

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

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**  
**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

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

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Commande des systèmes électrique**

## **THÈME**

**Commandes Avancées pour le contrôle  
d'une génératrice synchrone à aimants  
permanents**

**Préparé par :**

M<sup>elle</sup>. Tahraoui Ouahiba

M<sup>elle</sup>. Askeur Fawzia

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mr. koulali M.	MAA	Président
Mr. Kouadria S.	MAB	Examineur
Mr. Toumi.D.	MCB	Examineur
Mr. Mihoub.Y.	MCB	Encadreur

**PROMOTION 2016 /2017**

## ***Remerciements***

*Avant tout nous tenons à remercier notre dieu tout puissant qui nous a donné la force et la santé pour mener ce travail à terme.*

*Nous tenons également à adresser nos sincères et profondes reconnaissances à Mr. M.Koulali enseignant à l'Université Ibn Khaldoun Tiaret, pour avoir accepté de présider notre jury de mémoire de fin d'étude.*

*Nous souhaitons remercier Mr.S.Kouadria, enseignant à l'Université Ibn Khaldoun Tiaret d'avoir accepté d'examiner nos travail.*

*Nous remercions vivement Mr. D.Toumi enseignant à l'Université l'Université Ibn M.Khaldoun Tiaret, d'avoir accepté de juger ce travail et de faire part de jury.*

*Nous exprimons notre vive gratitude et remerciements à notre encadreur Mihoub Youcef qui a bien voulu accepter de diriger ce travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, sans oublier personne.*

*Nos vifs remerciements à tous nos enseignants de l'université qui nous a aidées et encouragés durant tout notre cursus d'études.*

*O.Tahraoui .F.Askeur*

MSAP	moteur synchrone à aimant permanent
GSAP	génératrice synchrone à aimant permanent
MLI	modélisation de largeur d'impulsion
MPPT	maximum power point Tracking
Pi	régulateur proportionnel intégrateur
A,b,c	axes liés aux enroulements triphasés
d,q	axes de référentiel de park
C mec	couple mécanique (N.m)
$C_T$	couple totale de l'éolienne (n.m)
I <sub>sa</sub> ,I <sub>sb</sub> ,I <sub>sc</sub>	les courants(A)
I <sub>sd</sub> ,I <sub>sq</sub>	les composants de courant statorique dans le repère d,q
(A)	
R <sub>s</sub>	résistance statorique
L <sub>sa</sub> ,L <sub>sb</sub> ,L <sub>sc</sub>	les inductances propres respectivement des phases a,b,c(H)
P(θ)	matrice de la transformation de park
P(θ)	matrice inverse de la transformation de park
V <sub>d</sub> ,V <sub>q</sub>	les composants de tension statorique dans le repère d,q
(V)	
V <sub>ref</sub>	l'amplitude de la tension de référence
V <sub>sa</sub> ,V <sub>sb</sub> ,V <sub>sc</sub>	les tensions appliqués aux trois phases statoriques
$\omega_e$	énergie emmagasinée dans le circuit magnétique
$\omega_k$	pulsation de l'harmonique de l'ordre K

$\theta_{geo}$	écart angulaire de la partie mobile par rapport à la partie fixe
$\lambda_{opt}$	valeur optimale de la vitesse spécifique
$\Phi_{sd}$	directe (wb)
$\Phi_{sq}$	flux de rotor (aimant permanent)(Wb)
$\Phi_{fs}$	flux d'axe quadrature (Wb)
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	les flux totaux à travers ces enroulements(Wb)
$\Omega_{turbine}$	la vitesse de rotation de la turbine avant multiplicateur (rad/s)
$\Omega_{mec}$	vitesse mécanique (du générateur) en (rad/s)
$\Omega_{ref}$	vitesse de référence (rad/s)
$C_{em\ ref}$	couple électromagnétique de référence(N.m)
$C_{em}$	couple électromagnétique(Nm)
$C_g$	couple entrainement a la GSAP
$C_m$	couple moteur.
$C_p$	coefficient de la puissance
$C_{pmax}$	coefficient de la puissance maximale.
$F$	coefficient des visqueux
$f\Omega$	couple de frottement visqueux (N.m)
$G$	rapport de multiplication.
$J$	inertie du rotor de la GSAP.
$K_i (a,b,c)$	conditions de commutation des 3 intercepteurs.
$K_i$	le gain intègre
$K_p$	le gain proportionnel

Ld	inductance d'axes directe (H)
Lq	inductance d'axes en quadrature (H)
Mab,Mbc,Mca	inductances mutuelles des phases abc.
P	nombre de pair de poles.
P( $\theta$ )	la transformation de Park.
R	rayon d l'aeroturbine.
r	taux de modulation
$\rho$	masse volumique de l'air ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
Vp	l'amplitude de porteuse
m	l'indice de modulation.

Introduction générale .....	1
Chapitre I : <b>Généralités sur la chaine de conversion éolienne</b>	
I. 1. INTRODUCTION.....	4
I. 2. Les différents sources des énergies renouvelables.....	4
I.2. 1. Source hydraulique.....	4
I.2. 2. Source photovoltaïque .....	5
I.2. 3. Source marines .....	5
Energie marémotrice.....	6
I.2.3. Source éolienne.....	6
I. 3. Utilisation de l'énergie renouvelable .....	7
I.3. 1. Systèmes raccordés au réseau .....	7
I.3. 2. Systèmes isolés.....	7
I. 4. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne .....	8
I.4. 1. Les systèmes à vitesse fixe .....	8
I.4. 2. Les éoliennes à vitesse variable .....	8
I. 5. Synthèse de production d'électricité éolienne .....	9
I.5. 1. la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique .....	9
I.5. 2. La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique .....	10
I.5.2. 1. Génératrices synchrones.....	10
I. 6. Chaine de conversion éolienne .....	11
I.6. 1. Introduction.....	11
I.6. 2. Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	11
I.6. 3. Différents Types d'Aérogénérateurs .....	11
I.6.3. 1. Eolienne à axe vertical.....	12
I.6.3. 2. Eolienne à axe Horizontal.....	12
I.6. 4. Principaux organes d'une éolienne .....	12
I. 7. Les conditions du choix d'une éolienne .....	15
I. 8. Sécurité.....	15
I. 9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	16
I. 10. Conclusion .....	17

Chapitre II : **Modélisation et commande vectorielle de la GSAP**

II. 1.Introduction.....	18
II. 2 Modélisation de la chaine de conversion éolienne.....	18
II.2.1 Partie Aérodynamique (le Vent).....	19
II.2.3 Modèle du Multiplicateur .....	21
II.2.4 Modèle de l'arbre.....	21
II.2.5 Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	22
II.2.5.1 Principe de la MPPT.....	22
II.2.5.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse .....	23
II.2 6.Resultat de simulation.....	24
II.2.7.Interpretation des résultats .....	24
II. 3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....	24
II.3.1 Introduction.....	24
II.3.2 Mise en équation de la MSAP .....	25
II.3.2.1 Equations électriques dans le repère (abc).....	25
II.3.2 2.Passage au repère de Park (d q).....	27
II.3.2 3 Equations électriques du MSAP dans le repaire de Park: .....	28
II.3.2 4 Equations du flux magnétiques .....	28
II.3.2.5 Equation du couple électromagnétique.....	28
II.3.2 6 Equations mécaniques .....	29
II.4 La Commande Vectorielle .....	29
II.4 1 Introduction.....	29
II.4.2 Principe et structure de la commande vectorielle de la génératrice.....	30
II.4.2.1 Découplage dynamique entrée sortie.....	30
II.4.2.2 Boucle de commande.....	31
II.4 3 Contrôle de la vitesse par régulateur PI.....	32
II. 4 Redresseur.....	33
II.5.1 Modèle du redresseur MLI .....	34
II. 6 Onduleur.....	35
II.6.1 Modélisation de l'onduleur:.....	35
II.6.2 La commande MLI .....	37
II.6.3.1 La modulation sinus-triangle.....	38

II. 7 Résultats de la simulation de la commande vectorielle .....	40
II. 8 Interprétation de résultats .....	41
II. 9 Conclusion .....	42

Chapitre III: **Commande floue**

III. 1 Introduction.....	43
III. 2 Historique .....	43
III. 3.La logique floue .....	44
III. 4.La théorie des ensembles flous .....	44
III. 5.fonction d'appartenance.....	45
III.5. 1.Représentations des fonctions d'appartenance .....	45
III.5. 2.Univers de discours .....	46
III.5. 3.Variables linguistiques.....	46
III. 6.Structure d'un régulateur floue .....	47
III.6. 1.Fuzzification.....	47
III.6. 3.Logique de prise de décision (inférence floue) .....	48
III.6. 4.Défuzzification.....	48
III.6.4. 1.La méthode du centre de gravité .....	48
III. 7.Commande floue de la vitesse d'une Génératrice Synchrone à Aimant Permanent .....	49
III.10. 1.Résultat de simulation de contrôleur floue .....	54
III.10. 2.Interprétation de résultat .....	56
III.10. 3.Résultat de simulation de contrôleur floue adaptatif.....	57
III.10. 4.Interprétation de de résultat .....	58
III. 11. Conclusion .....	58
Conclusion générale .....	59
Références bibliographiques.....	59
ANNEXES THEORIE DE BETZ .....	63

Chapitre I : **Généralités sur la chaine de conversion éolienne**

Fig.I. 1 Une centrale hydraulique .....	4
Fig.I. 3 Source photovoltaïque. ....	5
Fig.I. 4 Energie marine .....	5
Fig.I. 5 Source éolienne. ....	7
Fig.I. 6 Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.....	9
Fig.I. 7 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents. ....	11
Fig.I. 8 Tour(Le mât) d'une éolienne.....	13
Fig.I. 9 Rotor d'une éolienne en montage.....	14
Fig.I. 10 Principales composants de l'éolienne .....	15

ChapitreII : **Modélisation et commande vectorielle de la GSAP**

Fig.II 2 Configuration d'une éolienne .....	18
Fig.II 3 L'évolution temporelle du vent .....	19
Fig.II 4 Turbine éolienne.....	20
Fig.II 5 Schéma bloc du modèle de la turbine .....	22
Fig.II 6 résultats de simulation MPPT en boucle ouverte.....	24
Fig.II 7 Présentation d'une MSAP dans le repère (abc).....	25
Fig.II 8 Structure électrique du stator d'une MSAP.....	26
Fig.II 9 Représentation d'une MSAP dans le repère (d q). ....	27
Fig.II 10 principe de la commande vectorielle .....	30
Fig.II 11 Boucle de régulation du courant $i_d$ .....	31
Fig.II 12 Boucle de régulation du courant $i_q$ .....	31
Fig.II 13 Boucle de régulation de la vitesse .....	32
Fig.II 14 Schéma d'un redresseur .....	34
Fig.II 15 Schéma d'un onduleur de tension.....	36
Fig.II 16 modulation sinus-triangle.....	38
Fig.II 17 Modulation sinusoïdale naturelle .....	39
Fig.II 18 <i>Schéma bloc Simulink du modèle avec la commande vectorielle</i> .....	39
Fig.II 19 Allures des grandeurs mécaniques du système pour la commande vectorielle .....	40
Fig.II 20 Allures des grandeurs électriques du système pour la commande vectorielle:.....	41

Chapitre III: **Commande floue**

Fig. III 1.Exemple d'ensembles considérés en logique booléenne.....	44
Fig. III 2 Exemple d'ensembles considérés en logique floue. ....	45
Fig. III 3Formes usuelles des fonctions d'appartenance.....	45
Fig. III 4Variable linguistique .....	46
Fig. III 5. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou .....	47
Fig. III 6 Schéma synoptique d'un contrôleur flou de vitesse .....	49
Fig. III 7 Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateur flou. ....	51
Fig. III 8 Table d'inférences des règles floues. ....	51

Fig. III 9 Schéma bloc d'un contrôleur PI flou .....	53
Fig. III 10 Allures des grandeurs mécaniques du système pour un contrôleur PI-flou.....	54
Fig. III 11 Allures des grandeurs électriques du système pour un contrôleur PI-flou.....	55
Fig. III 12 Schéma bloc d'un contrôleur flou adaptatif.....	56
Fig. III 13 Allures des grandeurs mécaniques du système pour la commande vectorielle .....	57

---

# Introduction générale

## Introduction générale

L'objectif général de ce mémoire est l'étude des commandes avancées pour le contrôle d'une Génératrice Synchrones à Aimants Permanents intégrée dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne.

La demande mondiale en énergie électrique, sans cesse croissante, a contraint certains pays développés à combler leur déficit énergétique par l'utilisation des ressources énergétiques fossiles traditionnelles qui ne peuvent pas continuer indéfiniment et ils sont caractérisées par le risque d'accident, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels ce qui rend cette énergie de moins en moins attractive pour le futur. A cause des problèmes environnementaux dus aux énergies fossiles, l'utilisation des sources d'énergie renouvelables : le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, la marémotrice...etc devient très importante et utilisable dans le domaine industrielle.

Actuellement, l'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, l'énergie éolienne est l'énergie du vent (Le vent sur terre, en mer et dans les airs)et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Eole (en grec ancien Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique.

Dans ce travail on va apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Les Machines Synchrones à Aimants Permanents (*MSAP*) sont de plus en plus utilisées dans l'industrie pour leurs bonnes performances et parce qu'elles offrent beaucoup d'avantages: une faible inertie rotorique, une dissipation de chaleur efficace et un couple massique important. De plus, l'élimination des balais réduit les bruits et supprime la nécessité de leurs maintenances. Les recherches actuellement ont pour but de remplacer les Machines à Courant Continu (*MCC*) par des(*MSAP*) dans le domaine industriel initialement occupé par la commande des *MCC*.

La commande vectorielle est une méthode qui se ramène à une structure de commande linéaire par l'hypothèse d'orientation du flux. Elle est élaborée à partir du modèle de Park ( $d, q$ ). Ainsi, elle consiste à orienter le référentiel ( $d, q$ ) de manière à linéariser au mieux le modèle de la machine, ce qui rend le comportement de la *MSAP* analogue à celui de la *MCC*. Par conséquent, la régulation du courant devient insensible à la variation du couple, et ce, tant en régime transitoire que permanent. Le principe du contrôle vectoriel reste d'une très grande efficacité pour la synthèse

d'une loi de commande simple et moins coûteuse, car il conduit à la linéarisation du modèle de la machine, et de ce fait, à la facilité de la mise en œuvre d'une structure de contrôle.

Le comportement de la *MSAP* est celui d'un système non linéaire, sa dynamique est rapide, ses paramètres varient pendant le fonctionnement et elle est sujette à des perturbations inconnues. Toutes ces caractéristiques rendent la commande de cette machine complexe. Par conséquent, la conservation de la nature non linéaire de la machine, la poursuite de trajectoires prédéterminées, la robustesse aux variations des paramètres et le rejet de perturbations inconnues avec une réponse performante sont les objectifs à satisfaire lors d'une mise en œuvre d'une stratégie de commande intelligente.

Pour cela, deux techniques de synthèse des lois des commandes avancées assurant la robustesse du comportement du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations sont particulièrement considérées la logique floue.

Les techniques de l'intelligence artificielle, notamment la logique floue, pourront être utilisées à bon escient pour leur qualités à résorber certains problèmes liées aussi bien aux erreurs de modélisation qu'à la méconnaissance même du modèle du système à commander. A l'instar d'un contrôleur PI (proportionnel intégral) conventionnel, un contrôleur flou (en anglais *Fuzzy Logic Controller*, ou *FLC*),. un PI-flou, a l'aptitude d'améliorer les performances dynamiques (en poursuite) et statiques (en rejection) d'un contrôle bouclé et cela indépendamment de la connaissance du modèle du système à commander. Ceci pourrait donner un a priori favorable pour le *FLC*, notamment pour l'amélioration de la robustesse d'une commande contre les erreurs de modélisations et les dérives paramétriques, souvent inévitables. En effet, la difficulté ou la complexité de la commande ou de l'estimation sera surmonté par l'usage des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir-faire d'un expert pour répondre à une problématique spécifique du système à commander. Ainsi, il est plus question de connaître le système à commander mais plutôt de connaître son comportement ou son évolution suite à des sollicitations particulières, ce qui est en fait le particularisme de la logique floue.

### **Structure du mémoire**

Ce travail qui comprend trois chapitres, est organisé de la manière suivante.

- Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous identifions les différentes sources renouvelables utilisées pour la production d'énergie électriques en choisissons l'énergie éoliennes, en suite on explique ses types, son principes de fonctionnement et ses composants.

- Le second chapitre est dédié à la modélisation des éléments de la chaîne éolienne basée sur la GSAP, et quelques notions théoriques sur la commande vectorielle qu'on a appliquées sur le système éolienne et ses résultats de simulation sous environnement Matlab SIMILINK.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude théoriques des commandes avancées (floue et floue adaptatif) et leur application sur notre système éolienne et au GSAP.

