

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département : Génie Electrique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :  
**DEMDOUM Abdeslam**  
**SADAoui Abdelkrim**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Electromécanique  
Option : Electromécanique

**Thème : Commande intelligente d'une chaine de conversion éolienne  
augmentée par des réseaux de neurones**

Devant le jury composé de :

Mr : MOHAMDI	MCB	UAMOB	Président
Mme : BENSMAIL	MCB	UAMOB	Encadreur
Mr : KHERCHI	MAB	UAMOB	Examineur
Mr : MAAFA	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2018/2019

# REMERCIEMENTS

*Nos remerciements vont premièrement à Dieu "Allah" tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années.*

*Nous remercions sincèrement toute personne qui nous a aidée de près ou de loin pour évaluer ce travail et plus particulièrement notre promotrice Mme BENSMAL Samia docteur à l'université Bouira et sous la co-direction du Mr Hamou AIT ABASS, docteur à l'université de Bouira, pour la confiance qu'ils nous ont accordée et pour l'intérêt qu'ils ont constamment porté à notre travail.*

*Nous exprimons nos reconnaissances à tous les enseignants de département de génie électrique.*

*Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leurs encouragements et leurs soutiens inconditionnels et toutes personnes ayant contribué pour la réalisation de ce projet.*

# **DEDICACES**

*Nous dédions ce modeste travail :*

*À nos parents qui nous ont donné le sens de la vie.*

*À nos frères et sœurs.*

*À toutes les familles Demdoum, Sadaoui, et tous les camarades.*

*À titre de reconnaissance, d'amour et d'affection.*

# Tables des matières

Introduction générale.....1

**Chapitre I : Etat de l’art sur les énergies éoliennes**

I.1 Introduction.....3  
I.2 Historique .....3  
I.3 Définition d’une éolienne .....4  
I.4 Principaux organes du système de conversion éolienne.....4  
I.5 Architecture d’une éolienne à axe horizontal .....5  
    1.5.1 Le rotor .....6  
    1.5.2 La tour (le mat) .....6  
    1.5.3 La nacelle .....6  
I.6 Avantages et inconvénients .....7  
    I.6.1. Avantages.....7  
    I.6.2 Inconvénients.....8  
I.7 Les différents types des éoliennes .....8  
    I.7.1 Selon la puissance .....8  
    I.7.2 Selon la disposition géométrique.....9  
        I .7.2.1. Eolienne à axe vertical .....9  
        I .7.2.2. Eolienne à axe horizontale.....10  
    I .7.3. Selon la vitesse des turbines.....10  
        I .7.3.1. Eolienne à vitesse fixe.....10  
        I .7.3.2. Eolienne à vitesse variable.....10  
        I .7.3.3. Comparaison entre les deux types .....11  
I.8 La génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).....11  
    I.8.1 Avantages de la machine synchrone à aimants permanents.....12  
I.9 Domaine d’application d’une éolienne .....13  
I.10 Conclusion.....13

**Chapitre II : Modélisation et simulation de chaîne de conversion éolienne**

II.1 Introduction .....14  
II.2 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne .....14  
    II.2.1 Le vent .....14

## Table des matières

---

II.2.2 La conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique .....	15
II.2.2.1 Loi de Betz.....	16
II.2.2.2 Coefficient de puissance .....	17
II.3 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne .....	17
II.3.1 La turbine .....	18
II.3.2 Le multiplicateur de vitesse .....	18
II.3.3 L'arbre de transmission.....	19
II.4 Point maximum de puissance .....	20
II.5 Le schéma de simulation .....	21
II.6 Les résultats de simulation et interprétation.....	21
II.7 Modélisation de laGSAP .....	23
II.7.1 La représentation de la GSAP dans le repère abc.....	23
II.7.2 Hypothèse simplificatrices .....	24
II.7.3 Mise en équation .....	24
II.7.4 La représentation dans le repère Park (dq).....	25
II.8 Conclusion.....	26

## **Chapitre III : la commande vectorielle d'une GSAP**

III.1 Introduction .....	27
III.2 Principe de la commande vectorielle .....	27
III.3 Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle.....	27
III.3.1 Avantages.....	27
III.3.1 Inconvénients.....	27
III.4 Description de système global .....	28
III.5 Modèle de la machine .....	28
III.6 Le découplage par compensation.....	29
III. La régulation .....	30
III.7.1 Régulation de courant $i_d$ .....	31
III.7.2 Régulation de courant $i_q$ .....	32
III.7.3 Régulation de la vitesse $w$ .....	33
III.8 Modélisation de redresseur MLI .....	33
III.9 Modulation de largeur d'impulsions (MLI) .....	35

III.10 Les résultats de simulation .....36  
III.10 Conclusion.....40

**Chapitre IV: commande intelligente de la GSAP**

IV.1 Introduction.....41  
IV.2 Définition .....41  
IV.3 Structure de RNA.....41  
IV.3 Principe de fonctionnement du réseau de Neurone.....42  
IV.4 Fonctions d'activation.....44  
IV.5 Type de réseau de Neurones.....45  
    IV.5.1 Perceptrons multicouches (MLP).....45  
    IV.5.2 Réseaux de neurones à fonction de base radiale (RBF).....46  
IV.6 Caractéristiques de réseau de Neurone.....46  
IV.7 Domaine d'application des RNA.....47  
IV.8 L'apprentissage.....47  
IV.9 L'application de les RNA pour commander une GSAP.....47  
    IV.9.1 Modèle de la machine.....48  
    IV.9.2 Programmation du bloc de RNA.....48  
        IV.9.2.1 Système de vitesse.....48  
        IV.9.2.2 Système de flux.....50  
IV.10 Les résultats de simulation.....51  
    ➤ Interprétation des résultats.....53  
IV.11 Conclusion.....53  
Conclusion général.....54

# Liste des figures et tableaux

# Liste des Figures et tableaux

---

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark .....	4
<b>Figure I.2</b>	Conversion de l'énergie éolienne .....	4
<b>Figure I.3</b>	Principaux organes du système de conversion éolienne.....	5
<b>Figure I.4</b>	Principaux composante d'une éolienne .....	5
<b>Figure I.5</b>	Les éléments de nacelle .....	6
<b>Figure I.6</b>	Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable -machine synchrone à aimants permanents MSAP .....	12

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	Schéma bloc de reconstruction du vent.....	15
<b>Figure II.2</b>	Séquence de vent.....	15
<b>Figure II.3</b>	Tube de courant autour d'une éolienne.....	16
<b>Figure II.4</b>	Schéma de multiplicateur de vitesse .....	18
<b>Figure II.5</b>	Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse .....	19
<b>Figure II.6</b>	Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.....	21
<b>Figure II.7</b>	Vitesse de rotation $w$ (rad/sec) .....	21
<b>Figure II.8</b>	Coefficient de puissance $C_p$ .....	22
<b>Figure II.9</b>	La puissance de la turbine (watt).....	22
<b>Figure II.10</b>	Le couple de la turbine (N.m).....	22
<b>Figure II.11</b>	La représentation de la GSAP dans le repère abc.....	23
<b>Figure II.11</b>	Transformation du Park.....	25

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b>	Principe de découplage par compensation.....	29
<b>Figure III.2</b>	Schéma bloc de l'asservissement en utilisant PI. ....	31
<b>Figure III.3</b>	Boucle de régulation de courant $i_d$ .....	31
<b>Figure III.4</b>	Boucle de régulation de courant $i_q$ .....	32
<b>Figure III.5</b>	Boucle de régulation de vitesse.....	33
<b>Figure III.6</b>	Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	33
<b>Figure III.7</b>	Schéma bloc de la commande MLI sur MATLAB .....	35
<b>Figure III.8</b>	Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP.....	36
<b>Figure III.9</b>	L'allure de courant $i_d$ (A) .....	36

## Liste des Figures et tableaux

---

<b>Figure III.10</b> L'allure de courant $i_q$ (A) .....	37
<b>Figure III.11</b> L'allure de couple (N.m) .....	37
<b>Figure III.12</b> L'allure de vitesse (rad/sec) .....	37
<b>Figure III.13</b> L'allure de puissance (watt).....	38
<b>Figure III.14</b> L'allure de courant $i_d$ (A). .....	38
<b>Figure III.15</b> L'allure de courant $i_q$ (A) .....	39
<b>Figure III.16</b> L'allure de couple (N.m).....	39
<b>Figure III.17</b> L'allure de vitesse (rad/sec) .....	39
<b>Figure III.18</b> L'allure de puissance (watt).....	40

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b> Schéma fonctionnel du système nerveux.....	41
<b>Figure IV.2</b> Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.....	42
<b>Figure IV.3</b> Représentation d'un neurone.....	42
<b>Figure IV.4</b> Principe de fonctionnement de RNA.....	43
<b>Figure IV.5</b> Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel.....	44
<b>Figure IV.6</b> Réseau de neurones de type perceptron à une couche cachée.....	45
<b>Figure IV.7</b> Réseau de neurones de type RBF.....	46
<b>Figure IV.8</b> L'allure de courant $i_q$ (A).....	51
<b>Figure IV.9</b> L'allure de courant $i_d$ (A). .....	51
<b>Figure IV.10</b> L'allure de $\Delta d$ approximée.. .....	51
<b>Figure IV.11</b> L'allure de $\Delta q$ approximée.. .....	51
<b>Figure IV.12</b> L'allure de vitesse (rad/sec).....	52
<b>Figure IV.13</b> L'allure de l'erreur de vitesse avec et sans RNA.. .....	52
<b>Figure IV.14</b> L'allure de couple (N.m).....	52
<b>Figure IV.15</b> L'allure de puissance (watt).....	52

## Liste des tableaux

<b>Tab I.1</b> Tableau de classification des éoliennes selon leur puissance.....	8
<b>Tab I.2</b> Comparaison simple entre les différents modes de fonctionnement de l'éolienne.....	11

# Glossaire

MACE : Machines Asynchrones a cage d'écureuil.

