

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : commande Electrique

THÈME

**Contrôle intelligent d'une chaine de conversion
éolienne connectée au réseau**

Préparé par : M^{elle} MOKADDEM ASMA

M^{elle} SASSE REMAISSAA

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mme S.Laribi	MCB	Présidente
Mr A.Safa	MCB	Examinateur
Mr Y. Mihoub	MCB	Encadreur
Mr S.Hssaine	MCA	Co-Encadreur
Mr H.Chaib		Invité

PROMOTION 2018 /2019

Remerciements

✚ Au nom d'**ALLAH**, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux.

✚ La louange est à **ALLAH** l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

Aux termes de ces années de formation et de ce projet d'initiation à la recherche, nous tenons à remercier très sincèrement :

✚ Monsieur **MIHOUB Youcef**

✚ maître de conférences et Monsieur **HASSAINE Said** professeur à l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret, pour avoir accepté la tâche de nous encadrer,

✚ Monsieur, **ALLAOUI.T** de l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de soutenance,

✚ Monsieur **SAFA.A** maître de conférences d'avoir accepté d'examiner ce travail.

✚ Monsieur **CHAIB H**, doctorant à l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret,

pour l'intérêt

qu'il porte à nos

travaux.

Merci



ρ	Densité de l'air.
C_f	Couple résistant dû aux frottements.
$C_{aer.}$	Couple aérodynamique
C_{em}	Couple électromagnétique du générateur.
C_g	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice
C_{mec}	Couple mécanique total.
C_p	Coefficient de puissance
C_r	Couple résistant
d_{En}	Dérivée de l'erreur.
E_r	Erreur.
F	Fréquence d'alimentation des bobinages statoriques.
f	Coefficient de frottement visqueux.
F_{bf}	Fonction de Transfert Boucle Fermé
F_{bo}	Fonction de Transfert Boucle Ouverte
FLC	Fuzzylogic control.
G.	Gain du multiplicateur
GSAP	Génératrice synchrone à aimant permanent.
$i_{a,b,c}$	Courants des phases statoriques
IGBT	InsulatedGateBipolar Transistor
I_{sdq}	Courant statorique sur les axes d et q.
J	Moment d'inertie total sur l'arbre
Jg.	Moment d'inertie de la génératrice
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine.
L_d	Inductance statorique sur l'axe d.
L_q	Inductance statorique sur l'axe q.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT.	Maximum Power Point Tracking
P	Nombre de pair de pôles.
P (θ)	Transformation de Park.
P⁻¹(θ)	Transformation inverse de Park.
$\phi_{a,b,c}$	Vecteurs flux statoriques des phases a,b,c.
ϕ_f	Flux statorique des phases.
P_m	Puissance extraite.
R_s	Résistance statorique
Rt	Rayon des pales de la turbine.

Liste des symboles

S	Surface balayée par les pales de l'éolienne.
$V_{a,b,c}$	Tensions des phases statoriques.
V_1	Vitesse du vent en amont.
V_2	Vitesse du vent en aval.
V_{sdq}	Tension statorique sur les axes d et q.
V_v	Vitesse de vent
ω_{mec}	Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur)
ω_t	Vitesse de rotation avant multiplicateur
$\omega_{turbine}$	Vitesse de rotation du générateur (avant le multiplicateur)
β	Pitch angle
θ	Vitesse de rotation du rotor.
λ	La vitesse spécifique
ω	Vitesse de rotation de la génératrice

Liste des Tableaux

Tableau I 1 Comparaison des différentes éoliennes utilisées.....	21
Tableau III. 1 Les méthodes d'inférence	62
Tableau IV. 1 Matrice d'inférence du PI-flou à trois ensembles.....	71
Tableau IV. 2 Matrice d'inférence du PI-Flou à cinq ensembles.....	72
Tableau IV. 3 Matrice d'inférence 7 ensemble.....	73
Tableau IV. 4 matrice d'inférence du régulateur flou à trois entrés.....	80
Tableau IV. 5 matrice d'inférence.....	85
Tableau IV. 6 matrice d'inférence.....	91

Liste des Figures

Chapitre I

Généralités sur les Eoliennes

Figure I. 1 Développement de l'éolien au niveau mondial.....	5
Figure I. 2 Vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol en Algérie.....	6
Figure I. 3 Structure générale d'un système de conversion éolienne.....	7
Figure I. 4 Schéma des différentes parties d'une éolienne.....	8
Figure I. 5 Types d'éolienne à axe horizontal (éolienne amont – éolienne aval) ..	10
Figure I. 6 Éolienne à axe horizontal.....	10
Figure I. 7 Principe de rotor de Savonius.....	12
Figure I. 8 Éolienne de Darrieus.....	12
Figure I. 9 Description d'une pale d'éolienne.....	13
Figure I. 10 Génératrice Asynchrone à Double Alimentation GADA a vitesse variable.....	15
Figure I. 11 Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur.....	16
Figure I. 12 Générateur asynchrone à cage d'écureuil.....	17
Figure I. 13 Générateur asynchrone à double stator.....	17
Figure I. 14 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne.....	18
Figure I. 15 Système de décrochage aérodynamique.....	19
Figure I. 16 Variation de l'angle de calage d'une pale.....	20

Chapitre II		Modélisation et commande de la chaine de conversion d'énergie éolienne	
Figure II. 1	Configuration d'une éolienne. [24].....	22	
Figure II. 2	Simulation du profil de la vitesse de vent.	23	
Figure II. 3	Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne. [24]	23	
Figure II. 4	Schéma bloc de multiplicateur. [49]	26	
Figure II. 5	Schéma bloc du modèle de l'éolienne. [28]	27	
Figure II. 6	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.	29	
Figure II. 7	Représentation schématique de la GSAP dans l'espace électrique. [24]	30	
Figure II. 8	Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park. [24]	31	
Figure II. 9	Schéma de la commande vectorielle d'une GSAP. [49].....	35	
Figure II. 10	Schéma de découplage.	36	
Figure II. 11	Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI. [37].....	37	
Figure II. 12	Onduleur de tension. [24].....	39	
Figure II. 13	Schéma de principe de la technique triangulaire-sinusoidal MLI. [53]	40	
Figure II. 14	Schéma électrique du bus continu.....	42	
Figure II. 15	Schéma de contrôle de la tension continue Vdc. [49]	43	
Figure II. 16	Schéma électrique du filtre. [4].....	43	
Figure II. 17	Système global de la chaine de la conversion éolienne.....	46	
Figure II. 18	Schéma global de la simulation de la chaine de conversion éolienne.	48	
Figure II. 19	Fonction représentant la variation de la vitesse du vent.....	49	
Figure II. 20	Commande de la vitesse de rotation de la GSAP.....	49	
Figure II. 21	Puissance de la turbine.....	49	
Figure II. 22	Courbe de Lambda.....	50	
Figure II. 23	Courbe de Coefficient de puissance CP	50	
Figure II. 24	Courants statoriques de la GSAP	50	
Figure II. 25	Commande du courant direct dans le repère de Park.	51	
Figure II. 26	Commande du courant quadratique Isq.....	51	
Figure II. 27	Variation du couple électromagnétique avec la référence dans la GSAP.	51	
Figure II. 28	Tension redressé et la tension de bus continue.	52	
Figure II. 29	Commande de la puissance active P.	52	
Figure II. 30	Résultat de commande de la puissance réactive Q.....	52	
Figure II. 31	Le courant de réseau	53	
Figure II. 32	Le courant en quadrature de réseau.....	53	
Chapitre III		Logique floue et contrôleurs flous utilisés	
Figure III. 1	Éléments de la logique floue.....	59	
Figure III. 2	Formes de bases des fonctions d'appartenance.	59	
Figure III. 3	Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique. [40]	60	
Figure III. 4	Schéma générale d'un système flou.....	61	
Figure III. 5	Principe des différentes méthodes de défuzzification [44]	62	
Figure III. 6 a):	Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b) : Configuration d'un contrôleur flou.	63	
Figure III. 7	Schéma synoptique d'un contrôleur flou de vitesse	64	
Figure III. 8	Schéma synoptique d'un contrôleur PI- flou de vitesse.....	65	
Figure III. 9	Structure de contrôleur flou adaptatif	66	
Figure III. 10	Structure générale d'un contrôleur flou type -2.....	67	
Chapitre IV		Application de la commande floue	
Figure IV. 1	Schéma bloc Simulink de contrôleur PI flou de vitesse	69	
Figure IV. 2	Entrées et sortie du contrôleur PI-flou à trois ensembles	70	
Figure IV. 3	Entrées et sortie du contrôleur PI-flou à cinq ensembles.....	71	
Figure IV. 4	Entrées et sortie du contrôleur PI-flou à sept ensembles	73	
Figure IV. 5	Vitesse mécanique PI-FLOU.....	74	
Figure IV. 6	Puissance de la turbine PI-FLOU	74	
Figure IV. 7	courbe de lambda PI-FLOU	75	
Figure IV. 8	Courbe de coefficient de puissance PI-FLOU	75	
Figure IV. 9	courant Isabc PI-FLOU	75	
Figure IV. 10	Courant Isd PI-FLOU	76	
Figure IV. 11	Courant Isq PI-FLOU	76	
Figure IV. 12	Couple PI-FLOU	76	

Listes des tableaux et des figures

Figure IV. 13 Tension Vdc PI-FLOU	77
Figure IV. 14 Puissance active PI-FLOU	77
Figure IV. 15 Puissance réactive PI-FLOU	77
Figure IV. 16 Courant Idg PI-FLOU	78
Figure IV. 17 Courant Iqg / PI-FLOU	78
Figure IV. 18 Entrées et sorties du contrôleur flou adaptatif à trois ensembles.....	79
Figure IV. 19 Courbe de Vitesse / PI adaptatif à trois ensembles.....	80
Figure IV. 20 Puissance turbine / PI adaptatif à trois ensembles.....	81
Figure IV. 21 courbe de Lambda / PI adaptatif à trois ensembles	81
Figure IV. 22 courbe de Cp / PI adaptatif à trois ensembles.....	81
Figure IV. 23 courant Isabc / PI adaptatif à trois ensembles.....	82
Figure IV. 24 le courant Isq / PI adaptatif à trois ensembles	82
Figure IV. 25 couple / PI adaptatif à trois ensembles	82
Figure IV. 26 tension Vdc / PI adaptatif à trois ensembles.....	83
Figure IV. 27 courant Iqg.....	83
Figure IV. 28 Puissance réactive / PI adaptatif à trois ensembles.....	83
Figure IV. 29 Schéma bloc Simulink de contrôleur flou adaptatif à sept ensembles.....	84
Figure IV. 30 Entrées et sorties du contrôleur flou adaptatif à sept ensembles	85
Figure IV. 31 vitesse Isq / PI adaptatif à sept ensembles	86
Figure IV. 32 puissance de la turbine / PI adaptatif à sept ensembles	86
Figure IV. 33 Courbe de lambda / PI adaptatif à sept ensembles.....	87
Figure IV. 34 courant Isabc / PI adaptatif à sept ensembles	87
Figure IV. 35 courant isd / PI adaptatif à sept ensembles	88
Figure IV. 36 courant Isq/ PI adaptatif à sept ensembles.....	88
Figure IV. 37 tension Vdc / PI adaptatif à sept ensembles.....	88
Figure IV. 38 puissance / PI adaptatif à sept ensembles	89
Figure IV. 39 puissance réactive / PI adaptatif à sept ensembles.....	89
Figure IV. 40 courant Idq / PI adaptatif à sept ensembles	89
Figure IV. 41 courant Iqg / PI adaptatif à sept ensembles	90
Figure IV. 42 Schéma bloc Simulink de contrôleur flou type2.....	90
Figure IV. 43 Entrées et sortie du contrôleur flou type 2 proposé	91
Figure IV. 44 Vitesse / contrôleur flou type 2 proposé.....	92
Figure IV. 45 courbe de lambda / contrôleur flou type 2 proposé	92
Figure IV. 46 courant Isabc / contrôleur flou type 2 proposé	93
Figure IV. 47 Courant Isd / contrôleur flou type 2 proposé.....	93
Figure IV. 48 courant Isq/ contrôleur flou type 2 proposé.....	93
Figure IV. 49 couple / contrôleur flou type 2 proposé.....	93
Figure IV. 50 puissance active / contrôleur flou type 2 proposé.....	94
Figure IV. 51 courant Idg / contrôleur flou type 2 proposé	94
Figure IV. 52 courant Iqg/ contrôleur flou type 2 proposé	94
Figure IV. 53 Comparaison de la vitesse	95

Introduction générale...	1
Chapitre I	Généralités sur les Eoliennes
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition d'une éolienne.....	3
I.3. Historique.....	3
I.4. Production L'énergie Éolienne	4
I.4.1. Production dans le monde	4
I.4.2. Production dans l'Algérie	5
I.5. Avantages et inconvénients.....	6
I.5.1. Avantages.....	6
I.5.2. Inconvénients	7
I.6. Principe de Fonctionnement.....	7
I.7. Principaux composants de l'éolienne.....	8
I.7.1. Le mât (tour)	8
I.7.2. Le rotor.....	8
I.7.3. La nacelle	9
I.7.4. Le multiplicateur	9
I.7.5. La génératrice.....	9
I.7.6. Le système de refroidissement.....	9
I.7.7. Le système de commande	9
I.7.8. Système d'orientation des pales.....	9
I.8. Différents types d'aérogénérateurs	9
I.8.1. Les éoliennes à axe horizontal	9
I.8.1.1. Avantages.....	10
I.8.1.2. Inconvénients	10
I.8.2. Éoliennes à axe vertical.....	11
I.8.2.1. Le rotor Savonius	11
I.8.2.2. Le rotor de Darrieus	12
I.8.2.3. Avantages.....	12
I.8.2.4. Inconvénients	13
I.9. Fonctionnement d'une Pale d'éolienne.....	13
I.10. Classification des éoliennes selon leur vitesse.....	13
I.10.1. Éoliennes à vitesse fixe	14
I.10.1.1. Avantages.....	14
I.10.1.2. Inconvénients	14
I.10.2. Éoliennes à vitesse variable	14
I.11. Machines utilisée dans le système éolien (vitesse variables).....	15
I.11.1. Machine asynchrone à double alimentation.....	15
I.11.2. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone	16
I.11.3. Générateur asynchrone à Cage d'Écureuil.....	16
I.11.4. Générateur asynchrone à double stator	17

I.12. Zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	18
I.13. Système de régulation de vitesse	19
I.13.1. Système de décrochage aérodynamique (Stall - control).....	19
I.13.2. Système d'orientation des pales (pitch contrôle)	19
I.14. Synthèse des différents types d'éoliennes.....	20
I.15. Conclusion	21
II.1. Introduction.....	22
II.2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.....	22
II.2.1. La partie aérodynamique (Le vent)	22
II.2.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	23
II.2.2.1. Modèle de l'arbre	26
II.3. Stratégie de commande de la turbine éolienne	27
II.3.1. Principe de la MPPT (Maximum Power Point Tracking)	27
II.3.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	27
II.4. Modélisation de la (GSAP).....	29
II.4.1. Equations électriques	30
II.4.2. Passage au repère de Park.....	31
II.4.3. Modèle de la GSAP dans le repère de Park.....	32
II.5. Stratégie de commande de la MSAP	34
II.6. Découplage	35
II.7. Modélisation des convertisseurs statiques :	36
II.7.1. Redresseur MLI	36
II.7.2. Modélisation d'un onduleur triphasé.....	38
II.8. Contrôle de la connexion au réseau électrique.....	41
II.8.1. Modélisation du bus continu.....	41
II.8.2. Modélisation du filtre	43
II.8.3. Modélisation du filtre dans le repère de Park.....	44
II.9. Contrôle de la puissance active et réactive	44
II.10. Modèle du réseau électrique	45
II.11. Résultats de simulations.....	47
II.12. Conclusion	54
III.1. Introduction.....	55
III.2. Historique.....	56
III.3. Domaines d'application	56
III.4. Avantages et inconvénients.....	57
III.4.1. Avantages.....	57

III.4.2.	Inconvénients	57
III.5.	Principe de la logique floue.....	57
III.6.	Théorie des ensembles flous	58
III.6.1.	Ensemble flou	58
III.6.2.	Opérations sur les ensembles flous.....	58
III.6.3.	Univers de discours	59
III.6.4.	Fonction d'appartenance.....	59
III.6.5.	Variable linguistique.....	60
III.7.	Systèmes flous	60
III.7.1.	Interface de fuzzification	61
III.7.2.	Base de règles.....	61
III.7.3.	L'inférence.....	61
III.7.4.	Interface de défuzzification.....	62
III.8.	Commande floue	62
III.8.1.	Structure d'un système de commande floue.....	63
III.8.2.	Synthèse des régulateurs flous	64
III.8.3.	Structure de base d'un contrôleur flou de vitesse	64
III.8.4.	Contrôleur PI-flou de vitesse.....	64
III.8.5.	Contrôle flou adaptatif	65
III.8.6.	Description du régulateur flou adaptatif utilisé	65
III.9.	Concept des ensembles flous de type-2	66
III.9.1.	Systèmes et contrôleurs flous type-2.....	66
III.9.1.1.	L'interface de fuzzification.....	67
III.9.1.2.	Base de règles	67
III.9.1.3.	Inférence	67
III.9.1.4.	Défuzzification.....	67
III.9.1.5.	Réduction de type	68
III.10.	Conclusion	68
IV.1.	Introduction.....	69
IV.2.	Contrôleur PI-flou de vitesse	69
IV.2.1.	Contrôleur PI-flou à trois ensembles	69
IV.2.2.	Contrôleur PI-flou à cinq ensembles.....	71
IV.2.3.	Contrôleur Pi-flou à sept ensembles	72
IV.2.4.	Résultat de simulation.....	74
IV.3.	Contrôleur flou adaptatif à trois ensembles	79
IV.3.1.	Résultat de simulation.....	80
IV.4.	Contrôleur flou adaptatif à sept ensembles	84
IV.4.1.	Résultats de simulation	86
IV.5.	Contrôleur flou type 2	90

Sommaire

IV.5.1.	Résultat de simulations	91
IV.6.	Étude comparative	95
IV.7.	Conclusion	95
Conclusion générale		97
Annexes.....		99
Références Bibliographiques.....		108.

Introduction générale

L'énergie éolienne est l'une des ressources d'énergie renouvelable les plus prometteuses pour la production d'électricité en raison de sa compétitivité des coûts par rapport à d'autres types conventionnels de ressources énergétiques. Il s'agit d'une place particulière pour être les ressources d'énergie renouvelable les plus appropriées pour la production d'électricité. Il n'est pas nocif pour l'environnement et c'est une ressource abondante disponible dans la nature.

En effet, l'accès à l'électricité, garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation) et c'est un facteur essentiel pour le développement économique. La production de l'électricité a grandi par le temps face à la croissance démographique et les besoins planétaires considérables en énergie électrique (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique... etc.). On peut dire que l'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer. Sont peu ou pas polluantes. Économique et social. [22]

Au cours des dernières années, l'énergie éolienne a été considérée comme une principale ressource énergétique vis-à-vis de son respect pour l'environnement et en raison de sa préoccupation sociale et géopolitique.

L'utilisation du contrôle basé sur les techniques dites intelligentes constitue axe de recherche proposant une solution très prometteuse pour exploiter au mieux cette forme d'énergie

L'objectif principal de ce travail est la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une GSAP et par la suite l'application du contrôle classique pour ajouter le contrôle flou avec différentes structures

La démarche suivie pour la réalisation de ce travail et comme suit

L'étude théorique afin de situer par rapport à ce domaine

La modélisation mathématique sur la base d'hypothèses et de formules proposées par la théorie

La validation par simulation de ces modèles à l'aide des logiciels Matlab-Simulink et Simpower System pour vérifier les allures et les comparer à ce qui a été donné par la théorie

L'application des algorithmes de commande pour comparer les performances obtenues

Dans le premier chapitre des généralités sur les systèmes éoliens sont présentées, les avantages, les inconvénients, La constitution et les différents types d'éoliennes seront cités. Leurs différentes structures, leur fonctionnement seront également abordés. Ensuite, on parle sur les différentes machines utilisées et pourquoi on choisit la GSAP.

Le deuxième chapitre nous allons étudier la modélisation mathématique du système de conversion d'énergie éolienne connectée au réseau, le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillée. Nous allons ensuite passer à la turbine éolienne sur laquelle est basée notre étude en décrivant l'application de l'algorithme de MPPT et son contrôle dans le but d'extraire le maximum de puissance de la génératrice. Nous allons aussi donner le modèle de la (GSAP) en fonctionnement générateur. Un contrôle vectoriel de cette dernière utilisant un contrôleur conventionnel PI à travers un convertisseur MLI sera réalisé. Et nous avons pu injecter la puissance électrique, extraite au réseau via un onduleur de tension triphasé, en régulant la tension du bus continu.

Dans le troisième chapitre donne un aperçu général sur la théorie de la logique floue, l'historique, domaines d'application. Les bases mathématiques de cette technique en particulier les systèmes flous leurs différentes parties et les opérations feront l'objet d'une grande partie de ce chapitre.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'application de commande floue dite intelligente de vitesse de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent par un régulateur PI flou, PI flou adaptatif et pi flou type2,

Des résultats de simulation seront aussi présentés et une comparaison entre le régulateur PI, PI flou PI flou adaptatif et aussi flou type 2, sera effectuée pour montrer l'amélioration du comportement dynamique de la vitesse de la GSAP.

Une conclusion générale est présentée pour faire la synthèse des résultats obtenus et dégager des perspectives.

CHAPITRE I

Généralités Sur Les
Éoliennes

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter à cause de leur nature inépuisable, contrairement au gaz naturel et au le pétrole, dont les réserves sont limitées. Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponible en quantité illimitée, parmi ces énergies on s'intéresse particulier à l'énergie éolienne.

L'exploitation de ce type d'énergie est basée sur l'utilisation d'un mécanisme de conversion qui comporte une éolienne .une turbine et un type de machines électriques utilisant la force motrice du vent. Cette force peut être utilisée mécaniquement (dans le cas d'une éolienne de pompage).ou par produire de l'électricité (dans le cas d'un aérogénérateur). Les éoliennes peuvent être installées en terre ou mer. [1][2]

Ce chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens ; les différents types de machines ainsi que leur principe de fonctionnement.

I.2. Définition d'une éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, gratuit non dégradée qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. Les éléments de base sont :

- L'hélice qui transforme le vent en énergie mécanique.
- La génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Une liaison électrique au réseau. [5]

I.3. Historique

L'énergie éolienne est la forme principale de production d'énergie électrique renouvelable. Le mot « éolien » dérive du mot grec « Eeolos » qui représente le dieu du vent ou encore « inconstant » et « vif ».[4]

Le vent a été la première source d'énergie renouvelable exploitée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins de blé et les constructions permettant le pompage d'eau.[8]. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J-C environ Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J-C.[16]

Historiquement, on note que c'est en 1888 qu'un certain Charles F. Brush construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est mise au point par le Danois Poul Lacour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. [17]

Dans les années suivantes, le nombre de moulins en Angleterre était de 10.000 quand la révolution industrielle a explosé mais les moulins ont été bientôt éteints lorsque la machine à vapeur est apparue. Les éoliennes ont atteint aux Etats-Unis en 1850 mais n'ont été exploitées que 100 ans plus tard.

Après la deuxième guerre mondiale, l'éolienne a subi plusieurs développements. En 1956, Johannes Juul va construire la première à produire du courant alternatif de 200 KW, puis Darrieus fit bâtir la première éolienne à axe verticale.

Les chercheurs sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vent trop violent.[8]

I.4. Production L'énergie Éolienne

I.4.1. Production dans le monde

Au niveau mondial, près de 51,3 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées en 2018 (plus de 91% d'installations terrestres) selon les dernières données du Global Wind Energy Council (GWEC). Le volume de ces nouvelles installations est inférieur de 3,6% à celui de 2017 mais GWEC souligne l'émergence de nouveaux marchés comme l'Amérique latine, l'Asie du Sud-Est et l'Afrique (avec toutefois seulement 10% des capacités installées en 2018).

En 2018, la Chine a compté à elle seule pour près de 45% des nouvelles installations éoliennes dans le monde (+ 23 GW), très loin devant les États-Unis (+ 7,6 GW) et les pays européens. Signalons que l'empire du Milieu est également en tête des installations d'éoliennes offshore (+ 1,8 GW en 2018) alors que ce marché s'est historiquement développé dans les eaux européennes.

Au total, la puissance du parc éolien mondial a atteint 591 GW à fin 2018 selon GWEC qui n'a pas encore communiqué ses données sur les productions associées (1 096 TWh en 2017 selon les dernières données de l'AIE). Les installations de nouvelles éoliennes pourraient dépasser 55 GW par an d'ici à 2023. Il est en particulier attendu « *une énorme croissance en Asie* » (Asie du

Sud-est en particulier), celle-ci étant toutefois conditionnée en partie au politiques de soutien public mises en œuvre dans cette région. [25]

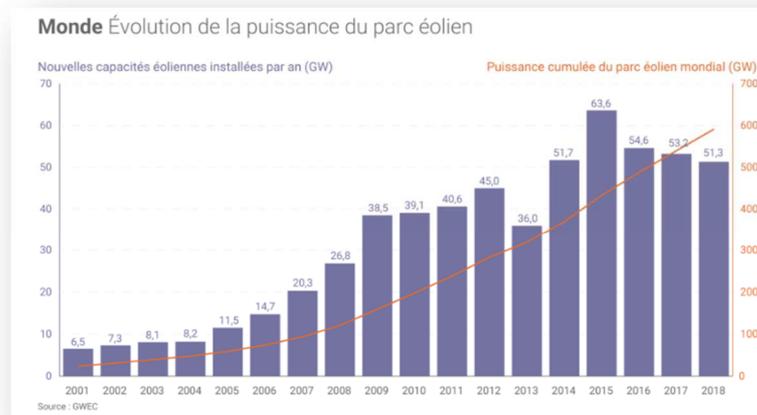


Figure I. 1 Développement de l'éolien au niveau mondial

I.4.2. Production dans l'Algérie

En Algérie, la ressource éolienne diffère considérablement d'un endroit à l'autre. Cela est principalement dû à la diversité du terrain et du climat. La zone géographique de l'Algérie est divisée en deux grandes zones distinctes. Le nord de la Méditerranée, qui comprend le littoral et le relief de 1200 km, est représenté dans deux chaînes de montagnes principales : l'Atlas de Tellien et l'Atlas du Désert. Entre eux, les plaines et les hauts plateaux du climat continental se croisent. Le Sud, cependant, est caractérisé par un climat désertique. Le sud de l'Algérie est caractérisé par des vents plus forts du nord, en particulier du côté sud-ouest, où la vitesse est supérieure à 4 m/sec et dépasse 6 m/sec dans une zone de dégâts. Pour le nord, la vitesse moyenne est généralement faible. Cependant, il y a de petits climats dans les sites côtiers d'Oran, De Béjaïa et d'Annaba, dans les hauteurs de Tiaret et d'al-Khair, et dans la zone bordée par Béjaïa au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'il ne faut pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures I-2 (Été, Printemps, Hiver et Automne). On remarque en général, que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année. [22]

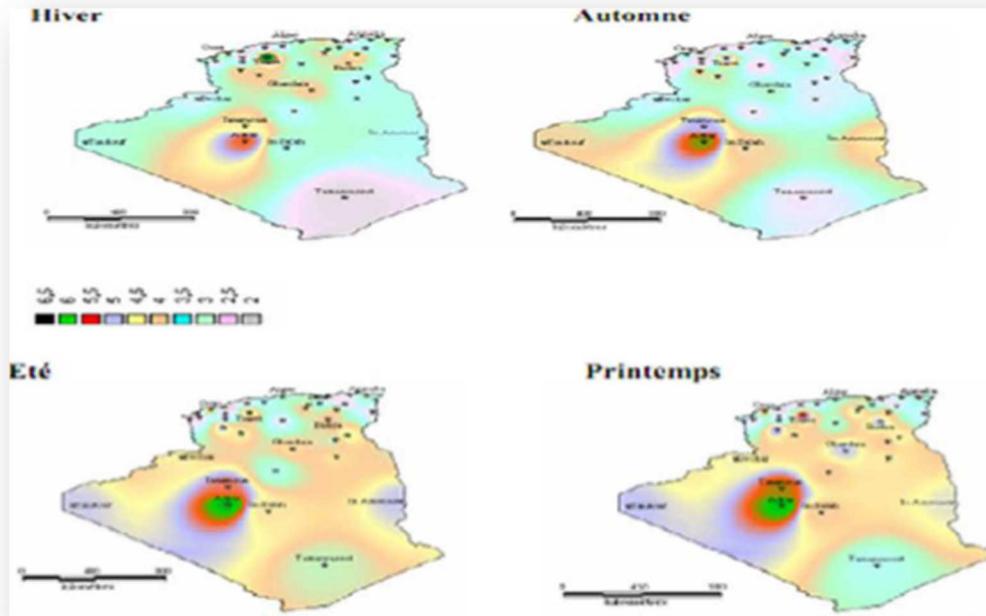


Figure I. 2 Vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol en Algérie

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (Sud-ouest), a été confiée le 21/01/2010 au groupe Français **VERGNET**. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz (CEEG), filiale du Groupe SONELGAZ [12].

I.5. Avantages et inconvénients

I.5.1. Avantages

- L'énergie éolienne respecte l'environnement, elle est propre et ne produit pas de déchets toxiques
- Énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant,
- Elle peut être reliée au réseau électrique pour fonctionner de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou une batterie couplée à un onduleur électrique pour produire du courant continu ou alternatif,
- Cette source d'énergie gratuite est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.[3].[4]

Et enfin cette énergie est simple à intégrer dans un système électrique déjà existant.