Chapite I :  
Généralités sur les systèmes éoliens

## I. 1. INTRODUCTION

Le besoin croissant en énergie dans le monde, l'épuisement des ressources énergétiques classiques (fossiles) et les problèmes d'environnement causés par l'émission du gaz carbonique lors de leurs exploitations ont poussé les chercheurs à développer de nouveaux moyens de production d'énergies abondantes et inépuisables dites " énergies renouvelables "[1].

Les énergies renouvelables ou EnR (solaire, éolienne, ...) ne représentent actuellement qu'environ 20 % de la production mondiale d'électricité, en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2 % ! Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un développement durable (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles, ...) [2]. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne qui occupe une bonne place grâce aux avantages qu'elle apporte .

Dans ce chapitre, une étude globale sur l'énergie éolienne qui comprend une description des différents aérogénérateurs ainsi que les avantages et les inconvénients.

## I. 2. Les différents sources des énergies renouvelables

### I.2. 1. Source hydraulique

L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue depuis longtemps dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Les sites de petites puissances (inférieures à 10 KW) sont des solutions très prisées pour des petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont des grands avantages. Les petites centrales hydrauliques appartiennent souvent à des producteurs Indépendants [3].

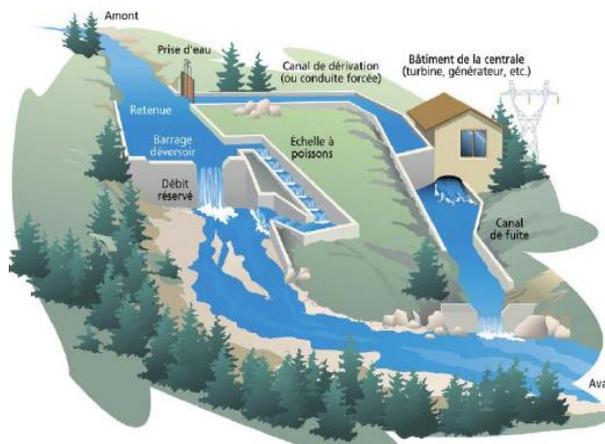


Fig.I. 1 Une centrale hydraulique

## I.2. 2. Source photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique qui peut être exploitée directement après un étage d'adaptation. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de poursuite du point de puissance maximale [3].



Fig.I. 2 Source photovoltaïque.

## I.2. 3. Source marines

Les mers et les océans représentent 71 % de la surface du globe. Ils pourraient en théorie fournir  $348.8 \cdot 10^{15}$  kWh à partir du seul rayonnement solaire sur leur surface,  $465 \cdot 10^{12}$  kWh par la force du vent en mer dont une partie se transforme en houle et vagues,  $23 \cdot 10^{12}$  kWh par la force des courants de marées dus à l'attraction lunaire et une énergie due à la différence de température selon la profondeur. On considère les énergies marines celles due à la houle des vagues et aux phénomènes des marées. Dans ce qui suit, sont présentés les principaux modes de conversion des énergies marines en énergie électrique.

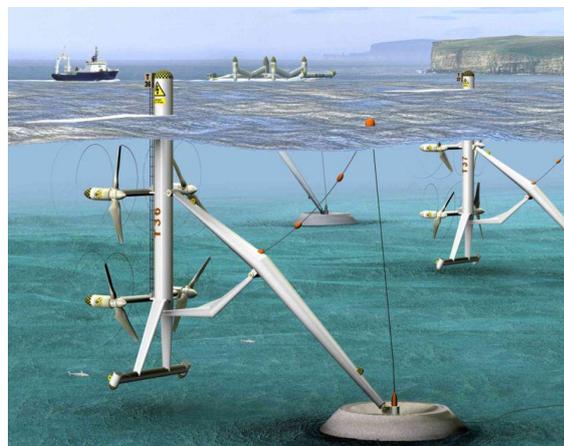


Fig.I. 3 Energie marine

## **La houle**

Lorsque le vent souffle sur l'océan, il crée des vagues et des courants marins. Si le phénomène se répète pendant une durée de temps il se forme une succession de vagues, c'est la houle. Les principaux dispositifs exploitants cette énergie sont:

- ✓ Barrages à houle.
- ✓ Systèmes à flotteur en surface ou semi-immergé.
- ✓ Systèmes à colonne oscillante.

## **Energie marémotrice**

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causées par l'effet conjugué des forces de gravitation lunaire et solaire. Cette énergie peut être exploitée sous deux formes :

- ✓ Energie potentielle.
- ✓ Energie cinétique. [4]

### **I.2.3. Source éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [5].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores [6].



Fig.I. 4 Source éolienne.

### **I. 3. Utilisation de l'énergie renouvelable**

Depuis quelques années, il n'est plus nécessaire d'installer les systèmes de production d'énergie renouvelable précisément sur le lieu d'utilisation de l'énergie. Ils sont maintenant utilisés pour générer de l'énergie électrique qui est transférée par un réseau électrique sur une distance plus ou moins grande vers les utilisateurs. Ils sont adaptés aux endroits dont la connexion au réseau n'est pas rentable, ou même impossible c'est pour sa on distingue deux systèmes [3].

#### **I.3. 1. Systèmes raccordés au réseau**

- ✓ Toute la génération est livrée directement au réseau électrique.
- ✓ Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique [7] .

#### **I.3. 2. Systèmes isolés**

La distinction “autonome” fait référence au genre d'applications non raccordées au réseau et (ou) à l'autonomie de ces applications, l'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par Exemple [8]:

- ✓ pour produire de l'électricité dans les îles,
- ✓ pour le pompage de l'eau dans des champs,
- ✓ Pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises,

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur [7].

## **I. 4. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne**

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- ✓ Les systèmes à vitesse fixe.
- ✓ Les systèmes à vitesse variable.

### **I.4. 1. Les systèmes à vitesse fixe**

Ces éoliennes sont les premières à avoir reçue une technologie développée. La génératrice qui est généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en hyper synchronisme à une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique fixe est imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles.

Le contrôle de la puissance de ce type de système se fait au niveau de la turbine, soit par décrochage aérodynamique, soit par calage variable des pales de l'aérogénérateur pour s'approcher du fonctionnement synchrone. Il est doté d'un multiplicateur de vitesse pour s'adapter à la vitesse de la turbine et de la génératrice.

#### **Les avantages de l'éolienne a vitesse fixe**

Les principaux avantages de ce type d'éoliennes sont :

- ✓ La simplicité d'implantation
- ✓ L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- ✓ Une grande fiabilité.
- ✓ Un faible coût.

#### **Les inconvénients de l'éoliennes a vitesse fixe**

Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à Savoir:

- ✓ Une puissance extraite non optimisée (On rate les maximas théoriques).
- ✓ Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.
- ✓ Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- ✓ La perte du contrôle de la puissance réactive [1].

### **I.4. 2. Les éoliennes à vitesse variable**

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable.

Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire.

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue . Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- ✓ Augmentation du rendement énergétique.
- ✓ Réduction des oscillations de couple (Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques [8].

## I. 5. Synthèse de production d'électricité éolienne

Un système de production d'électricité éolienne, quelque soit sa technologie, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique fournie à la charge ou au réseau.

### I.5. 1. la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique

Au passage du vent à travers le rotor, l'interaction entre le vent et les pales génère une poussée, dont la magnitude est liée directement à la transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique. Un couple est également généré sur les pales ce qui les met, puis les maintient en rotation [9].

L'énergie cinétique du vent, captée par les pales, est transformée en énergie mécanique. au moyen d'un dispositif aérogénérateur (turbine) [10].



Fig.I. 5 Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

## **I.5. 2. La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique**

Les générateurs éoliens peuvent être connectés au réseau individuellement ou ils peuvent être groupés pour former des parcs éoliens. La génératrice reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. En fonction de cette génératrice, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens :

- ✓ Système éolien à vitesse fixe avec générateur asynchrone à cage.
- ✓ Système éolien à vitesse variable avec générateur asynchrone à double alimentation.
- ✓ Système éolien à vitesse fixe avec générateur synchrone à inducteur bobiné ou à aimant.

Dans notre projet on a procédé au dernier type du générateurs électriques, c'est le générateur synchrone à aimant [11].

### **I.5.2. 1. Génératrices synchrones**

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de 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) aux 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 bagues et balais pour les génératrices à aimants. 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 [12].

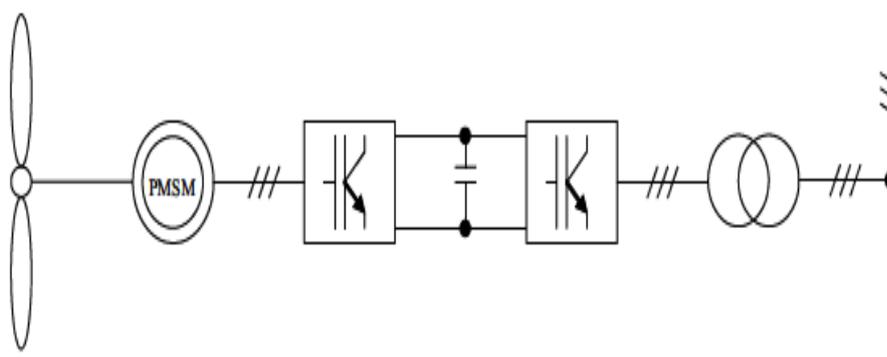


Fig.I. 6 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.

## I. 6. Chaîne de conversion éolienne

### I.6. 1. Introduction

L'énergie éolienne qui tire son nom du dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moulinier le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h [13].

### I.6. 2. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un autre nom pour une turbine éolienne est un "aéro-générateur", 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. La rotation du rotor entraînera celle de l'arbre lent dans la nacelle pour ensuite produire de l'électricité. Finalement, avec des câbles qui lient des machines à un poste de livraison à proximité, l'électricité est transportée au réseau électrique après un raccordement [14].

### I.6. 3. Différents Types d'Aérogénérateurs

Les éoliennes se divisent en général en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montée à l'hélice :

- ✓ Eolienne à axe verticale
- ✓ Eolienne à axe horizontal.

### **I.6.3. 1. Eolienne à axe vertical**

Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation. Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal. Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité [13].

### **I.6.3. 2. Eolienne à axe Horizontal**

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [15].

### **I.6. 4. Principaux organes d'une éolienne**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de:

#### **Le mât**

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont haut perchées car le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons ect

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la pression exercée par le vent directement sur la tour, et d'autre part dû à la puissance transmise par le rotor.

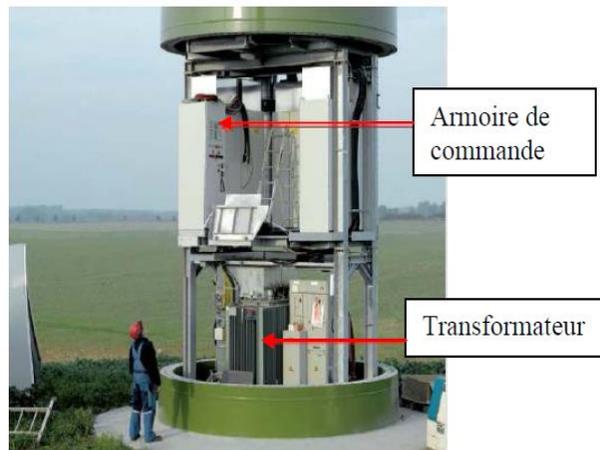


Fig.I. 7 Tour(Le mât) d'une éolienne.

### **Un rotor (l'hélice)**

Composé de plusieurs pales et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle) donc au carré du diamètre du rotor [16].

Le rendement de la chaîne électromécanique est généralement élevé et de l'ordre de 85%. Ce rendement est défini par le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor qui dépend de plusieurs paramètres dont :

#### ✓ **La longueur des pales:**

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

#### ✓ **Largeur**

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

- **Nombre de pales**

Les éoliennes à marche lente ont généralement entre 20 et 40 ailettes. Leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pales est limitée. Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales, cette dernière est la plus stable. Leur rendement est plus proche de la limite de Betz  $16/27$  [17].



Fig.I. 8 Rotor d'une éolienne en montage.

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque.

### **Une nacelle**

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine .

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

### **Les différents composants d'une nacelle**

- ✓ **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ✓ **L'arbre secondaire**: comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ✓ **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ✓ **Un contrôleur électronique**: chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le

contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle [16].

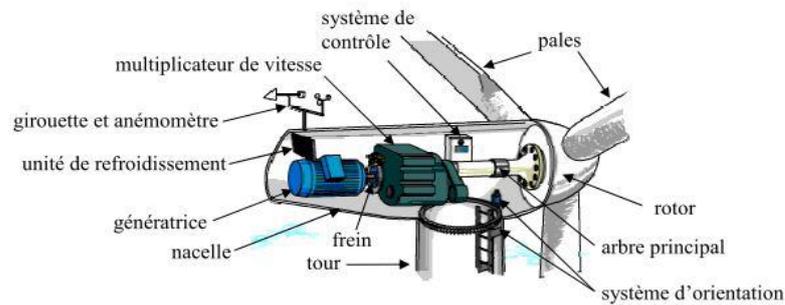


Fig.I. 9 Principales composantes de l'éolienne

## I. 7. Les conditions du choix d'une éolienne

Les éoliennes sont soumises à des vents variables, et des forces fluctuantes. Ceci est particulièrement le cas si elles sont situées dans un climat de vent très turbulent. Les composants du système qui sont soumis à des flexions répétées, comme les pales, peuvent éventuellement développer des fissures. La fatigue du métal est un problème bien connu dans des nombreux produits techniques. Lors de la conception d'une éolienne, il est extrêmement important de calculer à l'avance comment les différentes composantes vont se mettre à vibrer, individuellement et/ou conjointement. Il est également important le calcul des forces impliquées dans chaque flexion ou étirement d'un seul composant du système éolien.

A titre d'exemple, une éolienne tendance à se balancer, disons, toutes les trois secondes. La fréquence à laquelle la tour oscille en avant et en arrière est également connue comme la fréquence propre du mat. La fréquence propre dépend de la hauteur de se dernier, l'épaisseur de ses murs, le type d'acier utilisé à sa fabrication, le poids de la nacelle et du rotor.

Ainsi, à chaque fois qu'une pale du rotor passe devant le mat, le rotor va pousser un peu moins contre le mat. par conséquent, il est très important de connaître les fréquences propres de chaque composant, afin de concevoir ou dimensionner une éolienne sûre, avec une maîtrise parfaite de son fonctionnement [18].

## I. 8. Sécurité

Les éoliennes possèdent différentes possibilités pour sécuriser leur fonctionnement. Les moyens sont mis en action soit de façon automatique soit de façon manuelle. Généralement, une éolienne comprend au moins deux systèmes indépendants, mécaniques et aérodynamiques qui se complètent. Ces systèmes protègent l'aérogénérateur en limitant la puissance (pour des vitesses de vent classiquement supérieures à 25 m/s) ou en cas de risques d'emballement du rotor (tempêtes ect.). Ils

permettent aussi de protéger les personnes réalisant les travaux de maintenance par immobilisation du rotor.

les moyens aérodynamiques de comportent mécaniques :

- ✓ La mise en drapeau des pales par variation du pas. la mise en rotation des extrémités de pale pour certaines machines.
- ✓ L'utilisation de la régulation par décrochage jusqu'à un certain domaine de vitesse.
- ✓ Un empennage (ou surface aérodynamique) qui oriente le rotor dans le lit du vent et réduit ainsi la surface offerte.
- ✓ Le frein mécanique sur l'arbre secondaire est très largement répandu. Il permet de suppléer une défaillance éventuelle du système de freinage aérodynamique. Il peut être activé automatiquement par le contrôleur électronique ou manuellement par un opérateur. Cependant, pour des éoliennes de petites ou moyennes puissances, il existe en complément différents systèmes tels que :
  - L'abaissement du mât et du générateur.
  - Le repliage des pales.
  - Les régulateurs masse-ressort qui agissent sous l'effet de la force centrifuge [19].

## **I. 9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients, les avantages et les inconvénients de la conversion éolienne sont:

### **Avantages**

- ✓ Non polluante.
- ✓ Inépuisable (énergie du vent).
- ✓ Peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés).
- ✓ Peut-être complémentaire des filières traditionnelles.

### **Inconvénients**

- ✓ aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent).
- ✓ bruit des pales.
- ✓ impact visuel.
- ✓ interférences électromagnétiques. [6]

## **I. 10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Nous avons tout d'abord introduit quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne puis donné un aperçu des deux grandes familles d'éoliennes, à savoir celles à axe horizontal et celles à axe vertical. Une fois les différents constituants d'une éolienne présentés avec leurs avantages et inconvénients.

Dans les chapitres qui suivent nous allons étudier et modéliser toute la chaîne de production de l'énergie éolienne qu'elle se base sur la GSAP à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement [15].

