

**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 GÉNIE ÉLECTRIQUE**



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Spécialité : Génie Electrique**

**Option : Automatisation et Contrôle des Systèmes Industriels**

**Présenté par :**

ASRI Aicha

AIT ABDELLAH Fatima Zohra

*Sujet du mémoire*

**Applications des Algorithmes Intelligents à un Système Eolien  
dédié à la Production d'Electricité aux Sites Isolés**

*Soutenu publiquement devant le jury composé de :*

Mr :	BELFEDAL Cheikh	Président
Mr :	ALLAOUI Tayeb	Rapporteur
Mr :	MIHOUB Youcef	Co-Rapporteur
Mr :	LARBI M'hamed	Examineur
Mr :	BOUZID Mohamed Amine	Invité

PROMOTION : 2015

## *Remerciement*

Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et d'exprimer nos gratitude envers ALLAH de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'étude.

Nous tenons à remercier Mr ALLAOUI .T et Mr MIHOUB.Y pour avoir accepté de nos encadrer.

Nous remercions également Mr BOUZID M. A. pour sa disponibilité et son aide ainsi de nous avoir faisons bénéficier de ses compétences scientifiques.

Nous remercions tous les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profond respect.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à toutes nos familles (particulièrement A.B) nos parents symboles de tendresse et sacrifice, nous profitons de cette occasion pour leur exprimer notre attachement profond et notre très grande reconnaissance.

Dédicace

*A nos parents*

*A nos sœurs*

*A toute notre grande famille*

*A nos amis*

*A la promotion 2015 MASTER Automatisation et  
contrôle des systèmes industrielles*

*A toutes et à tous*

Nous dédions ce travail

---

# Sommaire

## Introduction Générale

### Chapitre 1 : **Etat de l'art des systèmes hybrides pour site isolé**

I.1.	Introduction .....	9
I.2.	Systèmes Hybrides (SEH) .....	10
I.2.1.	Éléments constituant un SEH.....	11
I.3.	Configuration des systèmes hybrides .....	11
I.3.1.	Architecture à bus CC .....	11
I.3.2.	Configuration de bus CA .....	13
I.3.3.	Architecture mixte à bus CC/CA .....	14
I.4.	Type d'aérogénérateur.....	15
I.4.1.	Eoliennes à axe vertical.....	15
I.4.2.	Eoliennes à axe horizontal .....	17
I.5.	Générateurs.....	18
I.5.1.	Générateur Asynchrone (IG).....	18
I.5.2.	Générateur Synchrone (SG) .....	20
I.6.	Système de stockage.....	21
I.7.	Description des différents systèmes de stockage d'énergie .....	21
I.7.1.	Stockage sous forme d'énergie cinétique : les accumulateurs à volant d'inertie.....	21
I.7.2.	Stockage par inductance supraconductrice .....	23
I.7.3.	Stockage hydrogène .....	24
I.7.4.	Le stockage sous forme chimique : Les accumulateurs électrochimiques.....	25
I.8.	Conclusion.....	26

---

Chapitre2:	Modélisation et commande de la chaine de conversion
II.1	Introduction ..... 28
II.2.	Modélisation du vent ..... 28
II.3.	Modélisation de la turbine éolienne[19]..... 29
II.3.1.	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine ..... 29
II.3.2.	Modélisation de la turbine..... 31
II.3.3.	Conversion aérodynamique..... 32
II.3.4.	Modèle du multiplicateur ..... 34
II.3.5.	Equation dynamique de l'arbre ..... 35
II.4.	Modélisation de la machine synchrone à aiment permanent..... 36
II.4.1.	Hypothèses simplificatrices ..... 36
II.4.2.	Equation de la machine synchrone à aiment permanent : ..... 36
II.4.3.	Equation de la machine synchrone à aiment permanent dans le plan de Park..... 37
II.5.	Modélisation de la batterie ..... 39
II.5.1.	Réglage de la tension continue..... 39
II.6.	Structure du dispositif de commande ..... 41
II.7.	Elaboration de l'algorithme MPPT ..... 42
II.7.1.	Maximisation de la puissance par asservissement de vitesse ..... 42
II.8.	Synthèse du régulateur ..... 44
II.9.	Caractéristique « puissance-vitesse » d'une éolienne ..... 45
II.10.	Commande vectorielle de la MSAP : ..... 46
II.10.1.	Calcul du régulateur PI : ..... 47
II.11.	Commande coté charge ..... 49
II.12.	Résultats de simulation..... 52
II.13.	Conclusion..... 55

---

Chapitre 3 : Application des algorithmes intelligents pour la maximisation de puissance	
III.1. Introduction .....	58
III.2. Historique : .....	58
III.3. Domaines d'application.....	59
III.4. La théorie des ensembles flous.....	59
III.4.1. Système flou .....	60
III.4.2. Ensemble flous .....	60
III.4.3. Variables linguistiques .....	61
III.4.4. Opération sur les ensembles flous .....	62
III.4.5. Propriétés des ensembles flous.....	63
III.5. Structure d'une commande par logique floue .....	63
III.5.1. Contrôleur flou .....	64
III.6. Le contrôle adaptatif.....	66
III.7. Description du contrôleur flou adaptatif .....	67
III.7.1. Fuzzification.....	67
III.7.2. Inférence.....	68
III.7.3. Défuzzification .....	69
III.8. Résultats de simulation.....	69
III.9. Conclusion.....	71
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>73</b>

# Liste des Figures

## Chapitre1

Figure I.1 - Configuration des SEH à bus CC .....	12
Figure I.2- Configuration des SEH à bus CA .....	14
Figure I.3- Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA. ....	15
Figure I.4-Technologie éolienne à axe vertical .....	16
Figure I.5- Technologie éolienne à axe horizontale .....	17
Figure I.6-Système de conversion éolien avec SCIG à vitesse fixe .....	18
Figure I.7- Système avec DFIG pour l'opération à vitesse variable .....	19
Figure I.8- Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable .....	20
Figure I.9- Principaux éléments d'un accumulateur à volant d'inertie .....	22

## Chapitre2

Figure II.1- Profil du vent .....	29
Figure II.2- Système mécanique de l'éolienne .....	29
Figure II.3- modèle mécanique de la turbine.....	31
Figure II.4- Schéma de la turbine éolienne .....	31
Figure II.5- théorie de Betz : schéma de principe .....	32
Figure II.6- Coefficient aérodynamique ( $C_p$ ) en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ ) .....	34
Figure I.7- schéma bloc de la turbine .....	36
Figure II.8 - Hacheur réversible en courant .....	39
Figure II.9- Modèle R-C de la batterie.....	40
Figure II.10 - Structure générale de commande de la chaîne de conversion .....	41
Figure II.11- schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique .....	43
Figure II.12- point de fonctionnement optimal .....	43
Figure II.13 - schéma fonctionnel de régulation de vitesse .....	44
Figure II.14- Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne.....	45

Figure II.15 -Boucle de régulation du courant $i_d$ .....	47
Figure II.16- Boucle de régulation du courant $i_q$ .....	48
Figure II.17 - principe de commande coté charge .....	49
Figure II.18- projection des différentes composantes des vecteurs courant et tension dans un référentiel tournant .....	50
Figure II.19- Découplage des axes d et q .....	51
Figure II- 20. [a]- Coefficient aérodynamique $C_p$ , [b]- Vitesse spécifique, [c]- Vitesse mécanique de la turbine.....	52
Figure II.21-[a]- Couple électromagnétique $C_{em}$ , [b]- Flux quadratique $q$ et directe $d$ , [c]- Courant $i_q$ et $i_d$ .	53
Figure II- 22 :[a]- Régulation de la tension du bus continu $V_{dc}$ , [b]- Zoom de $V_{dc}$ .....	54
Figure II.23- [a]- Tension $V_{d,q}$ ,[b]- Zoom de $V_{d,q}$ .....	54
Figure II.24-[a]- Tension aux bornes de la charge $V_{abc}$ , [b]- Figure Zoom de $V_{abc}$ , [c]- Courant de charge $i_{abc}$ , .....	55

### Chapitre3

Figure III.1- Schéma bloc représentant un système flou .....	60
Figure III.2- Elément de la logique floue.....	61
Figure III.3- Exemple d'ensemble en logique booléenne et en logique floue .....	62
Figure III.4- Structure d'un système de contrôle flou .....	64
Figure III.5- Structure de base de la commande adaptative utilisée.....	66
Figure III.6- Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé pour la commande de vitesse de la turbine. ....	66
Figure III.7- Formes des fonctions d'appartenances des entrées du régulateur flou adaptatif .....	68
Figure III.8- Formes des fonctions d'appartenances de la sortie du régulateur flou adaptatif .....	68
Figure III.9- [a]- Coefficient aérodynamique $C_p$ , [b]- Vitesse spécifique, [c]- Vitesse mécanique de la turbine.	69
Figure III.10- [a]- Coefficient de puissance $C_p$ , [b]- Zoom de $C_p$ , [c]- Vitesse spécifique $\lambda$ , [d]-Zoom de $\lambda$ .....	70
Figure III.11- [a]- Vitesse de rotation de la turbine $W$ , [b]- Zoom de $W$ .....	71



# Introduction Générale

---

## **Introduction Générale**

L'énergie électrique est depuis très longtemps traitée comme une denrée de consommation courante. Elle est omniprésente et circule autour de nous afin d'être utilisée rapidement, facilement et dans la plupart des cas à moindre frais[1]. Mais bien souvent, la production de cette énergie est très délocalisée par rapport à son utilisation. Cette délocalisation ainsi que la pénétration des sources variables et fluctuantes (énergies renouvelables : solaire, éolienne, etc.) augmentent les difficultés de stabilisation du réseau électrique, en raison essentiellement d'un déséquilibre entre production et consommation. Il convient alors de générer cette énergie, de la transporter, de la convertir et si besoin de la stocker.

Historiquement, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et là où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement de moins de 10 kW), que l'énergie éolienne était la plus compétitive. Dans ce type d'applications hors réseau, l'énergie du vent est captée par les éoliennes afin de recharger des batteries. L'énergie électrique ainsi emmagasinée permet alors de fournir de l'électricité sur demande. Le pompage de l'eau, où l'eau peut aussi être emmagasinée en vue d'un usage ultérieur, est par ailleurs une des plus anciennes formes d'exploitation de l'énergie éolienne. Dans les sites isolés, l'utilisation d'éoliennes pour la production d'énergie électrique est très concurrentielle par rapport à l'extension du réseau électrique, aux batteries non rechargeables, aux génératrices à effet Peltier à moteur diesel ou à moteur à essence. Les éoliennes sont aussi très concurrentielles dans les applications de pompage de l'eau[2].

L'aérogénérateur est basé sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, Le présent mémoire décrit une étude d'un système éolien dédié à la production d'électricité aux sites isolés. Le contrôle intelligent basé sur les techniques d'intelligence artificielle en particulier celui de la logique floue constitue une partie importante de notre étude. Un régulateur flou adaptatif est proposé dans un but d'améliorer notre système de commande. La théorie de la logique floue introduite par le professeur Lotfi Zadeh 1965[3] très proche du raisonnement humain et basée sur la règle générale si condition alors conclusion. Cette technique

largement utilisée dans le domaine de la commande [4]constitue une bonne alternative pour les systèmes Système d'Energie Hybride. Le mémoire est rédigé selon la structure suivante :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les structures des systèmes d'énergie hybrides et les différentes technologies utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal), ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens, puis une description des différents systèmes de stockage d'énergie.

Dans le deuxième chapitre, nous établissons un modèle pour la simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne en insistant notamment sur le caractère multiphasique (prise en compte des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques). La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance lie du système de commande. Ce chapitre est composé de trois parties :

- Une première partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillée,
- La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents,
- Dans la dernière partie nous présentons la modélisation de la batterie et commande coté charge suivie d'une simulation de ces configurations (MSAP et turbine) en fonctionnement générateur.

L'objectif de cette partie est d'expliquer la stratégie de commande de l'éolienne avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'un régulateur PI permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent à travers l'ajustement électronique continu de la vitesse spécifique de la turbine qui conduit à un point optimal à chaque fois que la vitesse du vent varie.

Le dernier chapitre est consacré à la commande de vitesse de la turbine par un régulateur PI flou, on présente la théorie de la logique floue et ses principes de base, les bases mathématiques de cette technique et la méthodologie de contrôle. Ensuite, on passe au régulateur flou, et son application pour le réglage de vitesse de la turbine. Les résultats de simulation sont comparés pour mettre en valeur l'amélioration du comportement dynamique de la vitesse de la turbine avec le contrôleur flou.

# Chapitre 1

---

Etat de l'art des systèmes hybrides pour site isolé

## I.1. Introduction

L'intégration de l'énergie éolienne dans le domaine de la production d'énergie constitue une variante intéressante qui pourrait assurer les besoins en électricité, et faire face à l'épuisement des sources traditionnelles d'énergies dans les prochaines années. Elle s'inscrit donc parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et plus généralement dans le contexte d'un développement durable du paysage énergétique.

Plusieurs solutions de stockage d'électricité existent, les unes plus éprouvées que d'autres. Par ailleurs chacune d'elles possède des atouts, mais aussi des inconvénients.

Le présent chapitre est un état de l'art des systèmes hybrides puis les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens ainsi les techniques usuelles utilisées pour le stockage de l'énergie électrique extraite des aérogénérateurs.

## I.2. Systèmes Hybrides (SEH)

Le domaine de la production d'énergies renouvelables à partir des SEH vise à concevoir des systèmes de production d'énergie performants, économes et peu polluants. Il se place dans le cadre du développement durable, marqué par les notions nouvelles d'éco-conception (notion d'analyse de cycle de vie,...). Il est en parfaite avec les technologies de stockage (Piles à combustibles, des accumulateurs et super condensateurs,...) de l'énergie, qui fait désormais partie intégrante des chaînes de production décentralisée[5]. Un système hybride est réalisé à partir de multi sources de production d'électricité. Il est capable d'un fonctionnement autonome qui est parfois associé à un système de stockage. La fonction d'un SEH de production d'électricité est de fournir de l'énergie à différentes charges, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie[5].

Dans les SEH nous obtenons une baisse de prix pour couvrir au moins l'investissement fait pour les générateurs d'énergies renouvelables et les autres composantes auxiliaires du système. Cette vision nous permet de chercher les performances dans les SEH à travers le rendement et la durée de vie depuis sa conception.

Le SEH souvent associé à la production d'électricité dans les régions isolées et se présente sous forme[5] :

D'une seule source d'énergie renouvelable avec ou sans groupe électrogène. Dans ce cas, la présence d'un dispositif de stockage est indispensable afin de pouvoir satisfaire, à tout instant, la demande du consommateur ;

De deux sources à énergie renouvelables avec ou sans groupe fonctionnant avec un groupe de stockage ;

De plus de deux sources d'origines renouvelables avec ou sans groupe électrogène accompagné d'une possibilité de stockage. Généralement, ces variantes peuvent être connectées aux réseaux de distribution.

Ces différentes configurations possibles en mode autonome, couplé au réseau sans sources renouvelables et avec stockage, doivent permettre une vision d'optimisation économique et énergétique d'un SEH (groupe électrogène, générateur photovoltaïque, éolien, accumulateurs,...).

### **I.1.1. Éléments constituant un SEH**

Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans le SEH. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, marémotrice, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène (pile à combustible). Les convertisseurs, les charges, les charges de délestage et une forme de gestion de l'énergie peuvent également faire partie d'un SEH. Les batteries sont habituellement utilisées pour le stockage d'énergie, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel (volant d'inertie) [6] et le stockage d'hydrogène.

## **I.3. Configuration des systèmes hybrides**

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Trois configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergies hybrides constituées par des sources d'énergie renouvelable, des batteries et des générateurs diesels: architecture à bus CC, architecture de bus CA et architecture mixte à bus CC-CA[4].

### **I.1.2. Architecture à bus CC**

Dans le système hybride présenté dans la figure (I-1), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être converti en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connecté en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la

partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

### Avantages

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande,
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85%.

### Désavantage

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, puisque une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.

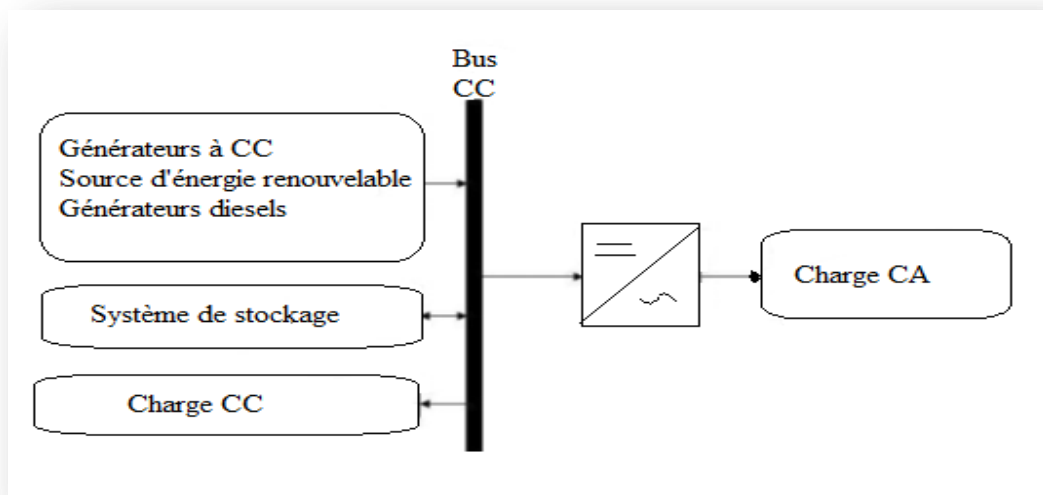


Figure I.1 -Configuration des SEH à bus CC.

