'annexe A).
5. Capteur de courant
6. Résistance variable.
7. Capteur de tension et de courant : Carte de mesure pour DSPACE
8. Source de tension 15V
9. Carte Arduino Méga.
10. Micro-Ordinateur plus puissant.

### V.2.1 Convertisseur statique AC/DC

Ce convertisseur est développé par la société SEMIKRON, ce module (figure V.2) est composé :

- D'un module en pont redresseur « *SKD 51/14* » 400 V-AC/600V-DC.
- D'un onduleur à base d'IGBT (par module de deux IGBT) « *SKM 50GB123D* » avec drivers 0/15V DC « *SKHI 22 A-R* » pour commander chaque module.
- D'un hacheur.
- L'ensemble des capacités électrolytiques de filtrage « 1100  $\mu F$ , 800V ».

Les bornes du convertisseur et leurs caractéristiques sont portées sur le tableau V.1.

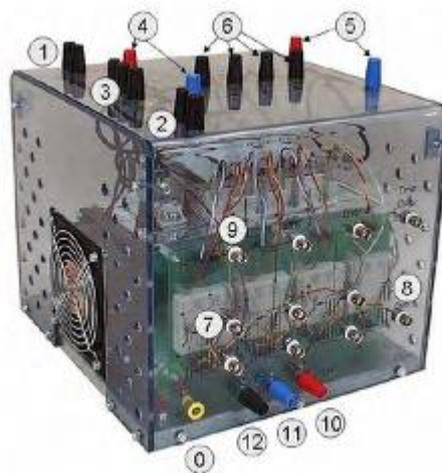


Figure V. 3 Convertisseur statique AC/DC

Le tableau suivant représente les caractéristiques et des bornes du convertisseur

N°	Type	Fonction	Niveau de voltage	Courant maximal
0	Connecteur	Mise à la terre	0V	30 A
1	Connecteur banane 4 mm	Alimentation du ventilateur	230V /50Hz	1 A
3	Connecteur banane 4 mm	<i>Déclencheur</i> thermique	15 V	5 A
4	Connecteur banane 4 mm	Entrées redresseurs	230/400 V	30 A
5	Connecteur banane 4 mm	Entrées redresseurs C.C	600 VCC (Rouge est positive, bleu est négative)	30 A
6	Connecteur banane 4 mm	Entrées de l'onduleur CC (IGBT)	600 VCC (Rouge est positive, bleu est négative)	30 A
7	Connecteur banane 4 mm	Onduleur CA (IGBT) +sortie du hacheur	400 VCA / 600 VDC	30 A
8	BNC Coaxial isolé 50 $\Omega$	Entrée PWM de l'onduleur	Logique CMOS 0 / 15V (le blindage est connecté aux pilotes 0V) 0V = IGBT est ouvert, 15V = IGBT est fermé	1 A
9	BNC Coaxial isolé 50 $\Omega$	Sortie d'erreur	Logique CMOS 0 / 15V (le blindage est connecté aux pilotes 0V)	1 A
10	Connecteur banane 4 mm	15V Source de courant pour les pilotes	15V	5 A
11	Connecteur banane 4 mm	0V Source de courant pour les pilotes	15V	5 A
12	Connecteur banane 4 mm	Capteur de température	0-5V	1 A

**Tableau V. 1** Caractéristiques et des bornes du convertisseur.

### V.2.2 Moteur à courant continu :

Figure V.4 montre le moteur qu'on a utilisé dans notre réalisation, les paramètres sont indiqués en annexe.

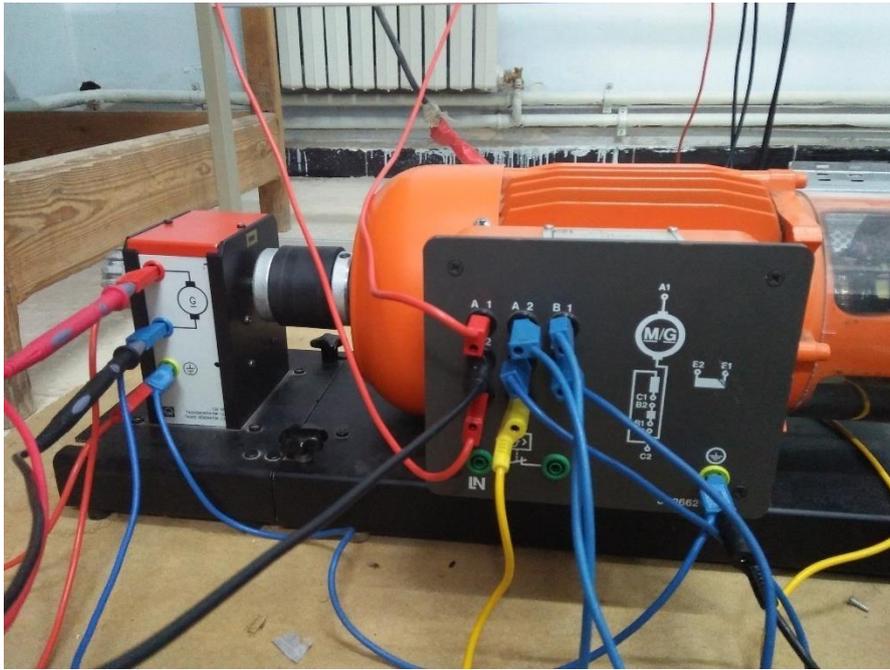


Figure V. 4 Moteur à courant continu utilisé dans le banc d'essai.

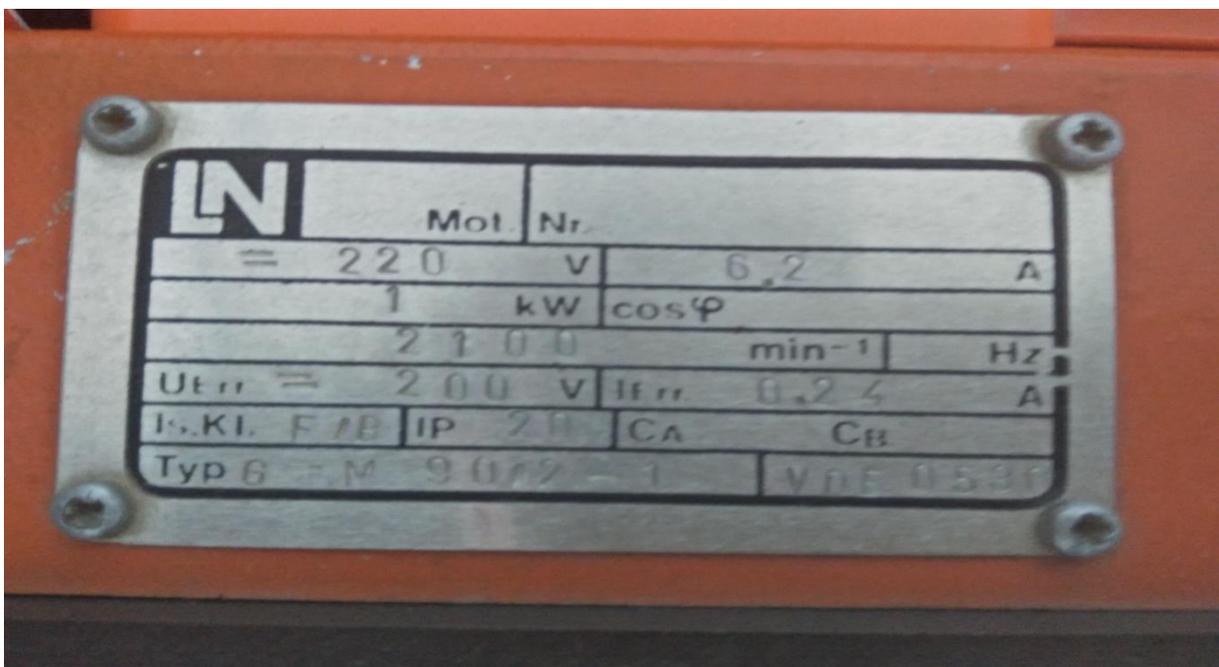


Figure V. 5 Plaque signalétique du moteur à courant continu

### V.2.3L'interfaçage Arduino-MATLAB/SIMULINK:

Il existe trois possibilités d'interfacer la carte Arduino avec MATLAB/Simulink, à savoir :

1. Programmation de la carte Arduino comme une carte d'interface.
2. Utilisation du package ArduinoIO.

3. Utilisation du package Arduino Target.

### **V.2.4 Carte Arduino Mega2560 :**

Le modèle Méga Arduino est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega2560. Il dispose de 54 broches numériques d'entrée / sortie (dont 14 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur en cristal de 16 MHz, d'une connexion USB, une prise d'alimentation, d'une embase ICSP, et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur suffit de le brancher à un ordinateur avec un câble USB ou de la puissance avec un adaptateur ou la batterie AC-DC pour commencer. Le Méga est compatible avec la plupart des blindages conçus pour l'Arduino DUE milanove ou Diecimila.

### **V.2.5 L'environnement MATLAB/SIMULINK :**

C'est un logiciel de calcul mathématique pour les ingénieurs et les scientifiques créé par Mathworks. MATLAB est un environnement de programmation pour le développement d'algorithme, d'analyse de données, de visualisation, et de calcul numérique.

En utilisant MATLAB, la résolution des problèmes de calcul complexes se fait plus rapidement qu'avec des langages de programmation traditionnels, tels que C, C++, et le Fortran.

SIMULINK est un environnement pour la simulation multi domaine. Il fournit un environnement graphique interactif et un ensemble de bibliothèques de bloc qui permettent de concevoir, simuler, mettre en application, et examiner une variété de systèmes, tel que les systèmes de communications, de commandes, de traitement des signaux, de traitement visuel, et de traitement d'image.

### V.3 Utilisation du package Arduino Target

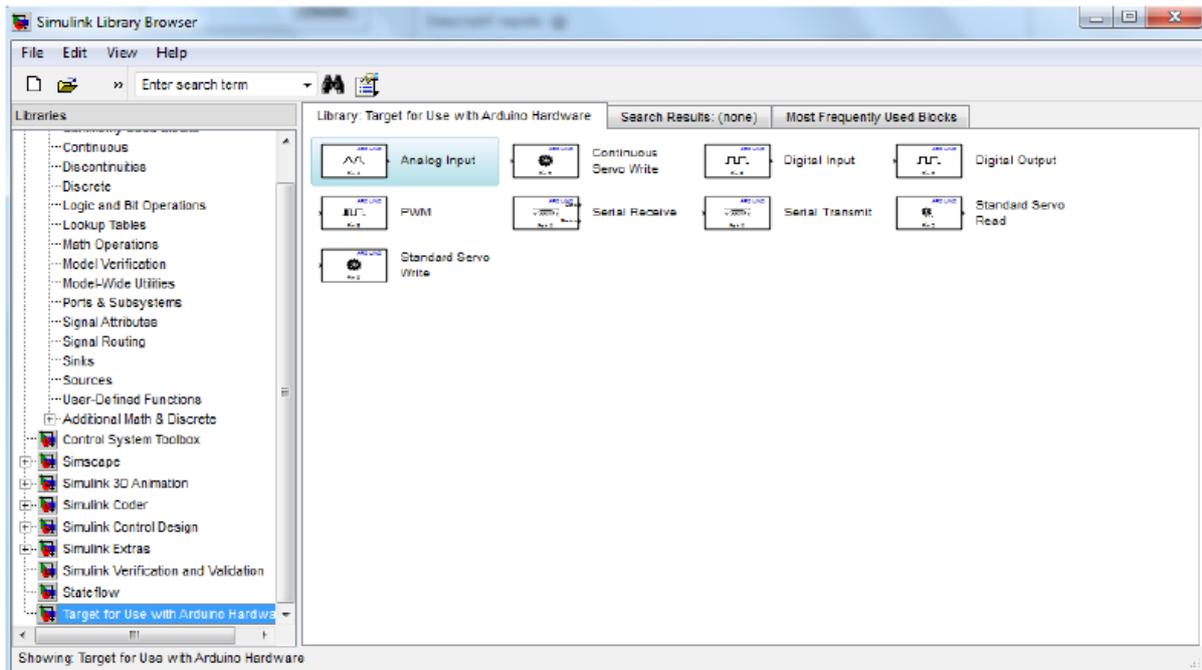


Figure V. 6 Arduino MATLAB/SIMULINK.