GSAP : Générateur synchrone à aimant permanent. MADA : Machines Asynchrones a double alimentation.

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.

MAS : Machine asynchrone.

IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée.

MLI : La technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion.

$V(t)$  : La vitesse de vent (m/s).

$V_0(t)$  : La vitesse moyenne du vent (m/s).

$V_T(t)$  : La vitesse du vent turbulence (m/s).

$G(s)$  : Fonction de transfert de filtre passe bas.

$t$  : Constante de temps (s).

$\gamma$  : Facteur d'affaiblissement sur le rotor.

$\rho$  : Masse volumique de l'air (Kg/m<sup>3</sup>).

$S$  : La surface du l'arbre de turbine en (m<sup>2</sup>).

$E_c$  : L'énergie cinétique du vent (Joule).

$V$  : vitesse instantanée du vent (m/s).

$P_v$  : La puissance de vent disponible (watt).

$m_0$  : La masse d'air en mouvement (kg).

$P_t$  : La puissance récupérable par la turbine (watt).

$C_p$  : Coefficient de puissance.

$C_{pmax}$  : Coefficient de puissance maximal.

$R$  : Rayon de la surface balayée en (m).

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation avant multiplicateur en (rad/s).

$\beta$  : l'angle de calage entre le plan de rotation et la corde du profil en (°).

$\lambda$  : la vitesse spécifique (relative).

$\lambda_{opt}$  : la vitesse relative optimale.

$C_T$  : Couple de la turbine éolienne (N.m).

$C_{Topt}$  : Couple optimal de la turbine éolienne (N.m).

$\Omega_g$  : Vitesse de rotation après multiplicateur en (rad/s).

$C_g$  : Couple après multiplicateur (N.m).

$G$  : Gain de multiplication.

$C_{mec}$  : couple mécanique total (N.m).

- J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.
- Cg : Le couple après le multiplicateur en (N.m).
- Cem: Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).
- Cf : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).
- f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.
- Ld: L'inductance dans l'axe direct (H).
- Lq: L'inductance dans l'axe quadrature (H).
- Rs : La résistance statorique ( $\Omega$ ).
- id: Le courant dans l'axe direct en (A).
- iq : Le courant dans l'axe quadrature en (A).
- $\omega$  : la vitesse angulaire (rad/sec).
- Vd : La tension dans l'axe direct en (volt).
- Vq: La tension dans l'axe quadrature en (volt).
- P: Nombre de paire de pole de la génératrice.
- $\Phi$  : Le flux de l'aimant permanent.
- P : Régulateur proportionnel.
- D : Régulateur dérivé.
- I : Régulateur intégral.
- PI : Régulateur proportionnel- intégral.
- PID: Régulateur proportionnel- intégral-dérivé.
- Ki : Gain proportionnel.
- Kp: Gain integral.
- e(t) : Signale de l'écart.
- $\tau_e$  : La constante de temps électrique relative.
- tr: Le temps de réponse.
- $\omega_0$ : La pulsation naturelle.
- Sa,b,c : Signal de commande des phases a, b, c.
- Va,b,c : Les tensions de phase de la machine .
- ia,b,c : Les courants de phase de la machine .
- Ea,b,c : Représentent les f.e.m induites dans les enroulements de phase du stator.
- f.e.m : La force électromotrice.
- Id\_ref : le courant de référence.
- FTBO : fonction de transfert en boucle ouverte.

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermée.

RNA : Réseau de Neurone artificielle.

$W_i$  : Les poids.

RBF : Réseaux de neurones à fonction de base radiale.

$\Delta_d, \Delta_q$  : La cible.

$M^T$  : Les poids.

$\sigma$  : La fonction d'activation.

$N_0$  : Les biais.

$\mu_d, \mu_q$  : Le vecteur d'entrée.

# ***Introduction générale***

# Introduction générale

---

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter, la grande partie de cette énergie consommable provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon,.....etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est de faire atténuer cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie classiques à des critères très sévères.

Si l'on admet qu'il n'existe aucune chance de survie sans énergie, la sagesse commande de rechercher et de développer d'autres sources et notamment les énergies renouvelables. Bien que, le développement et l'exploitation de nouvelles énergies ne se posent pas en termes de concurrence, mais bien de complémentarité avec les énergies usuelles. On peut considérer que le développement de ces énergies renouvelables est par conséquent, une composante fondamentale de l'aménagement du territoire [3].

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante [9].

De petites turbines de quelques dizaines de Watt en sites isolés aux grandes turbines de plusieurs MW en sites offshore raccordées au réseau électrique, la filière éolienne n'a pas encore dit son dernier mot et les performances des aérogénérateurs sont en permanente évolution profitant des dernières avancées technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance, des machines électriques et des matériaux de construction. Dans ce contexte, notre travail s'intéresse aux aérogénérateurs basés sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Les Machines Synchrones à Aimants Permanents MSAP sont de plus en plus utilisées dans l'industrie parce qu'ils offrent beaucoup d'avantages par rapport aux autres types de machines à courant continu ou alternatif avec un couple massique élevé, un excellent rendement, une maintenance réduite, un faible moment d'inertie et une grande capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse [10].

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de vitesse ayant des hautes performances dynamiques, une bonne précision en régime permanent, une haute capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse et une robustesse aux différentes perturbations. Ces

## Introduction générale

---

dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre au variateur d'atteindre ces performances [29].

La commande vectorielle permet d'avoir une dynamique proche de celle de la machine à courant continu, autrement dit, une dynamique asymptotiquement linéaire et découplée.

Cependant, cette structure de commande en utilisant des régulateurs classiques de type *PI* nécessite que les paramètres de la machine soient précis (les variations paramétriques internes et externes du système dues à la température, l'humidité, et aux surcharge occasionnelles, engendrent la perte de la stabilité des régulateurs classiques considérés ). Ceci exige une bonne identification des paramètres. En conséquence, le recours à des régulateurs de commande robuste, pour maintenir un niveau de découplage et de performance acceptable, est nécessaire [30].

On propose alors la synthèse d'une loi de commande utilisant une technique récursive et adaptative par réseau de Neurone (RNA).

Pour bien mener ce travail, le mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à des généralités sur les systèmes éoliens notamment sa description tout en donnant ses parties constitutives, son principe de fonctionnement, ses différents types et quelques avantages et inconvénients.

Le second chapitre est consacré à l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion éolien (turbine, génératrice synchrone à aimant permanent, convertisseurs MLI).

Le troisième chapitre présente l'application et l'étude de la commande vectorielle utilisée dans notre système éolien basé sur la GSAP (machine synchrone à aimant permanent). C'est une méthode qui se ramène à une structure de commande linéaire, permettant un découplage entre les variables de commande, reste la plus utilisée vue les performances dynamiques élevées qu'elle offre pour une large gamme d'applications. La simulation des résultats sont obtenus en utilisant le logiciel Matlab/Simulink à profil du vent variable et fixe.

Dans le quatrième, on va élaborer une commande par réseau de Neurone (RNA) à notre système pour améliorer la robustesse de la commande vectorielle faite dans le chapitre précédent.

Et on finalisera notre travail par une conclusion générale et perspective.

**Chapitre I :**

**Etat de l'art sur les énergies éoliennes**

# Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

---

## I.1 Introduction

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie.

Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables".

L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme. Portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 22 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 16 GW et l'Espagne avec 15 GW [1].

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les énergies éoliennes, à savoir sa définition, son historique, ses différents organes, ses avantages et inconvénients, ses différents types, et une brève présentation des machines électriques utilisées dans les systèmes de conversion éolienne.