I.5.2. Inconvénients

- Le bruit aérodynamique. Le freinage du vent et son passage autour des pales engendrent un son caractéristique, comme un souffle,
- L'énergie éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïque,
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, et de la météo,
- Le cout de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés,
- L'impact visuel qui dérange l'environnement,
- La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constantes. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. [4][9][10]

I.6. Principe de Fonctionnement

Un autre nom pour une turbine éolienne est un "aérogénérateur", c'est-à-dire un générateur d'électricité par l'air. La fonction de celui-ci est donc d'extraire de l'énergie à partir d'un écoulement d'air (vent). En présence des formes adaptées des pales, une poussée dans la direction du vent, ainsi qu'un couple entraînant la rotation, seront générés sur le rotor. Le mouvement du rotor entraînera celle de l'arbre lent dans la nacelle pour ensuite produire de l'électricité. L'électricité est transportée au réseau électrique après un raccordement avec des câbles qui lient des machines à un poste de livraison à proximité. [6]

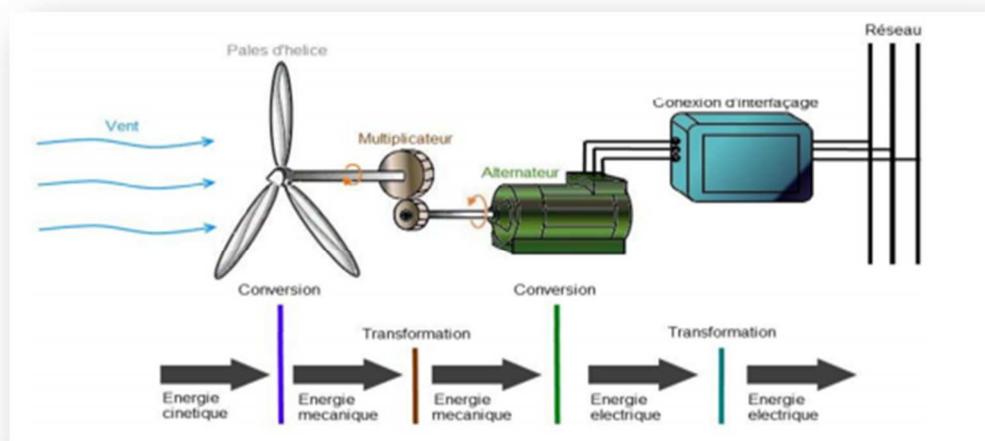


Figure I. 3 Structure générale d'un système de conversion éolienne

I.7. Principaux composants de l'éolienne

La production de l'énergie éolienne repose sur la structure en trois parties de l'éolienne.[7]

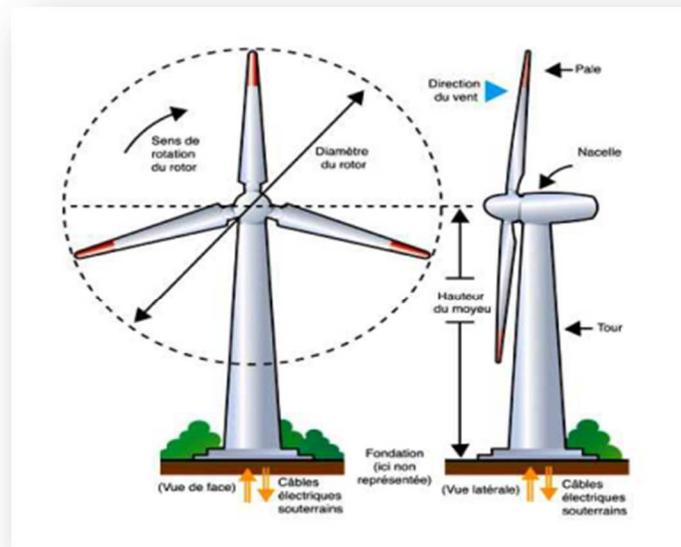


Figure I. 4 Schéma des différentes parties d'une éolienne

I.7.1. Le mât (tour)

C'est un tube d'acier Solidement implanté dans le sol. Il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent, et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol. [7]

Il existe trois grands types de mât (tour):

- **Mât haubané** : il est simple de construction mais utilisé essentiellement dans les machines de faibles puissances.
- **Tour en treillis** : il est aussi de construction simple et favorisé pour les machines de grandes tailles.
- **Tour tubulaire**: sa construction est complexe car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande.[9]

I.7.2. Le rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, formé par les pales assemblés dans leur moyeu. Il est branchée directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique) [11]

I.7.3. La nacelle

Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [1]

- Dans la nacelle on trouve les éléments suivants :

I.7.4. Le multiplicateur

Sert à adapter la vitesse de la turbine à celle des générateurs électriques. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionnée en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.[12]

I.7.5. La génératrice

C'est un alternateur qui convertit mécanique en énergie électrique. La puissance de cette génératrice peut varier entre quelque KW à 10 MW.[4]

I.7.6. Le système de refroidissement

Il se compose en général d'un ventilateur électrique pour la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

I.7.7. Le système de commande

Permet de contrôler et d'assurer le bon fonctionnement de l'éolienne. Grâce à ce système de supervision et de contrôle, l'éolienne peut être arrêtée automatiquement en cas de défaut. La sécurité de l'éolienne est assurée en continu.[7]

I.7.8. Système d'orientation des pales

Système mécanique qui permet l'orientation de l'éolienne selon le sens du vent. [13]

I.8. Différents types d'aérogénérateurs

Il existe deux types à axe horizontal et à axe vertical

I.8.1. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Les éoliennes à axe horizontal sont plus utilisées celles à axe vertical car elles sont moins exposées aux contraintes mécanique et ont un coût moins important. Elles peuvent être installées face au vent, cette configuration nécessite un système d'orientation de l'éolienne dans le vent. [7]

Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides. Le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable. [14]

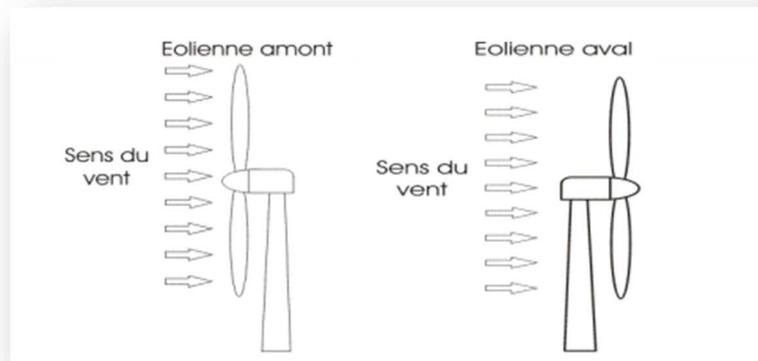


Figure I. 5 Types d'éolienne à axe horizontal (éolienne amont – éolienne aval)



Figure I. 6 Éolienne à axe horizontal

I.8.1.1. Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport à l'éolienne à axe vertical
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage. [18]

I.8.1.2. Inconvénients

- En cas de dysfonctionnement, cette interférence est difficile à cause de l'équipement situé au sommet de la tour,
- Le cout est très élevé,
- Elles font beaucoup de bruit [8]

Tous les points d'une même pale n'ont donc pas la même vitesse tangentielle. Comme le vent relatif est une combinaison de la vitesse tangentielle et de la vitesse du vent, chaque section de la pale, selon sa distance du centre de rotation, ne « voit » pas le même vent relatif. Chaque section de la pale ayant un vent relatif différent, il faut que l'angle d'attaque soit lui aussi différent si l'on souhaite avoir la portance maximale dans chaque section. Afin de remplir cette condition, la pale est vrillée ou possède un gauchissement géométrique. Dans bien des cas, les pales des éoliennes de petite puissance, moins de 5 kW, ne possèdent pas de gauchissement géométrique. L'angle d'attaque est donc optimal pour une partie seulement de la pale. Des raisons de simplicité de fabrication et de coût peuvent expliquer ce choix. [17]

I.8.2. Éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter un système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage. Le mat souvent très lourd subit des fortes contraintes mécaniques, ce qui pousse les constructeurs à abandonner ces aérogénérateurs. [19]

Dans ce type d'éolienne on distingue :

I.8.2.1. Le rotor Savonius

Ce rotor a été inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924. Il est constitué de deux sections semi-circulaires cylindriques formant approximativement une forme de la lettre « S ». [15] 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 augmentent le couple moteur. [11]

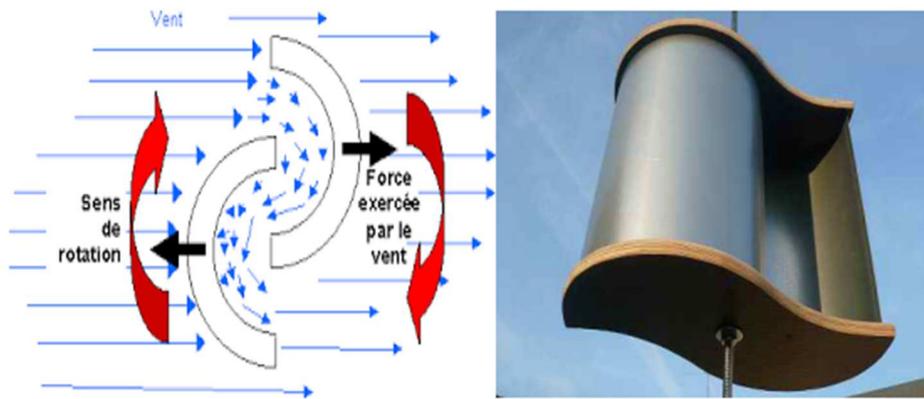


Figure I. 7 Principe de rotor de Savonius.

I.8.2.2. Le rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateurs est basée sur le fait qu'un profile placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.[20]



Figure I. 8 Eolienne de Darrieus

I.8.2.3. Avantages

- Permet de placer la génératrice et le multiplicateur à terre (il n'y pas besoin de munir la machine d'une tour),
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent,

I.8.2.4. Inconvénients

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol. Pour certaines VAWT (éolienne à axe verticale), il est nécessaire d'avoir un dispositif auxiliaire de démarrage,
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante,
- Utilisent la poussée (drag) plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et du rendement. [4]

I.9. Fonctionnement d'une Pale d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

La (Fig. 1-9) décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée

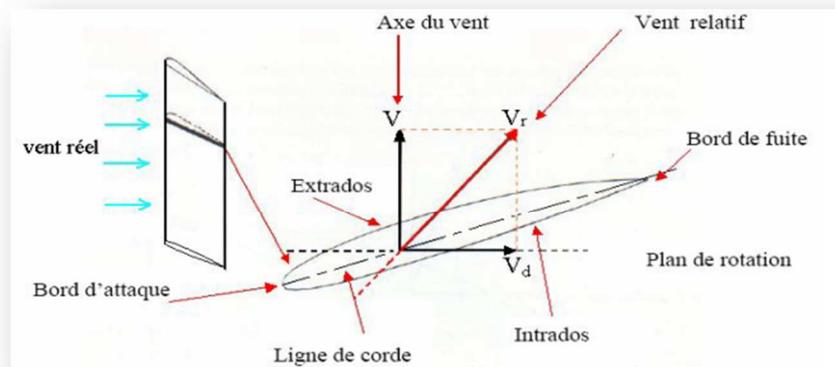


Figure I. 9 Description d'une pale d'éolienne

I.10. Classification des éoliennes selon leur vitesse

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écurieul et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

I.10.1. Éoliennes à vitesse fixe

Elles sont les premières à être développées. Dans ce type d'éolienne, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique dépend de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice.

I.10.1.1. Avantages

- Système électrique simple.
- Grande fiabilité.
- Prix modéré

I.10.1.2. Inconvénients

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée,
- Absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La Connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée.[4]

I.10.2. Éoliennes à vitesse variable

Est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.[18]

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.

- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.[21]

I.11. Machines utilisées dans le système éolien (vitesse variables)

I.11.1. Machine asynchrone à double alimentation

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. [21] C'est une configuration en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes. La figure(I.10) illustre le schéma de principe de ce type de machine, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable

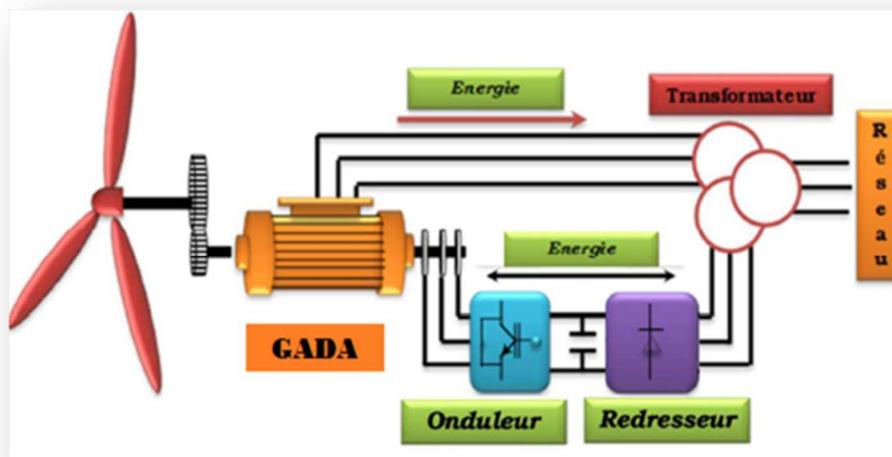


Figure I. 10Génératrice Asynchrone à Double Alimentation GADA a vitesse variable.

La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences, mécanique et électrique, par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor. [22]

I.11.2. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

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 1. 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.[3]

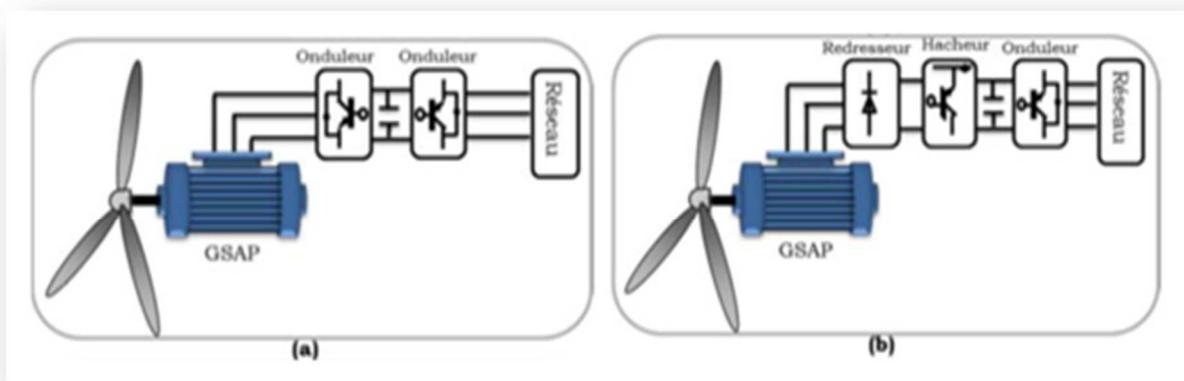


Figure I. 11Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

I.11.3. Générateur asynchrone à Cage d'Écureuil

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 KW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant « au fil du vent ». Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou

à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.[12]

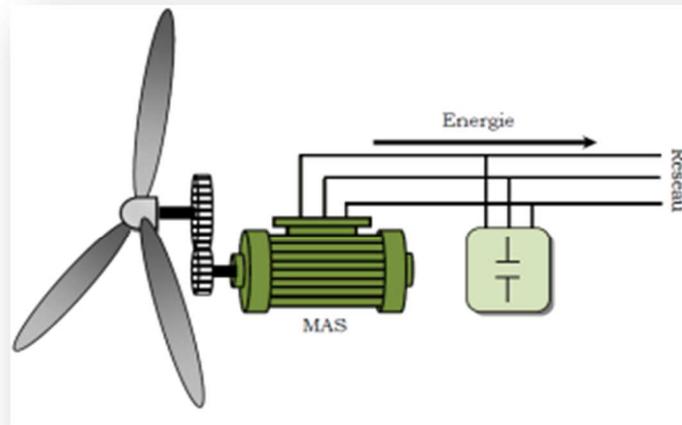


Figure I. 12 Générateur asynchrone à cage d'écureuil.

I.11.4. Générateur asynchrone à double stator

Cas deux enroulements statoriques, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend la sa conception difficile ainsi que son coût de revient est trop important. [12]

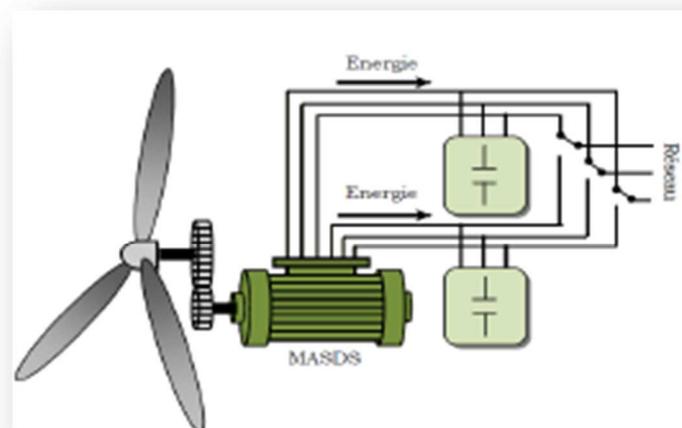


Figure I. 13 Générateur asynchrone à double stator.

I.12. Zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance P_n (puissance nominale). Cette dernière est obtenue à partir d'une vitesse du vent ω_n , (vitesse nominale). Lorsque la vitesse du vent est supérieure à ω_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbine, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale de l'éolienne. [23].

La caractéristique puissance vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre (4) zones présentes dans la figure I.11

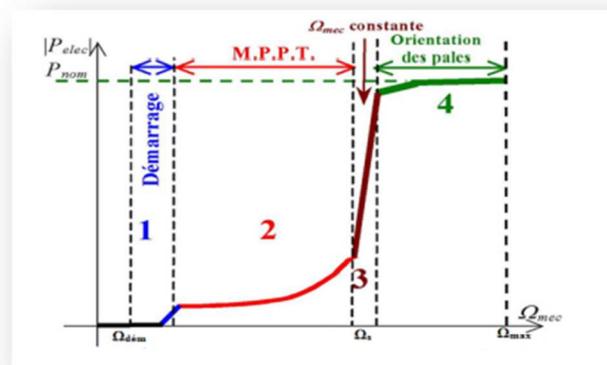


Figure I. 14 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne.

Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse de démarrages Ω_{dem} . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).

Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettent l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur nominale afin d'obtenir un C_p maximale. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. Au-delà de la vitesse Ω_{max} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

I.13. Système de régulation de vitesse

Les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leurs performances à une certaine vitesse devient V_n . En cas de vitesse devient supérieur à V_n , il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance. Il y'a deux manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance extraite à sa valeur nominale [24].

I.13.1. Système de décrochage aérodynamique (Stall - control)

Consiste à concevoir la géométrie de la pale de façon à mettre à profit, en cas de vitesses devient trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant une turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent (figure I.13), ce qui empêche la portant ce d'agir sur le rotor. Ce système est utilisé généralement dans les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances [24].



Figure I. 15 Système de décrochage aérodynamique.

Le système de régulation par décrochage aérodynamique a l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor. L'inconvénient est qu'un et elle régulation possède grands défis à la conception aérodynamique des pales afin d'éviter l'apparition de vibrations par décrochage [24].

I.13.2. Système d'orientation des pales (pitch contrôle)

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage (Le calage des pales est commandé par un vérin hydraulique alimenté par une centrale hydraulique) qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité. [18](Figure I-16).

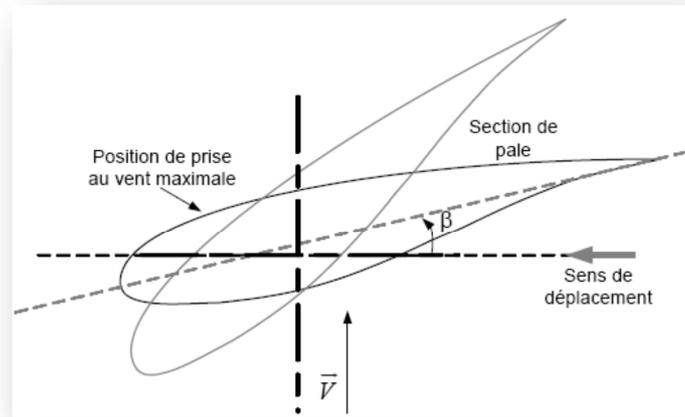


Figure I. 16 Variation de l'angle de calage d'une pale.

I.14. Synthèse des différents types d'éoliennes

Nous résumons les avantages et les inconvénients de chaque type dans le tableau. I.let nous rappelons que cette étude est pour les éoliennes à vitesse variable. [5]

Tableau I.1 1 Comparaison des différentes éoliennes utilisées

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Machine robuste ▪ Faible coût ▪ Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puissance extraite non optimisée ▪ Maintenance boîte de vitesse ▪ Pas de contrôle de l'énergie réactive ▪ Magnétisation de la machine imposée par le réseau
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à vitesse variable ▪ Puissance extraite optimisée ▪ Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ▪ Machine standard ▪ connexion de la machine plus facile à gérer ▪ Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maintenance boîte de vitesse ▪ Prix de l'électronique de puissance. ▪ Contrôle – commande complexe ▪ Contact glissant bagues - balais
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse ▪ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. ▪ Connexion de la machine facile à gérer ▪ Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prix de l'électronique de puissance ▪ Machine spécifique ▪ Grand diamètre de machine ▪ Électronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

I.15. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Un historique a été donné pour mettre en évidence que l'utilisation de ce type d'énergie éolienne a été présente depuis longtemps, suivi par une présentation théorique de la conversion mécanique de l'énergie éolienne. Le contenu de cette étude permet de classer les éoliennes en deux grandes familles d'éoliennes, à savoir celles à axe horizontal et celles à axe vertical. Les avantages et les inconvénients de chaque type d'éolienne sont également présentés. Un tableau récapitulatif a été dressé pour comparer les différents types d'éoliennes en fonction des machines utilisées dans la chaîne de conversion.

Après avoir présenté la chaîne de conversion éolienne nous allons passer à l'étude et à la modélisation d'une chaîne basée sur la GSAP à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement.

Chapitre II

*Modélisation et commande
de la chaîne de conversion
d'énergie éolienne*

II.1. Introduction

La modélisation est une étape indispensable pour la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne. Les équations obtenues sont utilisées pour la simulation de système complet. Les éléments les plus importants dans la chaîne de conversion éolienne sont la turbine et la génératrice, On utilise la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) à pôles lisses grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques, en particulier sa robustesse et la facilité de son entretien.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

- La modélisation de la chaîne de conversion éolienne à savoir la turbine éolienne, la GSAP, les convertisseurs statiques ainsi que le réseau électrique,
- La commande vectorielle appliquée à la GSAP avec l'association des convertisseurs statiques : l'onduleur et redresseur afin d'obtenir la forme souhaité de l'énergie électrique.

II.2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La chaîne de conversion éolienne est composée des parties suivantes :

- La turbine,
- Le multiplicateur,
- Le générateur.

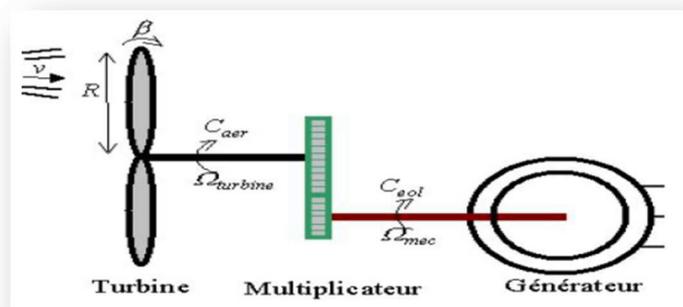


Figure II. 1 Configuration d'une éolienne. [24]

II.2.1. La partie aérodynamique (Le vent)

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacements de masses d'air caractérisé par une vitesse et une direction, qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour. [24]

Donc le vent est une variable importante à modéliser parce que la précision de simulation dépend de la qualité de modèle de vent.

Dans notre cas, La vitesse du vent sera modélisée par la somme de plusieurs harmoniques (série de fourrier) par les équations ci-dessous :

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t)) \quad (\text{II.1})$$

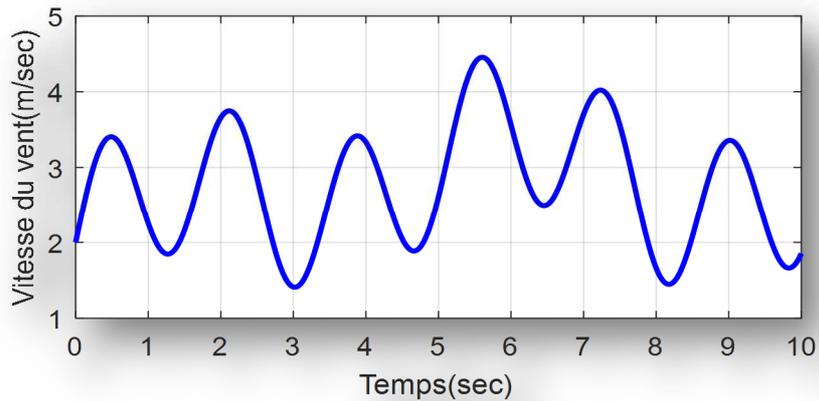


Figure II. 2 Simulation du profil de la vitesse de vent.

II.2.2. Modélisation de la turbine éolienne

On suppose, que le système mécanique est représenté par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques, on obtient le modèle suivant :

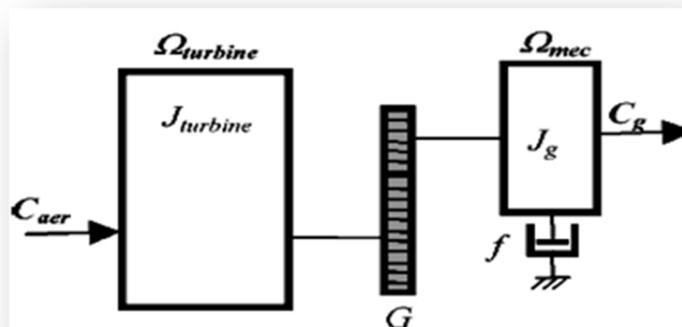


Figure II. 3 Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne. [24]

La relation entre la puissance mécanique et la puissance du vent est donné par cette équation :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{II.2})$$

Avec ρ : masse volumique de l'air dans les conditions normale de température et la pression.

L'expression d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent est expliquée par la théorie de Betz (rappelé dans l'annexe B), donc l'expression de la puissance de l'éolienne ($P_{turbine}$) est donnée par :

$$P_{turbine} = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.3)$$

Le coefficient de puissance : C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Chaque turbine à un comportement spécifique, pour cela, on retrouve plusieurs types de modélisation du C_p dont la limite théorique (limite de Betz) est exprimée par l'équation suivante :

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (II.4)$$

La variation de C_p , est en fonction du rapport de vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β .

Le rapport de vitesse λ est défini comme un rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse vent. [26] [27]

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V} \quad (II.5)$$

Avec R est le rayon de l'aéroturbine.

Dans notre cas, le C_p est représenté par la formule suivante :

$$c_p = f(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4 e^{-\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6 \lambda_i \right) \quad (II.6)$$

Le paramètre λ_i dépend de λ et β

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.7})$$

Les six coefficients définis $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ dépendent de la turbine considérée, leur valeur sont données en Annexe A.

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

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.8})$$

II.2.2.1 Modèle du Multiplicateur

La fonction du multiplicateur de vitesse, située entre la turbine éolienne et la génératrice, est de transformer la valeur de la vitesse mécanique de la turbine au niveau de la génératrice et permet d'avoir un couple du multiplicateur à partir du couple aérodynamique.

Le multiplicateur contient deux arbres tournants, un arbre tourne à une vitesse $\Omega_{turbine}$ et un arbre rapide tourne avec une vitesse Ω_{mec} . [27]

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aer} \quad (\text{II.9})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{1}{G} \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.10})$$

G est le rapport de multiplicateur

Ω_{mec} : c'est la vitesse mécanique de la génératrice en rad/sec

C_g : c'est le couple de la génératrice

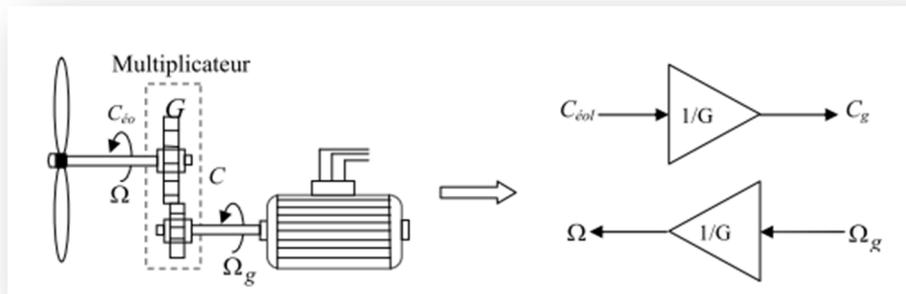


Figure II. 4 Schéma bloc de multiplicateur. [45]

II.2.2.1. Modèle de l'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et de la génératrice est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f \Omega_{mec} - C_{em} \quad (II.11)$$

Avec J : inertie totale des parties tournantes en (Kg.m²)

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.12)$$

Et

F : coefficient de frottement visqueux

$$F = \frac{F_{turbine}}{G^2} + F_g \quad (II.13)$$

C_T : $C_{em} + C_{mec}$ Couple totale de l'éolienne en (N.m)

C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m)

En fonctionnement génératrice le couple C_{em} a un signe négatif

Le schéma bloc suivant représente le modèle de la chaîne éolienne

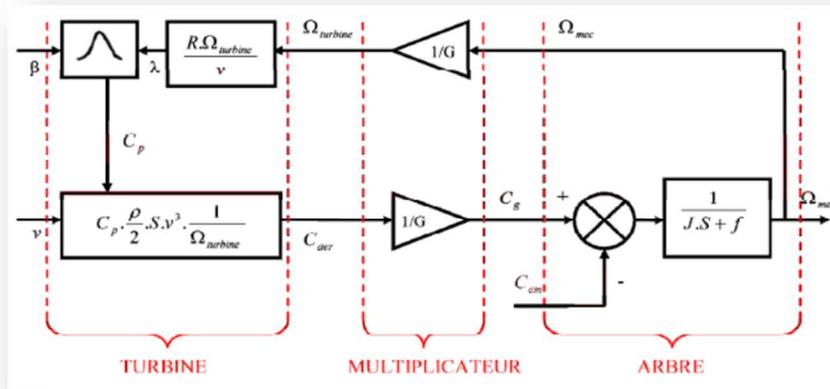


Figure II. 5 Schéma bloc du modèle de l'éolienne. [18]

II.3. Stratégie de commande de la turbine éolienne

II.3.1. Principe de la MPPT (Maximum Power Point Tracking)

L'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance.

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent.

La puissance captée par la turbine éolienne peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient de puissance C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice ou encore du rapport de vitesse λ .

Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale λ_{opt} , le coefficient de puissance prend sa valeur maximale $C_{pmax}=C_p(\lambda_{opt})$, ainsi que la puissance éolienne. [29][30]

$$\Omega_{turbine\ ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (II.14)$$

II.3.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em\ ref} \quad (II.15)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

La structure de commande consiste à régler le couple qui apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence

Le couple électromagnétique de référence $C_{em\ ref}$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par la relation suivante :

$$C_{em\ ref} = PI.(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.16)$$

PI : est le régulateur de vitesse ;

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine\ ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G(\Omega_{turbine\ ref}) \quad (II.17)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{Cp\ max}$ (à β constant et égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale de C_p . [27][38]

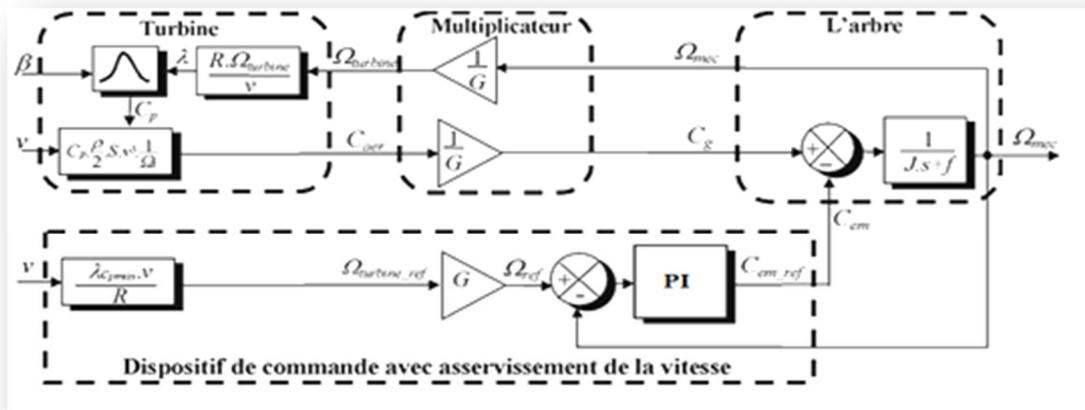


Figure II. 6 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

II.4. Modélisation de la (GSAP)

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types des machines électriques (performances, robustesse, ...), la machine synchrone à aimants permanents est un bon candidat pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne.

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents a fait l'objet de nombreux travaux. Le modèle le plus adéquat pour étudier le comportement dynamique de la machine et pour l'implémentation des lois de commande est inspiré des travaux. [36]

Le modèle analytique de la machine synchrone à aimants permanents peut être déduit en adoptant un ensemble d'hypothèses simplificatrices usuelles données dans la majorité des références qu'il est bon de rappeler :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique,
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator,
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau,
- L'effet d'encoche est négligeable,
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température. [24]

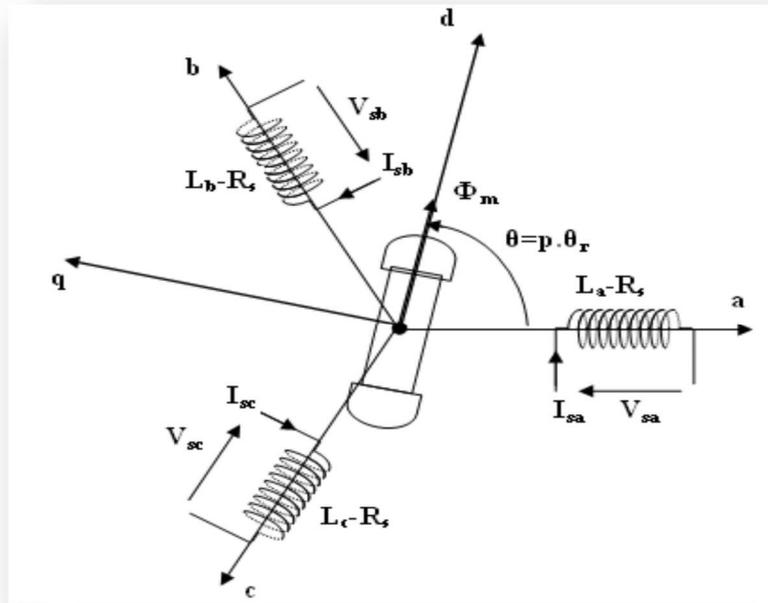


Figure II. 7 Représentation schématique de la GSAP dans l'espace électrique. [24]

II.4.1. Equations électriques

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

En désignant par :

Les équations (II.13) peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$[V_{s,abc}] = [R_s][I_{s,abc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s,abc}] \quad (\text{II.19})$$

Les flux totalisés Φ_s des phases statoriques s'écrivent dans le repère du stator sous la forme matricielle suivante :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\Phi_{sf}] \quad (\text{II.20})$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$[\Phi_{sf}] = [\Phi_{af} \quad \Phi_{bf} \quad \Phi_{cf}]^T \quad (II.22)$$

II.4.2. Passage au repère de Park

La transformation de Park est Appliquée aux variables réelles (courants, tensions et flux), cette transformation permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes (dq) ou les équations de Park. Du point de vue physique, cette transformation est interprétée comme étant une substitution des enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (dq) tournant avec le rotor. Cette transformation rend les équations dynamiques des machines à courant alternatif plus simples, ce qui facilite leur étude et leur analyse. [37]

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère.

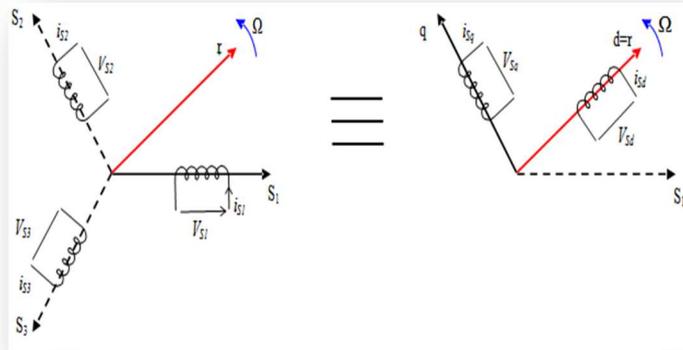


Figure II. 8 Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park. [24]

La transformation de Park ($P(\theta)$) est définie par la matrice suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

II.4.3. Modèle de la GSAP dans le repère de Park

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la (Figure II.8), le modèle de la MSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes:

Equations électriques

Les équations électriques de la GSAP convention moteur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \frac{d i_{ds}}{dt} - w_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_q \frac{d i_{qs}}{dt} + w_r \cdot L_d \cdot i_d + w_r \cdot \Phi_f \end{cases} \quad (II.25)$$

Pour la génératrice on inverse le sens des courants on a donc les équations électriques de la GSAP comme suit:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - L_d \frac{d i_{ds}}{dt} + w_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - L_q \frac{d i_{qs}}{dt} + w_r \cdot L_d \cdot i_d + w_r \cdot \Phi_f \end{cases} \quad (II.26)$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation.

Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (II.27)$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct Φ_{ds} et de quadrature Φ_{qs} sont fonction linéaire des courants (i_{ds} et i_{qs}) respectivement d'axe direct et de quadrature.

Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} P \frac{d w_e}{d \theta_r} \quad (II.28)$$

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (II.29)$$

En remplaçant V_{ds} et V_{qs} par leurs expressions on aura :

$\frac{3}{2} \cdot R_s (i_{ds}^2 - i_{qs}^2)$ Représente la puissance dissipée par effet Joule

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \right] \quad (II.30)$$

$\frac{3}{2} \cdot \left(i_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right)$ La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds})$: La puissance électromagnétique.

Sachant que : $P = C_{em} \cdot \Omega$ et $w = p \cdot \Omega$

Alors

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (II.31)$$

Et après l'affectation des valeurs de flux on aura :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + i_{qs} \cdot \Phi_f] \quad (II.32)$$

Equations mécaniques

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit:

$$C_m - C_{em} - f \cdot \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.33)$$

II.5. Stratégie de commande de la MSAP

Le principe de la commande vectorielle est d'obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu à excitation séparée, BLASCHKEET en 1972, elle est appelée aussi commande par orientation de flux FOC(Field Oriented Control),L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la MSAP à celui d'une MCC à excitation séparée, C'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique.

Habituellement, la composante d'axe 'd' du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur de flux dans la machine, le composante de l'axe 'q' joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple.

La stratégie de la commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant 'isd' a une valeur nulle, Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par linéarisation de la relation entre la couple et le courant.[30]

Donc on obtient $\Phi_d = \Phi_f$

L'expression de couple devient

$$C_{em} = 3/2 (P \cdot \Phi_f \cdot i_{sq}) \quad (II.34)$$

Comme le flux Φ_f est constant, le couple électromagnétique est proportionnel à 'isq' donc

$$C_{em} = K \cdot i_q \quad (II.35)$$

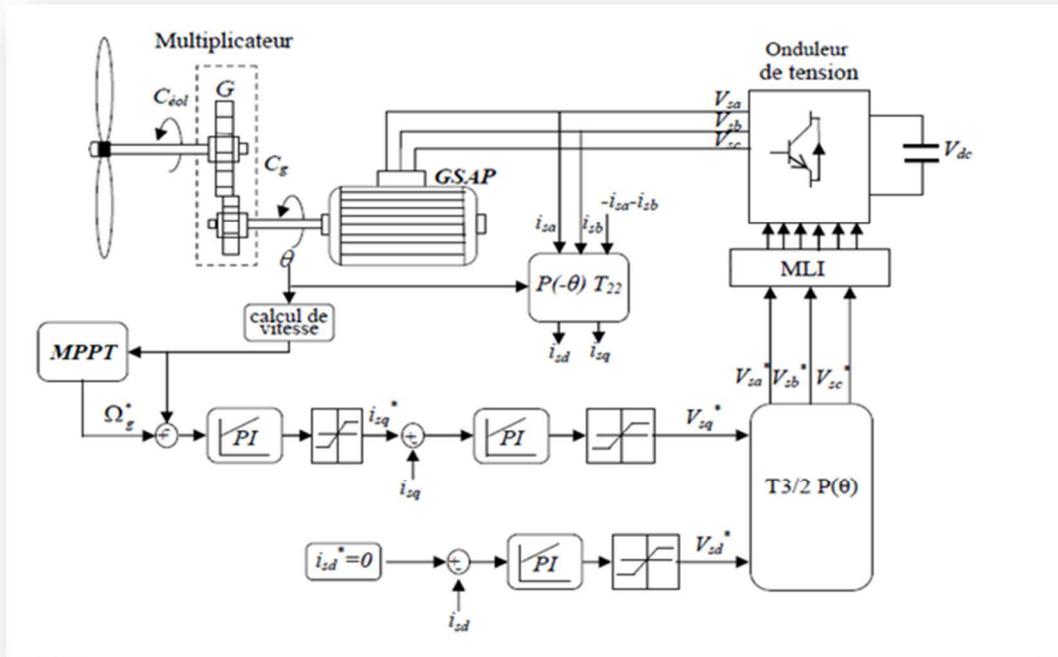


Figure II. 9 Schéma de la commande vectorielle d'une GSAP. [45]

II.6. Découplage

Nous avons un système multi-variable à deux entrées et deux sorties couplées, afin de mettre place des commande mono variable c'est-à-dire d'une manière simple et ainsi de calculer facilement les coefficients des régulateurs.

A partir des équations (V_{sd} et V_{sq}) il est possible de définir les termes de découplage. Pour ne pas compliquer cette étude, nous considérons le cas de décomposition des tensions. [30] [31]

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \frac{d i_{ds}}{dt} - w_r \cdot L_q \cdot i_q \\ ed = -w_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_q \frac{d i_{qs}}{dt} + w_r \cdot L_d \cdot i_d + w_r \cdot \Phi_f \\ eq = w_r \cdot L_d \cdot i_d + w_r \cdot \Phi_f \end{array} \right. \quad (II.36)$$

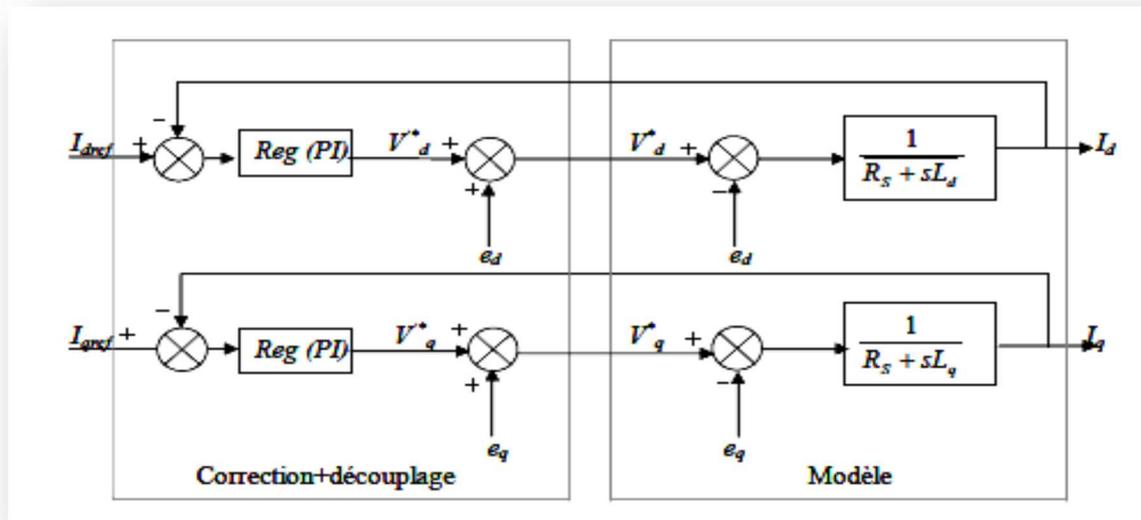


Figure II. 10 Schéma de découplage.

II.7. Modélisation des convertisseurs statiques :

II.7.1. Redresseur MLI

Le redresseur MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture. [39]

Modélisation d'un redresseur MLI

$$S = \begin{cases} +1, \bar{S} = -1 \\ -1, \bar{S} = +1 \end{cases} \text{ pour } S=a.b.c \quad (II.37)$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de:

j S, U_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (II.38)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par:

$$\begin{cases} U_{sab} = (S_a - S_b).U_{dc} \\ U_{sbc} = (S_b - S_c).U_{dc} \\ U_{sca} = (S_c - S_a).U_{dc} \end{cases} \quad (II.39)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi:

$$\begin{cases} e_a \\ e_b \\ e_c \end{cases} = R \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases} + \begin{cases} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{cases} \quad (II.40)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{sa} = \frac{2 \cdot S_a - S_b - S_c}{3} \cdot U_{dc} \\ U_{sb} = \frac{2 \cdot S_b - S_a - S_c}{3} \cdot U_{dc} \\ U_{sc} = \frac{2 \cdot S_c - S_a - S_b}{3} \cdot U_{dc} \end{cases} \quad (II.41)$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c - i_l \quad (II.42)$$

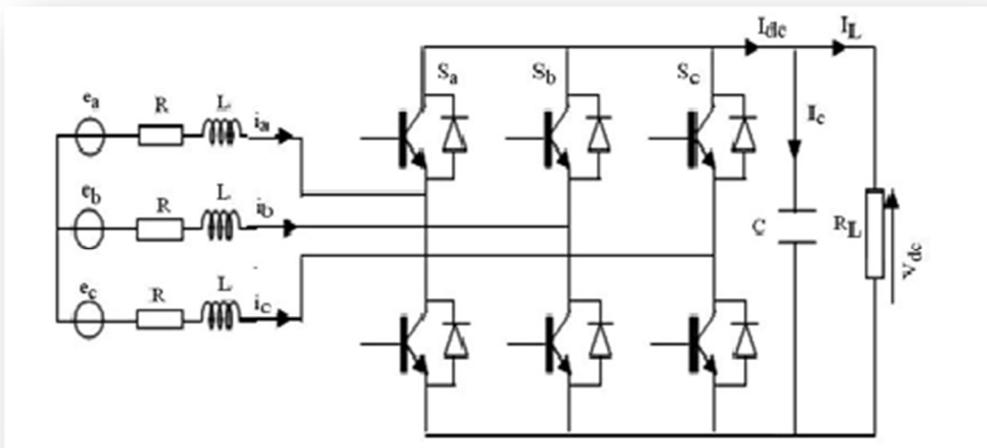


Figure II. 11 Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI. [37]

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones dq sont:

$$e_d = R.i_d + L.\frac{di_d}{dt} - \omega.L.i_q + U_{sd} \quad (II.43)$$

$$e_q = R.i_q + L.\frac{di_q}{dt} + \omega.L.i_d + U_{sq}$$

$$C.\frac{dU_{dc}}{dt} = S_d.i_d + S_q.i_q - i_l \quad (II.44)$$

Avec:

$$s_d = \frac{1}{\sqrt{6}}(2.S_a - S_b - S_c).\cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c).\sin(\omega t) \quad (II.45)$$

$$s_q = \frac{1}{\sqrt{6}}(S_b - S_c).\cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}}(2.S_a - S_b - S_c).\sin(\omega t)$$

II.7.2. Modélisation d'un onduleur triphasé

L'onduleur est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. [33]

Pour qu'un onduleur soit totalement command-able (fermeture et ouverture commandées des interrupteurs) ; il faut respecter la règle de l'alternance des sources, la nature de la source continue impose celle des récepteur alternatif. Un onduleur de tension continue alimente un récepteur de courant alternatif. Un onduleur de courant alimente un récepteur de tension. [29]

Quel que soit les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A,B,C et le point milieu O de la source de tension continue :

$V'_A - V_O$ égale $E/2$, quand K_1 est fermé et $-E/2$ quand K'_1 fermé ;

$V'_B - V_O$ égale $E/2$, quand K_2 est fermé et $-E/2$ quand K'_2 fermé ;

$V'_C - V_O$ égale $E/2$, quand K_3 est fermé et $-E/2$ quand K'_3 fermé ;

De ces tensions on déduit les tensions entre les bornes de sortie :

$$\begin{cases} U_{BA} = (V'_A - V_O) - (V'_B - V_O) \\ U_{CB} = (V'_B - V_O) - (V'_C - V_O) \\ U_{AC} = (V'_C - V_O) - (V'_A - V_O) \end{cases} \quad (II.46)$$

On a dans un système triphasé équilibré :

$$i_A + i_B + i_C = 0 \text{ Entraîne } V_A + V_B + V_C = 0$$

On peut donc écrire

$$\begin{cases} V_A = -V_B - V_C \\ 3V_A = (V_A - V_B) + (V_A - V_C) \\ V_A = \frac{2}{3}(V_A' - V_O) - \frac{1}{3}(V_B' - V_O) - \frac{1}{3}(V_C' - V_O) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

En procédant de manière identique pour les autres phases, on obtient :

$$\begin{cases} V_B = -\frac{1}{3}(V_A - V_O) + \frac{2}{3}(V_B - V_O) - \frac{1}{3}(V_C - V_O) \\ V_C = -\frac{1}{3}(V_A - V_O) - \frac{1}{3}(V_B - V_O) + \frac{2}{3}(V_C - V_O) \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Donc la tension de sortie de l'onduleur est donnée par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

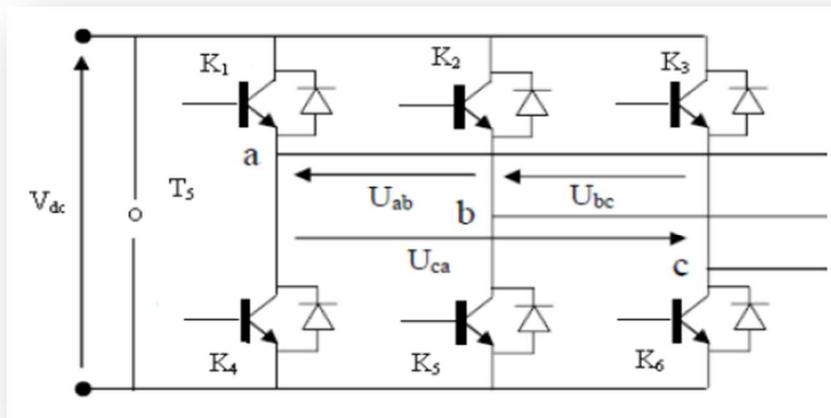


Figure II. 12 Onduleur de tension. [24]

Commande MLI de type sinus triangle

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse With Modulation, ou Modulation de Largeur d'Impulsion) consiste juste en la comparaison, ou sens électronique du terme, d'un signal sinusoïdal « de consigne » avec une <porteuse> triangulaire

de fréquence supérieur permettant de fixer par là même la fréquence de commutation, et ainsi la bande de fréquence occupée par le contenu harmonique.

Dans le cadre d'onduleur triphasé, la commande PWM n'est pas vraiment plus compliquée. Le signal triangulaire qui constitue la porteuse reste unique et les trois signaux de commande sont simplement obtenus par sa comparaison à trois sinusoïdes de consigne déphasées de 120° . [30]

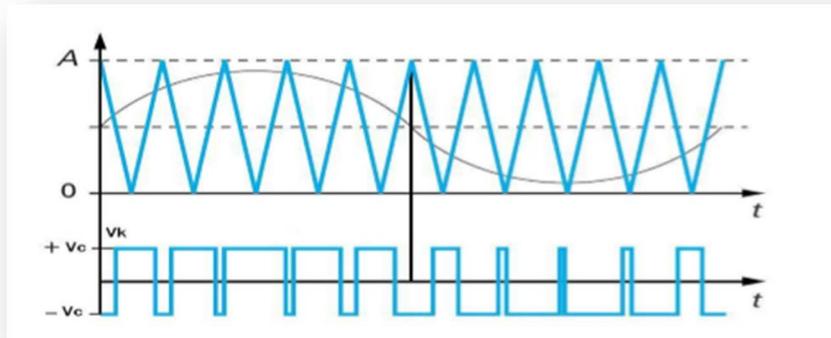


Figure II. 13 Schéma de principe de la technique triangulaire-sinusoidal MLI. [49]

Caractéristique de la commande MLI

L'indice de modulation "m": c'est le rapport entre la fréquence de signal de la porteuse f_p et la fréquence de signal de référence f_s .

$$m = f_p / f_s \quad (II.50)$$

Coefficient de réglage "r": c'est le rapport entre l'amplitude de référence V_r et l'amplitude de la porteuse.

$$r = V_r / V_p \quad (II.51)$$

En système triphasé équilibré toujours la phase entre les trois tensions est $2\pi/3$ d'amplitude fixe et de fréquence fixe :

$$\begin{cases} V_{r1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{r2} = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{r3} = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (II.52)$$

Le principe de cette stratégie peut être résolu par l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} Si \ V_r \geq V_p & S_i = 1 \quad i = [1, 2, 3] \\ sinon & S_i = 0 \end{cases}$$

II.8. Contrôle de la connexion au réseau électrique

L'ensemble de production d'énergie est connecté au réseau triphasé via un convertisseur *MLI* entre lesquels s'insère un filtre triphasé.

Le rôle du convertisseur *MLI* est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de la puissance, en générant le courant de charge nécessaire au condensateur notamment dans la phase de démarrage par le contrôle des courants transités par le réseau via le filtre.

Un contrôle vectoriel des courants, dans le repère de Park, a été réalisé en utilisant un repère synchronisé avec les tensions du réseau. Le convertisseur est commandé de manière à imposer des références aux tensions simples à partir de la mesure de la tension du bus continu. [45].

II.8.1. Modélisation du bus continu

Le bus continu est le condensateur situé entre les deux convertisseurs; sa fonction est de maintenir une tension continue stable.

Le schéma électrique du bus continu est représenté sur la Figure (II.14) il montre que le courant i_{dc} est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur (Redresseur et onduleur)

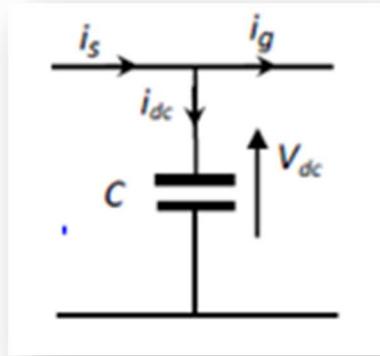


Figure II. 14 Schéma électrique du bus continu.

I_s : le courant du bus continu du côté générateur.

I_g : le courant du bus continu du côté réseau.

C : la capacité du condensateur du bus continue.

Le modèle de bus continu est exprimé comme suit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_s - i_g \quad (II.53)$$

On suppose que les convertisseurs sont idéaux, la tension aux bornes du condensateur s'écrit comme suit:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_s}{V_{dc}} - i_g \quad (II.53)$$

Avec P_s : la puissance électrique fournie par le système éolien, qui peut être exprimée comme suit:

$$P_s = 3V_s \cdot i_s = V_{dc} \cdot i_{dc} \quad (II.54)$$

Ou

$$P_s = \frac{3}{2} E_{max} \cdot I_{max} = V_{dc} \cdot i_{dc} \quad (II.55)$$

Où V_s est la tension du côté du générateur et E_{max} est son amplitude, I_{max} est l'amplitude du courant du générateur et i_{dc} est le courant à travers le condensateur.

Le diagramme de contrôle de V_{dc}

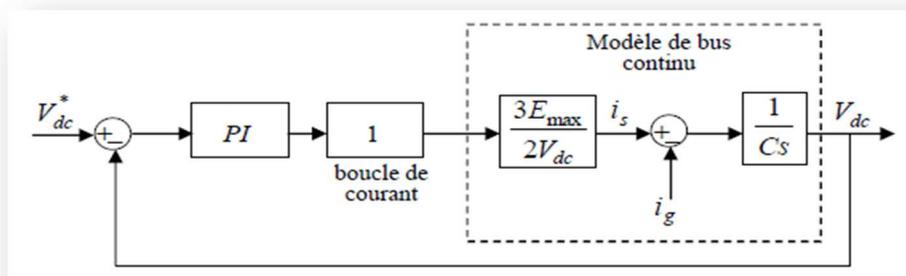


Figure II. 15 Schéma de contrôle de la tension continue V_{dc} . [45]

Dans cette boucle de contrôle, la dynamique de la boucle de courant est négligée devant celle de la boucle de tension. Nous supposons qu'elle soit égale à 1. Le contrôleur PI est conçu avec la méthode de placement des pôles. (Voir Annexe).

II.8.2. Modélisation du filtre

Modélisation du filtre dans le repère naturel

C'est un filtre passif série (R_f, L_f) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau électrique comme montré dans la Figure., sa fonction est de réduire la propagation des harmoniques dans le réseau.

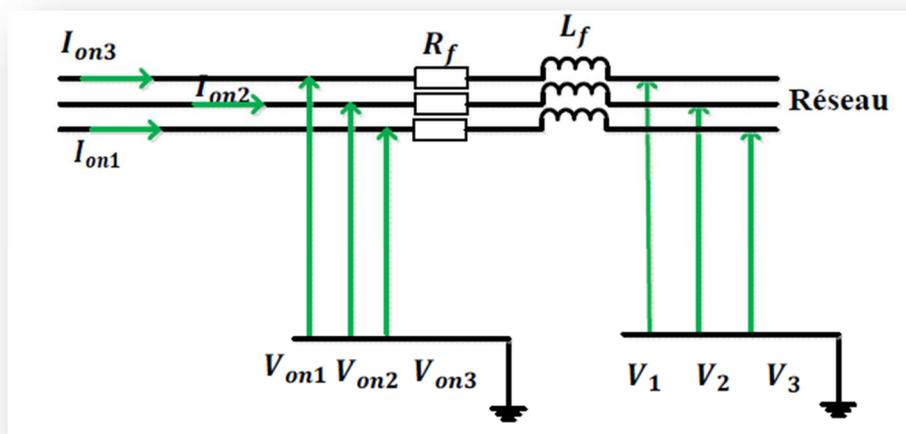


Figure II. 16 Schéma électrique du filtre. [4]

Les courants traversant le filtre sont obtenus par l'intégration des tensions aux bornes des bobines.

$$\begin{cases} I_{t1} = \int \frac{1}{L_f} \cdot V_{L_f1} + I_{t1}(t_0) \\ I_{t2} = \int \frac{1}{L_f} \cdot V_{L_f2} + I_{t2}(t_0) \\ I_{t3} = \int \frac{1}{L_f} \cdot V_{L_f3} + I_{t3}(t_0) \end{cases} \quad (II.56)$$

$I_{t1}(t_0)$, $I_{t2}(t_0)$ et $I_{t3}(t_0)$ sont respectivement les courants I_{t1} , I_{t2} et I_{t3} à l'instant initial.

Les tensions aux bornes des résistances sont données par :

$$V_R = R_{fi} I_{ti} \quad (II.57)$$

Les tensions aux bornes des inductances sont données par :

$$V_{Lfi} = \Delta V_i - V_{Rfi} \quad (II.58)$$

II.8.3. Modélisation du filtre dans le repère de Park

Les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ I_{t3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ I_{t3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (II.59)$$

L'application de la transformation de Park sur le système nous donne

II.9. Contrôle de la puissance active et réactive

Le modèle dynamique de connexion au réseau dans le référentiel tournant synchronisé avec le vecteur d'espace de tension du réseau est donné par :

$$\begin{cases} U_{gd} = -R_t i_{gd} - \frac{L_t di_{gd}}{dt} + W_{gr} L_t i_{gq} + e_{gd} \\ U_{gq} = -R_t i_{gq} - \frac{L_t di_{gq}}{dt} + W_{gr} L_t i_{gd} + e_{gq} \end{cases} \quad (II.60)$$

Avec

R_t et L_t sont respectivement la résistance et l'inductance du filtre

U_{gd} et U_{gq} sont les composantes de la tension de l'onduleur

ω_r est la vitesse angulaire électrique du réseau.

Si le référentiel est orienté avec la tension d'alimentation, le vecteur de tension de réseau est donné par cette équation :

$$U = U_{gd} + j_0 \quad (II.60)$$

Et la puissance active et réactive débitées au réseau à travers le convertisseur deviennent

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} U_{gd} i_{gd} \\ Q &= \frac{3}{2} U_{gd} i_{gq} \end{aligned} \quad (II.61)$$

Le contrôle de la puissance active et la puissance réactive est assuré par le contrôle des composantes du courant i_{dg} et i_{dq} comme le montre la Figure (II-17). Le système de commande doit répondre aux objectifs suivants:

- maintenir une tension constante du bus continu,
- contrôler indépendamment les puissances : active et réactive,
- avoir des courants sinusoïdaux du côté réseau, d'amplitude et de fréquence définies.

Dans la Figure (II-17), θ_g l'angle électrique du réseau est calculé par l'utilisation de bloc PLL (en anglais- phase locked loops). Dans cette structure, le régulateur de tension continue fournit la référence du courant direct i_{dg} pour le contrôle de la puissance active selon l'équation de [II-67]. Cela garantit que toute la puissance provenant du redresseur (coté **GSAP**) est transférée instantanément au réseau via l'onduleur (coté réseau). La puissance réactive est régulée autour de la valeur nulle pour garantir un facteur de puissance unitaire, en imposant un courant de référence i_{dq} nul. Les régulateurs de courant fournissent une référence de tension pour le convertisseur qui sera compensé en ajoutant des termes de compensation de la force électromotrice (fém) de rotation. Tous les contrôleurs utilisés sont des régulateurs de type **PI**.

II.10. Modèle du réseau électrique

Le modèle du réseau électrique correspond au modèle d'un bus infini. Un modèle du bus infini peut être utilisé lorsque la capacité de puissance de réseau est suffisamment large telle que l'action d'un utilisateur ou un générateur n'effectuera pas l'opération de la puissance de

réseau. Dans un bus infini, la fréquence et la tension du système sont considérées constantes et indépendantes des puissances active et réactive transitées. [45].

Le modèle dynamique de la connexion au réseau, en repère tournant en synchronisme avec la tension du réseau électrique, est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{dg} = V_{di} - R_i I_{dg} - L_{dg} \frac{di_{dg}}{dt} + L_{qg} \omega_g I_{qg} \\ V_{qg} = V_{qi} - R_i I_{qg} - L_{dg} \frac{di_{qg}}{dt} + L_{dg} \omega_g I_{dg} \end{cases} \quad (II.62)$$

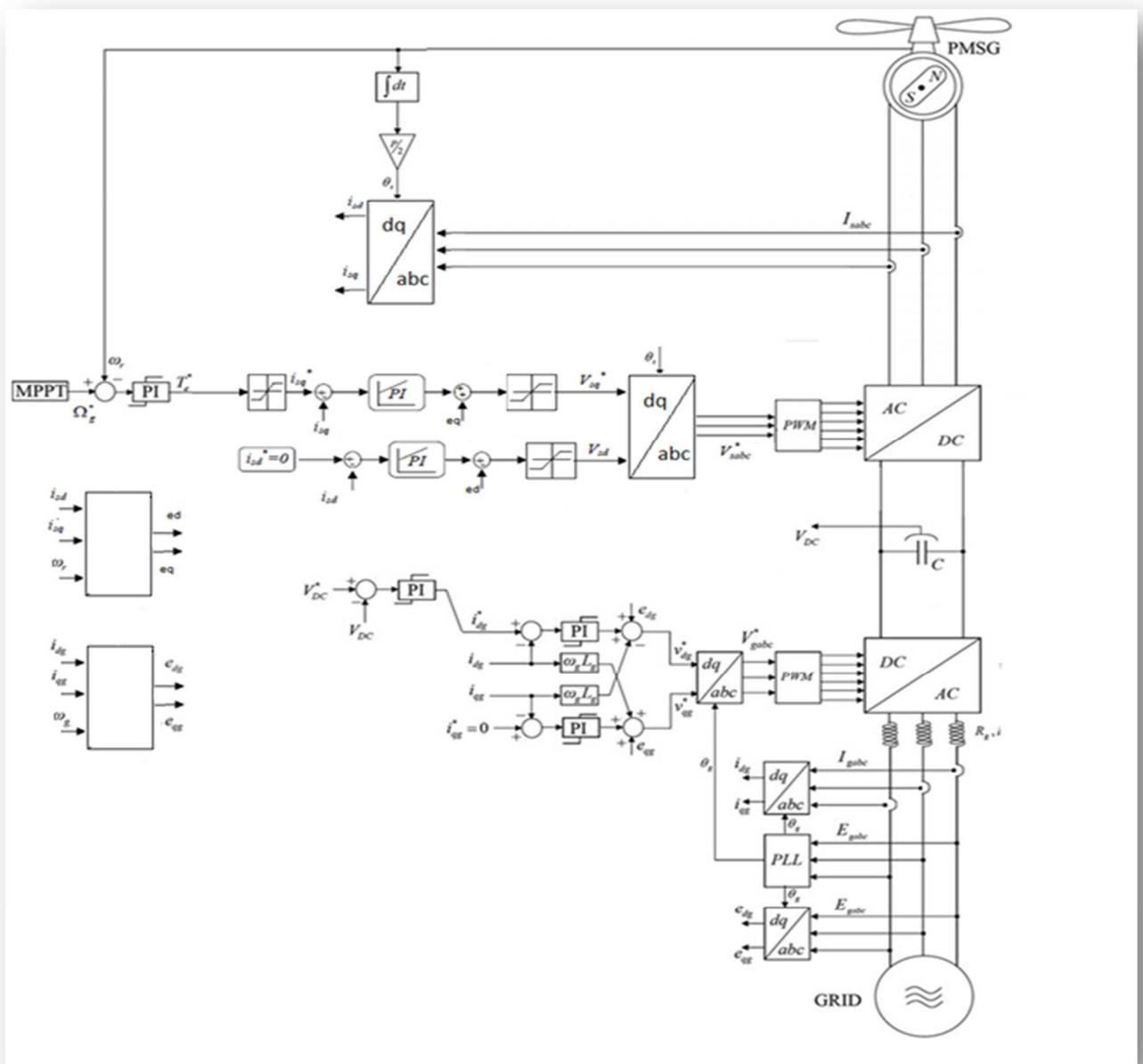


Figure II. 17Système global de la chaîne de la conversion éolienne

II.11. Résultats de simulations

La figure (II-18) illustre le schéma bloc complète de la chaîne de conversion éolienne en utilisant le programme Sim-Power System.

La figure (II-19) représente la variation de la vitesse du vent, on remarque que la vitesse varie entre une valeur maximale égale à 4.5m/s et une valeur minimale égale à 1.5m/s.

La figure (II-20) représente le résultat de la commande par un PI classique, en utilisant la méthode de compensation des pôles, de la vitesse de rotation de la GSAP suit sa référence avec une dynamique très rapide et une erreur statique quasi nulle.

La figure (II-21) montre l'allure de la puissance de la turbine, on remarque qu'elle est à l'image du profil du vent.

La figure (II-22) représente l'évolution du ratio de la vitesse On remarque que cette grandeur prend sa valeur optimal qui est égale à 5.66.

La figure (II-23) représente l'évolution du coefficient de puissance C_p , on remarque qu'il prend sa valeur maximale qui est égale à 0.34.

La figure (II-24) représente la variation du courant statorique de la GSAP, on voit que l'allure des courants est sinusoïdale, on remarque aussi que l'amplitude des courants varie en fonction de la vitesse de rotation de la GSAP

La figure (II-25) représente le résultat de la commande du courant statorique direct I_{sd} , avec une référence nulle. On voit que le courant direct suit sa référence avec une valeur moyenne nulle.

La figure (II-26) représente la variation du courant en quadrature. On remarque qu'après la commande, le courant quadratique suit sa référence avec une dynamique rapide.

La figure (II-27) représente la variation du couple électromagnétique fourni par la génératrice synchrone à aimants permanents avec une dynamique rapide. Il est à l'image de i_{sq} ce qui montre le fonctionnement de la commande vectorielle basée sur ce principe.

La figure (II-28) montre la variation de la tension à la sortie du redresseur. Sa valeur converge vers la référence qui est égale à 500V.

La figure (II-29) représente le résultat de la puissance active de GSAP et la puissance injectée au réseau électrique. On remarque la présence d'un pic de 1320 (W) du côté réseau lors du démarrage. On note un bon suivi de la puissance de la GSAP avec une chute de tension au voisinage de 30 (W).

La figure (II-30) représente le résultat de la puissance injectée au réseau électrique avec la présence d'un pic de la puissance égale à 3700 (Var) et la poursuite de la valeur de référence qui est égale à zéro. Cela montre le fonctionnement de la commande vectorielle.

La figure (II-31) représente la variation du courant direct après la commande. Le courant direct suit sa référence avec une dynamique rapide

La figure (II-32) représente le résultat de la commande du courant en quadrature I_{dq} , avec une référence nulle. On voit qu'il suit sa référence avec une valeur moyenne nulle.