### V.4 La mise en marche du banc d'essai :

Avant tous, il faut finaliser tous les montages, circuit de puissance et circuit de commande :

- Circuit de puissance : Alimentation + Redresseur + Filtre + Hacheur + MCC.
- Circuit de commande :



Ensuite, la mise en marche pour un régulateur donné nécessite la connaissance du temps d'échantillonnage qui égale :  $T_e = 5 \times 10^{-4}$

On met en marche le banc d'essai pendant une durée supérieure à 10s en exécutant le programme de commande, celui-ci commence à compter le temps T et après chaque temps d'échantillonnage  $T_e$  une interruption est générée. Ce programme va faire appel au programme du régulateur donné, résidant dans la mémoire, qui permet de calculer le signal de commande  $U_c$ .

Le programme de commande écrit en langage 'C' exécute les opérations suivantes :

- Lecture de courant  $I$  à partir de l'entrée 'A0' de la carte Arduino (Le capteur de courant traduit la vitesse de la machine en tension continue et la transmet à l'entrée analogique 'A0').
- Calcul de l'erreur  $e = I_{ref} - I_{mes}$  ou  $I_{ref}$  est affecté par le programme.
- Calcul du signal de commande  $U_c$  en utilisant l'algorithme du régulateur choisi.
- Envoi de cette valeur vers la sortie 'PWM' de la carte Arduino.

```
#include <TimerThree.h>

float Iref, commande, Kp, Ki, rapport_cyc, somme_erreurs, erreur, Imes, ImesI, E=220;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  //*****
  //***** Configuration des pin *****
  //*****

  pinMode(2, OUTPUT); // PWM invers
  pinMode(A0, INPUT); // Vitesse
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  //*****
  //***** Programme *****
  //*****

  Iref=2;
  ImesI = digitalRead(0);
  Imes=(5/1023)*10;
  erreur= Iref-Imes;
  somme_erreurs += erreur;
  commande = Kp * erreur + Ki * somme_erreurs;
  rapport_cyc=(commande/E+1)/2;
  Timer3.setPwmDuty(2, 512);
}
```

Figure V. 7 Programme de commande écrit en langage 'C'

Ce signal de commande va être transmis de la sortie analogique 'PWM' de la carte Arduino vers l'entrée de le hacheur sous forme de tension continue variant entre 0 et 15V, le hacheur va utiliser cette tension pour générer la tension continue nécessaire à l'alimentation de la machine à courant continu. Le moteur va démarrer, et le courant est capté par le capteur de courant qui le transmettra à nouveau au programme de commande à travers l'entrée analogique 'A0' de la carte Arduino Méga.

#### V.4.1 Application du couple résistant :



**Figure V. 8** Application du couple résistant avec génératrice

Le moteur entraîne une génératrice à CC alimentant une résistance variable (Rhéostat) afin d'appliquer une charge (couple résistant).

#### **V.4.2 Variation de la résistance d'induit**

Afin de varier la résistance d'induit, on insère en série avec cette dernière une résistance variable (voir figure V.9).

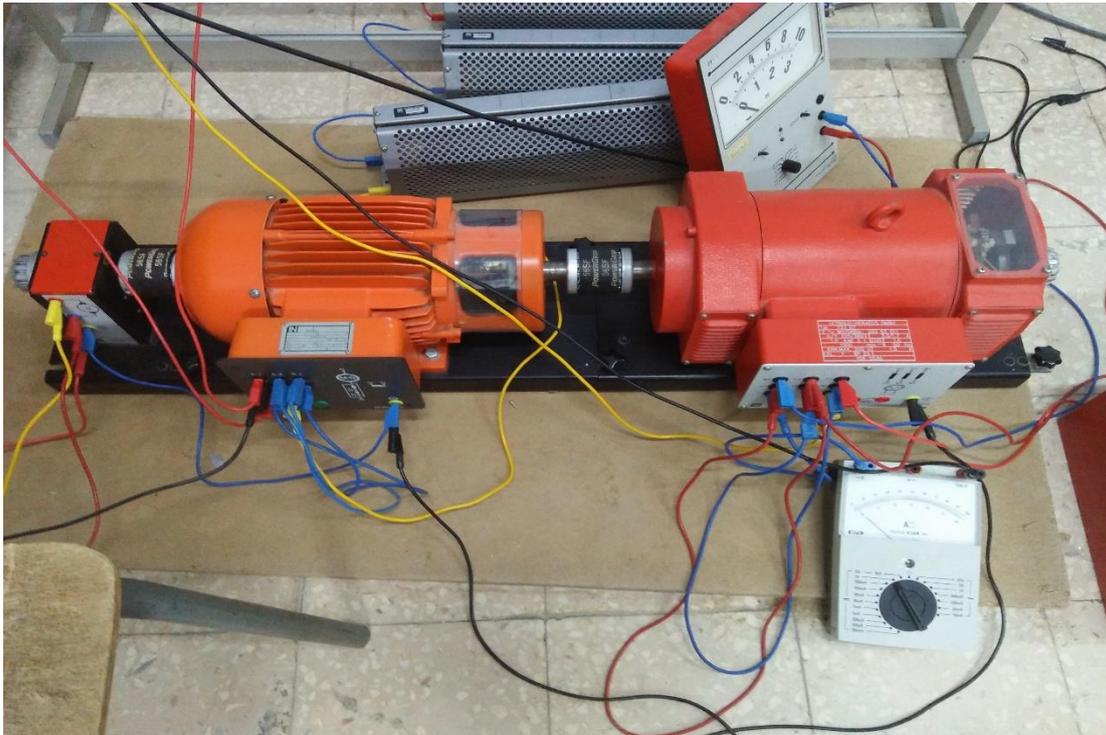


Figure V. 9 Rhéostat pour la variation de la résistance d'induit du MCC

## V.5 Les essais de réalisation :

### V.5.1 Crée un single PWM :

La figure suivante montre comment créer un single PWM avec l'utilisation du package Arduino Target.

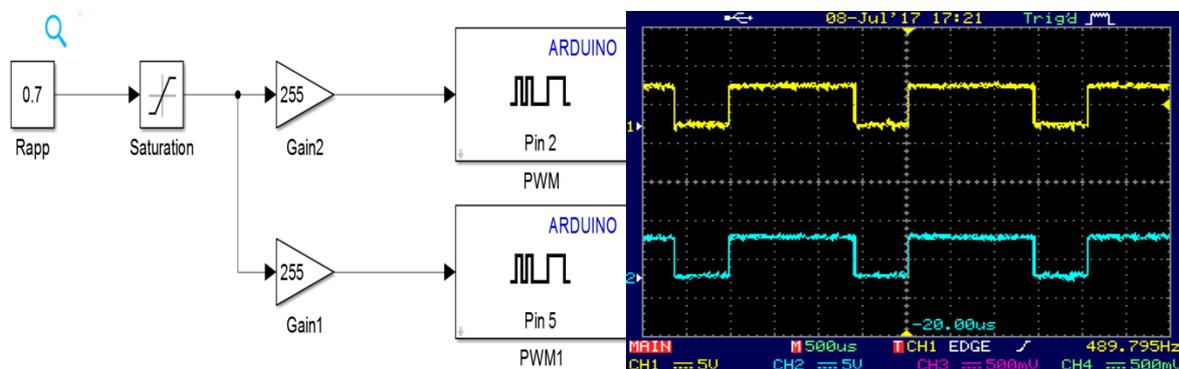


Figure V. 10 Création de signal PWM par Arduino Target.

### V.5.2 Calcul un rapporte cyclique et gère single PWM :

En général le hacheur à quatre quadrants se caractérise par deux grandeurs (la tension de entre E et la tension de sortie U), la relation qui lié entre elle est représentée par :

$$U = E(2.\alpha - 1) \quad (\text{V.1})$$

Avec :  $\alpha$  le rapport cyclique.

A partir de l'équation précédente .

$$\alpha = \frac{\frac{U}{E} + 1}{2} \quad (\text{V.2})$$

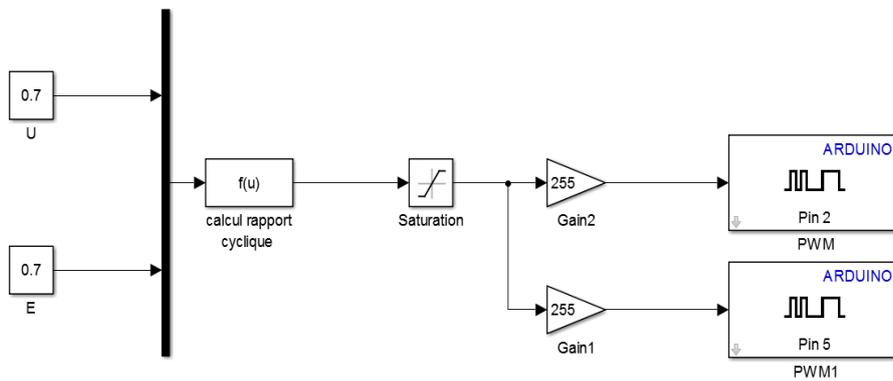
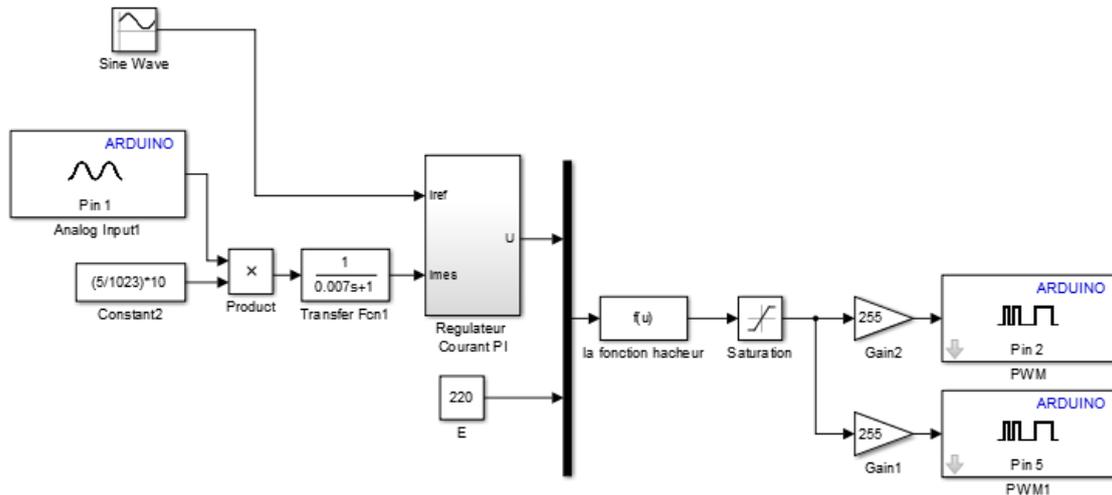


Figure V. 11 Modèle de PWM sous MATLAB.