## I.2 Historique

L'énergie éolienne est utilisée depuis des milliers d'années, elle est la première forme d'énergie utilisées par l'homme à savoir l'utilisation de l'énergie éolienne dans les moulins à vent et dans la propulsion des navires, elle est employée dans la voile pour la navigation des bateaux qui remontrait à 5000 ans en Egypte et pris de 4000 ans en Chine.

La première utilisation connue de l'énergie éolienne à 2000 ans J-C. les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance de vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

Les premiers pas vers la première éolienne est revient au physicien et mathématicien Lord KELVIN qui eut la première brillante idée de coupler une génératrice électrique à un moulin à vent. Ce 1<sup>er</sup> pas vers la 1<sup>ère</sup> aérogénérateur moderne remonte en 1802. Mais la première application concluants durent attendre un demi-siècle de plus lorsque Zénobe Gramme inventa la dynamo, c'est en 1888 que la 1<sup>ère</sup> éolienne relie à un système de stockage du courant vit le jour.

# Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

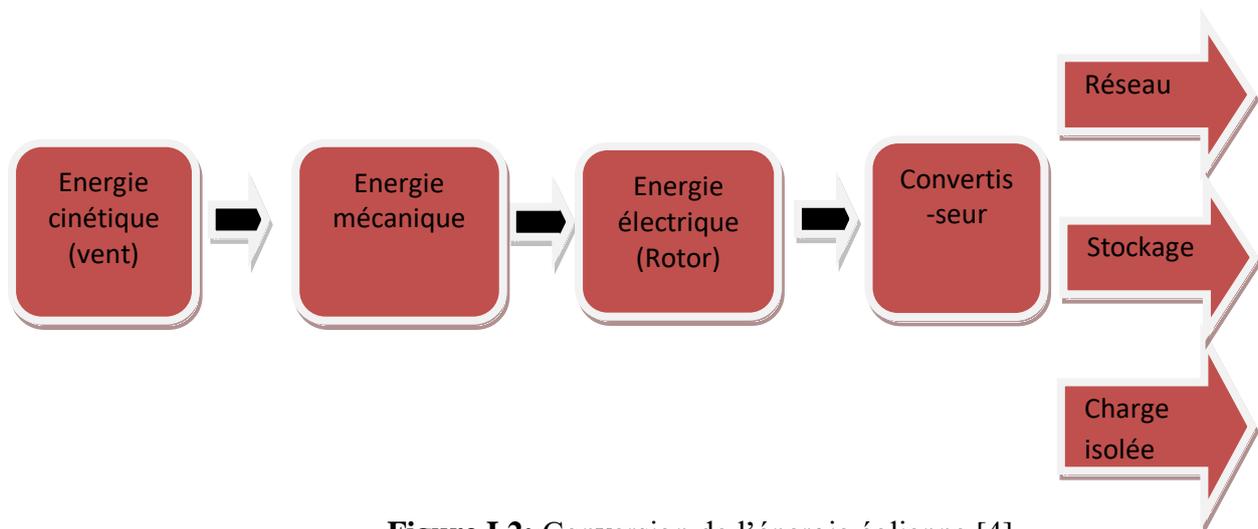
La première éolienne industrielle génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkersn dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908 [2].



**Figure I.1** Première aérogénératrice de *Poul La Cour* en 1891 à Askov, Danemark [3].

## I.3 Définition d'une éolienne

Un aérogénérateur, ou éolienne, est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I.2).



**Figure I.2:** Conversion de l'énergie éolienne [4]

## I.4. Principaux organes du système de conversion éolienne

Le système de conversion éolienne est constitué d'un générateur électrique entériné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, un système de commande, un convertisseur statique, un transformateur, et un réseau électrique (figure I.3)

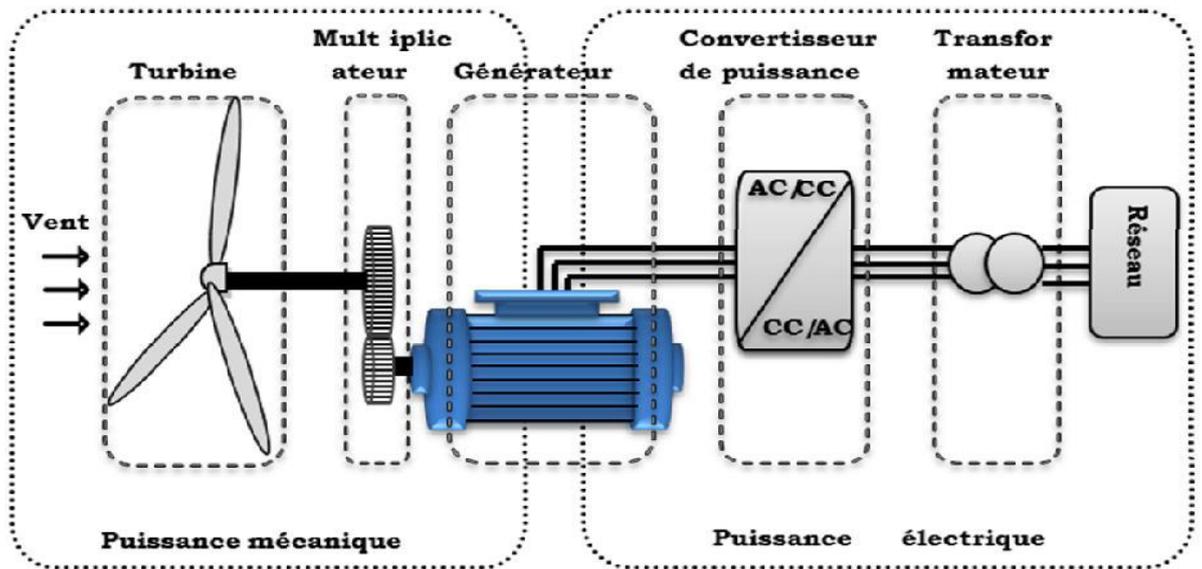


Figure I.3 Principaux organes du système de conversion éolienne [5]

## I.5 Architecture d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle, la tour, comme il est illustré dans la figure suivante :

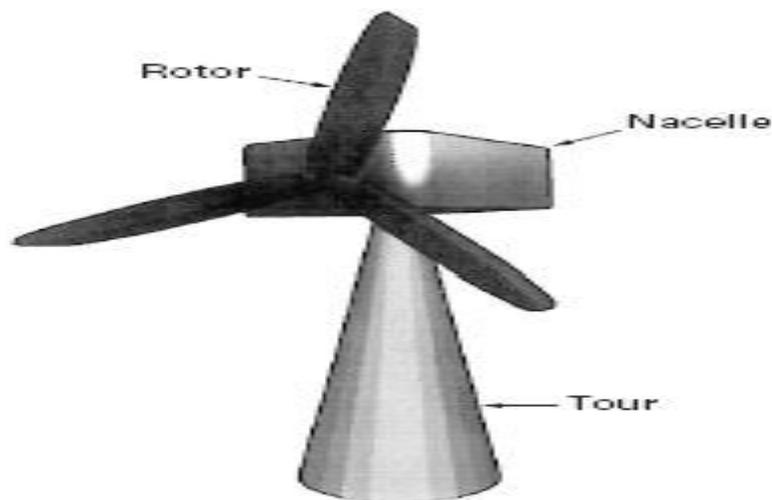


Figure I.4 Principaux composants d'une éolienne [6].

### I.5.1 Le rotor

C'est l'élément qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (rotation), il est constitué par des pales assemblées dans leur moyeu, le nombre de pales est varié de un à trois, mais généralement on trouve trois.

# Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

Le rotor est construit habituellement en matériaux composite à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois.

## I.5.2 La tour (le mat)

Généralement est un tube d'acier ou un treillis métallique, son rôle est de supporter l'ensemble (rotor + nacelle) pour que les pales ne touchent pas le sol, et de placer le rotor à une hauteur suffisante pour améliorer le capteur d'énergie de vent. Cette hauteur est comprise entre 60 et 100 mètres. A l'intérieur de ce tube on trouve l'échelle d'accès et les câbles de raccordement au réseau [7].

## I.5.3 La nacelle

C'est la partie essentielle de la chaîne de conversion éolienne, elle est située en haut de la tour, elle comporte toute l'installation de production d'électricité.

Elle comporte le multiplicateur, la génératrice, le système du frein et d'orientation de l'éolienne, les équipements d'automate et d'asservissement.

La nacelle est construite en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés entre eux. La figure (I.5) montre la nacelle et ses éléments.