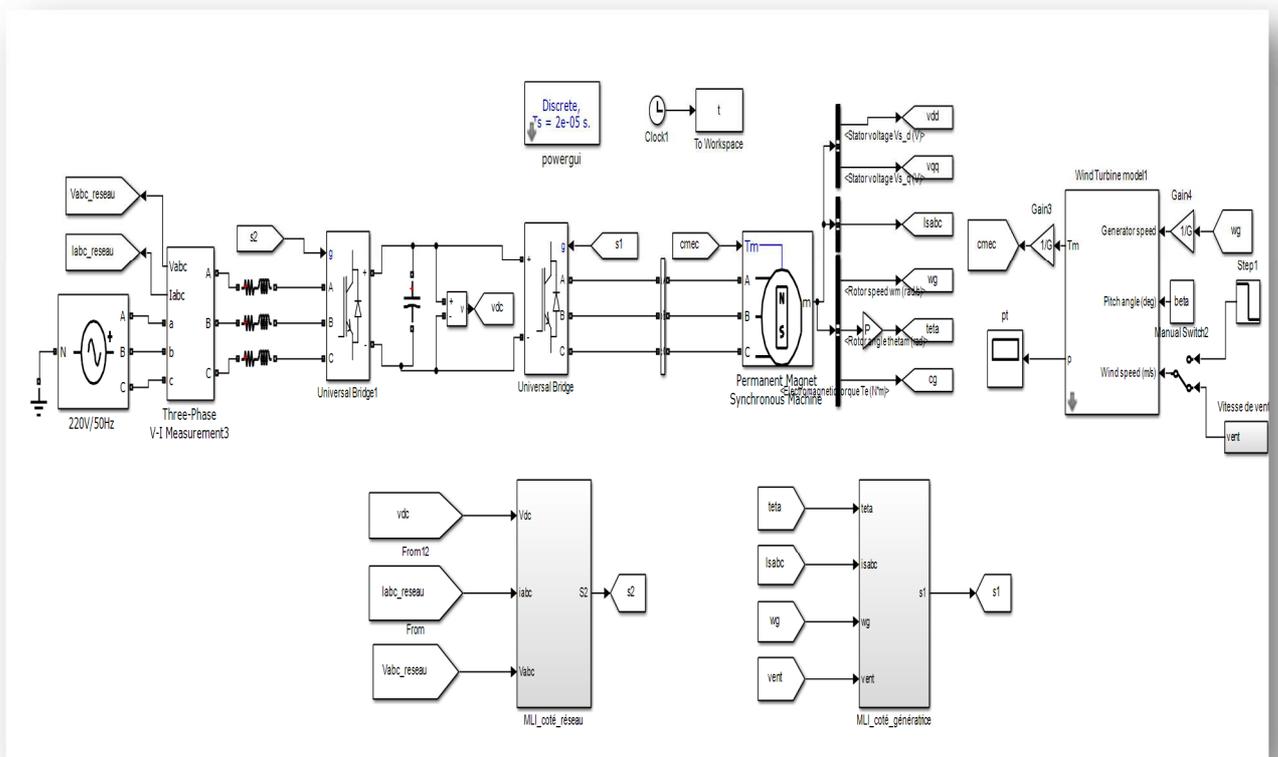


Figure II. 18 Schéma global de la simulation de la chaîne de conversion éolienne.

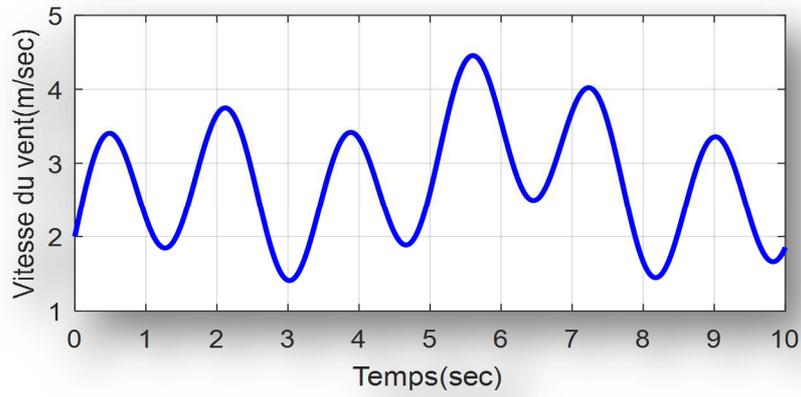


Figure II. 19 Fonction représentant la variation de la vitesse du vent.

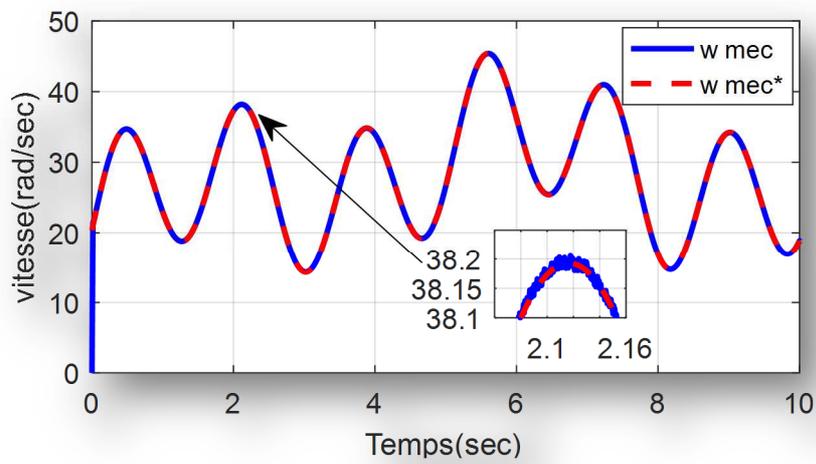


Figure II. 20 Commande de la vitesse de rotation de la GSAP.

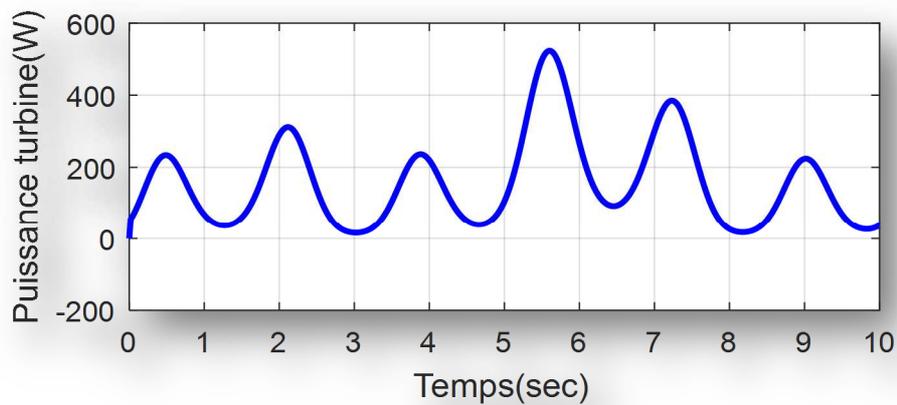


Figure II. 21 Puissance de la turbine.

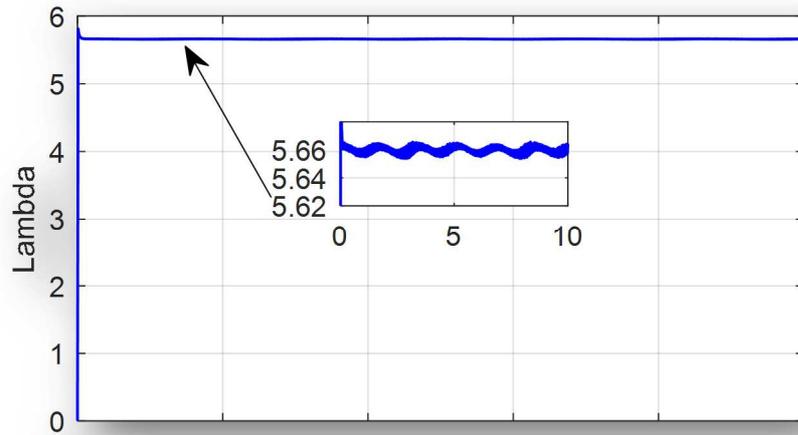


Figure II. 22 Courbe de Lambda

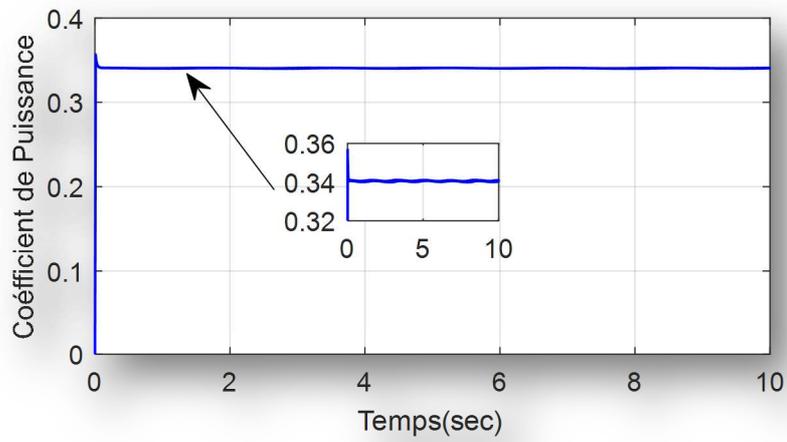


Figure II. 23 Courbe de Coefficient de puissance CP

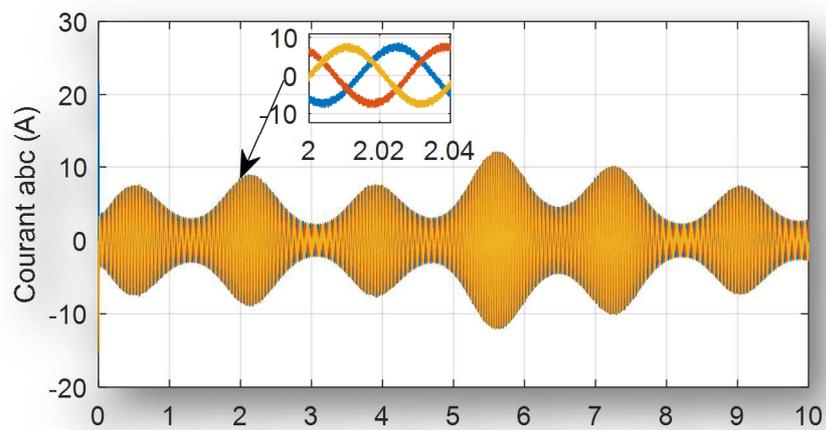


Figure II. 24 Courants statoriques de la GSAP.

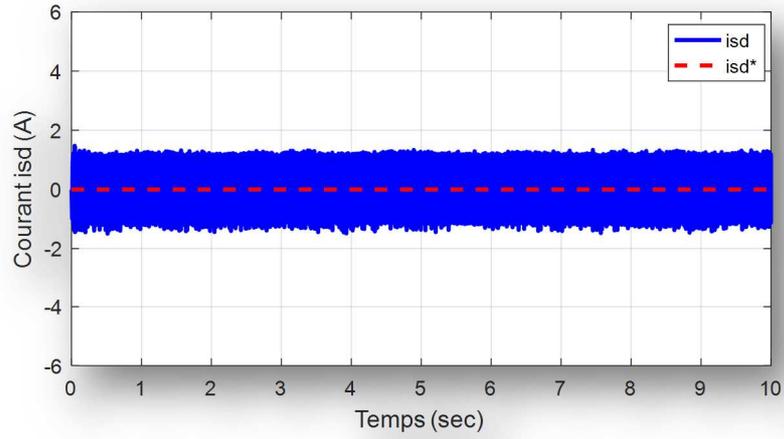


Figure II. 25 Commande du courant directe dans le repère de Park.

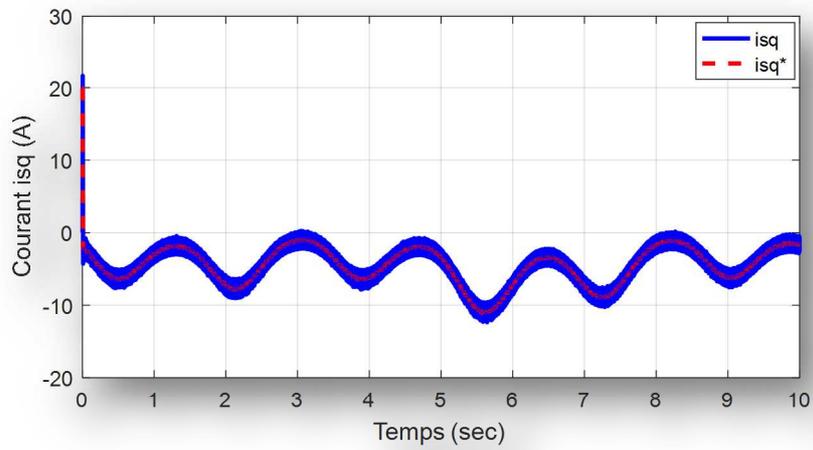


Figure II. 26 Commande du courant quadratique Isq

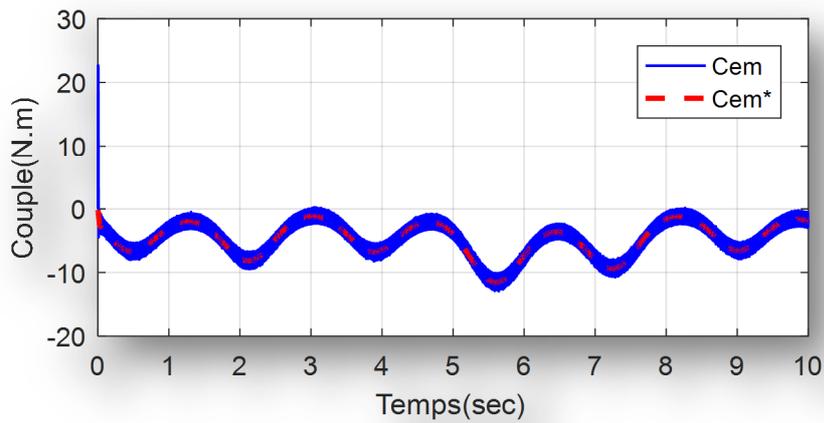


Figure II. 27 Variation du couple électromagnétique avec la référence dans la GSAP.

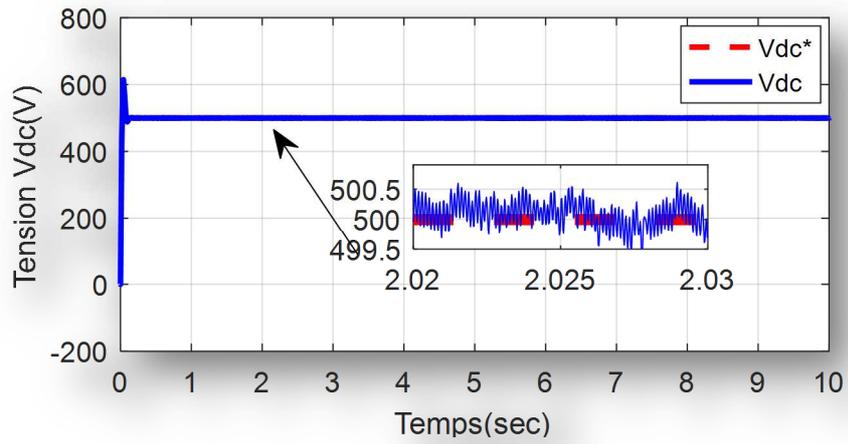


Figure II. 28 Tension redressé et la tension de bus continue.

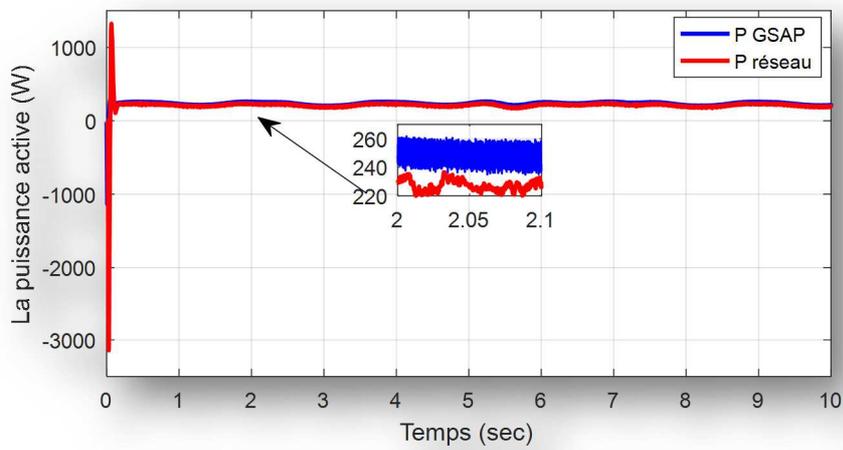


Figure II. 29 Commande de la puissance active P.

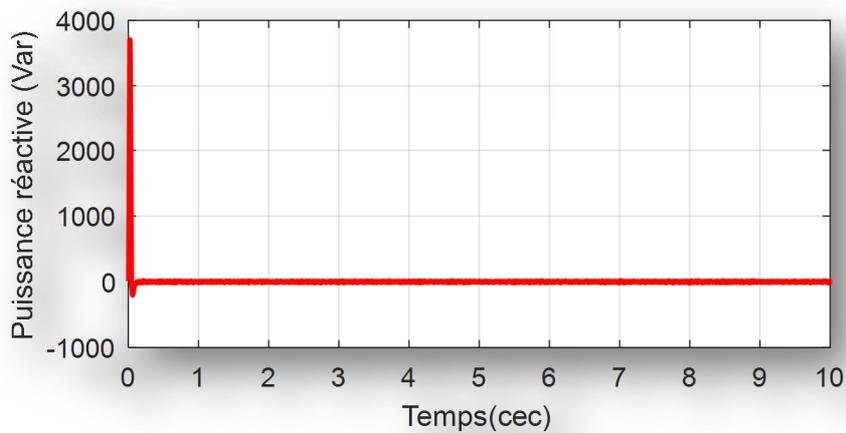


Figure II. 30 Résultat de commande de la puissance réactive Q.

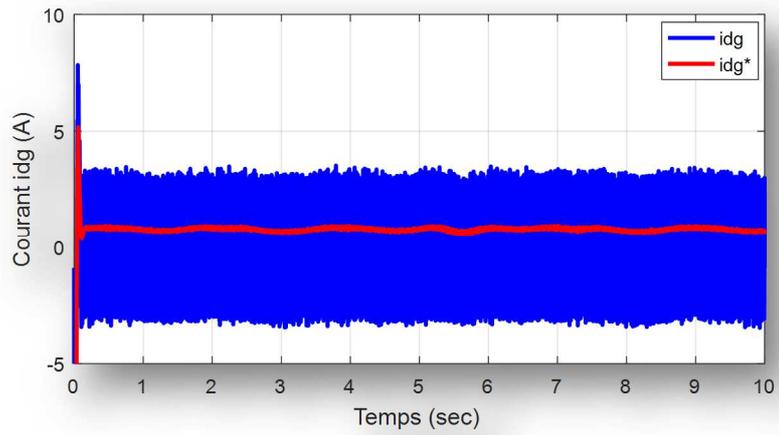


Figure II. 31 Le courant de réseau

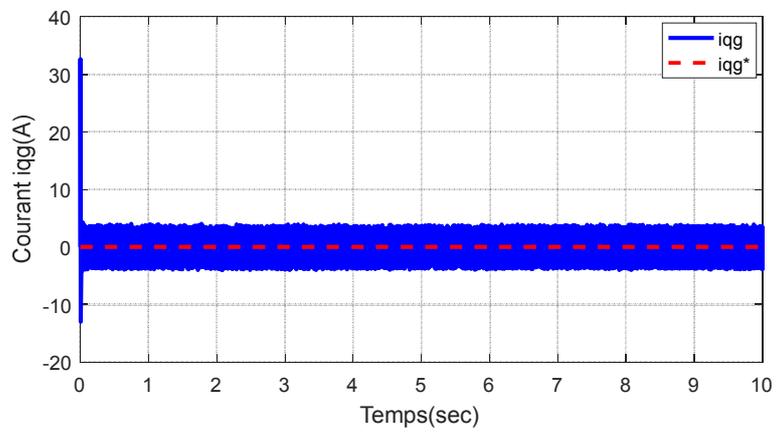


Figure II. 32 Le courant en quadrature de réseau

II.12. Conclusion

Ce chapitre traite la modélisation et la commande classique d'une chaîne éolienne connectée au réseau. La modélisation de la chaîne comporte les parties suivantes : le vent, la turbine, la GSAP, les convertisseurs statiques. Des schémas ont été utilisés pour montrer la relation entre les différentes parties de la chaîne et pour montrer leurs fonctionnements.

Les tensions triphasées sinusoïdales de la sortie de la GSAP ont été converties à une tension continue par un redresseur comme étage intermédiaire. La tension continue résultante est de nouveau utilisée à l'entrée de l'onduleur pour obtenir trois tensions sinusoïdales triphasées. Ces tensions alternatives ont été filtrées par une résistance R et inductance L placé en série puis injectées au réseau.

La commande vectorielle a été utilisée pour le contrôle des courants statoriques et de la vitesse. Nous avons utilisé un régulateur classique PI avec la méthode de compensation des pôles qui nous a donné des résultats satisfaisants et qui a mis en évidence le comportement du système face à cette commande, cependant ces résultats peuvent être améliorés en utilisant des commandes plus avancé comme l'application d'un plusieurs type de régulateurs flous, qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Logique Floue

et

Contrôleurs Flous

Utilisés

III.1. Introduction

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. Elle a été introduite comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commandes intelligentes. En 1965, le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkeley a introduit la notion des variables linguistiques et des ensembles flous. La première application expérimentale de cette technique de commande est celle réalisée par Mamdani.[18]

Les bases théoriques de la logique floue (fuzzylogic) ont été établies par le professeur Zadeh. Cette technique associe les notions de « sous-ensemble flou » et de « théorie des possibilités ». Il s'agit d'une approche calquée sur le raisonnement humain plutôt que sur des calculs rigides; pour des problèmes mal définis, l'être humain est irremplaçable. En effet, le mode de raisonnement en logique floue est plus intuitif que la logique classique. Il permet aux concepteurs de mieux appréhender les phénomènes naturels, imprécis et difficilement modélisables en s'appuyant sur la définition de règles et de fonctions d'appartenance à des ensembles dits « ensembles flous ».

La logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes classiques de régulation. Elle est complémentaire et utilisée particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander. De plus, l'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en ensembles de règles linguistiques facilement interprétables.

La logique floue a trouvé son application dans plusieurs domaines, tels que, la gestion, la médecine et la commande des systèmes dont on peut citer la commande des bras de robots, des machines outils, des réacteurs chimiques, des véhicules, des appareils électroménagers ...etc. [21]

Ce chapitre est concerné par la présentation des notions de base de la théorie de la logique floue, la définition d'un système flou ainsi que les relations qui gèrent la commande par cette technique.

III.2. Historique

Depuis longtemps l'homme recherche à maîtriser les incertitudes et les imperfections inhérentes à sa nature. La première réelle manifestation fut le développement de la théorie des probabilités à partir du XVII^e siècle de la volonté de formaliser la prise en compte des connaissances incertaines mais avec la contrainte de maîtriser les incertitudes psychologiques et linguistiques.

- La logique floue est apparue avant les années 1940, avec les premières approches par des chercheurs Américains, du concept d'incertitude. Elle a été publiée en 1965 par le professeur : L. A. Zadeh,
- Dès 1972, le Japon s'intéresse à la logique floue et crée une fondation pour la recherche sur les systèmes flous qui deviendra plus tard le bureau japonais de l'IFSA (International FuzzySystems Association),
- En 1973, Zadeh propose une méthodologie pour décrire les systèmes en utilisant un langage incorporant la notion du flou,
- En 1974 Mandani effectue la première application expérimentale d'un contrôleur flou.
- La première application industrielle sera effectuée en 1980, dans une cimenterie au Danemark,
- En 1983, la compagnie Fizi Electric utilise la logique floue pour la conduite de procédés de purification d'eau,
- En 1984, l'IFSA est créée. Elle organisa sa première conférence en 1985 et la seconde en 1987. [24]

III.3. Domaines d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications, La recherche opérationnelle ;

- Le contrôle de production et des machines,
- La robotique, la métrologie, la didactique,
- L'informatique, la médecine, la chimie industrielle, la sociologie,
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs,...etc.)
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...)
- Systèmes de conditionnement d'ambiance,
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet,
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance. [24]

III.4. Avantages et inconvénients

III.4.1. Avantages

- Le non nécessité d'une modélisation du système à régler,
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistique) de l'opérateur de processus,
- Solutions de problèmes multi variables complexes,
- Possibilité d'intégration du savoir-faire de l'expert,
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuit intégrés (processeur dédiés, solution matérielle). [42][47]

III.4.2. Inconvénients

- Le manque de directives précis pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzifications),
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglages en toute généralités (en l'absence d'un model valable),
- L'approche artisanale et en systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile)
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire. [8]

III.5. Principe de la logique floue

Les compréhensions de l'univers dans lequel nous évoluons sont généralement imparfaites dans la mesure où elles peuvent être entachées d'incertitudes et/ou d'imprécisions, ne serait-ce qu'à travers la perception que nous en avons. Or, nous pouvons constater que l'homme intègre naturellement ces imperfections dans la vie de tous les jours, en particulier au niveau du raisonnement et de la décision. A travers le nouveau concept ensembliste d'appartenance graduelle d'un élément à un ensemble, a été de définir une logique multi-évaluée permettant de modéliser a ces imperfections, c'est prendre en compte les états intermédiaires entre le tout et le rien. [44]

III.6. Théorie des ensembles flous

III.6.1. Ensemble flou

Un ensemble flou A est défini sur un univers de discours U (ensemble d'éléments discrets ou continus) par sa fonction d'appartenance μ_A . La grandeur $\mu_A(x)$ définit le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble A .

$$\begin{aligned} \mu_A: U &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \\ A &= \{(x, \mu_A(x)), x \in U\} \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

L'ensemble flou vide est noté f , il est défini par : $\mu_f(x) = 0, \quad \forall x \in U$ (III.2)

Le plus grand ensemble flou sur U est noté l_u ,

il est défini par : $\mu_{l_u}(x)=1, \quad \forall x \in U$ (III.3)

III.6.2. Opérations sur les ensembles flous

Comme dans le cas des ensembles «classiques», les opérations logiques d'union (ou), d'intersection (et) et de complémentation (non) peuvent être appliquées aux ensembles flous. [46]

Egalite

Soient A_i et A_j deux élément de l'ensemble $F(x)$.

$$A_i = A_j \iff \forall x \in X, f_{A_i}(x) = f_{A_j}(x) \quad (\text{III.4})$$

Inclusion

Soient A_i et A_j deux élément de l'ensemble $F(x)$.

$$A_i \subset A_j \iff \forall x \in X, f_{A_i}(x) \leq f_{A_j}(x) \quad (\text{III.5})$$

Intersection

Soient A_i et A_j deux élément de l'ensemble $F(x)$.

L'intersection de A_i avec A_j définit un nouveau sous-ensemble flou A_K , ayant pour fonction d'appartenance f_{A_K} (défini par :

$$f_{A_K}(x) = \min(f_{A_i}(x), f_{A_j}(x)), \forall x \in X \quad (\text{III.6})$$

Union

Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(x)$. L'union de A_i avec A_j définit un nouveau sous-ensemble flou A_K , ayant pour fonction d'appartenance f_{AK} défini par :

$$f_{AK}(x) = \max(f_{AI}(x), f_{AJ}(x)), \forall x \in X \quad (\text{III.7})$$

Complément

Soit A_i un élément de l'ensemble $F(x)$.

Le complémentaire $\overline{A_i}$ de A_i a pour fonction d'appartenance $f_{\overline{A_i}}$ telle que :

$$f_{\overline{A_i}}(x) = 1 - f_{A_i}(x), \forall x \in X \quad (\text{III.8})$$

III.6.3. Univers de discours

L'univers de discours représente l'ensemble de référence ou le domaine de la variation de la variable linguistique.

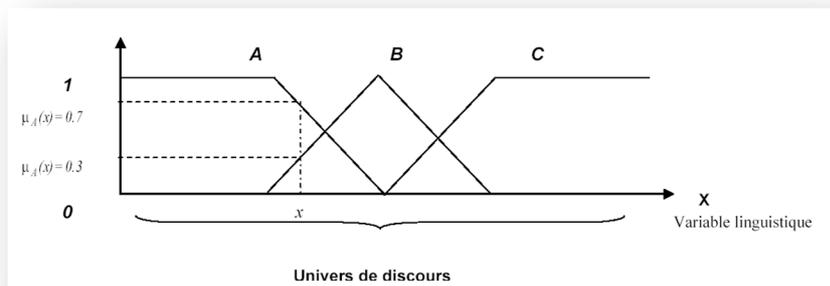


Figure III. 1 Éléments de la logique floue.

III.6.4. Fonction d'appartenance

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir diverses formes, on note en particulier les formes suivantes : triangulaire, trapézoïdale, gaussienne

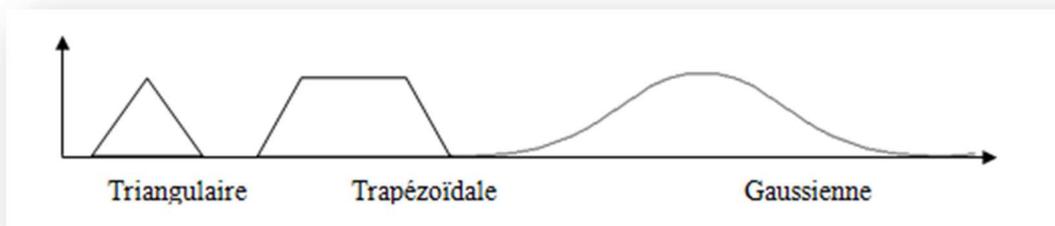


Figure III. 2 Formes de bases des fonctions d'appartenance.

III.6.5. Variable linguistique

Une variable linguistique comme son nom l'indique, est une variable définie à base de mots ou des phrases. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc." Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

On peut représenter une variable linguistique par un triplé (V, U, T_v) , tels que : V est une variable numérique (Vitesse, Taille, Température) définie sur un univers de référence U et T_v est un ensemble de catégories floues de U , qui sont utilisées pour caractériser V à l'aide de fonctions d'appartenance.

Considérons la vitesse de rotation d'une machine électrique comme une variable linguistique définie sur un univers de discours $U = [0,100] \text{ rd / s}$, et son ensemble de catégories floues $T_{vitesse} = (\text{lente, rapide, moyenne})$. [24]

Ces trois ensembles flous de $T_{vitesse}$ peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance comme le montre la figure (III-3) :

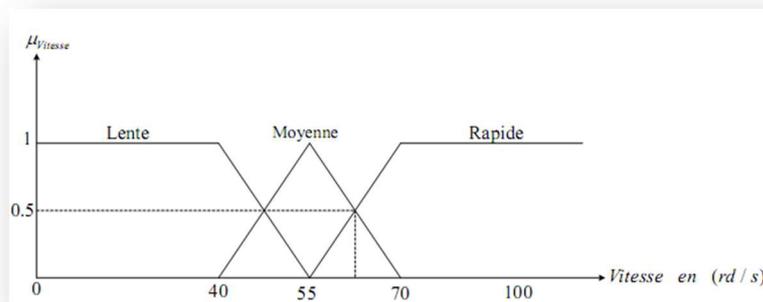


Figure III. 3 Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique. [40]

III.7. Systèmes flous

Un système flou est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numérique (entrées nette), les faire passer dans un système flou, et puis d'avoir une sortie scalaire (sortie nette). [41]

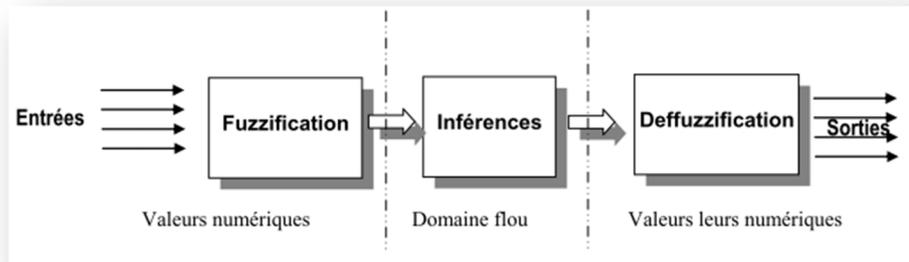


Figure III. 4 Schéma générale d'un système flou

III.7.1. Interface de fuzzification

Elle consiste à transformer les grandeurs réelles en variables linguistiques qui sont associées à une base de données avec des ensembles les caractérisant. Ces termes seront utilisés pour écrire les règles. Le nombre est impair et se répartit autour de zéro. Le nombre utilisé fréquemment est 3, 5 ou 7. Le nombre dépend de la précision souhaitée. [41]

III.7.2. Base de règles

C'est la collection de règles qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie, elles ont la forme: "si-alors"ou"ifthen", elles peuvent être écrites textuellement faisant appel à des entrées et à des sorties. Elles sont aussi données par des experts d'une manière directes numériques ou par des termes ou variables linguistique à travers des fonctions d'appartenance. [41]

III.7.3. L'inférence

Elle permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande et se fait par les opérations d'inférence floue et l'agrégation des règles. L'inférence floue repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication floue pour chaque règle à analyser. Cet opérateur quantifie la force de liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Il existe plusieurs possibilités pour exprimer les inférences, à savoir par description linguistique, par matrice d'inférence ou par tableau d'inférence. Deux approches d'inférence sont couramment utilisées implication de **Mamdani** et implication de **Larsen**. [41]

Tableau III. 1 Les méthodes d'inférence

Méthodes	Opérateurs sur prémisses		Opérateur Implication	Opérateur Agrégation
	Ou	Et		
Max-min	Max	Min	Min	Max
Max-prod	Max	Min	Prod	Max
Som-prod	Som	Prod	Prod	Som

III.7.4. Interface de défuzzification

La dernière étape du contrôle, appelée défuzzification qui permet de convertir les informations floues établis par le mécanisme d'inférence sous forme une grandeur numérique. On distingue trois méthodes différentes (Figure (III.5)) Celle du maximum, celle de la moyenne des maxima et celle du centre de gravité. Il est toutefois reconnu que la méthode de centre de gravité est utilisée. [8]

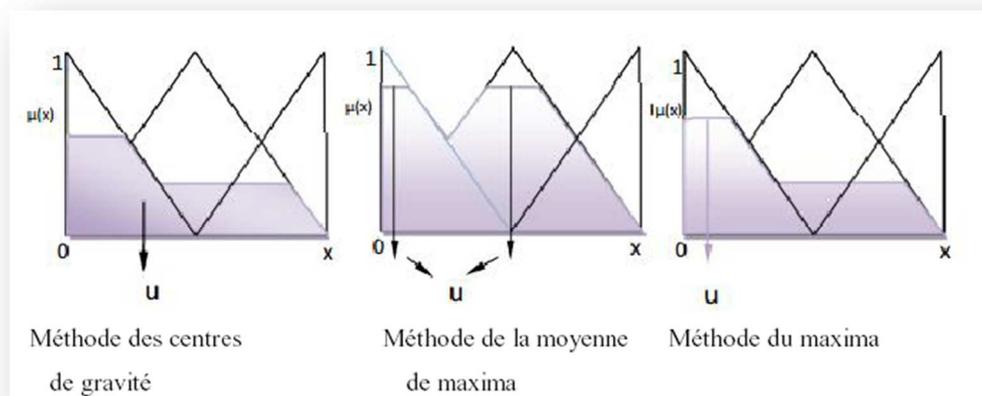


Figure III. 5 Principe des différentes méthodes de défuzzification [44]

III.8. Commande floue

La commande par la logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur à contre-réaction d'état,

le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique

Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

- La quantification floue des entrées, appelée aussi la fuzzification. Elle permet la conversion des variables des entrées qui sont des grandeurs physiques, en grandeurs floues, ou variables linguistiques.
- L'établissement des règles liant les sorties aux entrées, appelé l'Inférence floue.