### V.5.3 Résultats expérimentaux

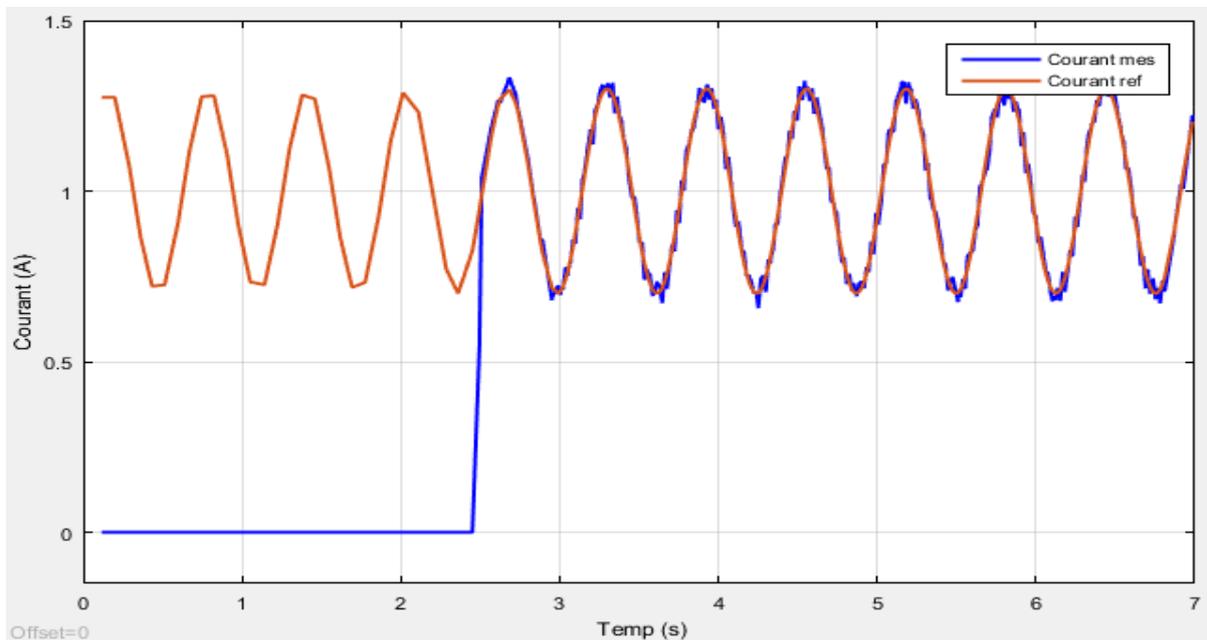
#### V.5.3.1 Commande de l'émulateur par PI :

**Test1 :** Dans un premier temps on va imposer un courant de référence pour voir l'efficacité du régulateur PI appliqué uniquement à la MCC avec le hacheur (voir figure V.12).



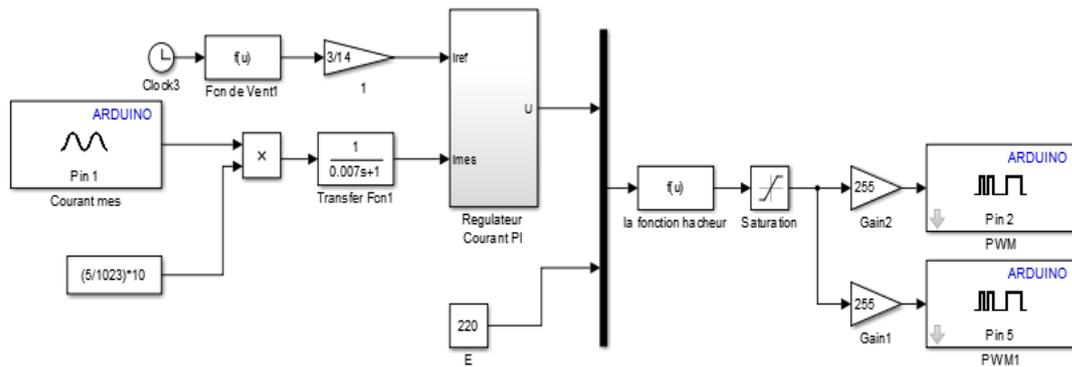
**Figure V. 12** L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence imposée

La figure V. 13 montre le résultat obtenu par le banc d'essai, on peut constater que le courant mesuré suit le courant de référence imposée avec une dynamique très rapide, ce qui montre l'efficacité du régulateur PI.



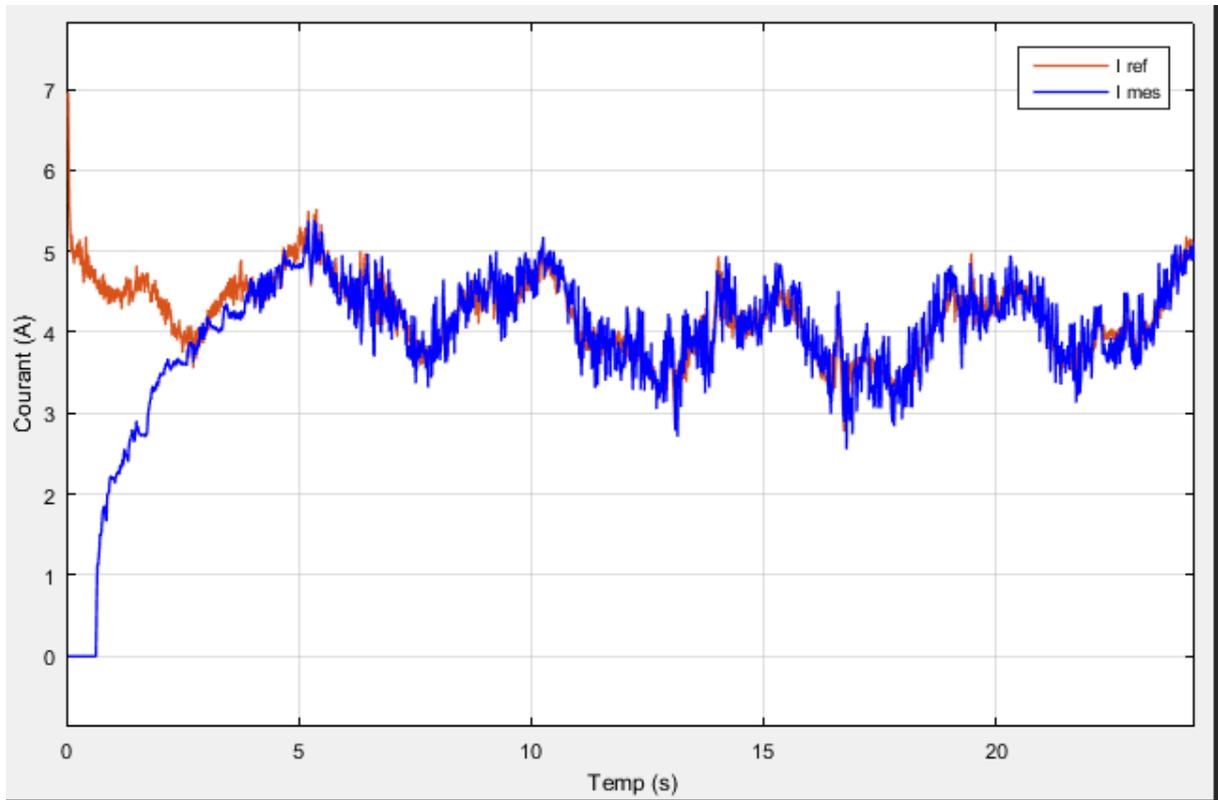
**Figure V. 13** Courant mesuré avec sa référence.

**Test2 :** Dans ce test, on va imposer un courant de référence similaire à celle obtenue par la turbine (voir figure V.14).



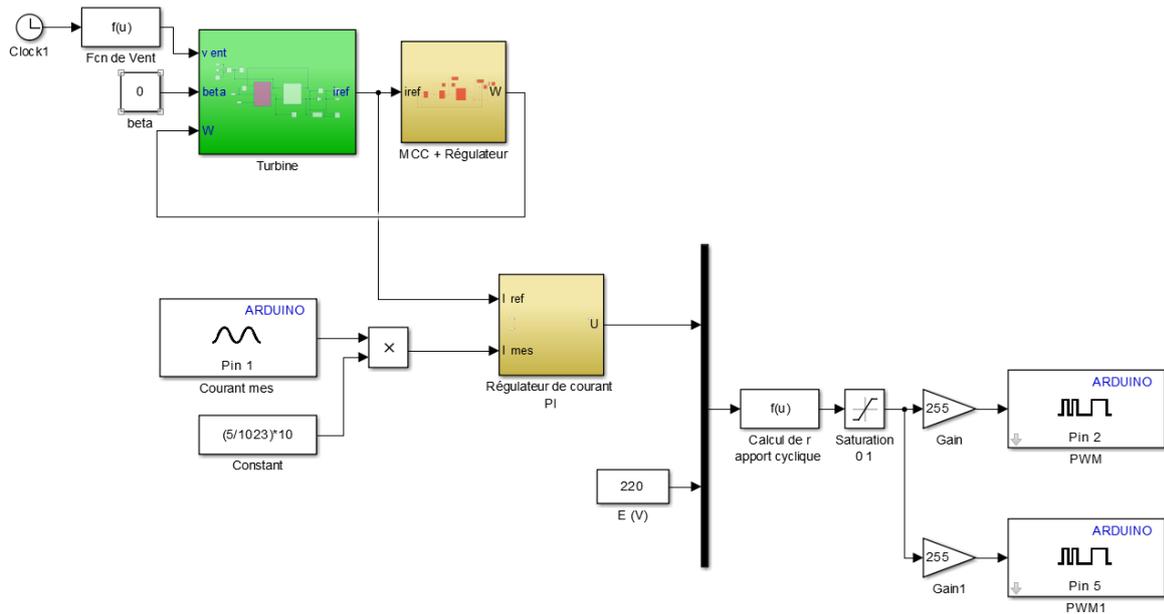
**Figure V. 14** L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence similaire à celle obtenue par la turbine.

La figure V.15 montre que le courant mesuré suit sa référence avec des fluctuations qui sont dues aux fluctuations du vent.



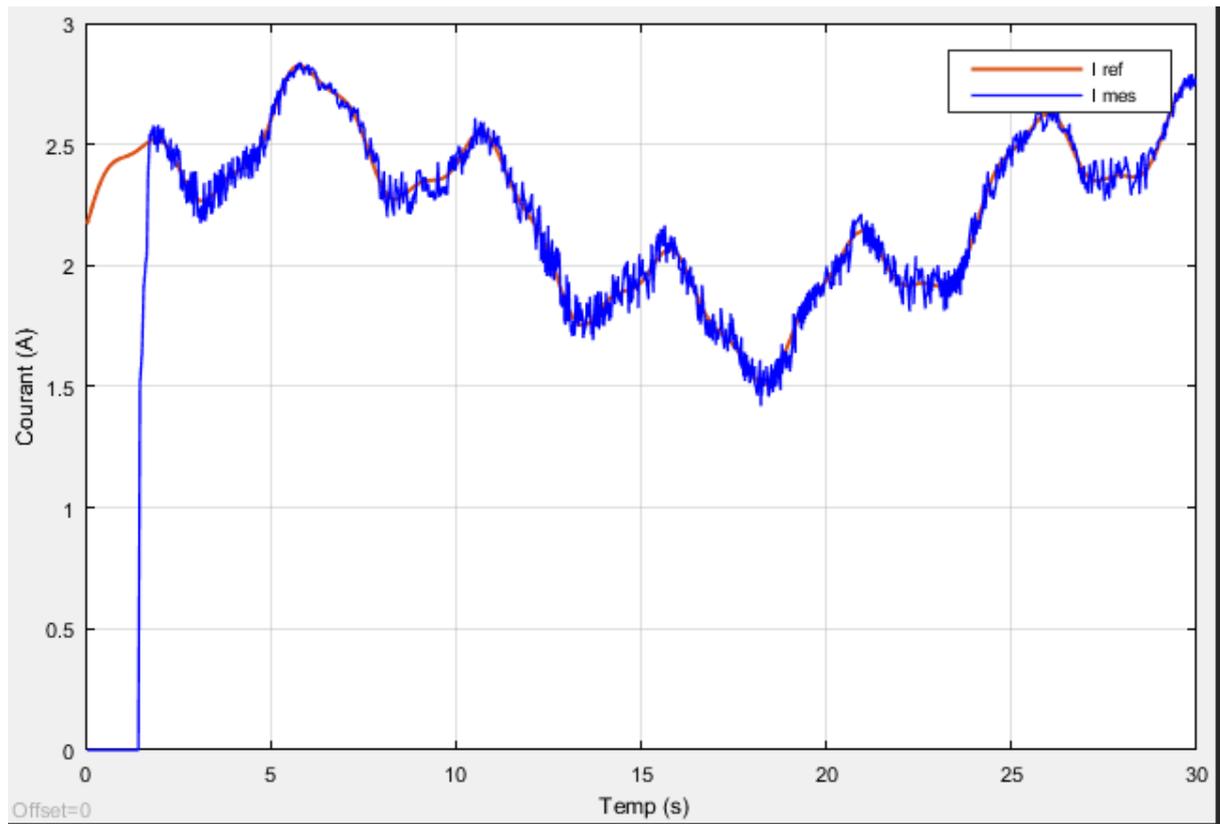
**Figure V. 15** Formes du courant de référence et du courant mesuré de la machine

**Test 3:** Dans ce test on va utiliser la chaîne complète de l'émulateur, c'est-à-dire que le courant de référence est imposé par la turbine éolienne (voir figure V.16).