### I.1.3. Configuration de bus CA

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA). Toutes les sources de productions sont reliées au bus CA via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus. L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA. Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (voir figure I-2) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants. Ces structures peuvent être utilisées pour l'alimentation de tous les consommateurs électriques, y compris dans les régions rurales des pays en voie de développement et des pays nouvellement industrialisés dans lesquels l'électricité, l'approvisionnement en eau et la purification de l'eau potable sont des besoins vitaux. L'ingénierie des systèmes modulaires avec couplage du côté CA a été développée pour la première fois par l'Institut national de l'énergie solaire (ISET, Université de Kassel) et par l'entreprise SMA Technologie AG.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients

#### Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres ;
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence du bus (CA).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif(Transformateur);
- Appareillage de connexion bon marché et disponible;
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces ;
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence).



## Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs;
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande.

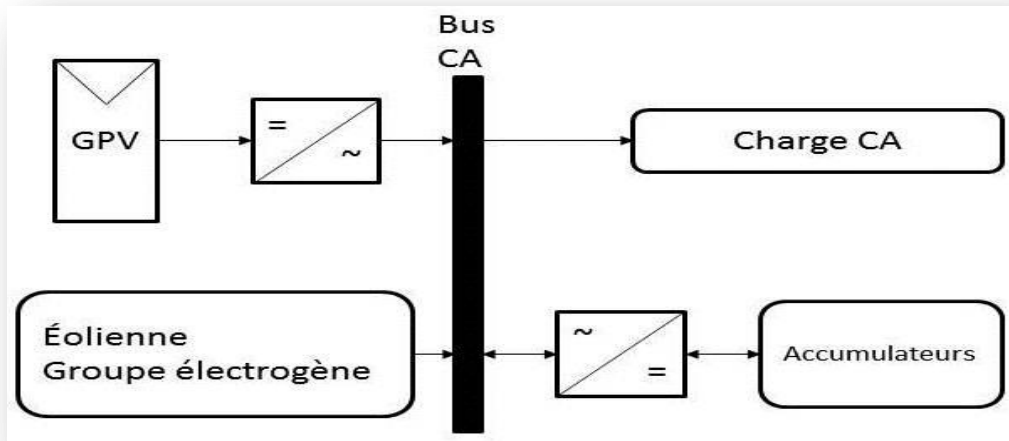


Figure I.2-Configuration des SEH à bus CA.

### I.1.4. Architecture mixte à bus CC/CA

La configuration des deux bus, à CC et à CA, présentée dans la Figure (I-3). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration, les sources d'énergies renouvelables et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du générateur diesel et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur). Quand il y a un surplus de l'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé.

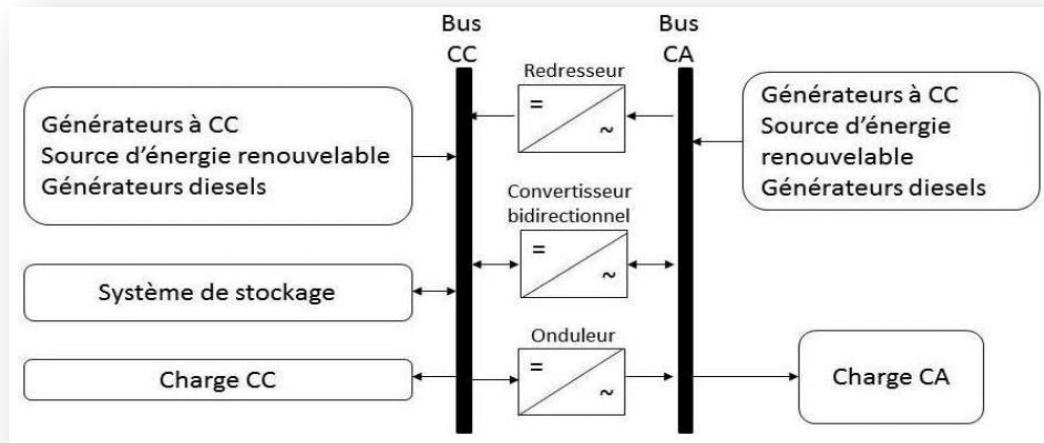


Figure I.3-Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA.

### Avantages

- Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge la possibilité de réduire la puissance nominale du générateur diesel et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

### Désavantage

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie du générateur diesel).

## I.4. Type d'aérogénérateur

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal[8].

### I.1.5. Eoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux[8].



**Figure I.4-**Technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients cités comme suit[8][9].

#### Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol,
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelque soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor,
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

#### Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des Pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

### I.1.6. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le Vent [10][8].



**Figure I.5-** Technologie éolienne à axe horizontale.

#### Inconvénient s

- Coût de construction très élevé,
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [8].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch)[8].

## I.5. Générateurs

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique.

### I.1.7. Générateur Asynchrone (IG)

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

#### I.5.1.1. Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (SCIG)

Jusqu'à présent le SCIG correspond au choix prépondérant par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite [11]. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur (Figure 1-6), ou par la mise en oeuvre d'un convertisseur statique de puissance (Figure 1-8).

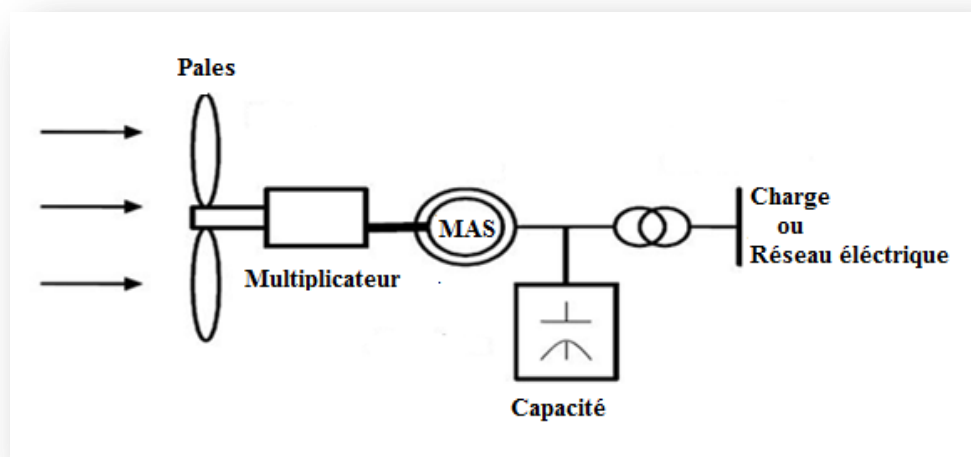
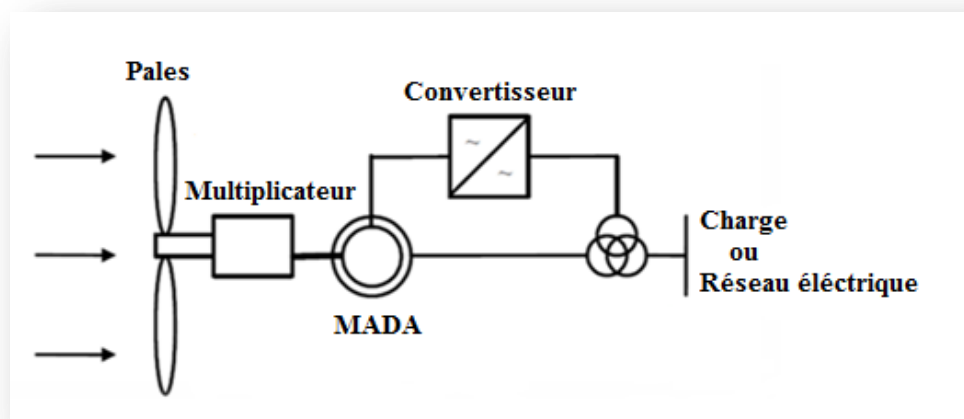


Figure I.6-Système de conversion éolien avec SCIG à vitesse fixe.

### I.5.1.2. Générateur Asynchrone Doublement Alimenté (DFIG)

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté (DFIG). Celui-ci est un WRIG dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur de type source de tension (VSC) en « back-to-back », qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure 1-7).



**Figure I.7-** Système avec DFIG pour l'opération à vitesse variable.

Les points forts du DFIG sont :

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

### I.1.8. Générateur Synchrone (SG)

L'avantage du générateur synchrone sur le Générateur Asynchrone (IG) est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du SG peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (gearless). Le SG est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (Figure I-8), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (GSAP) est plus simple et moins coûteux.

Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [11].

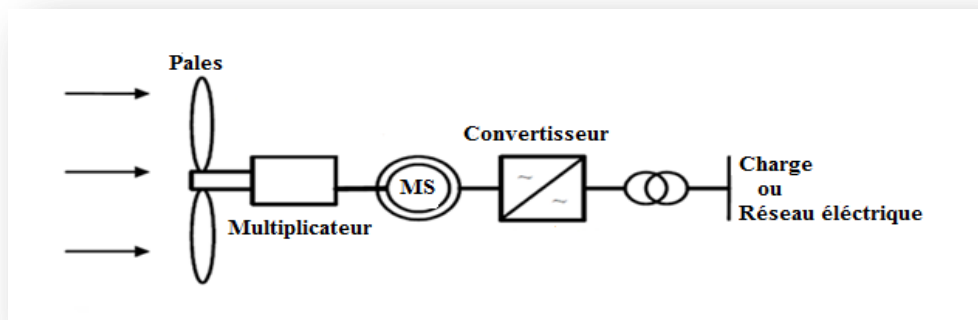


Figure I.8-Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

#### I.5.2.1. Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (WRSG)

La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur dimensionné pour la puissance totale du système.

#### I.5.2.2. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne[11]. Dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en

font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (pour transiter toute la puissance générée), sont les moins compétitifs.

## **I.6. Système de stockage**

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas ; les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb acide. Les batteries nickel cadmium sont rarement utilisées, la technologie des batteries plomb acide bénéficie en effet d'avantages, tels sont faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [12]

L'emploi des batteries plomb acide est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie.

Les cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Leur état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée [13]

## **I.7. Description des différents systèmes de stockage d'énergie**

Il s'agit essentiellement des techniques de stockage :

### **I.1.9. Stockage sous forme d'énergie cinétique : les accumulateurs à volant d'inertie**

Les volants d'inertie constituent l'une des techniques compétitives de stockage d'énergie des aérogénérateurs.

#### **a. Principe des accumulateurs à volant d'inertie**

Le principe de base du stockage de l'énergie à l'aide d'un solide en mouvement est le suivant : Un corps solide de moment d'inertie  $J$  (en  $\text{Kg.m}^2$ ), tournant à la vitesse angulaire  $\omega$  autour d'un axe passant par son centre de gravité possède une quantité d'énergie cinétique de valeur :



$$E_c = \frac{1}{2}J\omega^2 = \iiint \frac{1}{2}V^2 dm$$

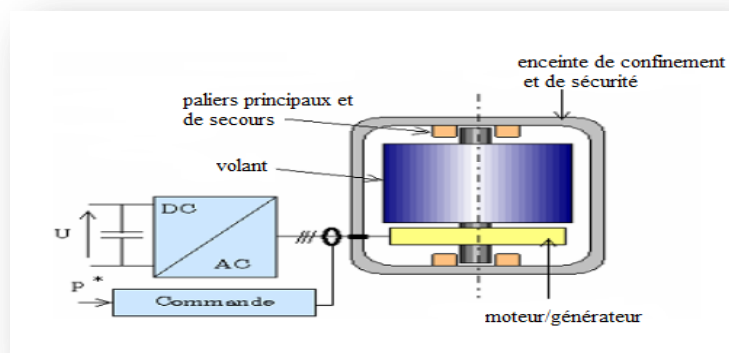
Avec  $V = R\omega$  la vitesse périphérique du solide (volant),  $R$  son rayon moyen et  $m$  sa masse.

La puissance transférée pour un système stationnaire de géométrie constante est :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = J\omega^2$$

Cette énergie stockée est limitée dans la pratique par la contrainte maximale admissible liée aux efforts centrifuges. Cette contrainte  $\sigma_{max}$  est proportionnelle à la masse volumique  $\rho$  du matériau constituant le solide et au carré de la vitesse périphérique  $V$  :

$$\sigma_{max} = \rho V_{max}^2$$



**Figure I.9-** Principaux éléments d'un accumulateur à volant d'inertie.

### b. Avantages des batteries électromécaniques

Les batteries électromécaniques présentent comme avantage une longue durée de vie qui se traduit par une bonne tenue au recyclage[14][15].

### c. Limites des batteries électromécaniques

Les principales limites des batteries électromécaniques sont :

- Leur caractère non statique : les pièces en mouvement provoquent de faibles bruits acoustiques ;
- Leur sensibilité aux vibrations et aux mouvements ;
- Leur coût relativement élevé.

### I.1.10. Stockage par inductance supraconductrice

Le stockage de l'énergie dans les inductances supraconductrices (SMES : **S**upraconductor **M**agnetic **E**nergy **S**torage) est, avec le stockage par supercondensateurs, l'un des deux systèmes de stockage direct de l'électricité.

#### a. Principe du stockage par inductance supraconductrice

Le stockage de l'énergie se fait sous la forme d'un courant électrique continu circulant dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte dans le supraconducteur (porté en dessous de la température critique) et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie [14].

La bobine supraconductrice court-circuitée permet de stocker l'énergie sous la forme

$$W = \frac{1}{2}LI^2,$$

L : étant son inductance et I : le courant qui la traverse.

La résistance du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine à une température cryogénique. Pour récupérer cette énergie, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée avec un temps très court.

#### b. Les avantages des inductances supraconductrices

Un des avantages des inductances supraconductrices est leur très bon rendement instantané, voisin de 95 % pour un cycle de charge décharge [16]. De plus, elles présentent une très grande puissance caractérisée par la possibilité de décharge à 50% en moins de 1s; cet atout, associé à leur temps de réponse rapide (inférieur à 100ms) fait des inductances supraconductrices des systèmes que l'on peut utiliser pour le réglage de la stabilité du réseau.

#### Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical,
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol,

- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

### c. Les limites des inductances supraconductrices

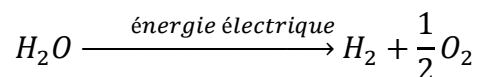
La limite majeure est liée au système de réfrigération qui, même s'il ne pose plus aujourd'hui de problème, accroît considérablement le coût et complique l'exploitation.

## I.1.11. Stockage hydrogène

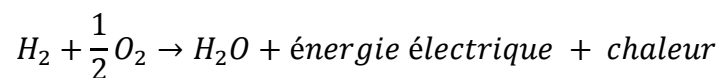
L'hydrogène, associé aux piles à combustible constitue l'un des moyens utilisés pour le stockage, puis la restitution de l'énergie électrique.

### a. Principe de l'électrolyseur à eau

L'électrolyseur à eau met en œuvre la décomposition de l'eau grâce à l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène :



Cette réaction est un moyen de stocker l'énergie électrique ayant permis sa réalisation, sous forme d'énergie chimique en stockant l'hydrogène produit. Cet hydrogène constitue un vecteur d'énergie qui pourra se recombiner à l'oxygène de l'air pour restituer l'énergie électrique, de l'eau et de la chaleur à travers la réaction suivante :



### b. Avantages des électrolyseurs à eau

Les électrolyseurs à eau présentent les avantages suivants :

- Ils sont plus propres pour l'environnement ;
- Ils présentent des densités de courant élevées leur permettant d'avoir des masses et volumes inférieures à la production de gaz équivalente ;
- Ils ont des rendements élevés ;
- L'hydrogène produit est d'une grande pureté...

### c. Limites du stockage sous forme d'hydrogène

L'association d'un électrolyseur à eau et d'une pile à combustible pour la production de l'énergie électrique à un rendement global très faible (35% au mieux), et le coût d'investissement est encore prohibitive. Par ailleurs, la durée de vie est insuffisante, surtout dans le contexte des applications au réseau électrique[17].

### I.1.12. Le stockage sous forme chimique : Les accumulateurs électrochimiques

Les accumulateurs électrochimiques sont des dispositifs qui conservent l'énergie sous une forme chimique pour qu'elle puisse être libérée quand il est nécessaire.

#### a. Principe des accumulateurs électrochimiques

Une batterie est composée d'une série de cellules individuelles, dont chacune est capable de fournir un courant défini sous une tension donnée. Chaque cellule contient deux électrodes, une anode et une cathode plongées dans un électrolyte. Une connexion électrique entre les deux électrodes est nécessaire pour permettre le passage d'électrons d'une électrode à l'autre afin de compléter la réaction. Les cellules sont organisées en série et en parallèle de façon à fournir la tension et le courant désirés pour une application particulière.

#### b. Les avantages des accumulateurs électrochimiques

Les batteries sont l'une des technologies de stockage d'énergie les plus intéressantes pour leur disponibilité et pour leur rendement élevé (75-90%)[18]. Les facteurs clés des batteries pour les applications de stockage incluent : haute densité d'énergie, haute capacité d'énergie, rendement d'aller et retour, capacité de cycle, durée de vie, coût initial. Ces facteurs sont assez attrayants pour une large gamme de batteries. Certaines batteries offrent des possibilités de décharge profonde, favorisant ainsi les stockages à grande échelle pour des applications de grande puissance.

#### c. Les limites des accumulateurs électrochimiques

Une des limites fondamentales des batteries électrochimiques est leur tendance à vieillir. Ce vieillissement est dû à de récurrentes décharges rapides et profondes des cellules ; en effet, le réchauffage fréquent causé par ces décharges réduit la durée de vie des batteries.

La plupart des batteries souffrent aussi de la perte d'énergie. Laisseé inutilisée trop longtemps, la cellule se décharge. Cela signifie que les systèmes de batterie peuvent être utilisés seulement pour le stockage sur des temps relativement courts.

## **I.8. Conclusion**

Une description des systèmes d'énergie hybride a été présentée dans ce chapitre.

Les principales notions liées à la technologie utilisée dans les systèmes à énergies hybride ont été présentées et détaillées.

Différentes structures sont utilisées à savoir architecture à courant continu, à courant alternatif ou bien la combinaison des deux. Parmi ces structures notre travail porte sur un système hybride à architecture mixte composé d'une éolienne et des batteries de stockage.