# Chapitre II:

## modélisation et commande vectorielle de la GSAP

## II. 1.Introduction

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Ce qui nous permet d'étudier le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et comprendre ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

Dans ce chapitre, d'abord on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne pour comprendre le comportement dynamique et de tester l'algorithme de commande MPPT sur une plateforme de simulation.

Puisque notre choix d'éolienne se porte sur la génératrice synchrone à aimants permanents qui est le dispositif responsable de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, nous allons faire sa présentation et sa modélisation

Nous verrons ensuite la modélisation et la commande en MLI de l'onduleur utilisé dans notre cas pour la commande de la GSAP. En effet cette technique permet le réglage en amplitude et en fréquence des tensions les plus sinusoïdales possibles de sa sortie. Dans notre travail, nous allons commencer par la commande vectorielle basée sur les régulateurs classique PI.

L'environnement MATLAB/Simulink a retenu notre intérêt de part, la maturité et la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants.

## II. 2 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

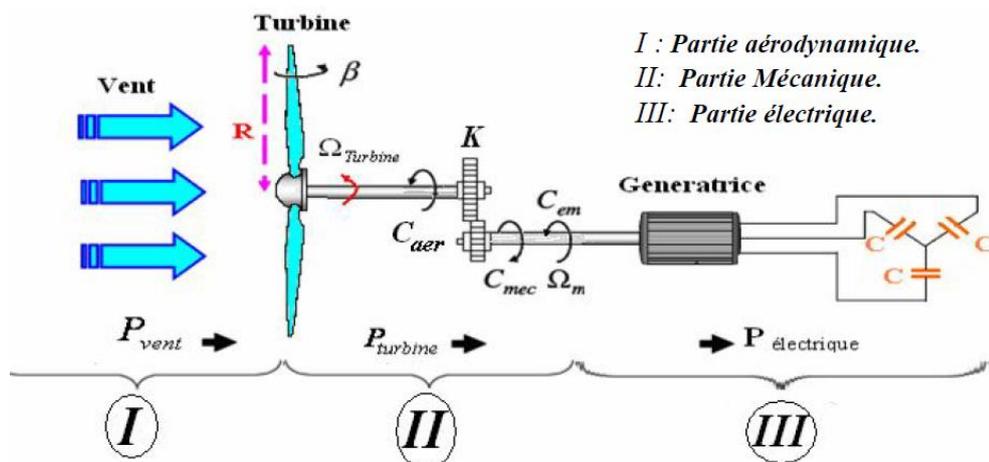


Fig.II 1 Configuration d'une éolienne

### II.2.1 Partie Aérodynamique (le Vent)

Le vent est le raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [20].

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

Le modèle du vent est donné par une présentation de série de fourrier par la formule:

$$v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.2})$$

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse de vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques[21]:

$$v(t) = 9 + 0.2.\sin(0.1047t) + 2.\sin.(0.2665t) + \sin.(1.2930t) + 0.2.\sin.(3.6645t) \quad (\text{II.3})$$

L'évolution temporelle du vent est tracée dans la figure suivante :

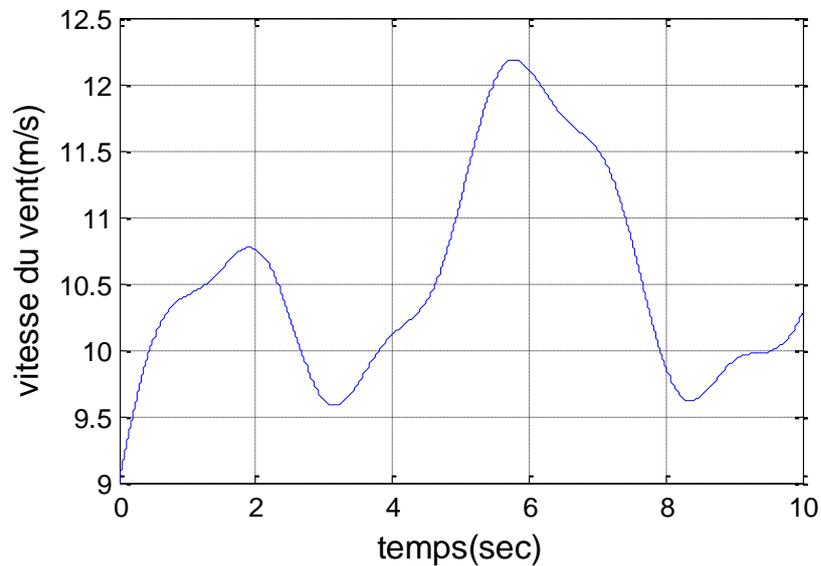


Fig.II 2 L'évolution temporelle du vent

## II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  [21].

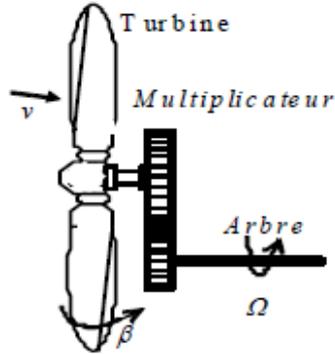


Fig.II 3 Turbine éolienne

La puissance cinétique du vent est donnée par:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$\rho = 1.25 \text{ Kg} / \text{m}^3$ : Masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

Et:  $S = \pi R^2$

$S$ : est l'aire balayée par la turbine.

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

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit

(II.5)

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) * P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Où:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda_i \quad (\text{II.6})$$

$C_p$ : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ ).

Et le paramètre  $\lambda_i$  dépend également de  $\lambda$  et  $\beta$ .

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

Où:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V} \quad (\text{II.8})$$

$\lambda$  : est le ratio de vitesse, il définit comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine

$\Omega_{turbine}$  : est la vitesse du vent.

$V$ :est la vitesse du vent.

Les six coefficients définis :  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  dépendent de la turbine considérée sont :

$$C_1 = 0.5176; C_2 = 116; C_3 = 0.4; C_4 = 5; C_5 = 21, C_6 = 0.0068$$

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

$$C_{turbine} = \frac{P_{turbine}}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.9})$$

### II.2.3 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, il adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice .ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les expressions suivantes [20]:

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

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{turbine} \quad (\text{II.11})$$

Où :

$G$  = Rapport de multiplication.

$C_{mec}$  = Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi.

$\Omega_{mec}$  : vitesse mécanique (du générateur) en rad/s.

### II.2.4 Modèle de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique partir du couple mécanique total ( $C_T$ ) appliqué au rotor [22]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T \quad (\text{II.12})$$

Où :

$J$  = inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) ( $Kg \cdot m^2$ )

$C_T = (C_{em} + C_{mec} - f \Omega_{mec})$  Couple totale de l'éolienne ( $N.m$ ).

$\Omega_{mec}$  = la vitesse mécanique.

$f$  = coefficient de frottement visqueux.

$C_{em}$  = couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple  $C_{em}$  a un signe négatif.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément est représenté par la figure:

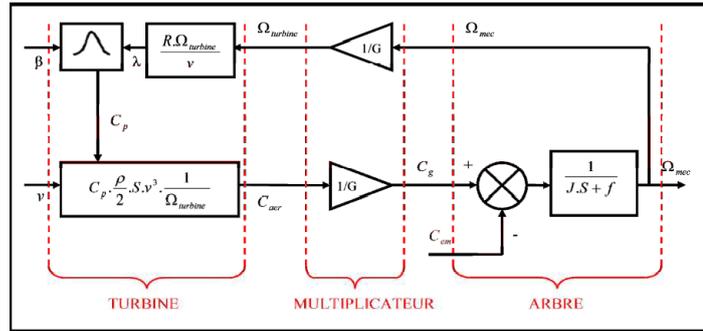


Fig.II 4 Schéma bloc du modèle de la turbine

## II.2.5 Stratégie de commande de la turbine éolienne

### II.2.5.1 Principe de la MPPT

L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme ou un système capable d'aider la chaîne de conversion pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible. la sortie du système MPPT est une vitesse optimale variant selon la vitesse du vent capturée [23]. Afin de capter le maximum de puissance de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence à la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. La vitesse mécanique optimale de la turbine correspond à  $\lambda^{opt}$  et  $\beta=0$  [24].

L'équation suivante donne la puissance correspondant à une vitesse de vent  $V$  :

$$p_{turbine} = \frac{1}{2} C_{p \max} \rho \pi R^2 V^3 \quad (II.13)$$

Avec:

$$C_{p \max} = C_p(\lambda^{opt}) \quad (II.14)$$

Si le ratio est optimal

$$\lambda_{opt} = \frac{R \Omega_{turbine}}{V} \quad (II.15)$$

Donc la vitesse de vent se présente comme suit :

$$V = \frac{R \Omega_{turbine}}{\lambda^{opt}} \quad (\text{II.16})$$

Alors on trouve que la puissance optimale de la turbine éolienne est :

$$P_{turbine}^{opt} = \frac{1}{2} C_{p \max} \rho \pi \left( \frac{R}{\lambda^{opt}} \right) \Omega_{turbine}^3 \quad (\text{II.17})$$

En conclue que le couple optimal de la turbine devient :

$$C_{turbine}^{opt} = \frac{1}{2} C_{p \max} \rho \pi \left( \frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \Omega_{turbine}^2 \quad (\text{II.18})$$

### II.2.5.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

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

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique est idéale et donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence [25].

$$C_{em} = C_{em\_ref} \quad (\text{II.19})$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Le couple électromagnétique de référence  $C_{em \text{ ref}}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  obtenu par la relation suivant [21]:

$$C_{em - ref} = K_{ass} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$K_{ass}$ : Régulateur de vitesse.  $\Omega_{ref}$ : Vitesse de référence.

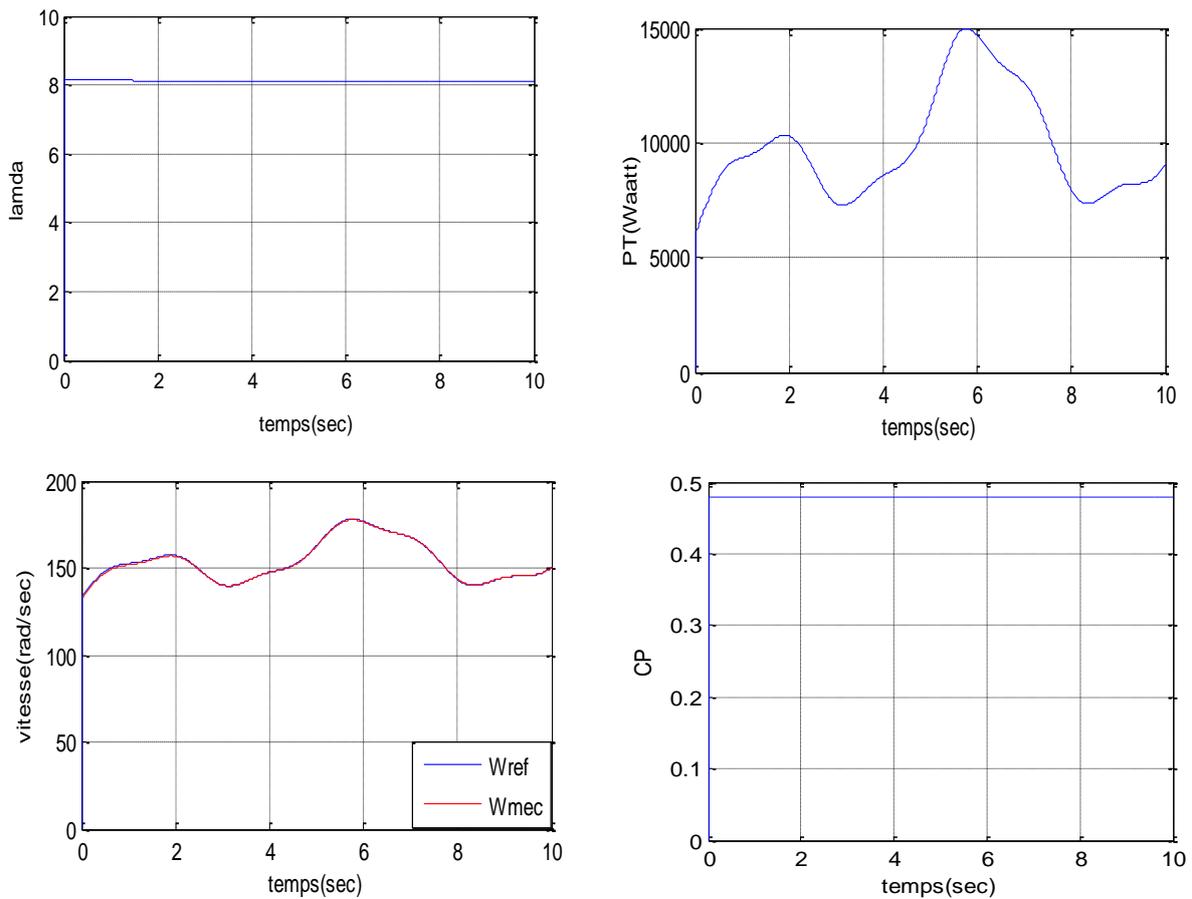
Selon l'équation (II-5), la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{V \cdot \lambda}{R} \quad (\text{II.21})$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda^{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{p \max}$  peut se déduire de

$$\Omega_{tur - ref} = \frac{V \cdot \lambda^{opt}}{R} \quad (\text{II.22})$$

## II.2 6.Resultat de simulation



**Fig.II 5** résultats de simulation MPPT en boucle ouverte

### II.2.7.Interpretation des résultats

L'allure de la vitesse de l'arbre de la turbine donnée permet de constater qu'elle est la réplique exacte de la vitesse de référence. On remarque une différence peut être calculée par l'erreur

$$E = w_{ref} - w_{mec}$$

La commande par asservissement de la vitesse a permis de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur maximale qui est de 0.48, et la vitesse spécifique de sa valeur optimale qui est de 8.1

## II. 3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

### II.3.1 Introduction

Les machines à aimants se développent de manière importante à l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés.

Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur donne une induction dans l'entrefer plus élevée et annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement. Le modèle analytique du 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 [26].

- L'absence de la saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (fmm), créée par l'enroulement du stator.
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés
- L'effet des encoches est négligé.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température [27].

### II.3.2 Mise en équation de la MSAP

#### II.3.2.1 Equations électriques dans le repère (abc)

Fig. II. 71), et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

En revanche, l'inconvénient majeur réside dans le fait qu'on perd toute possibilité de réguler le courant inducteur. Ceci rend très difficile de faire fonctionner la machine en survitesse. On doit alors imposer des courants statoriques qui affaiblissent le flux rotorique.

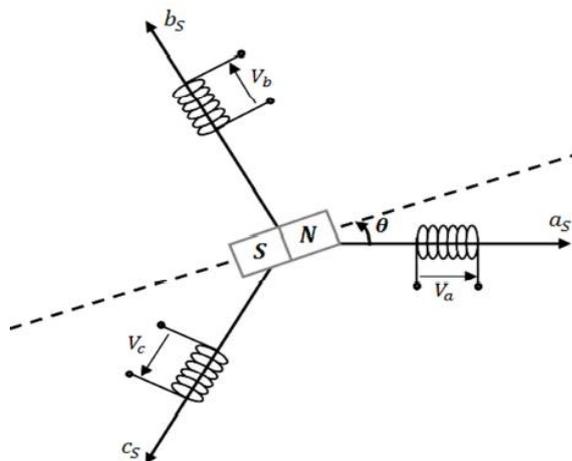
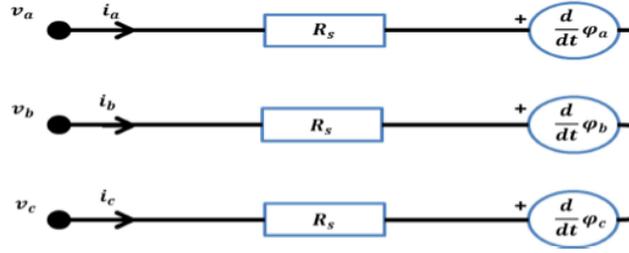


Fig.II 6 Présentation d'une MSAP dans le repère (abc).

Le point de départ dans l'étape de l'élaboration du modèle électrique de la machine consiste à modéliser le circuit des enroulements de phases illustrés dans la Fig. (II.4). Cette figure définit les tensions de phase  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  et les courants instantanés  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  circulant dans ces phases ainsi que les FEM induites.

Le point neutre du circuit en question est défini par la tension  $V_n$  et la résistance électrique d'une phase dans l'enroulement est désignée par  $R_s$ . quatre équations de base peuvent être trouvées [26].