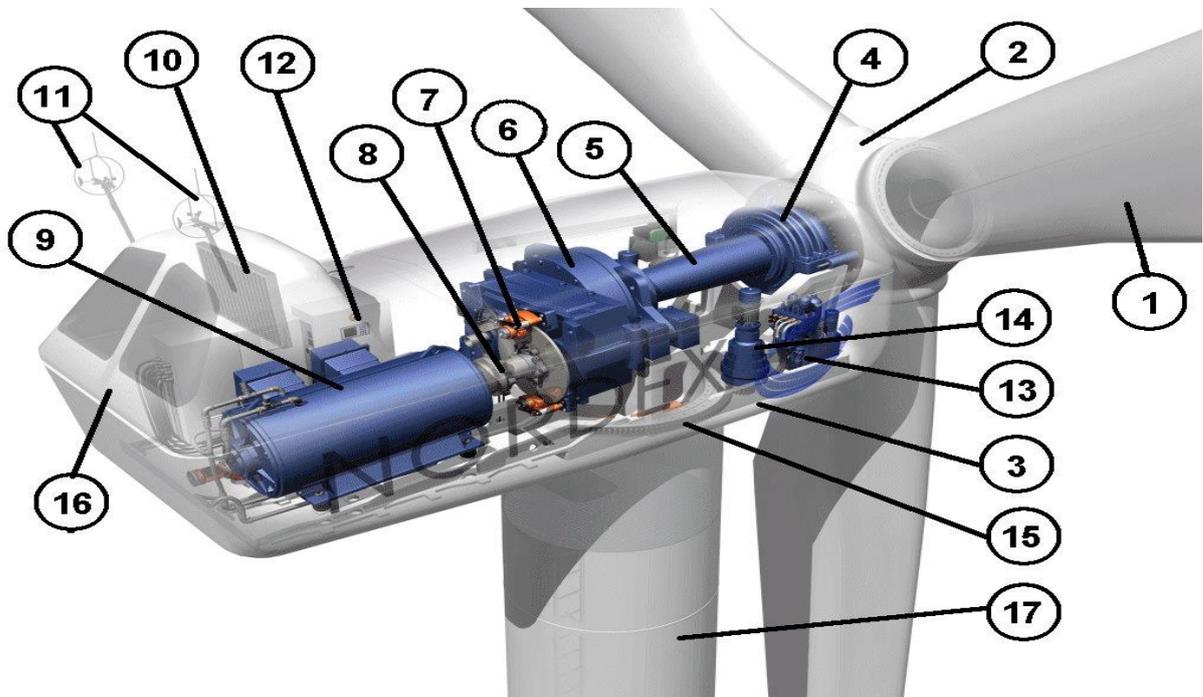


Figure I.5 Les éléments de nacelle [7].

# Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

---

- 1 : Pales en composite fibre de verre.
- 2 : Moyeu du rotor en fonte.
- 3 : Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4 : Paliers du rotor à double rangée de billes.
- 5 : Arbre lent du rotor en acier haute résistance.
- 6 : Multiplicateur de vitesse à 3
- 7 : Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure
- 8 : Accouplement avec la génératrice de type flexible.
- 9 : Génératrice.
- 10 : Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur-génératrice.
- 11 : Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmet les signaux au système de contrôle de la turbine.
- 12 : Système de contrôle surveillance et pilote la turbine.
- 13 : Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- 14 : Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 15 : Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
- 16 : Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
- 17 : Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles) [8], [13].

## I.6 Avantages et inconvénients

La croissante utilisation de l'énergie éolienne dans le monde est liée aux avantages de ce type d'énergie, mais elle a également des inconvénients qu'il faut étudier pour améliorer son rendement.

### I.6.1. Les avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, fiable, économique, et inépuisable.
- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources qui ont causé un changement radical du climat par la production du CO<sub>2</sub>.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque et ne produit pas de déchets radioactifs ou toxiques contrairement à l'énergie nucléaire.
- Pour chaque un mégawatt d'énergie produit par l'énergie éolienne, elle aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année.

# Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un précède continue et il a la possibilité de l'arrêt à importe qu'elle moment.
- Les parcs éoliens se démontent facilement et ne laissent pas des traces.
- Le cout d'énergie éolienne est toujours continu à diminuer grâce au développement technologique.

## I.6.2. Les inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants de réseau.
- Le cout élevé de l'éolienne par rapport aux autres sources d'énergie, et surtout dans les sites moins ventés.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel, à cause de l'invisibilité des pales de rotation surtout au mauvais temps et aux nuits [9], [2].

## I.7 Les différents types des éoliennes

On peut classer les éoliennes selon leur puissance, selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, ou selon la vitesse des turbines (fixe ou variable).

### I.7.1 Selon la puissance [14]

On peut classer les éoliennes selon leur puissance en :

- Eolienne de petite puissance.
- Eolienne de moyenne puissance.
- Eolienne de grande puissance.

L'éolienne	Diamètre	La puissance
Petite	Inférieur à 12m	Moins de 40 kW
Moyenne	Entre 12m et 45 m	De 40kw à 1MW
Grande	Supérieur à 46m	Plus de 1MW

**Tab I.1** Tableau de classification des éoliennes selon leur puissance [7]

## I.7.2 Selon la disposition géométrique

Selon la disposition géométrique on trouve :

- Eolienne à axe vertical.
- Eolienne à axe horizontale.

### I.7.2.1 Eolienne à axe vertical

L'axe de rotation de ces éoliennes est vertical au sol et perpendiculaire à la direction du vent. L'avantage de ce type d'éolienne est de qu'elle peut recevoir le vent de n'importe quelle direction et de qu'elle n'a pas nécessaire de système d'orientation des pales.

La générateur et l'amplificateur de vitesse sont situées au sol ce qui facilite la maintenance et l'intervention de ces machines.

Il existe deux types de l'éolienne à axe vertical :

#### ■ Eolienne de rotor de Savonius

L'éolienne de rotor de Savonius (inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), est basée sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [9], [10].

#### ■ Eolienne de rotor de Darrieux

D'après l'ingénieur français Georges Darrieux qui en breveta la conception en 1931. Ce type d'éolienne est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon l'orientation. La résultante de ces forces génère un couple moteur qui entraîne l'orientation du dispositif.

### I.7.2.2 Eolienne à axe horizontal :

Ce type d'éolienne est plus utilisé actuellement malgré l'incorporation d'un mécanisme d'orientation des pales, mais elle a un rendement plus élevé.

Ces éoliennes sont les descendantes des moulins à vent équipés d'ailes ressemblantes à celle d'un avion qui génèrent un couple moteur destiné à entraîner la génératrice.

# Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

---

Les différentes éoliennes utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et des fois plus (multi-pales).

On peut classer ces éoliennes à axe horizontales en deux types :

## ■ Eolienne amont :

Elle compte des pales rigides pour éviter les risques de collision avec la tour. L'écoulement d'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. Ce type d'éolienne est orienté à l'aide d'un dispositif spécifique.

Les machines de grandes puissances est généralement utilisent le montage amont.

## ■ Eolienne aval :

Elle utilise des rotors plus flexibles, l'effet du masque est plus important. Elle est auto-orientable.

### I.7.3 Selon la vitesse des turbines

On peut classer également les éoliennes selon la vitesse des turbines fixe ou variable.

#### I.7.3.1 Eolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette éolienne la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de génératrice.

En générale la génératrice utilisée est une machine asynchrone a cage d'écureuil relie directement au réseau.

#### I.7.3.2 Eolienne à vitesse variable

Ce système ne nécessite pas un système d'orientation des pales, ce qui nous permet d'exploiter les puissances du vent sur une large plage. La connexion directe au réseau dans ce cas est impossible à cause de caractère variables de la fréquence des tensions statoriques, alors on a besoin à une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau (un redresseur et un onduleur).

Les machines utilisées dans ce type de fonctionnement sont :

## Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

- Machine asynchrone double alimentation MADA.
- Machine asynchrone à cage d'écureuil.
- Machine synchrone à aimant permanent.

Le troisième type sera l'objectif de notre travail.