La suite sera consacrée pour la modélisation et la commande de la chaîne de conversion.

# Chapitre 2

---

## Modélisation et commande de la chaîne de conversion

## II.1. Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé le concept de la chaîne éolienne complète. Dans ce chapitre, Nous établissons un modèle de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne en insistant notamment sur le caractère multiphasique (prise en compte des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques).

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance lie du système de commande. Ce chapitre est composé de trois parties :

Une première consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillées.

Une deuxième consacrée à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, Ainsi que la modélisation de la batterie, et on terminera cette partie par une simulation de ces configurations (MSAP et turbine) en fonctionnement générateur.

Une dernière partie de ce chapitre explique la stratégie à suivre pour commander l'éolienne avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'un régulateur PI permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent à travers l'ajustement électronique continu de la vitesse spécifique de la turbine qui conduit à un point optimal à chaque fois que la vitesse du vent varie.

## II.2. Modélisation du vent

Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'avoir un profil de vent reflétant au maximum la réalité de ce qu'on peut trouver sur un site éolien.

Le modèle de vent considéré ici est simplifié car ne prenant pas en compte la direction : on considère ainsi une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Dans cette étude, nous avons retenu un chronogramme issu de mesures réelles, modélisé sous forme déterministe par une somme d'harmoniques [19][20].

$$V(t) = 6.5 + (0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t)) \quad (\text{II.1})$$

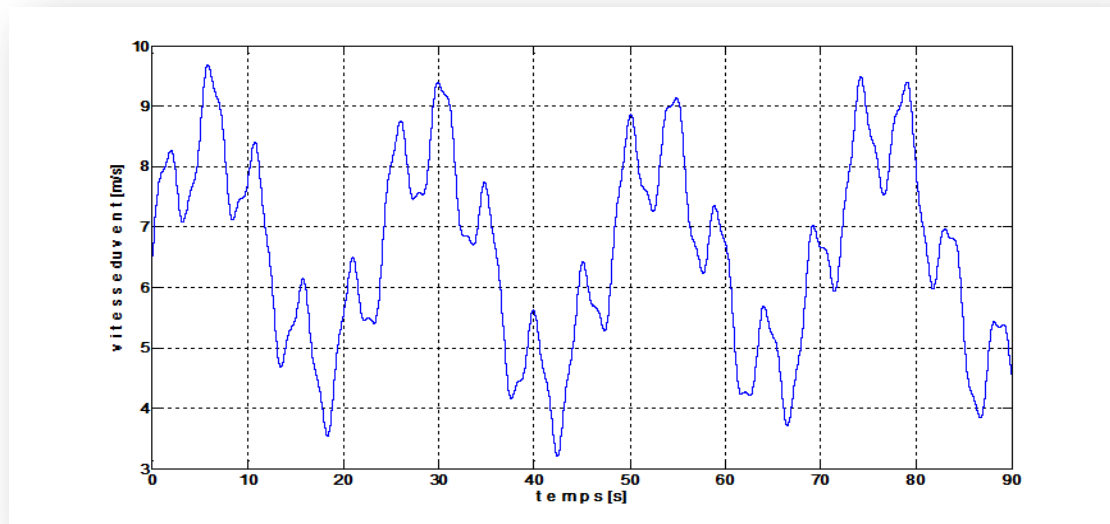


Figure II.1-Profil du vent.

### II.3. Modélisation de la turbine éolienne[21]

#### II.3.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine que nous étudions comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse qui est relié à un multiplicateur de gain. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure II.2).

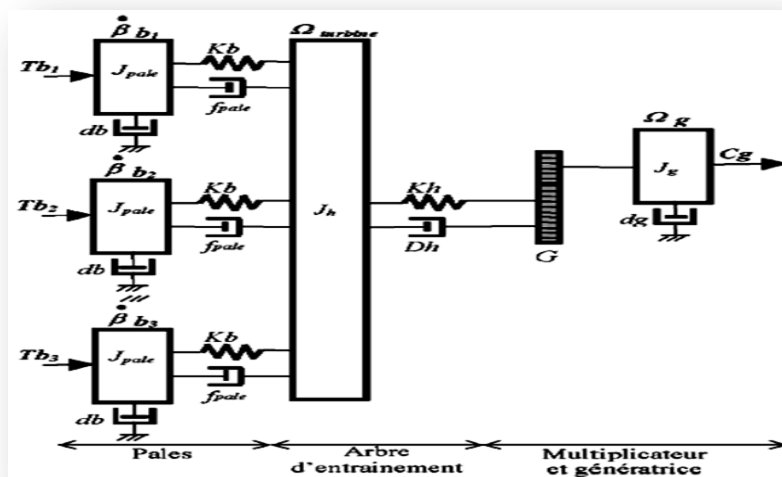


Figure II.2- Système mécanique de l'éolienne.



Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- La même inertie  $J_{pale}$  ;
- La même élasticité  $Kb$  ;
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$  .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$  .

Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie  $J_h$  ;
- Son élasticité  $Kh$  ;
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $Dh$  .
- Le rotor de la génératrice possède :
- Une inertie  $Jg$  ;
- Un coefficient de frottement  $fg$  ;
- Ce rotor transmet un couple entraînant ( $C_g$ ) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$  .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ( $Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$ ) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air ( $fg$ ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure II-3).

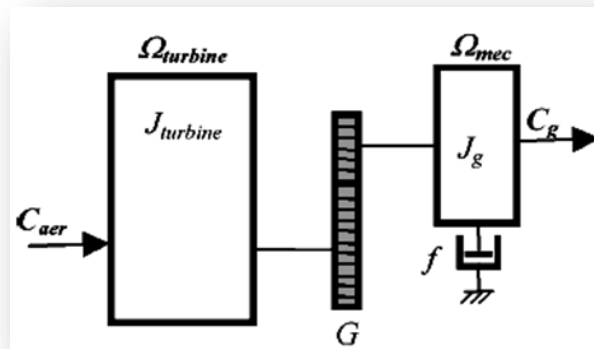


Figure II.3- modèle mécanique de la turbine.

### II.3.2. Modélisation de la turbine

Le dispositif, que nous étudions ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (figure II-4).

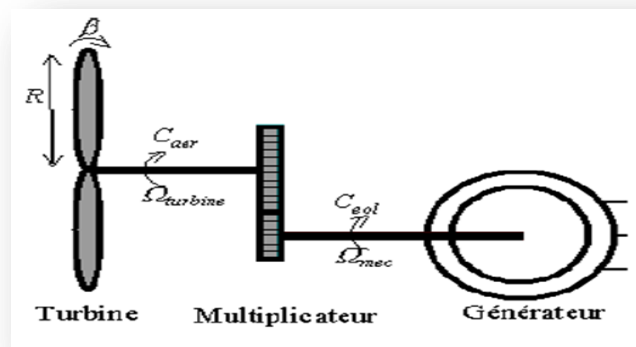


Figure II.4- Schéma de la turbine éolienne.

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

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

Où :

- $\rho$  est la densité de l'air (approximativement  $1.225 \text{ Kg} / \text{m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ \text{C}$  ;
- $S$  est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ;  $v$  est la vitesse du vent.

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

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

### II.3.3. Conversion aérodynamique

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement[22], cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne[22].

Cette modélisation (essentiellement dépendante du coefficient de puissance  $C_p$  ou rendement énergétique de l'éolienne) s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs[22].

#### II.3.3.1. Théorie de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par « Albert Betz »[23]. A. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse 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.

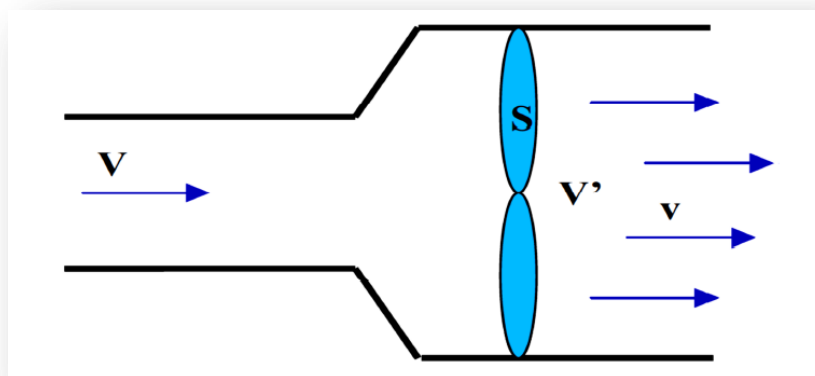


Figure II.5- théorie de Betz : schéma de principe.

Soit donc  $V$  la vitesse de l'air en amont,  $v$  celle en aval et  $V'$  celle au travers de  $S$ ,  $S$  : la section balayée par les pales de l'éolienne (comme présente à la Figure II-5) et  $m$  : la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation d'énergie cinétique de l'air  $\Delta E$  est :

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V^2 - v^2) \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V^2 - v^2) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- d.  $\rho$  : la densité de l'air.
- e.  $S$  : la surface balayée par les pales de la turbine.

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

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V - v) \quad (\text{II.6})$$

D'où :

$$P_T = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V - v) \quad (\text{II.7})$$

En identifiant les équations (II.5) et (II.7), il vient :

$$V' = \frac{V+v}{2} \quad (\text{II.8})$$

Et donc :

$$P_T = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V^2 - v^2) \cdot (V + v) \quad (\text{II.9})$$

### II.3.3.2. Limite de Betz

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

$$P_T = P_{T\_max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II.10})$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir  $v = V/3$ . Le coefficient  $C_p$  est une grandeur variable en fonction de  $\lambda$ , la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance  $C_p$ , appelée limite de Betz est de  $\frac{16}{27} = 0.593$  [26] ; 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont. On écrira en notant la vitesse du vent amont  $V$ .

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p \quad \text{Et} \quad C_{p\_max} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{II.11})$$

Où :

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II-6) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$ , et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .

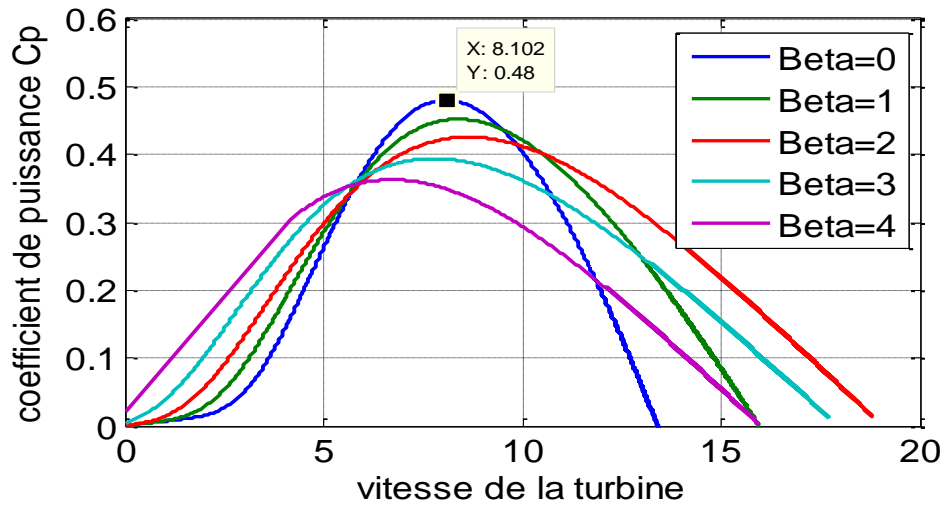


Figure II.6- Coefficient aérodynamique ( $C_p$ ) en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ ).

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante[24] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 * \left( C_2 * \frac{1}{\lambda_i} - C_3 * \beta - C_4 \right) * \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 * \lambda_i \quad (II.12)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

C1=0.5176	C2=116	C3=0.4	C4=5	C5=21	C6=0.0068
-----------	--------	--------	------	-------	-----------

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II.13)$$

### II.3.4. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure II-4). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.14)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.15})$$

### II.3.5. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $T_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.16})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne de 2 MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.17})$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.18})$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.19})$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté par la figure (II-7)



$$\begin{aligned}
\phi_a &= \phi_f \cos(p\theta) \\
\phi_b &= \phi_f \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
\phi_c &= \phi_f \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right)
\end{aligned} \tag{II.20}$$

$\phi_f$ : C'est la valeur crête du flux créée par l'aimant permanent à travers les enroulements statiques.

Les équations électriques de la MSAP dans le plan (a, b, c) sont :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \tag{II.21}$$

$[\phi_a \phi_b \phi_c]$  : Vecteur des flux statiques

$[R_s]$  : Résistance d'une phase d'enroulement statique

### II.4.3. Equation de la machine synchrone à aimant permanent dans le plan de Park

Afin de simplifier l'étude, on utilise la transformation de Park qui est un outil mathématique permettant de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a, b, c) en axes orthogonaux (d,q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statoriques (a, b, c) par des bobinages équivalents (d,q)[27].

La transformation de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.22}$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a,b,c) on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

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

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :



$$\begin{aligned}
 [i_{dq}] &= P(\theta)[i_{abc}] \\
 [v_{dq}] &= P(\theta)[v_{abc}] \\
 [\theta_c] &= P(\theta)[\phi_{abc}]
 \end{aligned}
 \tag{II.24}$$

Enfin, les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont données par les expressions suivantes :

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_d \cdot i_d \tag{II.25}$$

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - p \cdot \Omega_t \cdot L_q \cdot i_q \tag{II.26}$$

Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = (K_t \cdot i_q + p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \tag{II.27}$$

$$K_t = p\phi_f \tag{II.28}$$

Où

- $p$ : Le nombre de paires de pôles
- $v_d$ : La tension statorique sur l'axe d
- $v_q$ : La tension statorique sur l'axe q
- $i_d$ : Le courant statorique sur l'axe d
- $i_q$ : Le courant statorique sur l'axe q
- $L_d$ : L'inductance statorique sur l'axe d
- $L_q$ : L'inductance statorique sur l'axe q
- $K_t$ : Le coefficient de couple
- $\phi_f$ : Le flux inducteur

## II.5. Modélisation de la batterie

Puisque le vent varie continuellement, il n'est pas possible de rencontrer les besoins de la charge électrique en tout temps en réseau isolé. On doit donc disposer d'un moyen permettant de découpler la production et la consommation afin d'alimenter la charge lorsqu'elle vent est faible, et d'absorber les surplus de production lorsque le vent est fort. Les technologies présentes et futures qui permettent d'emmagasiner de l'énergie et qui peuvent être considérées pour les systèmes éoliens sont : le volant d'inertie, l'air comprimé, les accumulateurs hydrauliques, la bobine supraconductrice, les super capacités, la pile électrochimique, l'hydrogène et la pile à combustible[28].

### II.5.1. Réglage de la tension continue

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur éolien, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur éolien) vers le bus à CC. Dans le cas du Hacheur utilisé par la charge /décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés[29] comme l'indique la figure (II-8)

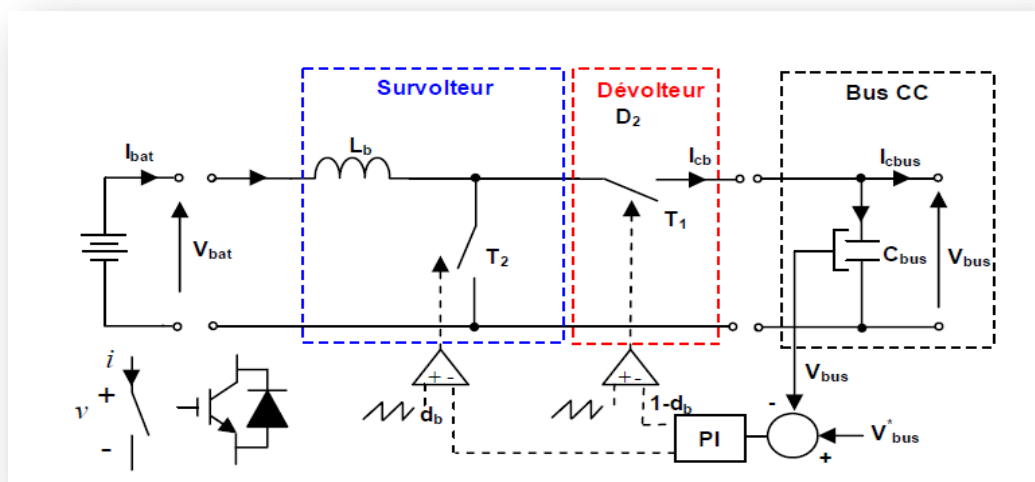


Figure II.8 -Hacheur réversible en courant.

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs réunis sur la structure présentée dans la figure (II-8) ont été résolues en utilisant un modèle en valeur moyennes[30]. Sachant que la commande des interrupteurs T1 et T2 est simultanée avec des rapports cycliques  $d_b$  et  $1 - d_b$  complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par :

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L}(d_b V_{bus} - V_{bat}) \quad (\text{II.29})$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus à CC s'exprime :

$$i_{cb} = d_b i_{bat} \quad (\text{II.30})$$

Le rapport cyclique  $d_b$  est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC.

- Le modèle électrique simple de la batterie

Le modèle électrique simple comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne ( $R_s$ ).

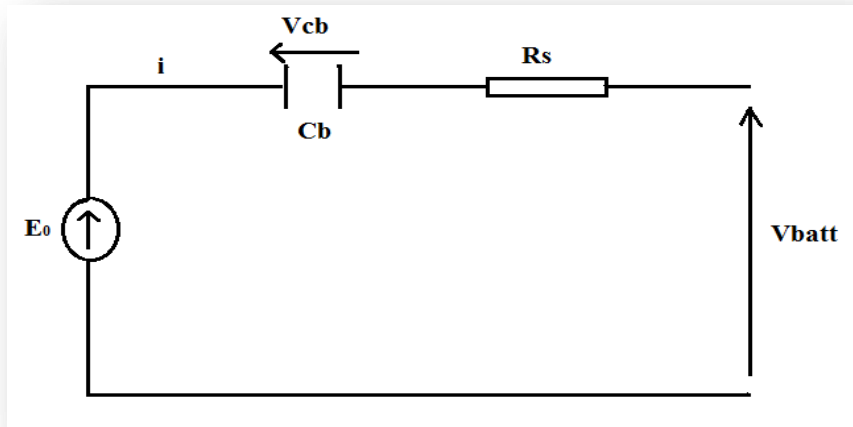


Figure II.9-Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{cb} \quad (\text{II.31})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = \frac{Qd}{C_b} \quad (\text{II.32})$$

Avec  $C_b$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et Qd la quantité de charge manquante par rapport à  $C_b$  [28].