La Défuzzification qui est l'opération inverse de la fuzzification. Elle consiste à transformer les variables linguistiques en variables réelles ou numériques. [15]

III.8.1. Structure d'un système de commande floue

La logique floue est principalement utilisée dans les domaines de prise de décision, de reconnaissance des formes, de modélisation et de commande des procédés. La commande ou la régulation des systèmes est le domaine industriel de la logique floue le plus exploité. [47]

Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la Figure (IV.1).

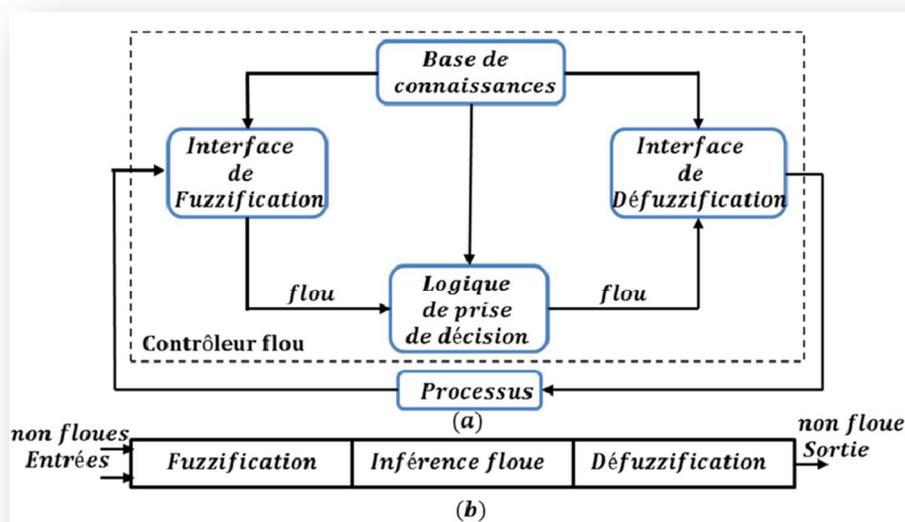


Figure III. 6a) : Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b) : Configuration d'un contrôleur flou.

La structure de Mamdani s'est proposé une interface de défuzzification à la sortie de la structure pure. Le fuzzification transforme les variables réelles d'entrée en variables

linguistiques floues, tandis que le défuzzification effectue l'opération inverse. La structure de Mamdani est devenue le modèle le plus utilisé dans la régulation des systèmes.

III.8.2. Synthèse des régulateurs flous

Cette synthèse de régulateur flou doit suivre les étapes suivantes :

- Le choix des variables d'entrée et de sortie du contrôleur.
- Déterminations des plages entrée/sortie.
- Construction des sous ensembles flous.
- Le choix de des fonctions d'appartenances des sous ensembles flous.
- Le choix de la méthode d'inférence et de défuzzification.
- Constructions de la base des règles. [49]

III.8.3. Structure de base d'un contrôleur flou de vitesse

Dans ce qui suit nous allons introduire un contrôleur flou dans la boucle de régulation de la vitesse. Pour les systèmes mono variables simples, les entrées du contrôleur flou sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système). Et la majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani. Comme le montre la figure (III-7) [47]

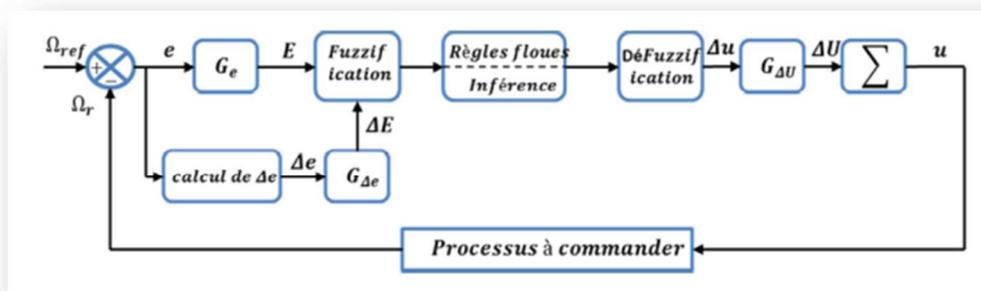


Figure III. 7 Schéma synoptique d'un contrôleur flou de vitesse

III.8.4. Contrôleur PI-flou de vitesse

L'objectif recherché est d'élaborer une commande plus robuste que celle obtenue par un PI classique tout en respectant la dynamique et la contrainte du temps de traitement.

Plusieurs structures de régulateurs sont utilisées, parmi elles, la structure PI-Flou qui est un contrôleur flou basé sur le profil du comportement d'un régulateur PI classique.

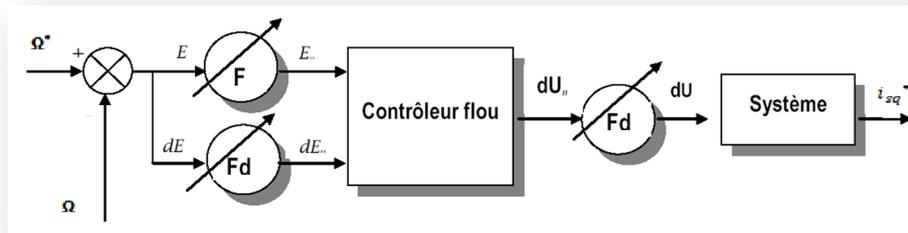


Figure III. 8 Schéma synoptique d'un contrôleur PI- flou de vitesse

Dans le schéma ci-dessus comme dans ce qui suit, nous notons:

- E: l'erreur, elle est définie par :

$$E(k) = \Omega^*(k) - \Omega(k) \quad (\text{III.9})$$

- dE: la dérivée de l'erreur, elle est approchée par :

$$dE(k) = \frac{E(k) - E(k-1)}{T_1} \quad (\text{III.10})$$

T_1 : étant la période d'échantillonnage.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$Isq^*(k) = isq^*(k-1) + dU(k) \quad (\text{III.11})$$

III.8.5. Contrôle flou adaptatif

Un contrôleur flou est dit adaptatif si l'un ou plusieurs de ses paramètres, que l'on peut ajuster (Gains, fonctions d'appartenances, règles), changent en cours du fonctionnement. Dans le cas contraire, le régulateur est dit : non adaptatif ou conventionnel.

III.8.6. Description du régulateur flou adaptatif utilisé

Le mécanisme d'adaptation flou dans notre cas est remplacé par un contrôleur flou adaptatif qui sera montré dans le schéma suivant [8]

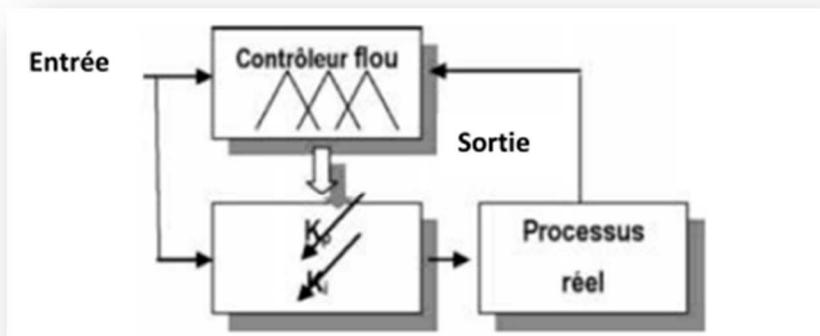


Figure III. 9 Structure de contrôleur flou adaptatif

III.9. Concept des ensembles flous de type-2

Le concept des à été introduit par Zadeh en 1975 comme une extension du concept des ensembles flous ordinaires dits ensembles flous de type-1. Un ensemble flou de type- 2 est caractérisé par une fonction d'appartenance floue c'est à dire que la valeur d'appartenance de chaque élément de l'ensemble est un dans $[0,1]$

Les ensembles flous type 2 peuvent être utilisés dans des situations où il y a une incertitude au sujet des degrés d'appartenance eux-mêmes, par exemple une incertitude dans la forme de la fonction d'appartenance ou dans quelques-uns de ses paramètres. [46]

III.9.1. Systèmes et contrôleurs flous type-2

Un système flou est dit de type-2, s'il inclut au moins un ensemble flou type-2 dans les fonctions d'appartenance définissant ses prémisses ou ses conséquences. L'inférence floue, dans ce type de système, conduit à l'obtention d'ensembles flous de sortie de type-2.

La structure d'un système flou type-2 est très similaire à celle d'un système flou type- 1. Elle comporte un bloc de fuzzification, une base de règles et un mécanisme d'inférence. La seule différence est au niveau de la sortie. Dans le cas du type-2, le bloc de défuzzification est précédé d'un bloc réduction de type (Figure VI-3). [46]

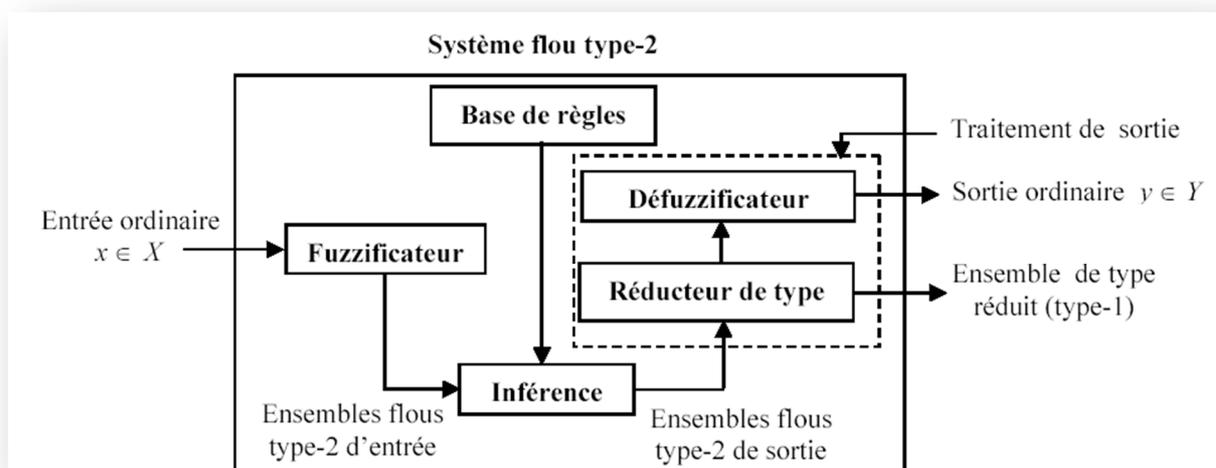


Figure III. 10 Structure générale d'un contrôleur flou type -2.

III.9.1.1. L'interface de fuzzification

L'interface de fuzzification fait correspondre à l'entrée déterministe un ensemble flou qui peut être généralement un EFT-2. Cependant, dans ce qui suit, nous utilisons seulement une fuzzification par singleton pour laquelle l'ensemble flou d'entrée possède uniquement un seul degré d'appartenance non nul. [50]

III.9.1.2. Base de règles

Comme nous l'avons déjà vu, la différence entre un système flou type-1 et celui du type-2 est due au type des fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences. La structure des règles dans le cas d'un système flou type-2 alors reste inchangée.

III.9.1.3. Inférence

Le mécanisme d'inférence est l'élément-clé dans l'algorithme de logique floue, il a grèges les règles si-alors stockées dans la base de connaissance avec les ensembles flous générés par la fuzzification pour ainsi former un ensemble flou qui prévoit une procédure de sortie globale raisonnable.

III.9.1.4. Défuzzification

Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation.

III.9.1.5. Réduction de type

La réduction de type prend en considération plus d'information au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifiée (un nombre). Cependant, cette opération nécessite des calculs intensifs, à l'exception des systèmes flous Type-2 type intervalle pour lesquels il existe une procédure simple pour la mise en œuvre de la réduction de type.

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- La réduction de type par le centre de gravité.
- La réduction de type par la hauteur. [46]
- La réduction de type par le centre des ensembles. [50]

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la théorie de la logique floue en passant par les points suivant : l'historique, les domaines d'application ; les éléments de cette technique ainsi que les opérations utilisées. Les avantages et les inconvénients ont été cités pour montrer les difficultés qui peuvent être rencontrées. Par la suite la commande floue a été introduite en utilisant plusieurs architectures à savoir : le contrôleur PI-flou et pi flou adaptatif. Un deuxième concept appelé flou type 2 de type Takagi sugeno a été introduit de la même façon. L'application de ces types de contrôleur flous fera l'objet du dernier chapitre.

Chapitre IV

Application de La Commande Floue

IV.1. Introduction

La commande floue trouve aussi en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques si... alors facilement interprétables. L'utilisation de la commande floue est particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de trop fortes non linéarité ou imprécisions. [32]

Cette partie est consacrée à l'application de la logique floue à la commande de vitesse d'une machine synchrone à aimant permanent.

IV.2. Contrôleur PI-flou de vitesse

Dans le but d'améliorer le comportement dynamique du réglage de la vitesse de la turbine, on introduit pour une variable x : trois, cinq ou sept ensembles flous. Une subdivision plus fine, compliquerait l'opération et influencerait sur le temps de calcul.

IV.2.1. Contrôleur PI-flou à trois ensembles

La conception d'un régulateur PI-flou à trois ensembles pour la commande des entraînements

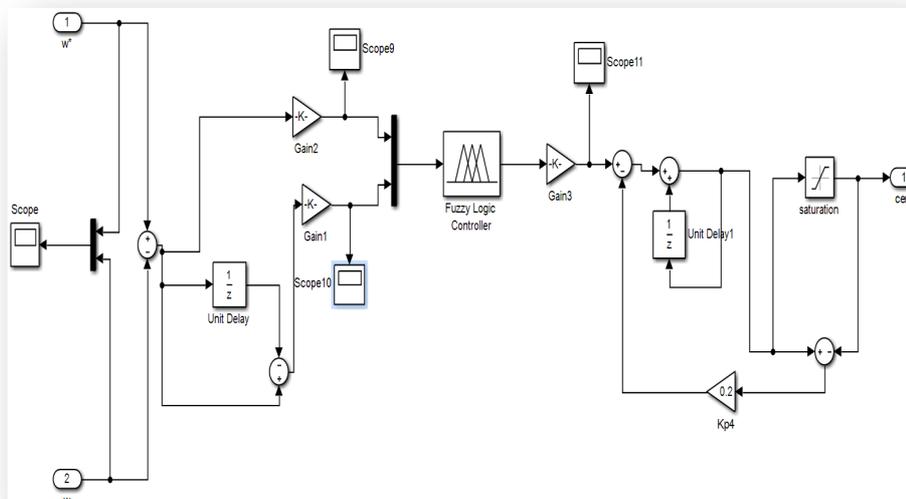


Figure IV. 1 Schéma bloc Simulink de contrôleur PI flou de vitesse

Nous introduisons, pour les variables d'entrées et de sortie trois ensembles représentés par une fonction d'appartenance de forme triangulaire à l'intermédiaire. Sauf pour les extrémités où la forme trapézoïdale est employée. [18]

Le régulateur admet pour chaque variable les trois ensembles flous

- N (négatif)

- Z (zéro)
- P (positif).

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires à l'intermédiaire et trapézoïdales à l'extrémité.

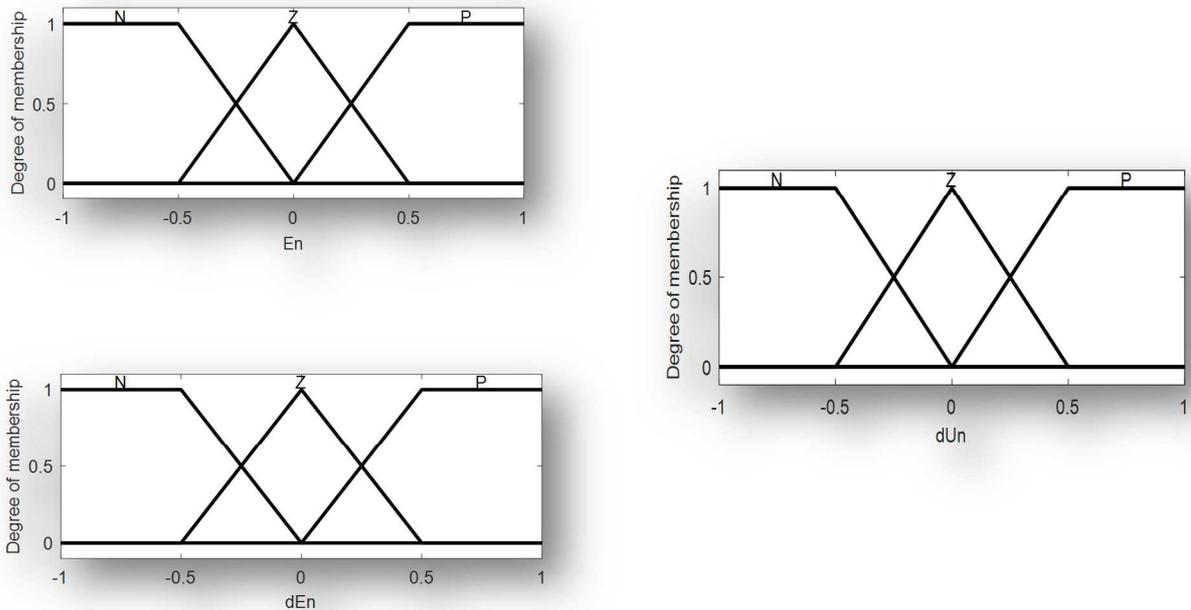


Figure IV. 2 Entrées et sortie du contrôleur PI-flou à trois ensembles

A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède trois ensembles flous, ce qui donne un ensemble de neuf règles floues. Ces règles sont représentées dans une matrice dite « matrice d'inférence » (Tableau IV.1)

Tableau IV. 1 Matrice d'inférence du PI-flou à trois ensembles

Du		dEn		
		N	EZ	P
En	N	N	N	EZ
	EZ	N	EZ	P
	P	EZ	P	P

IV.2.2. Contrôleur PI-flou à cinq ensembles

Les fonctions d'appartenance correspondant aux ensembles flous

- Négatif grand noté NG.
- Négatif petit noté NP.
- Environ de zéro noté EZ.
- Positif petit noté PP.
- Positif grand noté PG.

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires à l'intermédiaire et trapézoïdales à l'extrémité.

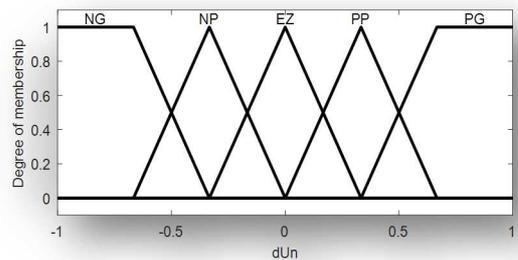
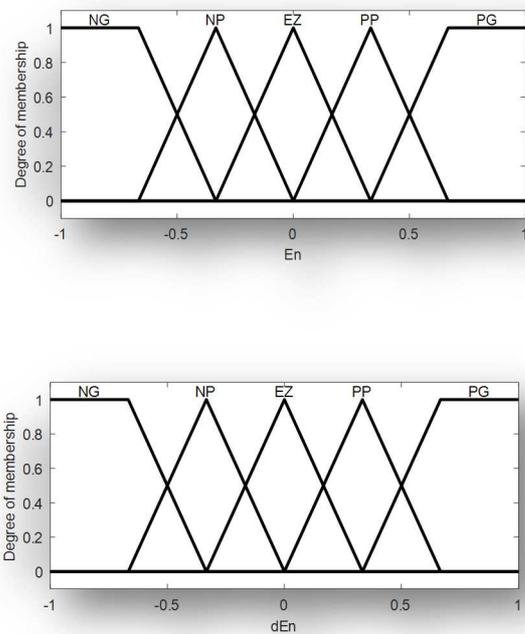


Figure IV. 3 Entrées et sortie du contrôleur PI-flou à cinq ensembles

Tableau IV. 2 Matrice d'inférence du PI-Flou à cinq ensembles

Du		dE				
		NG	NP	EZ	PP	PG
En	NG	NG	NG	NP	NP	EZ
	NP	NG	NP	NP	EZ	PP
	EZ	NP	NP	EZ	PP	PP
	PP	NP	EZ	PP	PP	PG
	PG	EZ	PP	PP	PG	PG

IV.2.3. Contrôleur Pi-flou à sept ensembles

Les fonctions d'appartenance correspondant aux ensembles flous

- Négatif grand noté NG.
- Négatif moyen noté NM.
- Négatif petit noté NP.
- Environ de zéro noté EZ.
- Positif petit noté PP.
- Positif moyen noté PM
- Positif grand noté PG.

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires à l'intermédiaire et trapézoïdales à l'extrémité comme le montre la figure suivante :

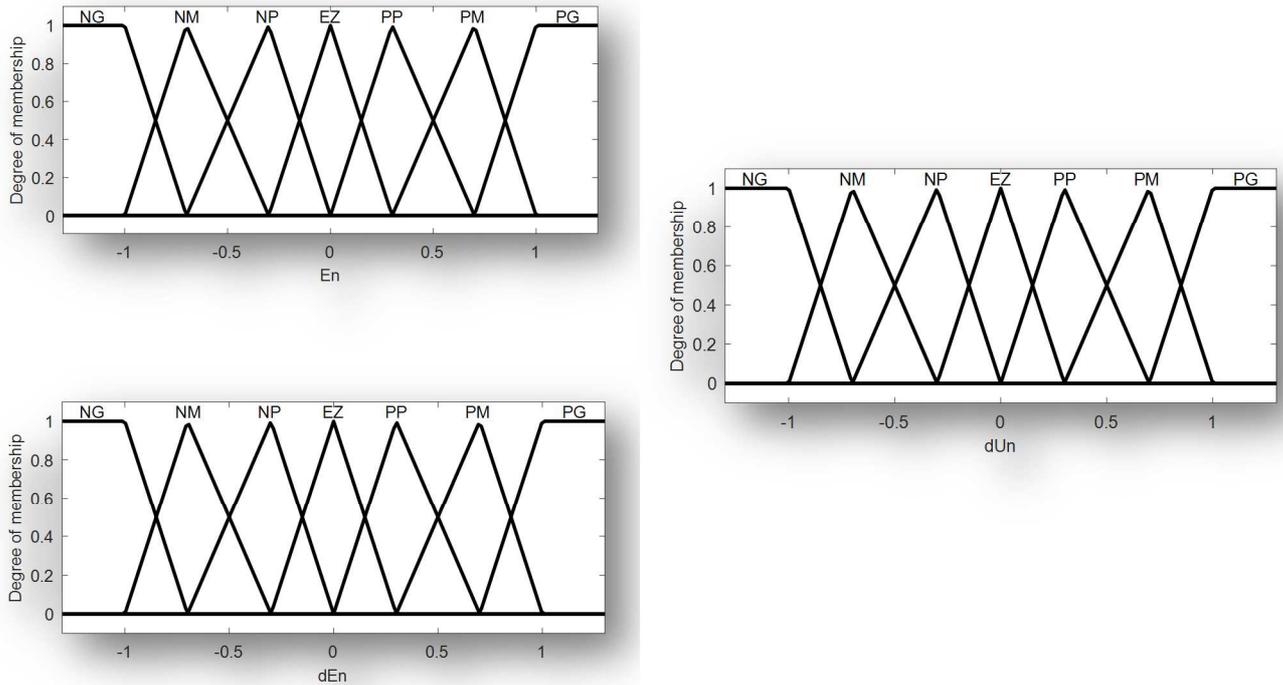


Figure IV. 4 Entrées et sortie du contrôleur PI-flou à sept ensembles

Tableau IV. 3 Matrice d'inférence 7 ensemble

dU		dE						
		NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
En	NG	NG	NG	NG	NP	NP	NP	EZ
	NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
	NP	NG	NG	NP	NP	EZ	PP	PP
	EZ	NP	NM	NP	EZ	PP	PM	PP
	PP	NP	NP	EZ	PP	PP	PG	PG
	PM	NP	EZ	PM	PM	PG	PG	PG
	PG	EZ	PP	PP	PP	PG	PG	PG

IV.2.4. Résultat de simulation

Le contrôleur PI-flou a été implanté avec succès pour sept ensembles, sur le modèle de la chaîne de conversion au niveau de la vitesse ensembles. Les résultats obtenus ont donné de très bonnes performances dynamiques on note en particulier les points suivants

- On constate que la vitesse suit sa référence sans dépassement avec erreur minimale ce qui confirme le fonctionnement correcte de l'algorithme flou de ce type de contrôleur.
- La variation du courant isq est suivie par une variation du couple électromagnétique d'après la relation entre eux.
- La tension de bus continu suit sa référence avec une erreur quasi nulle