**Figure V. 16** La chaine complète de l'émulateur.

La figure V.17 montre le courant fournit par l'émulateur éolien avec sa référence. On peut constater qu'il y a une bonne corrélation entre la théorie (résultats des simulations) et la pratique (résultats de banc d'essai). Ceci nous permet de conclure que le modèle de l'émulateur éolien utilisé présente, presque, parfaitement le modèle réel de cet émulateur.



**Figure V. 17** Variation de courant du MCC avec la référence

### V.5.3.2 Commande de l'émulateur par retour d'état avec action intégrale :

Pour montrer l'efficacité de ce régulateur à l'amélioration des résultats de notre émulateur réel, on va faire quatre tests différents en changeant l'allure de courant de référence.

**Test1:** Dans ce test on va imposer un courant de référence variable sous forme d'escalier (voir figures V.18 - V.19). On peut remarquer que même avec un changement brusque de référence, le courant présente un bon asservissement, ce qui montre l'avantage de régulateur d'état avec action intégrale.

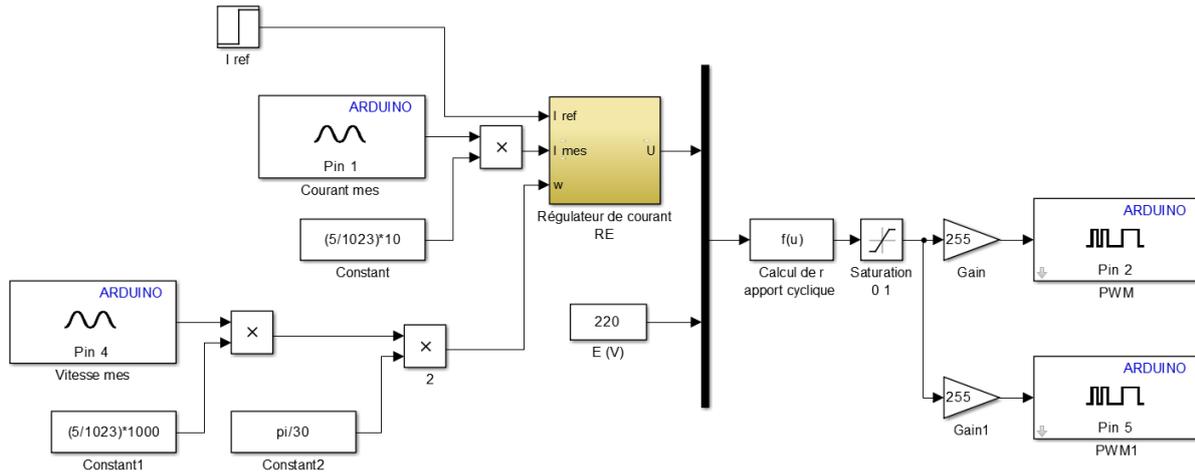


Figure V. 18 L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence imposé.

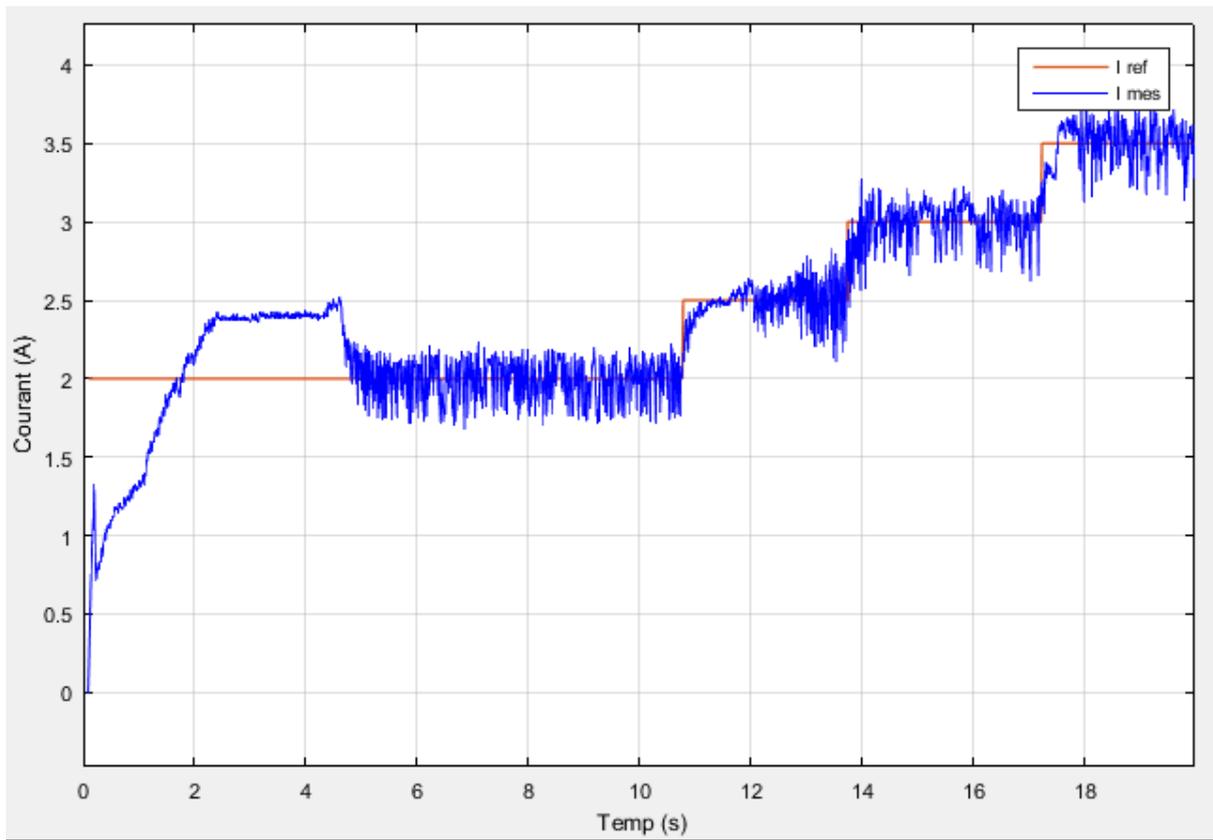


Figure V. 19 formes de courant référence et du courant mesuré.

**Test2 :** Dans ce test le courant de référence est imposé sous forme un signal périodique (voir figures V. 20- V. 21).

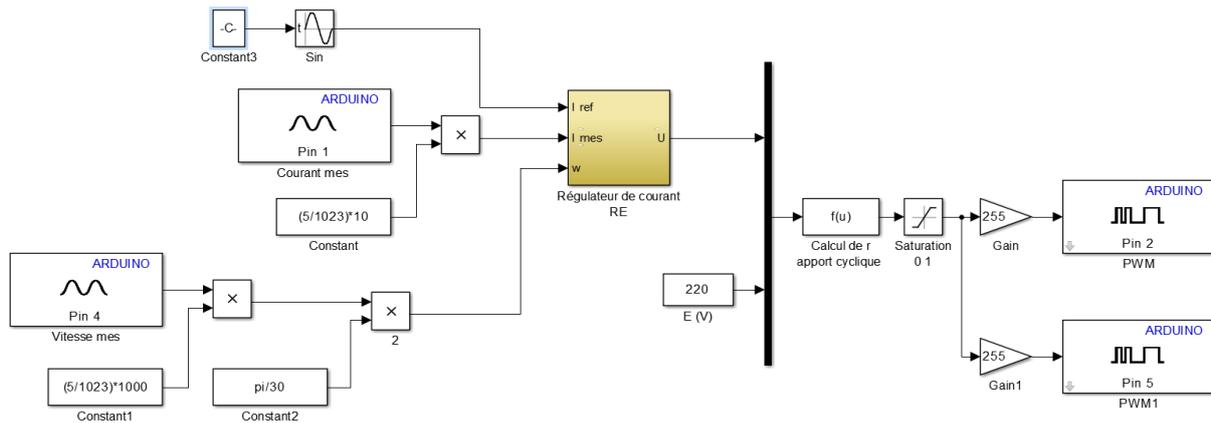


Figure V. 20 L'implémentation de l'émulateur avec un courant de référence périodique.

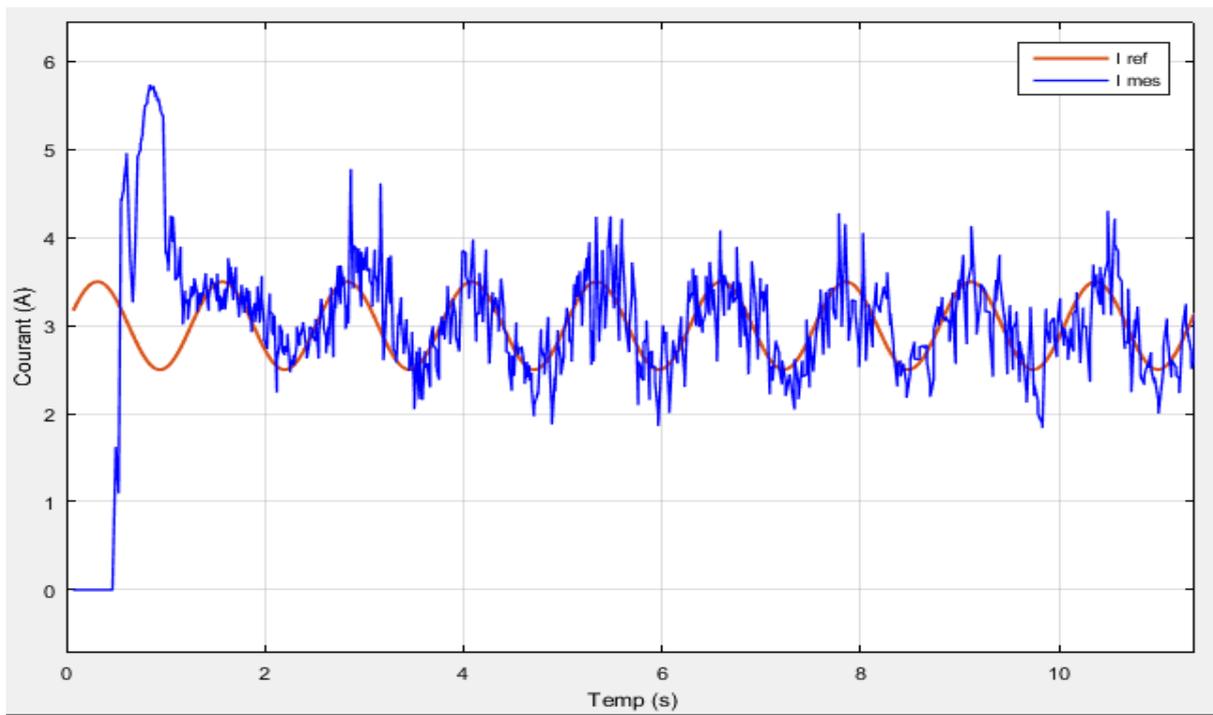


Figure V. 21 Variation de courant du MCC pour une référence périodique.

**Test3 :** Dans ce test, on va imposer un courant de référence similaire à celle obtenue par la turbine (voir figures V. 22- V. 23).