D'après le modèle R-C de la batterie présentée à la Figure (II-9) la capacité en ampères heure est modélisée par  $C_b$  dont la valeur est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{batt} = I * t_{batt} \quad (\text{II.33})$$

$$C = \frac{Q_{batt}}{V} \quad (\text{II.34})$$

Avec:

$Q_{\text{batt}}$ : La quantité de charge électrique en Coulomb,

- $I$  : le courant à travers la capacité,
- $t$  : le temps de fonctionnement,
- $C$  : la valeur de la capacité en Farad,
- $V$  : la différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie allant de 0% à 100%. Nous considérons  $V=2V$  pour une batterie au plomb de 12V.

## II.6. Structure du dispositif de commande

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide des logiciels Matlab/Simulink.

Le dispositif de contrôle du système se décompose en deux parties : La première concerne le contrôle du couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de façon à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous l'appellation « MPPT » (maximum power point tracking)

La deuxième concerne la commande vectoriel de la machine synchrone à aimant permanent.

L'architecture de commande est donnée par la figure suivante :

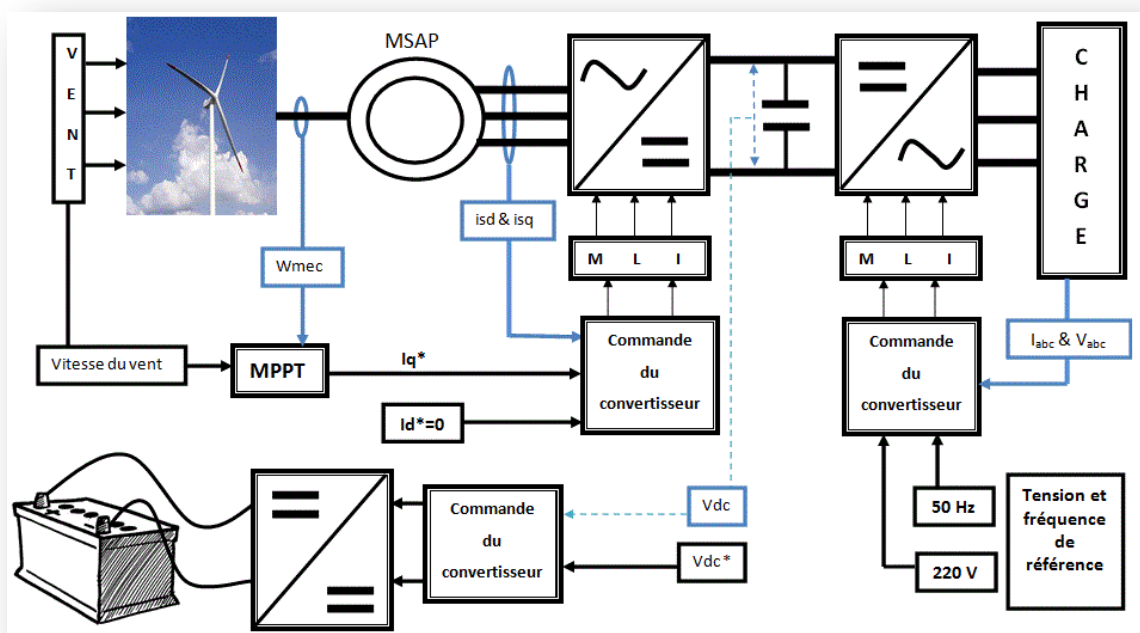


Figure II.10 -Structure générale de commande de la chaîne de conversion .

## II.7. Elaboration de l'algorithme MPPT

Pour maximiser la puissance électrique générée, on utilise la structure de commande par asservissement de la vitesse mécanique.

### II.7.1. Maximisation de la puissance par asservissement de vitesse

#### II.7.1.1. Principe générale

Le vent est une grandeur de nature fluctuante dont les variations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne.

Pour notre étude on suppose que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II.35)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés.

A partir des relations (II.17), (II.18) et (II.19), on déduit la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.36)$$

Avec :

$C_{em}$  : couple produit par la génératrice

$C_g$  : couple issu du multiplicateur

$C_{vis}$  : couple résistant dû au frottement  $C_{vis} = f * \Omega_{mec}$

A partir des expressions de la turbine éolienne, on déduit le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse mécanique.

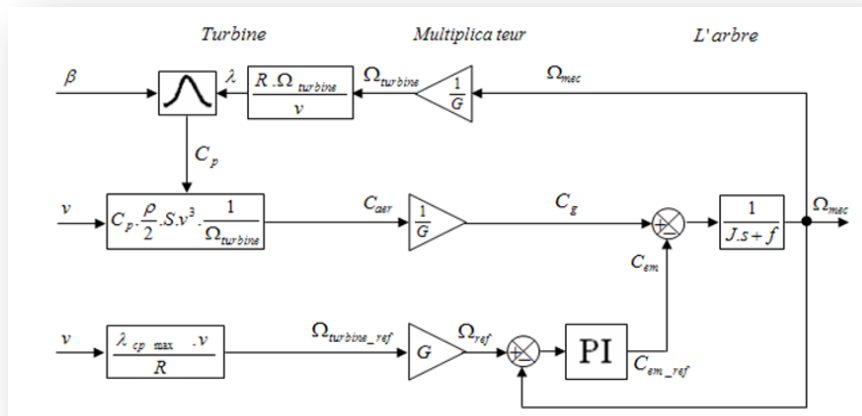


Figure II.11-schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Avec :

$C_{p-max}$  le rendement aérodynamique maximal obtenu pour une valeur d'angle d'orientation des pales égale à  $0^\circ$ .

- $W_{ref}$  : la vitesse mécanique de référence.
- PI : le régulateur de vitesse.

La référence de la vitesse de la turbine est celle correspondante à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{cpmax}$  (pour  $\beta$  égal à  $0^\circ$ ) permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$ . (Figure II-12)

Elle est donnée par :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda_{cpmax} V}{R} \tag{II.37}$$

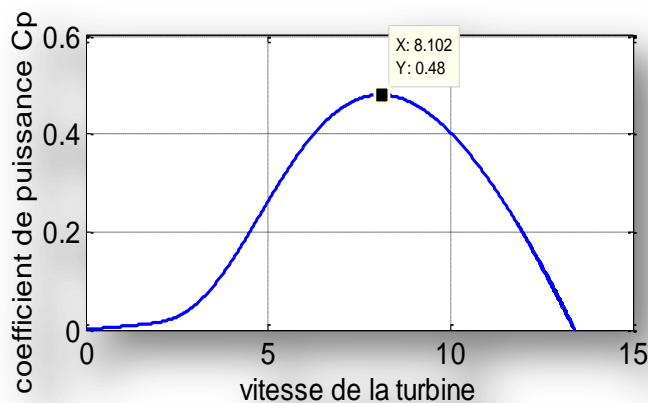


Figure II.12- point de fonctionnement optimal.

## II.8. Synthèse du régulateur

Le calcul du régulateur est basé sur la méthode de compensation des pôles. La boucle de régulation de vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure (II-13).

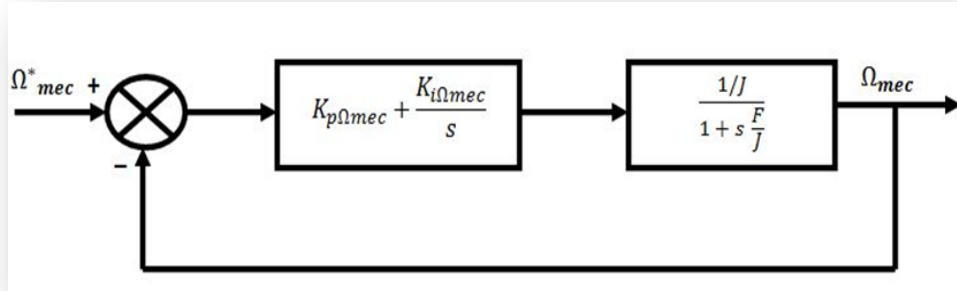


Figure II.13 -schéma fonctionnel de régulation de vitesse.

Le régulateur PI est donné par :

$$R_{pi}(s) = \frac{K_{p\Omega_{mec}}}{s} \left( s + \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \right) \quad (\text{II.38})$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \quad (\text{II.39})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega^*_{mec}} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{mec}} \cdot s} + 1} \quad (\text{II.40})$$

Le système est de premier ordre, sa fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega^*_{mec}} = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (\text{II.42})$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{mec}}} \quad (\text{II.41})$$

Les paramètres du régulateur de vitesse sont :

$$K_i = J/\tau \quad (\text{II.44})$$

$$K_p = F/\tau \quad (\text{II.43})$$

## II.9. Caractéristique « puissance-vitesse » d'une éolienne

La caractéristique puissance – vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (figure II-14)

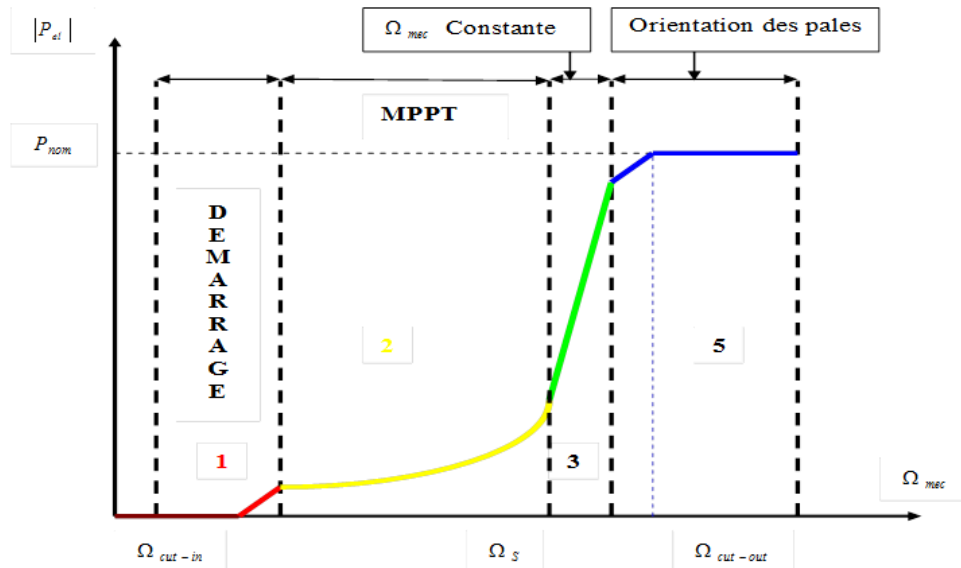


Figure II.14-Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne.

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

Zone 1 : c'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega_{cut-in}$ .

Zone 2 : lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est-à-dire, ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

Zone 3 : au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs très importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominal ( $P_{nom}$ ).

Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale, une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control. Au-delà de la vitesse  $\Omega_{cut-out}$ , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.



En pratique, le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique  $C_{em}$  en zone 2 et, en zone 4, c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales a une dynamique bien plus lente que la dynamique électrique de la machine. Ainsi, la lenteur de régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale se produisant pendant un fonctionnement entre les zones 2 et 4. Il est, dans ce cas, intéressant de concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation, dans cette zone 3 intermédiaires.

## II.10. Commande vectorielle de la MSAP

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct  $i_d$  à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation (II-27) en une expression linéaire donnée par :

$$C_{em} = K_t \cdot i_q \quad (\text{II.45})$$

Ce dernier est réglé en agissant sur le courant en quadrature pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- ✓ Poser une référence  $i_{dref} = 0$
- ✓ Poser  $C_{emref} = C_{te} \cdot \Omega^2$
- ✓ Poser une référence  $i_{qref} = \frac{C_{emref}}{K_t}$

Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation:

Afin de justifier le recourt à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations (II.46) (II.47)

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_q \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_q \quad (\text{II.46})$$

$e_q = \omega_r \cdot \Phi_q$ : f.e.m de la machine sur l'axe q

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_d \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_d \quad (\text{II.47})$$

$e_d = \omega_r \cdot \Phi_d$ : f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Les termes de couplage sont considérés comme des perturbations mesurables [31]. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_q p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.48})$$

Avec

-  $T_e = \frac{L_s}{R_s}$  : La constante de temps électrique

Si on tient compte de la perturbation,  $G_s(p)$  sera sous la forme donnée en (II-48), en vertu du théorème de superposition

$$G_s(p) = \frac{1}{V_{d,q}(p) + E_{d,q}(p)} \quad (\text{II.49})$$

Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur PI. La boucle de régulation du courant  $i_d$  est donnée par le schéma bloc suivant :

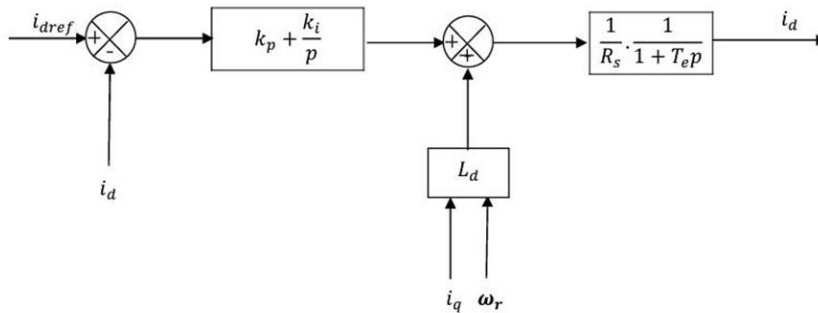


Figure II.15 -Boucle de régulation du courant  $i_d$ .

### II.10.1. Calcul du régulateur PI :

La fonction de transfert en boucle ouverte es donnée comme suit :

$$G_0(p) = \frac{K_{pd}p + K_{id}}{p} \cdot \frac{1}{R_s p + L_d} \quad (\text{II.50})$$

En fin

$$G_0(p) = \frac{K_{pd}p + K_{id}}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.51})$$

$T_e = \frac{K_p}{K_i}$  : La constante de temps électrique

$G_0$  : Le gain statique

La fonction de transfère en boucle fermée est donnée par  $G(p) = \frac{G_0}{1+G_0(p)}$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pole

La fonction de transfère en boucle ouverte est :

$$G_{bo}(p) = \frac{K_p p + K_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.52})$$

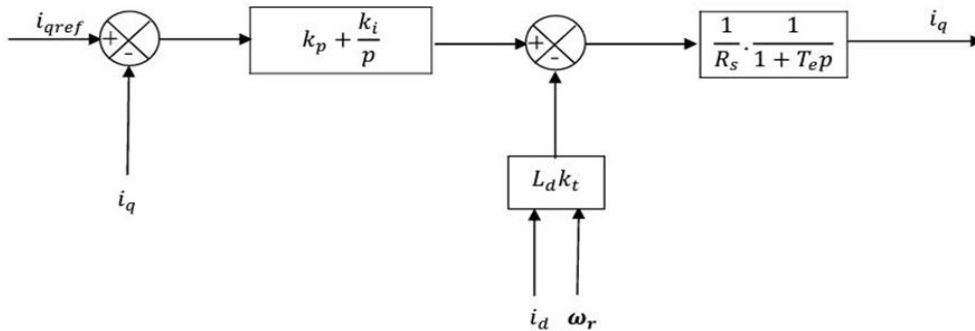
La fonction de transfère en boucle fermée est :

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{bo}}{1+G_{bo}} = \frac{K_p p + K_i}{L_q p^2 + (R_s + K_p) p + K_i} \quad (\text{II.53})$$

$$K_p = \frac{2\xi_n K_i}{\omega_n} - J \quad (\text{II.54})$$

$$K_i = \omega_n^2 J \quad (\text{II.55})$$

La boucle de régulation du courant  $i_q$  est donnée par le schéma bloc suivant :



**Figure II.16-**Boucle de régulation du courant  $i_q$ .

Avec :

$$i_{qref} = \frac{Cem_{ref}}{K_t} = Cte. \frac{\Omega^2}{K_t} \quad (\text{II.56})$$

$$Cem_{ref} = \frac{P_{éolmax}}{\Omega_t} \quad (\text{II.57})$$

$$P_{éol} = \frac{1}{2} C_{pmax} \lambda. \rho. S. v^2_v \quad (\text{II.58})$$

$$S = \pi R^2 \quad (\text{II.59})$$

Si on remplace la puissance éolienne  $P_{éol}$  et la surface active  $S$ , par leurs formules respectives, données en (II.58) et (II.59) on obtient :

$$Cte = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^5 \cdot C_{pmax}}{2 \cdot \lambda^3_{opt}} \quad (II.60)$$

## II.11. Commande coté charge

La charge électrique représente le consommateur d'électricité qui est relié au système éolien, à la batterie, le plus souvent via un onduleur. Aucune distinction n'est faite à savoir s'il s'agit d'une charge alternative ou continue et la valeur de la résistance de la charge n'est pas établie. Le modèle de la charge électrique est plutôt une série temporelle de la demande de puissance. La puissance électrique demandée est divisée ensuite par la tension du bus CC afin d'établir la demande de courant faite à la batterie.

La solution la plus simple pour la commande de l'onduleur est la commande à hystérésis qui fournit une réponse dynamique rapide, une bonne précision, une robustesse élevée et il n'y a pas de compensation en CC. Cependant, le problème majeur de la commande à hystérésis est que sa fréquence moyenne de commutation varie avec le courant de charge, entraînant un comportement irrégulier et aléatoire des interrupteurs[32]. Ce comportement a comme conséquence une fatigue supplémentaire des interrupteurs et rend difficile le dimensionnement du filtre.