### I.7.3.3 Comparaison entre les deux types

Le tableau suivant illustre une comparaison simple entre les différents modes de fonctionnement de l'éolienne :

Eolienne à vitesse fixe	Eolienne à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"><li>• Système électrique simple.</li><li>• Fiabilité plus grande.</li><li>• Moins cher.</li><li>• Faible probabilité d'entrée en résonances des éléments de l'éolienne.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Un rendement élevé.</li><li>• Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.</li><li>• Génération une puissance d'une meilleure qualité.</li></ul>

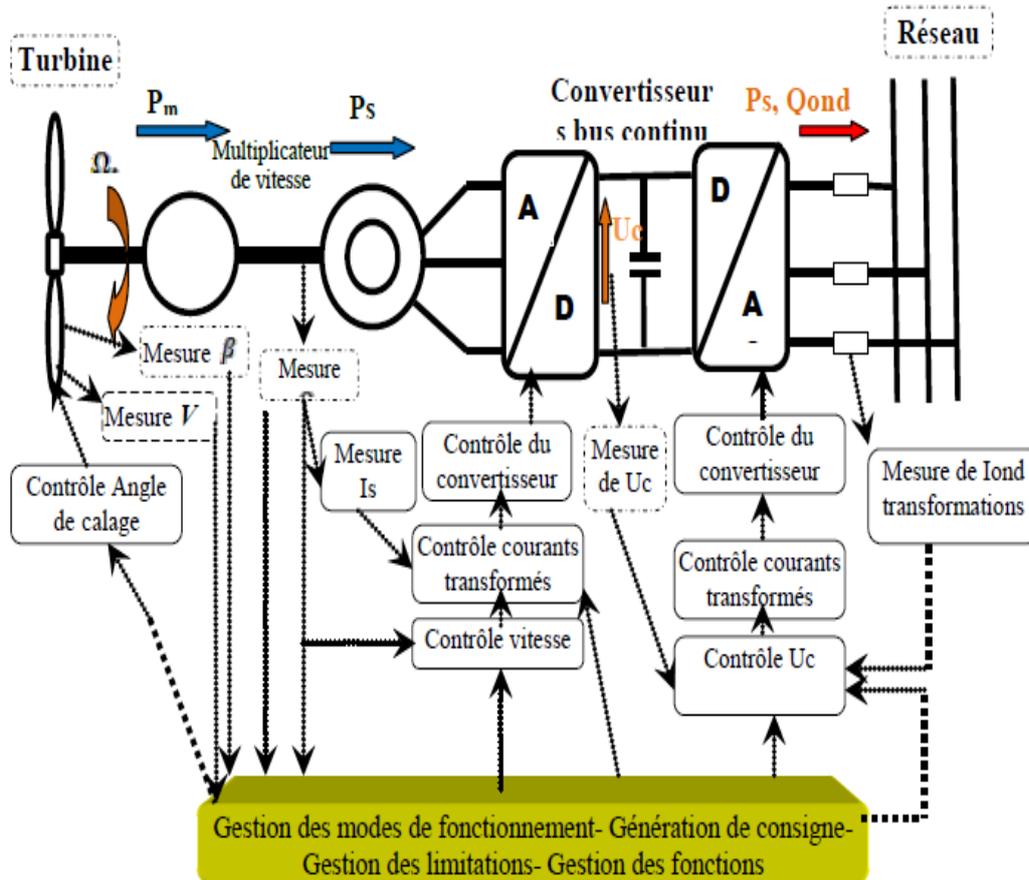
**Tab I.2** : Comparaison simple entre les différents modes de fonctionnement de l'éolienne

[5]

### I.8 La génératrice synchrone a aimant permanent (GSAP)

On s'intéresse ici à une structure d'éolienne entièrement interfacée par un dispositif d'électronique de puissance constitués de plusieurs convertisseurs (généralement maintenant des onduleurs réversibles à base de composants semi-conducteurs commandables IGBT ou IGCT contrôlés par MLI (*PWM*), l'un connecté au stator et l'autre connecté au réseau. La génératrice de référence considérée ici est une machine synchrone à aimants permanents possédant un grand nombre de paires de pôles (Figure I.10) ce qui permet la réduction ou la suppression du multiplicateur de vitesse.

Cette structure permet une variation de vitesse de 0% à 100% de la vitesse nominale de rotation [11].



**Figure I.6** Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable -machine synchrones à aimants permanents MSAP

### I.8.1 Avantages de la machine synchrone à aimants permanents

Comparée à la machine asynchrone et à courant continu, la machine synchrone à aimants permanents présente les principaux avantages suivants :

- Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu.
- Augmentation de la constante de temps thermique et de la fiabilité grâce à l'élimination des bagues et des balais.
- Facteur de puissance et rendement plus élevés par rapport à la machine asynchrone.
- Cette structure donne à la machine l'avantage de réduire les dimensions et par conséquent un moindre moment d'inertie, ce qui augmente sa fiabilité et sa densité de puissance par unité de volume.
- L'utilisation d'aimants permanents au rotor permet d'éliminer les pertes électriques dans le circuit rotorique.

## Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie éolienne

---

- Elle possède un couple moteur élevé au démarrage ce qui permet d'éliminer le multiplicateur de vitesse pour les systèmes éoliens [9], [12].

### I.9 Domaines d'application d'une éolienne

Une éolienne est un dispositif de production d'énergie électrique à partir de conversion de l'énergie cinétique du vent. Cette énergie est principalement utilisée dans :

- Pompage d'eau.
- Pour entraîner une génératrice électrique.
- Dans les fermes éoliennes.
- Aérogénérateur de grande puissance.
- Les moulins à blé.

### I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur le système de conversion éolienne, ou on a donné sa définition et une historique sur l'utilisation de ce genre d'énergie par l'homme, et nous avons vu ses différentes composantes et types aussi leurs avantages et inconvénients.

L'objectif de chapitre prochain sera la modalisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne à savoir la turbine la machine GSAP et les convertisseurs.

***Chapitre II :***

***Modélisation et simulation***

***de chaîne de conversion éolienne***

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va essayer de modéliser les différentes parties de la chaîne de conversion éolienne. Pour se faire nous allons dans le premier temps représenter la turbine de l'éolienne, le convertisseur électromécanique (génératrice synchrone à aimant permanent) et l'interface d'interconnexion.

Une fois le modèle mathématique de cette éolienne est fait, nous allons le simuler sur l'environnement MATLAB Simulink.

Les résultats seront représentés sous forme de courbe que nous allons étudier et analyser.

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

#### II.2 1 Le vent

L'élément le plus important dans le système de conversion éolienne est le vent, c'est la source de l'énergie éolienne. Il caractérise le déplacement d'une masse d'air avec une vitesse variable et dans des directions aléatoires, ce déplacement fait tourner la turbine de l'éolienne et cette dernière à son tour met le rotor de la génératrice électrique en rotation et cela crée une force électrique.

La vitesse de vent  $V_{vent}$  donnée par la relation suivante [15] :

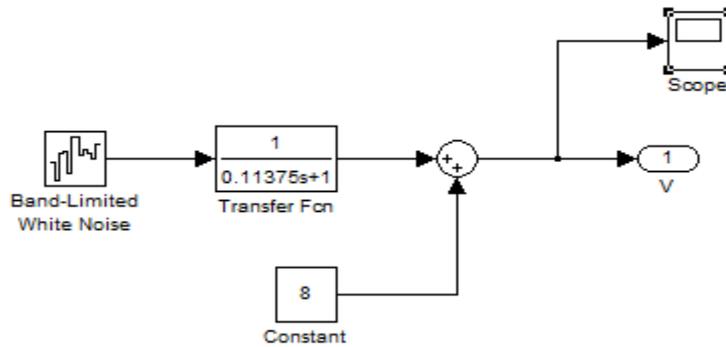
$$V(t) = V_0(t) + V_t(t) \quad (II.1)$$

On utilise un filtre passe bas pour filtrer les fluctuations hautes fréquences, ce filtre a une fonction de transfert :

$$G(s) = \frac{1}{1+t.s} \quad (II.2)$$

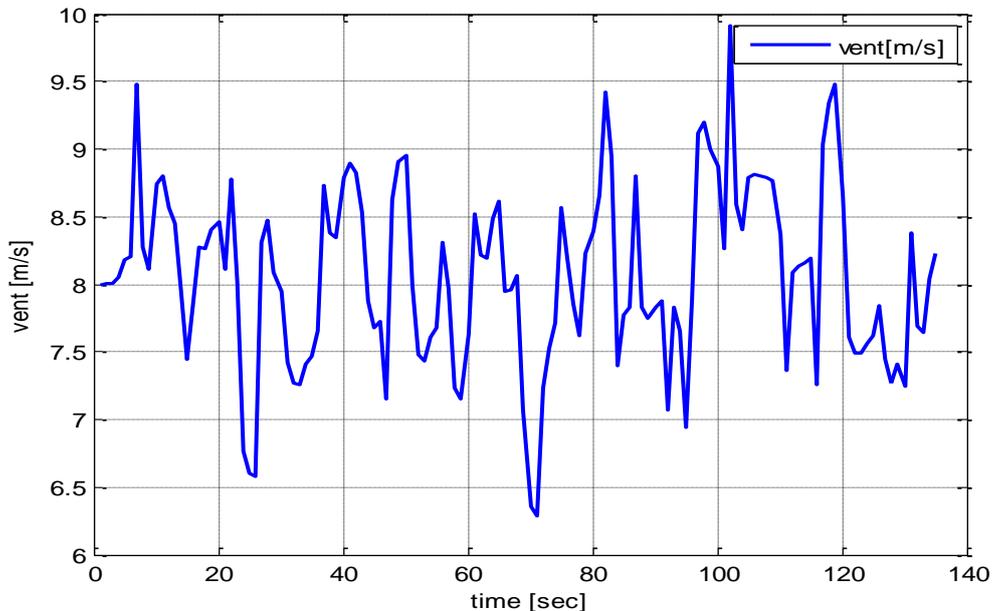
Avec  $t$  la constante de temps, il dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et la vitesse du vent moyenne.

$$t = \gamma \cdot (R/V_{moy})$$



**Figure II.1** Schéma bloc de reconstruction du vent

La séquence de vent générée par ce modèle est représentée par la figure suivante figure (II.2) pour une vitesse de vent moyenne  $V=8$  m/s.