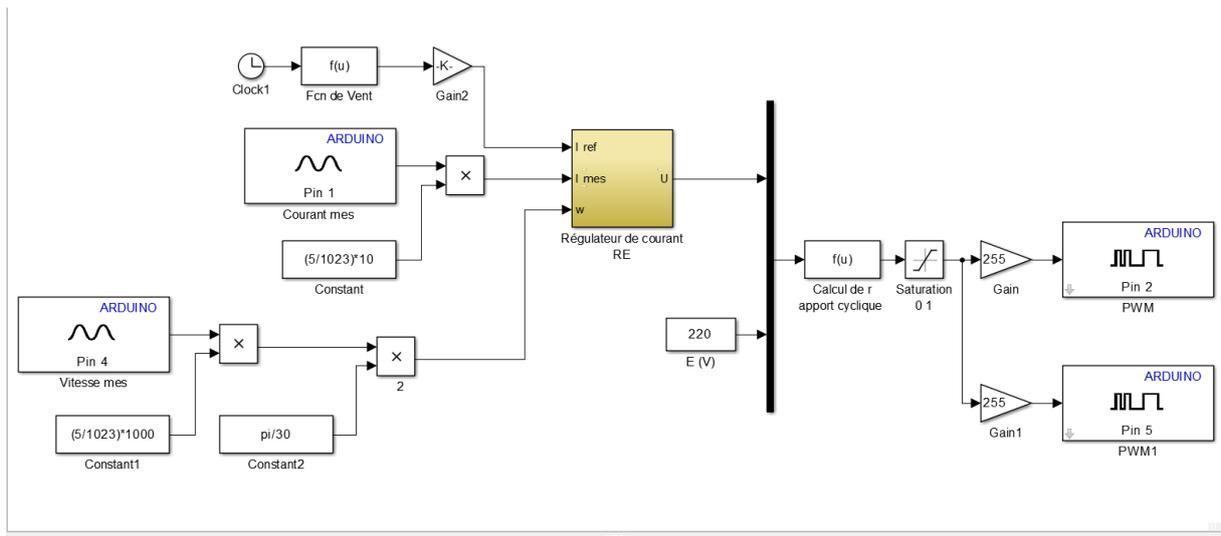


Figure V. 22 Modèle de régulateur par retour d'état implémenté sous MATLAB a fonction de vent..

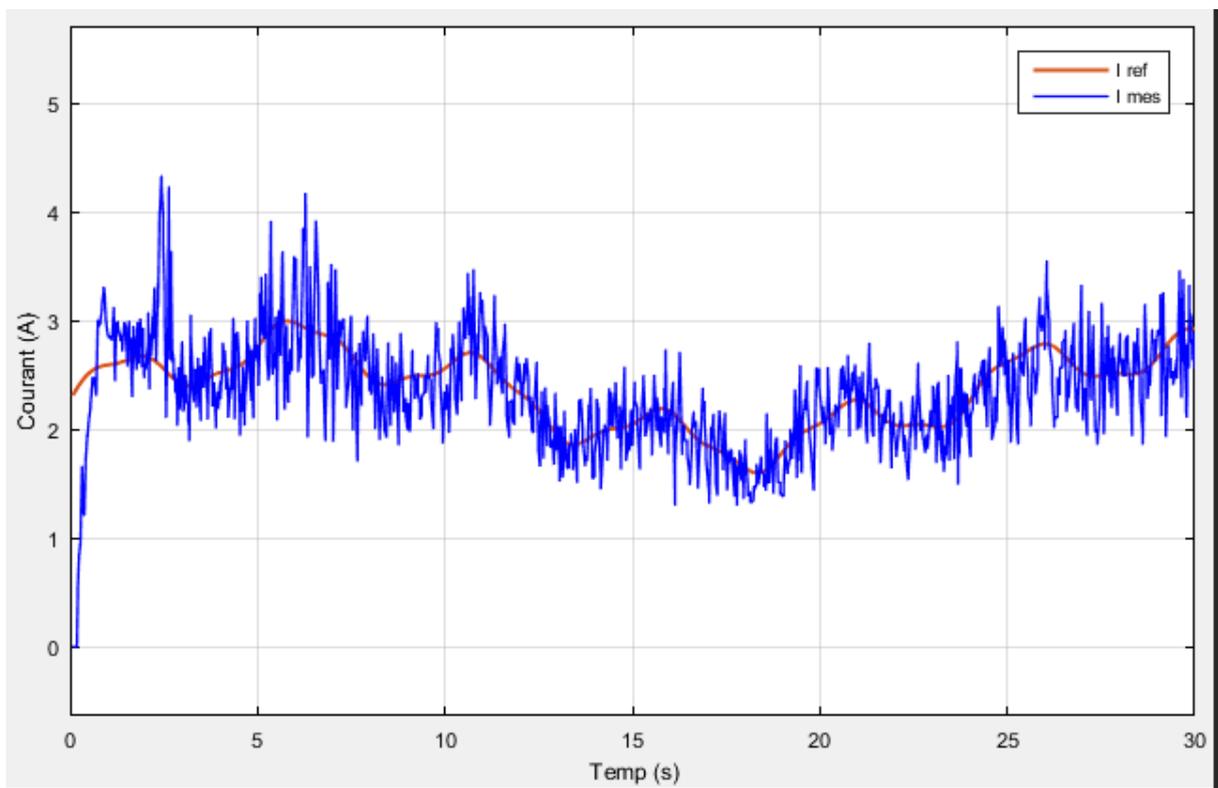


Figure V. 23 Variation de courant du MCC pour une référence forme de vent.

**Test3 :** Dans ce test on va utiliser la chaîne complète de l'émulateur, c'est-à-dire que le courant de référence est imposé par la turbine éolienne (voir figures V.24 - V.25).

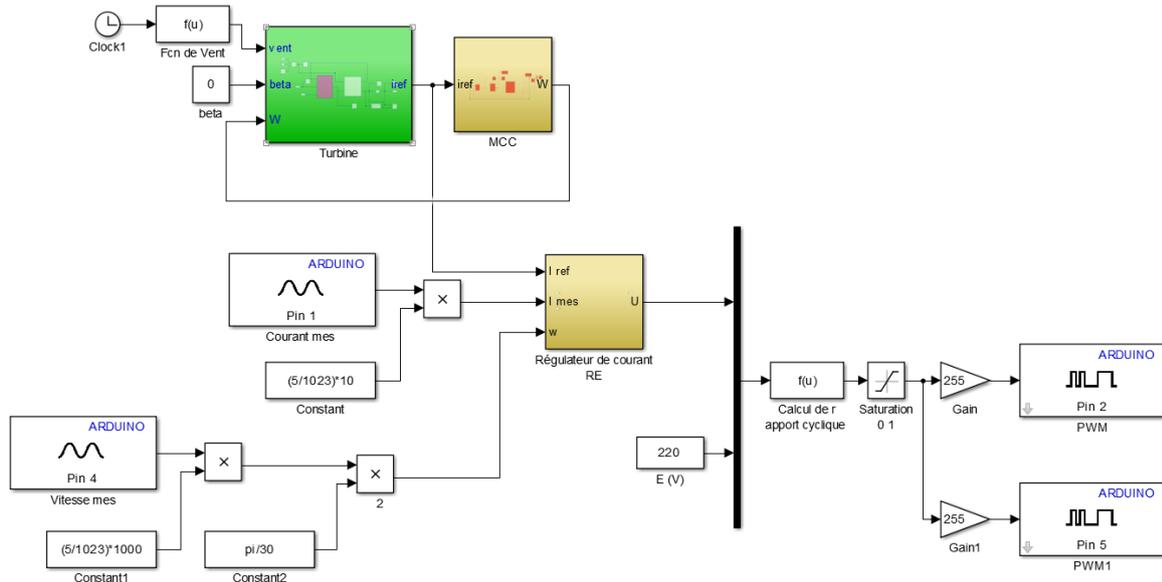


Figure V. 24 La chaine complète de l'émulateur.

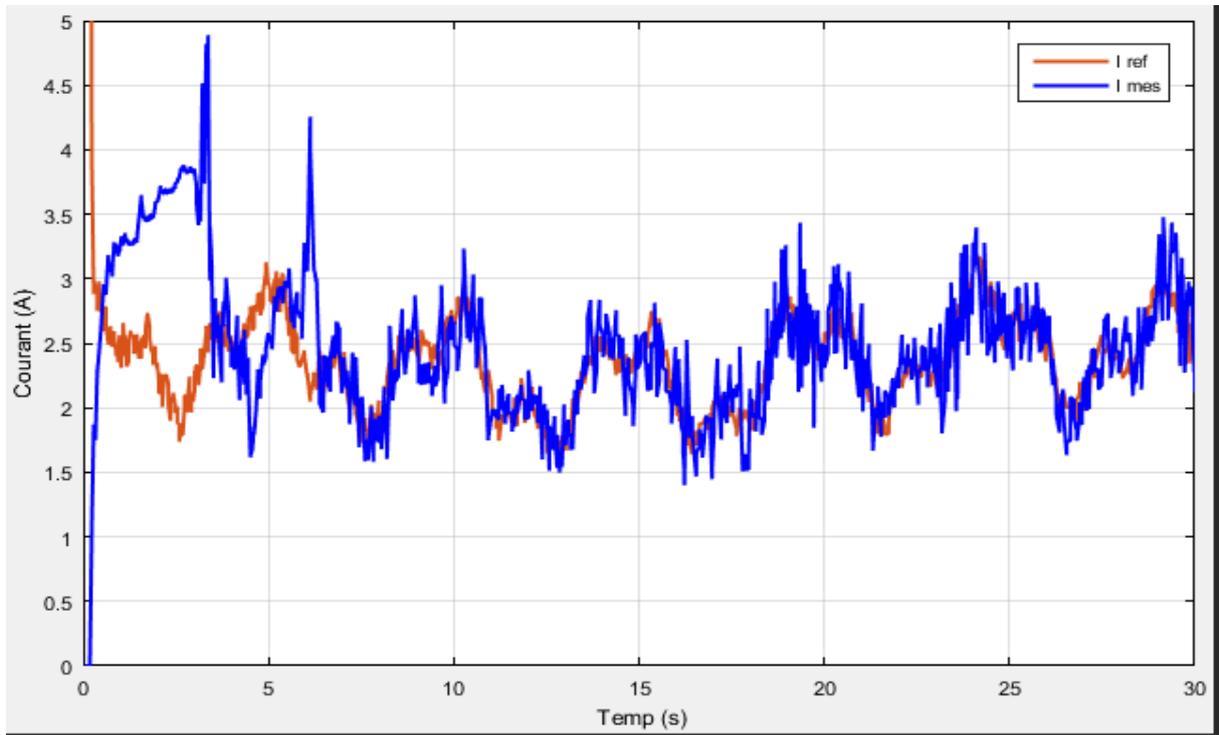


Figure V. 25 Variation de courant du MCC pour une référence forme de vent.

## V.6 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.

En première partie, on a constaté que les résultats obtenus par le régulateur PI dans la pratique sont proche à ceux obtenus par simulation.

En deuxième partie, la commande par retour d'état avec action intégrale donne des bonnes performances avec des ondulations qui sont dues au phénomène de chattering et à la limitation de la fréquence de l'ARDUINO qui ne dépasse pas 490 Hz.

On peut conclure aussi qu'il y a une bonne corrélation entre la théorie (résultats des simulations) et la pratique (résultats du banc d'essai). Ceci nous permet de conclure que le modèle de l'émulateur éolien utilisé présente, presque, parfaitement le modèle réel de cet émulateur.

Pour la commande adaptative, on a trouvé des difficultés pour l'implémenter sur le banc d'essai et ceci à cause de limitations de l'ARDUINO en capacité et en fréquence.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude et l'exploitation de nouvelles sources d'énergie non polluantes. L'objectif visé à travers ce travail est la modélisation d'un système éolien, ainsi que la réalisation d'un simulateur physique de turbine éolienne à base de la commande en couple d'une machine à courant continu par un régulateur conventionnel PI en suite par l'application d'une commande avancé c'est MRAC. Cet émulateur pouvant servir à accueillir les génératrices dont le fonctionnement est étudié dans un contexte éolien.

Le premier chapitre nous a permis de faire un aperçu général sur les systèmes éoliens. On a commencé par des définitions concernant l'énergie éolienne, les avantages et les désavantages de l'énergie éolienne et les composants ainsi que les différents types d'une éolienne. Après ce rappel et descriptif des notions élémentaires, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations électriques qui sont utilisées dans le domaine éolien.

Dans la seconde étude menée dans ce mémoire, on a 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 en se basant sur des paramètres statistiques qui les définissent. Nous avons appliqué ensuite ces variations 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

On a présenté dans le troisième chapitre, les résultats de simulation numérique de la commande classique (PI et retour d'état avec action intégrale) 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 et suivent les variations du vent appliqué au modèle de la turbine.

L'utilisation de la commande par retour d'état adaptative à un modèle de référence dans le quatrième chapitre, permis d'obtenir des résultats nettement meilleurs en termes de :

1. Poursuite de trajectoire imposée par le vent,
2. Rejet de perturbation,
3. Robustesse vis-à-vis de la variation paramétrique.