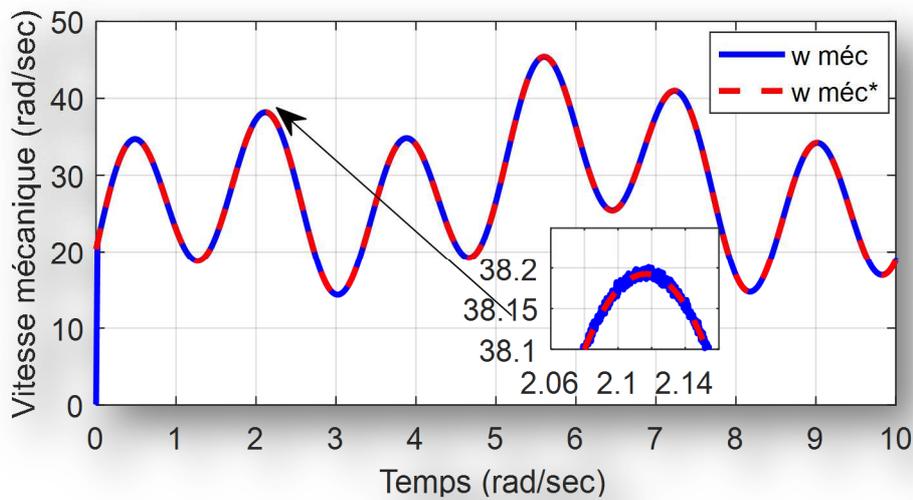


Figure IV. 5 Vitesse mécanique PI-FLOU

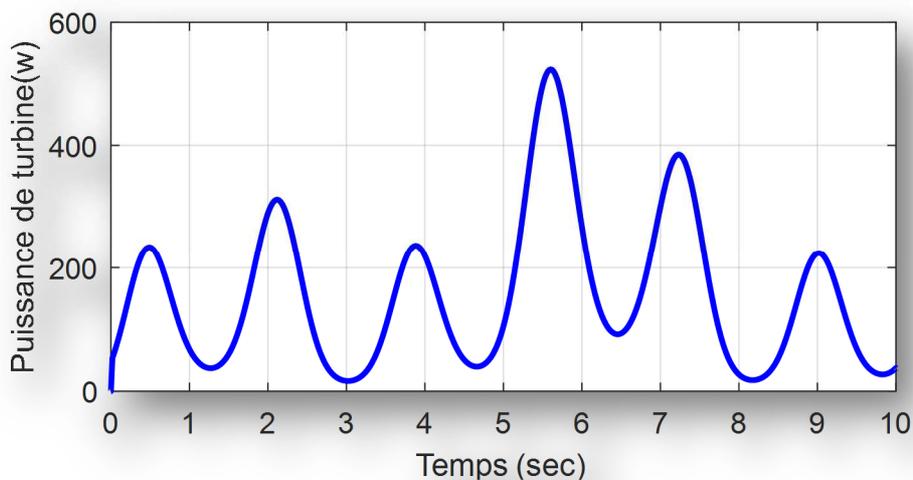


Figure IV. 6 Puissance de la turbine PI-FLOU

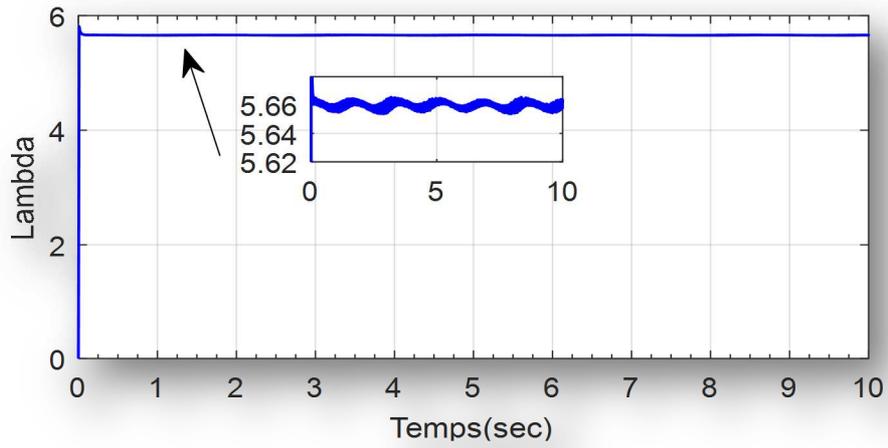


Figure IV. 7 courbe de lambda PI-FLOU

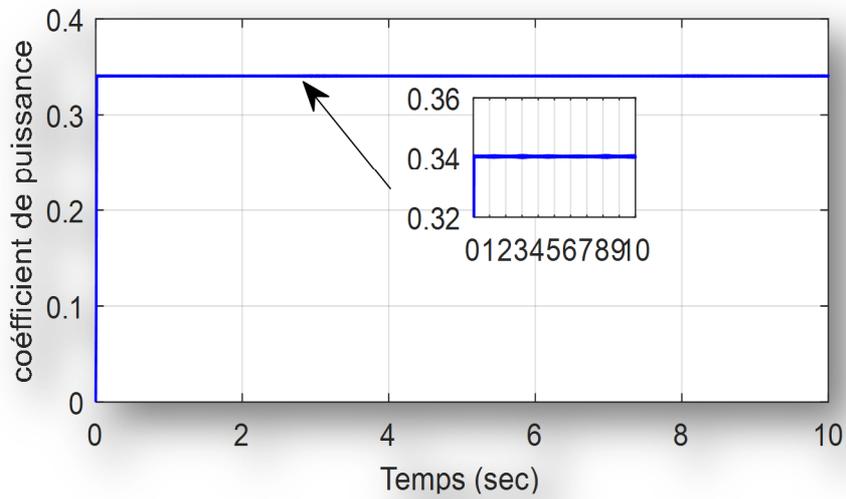


Figure IV. 8 Courbe de coefficient de puissance PI-FLOU

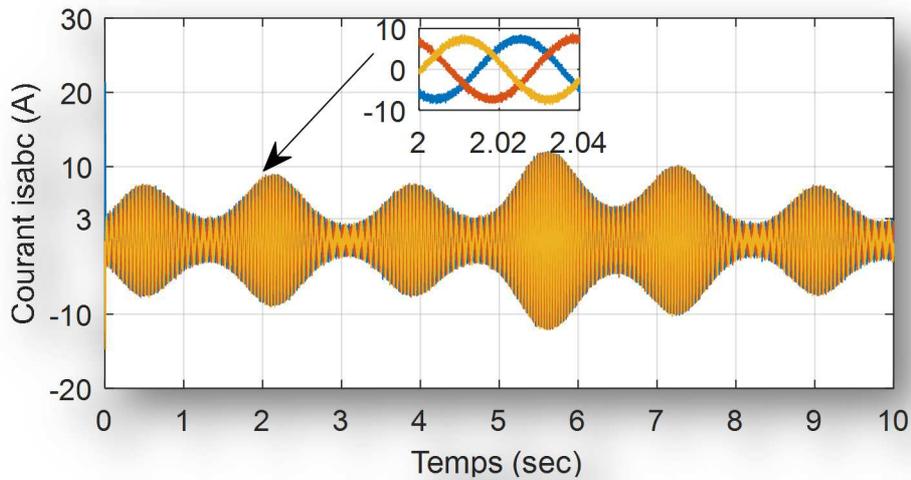


Figure IV. 9 courant Isabc PI-FLOU

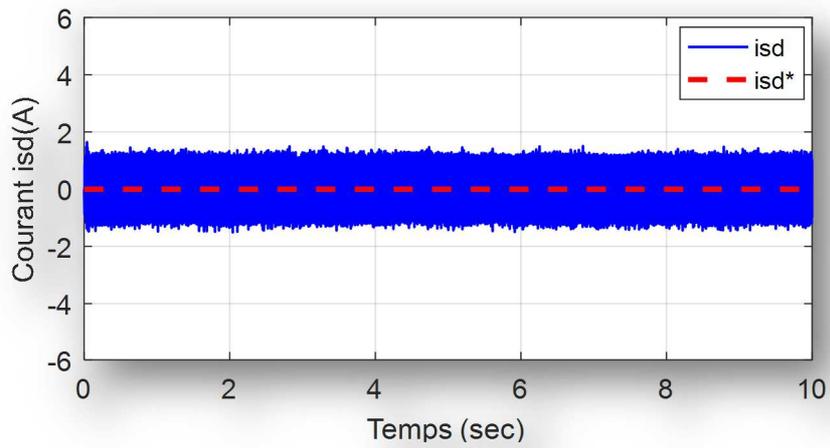


Figure IV. 10 Courant i_{sd} PI-FLOU

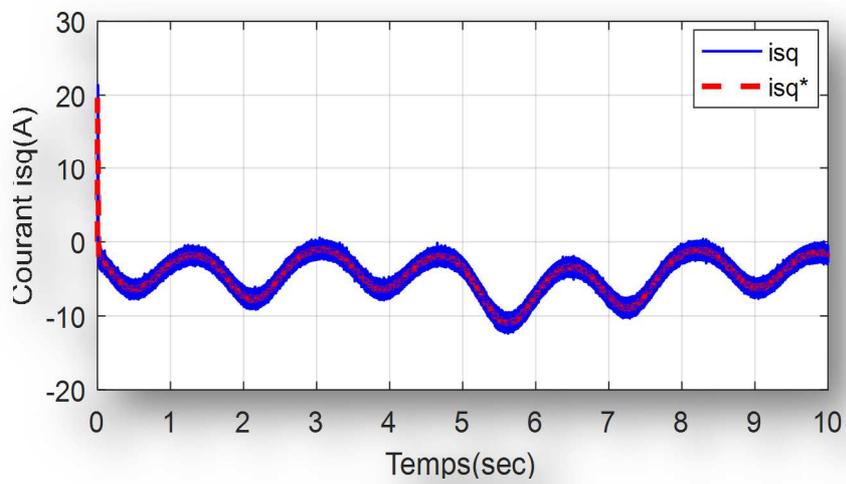


Figure IV. 11 Courant i_{sq} PI-FLOU

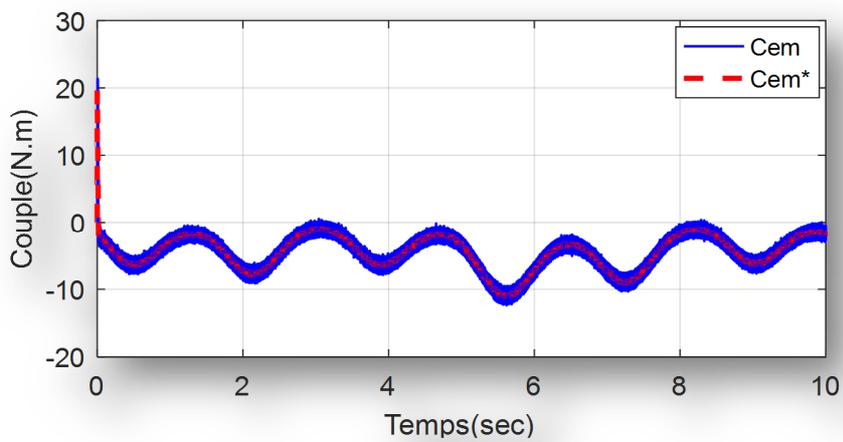


Figure IV. 12 Couple PI-FLOU

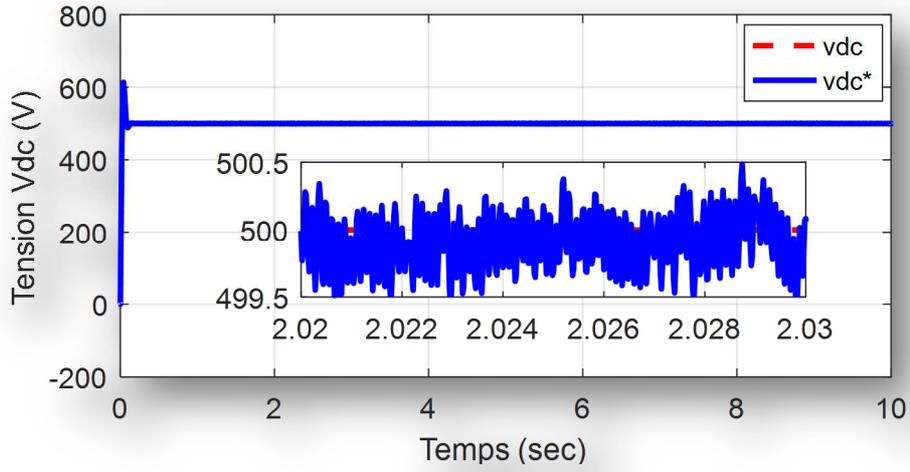


Figure IV. 13 Tension Vdc PI-FLOU

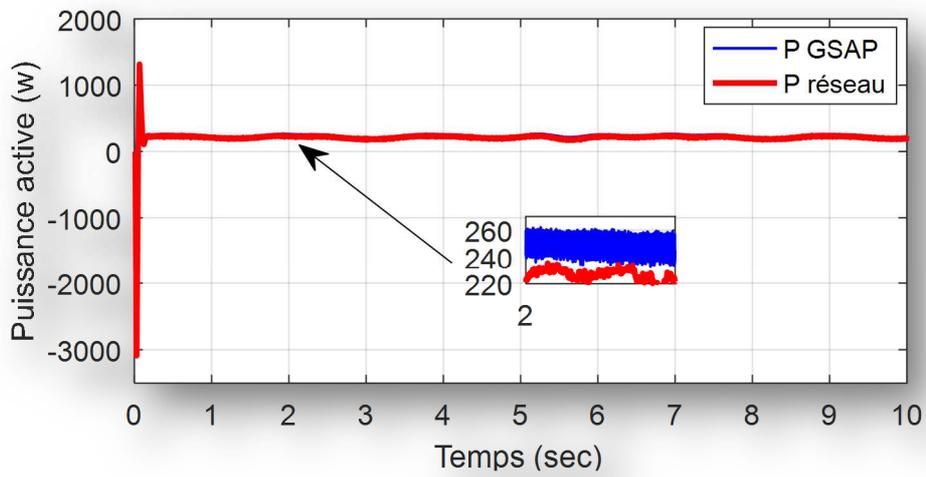


Figure IV. 14 Puissance active PI-FLOU

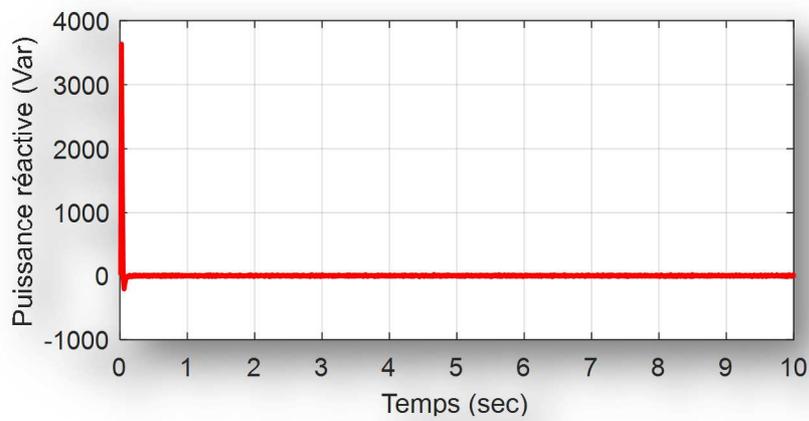


Figure IV. 15 Puissance réactive PI-FLOU

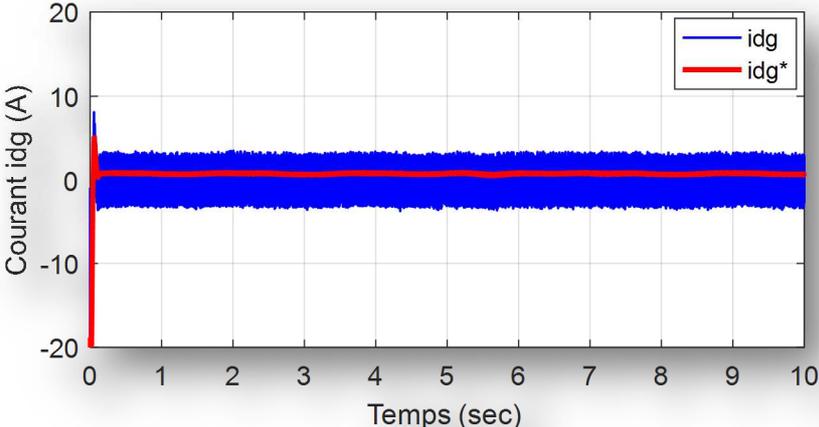


Figure IV. 16 Courant Idg PI-FLOU

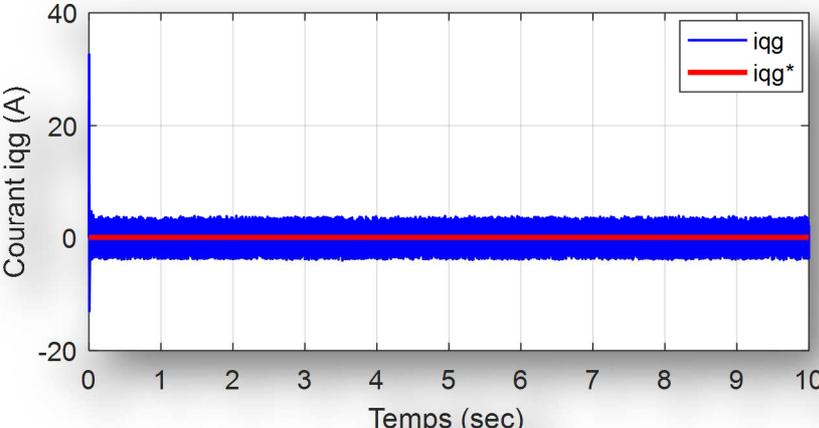


Figure IV. 17 Courant Iqg / PI-FLOU

IV.3. Contrôleur flou adaptatif à trois ensembles

Les entrées de contrôleur flou sont l'erreur E et sa dérivée dE , Les sorties sont la valeur normalisée de l'action proportionnelle et la valeur normalisée de l'action intégrale. Ces deux grandeurs de la commande sont normalisées dans l'intervalle $[-1,1]$.

Les fonctions d'appartenance pour les entrées E et dE sont défini dans l'intervalle $[-1,1]$

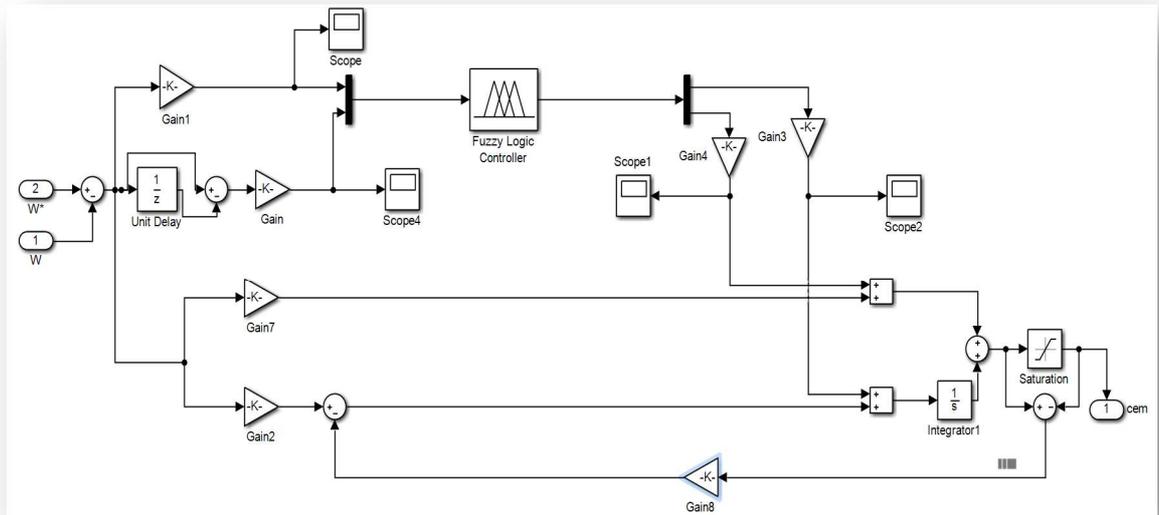


Figure IV-23 Schéma bloc Simulink du contrôleur flou adaptatif à trois entrées

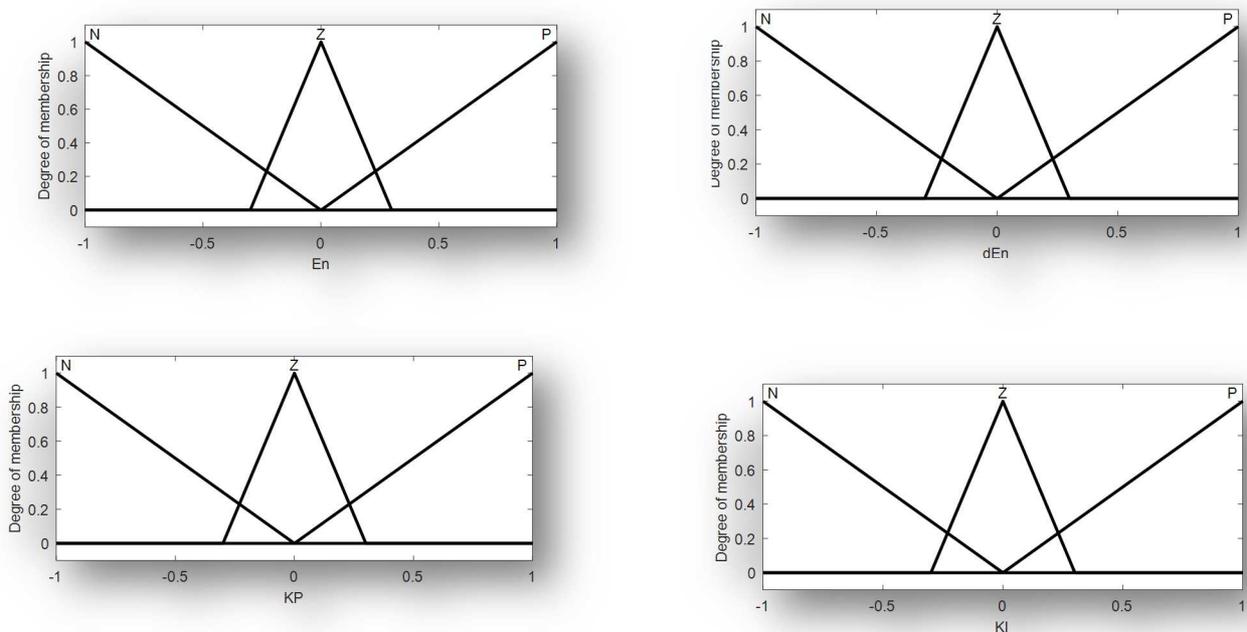


Figure IV. 18 Entrées et sorties du contrôleur flou adaptatif à trois ensembles

Tableau IV.4 matrice d'inférence du régulateur flou à trois entrées.

E	N		EZ		P	
ΔE	ΔKp	ΔKi	ΔKp	ΔKi	ΔKp	ΔKi
N	N	P	P	N	N	P
EZ	P	N	EZ	EZ	N	P
P	P	N	N	P	P	N

Le system flou est utilisé pour modifier les paramètres Kp et Ki selon le comportement du procédé, Dans notre cas. Les gains de la commande sont adaptés en temps réel sont calculés par

$$Kp' = Kp + GpdKp(E, dE) \quad (IV.1)$$

$$Ki' = Ki + GidKi(E, dE) \quad (IV.2)$$

II.3.1. Résultat de simulation

Le contrôleur flou adaptatif à trois ensembles a été implanté avec succès pour les trois cas de : trois, cinq et sept ensembles sur le modèle de la chaine de conversion au niveau de la vitesse. Les performances dynamiques qui ont été obtenues sont très proches de celles obtenues avec le contrôleur PI-flou

- On constate aussi que la vitesse suit sa référence sans dépassement avec erreur minimale ce qui confirme le fonctionnement de l'algorithme
- La tension de bus continu suit sa référence avec une erreur quasi nulle

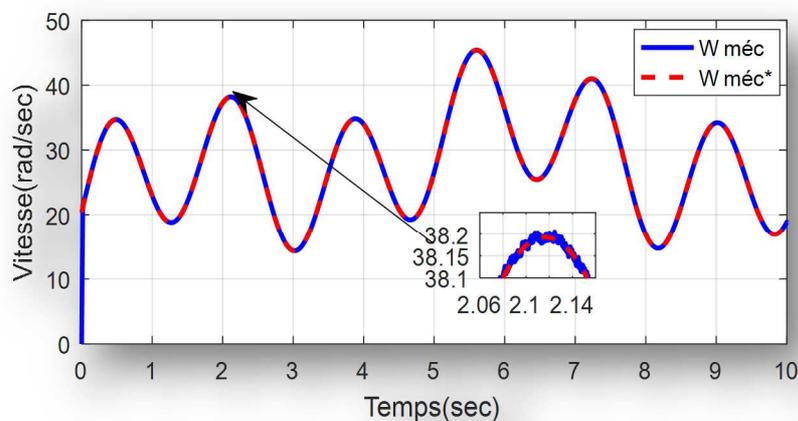


Figure IV. 19 Courbe de Vitesse / PI adaptatif à trois ensembles

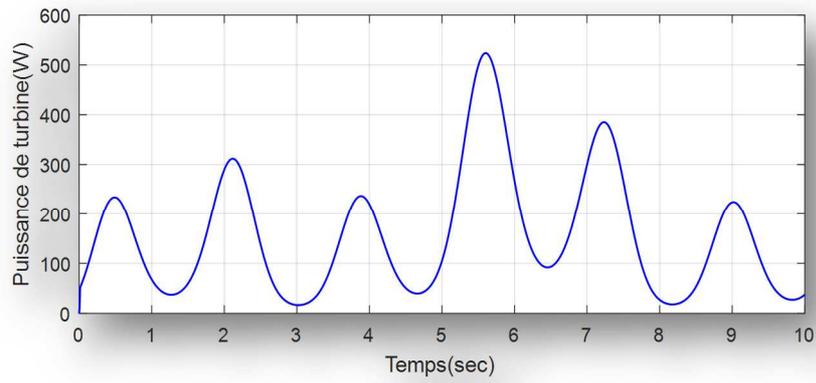


Figure IV. 20 Puissance turbine / PI adaptatif à trois ensembles

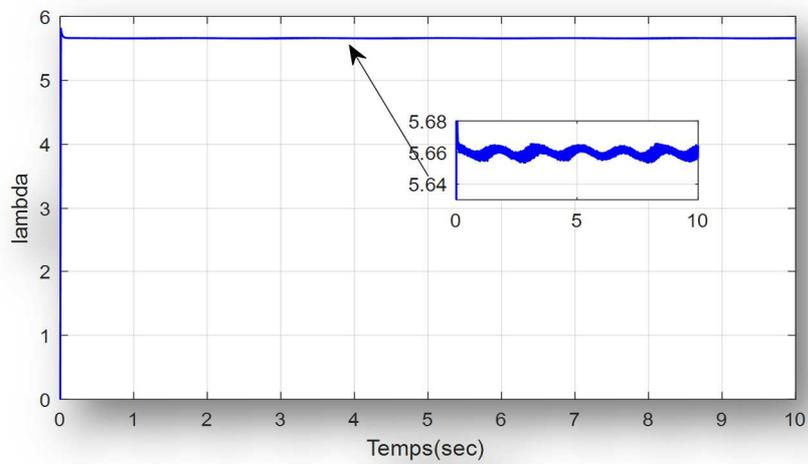


Figure IV. 21 courbe de Lambda / PI adaptatif à trois ensembles

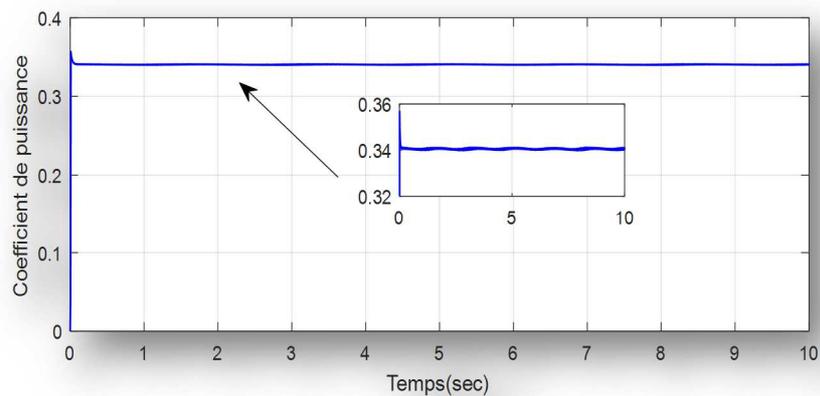


Figure IV. 22 courbe de Cp / PI adaptatif à trois ensembles

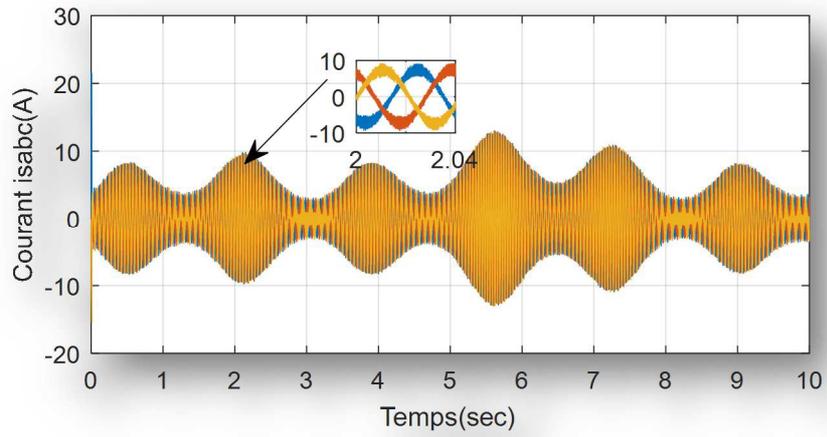


Figure IV. 23 courant isabc / PI adaptatif à trois ensembles

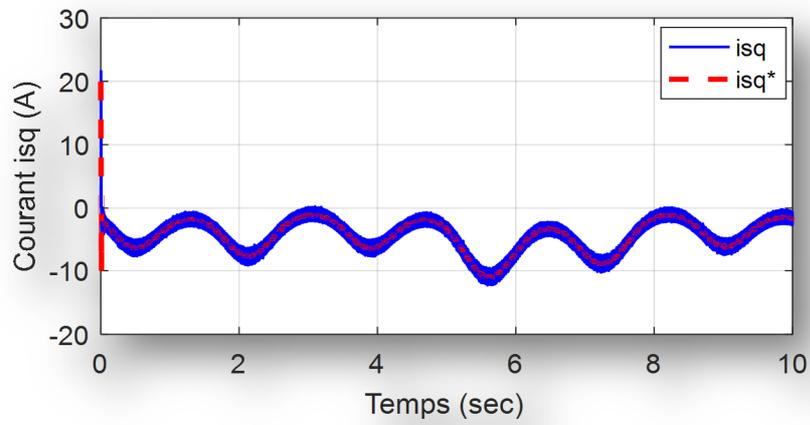


Figure IV. 24 le courant Isq / PI adaptatif à trois ensembles

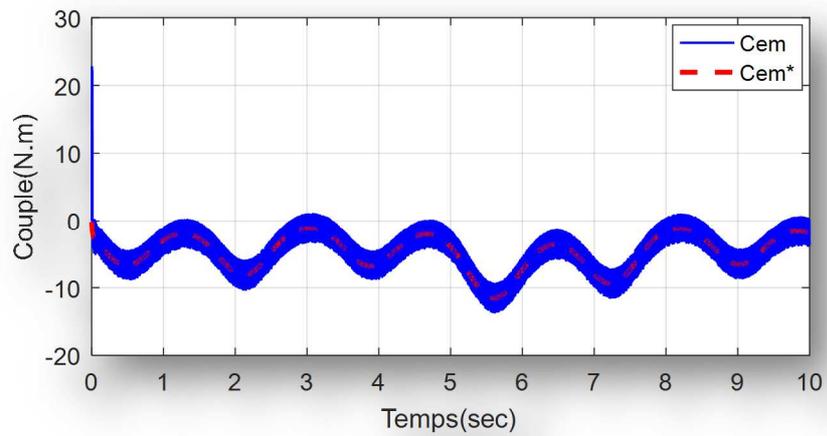


Figure IV. 25 couple / PI adaptatif à trois ensembles

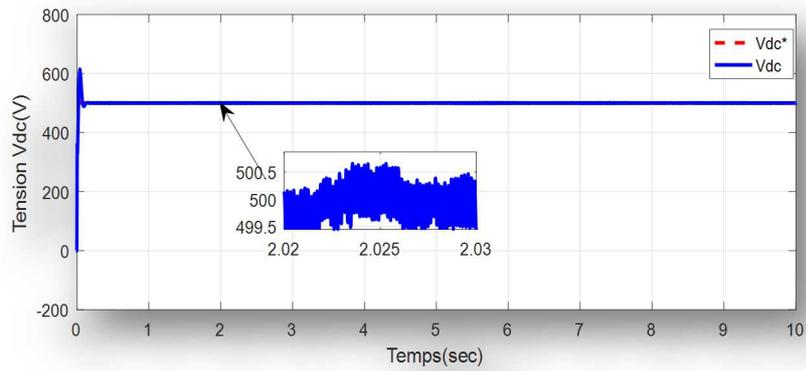


Figure IV. 26 tension Vdc / PI adaptatif à trois ensembles

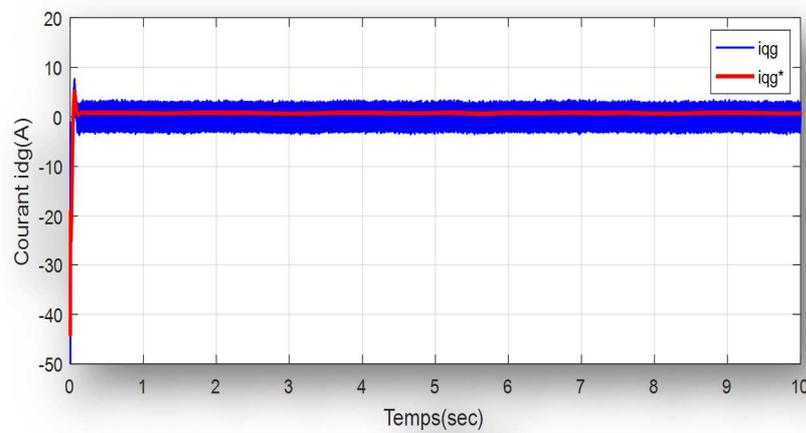


Figure IV. 27 courant Iqg

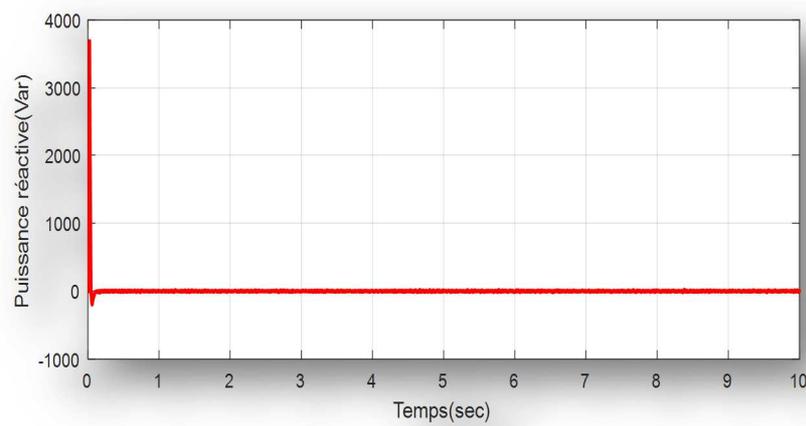


Figure IV. 28Puissance réactive / PI adaptatif à trois ensembles

IV.4. Contrôleur flou adaptatif à sept ensembles

Le régulateur admet sept ensembles flous, Les fonctions d'appartenance correspondant aux ensembles flous

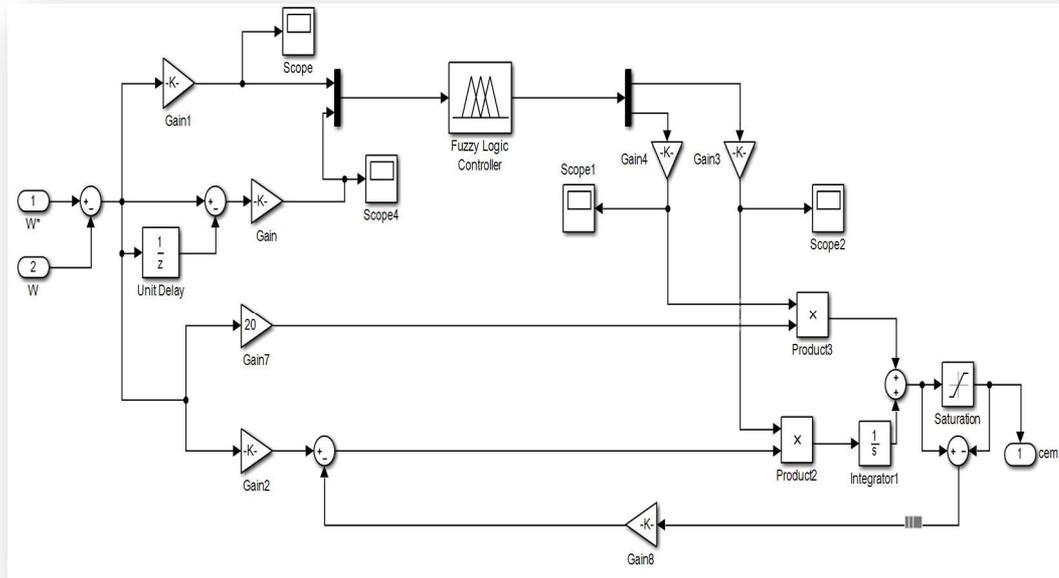


Figure IV. 29 Schéma bloc Simulink de contrôleur flou adaptatif à sept ensembles

- Négatif grand noté NG,
- Négatif moyen noté NM,
- Négatif petit noté NP,
- Environ de zéro noté EZ,
- Positif petit noté PP,
- Positif moyen noté PM,
- Positif grand noté PG.

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable d'entrées les formes triangulaires et gaussiennes pour les deux sorties comme la montre les figures suivantes :

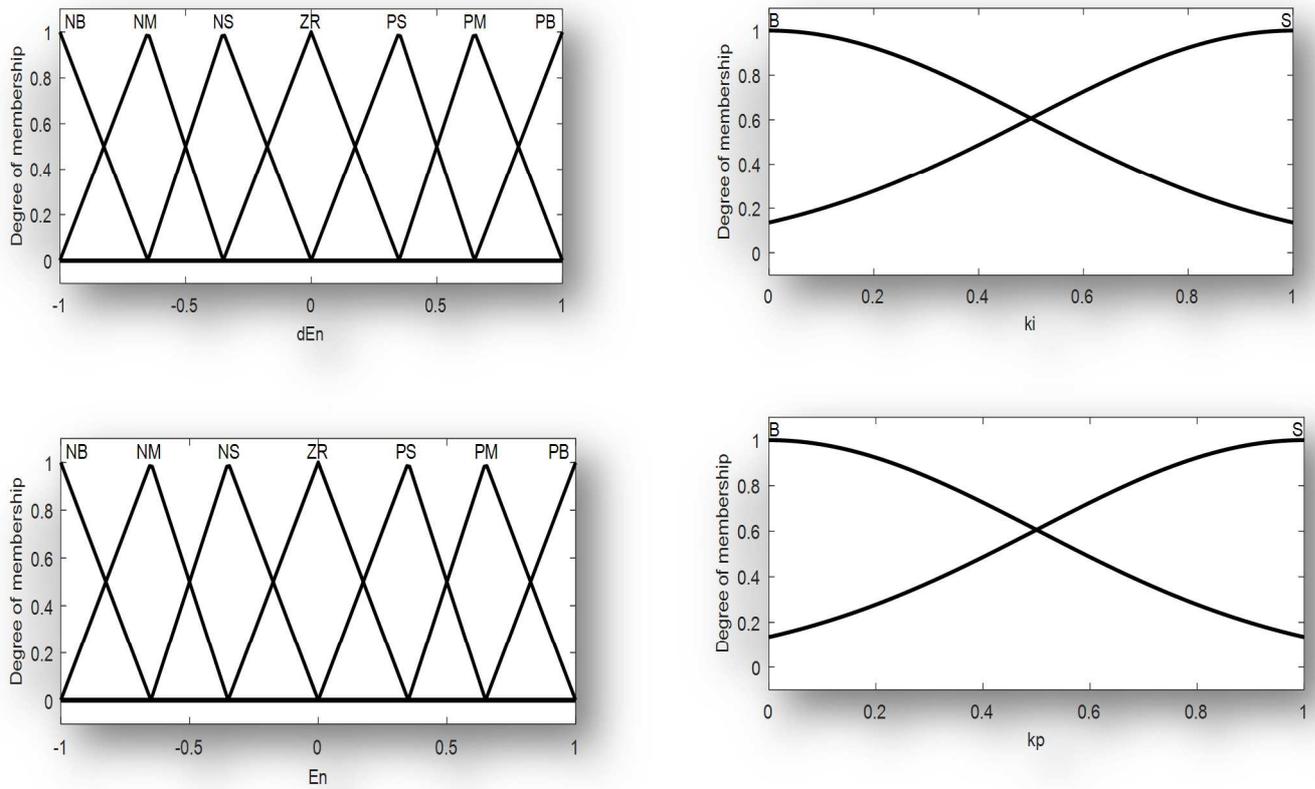


Figure IV. 30 Entrées et sorties du contrôleur flou adaptatif à sept ensembles

Tableau IV. 5matrice d'inférence

Kp, Ki		dE						
		NG	NM	NP	ZR	PG	PM	PP
E	NG	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NP	S	S	B	B	B	S	S
	ZR	S	S	S	B	S	S	S
	PG	S	S	S	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PP	B	B	B	B	B	B	B

IV.4.1. Résultats de simulation

Le contrôleur flou adaptatif à sept ensembles a été implanté avec succès sur le modèle de la chaîne de conversion au niveau de la vitesse. Les performances dynamiques qui ont été obtenues sont peu différentes de celles obtenues avec le contrôleur flou adaptatif à trois ensembles.