**Figure II.2** Séquence de vent

### II.2.2 Conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique

Soit une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animer par une vitesse  $V$ .

$$dEc = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dx \cdot V^2 \quad (II.3)$$

En supposant que  $dx = V \cdot dt$ , on déduit  $P_v$ :

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$\rho$ : la masse volumique de vent ( $\text{kg/m}^3$ ).

$V$  : vitesse instantanée du vent ( $\text{m/s}$ ).

$E_c$  : énergie cinétique de vent (Joule).

$S = \pi \cdot R^2$  : la surface balayée par la turbine ( $\text{m}^2$ ) [16], [4].

### II.2.2.1 Loi de Betz

D'après Betz l'énergie maximale recueillie par un aérogénérateur ne dépasse jamais 59% de l'énergie de vent à travers unité de temps.

On considère le système éolien à axe horizontal représenté dans la figure (II.3), sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont et la vitesse  $V_2$  en aval.

On suppose que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ , soit  $V_{12}$ . [18],[19],[4].

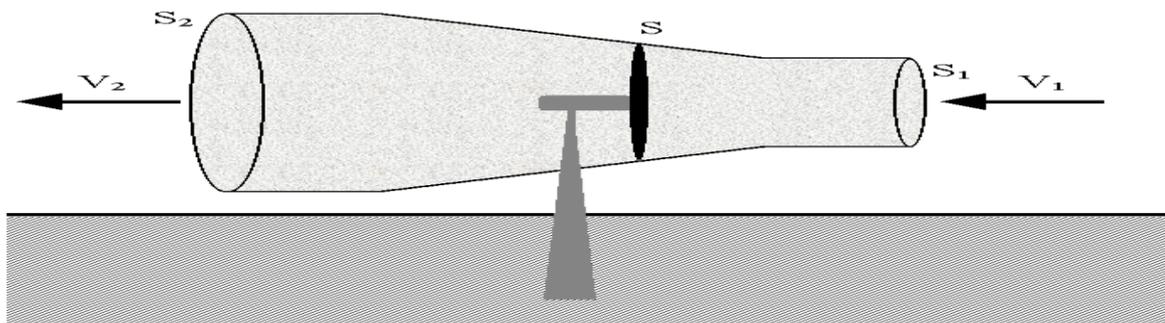


Figure II.3 Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement est donnée par :

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.5})$$

La puissance récupérée est donnée par :

$$P_t = \frac{m_0 \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.6})$$

On remplace  $m_0$  par son expression dans (II. 6) :

$$P_t = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 - V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

Si on met  $V_2=0$ , donc la puissance théorique disponible sur la surface S est:

$$P_v = \frac{\rho \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.8})$$

### II.2.2.2 Coefficient de puissance

Il est défini par le rapport entre la puissance récupérable et la puissance totale théorique disponible [20] [21].

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{(1 + \frac{V_2}{V_1}) \cdot (1 - (\frac{V_2}{V_1})^2)}{2} \quad (\text{II.9})$$

Ce coefficient de puissance présente un maximum de 0.59. Cette limite théorique appelée limite de Betz.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne à son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

R : rayon de la surface balayée (m).

V : vitesse de vent (m/s).

$\Omega$  : vitesse de rotation avant multiplicateur (rad/s).

Dans notre travail on utilise cette formule du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$  [22]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167(\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.11})$$

## II.3 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

Dans cette partie, on modélise la turbine, le multiplicateur et l'arbre de transmission.

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables.

- Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre relie la partie mécanique à la partie électrique autrement dit relie la turbine au générateur.

### II.3.1 la turbine

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales qui pivotent sur l'axe d'un angle  $\beta$ . Le vent de vitesse  $V$ , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine.

En combinant les équations (II.8), (II.9), et (II.10), la puissance mécanique  $P_t$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_t = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{II.12})$$

L'expression de couple :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R \cdot P_t}{\lambda \cdot V} = \frac{C_p}{2 \cdot \lambda} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{II.13})$$

Avec :  $C_t$ : Couple de la turbine éolienne (N.m).

### II.3.2 Le multiplicateur de vitesse

Suivant la nature du convertisseur électromécanique et la taille de la turbine éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle du convertisseur électromécanique [17].

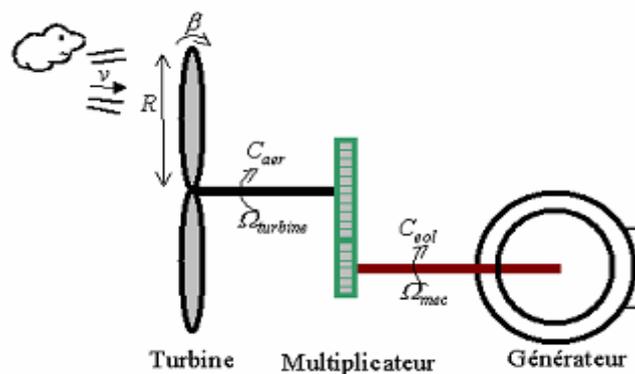


Figure II.4 Schéma de multiplicateur de vitesse

En introduisant le Gain de multiplicateur de vitesse  $G$  sur l'équation (II.13) on aura :

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t \quad \text{et} \quad C_g = C_t / G \quad (\text{II.14})$$

Donc :

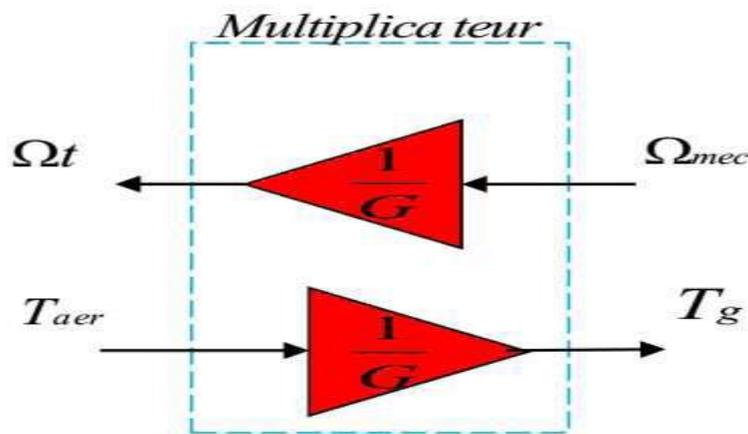
$$C_g = P_t / \Omega_g \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$\Omega_g$ : Vitesse de rotation après multiplicateur en (rad/s).

$C_g$ : Couple après multiplicateur (N.m).

$G$  : Gain de multiplication. [4]



**Figure II.5** Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse

### II.3.3 L'arbre de transmission

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J$  et comprend la masse des pâles et la masse du rotor de la turbine. Les modèles mécaniques proposés considèrent 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

$$J = \frac{d\Omega_g}{dt} + J_g \quad (\text{II.16})$$

Il est noté que l'inertie du rotor de la génératrice est faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir de la turbine du couple mécanique totale ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor.

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

Ou :

J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

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

Avec:

$C_{\text{mec}}$ : Le couple mécanique développé par la génératrice en (N.m).

$C_g$  : Le couple après le multiplicateur en (N.m).

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

$C_f$ : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).

Ou :

$$C_f = f \cdot \Omega g \quad (\text{II.19})$$

Donc :

$$J \frac{d\Omega g}{dt} + f \cdot \Omega g = C_g - C_{\text{em}} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique [24].