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.23})$$


**Fig.II 7** Structure électrique du stator d'une MSAP

Les tensions s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes:

$$V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \quad (\text{II.24})$$

$$V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \quad (\text{II.25})$$

$$V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \quad (\text{II.26})$$

La mise sous forme matricielle de la tension est donnée par :

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.27})$$

[Vabc] t : Vecteur tension des phases statoriques;

[Iabc] t : Vecteur courant des phases statoriques;

[Φsabc] t : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques;

R<sub>s</sub> : la résistance des phases statoriques.

Les flux totalisés  $\Phi_s$  des phases statoriques s'écrivent dans un champ lié au stator sous la forme matricielle suivante :

$$[\phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\phi_{sf}] \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\phi_{sf} = [\phi_{af} \quad \phi_{bf} \quad \phi_{cf}] \quad (\text{II.30})$$

$\phi_{sf}$  : représente le vecteur de projection du flux de l'aimant permanent sur les 3 trois phases a, b, c.

$L_{SS}$  : est la matrice des inductances statoriques

$L_{Sa}, L_{Sb}, L_{Sc}$  : Les inductances propres respectivement les phases a, b et c.

### II.3.2 2. Passage au repère de Park (d q)

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère, cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor [26].

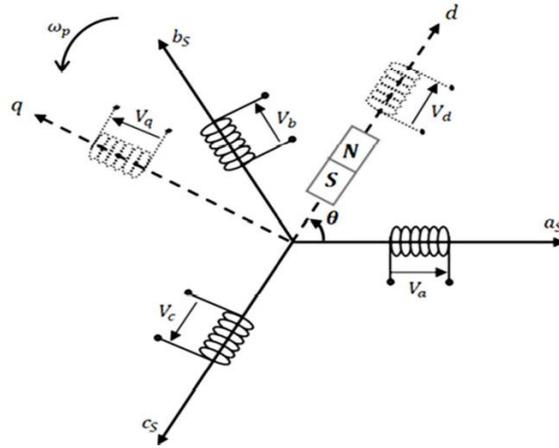


Fig.II 8 Représentation d'une MSAP dans le repère (d q).

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

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Et on a:

$$P[\theta]^{-1} = P[\theta]^t \quad (\text{II.32})$$

Donc:

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

### II.3.2 3 Equations électriques du MSAP dans le repaire de Park:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Les équations précédentes présentes les tensions en fonctionnement moteur et pour le fonctionnement en génératrice en inversant le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$ . Donc on obtient les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

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

### II.3.2 4 Equations du flux magnétiques

Il est présenté comme suit :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \phi_f \\ \phi_{qs} = L_q \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

### II.3.2.5 Equation 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 [27].

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} P \frac{dw_e}{d\theta_r} \quad (\text{II.37})$$

Avec:

$w_e$  : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$  : Ecart angulaire de la partie mobile par rapport à la partie fixe (rotor par rapport au stator)

P : Nombre de paires de pôles.

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.38})$$

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

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[ -R_s (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - (i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt}) + \frac{d\theta_r}{dt} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \right] \quad (\text{II.39})$$

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

$\frac{3}{2} \cdot (i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt})$  : 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  $W = p \cdot \Omega$  ( $\Omega$  : vitesse mécanique)

Alors

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.40})$$

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

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + i_{qs} \cdot \phi_f] \quad (\text{II.41})$$

### II.3.2 6 Equations mécaniques

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.42})$$

Tel que:

$C_{em}$  : Couple moteur.

$f\Omega$  : Couple de frottements visqueux.

f: coefficient des frottements visqueux.

J: moment d'inertie de la machine

## II.4 La Commande Vectorielle

### II.4 1 Introduction

Elle est appelée « commande par orientation de flux » et notée foc ( Field oriented control).

Le contrôle de la machine synchrone consiste au contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Cependant, la formule du couple électromagnétique complexe, elle ne rassemble pas à celle d'une machine à courant continu à excitation séparé ou la force magnétomotrice de l'induit établi un angle de  $90^\circ$  ceci quelle que soit la vitesse de rotation, et le découplage est naturelle entre le

réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée, on se trouve donc confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple.

En 1971, BLASCKE a proposé une théorie de commande par champ orienté qui permet d'assimiler le comportement de la machine synchrone à aimant permanents à une machine à courants continus à excitation séparée [28].

### II.4.2 Principe et structure de la commande vectorielle de la génératrice

Le contrôle vectoriel porte en générale sur des machines alimentées en tension et régulière en courant sur les axes d et q, il consiste à maintenir la composante Id nulle et le contrôle de couple se fait uniquement par le courant Iq. Ceci revient à maintenir le courant statorique en quadrature avec le flux inducteur (l'axe d) ce qui est donné un couple maximal et qui vérifie le principe de la MCC à excitation séparée. Cela permet de simplifier l'expression de couple de l'équation [29].

$$C_{em} = \frac{3}{2} p i_q \Phi_f \qquad C_{em} = K_t i_q \qquad (II.43)$$

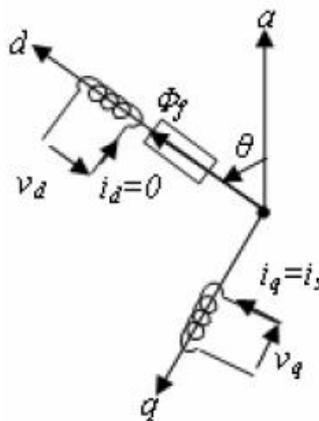


Fig.II 9 principe de la commande vectorielle

#### II.4.2.1 Découplage dynamique entrée sortie

Les courants Id et Iq dépendent simultanément des grandeurs d'entrées vd et vq, alors nous avons ici un système multi-variable à deux entrées et deux sorties couplées. Afin de pouvoir mettre en place des commandes mono-variables, nous partons des équations régissant de la GSAP pour découpler le système. Pour découpler l'évolution des courants Id et Iq par rapport aux commandes, définissons les termes de compensation ed et eq tel que [30]:

$$\begin{cases} v_d = -(R_s i_d) - l_d \frac{di_d}{dt} + (l_q i_q \omega) \\ e_d = l_q i_q \omega \end{cases} \qquad (II.44)$$

$$\begin{cases} V_q = -(R_s * i_q) - l_q * \frac{di_q}{dt} \pm l_d * i_d * \omega + \Phi f * \omega * \sqrt{3/2} \\ e_q = -\omega * l_d * i_d + \Phi f * \omega \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

### II.4.2.2 Boucle de commande

Pour piloter les deux courants  $I_d$  et  $I_q$ , il est nécessaire de faire la synthèse de deux correcteurs PI, en fournissant la consigne de couple de référence à la boucle  $I_q$

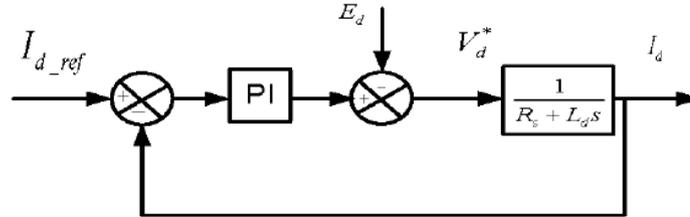


Fig.II 10 Boucle de régulation du courant  $i_d$

Les constantes de correcteur PI ( $K_{pd}$  et  $K_{id}$ ) sont identiques pour la boucle de courant d'axe direct et en quadrature.

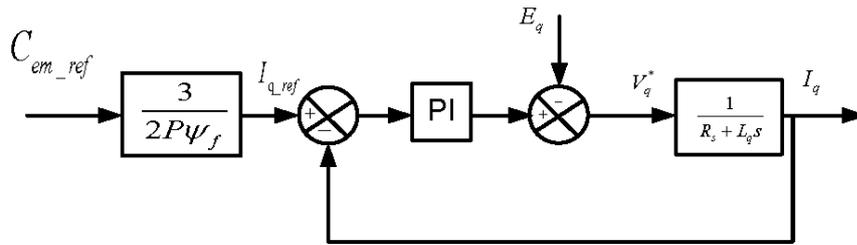


Fig.II 11 Boucle de régulation du courant  $i_q$

La fonction de transfert en boucle ouverte  $F_{bo}(s)$

$$F_{bo}(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left(\frac{1}{R_s + sL_d}\right) \quad (\text{II.46})$$

Si on compose le terme  $\frac{k_p}{k_i}$  par le terme  $\frac{L_d}{R_s}$ , on obtient la condition suivante  $\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_p}{K_i}$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant:

$$F_{bo}(s) = \frac{K_i}{sR_s} \quad (\text{II.47})$$

On boucle fermé, nous obtenons un système du première ordre défini par:

$$F_{bf}(s) = \frac{1}{\frac{R_s}{k_i}s + 1} \quad (\text{II.48})$$

La constant de temps en boucle fermés est définie par:

$$\tau_{bf} = \frac{R_s}{K_i} \quad (\text{II.49})$$

L'action intégrale du PI est obtenue comme suit:

$$K_i = \frac{R_s}{\tau_{bf}} \quad (\text{II.50})$$

Si l'on choisit le temps de réponse souhaité égale à  $3\tau_{bf}$ , On aura donc:

$$\begin{cases} K_p = \frac{3L_d}{t_{rep}} \\ K_i = \frac{3R_s}{t_{rep}} \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

### II.4 3 Contrôle de la vitesse par régulateur PI

Une fois la régulation du courant est validée, il est possible de mettre en place une boucle de vitesse souhaité. La vitesse est commandée au moyen d'un régulateur de type PI. Notre choix pour un tel régulateur est guidé par:

- L'amélioration de sa stabilité en boucle fermée.
- La connaissance et la maîtrise de ce type de régulateur et son application dans l'industrie;
- La robustesse de sa commande [21].

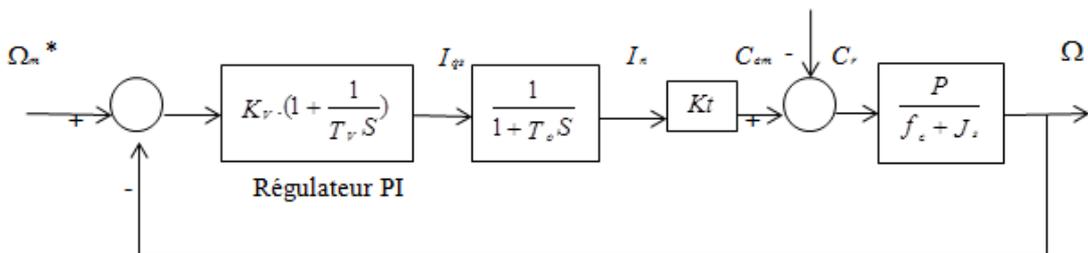


Fig.II 12 Boucle de régulation de la vitesse

La fonction de transfert de la boucle de vitesse en boucle fermée est donnée par :

$$G_{BF}(s) = \frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{(1 + T_v s)}{\frac{JT_v T_0}{pK_t K_v} s^3 + \frac{(JT_v + f_c T_v T_0)}{pK_t K_v} s^2 + (\frac{f_c T_v}{pK_t K_v} + T_v) s + 1} \quad (\text{II.52})$$

Compte tenu des termes de découplage que l'on introduit dans les boucles interne et en compensant le zéro du régulateur PI, la fonction de transfert de la boucle de vitesse en boucle fermée se réduit à:

$$G_{BF}(s) = \frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{(1 + T_v s)}{\frac{JT_v}{pK_t K_v} s^2 + \left(\frac{f_c T_v}{pK_t K_v} + T_v\right) s + 1} \quad (\text{II.53})$$

Avec:

$$K_t = p * \Phi f \quad (\text{II.54})$$

Après identification avec un système de second ordre on obtient:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (\text{II.55})$$

Avec:

$\zeta$  : est le taux d'amortissement imposé au système.

$\omega_n$  : est la pulsation naturelle du système.

$$K_v = \frac{2\zeta\omega_n J - f_c}{pK_t} \quad (\text{II.56})$$

Avec:

$$K_{iv} = \frac{K_v}{T_v} \quad (\text{II.57})$$

$$T_v = \frac{pK_t K_v}{J\omega_n^2} \quad (\text{II.58})$$

Alors:

$$K_{iv} = \frac{J\omega_n^2}{pK_t} \quad (\text{II.59})$$

## II. 4 Redresseur

Les redresseurs sont des convertisseurs statiques permettant, à partir de tensions alternatives d'obtenir des grandeurs électriques continues dont la valeur moyenne est différente de zéro. L'intérêt des dispositifs statiques modernes réside dans le fait qu'ils effectuent toutes les transformations par fermeture et ouverture d'interrupteurs électroniques présentant des temps de réponse faibles, des pertes faibles et un encombrement réduit.

### II.5.1 Modèle du redresseur MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés 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.[21]

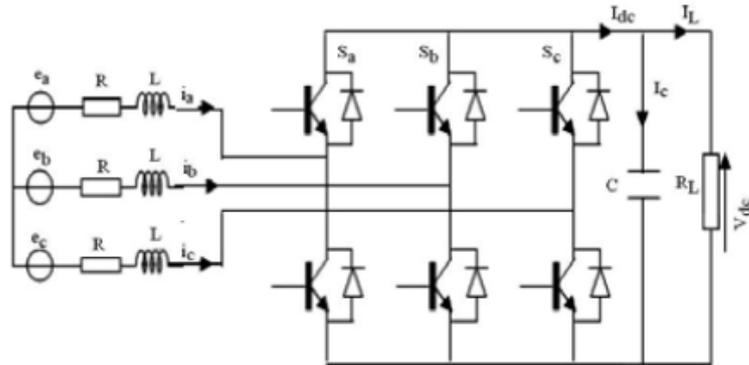


Fig.II 13 Schéma d'un redresseur

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire : résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué et réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties : le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1. \bar{S} = -I \\ -1. \bar{S} = +I \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

Pour:  $S=a,b,c$ .

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de:  $S_j$ ,  $U_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  tel que:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.61})$$

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

$$U_{s \ ab} = (S_a - S_b).U_d \quad (\text{II.62})$$

$$U_{s \ bc} = (S_b - S_c).U \quad (\text{II.63})$$

$$U_{sca} = (S_c - S_a) \cdot U_{dc} \quad (\text{II.64})$$

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.65})$$

Avec:

$$U_{sa} = \frac{2 * S_a - S_b - S_c}{3} * U_{DC} \quad (\text{II.66})$$

$$U_{sb} = \frac{2 * S_b - S_a - S_c}{3} * U_{DC} \quad (\text{II.67})$$

$$U_{sc} = \frac{2 * S_c - S_b - S_a}{3} * U_{DC} \quad (\text{II.68})$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:[31]

$$C * \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a * i_a + S_b * i_b + S_c \quad (\text{II.69})$$

## II. 5 Onduleur

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative, il existe des onduleurs :

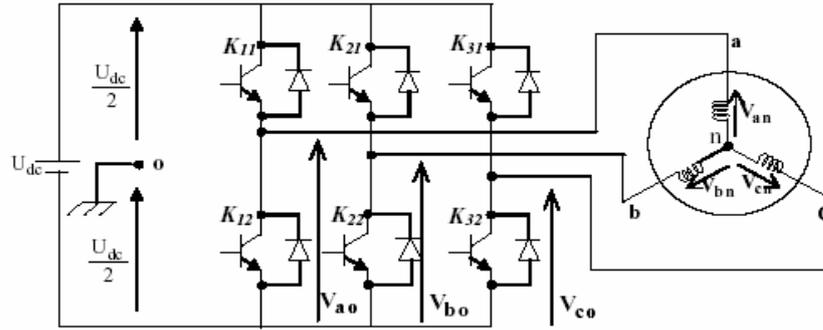
- Non autonome : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la source du côté alternative (le réseau).
- Autonome : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la commande de la source du côté continu [18]

### II.6.1 Modélisation de l'onduleur:

La structure intéressante est celle avec un onduleur commandable par la modulation de largeur d'impulsions. Pour simplifier l'étude on suppose que:

- ✓ **La charge est équilibrée** couplée en étoile avec neutre isolé.
- ✓ **Interrupteurs parfaits** : la commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture nuls) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle.
- ✓ **Alimentations parfaites** : la tension aux bornes du bus continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée [32]

Un onduleur de tension est donné par la figure



**Fig.II 14** Schéma d'un onduleur de tension

On a, donc :

$I_k = 0, V_k \neq 0$  ; Interrupteur ouvert.

$I_k \neq 0, V_k = 0$  ; Interrupteur fermé.

Les tensions composées :  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ , sont obtenues à partir de ces relations :

$$V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \quad (\text{II.70})$$

$$V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \quad (\text{II.71})$$

$$V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \quad (\text{II.72})$$

$V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$  : sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations comme suites :

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no} \quad (\text{II.73})$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \quad (\text{II.74})$$

$$V_{co} = V_{cn} + V_{no} \quad (\text{II.75})$$

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  : sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives).