- On constate aussi que la vitesse suit sa référence sans dépassement avec erreur minimale ce qui confirme le fonctionnement de l'algorithme,
- Le choix des gains nous permis de trouver une réponse de vitesse très satisfaisante,
- La tension de bus continu suit sa référence avec une erreur quasi nulle.

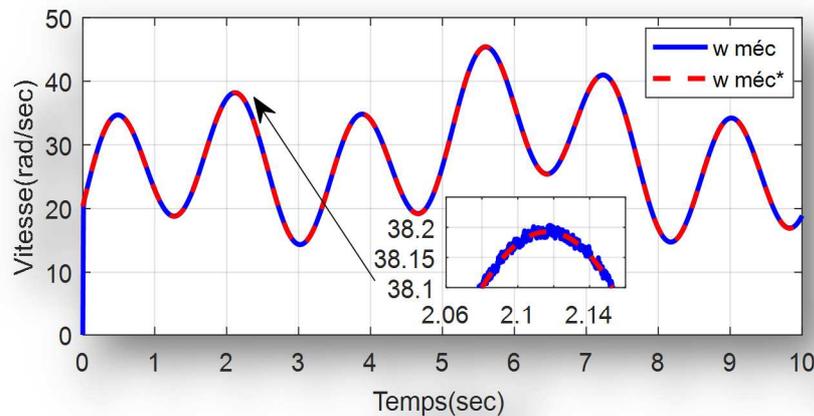


Figure IV. 31 vitesse / PI adaptatif à sept ensembles

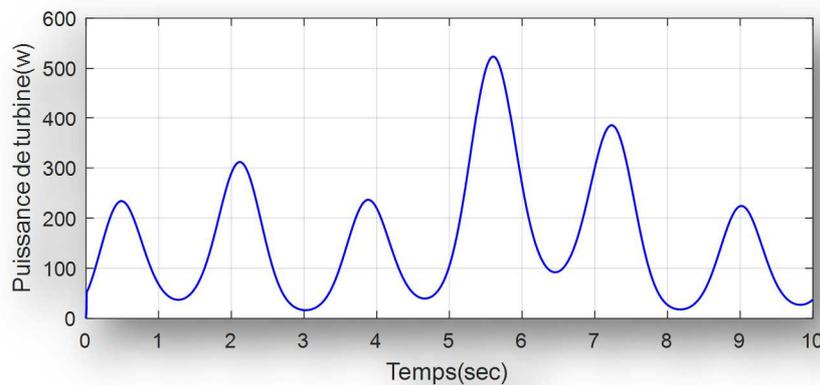


Figure IV. 32 puissance de la turbine / PI adaptatif à sept ensembles

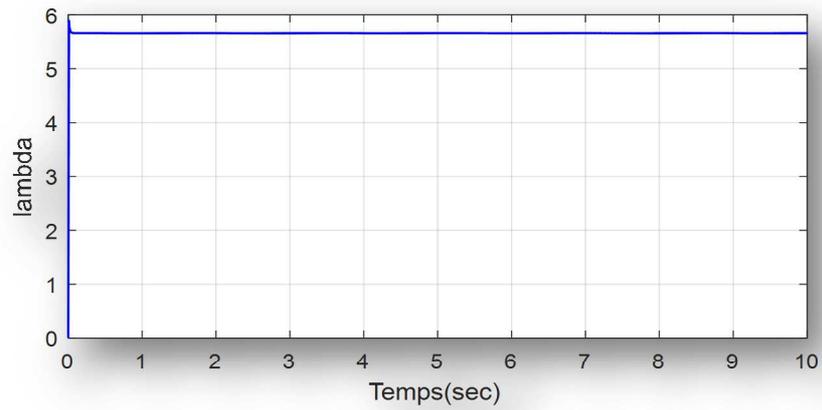


Figure IV. 33 Courbe de lambda / PI adaptatif à sept ensembles

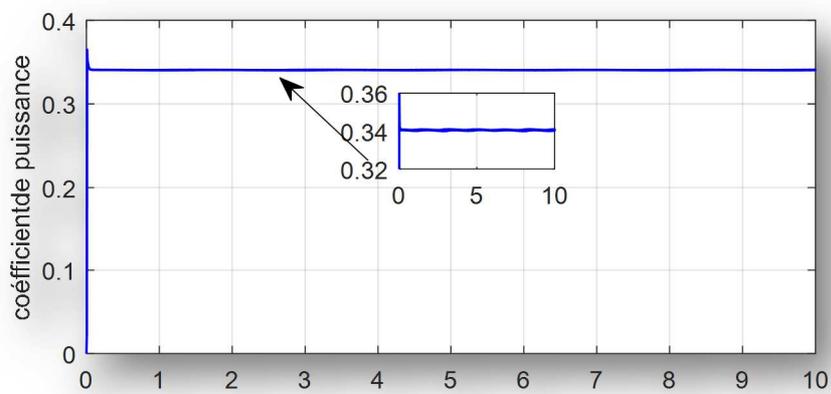


Figure IV-46 coefficient de puissance

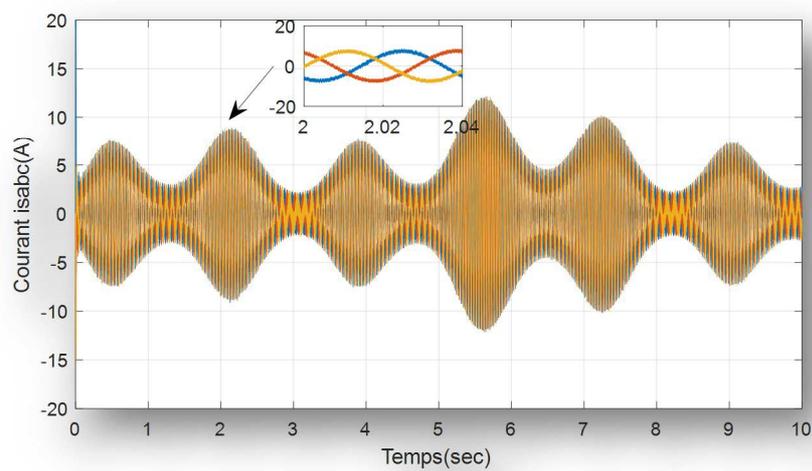


Figure IV. 34 courant Isabc / PI adaptatif à sept ensembles

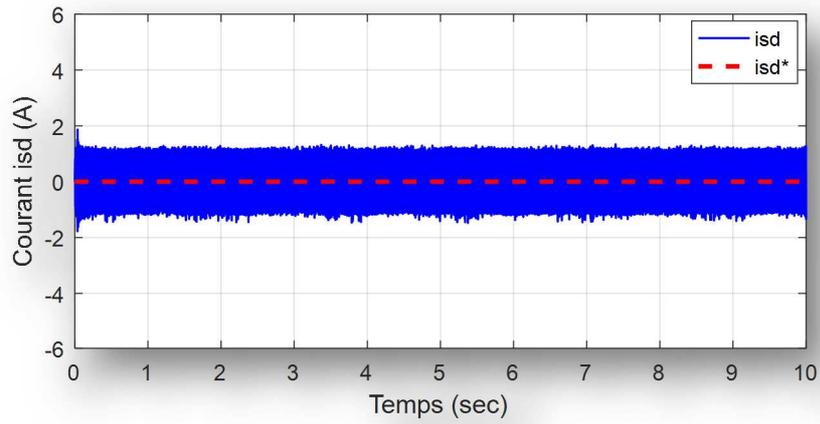


Figure IV. 35 courant isd / PI adaptatif à sept ensembles

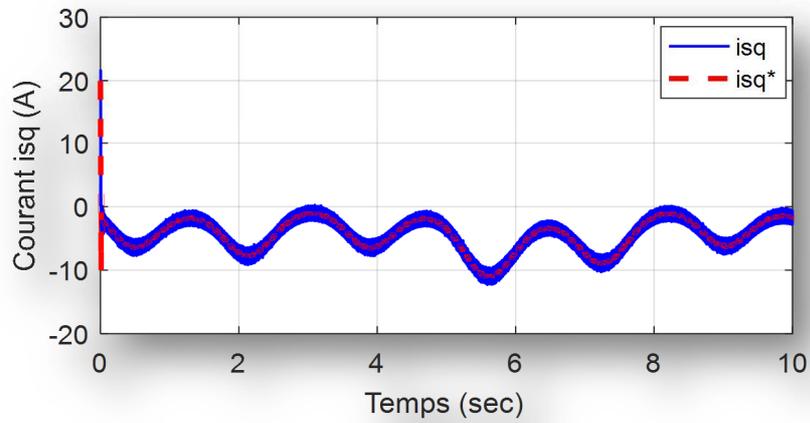


Figure IV. 36 courant Isq/ PI adaptatif à sept ensembles

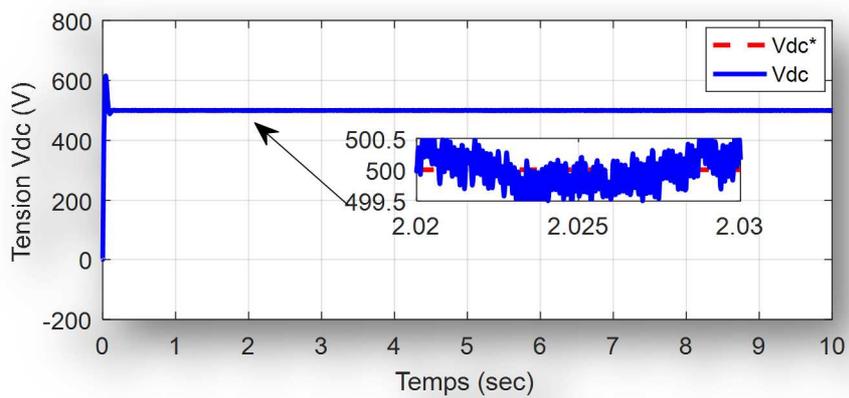


Figure IV. 37 tension Vdc / PI adaptatif à sept ensembles

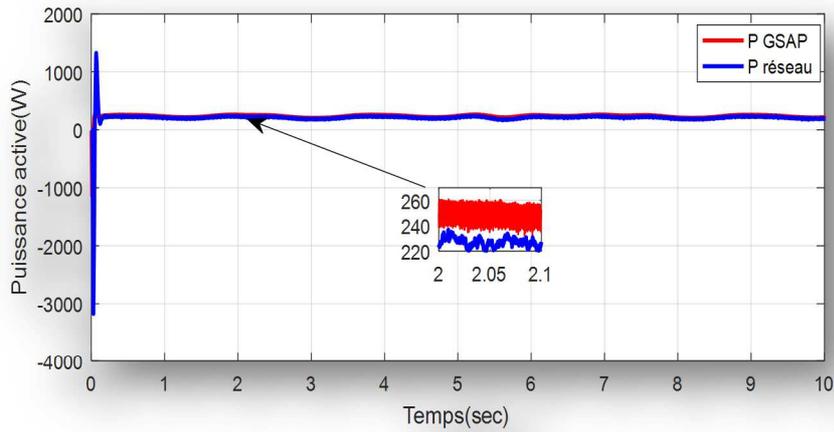


Figure IV. 38 puissance / PI adaptatif à sept ensembles

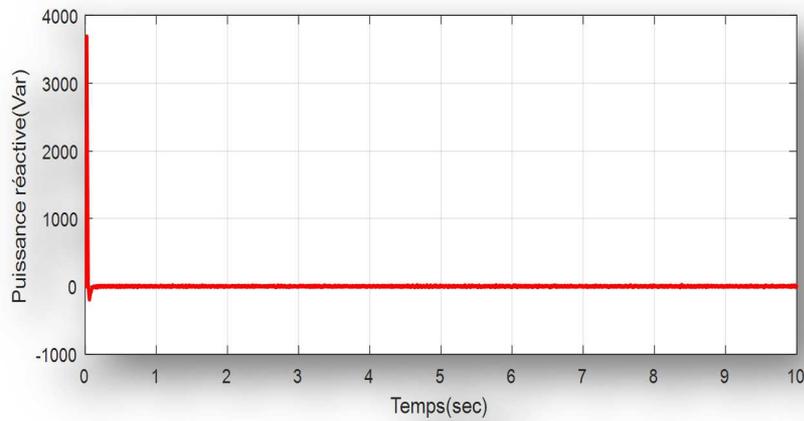


Figure IV. 39 puissance réactive / PI adaptatif à sept ensembles

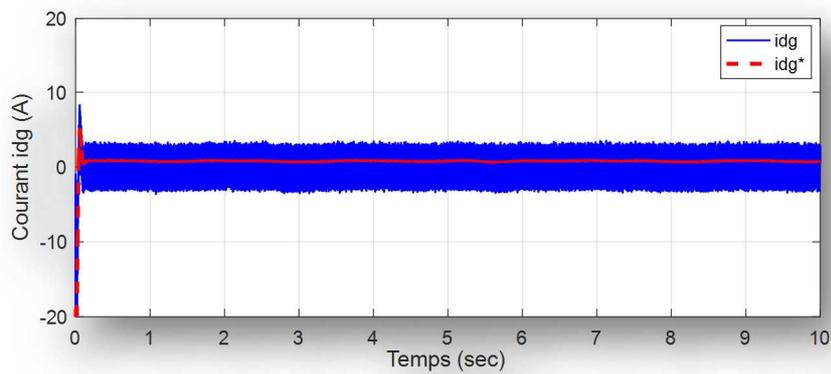


Figure IV. 40 courant Idq / PI adaptatif à sept ensembles

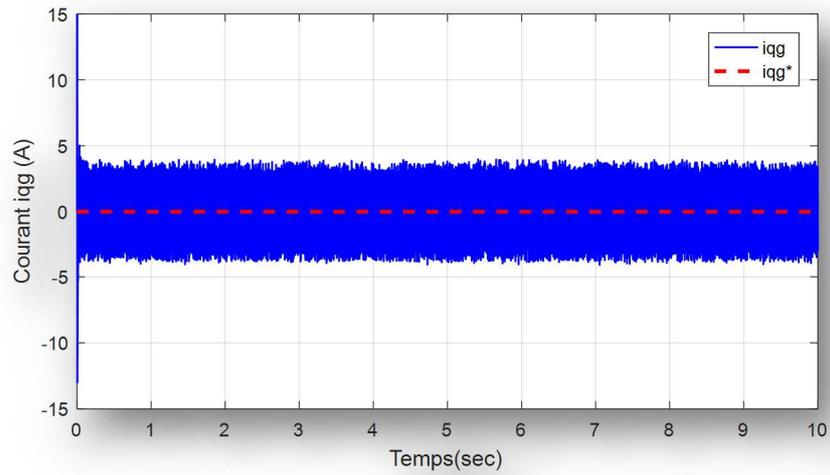


Figure IV. 41 courant i_{qg} / PI adaptatif à sept ensembles

IV.5. Contrôleur flou type 2

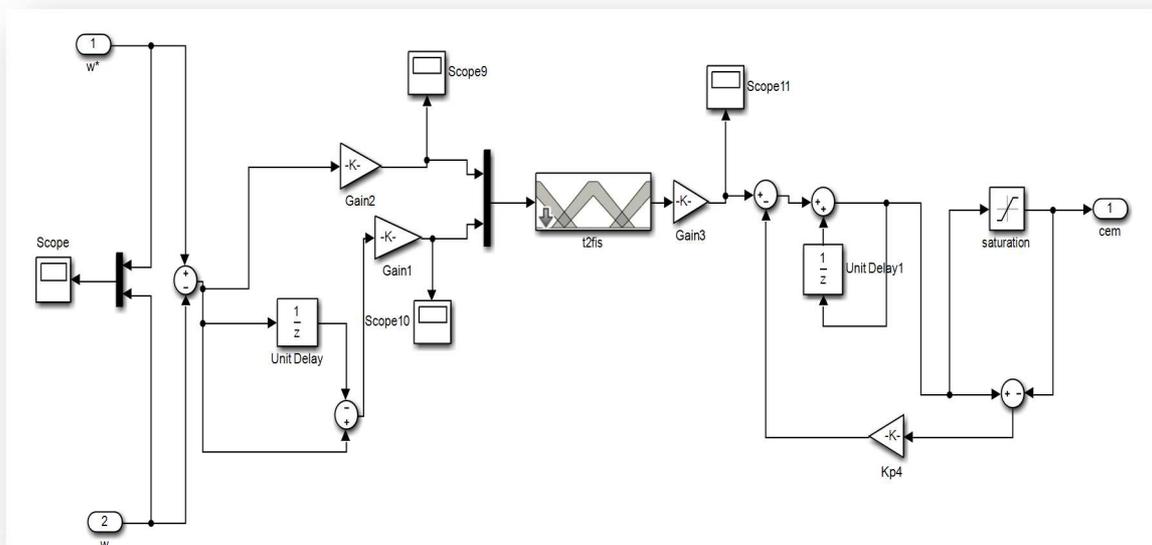


Figure IV. 42 Schéma bloc Simulink de contrôleur flou type 2

Entrées : Erreur, dérivée de l'erreur et la sortie Sugeuno

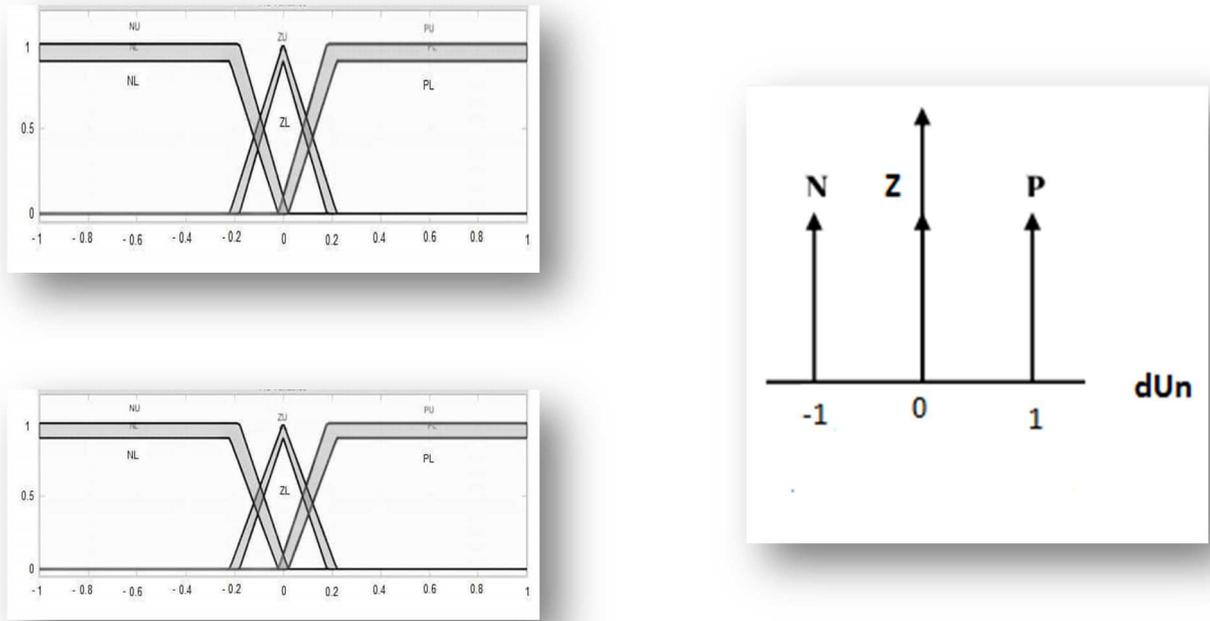


Figure IV. 43 Entrées et sortie du contrôleur flou type 2 proposé

Tableau IV.6 matrice d'inference

Du	dEn			
	N	Z	P	
En	N	N	Z	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

IV.5.1. Résultat de simulations

Le contrôleur flou type2 a été proposé comme extension au PI-flou à trois ensemble Son fonctionnement demande une puissance de calcul et un environnement de travail au niveau de du programme utilisé à savoir le FyzyTool Box ou la Boite à Outil floue

Le nombre de trois ensembles et la forme linéaire des fonctions d'appartenance nous ont permis de l'implanter avec succès sur le modèle de la chaine de conversion au niveau de la vitesse. Les performances dynamiques qui ont été obtenues sont peu différentes de celles obtenues avec les contrôleurs flous utilisés PI-flou et adaptatifs.

- On constate aussi que la vitesse suit sa référence sans dépassement

- Le choix rapide des gains au voisinage des valeurs obtenus avec le PI-flou à toirs ensembles nous permis de trouver une réponse de vitesse très satisfaisante,
- De même, la tension de bus continu suit sa référence avec une erreur quasi nulle

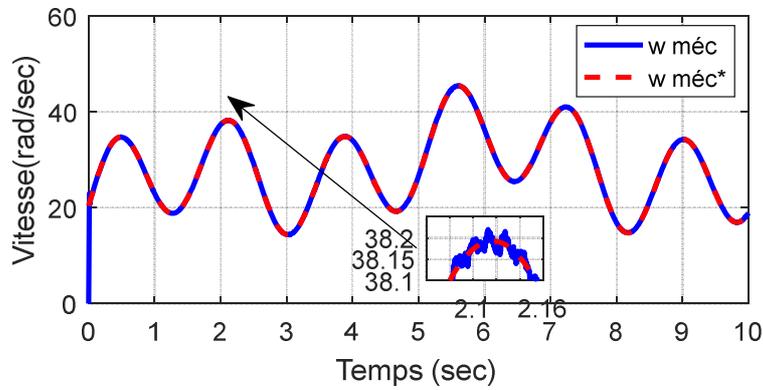


Figure IV. 44 Vitesse /contrôleur flou type 2 proposé

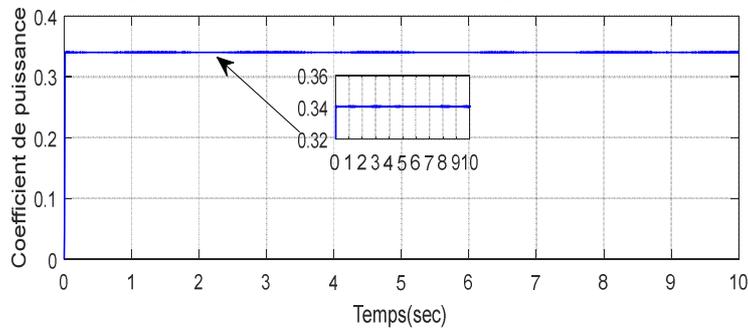


Figure IV-1 coefficient de puissance/ contrôleur flou type 2 proposé

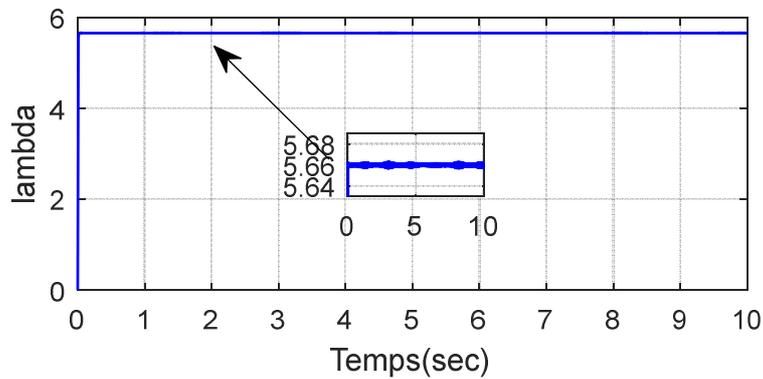


Figure IV. 45courbe de lambda / contrôleur flou type 2 proposé

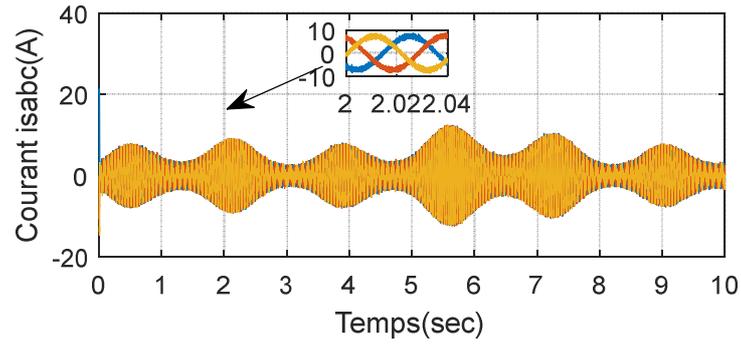


Figure IV. 46 courant i_{sabc} / contrôleur flou type 2 proposé

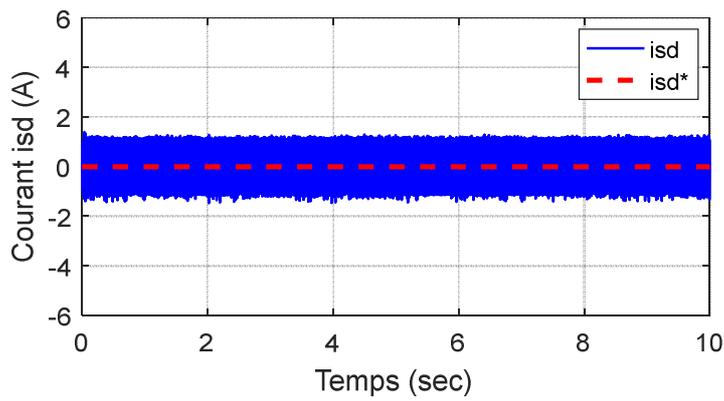


Figure IV. 47 Courant i_{sd} / contrôleur flou type 2 proposé

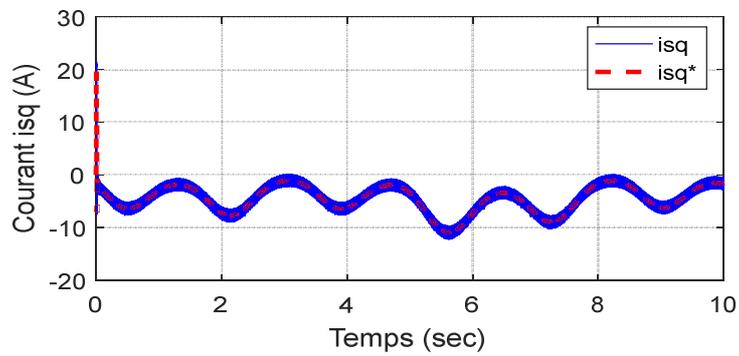


Figure IV. 48 courant i_{sq} / contrôleur flou type 2 proposé

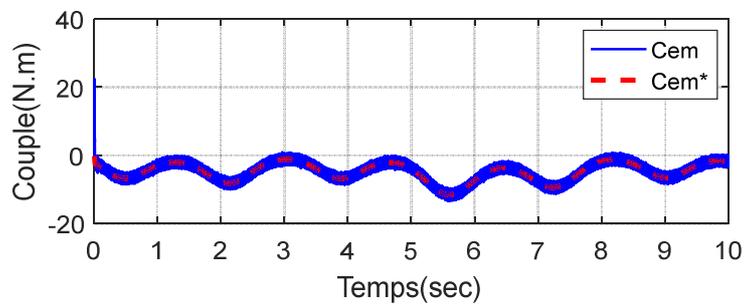


Figure IV. 49 couple / contrôleur flou type 2 proposé

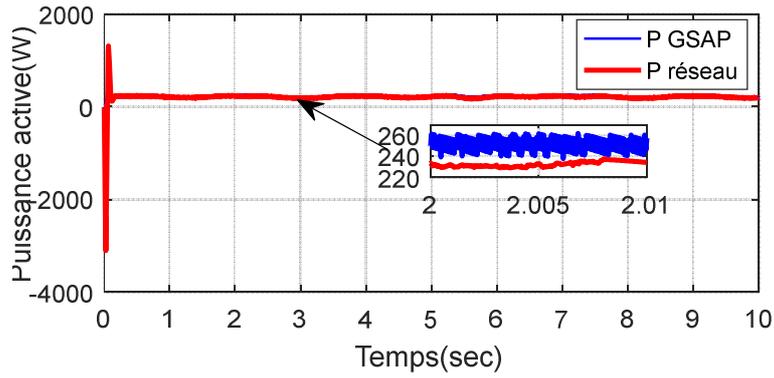


Figure IV. 50 puissance active / contrôleur flou type 2 proposé

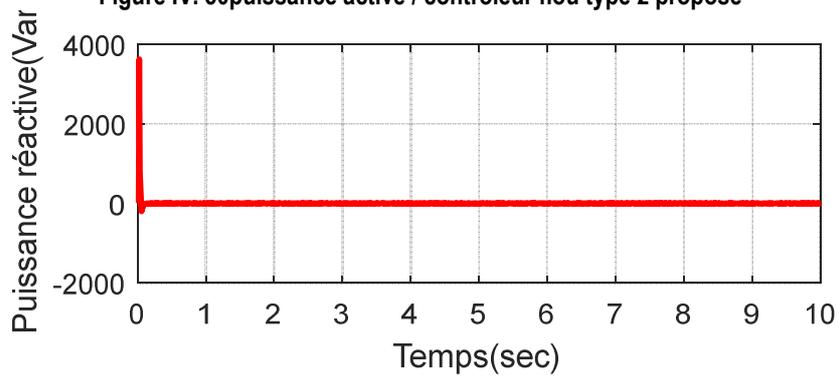


Figure IV-85 Puissance réactive

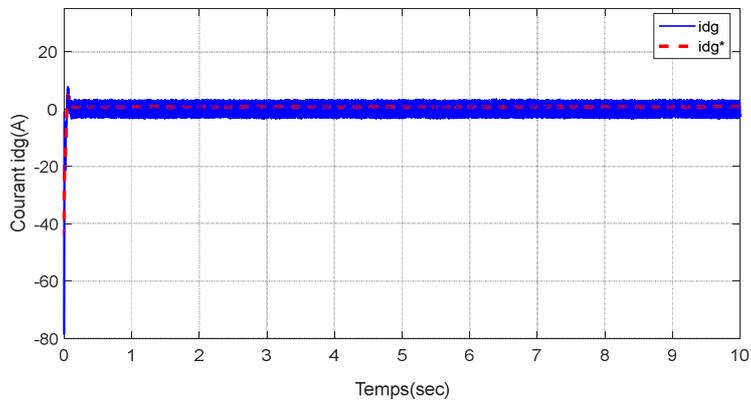


Figure IV. 51 courant Idg / contrôleur flou type 2 proposé

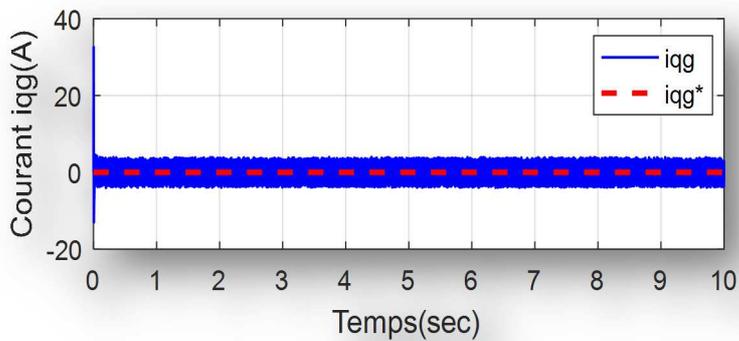


Figure IV. 52 courant Iqg/ contrôleur flou type 2 proposé

IV.6. Étude comparative

Dans le but de faire une comparaison entre les dynamiques des réponses de la vitesse par rapport aux différents régulateurs développés dans ce travail à savoir le contrôleur conventionnel PI, le contrôleur PI-flou, les trois contrôleur flou adaptatif ainsi que le contrôleur flou type 2 proposé par rapport à une vitesse constante comme référence..