Le Principe de commande étant fixé, plusieurs stratégies de commande sont envisageables pour le contrôle des grandeurs électrique[33][32][34][35]. Parmi celles-ci la stratégie de commande basée sur la régulation du courant (tension) en coordonnées continues dq est largement utilisée. Les boucles fermées de régulation utilisées par ces commandes assurant une réponse rapide en régime transitoire et une performance élevée en régime stationnaire[33].

Le schéma de commande est présenté dans la figure (II-17) :

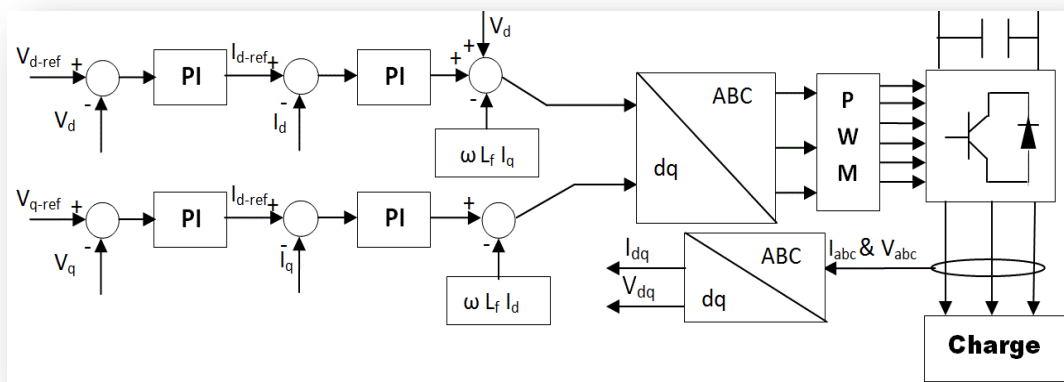
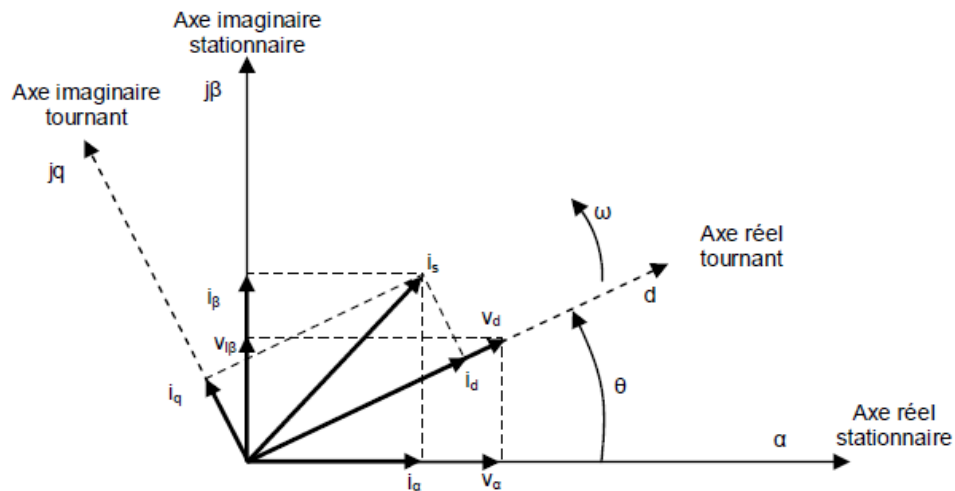


Figure II.17 - principe de commande coté charge.

Il s'agit d'une stratégie de commande permettant à l'onduleur de contrôler de manière autonome en fréquence et en amplitude la tension délivrée à une charge. Cette stratégie contient deux boucles de régulation : une boucle interne pour la régulation du courant et une boucle externe pour la régulation de la tension[34][35]. Le contrôle de ces grandeurs est réalisé dans un référentiel tournant  $d_q$ (figure II-18) :



**Figure II.18-** projection des différentes composantes des vecteurs courant et tension dans un référentiel tournant.

La régulation de la composante  $i_d$  du courant permet d'agir sur le flux de puissance active, alors que la régulation de la composante  $i_q$  du courant agit sur le flux de puissance réactive. Dans un système de référence tournant lié à la tension aux bornes de la charge, on a :

$$0 = v_{sq} - R_f i_q - L_f \frac{di_q}{dt} - \omega L_f i_d \quad (\text{II.62})$$

$$v_d = v_{sd} - R_f i_d - L_f \frac{di_d}{dt} + \omega L_f i_q \quad (\text{II.61})$$

Deux régulateurs PI sont utilisés pour contrôler les courants  $i_d$  et  $i_q$ .

Cependant, pour le système décrit par les équations (II.61) et (II.62), les performances des régulateurs ne sont pas satisfaisantes à cause du couplage existant entre l'axe d et l'axe q [32].

Le découplage est possible en considérant les termes de couplage comme des termes de perturbation (figure II-19)

Les signaux de commande sont obtenus à partir des Equations (II.61) et (II.62) :

$$v_{sd} = v_d + (PI)(i_d^* - i_d) - \omega L_f i_q \tag{II.63}$$

$$v_{sq} = (PI)(i_q^* - i_q) + \omega L_f i_d \tag{II.64}$$

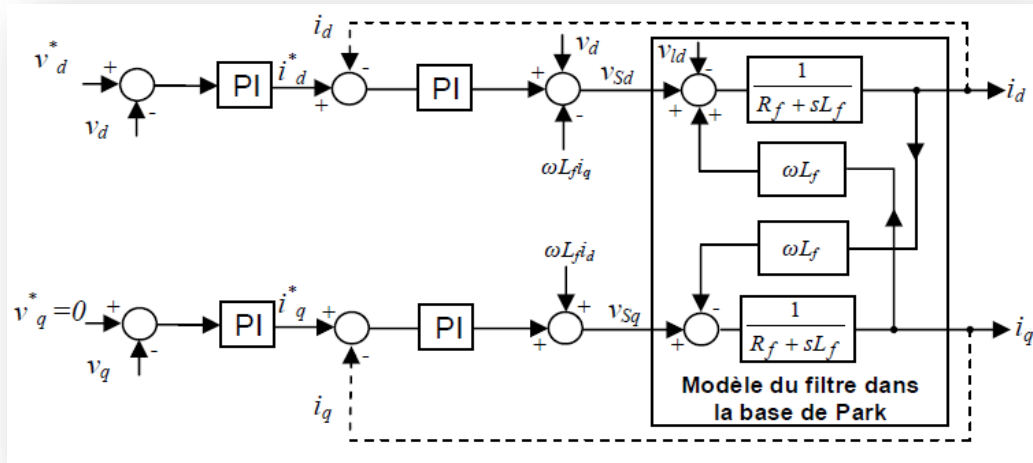


Figure II.19- Découplage des axes d et q.

Les consignes  $i_d^*$  et  $i_q^*$  sont les sorties des PI utilisés dans la boucle externe de régulation des tensions  $v_{Ld}$  et  $v_{Lq}$ . Cette boucle de régulation permet de fixer l'amplitude de la tension sur le bus CA ( $v_{Ld}^* = cte$ ) et d'annuler  $v_{Lq}$ .

$$i_d^* = (PI)(v_d^* - v_d) \tag{II.65}$$

$$i_q^* = (PI)(v_q^* - v_q) \tag{II.66}$$

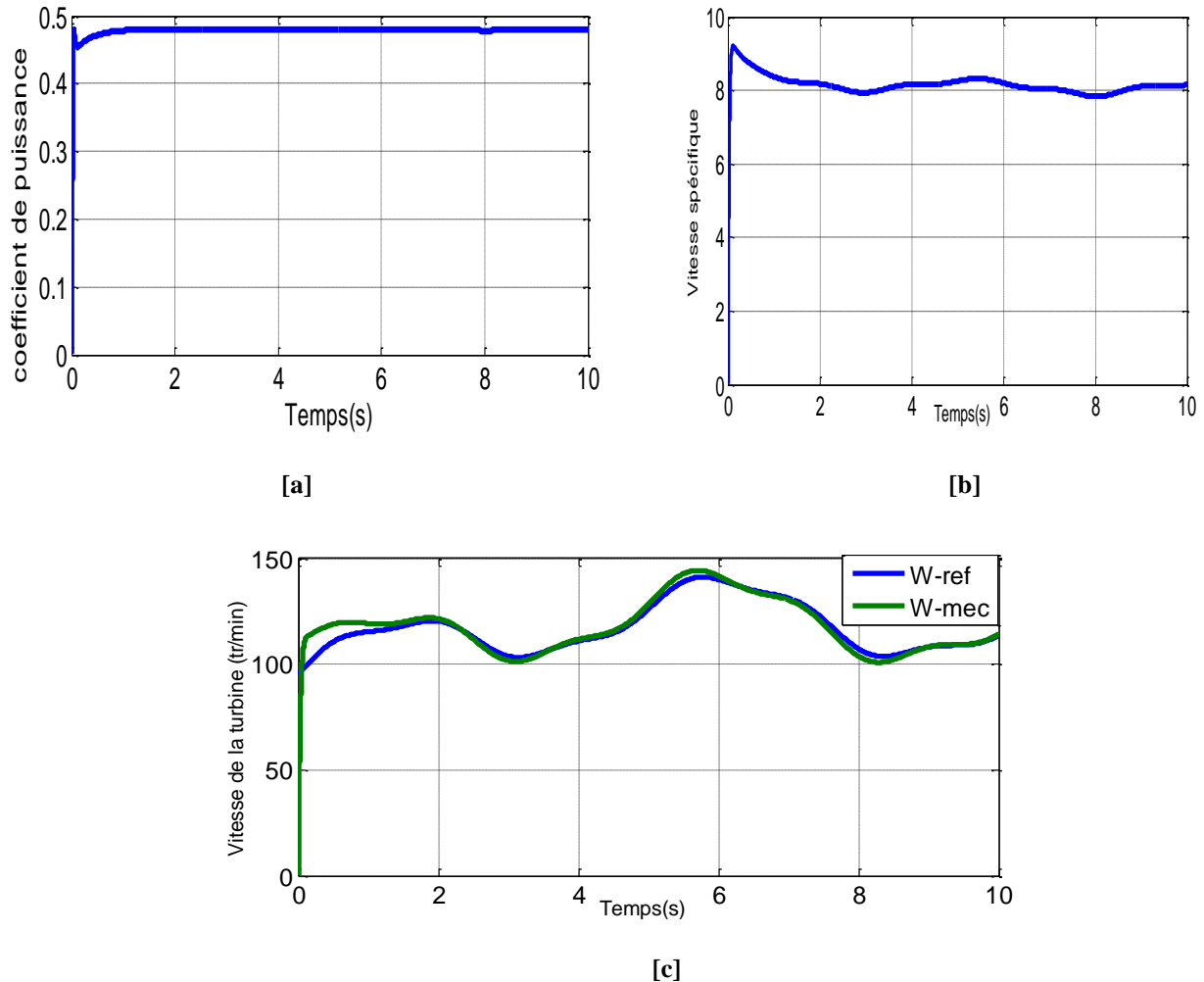
Les signaux de commande  $v_{sd}^*$  et  $v_{sq}^*$  sont ramenés dans la base de départ (transformation inverse de Park) pour servir des signaux de commande (calculer les rapports cycliques). L'angle  $\theta$  utilisé dans les transformations de park est obtenu en intégrant la vitesse angulaire  $w (w = 2\pi f)$   $f$ : la fréquence des grandeurs alternatives

## II.12. Résultats de simulation

Les résultats obtenus par simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink sont comme suit :

- **La turbine**

Les Figures II-20.a et II-20.b présente le coefficient aérodynamique  $C_p$  et la vitesse spécifique, ainsi la figure II-20.c présente la vitesse de rotation de la turbine.



**Figure II- 20.[a]-** Coefficient aérodynamique  $C_p$ , **[b]-** Vitesse spécifique, **[c]-** Vitesse mécanique de la turbine.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants vu que le coefficient de puissance  $C_p$  prend une forme d'allure croissante pendant le temps de démarrage, puis se met à osciller autour de sa valeur optimale ( $C_p = 0.48$ ), de la même façon, la vitesse spécifique  $\lambda$  est asservie à sa valeur optimale ( $\lambda = 8.1$ ), donc une transmission de puissance optimale vers la génératrice. La vitesse de référence et celle mesurée sont presque confondues.

- La MSAP

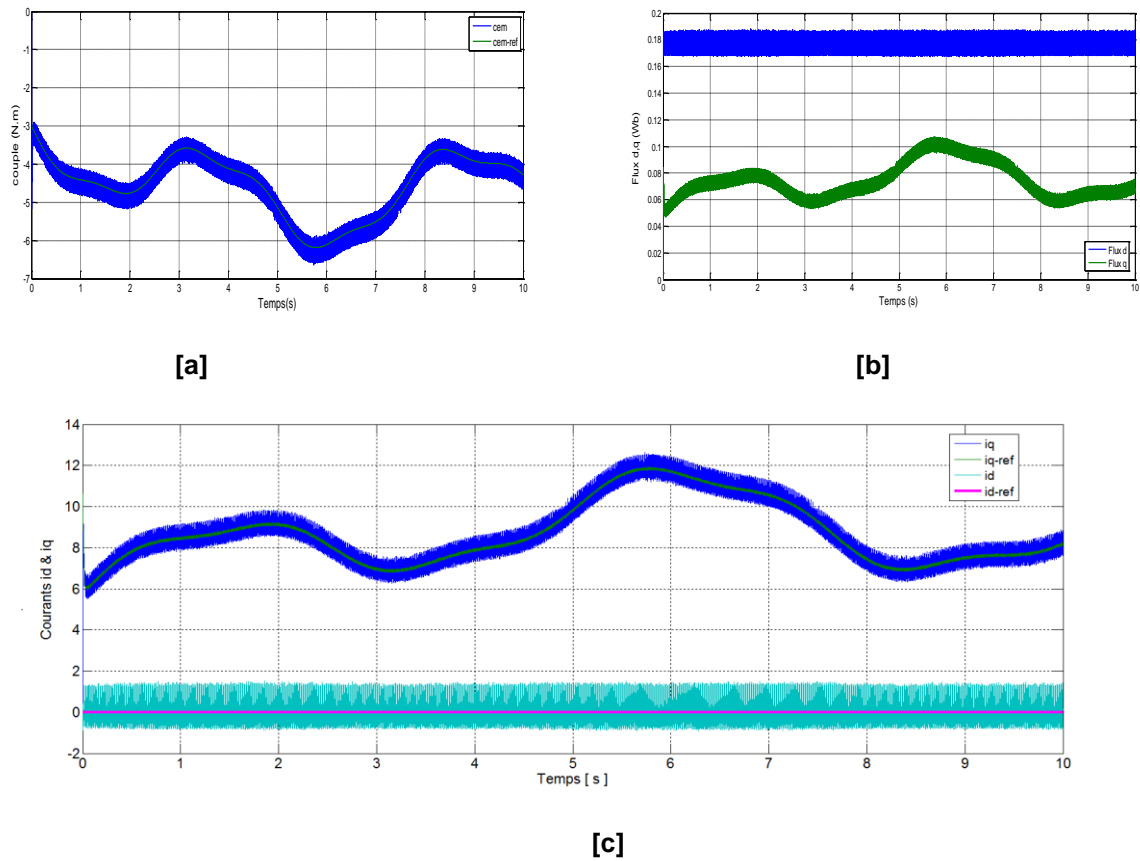
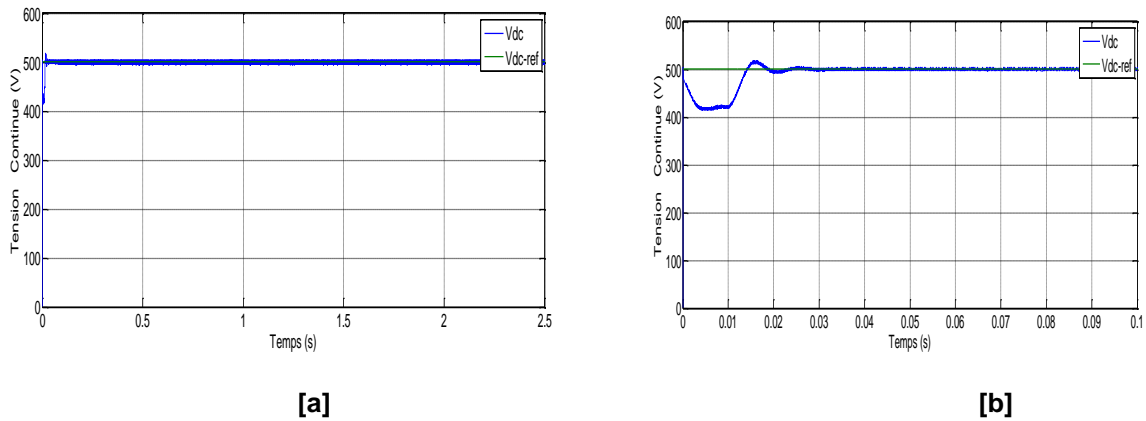


Figure II.21-[a]-Couple électromagnétique  $C_{em}$ , [b]- Flux quadratique  $q$  et directe  $d$ , [c]- Courant  $i_q$  et  $i_d$ .