$V_{no}$  : est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système  $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$  équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.76})$$

La substitution aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.77})$$

$$V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (\text{II.78})$$

$$V_{bn} = \frac{-1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (\text{II.79})$$

$$V_{cn} = \frac{-1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \quad (\text{II.80})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu- alternatif.

$$[V_{ac}] = [T].[V_{dc}] \quad (\text{II.81})$$

$$[V_{AC}] = [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T \quad (\text{II.82})$$

$$[V_{dc}] = [V_{ao} \ V_{bo} \ V_{co}]^T \quad (\text{II.83})$$

$$[V_{dc}] = U_{dc}[S1 \ S2 \ S3]^T \quad (\text{II.84})$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale:  $S_i = (0 \text{ ou } 1)$  et  $\{i=1, 2, 3\}$

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.85})$$

L'onduleur peut être commandé en utilisant plusieurs techniques dont: la commande par hystérésis et la technique de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI). Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI[16].

## II.6.2 La commande MLI

Pour assurer la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on distingue plusieurs type de techniques de modulation de largeur d'impulsion peuvent être considérées, dont en peut citer: La modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde, et la MLI vectorielle (SVM: space vector modulation).

### II.6.3.1 La modulation sinus-triangle

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ), d'amplitude variable et de fréquence  $f$  appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

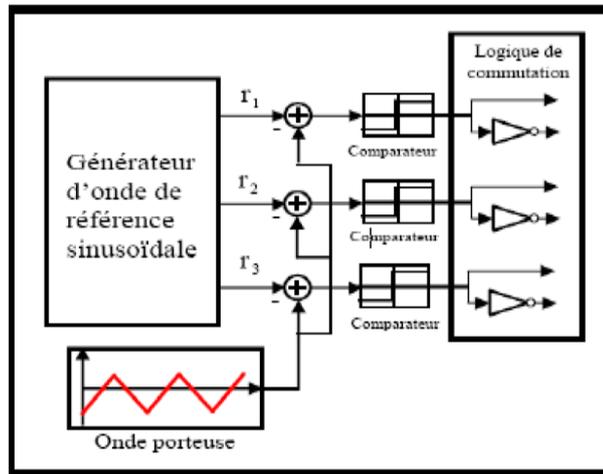


Fig.II 15 modulation sinus-triangle

#### Caractéristique de la modulation

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

- ✓ Indice de modulation  $m$  égale au rapport de la fréquence  $f_c$  de la porteuse à la fréquence  $f_m$  de la référence  $m=f_c/f_m$ .
- ✓ Taux de modulation ou coefficient de réglage de tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence  $A_m$  à celle de la porteuse  $A_c$ ;  $r = A_m/ A_c$
- ✓ Le facteur d'évaluation des performances de la MLI, le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie THD, défini par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension,

$$THD = \frac{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{1/2}}{(\sum_{i=1}^n V_i^2)^{1/2}} \quad (II.86)$$

Pour un onduleur triphasé à deux niveaux, le signal de commande généré par chacune des deux techniques:

- Modulation sinusoïdale naturelle
- Modulation sinusoïdale à doubles triangles

Dans ce travail, nous sommes intéressées par la première technique.

### Modulation sinusoïdale naturelle

Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de  $120^\circ$ , de fréquence et d'amplitude  $A_m$ , avec un signal triangulaire d'amplitude  $A_c$  et de fréquence  $f_c$  très supérieur à  $f_m$ .

La figure montre le principe de la technique MLI sinusoïdale naturelle utilisée pour un onduleur triphasé à deux et trois niveaux [33]:

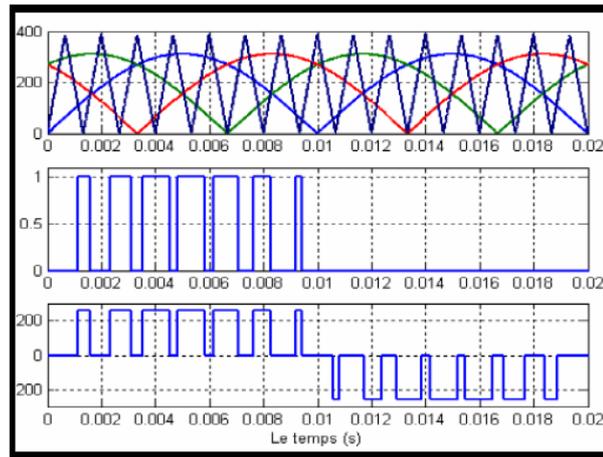


Fig.II 16 Modulation sinusoïdale naturelle

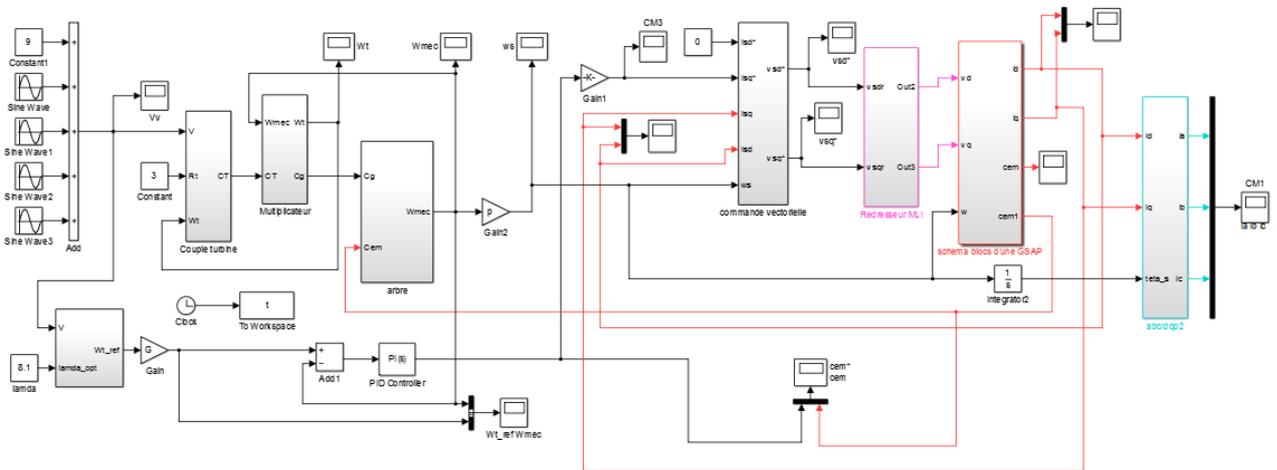
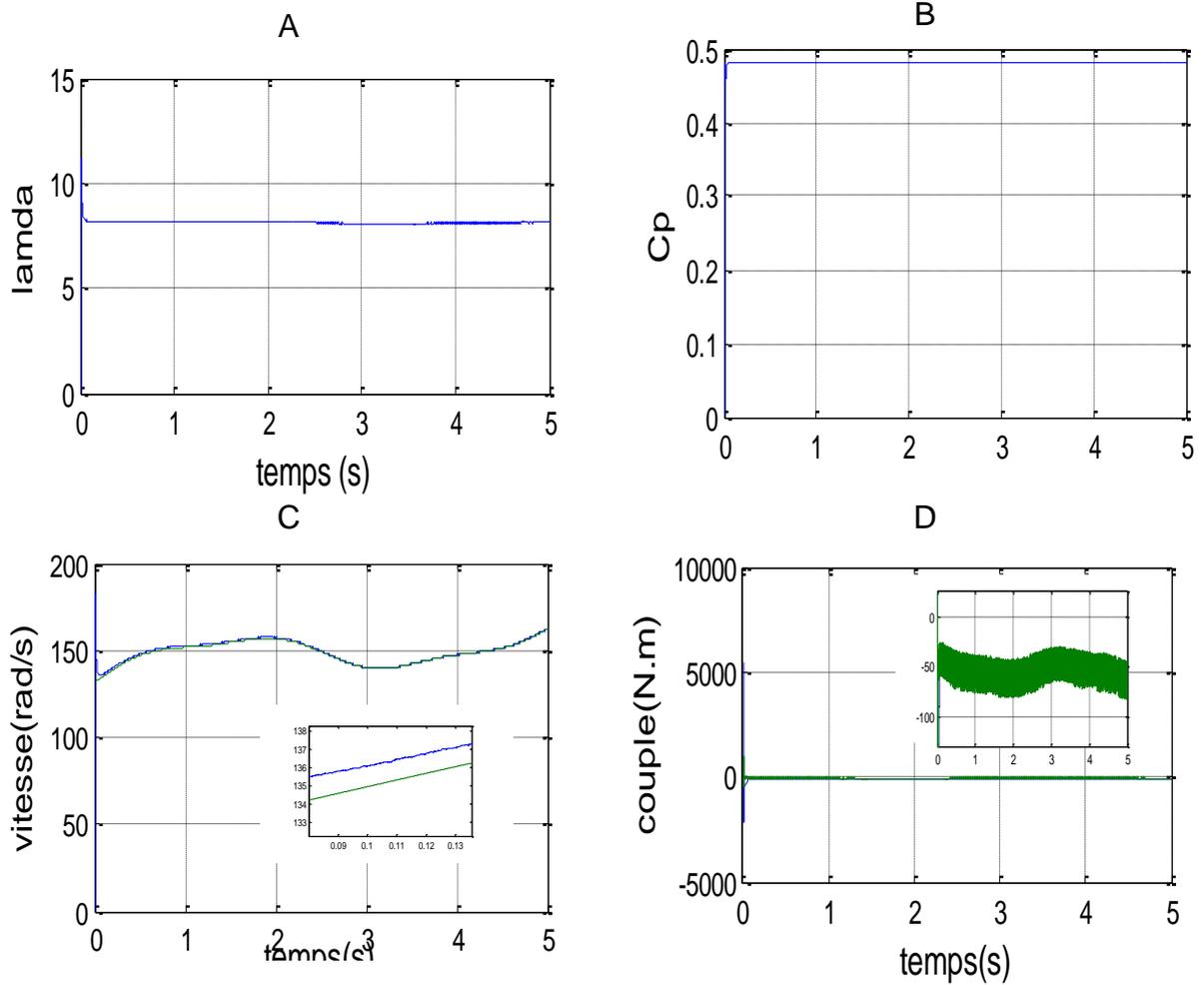


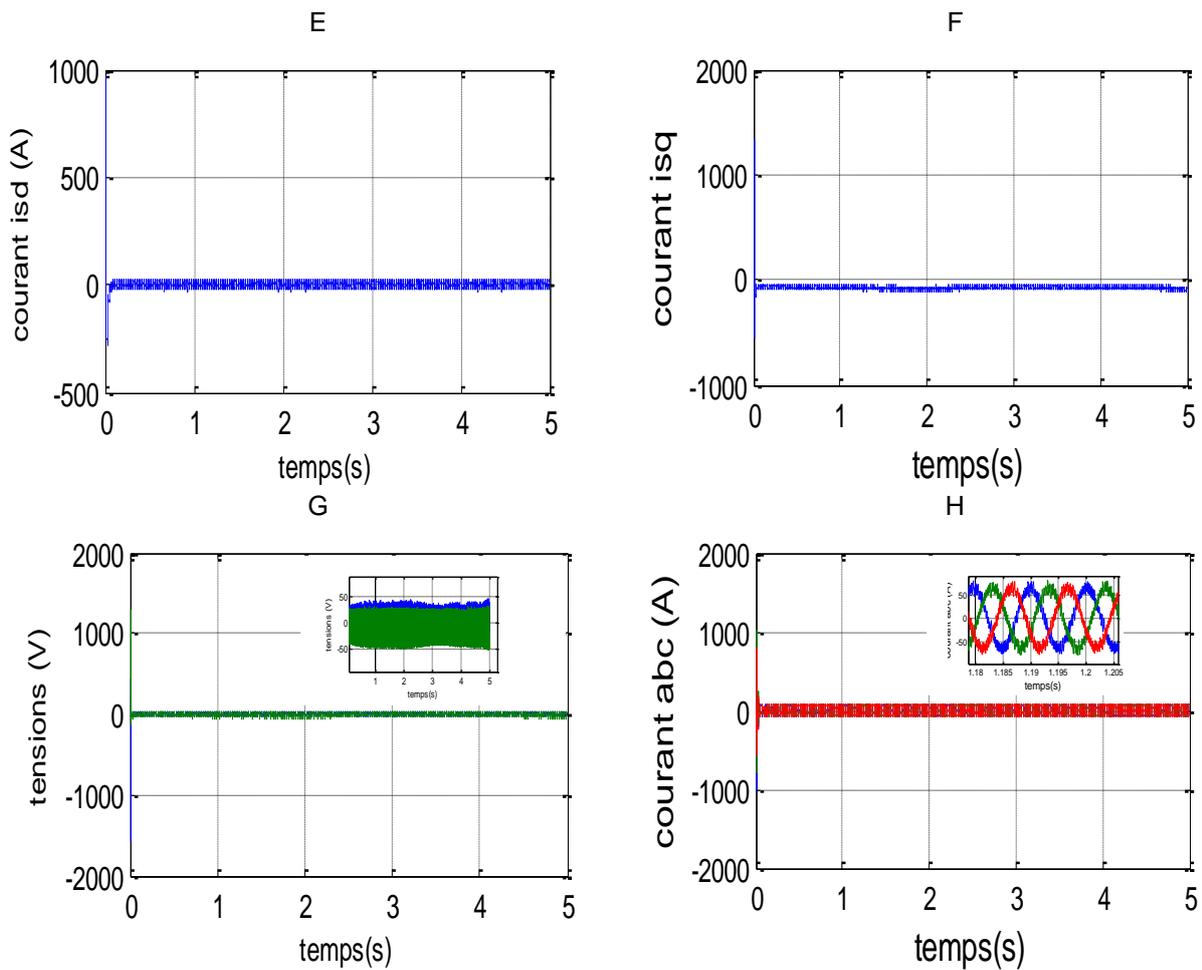
Fig.II 17 Schéma bloc Simulink du modèle avec la commande vectorielle

## II. 6 Résultats de la simulation de la commande vectorielle



**A** : lamda, **B** : le coefficient de la puissance  $C_p$ , **C** : la vitesse de référence et la vitesse mesuré et **D** : le couple

**Fig.II 18** Allures des grandeurs mécaniques du système pour la commande vectorielle



**E** : le courant direct Isd, **F** : le courant quadrature Isq, **G** : les tensions, **H** : les courants a,b,c.

**Fig.II 19** Allures des grandeurs électriques du système pour la commande vectorielle:

## II. 7 Interprétation de résultats

La figure ci-dessus représente les résultats de la simulation enregistrée de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent ces résultats, on remarque que la vitesse mesuré suit

- ✓ La vitesse de référence (vent) avec une petite erreur (1.4 rad/s).avec lamda optimale.
- ✓ Le couple varie autour de la valeur -50N.m
- ✓ Les courants statoriques sont alternatifs mais pas purement sinusoidales.

## II. 8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Nous avons tout d'abord introduit quelques notions sur la turbine éolienne et nous avons présenté ses différents éléments et sa modélisation. Une fois les constituants d'une éolienne présentés, nous avons abordé, dans une seconde partie, la modélisation de la GSAP ainsi que redresseur MLI. Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de vérifier ce modèle en boucle ouverte. En fin, nous avons appliqué la stratégie de la commande vectorielle avec l'utilisation des régulateurs PI (la vitesse et les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ ).

Les résultats de simulations ont donné de bonnes performances dynamiques tout en assurant un découplage entre le couple et le flux.

Dans un but d'améliorer les performances de cette commande, on va utiliser une commande robuste qui est la commande floue.

# Chapitre III: Commande floue de la GSAP

### III. 1 Introduction

Au départ théorie, la logique floue s'affirme comme une technique opérationnelle utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle Industriel. Elle est apparue comme une substitution à logique stricte, imitant ainsi le comportement empirique du cerveau humain, et ne remplace pas nécessairement les systèmes de régulation conventionnels. Elle est complémentaire ses avantages viennent notamment de ses capacités à :

- ✓ formaliser et simuler l'expertise d'un opérateur ou d'un concepteur dans la conduite et le réglage d'un procédé.
- ✓ donner une réponse simple pour les procédés dont la modélisation est difficile.
- ✓ prendre en compte sans discontinuité des cas ou exceptions de natures différentes, et les intégrer au fur et à mesure dans l'expertise.
- ✓ prendre en compte plusieurs variables et effectuer de la « fusion pondérée » des grandeurs d'influence [31].

Dans ce chapitre, on présentera un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera comment construire un régulateur flou et son application au réglage de vitesse de la turbine. Des résultats de simulation seront aussi présentés et une comparaison entre le régulateur PI classique et PI flou sera effectuée pour montrer l'amélioration du comportement dynamique de la vitesse de la turbine.

### III. 2 Historique

Les origines de la logique floue se trouvent dans le principe de l'incertitude de Heisenberg. Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur  $\frac{1}{2}$  dans le système logique bivalent  $\{0, 1\}$ . Au début des années 30, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a développé le système logique avec trois valeurs.