D'après les résultats obtenus on constate que :

- Une meilleure dynamique est obtenue de façon générale avec la commande floue
- En particulier contrôleur PI-flou donne les meilleurs résultats ceci peut être expliqué par le choix convenable des gains de normalisation utilisé lors des essais de tatonnement. .

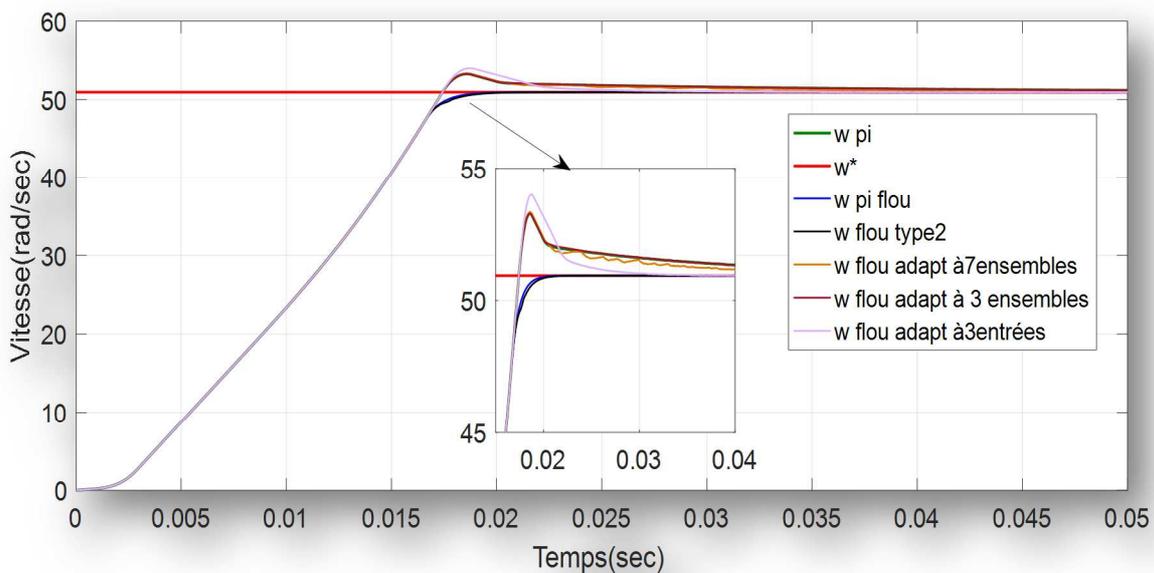


Figure IV. 53 Comparaison de la vitesse

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué avec succès les 3 types de contrôleur flous présentés dans le troisième chapitre dans un objectif d'améliorer la réponse de la vitesse tout en maintenant le fonctionnement de la MPPT et la tension continue.

L'application est simulée numériquement en utilisant l'outil MATLAB (Simulink), mais le dimensionnement du régulateurs flous est fait par ajustement manuel en utilisant la méthode « essai-erreur » (tâtonnement), pour déterminer les trois gains de normalisation K_e , $K_{\Delta e}$ et $K_{\Delta u}$.

Des formules ont été proposées pour réaliser cette approche de tâtonnement et nous avons comparé les valeurs qui ont donné de bons résultats et nous avons constaté qu'elle été au voisinage de ces intervalles

Conclusion

Générale

Le travail présenté ce mémoire a pour objectifs principaux :

- L'étude et la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une GSAP branché au réseau, cette étude comporte la modélisation du vent, de la turbine, de la GSAP ainsi que les convertisseurs statiques,
- Le branchement au réseau en utilisant deux convertisseurs à savoir le redresseur et l'onduleur et cela pour assurer l'écoulement de l'énergie dans les deux sens
- L'application d'une stratégie de contrôle des courants statoriques et de la vitesse en utilisant, dans une première étape un contrôleur conventionnel de type PI pour vérifier le fonctionnement du modèle et vérifier les relations théoriques qui régissent le fonctionnement du système complet,
- L'application du contrôle intelligent en particulier la commande floue avec des architectures différentes,
- L'étude et la comparaison des méthodes proposées afin de dégager les points forts et les points faibles de chaque solution proposée,

Pour atteindre ces objectifs la démarche suivante a été suivie :

Un survol théorique a été fait dans le premier chapitre pour mettre en évidence l'utilisation de l'énergie éolienne à travers le temps avec différentes possibilités pour la construction de l'éolienne ainsi que la machine utilisée pour assurer la conversion de cette énergie en énergie électrique.

La modélisation du système à étudier qui est une opération nécessaire à la commande et à la simulation de la chaîne de conversion éolienne,

L'intelligence artificielle, en particulier la logique floue qui est très proche du raisonnement humains a toujours inspiré les chercheurs électrotechniciens et automaticien pour l'appliquer dans la commande des processus complexes et de nature non précises. Dans ce sens le troisième chapitre été consacré à la présentation de cette théorie de façon à expliquer quelques notions et éléments nécessaires à son application à ce système.

Par la suite trois architectures de contrôleurs flous ont été proposées

- Un contrôleur dit PI-flou déjà utilisé pour la commande de vitesses des machines électriques,
- Des contrôleurs flous adaptatifs avec différentes architecture pour adapter les valeurs du contrôleur conventionnel PI,
- En fin, un contrôleur appelé flou type 2 proposé comme extension du PI-flou utilisé dans notre système.

Ce travail nous a permis de ce type de contrôle avec succès et avec des améliorations des réponses dynamique au niveau des grandeurs commandées, néanmoins beaucoup de difficultés ont été confrontés et qu'on peut résumer principalement par le manque de directives systématique et de formules précises pour le calcul des gains lors du tâtonnement et la non maîtrise de cette théorie qui est encore en train d'être développée.

En perspective ce travail peut être améliorer par d'autres techniques telles que l'auto-ajustement des gains ou l'utilisation des réseaux de neurones artificiels suivi par l'implantation sur un banc d'essai pratique pour valider les solutions proposées

ANNEXES

Annexe A

Paramètres d'une génératrice à aimant permanent	paramètre de la turbine éolienne	
<ul style="list-style-type: none"> • $L_d=8.5e-3$ H 	<ul style="list-style-type: none"> • $C1=0.5176$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $r_o=1.22$
<ul style="list-style-type: none"> • $L_q=8.5e-3$ H 	<ul style="list-style-type: none"> • $C2=116$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $J_t=0.042$ Kg.m²
<ul style="list-style-type: none"> • $L_s=3.95e-04$ H 	<ul style="list-style-type: none"> • $C3=0.4$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $F_t=0.017$ N.m/s
<ul style="list-style-type: none"> • $R_s=2.8750$ Ω 	<ul style="list-style-type: none"> • $C4=5$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $\beta=0$
<ul style="list-style-type: none"> • $P=4$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $C5=21$ 	$\lambda_{opt} = 5.66$
<ul style="list-style-type: none"> • $\phi_{if}=0.175$ J 	<ul style="list-style-type: none"> • $C6=0.0068$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $C_p=0.34$
<ul style="list-style-type: none"> • $J_g=0.0008$ Kg.m² 	<ul style="list-style-type: none"> • $G=5.4$ 	
<ul style="list-style-type: none"> • $F_g=0.001$ N.m/s 	<ul style="list-style-type: none"> • $R=3$ 	

paramètre de bus continue
<ul style="list-style-type: none"> • $C=5e-4$
<ul style="list-style-type: none"> • $V_{dc}=500$

Annexe B

B.2 Loi de Belz

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur [23].

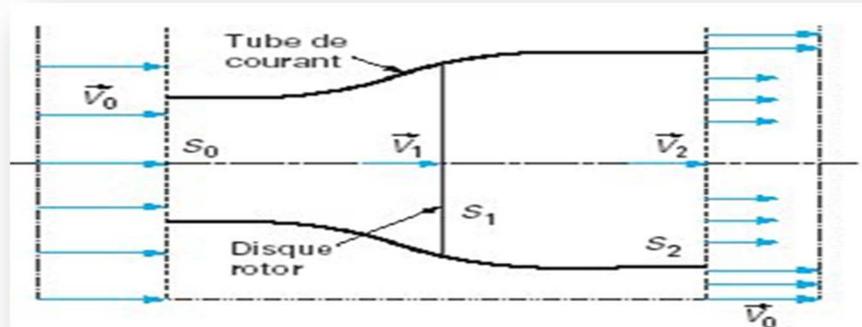


Figure. B.4 : Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur.

Avec

V_0 vitesse axiale initiale du vent	S_0 surface à l'entrée du tube du courant
V_1 vitesse du vent dans le plan du rotor	S_1 surface du rotor
V_2 vitesse du vent à l'aval du rotor	S_2 surface à l'aval du rotor

On supposera l'air incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 V_0 = S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (\text{B.1})$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force F s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho S_1 V_1 (V_0 - V_2) \quad (\text{B.2})$$

On obtient ainsi l'expression de la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur:

$$P = F V_1 = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (\text{B.3})$$

De plus, la masse d'air élémentaire dm traversant l'éolienne pendant le temps dt est :

$$dm = \rho S_1 V_1 dt$$

(B.4)

La variation d'énergie cinétique de cette masse dm lorsque la vitesse passe de la valeur V_0 à la valeur V_2 est défini par :

$$dW_c = 1/2 dm (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{B.5})$$

La variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air est :

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} : 1/2 \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{B.6})$$

En exprimant que $P_c = P$, on en déduit que :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (\text{B.7})$$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de Betz s'énonce :

$$P_r = \frac{1}{4} \rho S_1 (V_0 + V_2)^2 (V_0 - V_2) \quad (\text{B.8})$$

La relation devant exister entre V_0 et V_2 pour que cette puissance P_r passe par un maximum soit :

$$dP_r/dV_2 = 0 \quad \text{soit} \quad V_0 = 3 V_2 \quad (\text{B.9})$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{max} = (8/27) \rho S V_0^3 = (16/27) (1/2 \rho S V_0^3) = 16 / 27 P_d \quad (\text{B.10})$$

Ce qui signifie que de la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de $\frac{16}{27} \times 100 = 59,29\%$ de la puissance disponible due au vent, c'est la **limite de Betz**.

Annexe C

Conceptions des régulateurs

Les régulateurs ont d'une part, la tâche de stabiliser le circuit de réglage, et d'autre part, ils viennent pour assurer une meilleure précision et un temps de réponse meilleur. Les régulateurs standards de type PI, IP, PI-P ou PID sont les plus utilisés dans le domaine des réglages industriels.

Soit $Y^*(t)$ le signal à poursuivre, et $Y(t)$ le signal de sortie du système à contrôler.

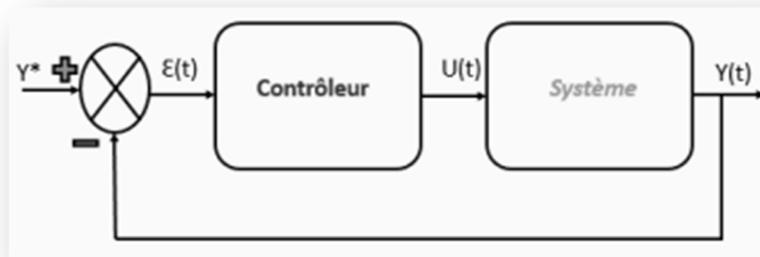


Figure C-1 Représentation de la commande par PI

La loi de commande est :

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) \cdot dt \quad (\text{C.1})$$

Action proportionnelle (K_p)

Si K_p est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.

Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

Action intégrale (K_i)

L'action intégrale régit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

Depuis l'équation (C.1) on trouve :

$$\frac{U(t)}{\varepsilon(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{C.2})$$

Avec :

K_p : Gain Proportionnelle

K_i : Gain intégrale

T_i : Constante de temps d'intégration, tel que $T_i = \frac{1}{K_i}$

Le régulateur (PI) est donné par la figure suivante :

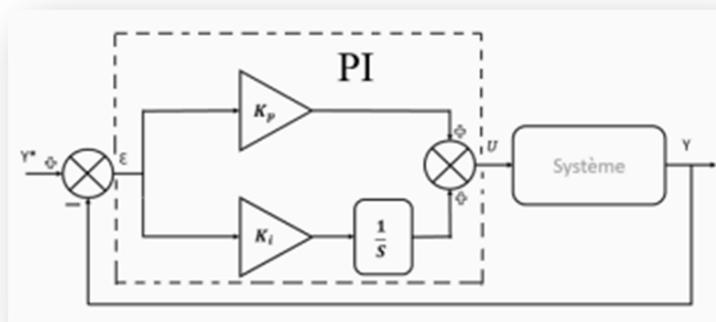


Figure C-2 Schéma du Régulateur PI

Dimensionnement des régulateurs

La machine étant découplée selon deux axes (d, q), la régulation sur l'axe « d » est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe « q » est faite par deux boucles en cascades l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse.

La commande de la MSAP s'effectue en contrôlant les courants I_d , I_q , le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence I_{qref} , le courant I_d est maintenu nul, la commande est effectuée par les régulateurs (PI) pour avoir l'erreur statique nulle $\varepsilon = 0$.

Régulateur PI du courant I_{sd}

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de courant est présentée par le schéma bloc de la figure (C-3).

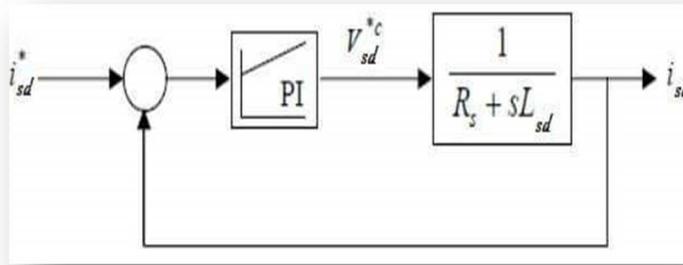


Figure C-3 Boucle de régulation de courant Isd

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{C.3})$$

La fonction de transfert en boucle ouvert s'écrit par :

$$F_{bo} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{R_s + L_d \cdot s}\right) \quad (\text{C.4})$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$\tau_{bo} = \frac{K_p}{K_i} = \frac{L_d}{R_s} \quad (\text{C.5})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devienne :

$$F_{bo} = \frac{K_i}{R_s \cdot s} \quad (\text{C.6})$$

$$F_{bf} = \frac{K_i / R_s \cdot s}{\frac{K_i}{R_s \cdot s} + 1} \quad (\text{C.7})$$

$$\tau_{bf} = \frac{R_s}{K_i} \quad (\text{C.8})$$

Le régulateur de courant Isd est :

$$K_i = R_s / \tau_{bf} \quad (\text{C.9})$$

$$K_p = L_d / \tau_{bf} \tag{C.10}$$

Régulateur PI de Isq

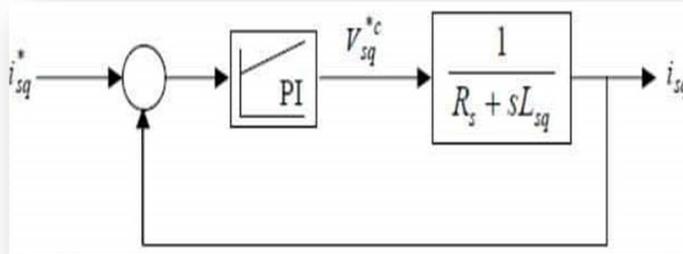


Figure C-4 Boucle de régulation de courant Isq.

La fonction de transfert en boucle ouvert de la figure 1 est :

$$\tag{C.11}$$

$$F_{bo} = (K_p + \frac{K_i}{s}) \cdot (\frac{1}{R_s + L_q \cdot s})$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$\tau_{bo} = \frac{K_p}{K_i} = \frac{L_q}{L_i} \tag{C.12}$$

La fonction de transfert en boucle fermée devienne

$$F_{bf} = \frac{K_i / R_s \cdot s}{\frac{K_i}{R_s \cdot s} + 1} \tag{C.13}$$

$$K_i = R_s / \tau_{bf} \tag{C.14}$$

$$K_p = L_q / \tau_{bf} \tag{C.15}$$

Régulateur PI de vitesse

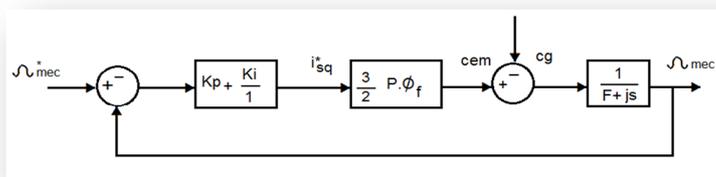


Figure 5 Boucle de régulation de vitesse.

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

$$\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{f + J_s}\right) \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi \cdot f\right) \quad (\text{C.16})$$

$$\frac{K_i}{s} \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1\right) \cdot \left(\frac{1/f}{1+s}\right) \cdot \frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi \cdot f \quad (\text{C.17})$$

$$\tau_{bo} = \frac{J}{F} = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{C.18})$$

$$FTBF(s) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot f}{3 \cdot K_i \cdot p \cdot \varphi \cdot f} \cdot s} \quad (\text{C.19})$$

$$\tau_{bf}(s) = \frac{2 \cdot f}{3 \cdot K_i \cdot p \cdot \varphi \cdot f} \quad (\text{C.20})$$

$$K_i = \frac{2 \cdot f}{3 \cdot p \cdot \varphi \cdot f \cdot \tau_{bo}} \quad (\text{C.21})$$

$$K_p = \frac{2 \cdot J}{3 \cdot p \cdot \varphi \cdot f \cdot \tau_{bf}} \quad (\text{C.22})$$

Dimensionnement de régulateur PI de Vdc

$$\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{3 \cdot E_{max}}{2 \cdot V_{dc}}\right) \cdot \frac{1}{C s} \quad (\text{C.23})$$

Par l'utilisation de la méthode de placement des pôles, on aura :

$$FTBO(s) = \frac{3 \cdot K_p \cdot E_{max} \cdot s + 3 \cdot K_i \cdot E_{max}}{2 \cdot C \cdot V_{dc} \cdot s^2} \quad (\text{C.24})$$

$$\begin{aligned} FTBF(s) & \quad (\text{C.25}) \\ & \frac{(3 \cdot K_p \cdot E_{max} \cdot s + 3 \cdot K_p \cdot E_{max}) / 2 \cdot C \cdot V_{dc}}{s^2 + \left(3 \cdot K_p \cdot E_{max} \cdot s / 2 \cdot C \cdot V_{dc}\right) + \frac{3 \cdot K_i \cdot E_{max}}{2 \cdot C \cdot V_{dc}}} \end{aligned}$$

$$K_i = \frac{\omega n^2 \cdot 2 \cdot C \cdot V_{dc}}{3 \cdot E_{max}} \quad (\text{C.26})$$

$$K_p = \frac{4 \cdot \xi \cdot \omega n \cdot C \cdot V_{dc}}{3 \cdot E_{max}} \quad (\text{C.27})$$

Table essai erreur (tâtonnement)

PI flou

KE_n	KdE_n	KdU	$W_{méc}$	$W^*_{méc}$
0.002	0.1	100	33.8795	33.8741
0.002	0.1	150	33.8765	
0.002	0.1	200	33.8743	

PI flou adaptatif					
KE_n	KdE_n	$K(K_p)$	$K(K_i)$	$W_{méc}$	$W^*_{méc}$
0.002	300	8	8	33.8790	33.8741
0.002	200	2	3	33.8767	
0.001	200	2	3	33.8760	

Références

Bibliographiques

- [1]. Audnane Samia « Apports Des Convertisseurs Multi Niveau Dans Les Systèmes d'Energie Eolienne» Mémoire De Fin d'Etude Université Ibn Khaldoun TIARET 2015
- [2].Maghzel Saliha « Contribution Modélisation Et La Commande D'une Turbine Eolienne » Mémoire De Magister Université du 20 Aout 1955 SKIKDA Promo 2011/2012
- [3].DioneFatou « Etude D'une Chaîne De Conversion d'Energie Eolienne A Base De Machine Asynchrone à Aiment Permanents » Université de ANNABA 2018
- [4].MegheniBillel « Contribution à L'alimentation Des Performances D'une Chaîne Energétique Eolienne » thèse de doctorat université badjimokhtar ANNABA 2015
- [5]. Abdellah saïd / Amiartahar « modelisation d'un système de stockage intégré dans un système éolienne » Mémoire De Fin d'Etude Université Ibn Khaldoun TIARET 2017/2018.
- [6]. Zineb Kacem / MeymounaHamoi«< La Compensation de l'énergie réactive dans une ferme éolienne>> Mémoire De Fin d'étude Université Ibn Khaldoun TIARET 2016/2017
- [7].Y.bentaleb/Y.hacen « Etude D'un Emulateur Eolienne » mémoire de fin d'étude 2008.
- [8].Bouasaria Samira Khadidja /BouzergataChafia « Etude Et Commande D'un Aérogénérateur Synchrone à Aiment Permanents » Mémoire De Fin d'Etude Université Ibn Khaldoun TIARET 2017/2018
- [9]. Mr Benmokhtar Sofiane/Mr Bensahnoun Mohamed « Modélisation Et Commande D'une Chaîne Basée Sur Génératrice Synchrone à Aiment Permanent GSAP » Mémoire De Fin d'Etude Université Ibn Khaldoun TIARET 2015/2016
- [10].Mme Sekouane Asma Kholoud «Amélioration De La Qualité d'Energie à L'aide D'un Filtre Actif Applique Dans Une Chaîne De Production Eolienne Connecté Au Réseau Eléctrique » Mémoire De Fin d'Etude Université Ibn Khaldoun Tiaret 2017/2018.
- [11].Frédéric Poitiers «Etude Et Commande De Génératrices Asynchrone Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne – Machine Asynchrone à Cage Autonome- Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée Au Réseau » Thèse De Doctorat De L'université De Nantes Le 19 Décembre 2003.
- [12]. Mr Zoubir Djalal Eddine « Système Du Stockage Dans La Chaîne De Conversion Eolienne » Mémoire De Fin D'étude Université Ibn Khaldoun Tiaret - 2015
- [13].BenchrifBilel « Etude Et Modélisation Des Différentes Composants D'une Installation Eolienne Utilisant Un Génératrice Synchrone à Aiment Permanent » Mémoire De Magister Université Ferhat Abbas -Sétif 2011
- [14]. Mr addourmiloud / Mr allaoutilyes “étude et maximisation d'un éolien “ Mémoire De Fin D'étude université Abderrahmane mira de Bejaïa 2013
- [15]. Mehdi Kheira/Bourokba Ali «Application Des Algorithmes Intelligents Pour Améliorer Le Fonctionnement D'un Emulateur Eolienne » Mémoire De Fin D'étude Université Ibn Khaldoun Tiaret 2013/2014
- [16].KarouiAttef « Modélisation D'une Chaîne De Conversion D'énergie Eolienne Basée Sur Une Machine Synchrone à Aiment Permanent » Mémoire De Fin D'étude Université Badji Mokhtar Annaba 2017
- [17].KhalesFerkous « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire De Fin D'étude Université Mantouri Constantine Soutenu le 27 /05 / 2009
- [18].BelabbasBelkacem « Intégration De L'énergie Eolienne Dans Un Réseau Electrique Local » Mémoire De Magister Université Ibn Khaldoun Tiaret 2012
- [19].MahieddineHacil « Amélioration Des Performances Des Energies Eoliennes » Thèse De Doctorat Université Mantouri -Constantine 2012

[20]. LouarFateh « Modélisation Et Simulation D'une Chaîne De Conversion D'énergie Eolienne à Base D'une Machine Synchrone à Aiment Permanent » Thèse De Doctorat Université Badji Mokhtar Annaba 2016

[21]. Mme Kelkoul Bahia « Etude Et Commande D'une Turbine Eolienne Utilisant Une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire De Fin D'étude Université De Tlemcen 2011

[22]. BEN DJOUDI Habib Chaouki /ARARIA Mohamed Amine. « Stratégies De Commande DTC-SVM Appliquées à Une MADA Utilisée Pour La Production D'énergie Eolienne » Mémoire De Fin D'étude Université Ibn Khaldoun TIARET 2015/2016.

[23]. Belfedhal Mostafa /Benyahia Sami « Maximisation De La Puissance (MPPT) Avec Asservissement De Vitesse Et Sans Capteur Mécanique De La Turbine Eolienne A Base De Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA)» Mémoire De Fin D'étude Université Ibn Khaldoun Tiaret 2015

[24]. Mr Darouaz Ibrahim/ Mr Chikhsalah Salah « Etude et contrôle Intelligent D'une Chaîne De Conversion Eolienne Utilisant Une GSAP » Mémoire De Fin D'étude Université Ibn Khaldoun Tiaret 2015/2016

[25]. <https://www.connaissancedesenergies.org>, consulté le 25 mai 2019.

[26]. Melle Chachour Halima/ M elle Yezid Aicha « Contrôle Neuro-Flou D'une Chaîne De Conversion Eolienne Utilisant Une GSAP » Mémoire De Fin D'étude Université Ibn Khaldoun Tiaret 2015/2016

[27] Mezimez Takieddine et Houchat Nasreddine «>>>> Commande D'une Chaîne Eolienne En Utilisant Un Convertisseur Matriciel» Mémoire De Fin D'études Université Ibn Khaldoun De Tiaret 2016/2017

[28] Nouri Mohamed Lamine et Abellah Abderrahmane «>> Commande Directe Du Couple DTC D'une Machine Asynchrone Double Alimentation MADA Dédiée à L'énergie Eolienne» Mémoire De Fin D'études, université Ibn Khaldoun de Tiaret. Promotion 2016/2017

[30] Zineb Kacem et Meymouna Hamou «>> La Compensation De L'énergie Réactive Dans Une Ferme Eolienne » Mémoire De Fin D'études université Ibn Khaldoun De Tiaret. Promotion 2016/2017

[31] ZEGHOUDI Souhila « Commande Par Passivité De La Machine Synchrone A Aiment Permanent » Mémoire De Fin D'études, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. Promotion 2014/2015

[32] Melle. Tahraoui Ouahiba et Melle. Askeur Fawzia « Commandes Avancées Pour Le contrôle d'une génératrice synchrone à aimants permanents » Mémoire De Fin D'études En vue de l'obtention du diplôme de master, université IBN KHALDOUN de Tiaret. Promotion. 2016/2017

[33] F. Kendouli*, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla « Modélisation, Simulation Et Contrôle D'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable Basée sur La Génératrice Asynchrone à Double Alimentation » Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Mentouri, Constantine,

[34] G. Mohammed, M. Ismail « Modélisation Et Commande D'un Statcom Basé Sur Un Convertisseur Trois Niveaux, Mémoire De Fin D'études Promotion 2014

[35]: G. SEGUIER, R. BAUSIERE, F. LABRIQUE, Electronique De Puissance « Structures, Fonctions De Base, Principales Applications » 8ème Edition. DUNOD.

[36] : G. SYBILLE, ElectroTechnique (THEODORE WILDI) 3ème édition.

[37] S. Belakehal*, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla. Laboratoire d'Electrotechnique, 'LEC' Faculté Des Sciences De l'Ingénieur, Université Mentouri De Constantine Route Ain-El-Bey, Constantine, Algérie « Modélisation Et Commande D'une Génératrice Synchrone à Aimants Permanents Dédiée à la Conversion De L'énergie Eolienne » (reçu le 14 Janvier 2010 – accepté le 28 Mars 2010)

[38] Mr Said HASSAINE « Application Des Nouvelles Techniques De Commande De La Machine Synchrones à Aimants Permanents » Mémoire En Vue De L'obtention Du Diplôme De Docteur En Es-Sciences. Soutenu Le: 08 Mars 2008

[39] Melle Matmatoria « Commande D'une Eolienne Double Alimentation Sur Réseau électrique» Mémoire De Fin D'études Université IBN KHALDOUN de Tiaret. Promotion2016/2017

[40] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC'.Département d'électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie.<< Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation>>(reçu le 30 Janvier 2011 – accepté le 25 Mars 2011).

[41] Mr Mihoub Youcef « Commande floue adaptative de la machine asynchrone » Thèse De Doctorat Université Des Sciences et de Technologie D'Oran MOHAMED BOUDIAF 2012

[42] Amar Sais Aghilas « Contribution De La Technique De La Logique Floue Pour La Diagnostic Des Défaut Statorique Dans La Machine Asynchrone à Cage d'Écureuil » Mémoire De Fin D'études Université IBN KHALDOUN de Tiaret. Promotion2017/201

[43] El- Hadi Rebaa génération automatique et optimisation de Systèmes à inférence floue thèse De Doctorat université paris XII 18 décembre 2003

[44] Benseni Hacene Zerrouki Khaled « Commande adaptative basée sur l'approximation floue pour une classe de systèmes non linéaires discrets » Mémoire De Fin D'études Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2016/2017

[45] M Tahri Ahmed « contribution à l'identification et à la commande robuste des génératrices synchrones à aimant permanent associés aux générateurs éoliens » >> Thèse De Doctorat université Ibn Khaldoun De Tiaret. Promotion 2016/2017

[46] Mouloud Ider « Etude Des systèmes flous type-2 : application à la commande des systèmes non linéaires » Thèse De Doctorat université Abderrahmane mira de Bejaïa 2006

[47]M.BenAissa Ali M.Kouider Rabah « Application d'un réglage flou adaptatif de la vitesse d'une génératrice synchrone à aimants permanents dans une chaîne éolienne » Mémoire De Fin D'études université Ibn Khaldoun De Tiaret. Promotion 2016/2017

[48]Mokaddem.Asma/MessabihChahrazed « Etude et Commande d'un Onduleur Triphasé à Deux Niveaux et Trois Niveaux à Structure NPC » mémoire de fin d'études licence université IBN KHALDOUN de TiaretPromotion2016/2017.

[49] Mr Brahami Mohamed / Mr Ziane Bilal « commande basée sur la passivité adaptative par la logique floue d'un moteur synchrone à aimant permanent » mémoire de fin d'études université Abderrahmane mira de Bejaïa 2014.

[50]Annane Mohamed Mostapha « Analyse Et Stabilité Et Synthèse Des Systèmes Flous De Type 2 » mémoire de magister université Ferhat Abbas Sétif 02/11/2011

ملخص

يعالج هذا العمل مع النمذجة والتحكم الذكي لسلسلة تحويل الرياح باستخدام آلة متزامنة بمغناطيس دائم متصلة بالشبكة. يتم تحويل الفولتية ثلاث أطوار من المخارج إلى التوتر المستمر من قبل مستقيم. يتم استخدام التوتر المستمر مرة أخرى عند مدخل العاكس من أجل الحصول على توترات جيبيية. يتم توفير التحكم على مستويين. على الجانب آلة يتم استخدام وحدة تحكم PI التقليدية مع تقنية MPPT للسيطرة على سرعة الجهاز. يتم تطبيق ثلاثة وحدات تحكم غامض على نفس النظام PI; PI-FLOU; PI: بروتوكول PI متكيف مع هياكل مختلفة ووحدة تحكم من النوع 2. على جانب الشبكة، يتم التحكم أيضا بالجهد المستمر من قبل منظم PI. يتم توفير التحكم في الطاقة بواسطة التحكم في التيارات و الجهد المستمر. يتم استخدام نظام Matlab Simulink ونظام Simpower للمحاكاة الرقمية للنظام بأكمله. نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها مع التحكم الغامض أدت إلى أفضل أداء ديناميكي. في التوقعات؛ يمكن زرع هذه الخوارزميات على اختبار عملي

كلمات مفتاحية

توربينات الرياح؛ التحكم الشعاع؛ مولدة تزامنية ذات مغناطيس دائم؛ تتبع نقطة الاستطاعة العظمى؛ التحكم الغامض؛ التحكم الذكي

Résumé

Ce travail traite la modélisation et le contrôle intelligent d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau. Les tensions triphasées de sorties sont converties à une tension continue par un redresseur. La tension continue est de nouveau utilisée à l'entrée de l'onduleur pour avoir les tensions sinusoïdales. Le contrôle est assuré à deux niveaux. Du côté machine un contrôleur conventionnel PI avec la technique de la MPPT est utilisé pour le contrôle de la vitesse de la machine. Trois contrôleurs flous sont appliqués sur le même système : Le PI-flou ; le PI flou adaptatif avec différentes structures et un contrôleur de type2. Du côté réseau, la tension continue est également commandée par un régulateur PI. Le contrôle de puissance est assuré par action sur les courants et la tension continue. Matlab Simulink et Simpower System sont utilisés pour la simulation numérique du système complet. Les résultats de simulation obtenus avec le contrôle flou ont donné les meilleures performances dynamiques. En perspectives ; ces algorithmes peuvent être implantés sur un banc d'essai pratique.

Mots clés

Éolien; Commande vectorielle, GSAP, M PPT, Commande floue, Intelligence artificielle.

Abstract

This work deals with the modeling and intelligent control of a wind conversion chain using a synchronous permanent magnet machine connected to the network. The three-phase voltages of exits are converted to a continuous voltage by a straightened. Continuous tension is again used at the inductor entrance to have sinusoidal tensions. Control is provided on two levels. On the machine side a conventional PI controller with the MPPT technique is used for the control of the machine's speed. Three fuzzy controllers are applied to the same system: the PI-blur; Adaptive Fuzzy PI with different structures and a type2 controller. On the network side, continuous voltage is also controlled by a PI regulator. Power control is provided per action on currents and the voltage continues. Matlab Simulink and Simpower System are used for digital simulation of the entire system. Simulation results obtained with blur control yielded the best dynamic performance. In outlook; these algorithms can be implanted on a practical test bed. .

Keywords

Eolien; Vector control GSAP; MPPT; Fuzzy control; Artificial intelligence.