Enfin, le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à la partie pratique, où nous avons essayé de remplacer le modèle de la machine à courant continu par une machine réelle d'1 kW de puissance, L'objectif était de commander cette machine à travers un hacheur à quatre quadrants afin de valider les résultats obtenus par simulation. On peut conclure que notre émulateur avec les commandes proposées permettra de reproduire le comportement réel d'une turbine éolienne.

Comme le travail est très intéressant, des perspectives pouvant contribuer au développement et à l'amélioration du fonctionnement de cet émulateur sont envisageables telles que :

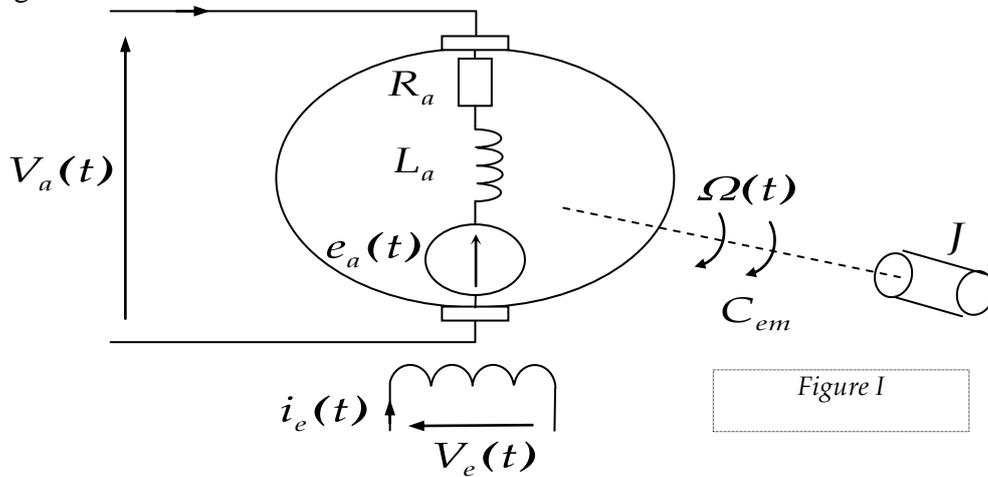
- Application d'autres commandes avancées.
- Synthèse des régulateurs classiques par des méthodes très récentes telles que les techniques LMI et celles basées sur les algorithmes génétiques.
- Réalisation pratique d'un système de conversion éolienne complet en utilisant la carte DSPACE.

# **ANNEXES**

## ANNEXES

### ANNEXES A : Identification des paramètres de la Machine à Courant Continu à excitation séparée.

La réalisation du simulateur de turbine éolienne nous a imposé une étape de modélisation de la machine à courant continu disponible sur le banc d'essai. La machine est à excitation séparée et nous avons procédé à l'identification de ses paramètres selon le schéma de la Figure A.1 :  $i_a(t)$



**Figure A.1 :** Modèle de la machine à courant continu.

On a considéré une machine à courant continu à excitation séparée en fonctionnement moteur

Equations électrique :

$$V_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a(t) \quad (\text{A.1})$$

$$e_a(t) = K \cdot \Omega(t) \text{ Avec } \Phi_e = cst \ (i_e = cst) \quad (\text{A.2})$$

Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - F \cdot \Omega - C_{sec} - C_r \quad (\text{A.3})$$

$R_a$  : Résistance de l'induit

$F$  : Coefficient de frottement

$L_a$  : Inductance de l'induit

$F\Omega$  : Couple de frottement visqueux

$K$  : Coefficient de  $f_{em}$

$C_{sec}$  : Couple de frottement sec

$C_{em} = K i_a$  : Couple électrique

$C_r$  : Couple de charge

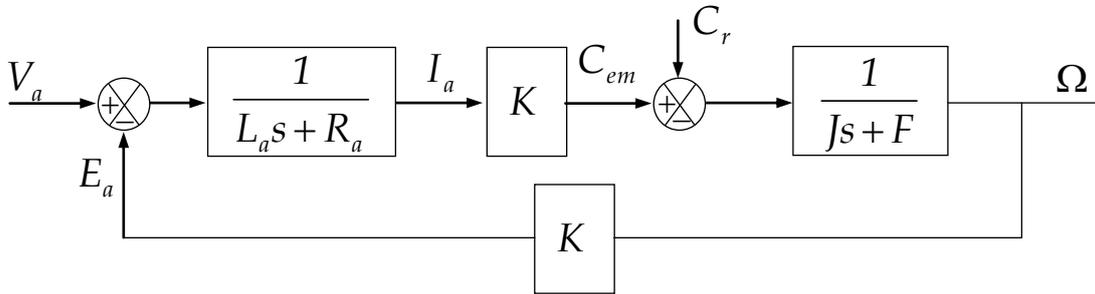
$J$  : Moment d'inertie global

## ANNEXES

A flux constant les équations de la machine après application de la transformation de Laplace deviennent

$$V_a = (R_a + L_a \cdot S) \cdot I_a + K \cdot \Omega \quad (A.4) \quad K \cdot I_a = (F + J \cdot S) \cdot I_a + C_r \quad (A.5)$$

A partir de ces équations, on peut tracer le schéma fonctionnel de la figure A.2



**Figure A.2 :** Schéma bloc de la MCC à flux constant.

Pour décrire le comportement dynamique de la machine nécessaire pour réaliser le réglage de la vitesse du MCC à excitation séparée, cinq paramètres sont à déterminer  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $K$ ,  $J$  et  $F$ .

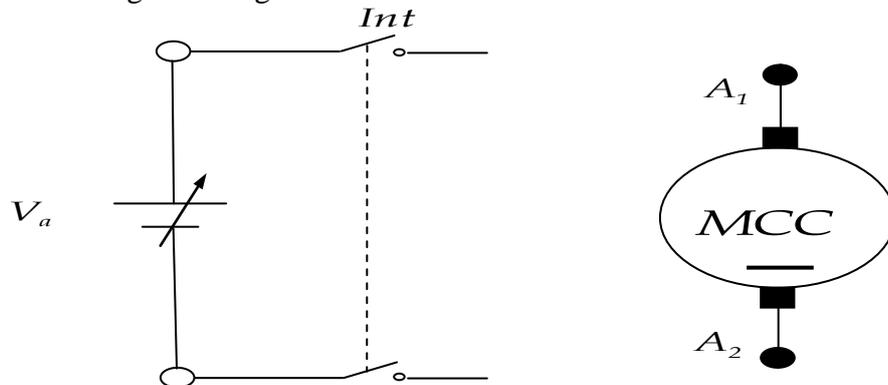
### A.1 Manipulation : Identification des paramètres

#### A.1.1 Détermination de $R_a$ :

On détermine  $R_a$  par la méthode voltampéremétrique avec machine à l'arrêt (courant excitation nul).

On obtient :  $R_a = \frac{V_a}{I_a}$  (A.4)

On va réaliser le montage de la figure A.3



**Figure A.3 :** Modèle de la machine l'induit.

## ANNEXES

La mesure de  $R_a$  pour différents courants d'induit et positions du rotor

Le tableau suivant représente les différents essais :

$I_a$ (mA)	$I_{an}=6.2$ A	$2I_{an}/2 = 4.13$ A	$I_{an}/3 = 2.06$ A
$V_a$ (V)	25.05	17.4	7.4
$R_a$ ( $\Omega$ )	4.04	4.21	3.59

**Tableau A.1** : Résultats des essais à courant continu.

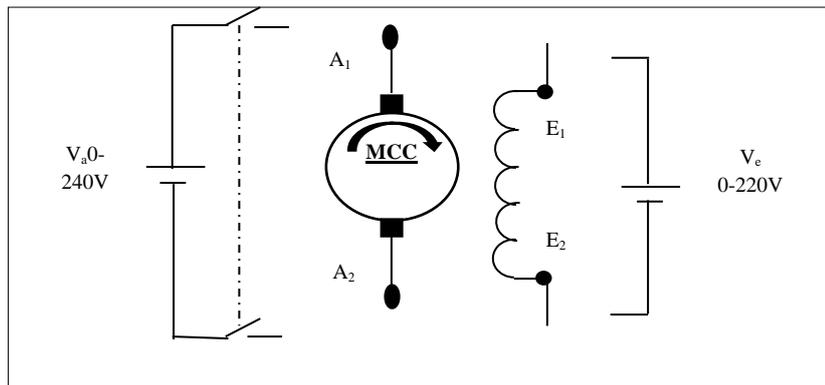
Valeur moyenne de  $R_a$  ( $\Omega$ ) = 3.94  $\Omega$ .

### A.1.2 Détermination de la constante K :

L'expression qui détermine la constante de la machine K à partir de  $V_a$ ,  $I_a$ ,  $\Omega$  et la résistance de l'induit  $R_a$  et donne par :

$$V_a = R_a \cdot I_a + K \cdot \Omega \Rightarrow K = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{\Omega} \quad (\text{A.5})$$

On va réaliser la figure A.4 Le frein et la tachygénérateur sont branchés sur l'arbre de la machine. Et exciter la machine à courant nominal  $I_{en}$  et on démarre la machine en augmentant progressivement la tension de l'induit jusqu'à  $V_a=220V$ .



**Figure A.4** : Modèle de la machine avec Le frein et la tachygénérateur.

On utilise la tachygénérateur pour relever de la vitesse de rotation après son étalonnage par le stroboscope. Veille à ce que  $V_a$  et  $I_e$  restent constants pendant toute la durée de l'essai.

Le tableau suivant représente les différents résultats :

## ANNEXES

	$V_a = 220 \text{ V} / I_e = I_{en}$					
$C_r(\text{Nm})$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	
$N (\text{tr}/\text{min})$	2600	2500	2450	2400	2350	2300
$I_a(\text{mA})$	1.9	3	4	5	6	7

**Tableau A.2 :** Les mesures de la constante du couple.

La valeur moyenne de K et :  $K=0.794 \text{ (V/rad/s)}$ .

### A.1.3 Détermination de $L_a$ :

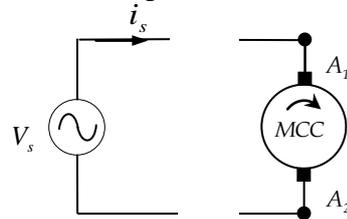
L'induit est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace  $V_s$ . Que devient le schéma équivalent de l'induit (avec flux d'excitation nul). L'expression de l'inductance en fonction des valeurs efficaces de  $V_s$  et  $I_s$  et de  $R_a$ .

$$|Z| = \sqrt{R_a^2 + (L_a \cdot \omega)^2} = \frac{U_a}{i_a} \quad (\text{A.6})$$

D'où

$$L_a = \sqrt{\frac{Z^2 - R_a^2}{\omega^2}} \quad (\text{A.7})$$

On l'arrête la machine et on utilise la sortie de l'autotransformateur de l'alimentation de l'inducteur pour alimenter l'induit de la machine par une tension sinusoïdale suivant le circuit de la figure A.5 et le tableau A.3 représente les trois courants.



**Figure A.5 :** Essai harmonique

$I_s \text{ (A)}$	$I_{an}=6.2$	$2. I_{an}/3=4.13$	$I_{an}/3=2.06$
$V_s \text{ (V)}$	78	59	32
$Z \text{ (}\Omega\text{)}$	12.5806	14.2742	15.4839
$L_a \text{ (H)}$	0.0380	0.0437	0.0477

**Tableau A.3 :** Résultats des essais harmoniques.

La valeur moyenne de  $L_a = 0.0431$

## ANNEXES

### A.1.3 Détermination du $C_{sec}$ et $F$ :

Avec le même montage de la figure A.4 et on va débrancher le frein de l'arbre de la machine. Et démarrer la machine en excitation nominale, lors d'un essai à vide sous tension d'induit variable. On utilise la tachygénératrice pour le relevé de la vitesse de rotation après son étalonnage par le stroboscope. Veiller à ce que  $I_e$  reste constant pendant toute la durée de l'essai.