Depuis les années 30, Max Black a appliqué la logique floue aux ensembles d'éléments ou de Symboles. Il a dessiné la première fonction d'appartenance (*Membershipfunction*).

Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous-ensembles flous soit proposé par Lotfi Zadeh, automaticien de réputation internationale, qui a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Il publia un article intitulé (*Fuzzy sets*) ou (*Ensembles flous*).

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société Smidt-Fuller en 1978. C'est la première véritable application industrielle

de la logique floue. Grâce au chercheur japonais Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue.

Freinée par la réticence à appréhender un nouveau concept et par des difficultés de réalisation pratique, la logique floue ne débouche réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et des systèmes utilisant cette technique. Et en 1995 grâce à Jang, l'application de la logique floue s'élargit aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle [26].

### III. 3.La logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne par Lofti Zadeh, elle se base sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

Un des intérêts de la logique floue est la formalisation de raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel [32].

### III. 4.La théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous permet d'exprimer l'idée d'appartenance partielle d'un élément à un ensemble ou plus précisément son degré d'appartenance. Dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble [31].



Fig. III 1.Exemple d'ensembles considérés en logique booléenne

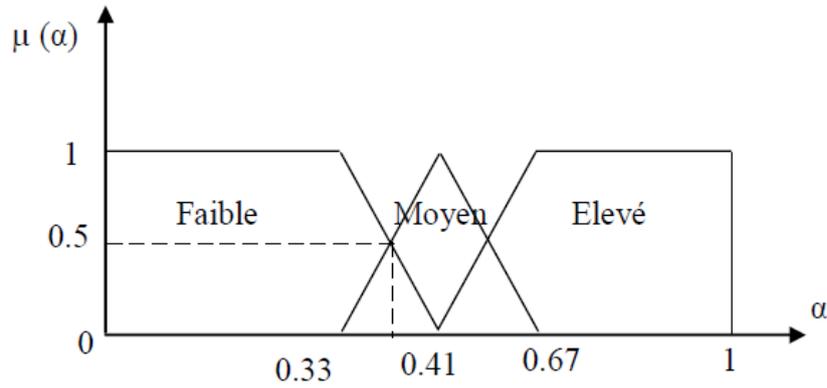


Fig. III 2 Exemple d'ensembles considérés en logique floue.

### III. 5.fonction d'appartenance

Un ensemble flou  $A$  est défini par une fonction d'appartenance  $\hat{a}(x)$  exprimé entre les valeurs  $[0,1]$  et qui quantifie le degré par lequel un élément  $x$  de  $X$  appartient à  $A$ . Plusieurs ensembles flous (parfois appelés sous-ensembles) peuvent être définis sur la même variable, chacune par une fonction d'appartenance, l'ensemble est appelé «Univers de discours  $X$ » [33].

#### III.5. 1.Représentations des fonctions d'appartenance

Plusieurs formes non linéaires peuvent représenter les fonctions d'appartenance. Les formes trapézoïdale, triangulaire sont les plus utilisé:

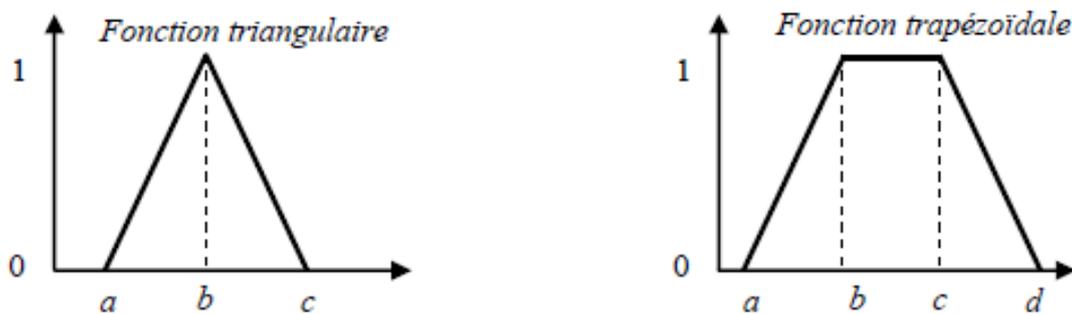


Fig. III 3Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

### III.5. 2.Univers de discours

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue  $x$  et  $\mu(x)$  est le degré d'appartenance de l'élément  $\mu(x)$  à l'ensemble flou  $A$ . Plus généralement, le domaine de définition de  $\mu_A(x)$  peut être réduit à un sous ensemble de l'univers de discours. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue  $x$  [31].

### III.5. 3.Variables linguistiques

La description d'une situation ou d'un procédé contient en général des variables dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou des phrases exprimés en langage naturel ou artificiel, la raison pour laquelle on utilise des mots ou des phrases à la place des nombre, est que le caractère linguistique est moins spécifique que le caractère numérique[22].

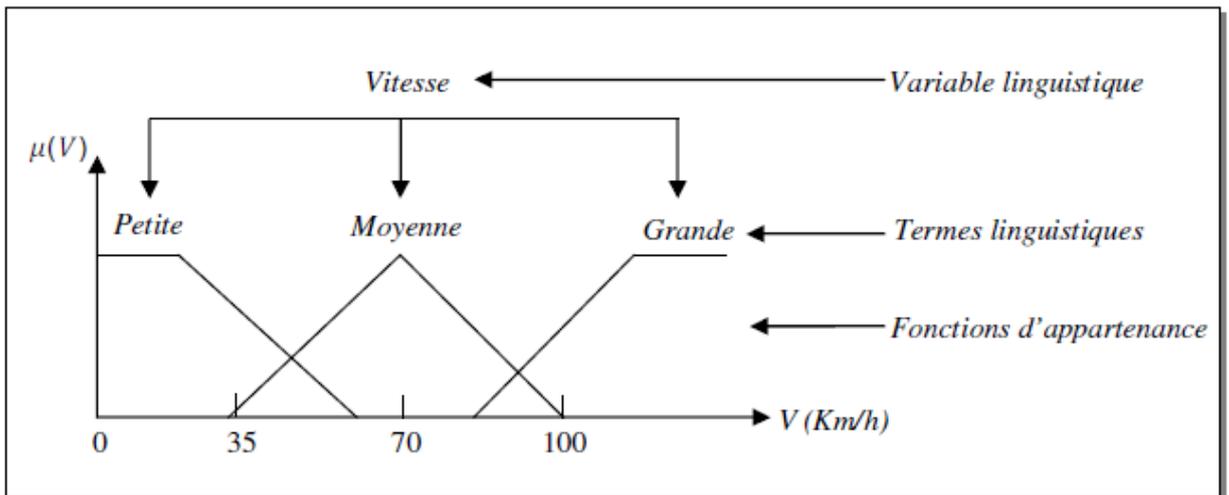


Fig. III 4 Variable linguistique

### III. 6. Structure d'un régulateur floue

Le réglage par la logique floue traite les problèmes de commande mais avec une philosophie différente. En effet, ce type de régulateurs flous ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue [34].

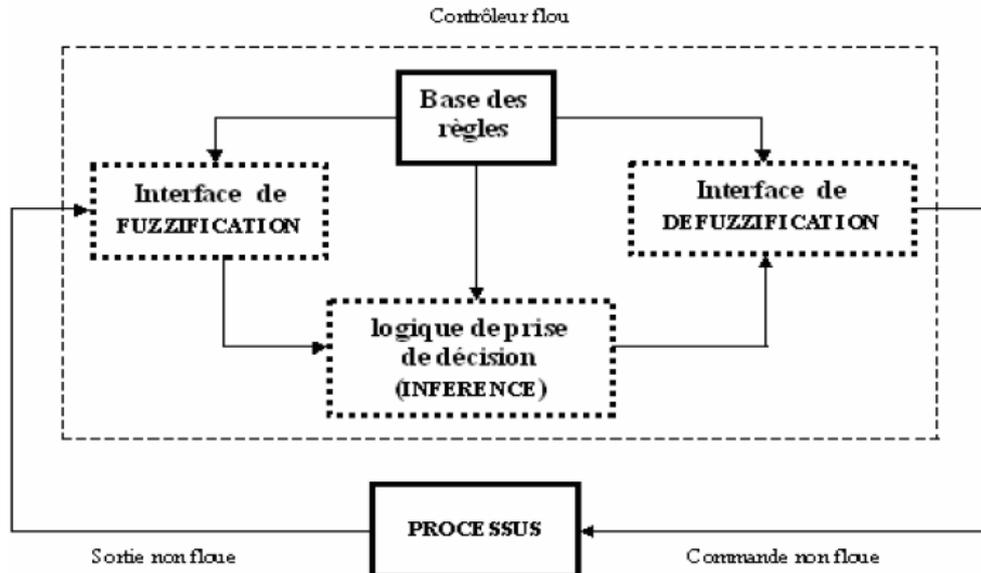


Fig. III 5. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

#### III.6. 1. Fuzzification

L'interface de FUZZIFICATION inclut les fonctions suivantes:

- ✓ Mesure des variables d'entrée.
- ✓ Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- ✓ Transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

#### III.6. 2. Base de règles

Les connaissances de l'expert sur un processus donné sont transformées en un ensemble de règles linguistiques de la forme suivante.

**Si** prémisse **Alors** conclusion

Les règles peuvent être représentées dans une matrice dite matrice d'inférence. La prémisse est un ensemble de conditions liées entre elles par des opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions

d'appartenance. Les plus communément utilisés sont: l'opérateur d'intersection "ET", l'opérateur d'union "OU", et l'opérateur de la négation ou du complément "NON"[33].

### III.6.2 1.Opérateur « ET »

Qui correspond à l'intersection de deux ensembles A et B il peut être réalisé par la fonction "Min" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.1})$$

La fonction arithmétique "Produit":

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (\text{III.2})$$

### III.6.2 2.Opérateur « OU »

Qui correspond à l'union de deux ensembles A et B il peut être réalisé par la fonction "Max" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.3})$$

La fonction arithmétique "somme" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad (\text{III.4})$$

### III.6.2 3.Opérateur « NON »

Est réalisé par[22]:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.5})$$

## III.6. 3.Logique de prise de décision (inférence floue)

A partir de la base de règles donnée par l'expert et des sous-ensembles flous correspondants à la fuzzification des entrées, le mécanisme d'inférence calcule le sous ensemble flou Y relatif à la commande du système.

### III.6. 4.Défuzzification

La défuzzification a pour objectif de transformer le sous ensemble flou défini par le mécanisme d'inférence en une valeur non floue permettant ainsi la commande effective du système [35]

#### III.6.4. 1.La méthode du centre de gravité

On présente dans ce qui suit l'une des méthodes les plus utilisées, qui sont la méthode du centre de gravité. Elle consiste à calculer le centre de gravité de la surface formée par la fonction d'appartenance issue de l'agrégation des règles.

$$u = \frac{\int x * \mu_R(x) * dx}{\int \mu_R(x) * dx} \quad (\text{III.6})$$

Au cas où les fonctions d'appartenance de la variable de sorties sont des rectangles en forme de barres « singletons », on se retrouve à un cas particulier « méthode de Sugeno » [33].

### III. 7. Commande floue de la vitesse d'une Génératrice Synchrones à Aimant Permanent

Le succès de 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 [36].

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

#### III.7. 1. 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. 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 [33].

Plusieurs structures de régulateurs sont utilisées, parmi elles, la structure Flou-PI qui est un contrôleur flou basé sur le profil du comportement d'un régulateur PI classique. Généralement, la conception d'un régulateur flou pour la commande des entraînements électriques exige les choix des paramètres suivants:

- ✓ Choix des variables linguistiques
- ✓ Choix des fonctions d'appartenance
- ✓ Choix de la méthode d'inférence
- ✓ Choix de la stratégie de défuzzification.

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 Fig (III. 6) [26]:

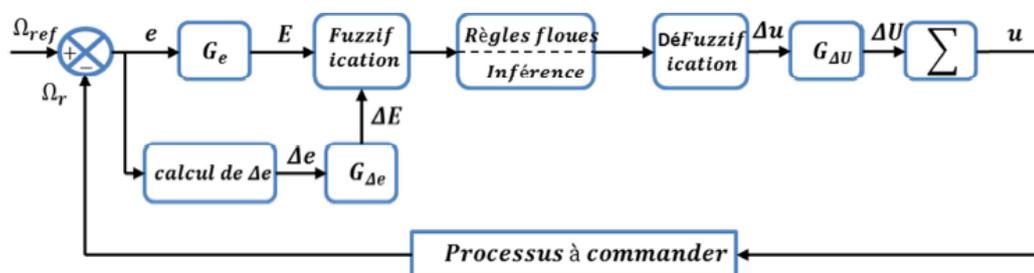


Fig. III 6 Schéma synoptique d'un contrôleur flou de vitesse

Les deux entrées du contrôleur flou sont l'erreur de vitesse et sa variation.

- ✓ L'erreur de vitesse notées est définie par :

$$e = \Delta\Omega = \Omega_{r\text{ref}} - \Omega_r \quad (\text{III.7})$$

- ✓ La variation de l'erreur de vitesse notée  $\Delta e$  est définie par :

$$\Delta e = e(t + \Delta t) - e(t) = e(k + 1) - e(k) \quad (\text{III.8})$$

La sortie du régulateur correspond à la variation de la commande ou du couple électromagnétique notée  $\Delta u$ . Les trois grandeurs,  $\Delta e$  et  $\Delta u$  sont normalisées comme suit:

$$E = G_e * e \quad (\text{III.9})$$

$$\Delta E = G_{\Delta e} * \Delta e \quad (\text{III.10})$$

Où  $G_e$ ,  $G_{\Delta e}$  et  $G_{\Delta u}$  sont des facteurs d'échelle ou de normalisation, et jouent un rôle déterminant sur les performances statiques et dynamiques de la commande.

Le régulateur flou représenté par la Fig. 6 est composé de :

- ✓ Un bloc de calcul de la variation de l'erreur de vitesse  $\Delta e$  au court de temps.
- ✓ Des facteurs d'échelle associés à l'erreur et sa variation et la grandeur de commande.
- ✓ Un bloc de fuzzification.
- ✓ Des règles floues.
- ✓ Un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande en valeur Numérique.
- ✓ Un bloc sommateur qui calcule la valeur intégrale de la commande [26]

### III.7.1. 1. Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, l'erreur de vitesse et sa variation du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert.

Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple, qui est subdivisé en cinq ensembles flous. Ceux-ci sont caractérisés par les désignations standards suivantes :

- ✓ 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 et trapézoïdales comme le montre la figure suivante [37] :

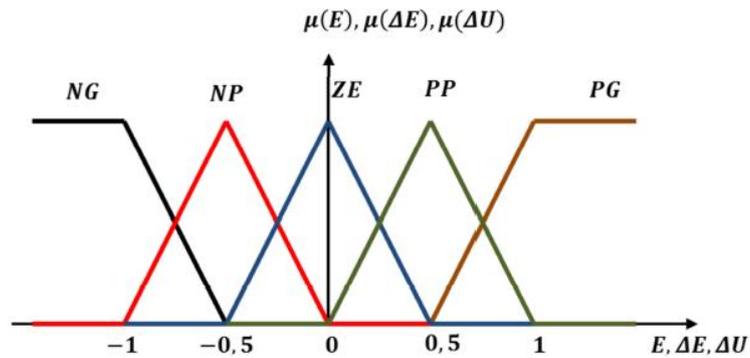


Fig. III 7 Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateur flou.

### III.7.1. 2.Base des règles

La base des règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques [26]. Elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « **Si-Alors** » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système [33]. Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur en fonction des signaux d'entrée :

$$R_i \text{ Si } X_1 \text{ est } A_1^i \text{ et } \dots \text{ et } X_n \text{ est } A_n^i \text{ Alors } u_i \text{ est } B^i$$

Avec :  $[X_1, \dots, X_n]$  : les entrées du régulateur.

$u_i$  : la sortie du régulateur.

À partir de l'étude du comportement du système en boucle fermée de vitesse régulée par PI, et en se basant sur l'expertise, nous pouvons établir les règles de commande, qui relie la sortie avec les entrées. Les règles d'inférences donnent la fonction d'appartenance de la grandeur de contrôle  $u$  en fonction des variables d'entrées  $e$  et  $E$ . Dans notre cas, la construction de la table d'inférence repose sur une analyse qualitative dans le plan de phase de la trajectoire que l'on souhaite donner au système. La figure suivante montre une des tables d'inférences possibles.

$\Delta E$	$E$	NG	NP	ZE	PP	PG
NG		NG	NG	NP	NP	ZE
NP		NG	NP	NP	ZE	PP
ZE		NP	NP	ZE	PP	PP
PP		NP	ZE	PP	PP	PG
PG		ZE	PP	PP	PG	PG

Fig. III 8 Table d'inférences des règles floues.