### II.4 Point maximum de puissance

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

La courbe spécifique d'une turbine tripale possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale ( $\lambda_{\text{opt}}$ ) et le coefficient de puissance maximal ( $C_p\text{-opt}$ ). La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation est égale à :

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

L'expression de Pt:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot S \cdot (R^3 / \lambda^3) \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{II.22})$$

L'expression de couple devient:

$$C_t = \frac{1}{2 \cdot \lambda^3} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II.23})$$

On considère que les conditions sont optimales alors l'équation (II.23) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

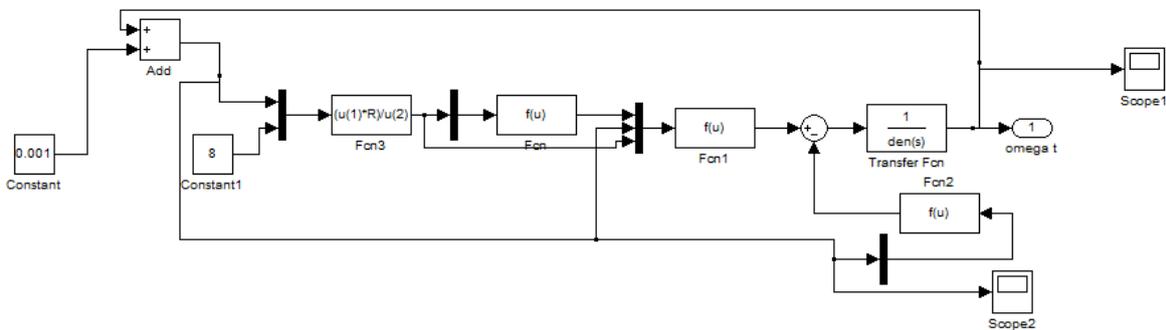
$$C_{t-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (II.24)$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad (II.25)$$

### II.5 Le schéma de simulation

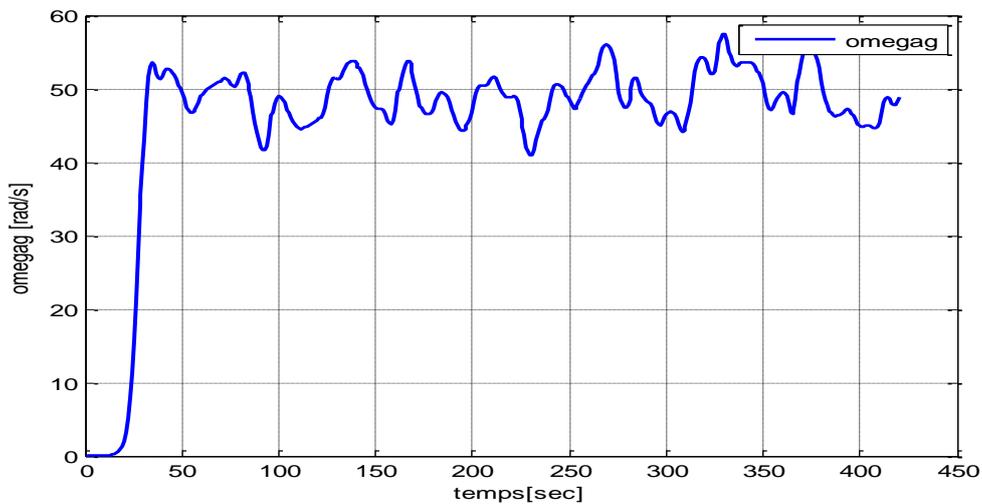
Le schéma bloc de la turbine d'éolienne utilisée est représenté comme ci-dessous :



**Figure II.6** Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.

### II.6 Résultats de simulation et interprétation

Le profil du vent donné par la figure (II.2) est utilisé pour simuler le modèle de la turbine ; les résultats sont donnés par les figures ci-dessous



**Figure II.7** vitesse de rotation de turbine  $w$  (rad/sec)

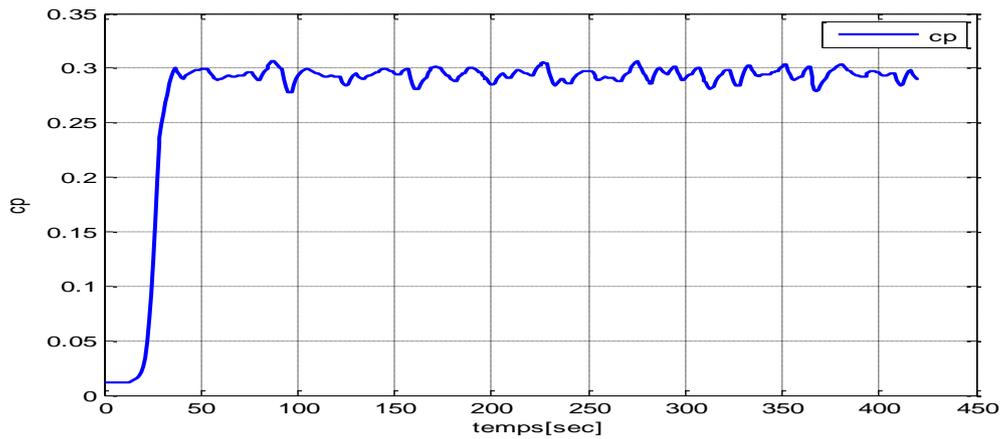


Figure II.8 Coefficient de puissance  $C_p$

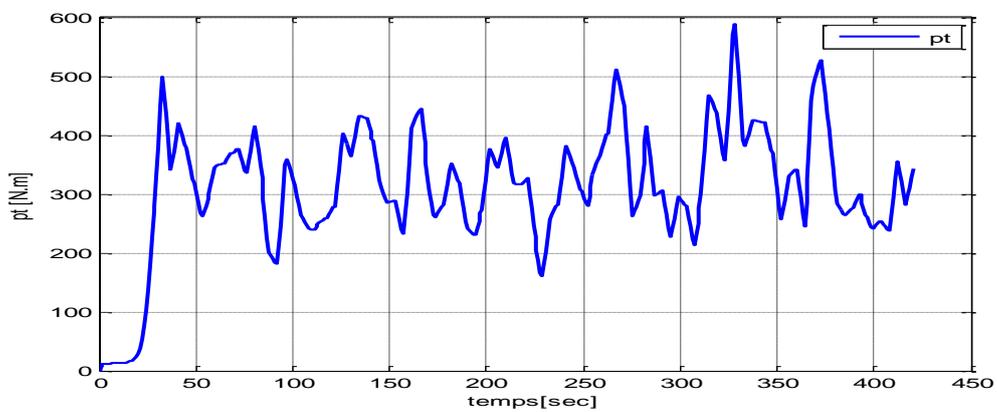


Figure II.9 La puissance de la turbine (watt)

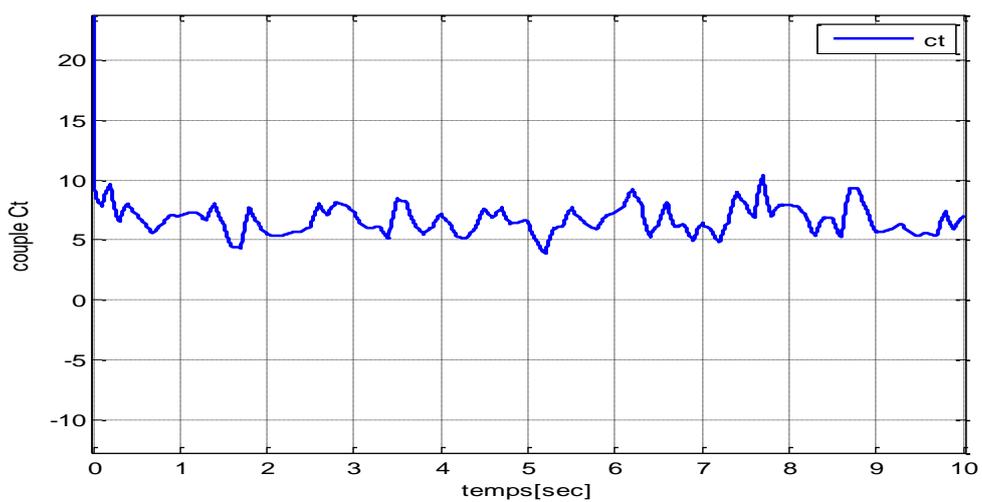


Figure II.10 Le couple de la turbine (N.m)

Et on remarque que la vitesse de rotation de la turbine suit celle du vent, de même pour la puissance ça est expliqué par la transformation de la puissance cinétique du vent en puissance mécanique sur l'arbre de transmission.

On peut constater dans la figure II.8 que la valeur de  $C_p$  est quasiment constante malgré la variation de vitesse donc le fonctionnement à puissance maximal est respecté.

### II.7 Modélisation de la GSAP

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatif sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

#### II.7.1 La représentation de la GSAP dans le repère abc

La machine synchrone à aimant permanent est représentée comme suit (figure II.10).