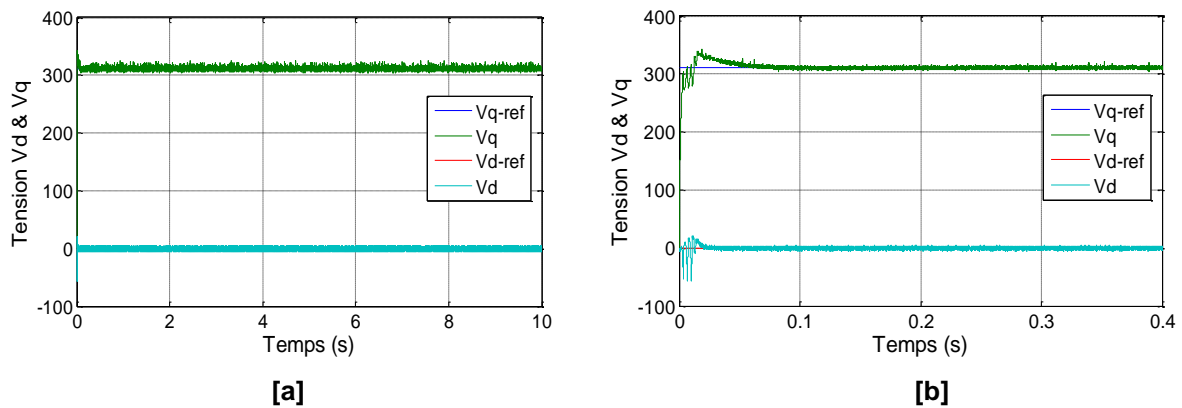
- Les résultats de simulation de la GSAP montrent que l'allure du couple électromagnétique est de forme fluctuante et suit sa référence, c'est ce qui apparaît clairement dans la Figure II-20.a.
- L'allure du flux quadratique  $q$  et directe  $d$  sont de même forme que celle du courant  $i_q$  et  $i_d$ .
- Les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont décrites par la figure II-21.c, qui montre que le courant  $i_d$  oscille autour de sa référence  $i_{d-ref} = 0A$ , il est d'une valeur moyenne presque nulle. Tandis que le courant  $i_q$  est superposé à sa référence.





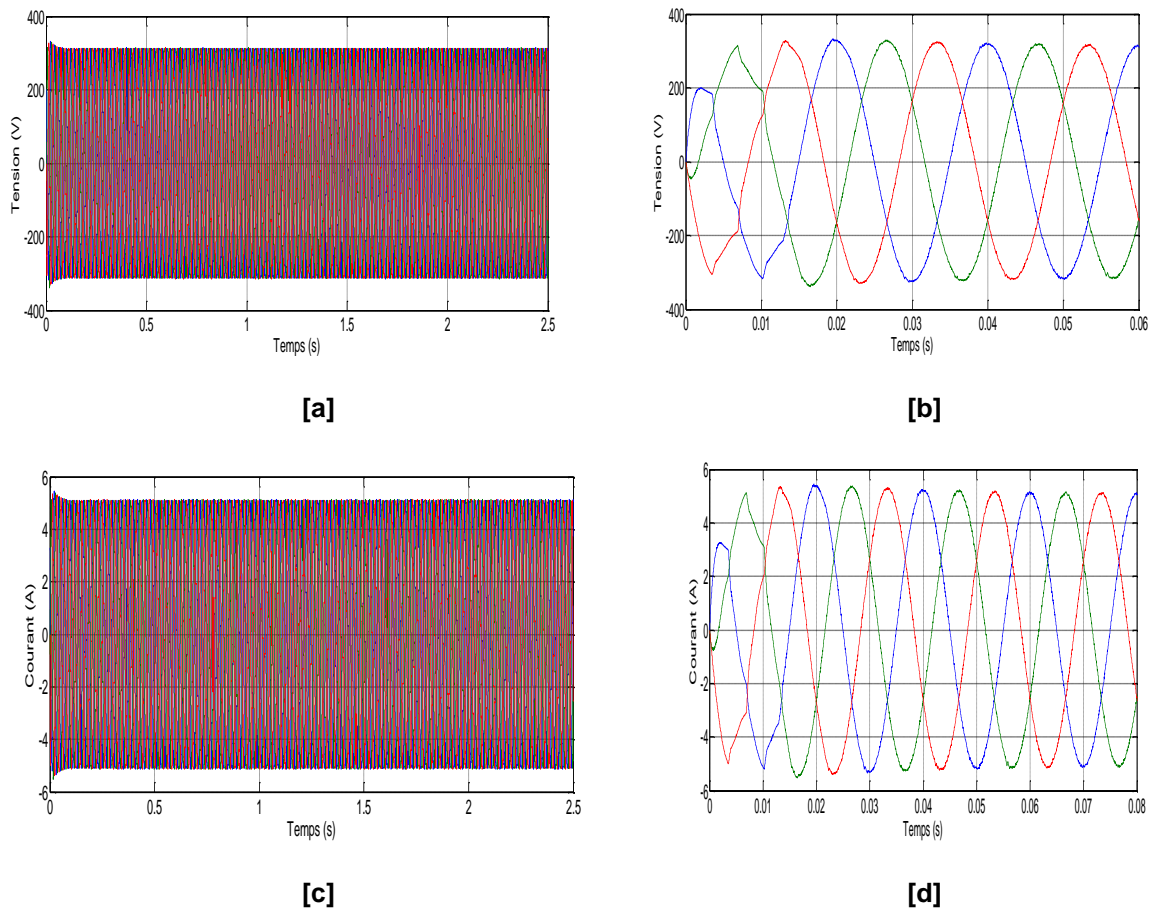
**Figure II- 22 :[a]- Régulation de la tension du bus continu  $V_{dc}$  , [b]- Zoom de  $V_{dc}$**

La régulation de la tension du bus continu est présentée sur la Figure II-22.a et la Figure III-22.b, la tension du bus continu  $V_{dc}$  est bien asservie à sa consigne 500V après un temps de réponse de 0.02s. La Figure II-22.b montre une perturbation de la tension  $V_{dc}$  à  $t=0s$  (la tension du bus continu augmente ou diminue lors d'une augmentation ou diminution de la puissance électrique exploitée).



**Figure II.23- [a]- Tension Vd,q,[b]-Zoom de Vd,q.**

Les résultats du réglage des tensions directe et quadratique sont présentés par les Figure II-23.a et la Figure III-23.b. On constate que les tensions Vd et Vq suit leurs références et se stabilisent après un temps de réponse qui dure 0.04 s.



**Figure II.23-[a]**-Tension aux bornes de la charge  $V_{abc}$ , **[b]**- Figure Zoom de  $V_{abc}$ , **[c]**- Courant de charge  $i_{abc}$ , **[d]**- Zoom de  $i_{abc}$ .

La figure II-24 représente l'évolution des tensions et des courants de charge, ils sont parfaitement sinusoïdaux en régime stable, avec des valeurs crête de 300 (V), 5(A) et une fréquence de 50(HZ).

## II.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimant permanent est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle, Ainsi que la modélisation du système de stockage (Batterie) pour l'extraction du maximum de puissance nous avons utilisé la "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI.

L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent.

Mais dans le but d'augmenter ce degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système, il faut réfléchir à d'autres algorithmes de commande plus avancés comme la commande par la logique floue, qui sera l'objectif du chapitre suivant.

# Chapitre3

---

Application des algorithmes intelligents pour la  
maximisation de puissance

### III.1. Introduction

La logique floue est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous. A ce titre, toute une série de notions fondamentales a été développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base de la logique floue.

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 prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble floue soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel[3].

La commande floue est un domaine d'application de la théorie des ensembles flous qui a été abordé très tôt, proposé par L.A. Zadeh est développé par des chercheurs européens[36]. Son principe a été introduit en Angleterre par Mamdani et Assilian pour la commande d'une machine à vapeur expérimentale. Il a ensuite été exploité, toujours en Europe, pour la commande d'une usine d'eau chaude et un échangeur de chaleur, pour la régulation de la vitesse d'un moteur en France et pour la réalisation industrielle d'un four à ciment au Danemark. La commande floue a été largement développée au Japon à partir du début des années 80, où il existe actuellement de nombreuses réalisations industrielles[4].

### III.3. Domaines d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications, on peut citer [37] :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...)
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.)
- Systèmes autonomes mobiles
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...)
- Systèmes de conditionnement d'ambiance
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance
- Systèmes d'autoroute automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette des gaz pour les véhicules
- Robotique : contrôle de la place et organisation de chemin
- Produits de consommation courante.

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

La logique de propositions est la logique associée à la théorie classique des ensembles qui est une logique formelle s'appuyant sur la tables de vérité, la logique floue est associée de la même manière à la théorie des sous-ensembles floue, elle s'appuie sur des opérations floues réalisées sur les ensembles flous.

#### Qu'est-ce que la logique floue ?

La logique floue est plus proche de la manière avec laquelle l'être humain pense que la logique traditionnelle, puisqu'elle s'exprime en langage naturel, elle fournit un moyen efficace pour capturer la nature inexacte et approximative du monde réel.

### III.4.1. Système flou

Un système flou (S.F) est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numérique (entrée nettes) les faire passer dans un domaine flou, puis avoir une sortie scalaire (sortie nette). La structure générale de ce traitement est donnée [38] par la figure (III-1)

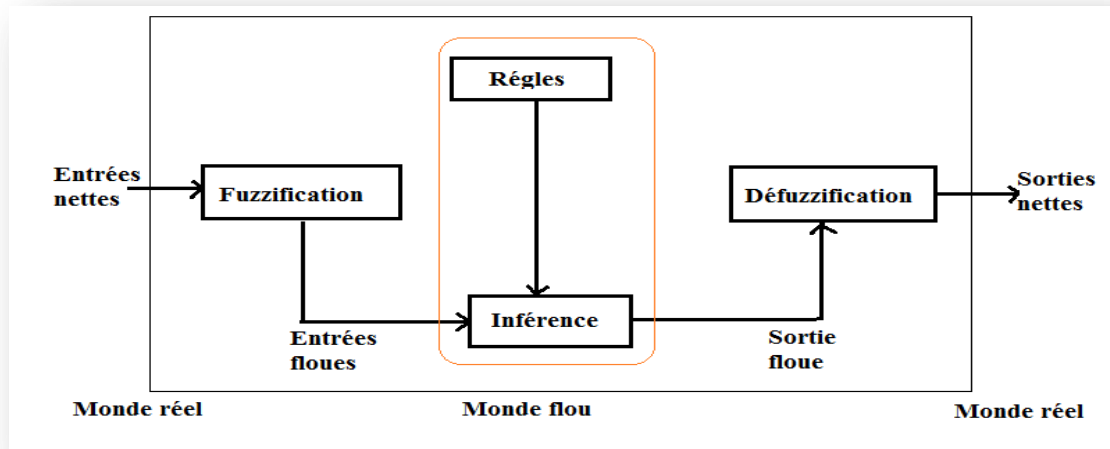


Figure III.1-Schéma bloc représentant un système flou.

- l'interface de fuzzification pour passer du monde réel au monde flou.
- Mécanisme d'inférence avec les règles pour le traitement de données.
- Défuzzification pour passer du monde flou au monde réel.

### III.4.2. Ensemble flous

La notion d'ensemble flou permet de définir une appartenance graduelle d'un élément à une classe, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe, Cette notion permet le passage progressif et non exclusif d'un ensemble à un autre.

Un ensemble flou  $F$  est caractérisé par une fonction d'appartenance  $\mu(x) F$  qui prend ses valeurs dans l'intervalle  $[0,1]$ , cette fonction nous donne le degré d'appartenance d'un Elément à l'ensemble  $F$ . Cependant l'appartenance dans un ensemble net prend deux valeurs soit « 0 » soit « 1 » [39].

L'ensemble flou constitué de l'élément  $X$  et de la valeur de sa fonction d'appartenance

$$F = \{(X, \mu_F(x)) / x \in U\} \quad (\text{III-1})$$

1- Continu :  $F$  est noté sous la forme suivante :

$$F = \int_u \mu_F(x)/x \quad (\text{III-2})$$

2- Discret : F est noté sous la forme suivante :

$$F = \sum_u \mu_F(x)/x \quad (\text{III-3})$$

### III.4.3. Variables linguistiques

La description d'une situation, d'un phénomène 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.

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont définies en termes linguistiques, elle est caractérisée par un triplé (U, T(U), X)[38] où :

- U est le nom de la variable
- T(U) l'ensemble des termes primaires affectés à la variable
- X est le référentiel sur lequel sont définis les sous-ensembles (termes).

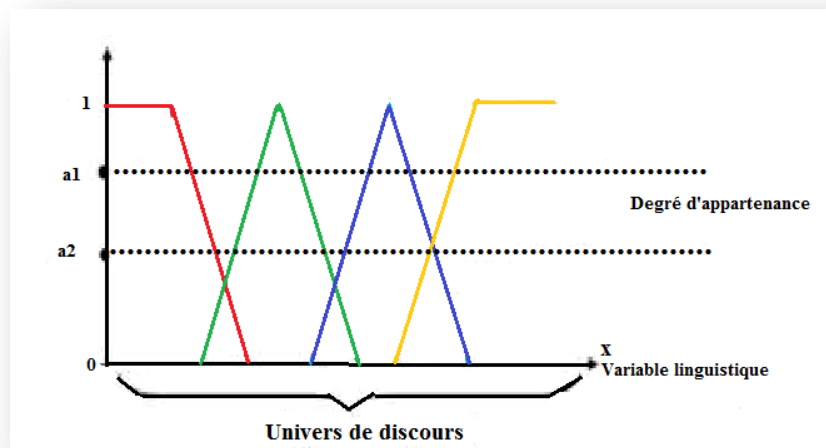


Figure III.2-Élément de la logique floue.

Exemple

En logique booléenne, la température peut être :

- ❖ Faible :  $\mu_{faible}(T) = 1, \mu_{moyenne}(T) = 0, \mu_{élevée}(T) = 0$
- ❖ Moyenne :  $\mu_{faible}(T) = 0, \mu_{moyenne}(T) = 1, \mu_{élevée}(T) = 0$
- ❖ Elevée :  $\mu_{faible}(T) = 0, \mu_{moyenne}(T) = 0, \mu_{élevée}(T) = 1$



Elle ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois (figure III-3)

En logique floue,  $\mu_{moyenne}(T)$  par exemple, permet de quantifier le fait que la température puisse être considérée comme moyenne.

Dans ce cas, la température peut être considérée à la fois, comme faible avec un degré d'appartenance de 0.2 et comme moyenne avec un degré d'appartenance de 0.8.

$$\mu_{faible}(T) = 0.2, \mu_{moyenne}(T) = 0.8, \mu_{élevée}(T) = 0$$

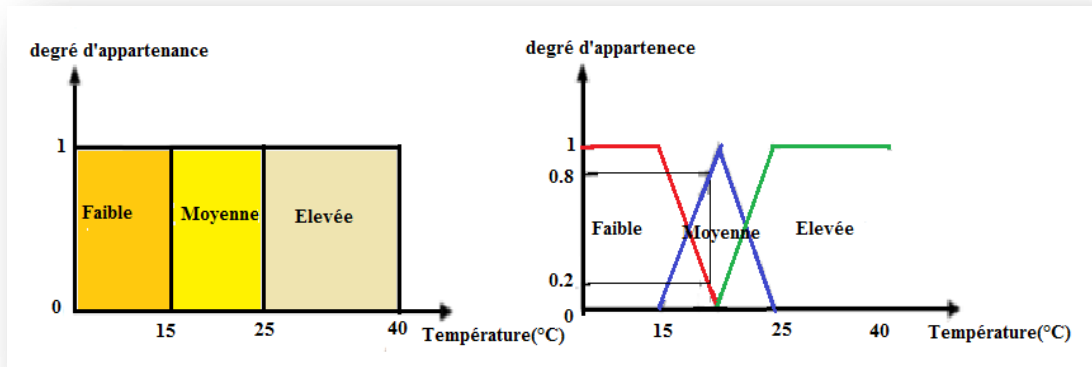


Figure III.3-Exemple d'ensemble en logique booléenne et en logique floue.

#### III.4.4. Opération sur les ensembles flous

Comme dans la théorie des ensembles classique on définit l'intersection l'union des ensembles flou ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou, ces relation sont traduites par les opérateurs « et », « ou » et « non »[40].

L'opérateur "ET", qui correspond à l'intersection de deux ensembles A et B il peut être réalisé par la fonction "Min" :

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

La fonction arithmétique "Produit" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

L'opérateur "OU", qui correspond à l'union de deux ensembles A et B il peut être réalisé par la fonction "Max" :

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

La fonction arithmétique "somme" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x)$$

L'opérateur "Non" est réalisé par :

$$\mu_{A-}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

### III.4.5. Propriétés des ensembles flous

Soit une fonction  $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  telle que  $\forall x, y, z \in [0, 1]$  :

1. Commutativité :  $xTy = yTx$ .
2. Associativité :  $xT(yTz) = (xTy)Tz$ .
3. Distribution :  $xT(yTz) = (xTy)T(xTz)$ .
4. Idempotence :  $xTx = x$ .
5. Monotonie :  $xTz = yTz$  si  $x \leq y$ .

Admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre :  $0Tx = 0, 1Tx = x$ .

## III.5. Structure d'une commande par logique floue

La commande floue (linguistique) s'est révélée, durant ces dernières années, comme un domaine de recherche actif, elle est basée sur la logique floue. Comme en automatique classique, son but est de traiter des problèmes de commande de processus, c'est à dire de gérer un processus en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus, mais son approche est différente par les points suivants [37]:

- La connaissance mathématique du fonctionnement du processus n'est pas nécessaire,
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (non Linéaire) ou mal connus un contrôleur flou s'avère très intéressant,
- Le contrôleur flou reste clair pour tous les opérateurs et les utilisateurs de la machine,
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire),
- Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur qualifié « expert ».les connaissances de l'expert son schématisées à l'aide d'un ensemble de règles de conduite basées sur un vocabulaire symbolique,
- Le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques.