En effet, il est tout à fait normal de générer une variation du couple de référence PG quand l'erreur sur la vitesse de sortie de la GSAP par rapport à sa consigne et sa variation sont PG, comme indiqué sur la Fig. 8, prenons la règle suivante [26]:

*“Si E est PG et  $\Delta E$  est PG Alors  $\Delta u$  est PG”*

### III.7.1. 3.Mécanisme d'inférence

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif.

Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en générale une des méthodes suivantes:

- ✓ Méthode d'inférence max-min (Mamdani).
- ✓ Méthode d'inférence max-prod (Larsen).
- ✓ Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno). [35]

Dans notre travail, on a adopté la méthode d'inférence "Somme-produit". Dans cette méthode l'opérateur "ET" est représenté par la fonction Produit, l'opérateur "OU" par la fonction Somme ou Moyenne et pour la conclusion, l'opérateur "Alors" est représenté par la fonction Produit.

Alors la sortie floue résultante du régulateur c'est la contribution des règles floues de la table d'inférence.

### III.7.1. 4.Défuzzification

Par cette étape se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenances à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de sortie qui est la commande.

La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail, l'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivante [37] :

$$XGr = \Delta u = \frac{\int_{-1}^1 Xr * \mu_{RES}(Xr) * dXr}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(Xr) * dXr} \quad (III.12)$$

## III. 8.Réglage de vitesse de la GSAP par un contrôleur flou

Les performances du régulateur flou présentées précédemment sont étudiées et évaluées à travers une application sur la machine synchrone à aimant permanent pour assurer la poursuite de la consigne de la vitesse de rotation de l'entraînement éolien qui correspond au point optimalité à la vitesse spécifique optimale  $\lambda_{opt}$  et au coefficient de puissance maximum  $C_{pmax}$ .

### III. 9. Réglage de vitesse de la GSAP par un contrôleur flou adaptatif

Dans cette partie, on a ajouté deux gains à notre régulateur flou pour obtenir un nouveau contrôleur sous le nom de régulateur flou adaptatif. Ceci fait pour l'amélioration de la performance de système pour avoir une meilleure robustesse (l'allure est plus stable et plus voisine à la référence)

### III. 10. Résultats de simulation

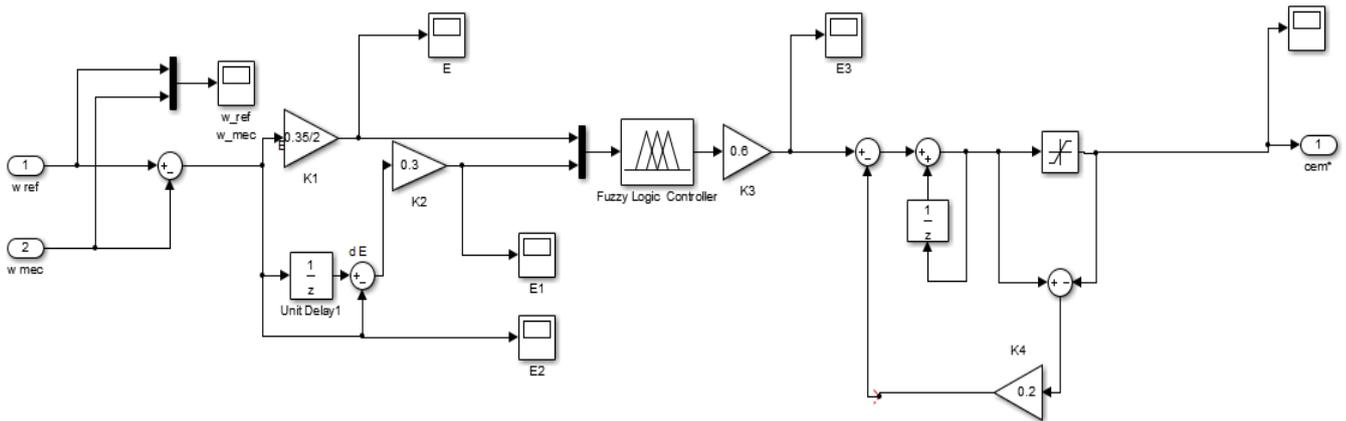
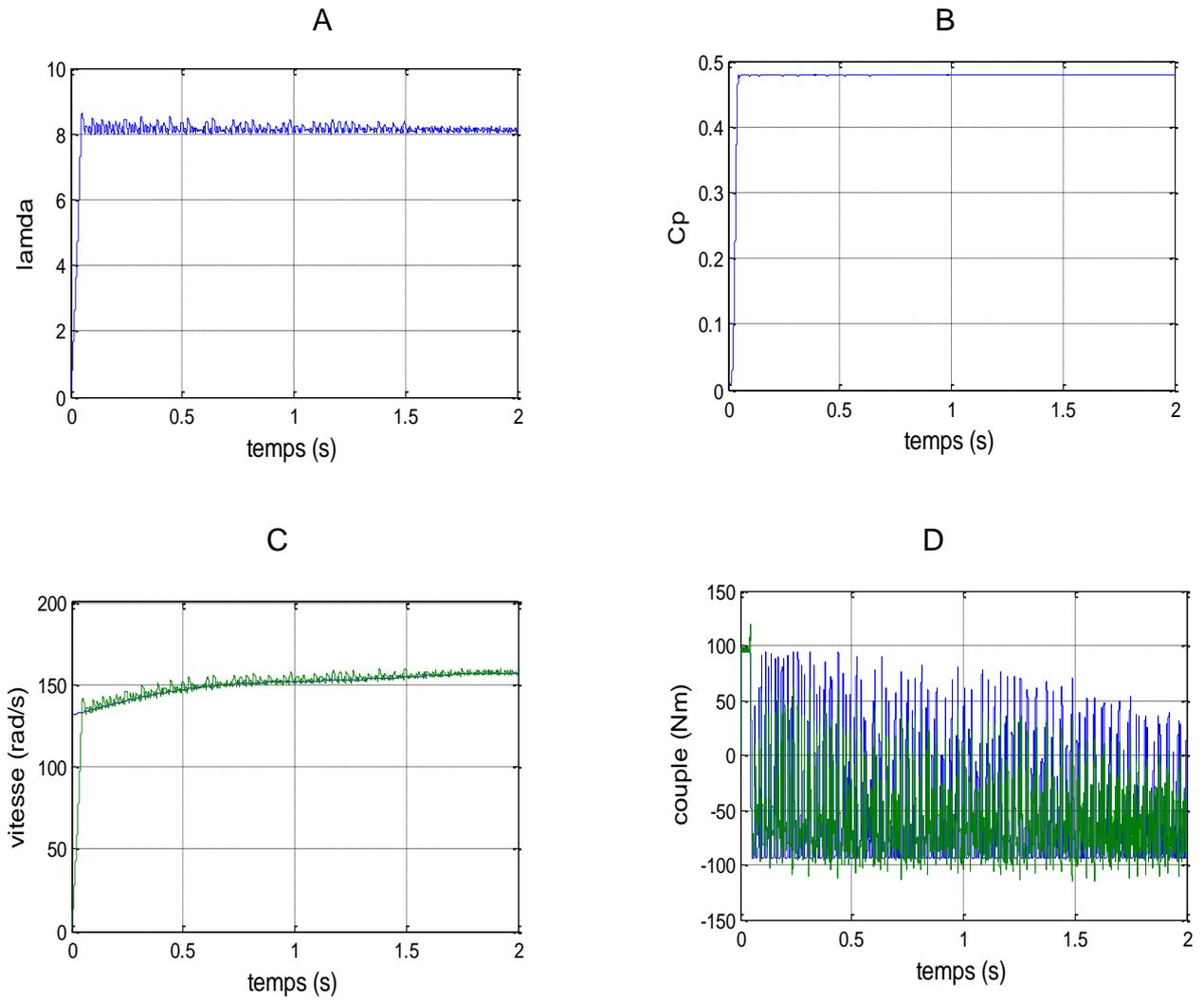


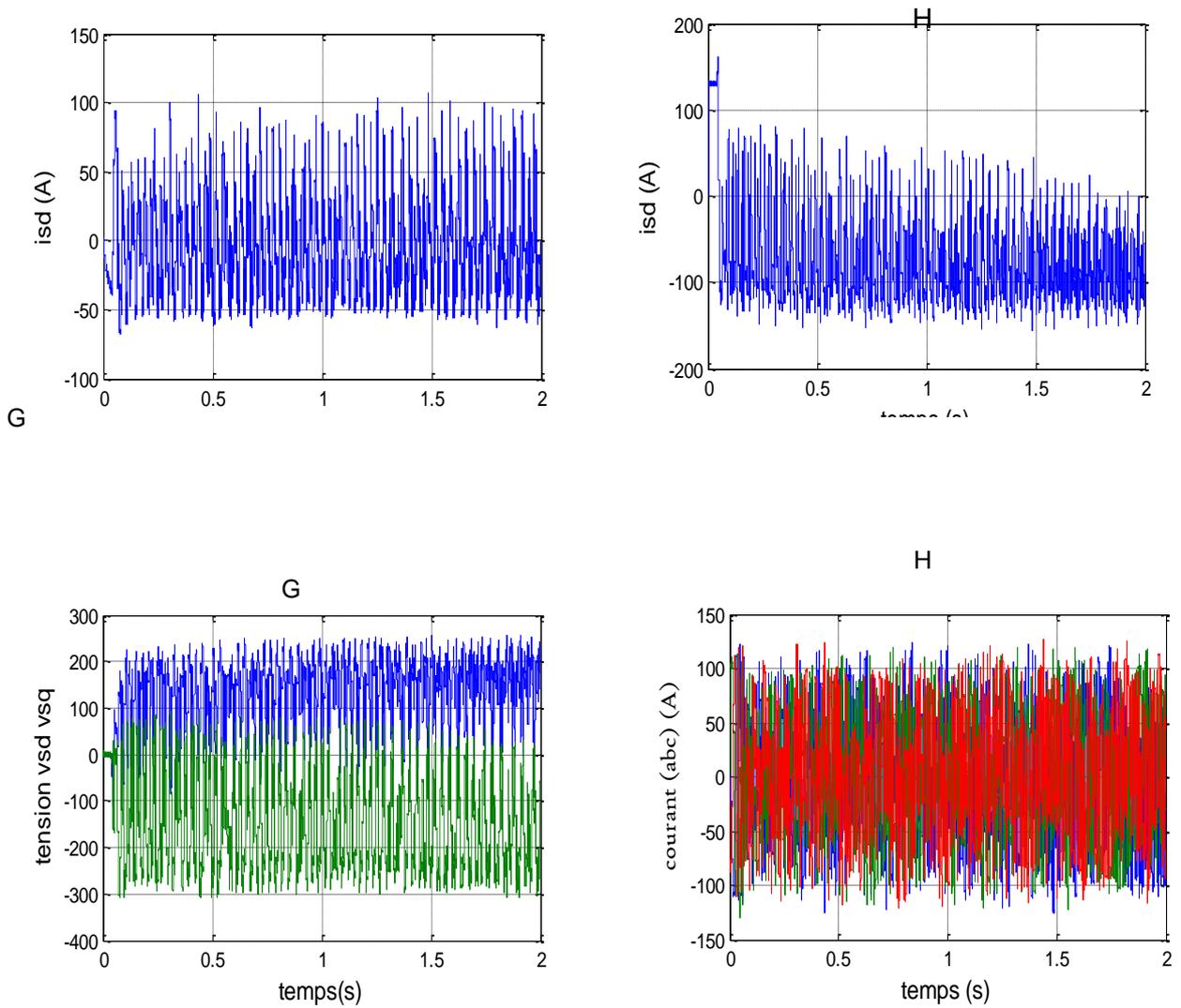
Fig. III 9 Schéma bloc d'un contrôleur PI flou

## III.10. 1. Résultat de simulation de contrôleur floue



**A** :  $\lambda$ , **B** : le coefficient de la puissance  $C_p$ , **C** : la vitesse de référence et la vitesse mesuré et **D** : le couple

**Fig. III 10** Allures des grandeurs mécaniques du système pour un contrôleur PI-flou

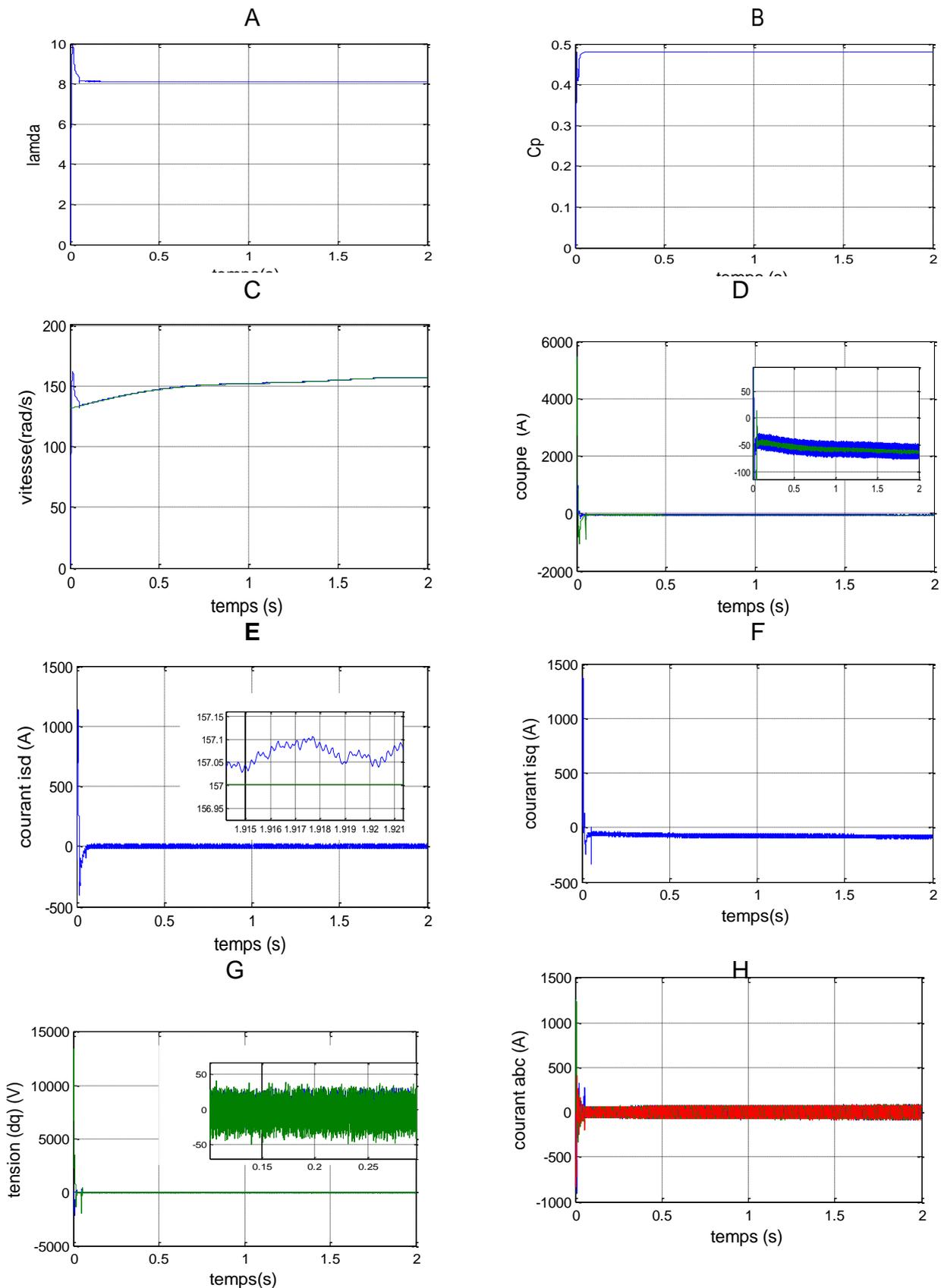


**E** : le courant direct Isd, **F** : le courant quadrature Isq, **G** : les tensions, **H** : les courants a,b,c.

**Fig. III 11** Allures des grandeurs électriques du système pour un contrôleur PI-flou



### III.10. 3.Résultat de simulation de contrôleur floue adaptatif



**A** :  $\lambda$ , **B** : le coefficient de la puissance  $C_p$ , **C** : la vitesse de référence et la vitesse mesuré et **D** : le couple, **E** : le courant direct  $I_{sd}$ , **F** : la courante quadrature  $I_{sq}$ , **G** : les tensions, **H** : les courants a, b, c.

**Fig. III 13** Allures des grandeurs mécaniques du système pour la commande vectorielle

### III.10. 4. Interprétation de de résultat

- Une bonne poursuite de la valeur de référence de la vitesse a été réalisée avec un régulateur flou adaptatif ou l'erreur est négligeable (inférieure à 0.5 rad/s)
- Les tensions statoriques restent toujours des signaux alternatifs
- Le couple varie avec la variation du couple de quadrature selon la relation proportionnelle entre eux.