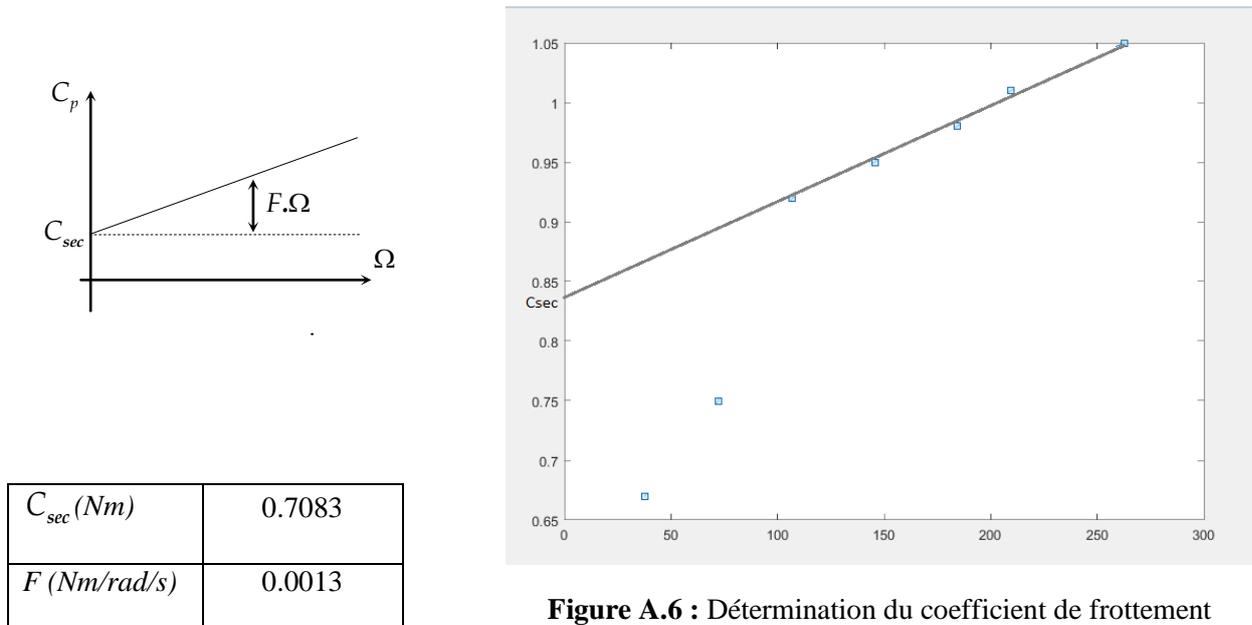
$V_a$ (V)	40	70	100	130	160	180	220
$N_0$ (tr/min)	360	690	1020	1390	1960	2000	2510
$\Omega$ (rad/s)	37.699	72.2566	106.8142	145.56	184.31	209.44	262.85
$I_{a0}$ (A)	0.68	0.82	1.02	1.1	1.16	1.12	1.29
$C_p$ (Nm)	0.67	0.75	0.92	0.95	0.98	1.01	1.05

**Tableau A.4** : Les mesures du couple de perte.

Le couple de perte se calcule comme suit :

$$C_p = (E_{a0} \cdot I_{a0}) / \Omega_0 = (V_a - R_a \cdot I_{a0}) I_{a0} / (N_0 \cdot \pi / 30) \quad (\text{A.7})$$

La figure suivante représente le graphique de l'évolution de couple de pertes en fonction de la vitesse  $C_p = f(\Omega)$



**Figure A.6** : Détermination du coefficient de frottement visqueux.

### A.1.3 Détermination du $J$ :

## ANNEXES

Pour un fonctionnement à vide ( $C_{ch}=0 \text{ Nm}$ ). La machine développe le couple électromagnétique égale au couple de perte :  $C_p=C_{sec}+C_{FV}$  . le couple de frottement sec  $C_{sec}$  est indépendant de la vitesse de rotation et le couple de frottement visqueux est égal  $C_{FV}=F*\Omega$  avec  $F$  est le coefficient de frottement visqueux.

Lorsqu'on coupe l'alimentation d'induit du moteur, on a alors :

$$I_a = 0 \text{ et } J \frac{d\Omega}{dt} = -F\Omega - C_{sec} \quad (\text{A.8})$$

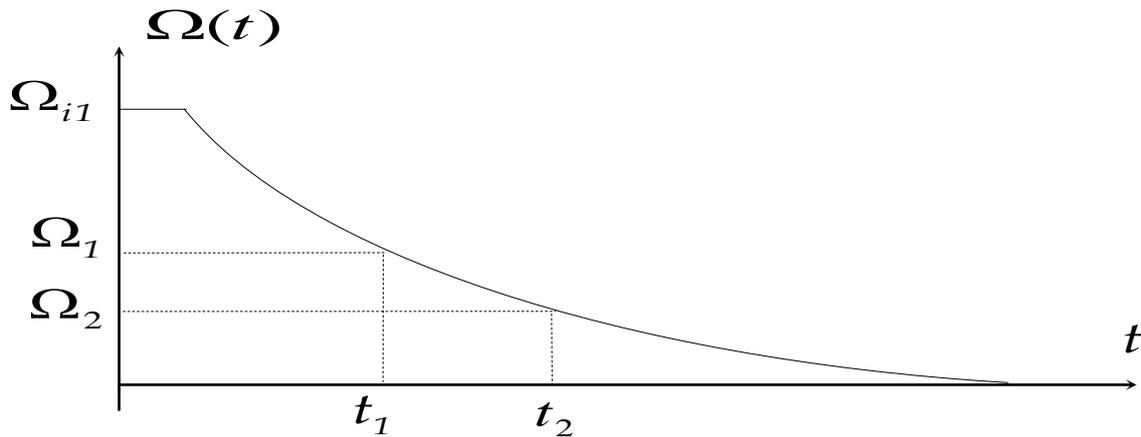
$$\text{Soit } J \frac{d\Omega}{dt} = -C_p(\Omega) \quad (\text{A.9})$$

Si on enregistre la variation  $\Omega(t)$  lors de cet essai de ralentissement. On obtient une courbe comme la montre la figure A.7.

On considère un point  $\{\Omega_1, t_1\}$  et un point voisin  $\{\Omega_2, t_2\}$  puis on détermine :

$$\left( \frac{d\Omega}{dt} \right)_{t_1} = \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{A.10})$$

$$\text{Alors } J = \frac{C_p(\Omega_1)}{\left( \frac{d\Omega}{dt} \right)_{t_1}} \quad (\text{A.11})$$



**Figure A.7 :** Courbe de ralentissement d'une machine à courant continu.

$$d\Omega = 20.93 \quad (\text{A.12})$$

$$dt = 0.14 \text{ Donc } \frac{d\Omega}{dt} = 149.52 \quad (\text{A.13})$$

$$J = 0.0098 \text{ Kg} / m^2 \quad (\text{A.14})$$

## ANNEXES

### **ANNEXES B : Identification des paramètres de la Machine à Courant Continu à excitation séparée.**

#### **B.1 Description sur la carte ARDUINO**

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. Sans tout connaître ni tout comprendre de l'électronique, cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne. Pont tendu entre le monde réel et le monde numérique, Arduino permet d'étendre les capacités de relations humain/machine ou environnement/machine. Arduino est un projet en source ouverte : la communauté importante d'utilisateurs et de concepteurs permet à chacun de trouver les réponses à ses questions. Des dizaines de milliers d'artistes, de designers, d'ingénieurs, de chercheurs, d'enseignants et même d'entreprises l'utilisent pour réaliser des projets incroyables dans de multiples domaines:

- prototypage rapide de projets innovants utilisant l'électronique.
- captation et analyse de données scientifiques.
- installations d'arts numériques.
- projets pédagogiques.

##### **B.1.1 Partie matérielle**

La carte Arduino repose sur un circuit intégré (un mini-ordinateur appelé également microcontrôleur) associée à des entrées et sorties qui permettent à l'utilisateur de brancher différents types d'éléments externes :

- Côté entrées, des capteurs qui collectent des informations sur leur environnement comme la variation de température via une sonde thermique, le mouvement via un détecteur de présence ou un accéléromètre, le contact via un bouton-poussoir, etc.
- Côté sorties, des actionneurs qui agissent sur le monde physique telle une petite lampe qui produit de la lumière, un moteur qui actionne un bras articulé, etc.

Comme le logiciel Arduino, le circuit électronique de cette plaquette est libre et ses plans sont disponibles sur internet. On peut donc les étudier et créer des dérivées. Plusieurs constructeurs proposent ainsi différents modèles de circuits électroniques programmables et

## ANNEXES

utilisables avec le logiciel Arduino. Il existe plusieurs variétés de cartes Arduino UNO, DUE et MEGA chaque une a des caractéristiques spécifiques

### **B.1.2 Partie logicielle**

L'environnement de programmation ARDUINO (IDE en anglais) est une application écrite en Java, dérivée du langage Processing. L'IDE permet d'écrire et de modifier les codes et les convertir en une série d'instructions compréhensibles par la carte. On y retrouve les éléments de la fenêtre de travail de Processing : intitulés des menus, boutons, zone d'édition, console, etc. comme dans Processing, le programme est constitué d'une série d'instructions saisie dans la fenêtre du logiciel.

Le programme qui envoyé vers la carte ARDUINO est enregistré de manière permanente, ce programme est activé à chaque fois que l'on alimente la carte.

### **B.2 La carte ARDUINO Mega**

Le modèle Mega Arduino est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega2560. Il dispose de 54 broches numériques d'entrée / sortie (dont 14 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur en cristal de 16 MHz, d'une connexion USB, une prise d'alimentation, d'une embase ICSP, et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur suffit de le brancher à un ordinateur avec un câble USB ou de la puissance avec un adaptateur ou la batterie AC -DC pour commencer. Le Mega est compatible avec la plupart des blindages conçus pour l'Arduino Duemilanove ou Diecimila.

## ANNEXES

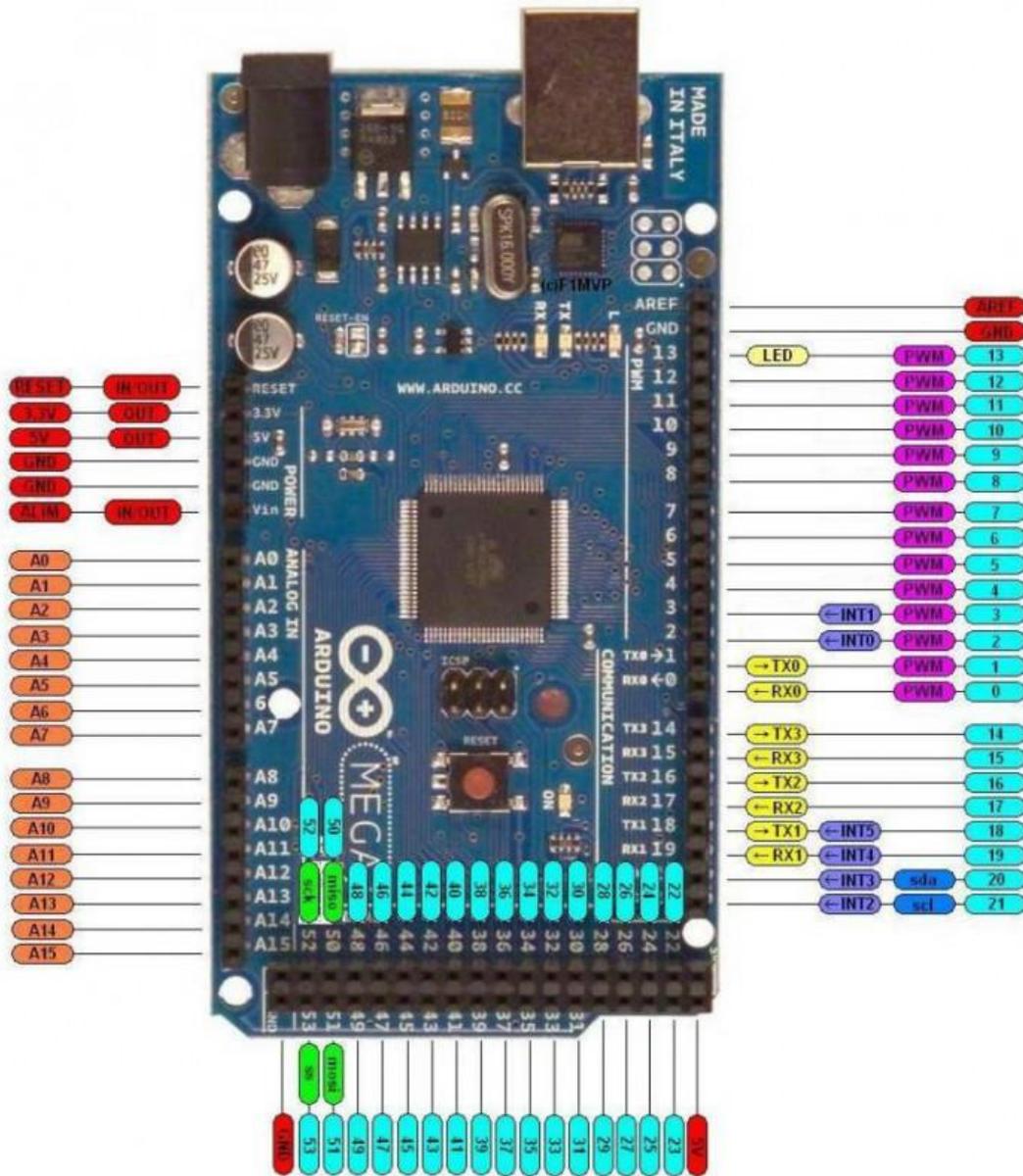


Figure B. 1 Arduino Mega 2560

### B.3 LOGICIEL

### B.4 LES CONDITIONS D'UN PROGRAMMATION ARDUINO:

Le langage de programmation Arduino dérive du langage C++ et il en respecte les règles de syntaxe:

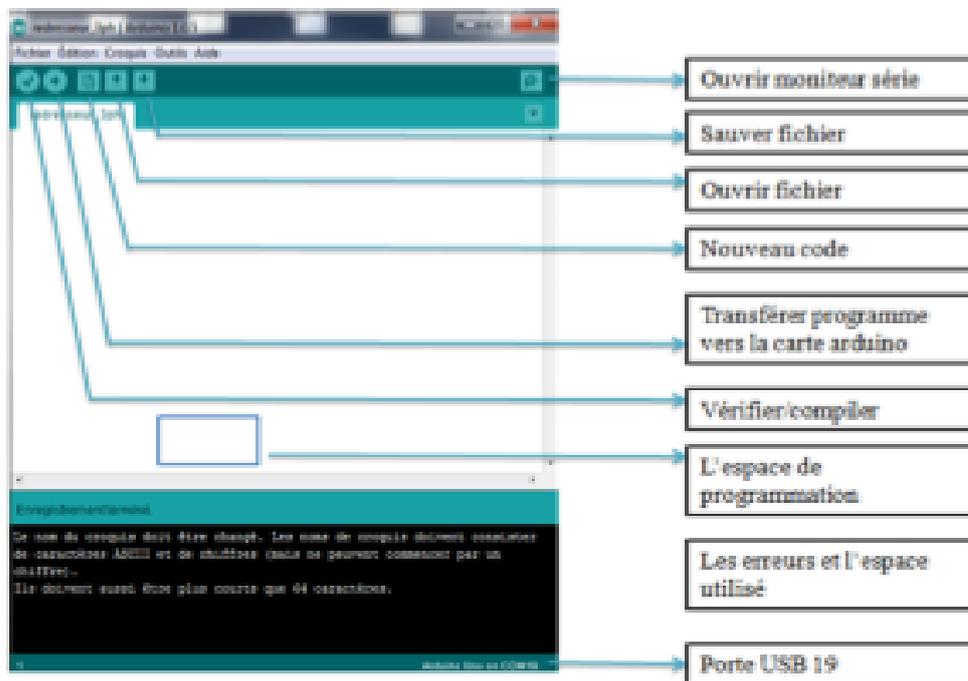
- Une ligne qui commence par "//" est considérée comme un commentaire
- Un paragraphe qui commence par "/\*" et qui se termine par "\*/" est considéré comme un commentaire
- Toute ligne d'instruction de code doit se terminer par un point-virgule ";"

## ANNEXES

- Un bloc d'instructions (définition d'une fonction, boucle "while" ou "if"/"else"... ) doit être délimité par des accolades ouvrantes "{" puis fermantes "}".
- Toutes les variables doivent être déclarées, ainsi que leur type (int,float,...) avant d'être utilisées.

Un programme (ou "sketch") Arduino est constitué de 2 fonctions distinctes:

- La fonction de configuration "void setup" exécutée une seule fois au lancement du programme.
- La fonction "void loop" qui est ensuite exécutée indéfiniment en boucle.  
Remarque: On peut relancer le programme en actionnant le bouton poussoir "reset" sur la carte.



**Figure B. 2** Explication de l'entête de la logicielle Arduino.

### B.5 L'environnement MATLAB/Simulink

C'est un logiciel de calcul mathématique pour les ingénieurs et les scientifiques créé par Mathworks. MATLAB est un environnement de programmation pour le développement d'algorithme, d'analyse de données, de visualisation, et de calcul numérique.

## ANNEXES

En utilisant MATLAB, la résolution des problèmes de calcul complexes se fait plus rapidement qu'avec des langages de programmation traditionnels, tels que C, C++, et le Fortran.

SIMULINK est un environnement pour la simulation multi domaine. Il fournit un environnement graphique interactif et un ensemble de bibliothèques de bloc qui permettent de concevoir, simuler, mettre en application, et examiner une variété de systèmes, tel que les systèmes de communications, de commandes, de traitement des signaux, de traitement visuel, et de traitement d'image.

### **B.5.2 L'interfaçage Arduino-MATLAB/Simulink**

Il existe trois possibilités d'interfacer la carte Arduino avec MATLAB/Simulink, à savoir :

4. Programmation de la carte Arduino Uno comme une carte d'interface.
5. Utilisation du package ArduinoIO.
6. Utilisation du package Arduino Target.

Dans ce travail on a choisi l'Arduino Méga2560 car cette carte fonctionne en temps réel

## Références

- [1] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Paris, ENSAM, 2003.
- [2] A. Mirecki, « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », 2005.
- [3] F. Blaabjerg, F. Iov, R. Teodorescu, et Z. Chen, « Power electronics in renewable energy systems », in Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, 2006, p. 1–17.
- [4] D. Le Gourières, « Énergie éolienne: Théorie, conception et calcul pratique des installations », in Energie eolienne: theorie, conception et calcul pratique des installations, Eyrolles, 1982.
- [5] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, et H. AHMED, « Le Génie Electrique dans le vent: état de l'art et ».
- [6] B. Multon et al., Etat de l'art des aérogénérateurs. Ed. NOVELECT-ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, 2002.
- [7] F. AKEL, « Etude et réalisation d'un emulateur de turbine éolienne », l'UER d'Electrotechnique école militaire polytechnique, 2009.
- [8] T. Tafticht, « Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien », Université du Québec à Trois-Rivières, 2006.
- [9] P. W. Carlin, A. S. Laxson, et E. B. Muljadi, « The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology », Wind Energy, vol. 6, no 2, p. 129–159, 2003.
- [10] « Horizontal wind turbine », energythic. [En ligne]. Disponible sur: <http://energythic.com/view.php?node=200>.
- [11] F. Poitiers, « Etude et commande de generatrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie eolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Université de Nantes, 2003.
- [12] S. Mathew, Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics, vol. 1. Springer, 2006.
- [13] Y. BENTALEB et Y. HACENE, « Etude d'un émulateur éolien », 2008.
- [14] « Eolienne à axe vertical de type Savonius », ecosources. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne\\_verticale\\_Savonius](http://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Savonius).
- [15] M. S. Abdoulaziz, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mém. Ingénieure Ecole Natl. Polytech. D'Alger, 2007.
- [16] D. Y. Goswami et F. Kreith, Handbook of energy efficiency and renewable energy. Crc Press, 2007.
- [17] « Eolienne verticale », ooreka. [En ligne]. Disponible sur: <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/eolienne-verticale>.
- [18] R. d'ADRAR, « MASTER ACADEMIQUE ».
- [19] F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff, et M. E. Zaim, « Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems », Int. J. Renew. Energy Eng., vol. 3, no 3, p. 373–378, 2001.
- [20] J. Ancel, « Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul », Tech. L'Ingénieur Traité Génie Électr. D, p. 451–9.
- [21] A. Tounzi, « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », Journ. Club EEA, p. 28–29, 1998.
- [22] L. Refoufi, B. A. T. Al Zahawi, et A. G. Jack, « Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator », IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no 3, p. 333–339, 1999.
- [23] S. Heier, « Grid integration of wind energy conversion systems, 1998 », ISBN 0, vol. 471, p. 97143.
- [24] G. A. Smith et K. A. Nigim, « Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator », in IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 1981, vol. 128, p. 317–324.

- [25] C. Colliez, A. Tounzi, et F. Piriou, « Vector control of an autonomous induction generator connected to a PWM rectifier », in EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 1997, vol. 2, p. 2–711.
- [26] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Université de Nantes, 2003.
- [27] T. Belkacem, « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », Université de Batna 2, 2010.
- [28] S. Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Ecole nationale supérieure polytechnique, 2009.
- [29] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Université Henri Poincaré-Nancy I, 2006.
- [30] H. Merabet Boulouiha, « TECHNIQUES DE COMMANDE AVANCÉE », 2015.
- [31] M. A. SADEG et F. YAHATENE, « Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu », Université Djillali Liabes, SIDI BEL ABBES, 2015.

## ملخص:

عرف القرنان الماضيان تطورا صناعيا مذهلا يعود الفضل فيه أساسا إلى الطاقة الكهربائية التي ظل إنتاجها طويلا قائما على ما تحويه الرض في باطنها من محروقات. لكن التلوث الناتج عن إنتاج الطاقة الكهربائية بهذه الطريقة و تكاليفها الباهظة و كذا سيرها نحو النضوب، عوامل دفعت إلى البحث عن بدائل لها، و كان ذلك في الطاقات المتجددة نذكر منها طاقة الرياح و هو الحل اكثر رواجاً.

في هذه المذكرو، سنقوم بشرح كيف نقوم بإنجاز محاكي فيزيائي لناعورة هوائية لإنتاج الطاقة الكهربائية وذلك عن طريق التحكم في عزم المحرك ذي تيار مستمر و ذي تغذية مستقلة. نموذج الناعورة و كذا نموذج المحرك و التحكم فيه تم تمثيلهما بإستعمال برنامج MATLAB/SIMULINK هذا المحاكي يسمح بدراسة آليات تحويل الطاقة الهوائية إلى طاقة كهربائية في المخبر في ظروف قريبة من الواقع

## كلمات مفتاحية :

ناعورة هوائية، محاكي، محرك ذو تيار مستمر، مقطع ذو أربع اتجاهات، التحاكي في الوقت الحقيقي

## Abstract:

Electrical energy was at the origin of the great industrial development that had taken place during the last two centuries. Its production has long been based on fossil products. This type of production is polluting, expensive and tends towards exhaustion; New forms of electricity production based on renewable energies have presented an attractive alternative. One of these is wind energy.

In this brief, we present the implementation of a wind turbine emulator based on the torque control of a separately excited MCC. The model of the wind turbine and the control are implemented under MATLAB / SIMULINK. This emulator will allow to study the wind conversion chains in the laboratory under conditions close to those of a real wind system.

Keywords: Wind turbine, emulator, DC machine, four quadrant chopper, real time simulation.

## Résumé :

L'énergie électrique était à l'origine du grand développement industriel qu'avaient connu les deux derniers siècles. Sa production est restée longtemps basée sur les produits fossiles. Ce type de production étant polluant, coûteux et tendant vers l'épuisement; de nouvelles formes de production d'électricité à base d'énergies, dites renouvelables, ont présenté une alternative attirante. L'une d'elles est l'énergie éolienne.

Dans ce mémoire, nous exposons la mise en œuvre d'un émulateur de turbine éolienne à base de la commande en couple d'une MCC à excitation séparée. Le modèle de la turbine éolienne et de la commande sont implémentés sous MATLAB/SIMULINK. Cet émulateur va permettre d'étudier les chaînes de conversion éoliennes au laboratoire dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel.

Mots clés: Éolienne, émulateur, machine à courant continu, hacheur à quatre quadrants, simulation en temps réel.