### III.5.1. Contrôleur flou

Un contrôleur flou n'est autre qu'un système flou destiné à appliquer une action de commander à un processus. La valeur de cette commande est déterminée à partir des valeurs des variables d'entrée par des relations floues, ou règles floues. En général, la structure d'un système de contrôle flou est composée de quatre principales distinctes, comme le montre la figure (III-4)

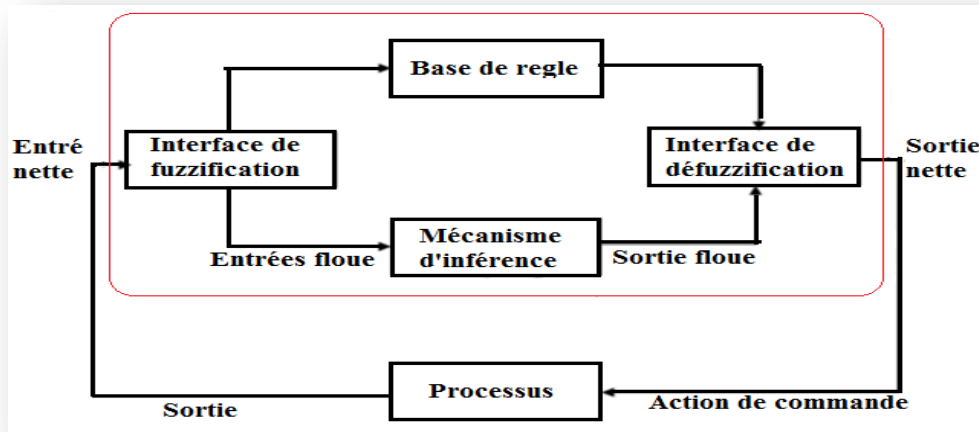


Figure III.4- Structure d'un système de contrôle flou.

#### III.5.1.1. Interface de fuzzification

C'est la première étape du traitement d'un problème par la logique floue, elle consiste donc à modéliser chacune des entrées du système par des courbes donnant les degrés d'appartenance à différents états identifiés. On utilise en général des fonctions d'appartenances de forme triangulaire et trapézoïdale, bien, qu'il en existe d'autre, ces deux formes, à caractère linéaire, facilitent l'étape de fuzzification et le temps de calcul.

#### III.5.1.2. Base de règle

Le système de contrôle flou comprend un nombre de règles liant les ensembles flous (basée sur la règle logique) ayant la forme « si- alors ».

L'établissement de ces règles est généralement basé sur la connaissance du problème et sur l'expérience de l'opérateur qui peut fixer le nombre de sous ensemble, leurs fonctions d'appartenance ainsi que les variables linguistiques, ils existent plusieurs présentation de la base de règles telle que la description linguistique, symbolique ou par une matrice d'inférence.

Ces règles sont de deux types[41] :

- Mamdani :

La méthode Mamdani consiste à utiliser l'opérateur Min pour le Et, et l'opérateur Max pour le Ou

- Sugeno :

La règle générale de type Sugeno est donné sous formes de composition d'opérateurs arithmétique.

L'établissement des règles de commande floue, est généralement basé sur un des points suivants:

- Expérience d'un expert et connaissance du problème de commande,
- Un modèle flou du processus pour lequel on souhaite synthétiser le régulateur,
- Les actions de l'opérateur, s'il n'arrive pas à exprimer linguistiquement les règles qu'il utilise, implicitement,
- L'apprentissage : c'est-à-dire que la synthèse de règle se fait par un procédé automatique également appelé superviseur.

### **III.5.1.3. Mécanisme d'inférence**

Dans cette, étape, il s'agit de déterminer comment le système interprète les variable linguistique floues. Les variables linguistiques [entrées et sorties] sont liées par les règles d'inférence.

Il existe deux règles d'inférence :

- Méthode d'inférence MAX – MIN
- Méthode d'inférence SOMME – PROD

### **III.5.1.4. Interface de 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. Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont :

- Méthode du maximum,
- Méthode de la moyenne des maximums,
- Méthode du centre de gravité,
- Méthode des hauteurs pondérées.

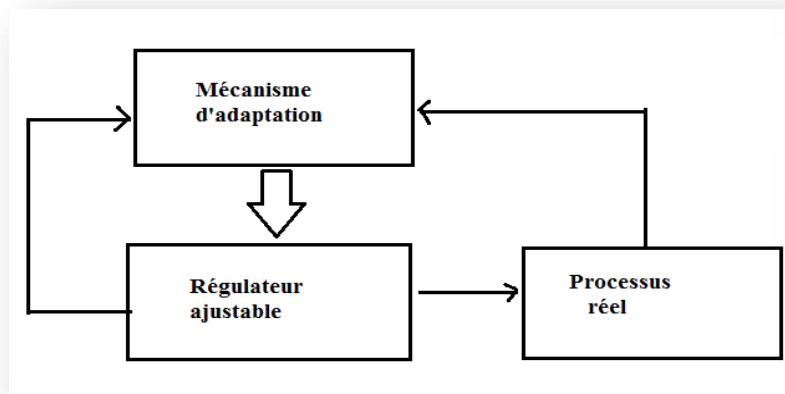
### III.6. Le contrôle adaptatif

La commande adaptative consiste à utiliser un ensemble de techniques pour l'ajustement automatique en ligne des boucles de commande afin de réaliser et de maintenir de meilleures performances dynamiques au système à commander.

Deux types de structures de commande sont utilisés d'une manière générale.

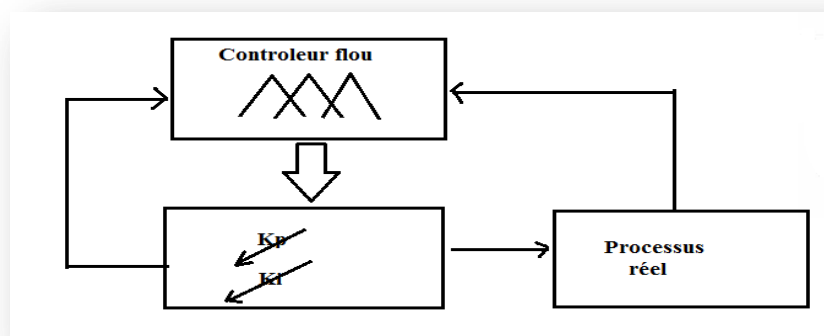
- Indirect où on estime les paramètres en ligne par un mécanisme d'adaptation. La loi de commande est calculée à partir des paramètres estimés.
- Direct où on peut également calculer les paramètres du régulateur à partir du mécanisme d'adaptation paramétrique.

Le schéma de la figure (III-5) montre une configuration de la première approche.



**Figure III.5-**Structure de base de la commande adaptative utilisée.

Le mécanisme d'adaptation dans notre cas est remplacé par un contrôleur flou qui sera présenté par la suite voir figure (III-6).



**Figure III.6-** Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé pour la commande de vitesse de la turbine.

## III.7. Description du contrôleur flou adaptatif

### III.7.1. Fuzzification

Les entrées du contrôleur FLC sont :

✓ E : l'erreur, elle est définie par :

$$E(k) = \omega * (k) - \omega(k) \quad (\text{III-4})$$

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

$$dE(k) = \frac{E(k) - E(k-1)}{T_e} \quad (\text{III-5})$$

$T_e$  : période d'échantillonnage.

Le régulateur admet pour chaque variable d'entrée les Sept ensembles flous :

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

Les sorties de ce contrôleur flou est les poids attribué aux paramètres du régulateur PI.

Pour la sortie on a les ensembles flous suivants :

- Grand noté G,
- Petit noté P.

Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales.

Les fonctions des entrées et de la sortie sont représentées par les figures suivantes :

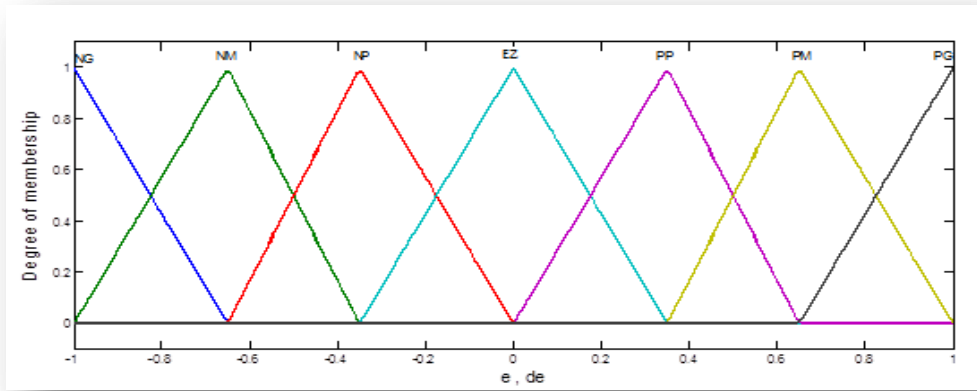


Figure III.7-Formes des fonctions d'appartenances des entrées du régulateur flou adaptatif.

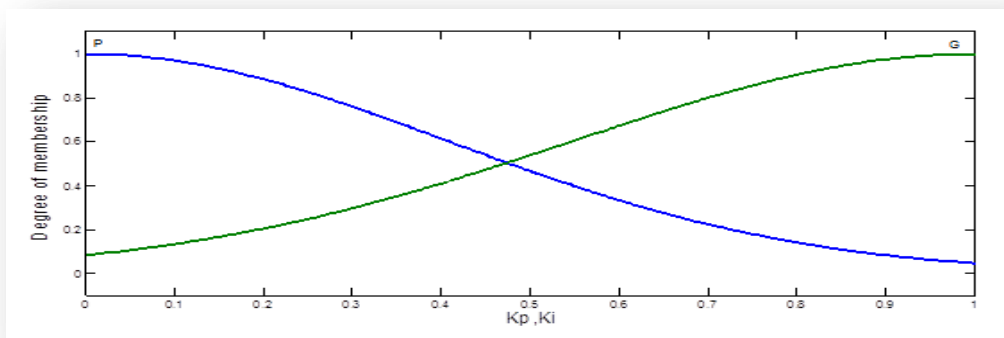


Figure III.8- Formes des fonctions d'appartenances de la sortie du régulateur flou adaptatif.

### III.7.2. Inférence

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Il s'agit souvent d'inférence avec plusieurs règles qui peuvent être activées en même temps. Ces règles doivent tenir compte du comportement du système à régler, ainsi que des buts du réglage envisagé.

Les matrices d'inférence prendront les formes suivantes :

U		dE						
		NG	NM	NP	ZR	PG	PM	PP
E	NG	G	G	G	G	G	G	G
	NM	P	G	G	G	G	G	P
	NP	P	P	G	G	G	P	P
	ZR	P	P	P	G	P	P	P
	PG	P	P	G	G	G	P	P
	PM	P	G	G	G	G	G	P
	PP	G	G	G	G	G	G	G

Tableau III.1- Matrice d'inférence des règles floues

### III.7.3. Défuzzification

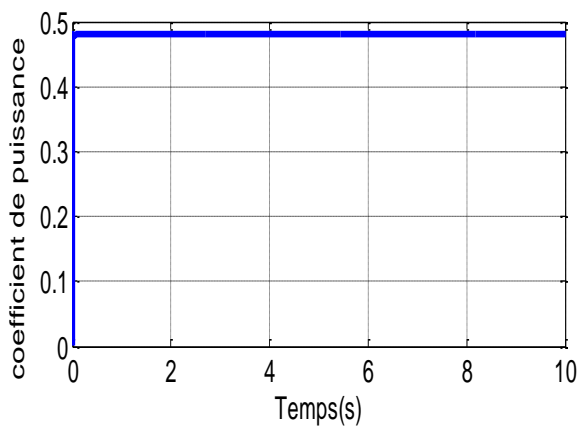
La méthode d'inférence utilisée est la méthode MAX-Min, on prendre comme critère de Défuzzification la méthode de centre de gravité.

### III.8. Résultats de simulation

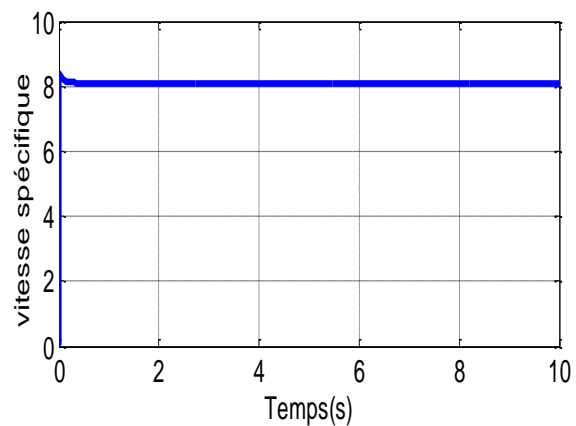
Les résultats obtenus par simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink sont les suivants :

- **La turbine**

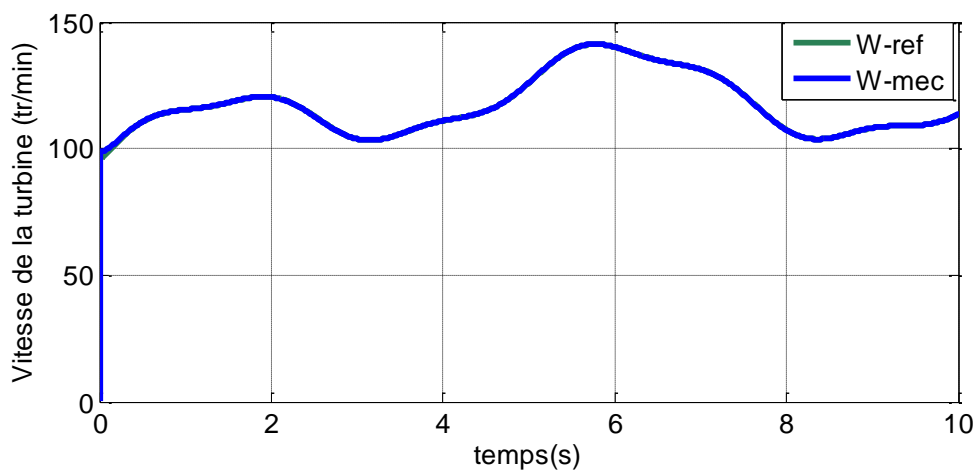
Les Figures III-9.a et III-9.b présente le coefficient aérodynamique  $C_p$  et la vitesse spécifique  $\lambda$ , ainsi la figure III-10.c présente la vitesse de rotation de la turbine.



[a]



[b]



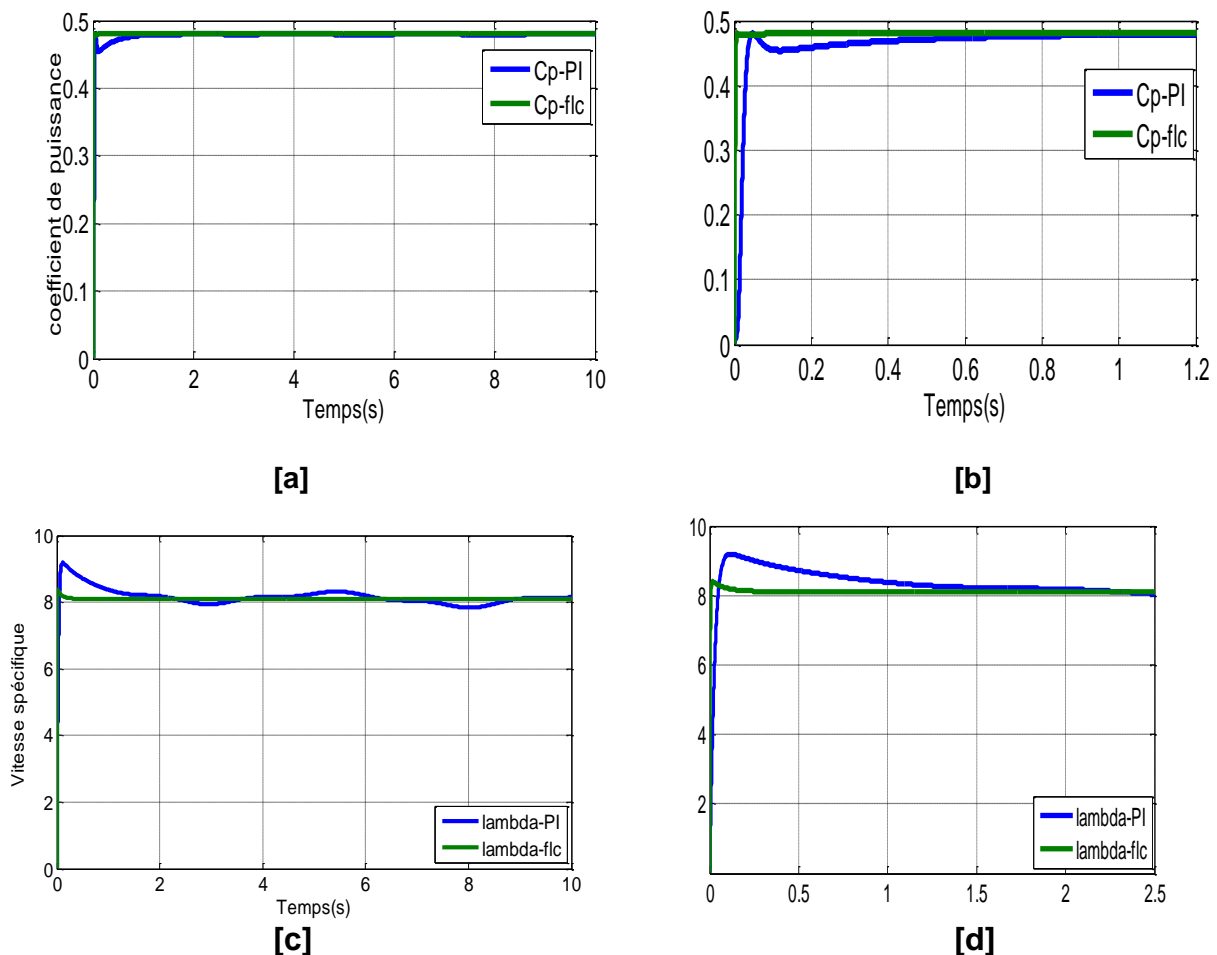
[c]

Figure III.9-[a]-Coefficient aérodynamique  $C_p$ , [b]- Vitesse spécifique, [c]- Vitesse mécanique de la turbine.