### III. 11. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté La théorie de la commande floue et ses différentes règles pour l'appliquer sur la vitesse de la GSAP. il est en ressort que le réglage flou possède une bonne réponse dynamique de la vitesse et un très bon rejet de perturbation.

Les résultats de simulation obtenue de ce même réglage flou ont montré l'amélioration des performances de ce type de réglage vis à vis de la variation paramétrique et des perturbations externes (Couple de charge), puis on le remplace par un régulateur flou adaptatif Pour améliorer en termes de réponse dynamique et de robustesse, qu'ils sont nécessités moins d'énergie en matière que celui du régulateur *PI-classique*.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

La production d'énergie renouvelable, notamment celle de type éolien, se distingue par son caractère aléatoire et intermittent, qui est souvent à l'origine de sérieux problèmes liés à la stabilité et de la qualité de l'énergie fournie. Ce mémoire présente une étude multi-objective concerne les commandes avancées pour le contrôle d'une génératrice synchrone à aimants permanents, fonctionnant à vitesse variable. Un état de l'art sur l'énergie renouvelable éolienne et les différents composants de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, Ensuite on aborde la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques. Puis une modélisation détaillée de la turbine éolienne. Les modèles de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec tous ses éléments, en modes de fonctionnement ilote et connectée au GSAP ont été présentés. A la fin, on termine par les résultats de simulation qui nous permettrons de passer à la commande.

Les machines synchrones à aimants permanents apportent une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques notamment une durée de vie importante, un rendement élevé, une maintenance réduite, une fiabilité élevée et une bonne robustesse. Dans notre travail, on s'est intéressé à la génératrice synchrone à aimant permanent.

La structure de la GSAP à intégrer dans la chaîne de conversion éolienne et ses différents éléments ont été modélisés. L'étude de la génératrice synchrone à aimants permanents a été effectuée en détails et le modèle analytique sous forme d'équations mathématiques a été établi sur la base d'un ensemble d'hypothèses simplificatrices des phénomènes électriques, magnétiques et mécaniques régissant son fonctionnement.

La stratégie de commande vectorielle appliquée à la GSAP permet de découpler les expressions du couple et des flux tout en assurant simultanément et séparément le réglage et le contrôle de ces grandeurs électriques. Pour la régulation de la vitesse mécanique, après l'étude aérodynamique de la pale, des stratégies de commande, à l'aide de régulateurs PI, de manière à maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimal quelques soient les variations du vent, ont été établies.

Le contrôle du système éolien s'effectue via un convertisseur statique triphasé situé entre le bobinage statorique de la GSAP et la turbine éolienne il a été traité en donnant les principes de l' MLI sinusoïdale. La gestion appropriée de ce convertisseur s'avère très intéressante, lorsqu'il est contrôlé différemment. L'architecture des stratégies de commande mises en œuvre agissant sur l'interface de l'électronique de puissance, permet d'atteindre plusieurs objectifs.

A la fin de ce travail, pour améliorer ces résultats, nous avons développés deux autres techniques de commandes qui ont été présentées. En premier lieu, on a donné un rappel sur les notions de base de la théorie de la commande par la logique floue, puis on a appliqué cette commande sur la même structure de celle de la commande vectorielle avec un remplacement des régulateurs PI par des régulateurs flous.

Puis nous avons présenté Les résultats de simulations numériques obtenus pendant l'application de ces deux commandes sur le système montrent leurs efficacités.

Les résultats des simulations, développées sous environnement MATLAB/Simulink et réalisées à partir des systèmes proposés, montrent clairement la validité des modèles choisis et les performances des stratégies de contrôle proposées.

Les résultats de simulations obtenus justifient pleinement le choix de la stratégie des commandes avancées (floue et floue adaptatif) appliquées sur la vitesse de la GSAP. Elles sont plus performantes que les méthodes classiques (commande vectorielle).

En perspective ce travail peut être complété la chaîne de conversion par le branchement au réseau électrique.

# Références Bibliographiques

### Références bibliographiques

- [1] Rouabhi Riyadh ,« Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée», Thèse de Doctorat.Université Batna 2 ,01 / 12 / 2016.
- [2] Lebsir Abdelkadir , «Performances comparées de machines synchrones à aimants permanents et à réluctance variable associées à une chaîne de conversion d'énergie renouvelable » Thèse de Doctorat ,28/5/2016.
- [3] Minh Huynh Quang, «Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé »,These de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [4] Aymen Ammar« Modélisation et optimisation d'un Générateur synchrone à double excitation de forte puissance », Thèse de Doctorat, L'école Centrale De Lille,28/6/ 2013.
- [5] Adam Mirecki , «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance»., Thèse de Doctorat ,L'institut national polytechnique de Toulouse, 05/04/2000.
- [6] Meghlaoui Issam , « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal »,Mémoire de Magister,Universite Badji Mokhtar-Annaba 2009.
- [7] Hassad Mohamed Amine, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », Mémoire de Magister,Universite Setif 2012.
- [8] Azeddine HouarI, « Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques. »,Thèse de doctorat, Univrsité de Lorraine / 2012.
- [9] Mohammed MALKI Saïd, ALI BELARBI,«Etude et simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret», Mémoire de Master , Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [10] Louar Fateh, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar ,2016.

## Références bibliographiques

---

- [11] Ibrahim Yassine, « Système hybride photovoltaïque éolien diesel sans stockage » ,Thèse de Doctorat , Université libanaise, 2013.
- [12] Fezzani Amor ,« Commande robuste de la machine synchrone à aimants permanents» Thèse de Doctorat université de Toulouse,2005.
- [13] Samir Bencharif,« Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne», Thèse de Master,Université Mohamed Khider Biskra.
- [14] Xinjin «Etudes construction d'une chaîne d'outils numériques pour la conception aérodynamique de pales d'éoliennes», Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.
- [15] M. Kassa Idjdarene ,«Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices asynchrones à cage dédiées à des Centrales Electriques éoliennes autonomes», Université Abderrahmane MIRA – Béjaia (Algérie),23 Mai 2010.
- [16] Naouel Hamdi ,«Modélisation et commande des génératrices éoliennes »,Mémoire de Magister ,Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [17] Zidane Nourredine, «Étude et dimensionnement des Systèmes de Production d'énergies renouvelables» ,Mimoire de Magister ,Université Ferhat Abbas Setif1, 2014.
- [18] Hadji Mohamed ,Ouared Omar,«commande d'une génératrice synchrone à aiment permanent en vue de son utilisation dans les systèmes éoliens», Université ibn khaldoun Tiaret ,Mémoire de Master ,2013.
- [19] Philippe Leconte .Marc «Eolienne » Rapin. Edmond Szechenyi ,Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA),Edition mars 1998.
- [20] Azzouz Tamaraat ,« Modilisationt commande d'un Système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA »,These de Doctorat ,Univercité de Mohamed khaidar Beskra, 2015.
- [21] Chachour Halima,Yazid Aicha , « Contrôle neuro flou d'une chaine de conversion éolienne utilisant une GSAP »,These de Master , Univercité de Ibn khaldoune,2016 .

## Références bibliographiques

---

- [22] ASRI Aicha , Ait abdellah Fatima Zohra, «Applications des algorithmes intelligents à un système éolien dédié à la production d'électricité aux sites isolés», These de Master ,Univercité de Ibn khaldoune. 2015.
- [23] Abdoulay Bmamadie Sylla,« La.modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation»,Mémoir de majester, Université du Québec , 2013.
- [24] Ait Ramdane Naima ,« Commande robuste d'une génératrice a synchrone a double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne » , Université de Tizi Ouezou,2012.
- [25] Belabasse Belkassem,« Intigration de l'énergie éoliene dans un réseaux local », Mémoir de Magister ,Univercité de Ibn khaldoune,2012.
- [26] Latreche Mohammed Tahar, « Commande floue de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) utilisée dans un système éolien » , Mémoir de Magister,Université Ferhat Abbas de Setif,2012.
- [27] Bouheda Ali, «cotribution à l'étude d'un système de commande d'une éolienne» , Mémoir de Magister ,Univercité de Tizi Ouezzou,2011.
- [28] Abdellaoui Hassina, «Etude exprimentalede la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variable électriques»,Mémoir de Magister,Univercité Mouloud Mammeri,Tizi Ouzou.
- [29] Amor khalief ,«Contrubi à la commande vectorielle sans capteurs mécanique des machiness à aiments permanents MSAP » , These de Doctorat,2012.
- [30] Toufik Zidelmal, « Modèle de Prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents : Application Dans Les Aérogénérateurs »,Mémoire de Master,Université du Québec En Abitibi-Témiscamingue,2015.
- [32] Franck Deroncourt, « La logique floue entre raisonnement humain et intelligence artificielle» Mémoire Master Paris, Janvier 2011.
- [33] Rezgui Salah Eddiine , « Techniques de commande avancées de la machine asynchrone étude comparative et applications »,Thèse de doctorat,Université des Frères Mentouri Constantine , 2015.

## Références bibliographiques

---

- [34] Zarour Laid ,« Etude Technique d'un systemed'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors reseau », These de Doctorat, Universite Mentouri de Constantine, 2010.
- [35] Talbi Nesrine,« Conception des systèmes d'Inférence floue par des approches hybrides : Application pour la commande et la modélisation des systèmes non linéaires »,Thèse de Doctorat ,Université de Constantine ,2014.
- [36] Abdel Ghani Aissaoui, Hamza Abid, Mohamed Abid, Ahmed Tahour,« Commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée », Rev. Roum Sci Techn – Électrotechn et Énerg ,52 1 p 89–103..
- [37] Mokeddem Diab, « Contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat,Université Ferhat Abbas de Sétif,2010.

# ANNEXES

## ANNEXES THEORIE DE BETZ

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz

A. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $V$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $v$ . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse  $v$  est nécessairement inférieure à  $V$ . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

Soit donc  $V$  la vitesse de l'air en amont,  $v$  celle en aval et  $V'$  celle au travers de  $S$ , la section balayée par les pales de l'éolienne (comme présenté à la figure B.1) et  $m$  la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation d'énergie cinétique de l'air  $\Delta E$  est :

$$\Delta E = \frac{1}{2} . m . (V^2 - v^2) \quad (\text{A.1})$$

La puissance de l'éolienne  $P$  est alors :

$$P = \frac{1}{2} . \rho . S . V' . (V^2 - v^2) \quad (\text{A.2})$$

Avec :  $\rho$  la densité de l'air.

$S$  la surface balayée par les pales de la turbine.

Par ailleurs, la force de l'air  $F$  sur l'éolienne est :

$$F = \rho . S . V' . (V - v) \quad (\text{A.3})$$

D'où :

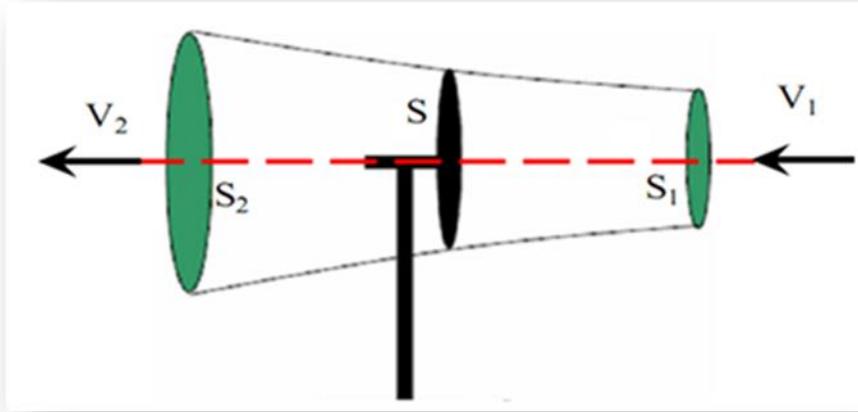
$$P = F . V' = \rho . S . V'^2 . (V - v) \quad (\text{A.4})$$

En identifiant les équations B.2 et B.4, il vient :

$$V' = \frac{V + v}{2} \quad (\text{A.5})$$

Et donc :

$$P = \frac{1}{2} . \rho . S . (V^2) . (V + v) \quad (\text{A.6})$$



**Figure A.1 :** théorie de Betz (schéma de principe).

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée  $\frac{dP}{dv}$  sera nulle, soit pour  $v = \frac{V}{3}$ . La puissance est alors maximale et vaut :

$$P = P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{A.7})$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir  $v = \frac{V}{3}$ , on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont. On écrira en notant la vitesse du vent amont  $V = v_{\text{vent}}$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_{\text{vent}}^2 \cdot C_p \quad (\text{A.8})$$

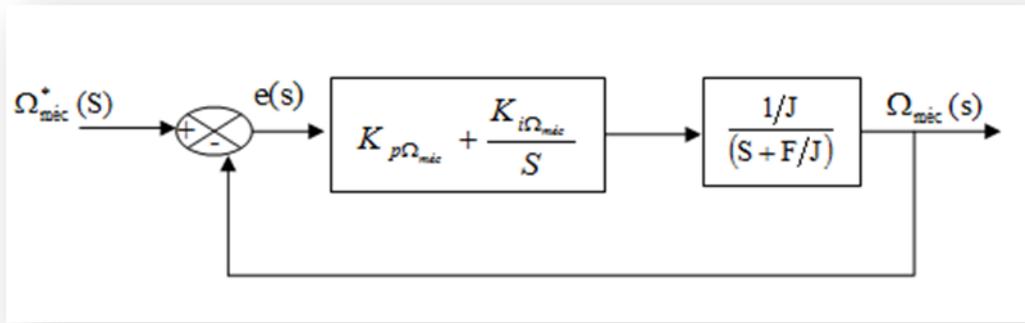
Où :

$C_p$  : Le coefficient de puissance de l'éolienne, il dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

$R_T$  : le rayon de la turbine

## A.2 Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT)

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure (A.1).



**Figure A.1:** Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p\Omega_{méc}}}{S} \left( S + \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \right) \quad 9)$$

Par compensation

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (A.10)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{méc}^*} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} S + 1} \quad (A.11)$$

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

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{méc}^*} = \frac{K}{1 + \tau S} \quad (A.12)$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (A.13)$$

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

$$K_{p\Omega_{méc}} = \frac{J}{\tau} \quad (A.14)$$

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة التشغيل و المراقبة لنظام تحويل الطاقة الرياحية باستعمال آلة التزامنية بمغناطيس دائم. النمذجة والتحكم في النظام مع استعمال التعديل الأقصى لنقطة الاستطاعة من اجل مراقبة سرعة التربينه المجمعه بالتحكم الشعاعي للآلة التزامنية بمغناطيس دائم المكون الجزء الهام من هذا العمل. من اجل تحسين الفعالية الديناميكية للنظام نطبق بنية مختلفة للمراقبات الذكية استعملنا معدل غامض تصاعدي بخمسة مجاموعات بالإضافة إلى المعدل الغامض المكيف بثلاث مجاموعات من اجل محاكاة النتائج الجذ مشجعة و الفاتحة لأبواب جديدة من اجل تطوير السلسلة الكاملة و التحقق التطبيقي. **fuzzy toolbox**

## Matlab Simulink

### الكلمات المفاتيح

مولدة متزامنة ذات مغناطيس دائم, المنطق الغامضة, التحكم الشعاعي. نظام تحويل الطاقة الرياحية.

### Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude du fonctionnement et le contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne utilisant une machine synchrone à aimant permanent la modélisation et la commande de ce système avec l'utilisation de la MPPT pour le contrôle de la vitesse de la turbine associée à la commande vectorielle de la GSAP constituent une partie importante de ce travail pour améliorer les performances dynamiques du systèmes on applique différentes structures de contrôleurs intelligentes à savoir un PI flou incrémental à cinq ensemble en plus d'un PI flou adaptatif à cinq entrées On a utilisé l'environnement Matlab et quelques outils tels que le Simulink, le Fuzzy toolbox. Les résultats de simulations obtenus sont très encourageants et ouvrent de nouveaux horizons

**Mots clés :** génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), logique floue, commande vectorielle, chaîne éolienne.

### Abstract

The objective of this work is the study of the operation and control of a wind energy conversion system using a permanent synchronous machine. Modeling and control of this system with the use of MPPT for control Of the turbine velocity associated with the GSAP vector control constitute an important part of this work to improve the dynamic performances of the system. We develop various structures of intelligent controllers namely an incremental PI with five input membership function in addition to an Adaptive PI fuzzy with five input membership function We used the Matlab environment and some tools such as the Simulink, the Fuzzy toolbox. The obtained results of simulations are very encouraging and open new horizons

**Keywords:** synchronous generator with permanent magnets (GSAP), fuzzy logic, vector control, wind chain