Les résultats obtenus sont très satisfaisant vu le coefficient de puissance qui est asservi à sa valeur optimale ( $C_p = 0.48$ ), ainsi la vitesse spécifique ( $\lambda = 8.1$ ), donc une transmission de puissance optimale vers la génératrice. La vitesse de référence et celle mesurée sont tellement confondues qu'il est impossible de les différencier, et aussi remarquer clairement dans le régime transitoire la rapidité du système avec le régulateur flou.

- **Comparaison entre le régulateur PI classique et le régulateur PI flou**



**Figure III.10- [a]-Coefficient de puissance  $C_p$ , [b]- Zoom de  $C_p$ , [c]-Vitesse spécifique  $\lambda$ , [d]- Zoom de  $\lambda$ .**

A partir des résultats de simulation obtenus, on peut noter de la première vue, que le régulateur flou a pratiquement des performances légèrement meilleures que celles du régulateur PI classique, surtout en régime dynamique, où on peut remarquer clairement sur les deux figures de la vitesse spécifique  $\lambda$  et du coefficient de puissance  $C_p$ , que le temps nécessaire pour se rétablir aux valeurs optimales ou maximales après une variation de vitesse est très faible par rapport à celui du réglage

PI classique, c'est pour ça les figures des  $C_p$  et  $\lambda$  par PI floue plus stable et plus voisine des valeurs optimales par rapport à l'autre . Cette correction rapide de la vitesse spécifique et du coefficient de puissance en premier lieu, a permis d'assurer la poursuite traduite par une superposition entre les courbes de la puissance mécanique extractible et celle capturée par l'éolienne.

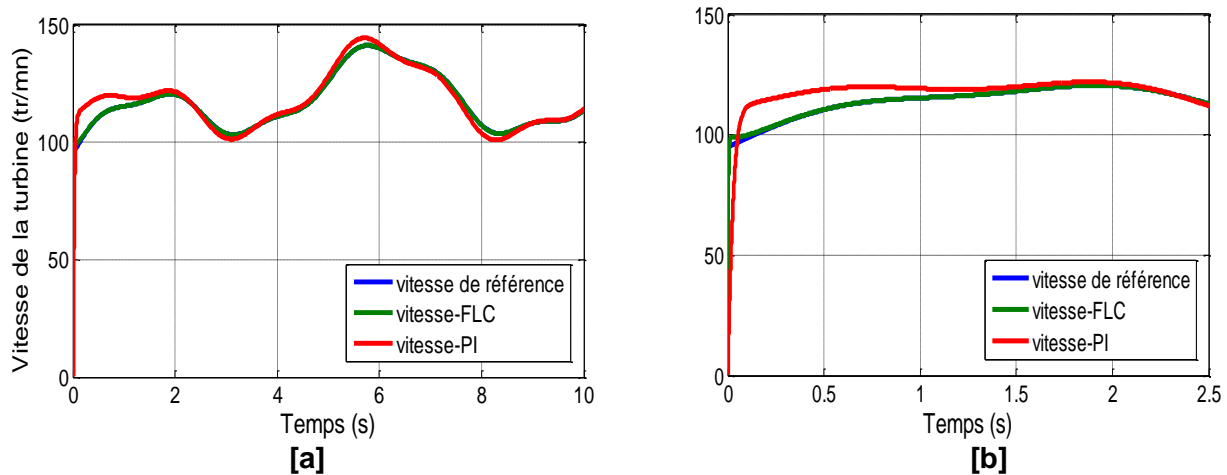


Figure III.11-[a]-Vitesse de rotation de la turbine W, [b]- Zoom de W.

La figure III-11 montre que le régulateur flou a pratiquement des performances légèrement meilleures (l'allure est plus stable et plus voisine à la référence) que celles du régulateur PI classique.

### III.9. Conclusion

Comme technique de commande avantageuse, la commande floue avec sa possibilité de contrôler des systèmes complexes sans nécessité de leur modélisation complète, était l'objet traité dans ce chapitre, le contrôleur flou adaptatif nous a permis de régler la vitesse du système éolien étudié à sa valeur optimale assurant la MPPT. Les résultats de simulation ont confirmé l'amélioration apportée sur le coefficient de puissance, la vitesse spécifique et la vitesse de rotation de la turbine.

# Conclusion Générale

---

## Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire était la commande et la gestion d'un système de conversion d'énergie éolienne dédié à la production d'électricité aux sites isolés, dans le but de comprendre le fonctionnement de la turbine éolienne et concevoir le principe de régulation mécanique de la vitesse de rotation.

Afin d'atteindre cet objectif, le premier chapitre nous a permis de faire un survol sur l'état de l'art des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique ainsi que les différents éléments qui les constituent. Nous avons cité les différents types d'éoliennes existants à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal ainsi que les différents générateurs utilisés.

Pour le fonctionnement hors réseau, il est important d'ajouter un groupe de stockage pour recharger les batteries afin de fournir de l'électricité sur demande. On doit noter qu'il existe de nombreuses techniques pour stocker l'électricité.

Pour la modélisation, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne

- La partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice.
- La deuxième partie concerne la machine à aimant permanent dans le repère de Park associé avec le système de stockage (Batterie). La transformation de Park nous a permis de simplifier le modèle.
- La stratégie de commande conçue d'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI.

L'analyse des résultats obtenus montre clairement un degré d'efficacité de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal en présence d'une variation de la vitesse du vent.

Enfin un contrôleur flou adaptatif est appliqué à la commande de turbine, afin d'améliorer le réglage la vitesse du système éolien étudié à sa valeur optimale assurant la maximisation de la puissance extraite. Les résultats de simulation ont montré l'amélioration du comportement dynamique de la vitesse de la turbine.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer:

- ✓ Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT;
- ✓ Association d'une source DIESEL au système éolien ;

- ✓ Combinaison hybride basée sur la chaîne de conversion éolienne et la chaîne de conversion solaire ;
- ✓ Application dans le domaine de pompage.

## Références Bibliographiques

- [1] F. Faure, « Suspension magnétique pour volant d'inertie », Thèse de doctorat ,Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2003.
- [2] G. J. Leng, « Overview of the worldwide photovoltaic industry », Energy Diversification Research Laboratory Canada, Ottawa, Ontario (Canada); Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Ontario (Canada), 1996.
- [3] L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », thèse de Doctorat de l'université Honri Poincaré, Nancy-1, Janvier 1999.
- [4] S. Chekroun, « COMMANDE EURO-FLOUE SANS CAPTEUR DE VITESSE D UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE », Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2008.
- [5] S. M. El Moustapha, M. L. Ndiaye, P. A. Ndiaye, A. K. O. Mahmoud, et I. Youm, « Influence des paramètres météorologiques sur la production d'un aérogénérateur: Application sur le littoral Sahélien », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 17, n° 1, p. 43–54, 2014.
- [6] E. B. Mouni, « Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones: nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées », *These de Doctorat, université de Poitiers, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers*, 2008.
- [7] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », 05-avr-2005. [En ligne]. Disponible sur: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000079/>. [Consulté le: 12-janv-2015].
- [8] S. Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », *mémoire de magister, ENP, el Harrach*, 2009.
- [9] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [10] N. Laverdure, *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires*. Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [11] T. Ackermann et others, *Wind power in power systems*, vol. 140. Wiley Online Library, 2005.
- [12] I. Cruz, F. Arias, F. Avia, L. M. Arribas, et R. P. Fiffe, « Assessment of different energy storage systems for wind energy integration », in *European Wind Energy Conference*, 2001.
- [13] J. Labbé, « L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [14] F. Stefanescu et A.-I. Dolan, « Conceptual design of 21 kJ superconducting magnetic energy storage device », *Annals of the University of Craiova, Series: Electrical Engineering*, n° 34, p. 109–112, 2010.

- [15] H. B. Ahmed, B. Multon, N. Bernard, et C. Kerzreho, « Le stockage inertiel électromécanique », *revue 3EI*, p. pp-18, 2007.
- [16] B. Multon et J.-M. Peter, « Le stockage de l'énergie électrique. Moyens et applications », *revue 3EI*, p. pp-59, 1996.
- [17] H. Ibrahim, A. Ilinca, et J. Perron, « Solutions de stockage de l'énergie éolienne », *Laboratoire de Recherche en Energie éolienne, LREE- 01 – Janvier 2006, Université du Québec à Rimouski*.
- [18] M. Lopez, « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-sud11., 2008.
- [19] T. Duc-Hoan, « Conception simultanée par optimisation d'une chaîne éolienne «passive»: Analyse de robustesse, validation expérimentale », *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, FRANCE*, n° 2010.
- [20] F. Poitiers, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'université de NANTES, FRANCE, 2003.
- [21] S. El Aïmani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies, Lille, FRANCE, 2005.
- [22] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [23] F. Iov, A. D. Hansen, P. Sørensen, et F. Blaabjerg, « Wind Turbine Block-set in Matlab/Simulink-General Overview and Description of the Models. AalborgUniversity », ISBN 87-89179-46-3, 2004.
- [24] B. Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Thèse de Doctorat, université paris XI, FRANCE, 2006.
- [25] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, et J. Deuse, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », *J3eA*, vol. 5, 2006.
- [26] F. S. dos Reis, J. A. V. Ale, F. D. Adegas, R. Tonkoski, S. Slan, et K. Tan, « Active shunt filter for harmonic mitigation in wind turbines generators », in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE*, 2006, p. 1-6.
- [27] M. Yin, G. Li, M. Zhou, et C. Zhao, « Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration », in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 2007, p. 1-6.
- [28] C.-Y. Wan, S.-C. Kim, et B. K. Bose, « Robust position control of induction motor using fuzzy logic control », in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE*, 1992, p. 472-481.

- [29] R. Bourgeois et D. Cogniel, *Mémotech électrotechnique*. Educavivre/Casteilla, 1996.
- [30] J. Sun et H. Grotstollen, « Averaged modelling of switching power converters: reformulation and theoretical basis », in *Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC'92 Record., 23rd Annual IEEE*, 1992, p. 1165–1172.
- [31] R. Melício, V. M. F. Mendes, et J. P. S. Catalão, « Computer simulation of wind power systems: power electronics and transient stability analysis », in *Kyoto, Japan: International Conference on Power System Transient (IPST2009)*, 2009.
- [32] M. Malinowski, « Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers », *Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa*, 2001.
- [33] H. Camblong, M. Santos, et M. Rodriguez, « Logiciel de Simulation d'Eoliennes à Vitesse Variable, rapport de SIMEOLE », *Fonds Communs de Coopération Aquitaine-Euskadi*, 2002.
- [34] J. D. Irwin, M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, et F. Blaabjerg, *Control in power electronics: selected problems*. Academic press, 2002.
- [35] H. Song et K. Nam, « Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions », *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 46, n° 5, p. 953–959, 1999.
- [36] F. Chevré et F. Guély, « La logique floue », *Cahier Technique Schneider*, n° 191, 1998.
- [37] Y. Elbia, « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté », *Mémoire de magister*, 2009.
- [38] A. El Ougli, « Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs », *DOCTORAT NATIONAL, Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, MAROC*, 2009.
- [39] W. Wu, « SYNTHÈSE D'UN CONTRÔLEUR FLOU PAR ALGORITHME GÉNÉTIQUE: APPLICATION AU REGLAGE DYNAMIQUE DES PARAMÈTRES DES SYSTÈMES », Docteur, Université de Sciences et Technologies de Lille, 1998.
- [40] F. Boumaraf, « Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation », *Mémoire De Magistère En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie*, 2009.
- [41] M. Fodil, « Commande adaptative par logique floue de la machine asynchrone », Magister En Electrotechnique, EL-HADJ LAKHDAR, BATNA, 2009.



# Annexe

---

## Paramètres de la simulation

### Génératrice + Turbine

Symbole	Désignation	Valeur
$P$	Puissance de la machine	9.4 kW
$R_s$	Résistance statorique	2.8750 $\Omega$
$L_s$	Inductance statorique	8.5e-3 H
$\Phi_f$	Flux magnétique	0.175 Wb
$J$	Moment d'inertie	0.0008 kg·m <sup>2</sup>
$f$	Coefficient de frottement	0.001Nm/rad/s
$n_p$	Nombre de paires de pole	4
$R$	Diamètre des pales	3 m
$\rho$	Densité de l'air	1.225 kg/m <sup>3</sup>
$C_{p_{max}}$	Coefficient de puissance (valeur optimale)	0.48
$\lambda_{opt}$	Vitesse Spécifique (valeur optimale)	8.1

### Batterie (Acide-Plomb)

Désignation	Valeur
Tension nominale	200 V
Tension (pleine charge)	235.5 V
Courant nominal	1.3 A
Capacité	6.5 Ah
Capacité (à la tension nominale)	6.25 Ah
Capacité maximale	7 Ah
Résistance interne	0.307 $\Omega$

# Notation

---

**1. Abréviation****Désignation**

SEH	Systèmes d'Énergie Hybrides
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel intégrale
IG	Générateur Asynchrone
SCIG	Générateur Asynchrone à cage d'écureuil
DFIG	Générateur Asynchrone doublement alimenté
SG	Générateur Synchrone
GSAP	Générateur synchrone à aimants permanents
WRSG	Générateur Synchrone à Rotor Bobiné
SMES	stockage de l'énergie dans les inductances supraconductrices
FMM	Force magnétomotrice

**2. Symboles**

$H_2$	Hydrogène
$O_2$	Oxygène
$C_g$	Couple transmis par la génératrice [Nm]
$C_{aer}$	Couple aérodynamique [Nm]
$C_p$	Rendement aérodynamique de la turbine éolienne
$C_{vis}$	Couple résistant dû au frottement
$I_s$	Courant statorique [A]
$\Omega_{tur}$	La vitesse de la turbine (tr/mn)
$\Omega_{mec}$	La vitesse mécanique (tr/mn)
$J_G$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice [kg.m <sup>2</sup> ]

---

$J_h$	Moment d'inertie de l'arbre d'entraînement [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_{pale}$	Moment d'inertie des pales
$J$	Moment d'inertie total [Kg.m <sup>2</sup> ]
$K_b$	Elasticité des pales
$\lambda$	Longueur d'onde [ $\mu$ m]
$K_h$	Elasticité de l'arbre d'entraînement
$K_p$	Gain de l'action proportionnelle
$K_i$	Gain de l'action intégrale
G	gain du multiplicateur
$\beta$	Angle de calage [Degré]
$L_d$	Inductance cyclique directe [H]
$L_q$	Inductance cyclique quadratique [H]
$C_{pmax}$	Coefficient de puissance maximale de la turbine éolienne
$\rho$	Masse volumique de l'air [g.m <sup>3</sup> ]
$I_{a,b,c}$	Courants statoriques [A]
$I_{bat}$	Courant de la batterie [A]
$C_{em}$	Couple électromagnétique [Nm]
$C_m$	Couple mécanique [Nm]
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique
$R$	Longueur de la pale [m]
$R_s$	Résistance des enroulements statoriques [ohm]
$\varphi_{a,b,c}$	Flux statoriques [Wb]

---

$\varphi_{d,q}$	Flux d'axes direct (d) et en quadratique (q) [Wb]
P	Le nombre de paires de pôles
$T_e$	Constante de temps électrique [s]
$G_0$	Le gain statique
$C_{bat}$	Capacité de stockage [Ah]
$R_{bat}$	Résistance interne de la batterie [ $\Omega$ ]
$V_{dc}$	Tension du bus continu [V]
$V_{bat}$	Tension de la batterie [V]
$Q_{batt}$	Quantité de charge manquante
$C_b$	Capacité nominale de la batterie [Ah]
C	la valeur de la capacité [F]
$d_b$	Rapport cyclique
$K_t$	Le coefficient de couple
$\Phi_f$	Le flux inducteur

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقديم عنصر تحكم ذكي لنظام مستقل لتوليد الكهرباء من مصدر متجدد لتزويد المناطق النائية. أصبحت طاقة الرياح واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة في جميع أنحاء العالم، ليس فقط في مزارع الرياح على نطاق واسع. هذه الأنظمة هي مفيدة بشكل رئيسي في تطبيقات على نطاق صغير. نظام تخزين الطاقة من البطارية يدخل عادة في نظام تحويل طاقة الرياح لضمان سلامة الطاقة على فترات متقطعة. هذا العمل يقترح وحدة تحكم غامض تكيفي للتغلب على الخصائص غير الخطية من نظام تحويل الطاقة بالرياح.

تبين نتائج المحاكاة المأخوذة من MATLAB أن وحدة التحكم الغامض التكيفي لديها أداء أفضل مقارنة مع وحدة تحكم PI

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، التخزين، نظام الطاقة الهجين، التحكم الغامض، تتبع نقطة الاستطاعة العظمى المولدة المتزامنة ذات النظام الدائم

## Résumé

L'objectif de ce travail est de présenter un contrôle intelligent d'un système autonome de production d'électricité à partir d'une source renouvelable pour alimenter les régions éloignées. L'énergie éolienne est devenue l'une des principales sources d'énergie renouvelables dans le monde entier. Ces systèmes sont principalement avantageux dans les applications à petite échelle. Un système de stockage d'énergie de la batterie est généralement intégré à un système de conversion de vent pour lisser sa puissance intermittente.

Un régulateur flou adaptatif est proposé pour surmonter les caractéristiques non linéaires du système de conversion de l'énergie éolienne. Les résultats de simulation développés sous MATLAB SIMULINK montrent que le régulateur flou adaptatif présente de meilleures performances par rapport au régulateur PI avec des paramètres prédéterminés.

Mots clés : **Energie éolienne, système d'énergie hybride, stockage, commande floue, MPPT.**

## Abstract

The objective of this work is to present an intelligent control of a standalone wind renewable energy conversion system to supply remote areas. These systems are primarily of benefit in small-scale applications. A battery energy storage system (BESS) is usually integrated with a wind Conversion system to smooth out its intermittent power.

An adaptive fuzzy speed controller is proposed to overcome the nonlinear characteristics of Wind Energy Conversion System (WECS). Simulation results developed with MATLAB SIMULINK show that (adaptive FLC-PI) presents better performances compared to the PI controller with predetermined parameters.

Keywords: **Wind turbines, Hybrid Energy System, Storage, Fuzzy Control, MPPT.**