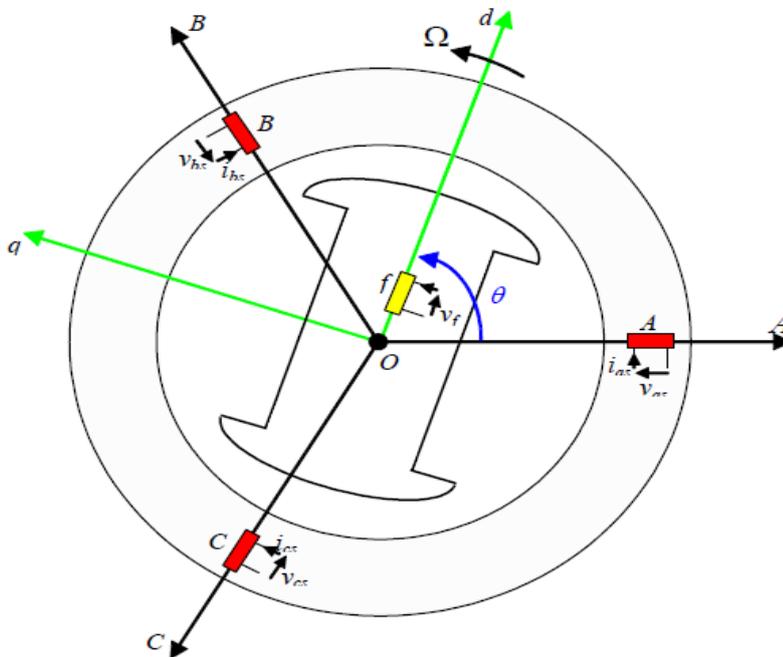


Figure II.11 La représentation de la GSAP dans le repère abc

### II.7.2 Hypothèse simplificatrices

Une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entrefer.
- L'influence des pièces polaires.

### II.7.3 Mise en équation

$$\bullet \text{ Equations électriques : } \begin{cases} V_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

$$\bullet \text{ Equations magnétiques : } \begin{cases} \phi_a = L \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c \\ \phi_b = L \cdot i_b + M_{ab} \cdot i_a + M_{bc} \cdot i_c \\ \phi_c = L \cdot i_c + M_{ca} \cdot i_a + M_{bc} \cdot i_b \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

La forme matricielle

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Donc les équations de tension sont données par:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = R_s \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.29})$$

avec :

$V_{a,b,c}$  : Les tensions de phase de la machine

$i_{a,b,c}$  : Les courants de phase de la machine

$L$  : L'inductance

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique

$E_{a,b,c}$  : Représentent les f.e.m induites dans les enroulements de phase du stator.

- **Expression de couple**

$$Cem = \frac{p}{w} (Ea.ia + Eb.ib + Ec.ic) \quad (II.30)$$

Où :

p : Le nombre de pair de pôle,

w : La vitesse du rotor avec ( $w=p. \Omega$ ).

### II.7.4 La représentation dans le repère Park (dq)

On doit appliquer la transformation de Park pour aller de  $(Va, Vb, Vc)$  vers  $(Vd, Vq)$  :

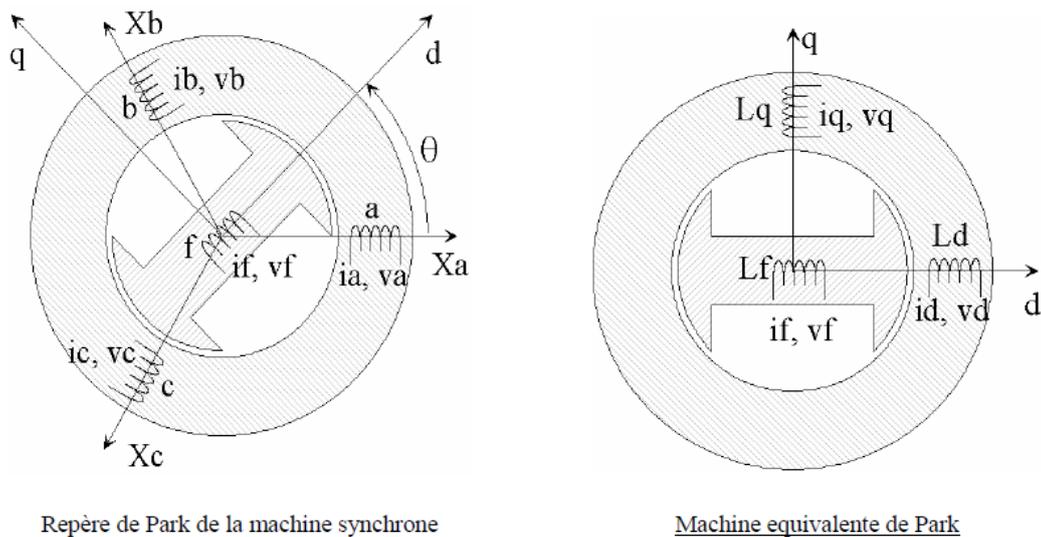


Figure II.12 Transformation du Park

La matrice de PARK s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{pmatrix} \quad (II.31)$$

Après simplifications on aura :

$$\begin{cases} Vd = Rs.id - w.l.iq + L \frac{did}{dt} \\ Vq = Rs.iq + L \frac{diq}{dt} + (L.id + \emptyset f)w \end{cases} \quad (II.32)$$

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} \cdot (E_{q, id}) = P \cdot \frac{1}{\omega} \cdot i_q \quad (II.33)$$

### II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté le système physique à étudier (chaîne de conversion éolienne). Puis, nous avons présenté la modélisation des différentes parties de ce système à partir des modèles mathématiques existant dans la littérature ; ce qui nous a permis d'évaluer les caractéristiques de chaque élément du système. nous avons constaté que la caractéristique  $(P, \Omega)$  de la turbine est fortement non-linéaire et présente un seul point où la puissance est maximale, pour l'extraire nous avons mis en œuvre un algorithme (MPPT) classique

Dans le chapitre suivant, nous allons appliquer la commande vectorielle pour commander la MSAP.

# ***Chapitre III :***

## ***La commande vectorielle d'une GSAP***

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va essayer d'élaborer la commande vectorielle par orientation de flux rotorique sur la machine synchrone à aimant permanent qu'on a modélisé et simulé dans le chapitre précédant dans le repère de Park.

Pour cela on va parler d'abord sur le principe de la commande vectorielle et ensuite on va développer un modèle de simulation sur l'environnement MATLEB Simulink.

### III.2 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle consiste à rendre le contrôle de la machine synchrone similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée [26]. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes (axe  $d$  et axe  $q$ ). Habituellement, la composante d'axe ' $d$ ' du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe ' $q$ ' joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple.

L'application de la commande vectorielle nécessite que l'axe de la composante  $i_q$  soit en quadrature par rapport au flux rotorique. Par conséquent, la composante  $i_d$  du courant statorique, doit être colinéaire, au flux rotorique. Si le courant  $i_d$  est dans la même direction que le flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe ' $d$ ' s'ajoute au flux des aimants, ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer (surexcitation). D'autre part, si le courant  $i_d$  est négatif, le flux statorique sera en opposition à celui du rotor, ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (sous-excitation). Le courant  $i_d$  doit être nul, lorsque le système travaille à couple constant [27].

### III.3 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

#### III.3.1 Avantages

- Elle est précise et rapide
- Elle est basée sur le modèle transitoire
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase [7].

#### III.3.2 Inconvénients

- Présence de transformation de coordonnées dépendant d'un angle  $\Theta_s$  estimé.
- Faible robustesse aux variations paramétriques.

### III.4 Description du système global

La structure de la commande est constituée de l'association d'une machine synchrone, à aimant permanent dans le repère (d, q). La référence du courant direct  $I_{d\_ref}$  est fixé à zéro et la sortie du régulateur de la tension du bus continu constitue la consigne du couple.

Le couple dépend seulement du courant  $I_q$ . Alors, on peut contrôler le couple uniquement par la composante  $I_q$ . Le courant de référence  $I_{q\_ref}$  est obtenue par la relation du couple de référence est issu de la régulation de la tension du bus continu. Les références des courant direct  $I_{d\_ref}$  et  $I_{q\_ref}$  sont comparées séparément aux courant réelle de la machine  $i_d$  et  $i_q$  les erreurs des courants sont appliques à l'entrée des régulateurs classiques de type PI [27].

### III.5 Modèle de la machine

Notre machine à commander est une génératrice synchrone à aimant permanent a pole lisse est définie par les équations suivantes [26], [27], [28]:

- **Equations électrique**

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - w \cdot L_q \cdot i_q \quad (III.1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s \cdot i_d + w \cdot L_q \cdot i_q) \quad (III.2)$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_d \cdot \frac{di_q}{dt} + w \cdot L_d \cdot i_d - w \cdot \Phi_f \quad (III.3)$$

$$\Leftrightarrow \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s \cdot i_q - w(L_d \cdot i_d - \Phi_f)) \quad (III.4)$$

- **Equations mécaniques**

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_t - C_{em} - C_f) \quad (III.5)$$

Avec:

$$C_{em} = \frac{3}{2} (p \cdot i_q \cdot \Phi_f) \quad (III.6)$$

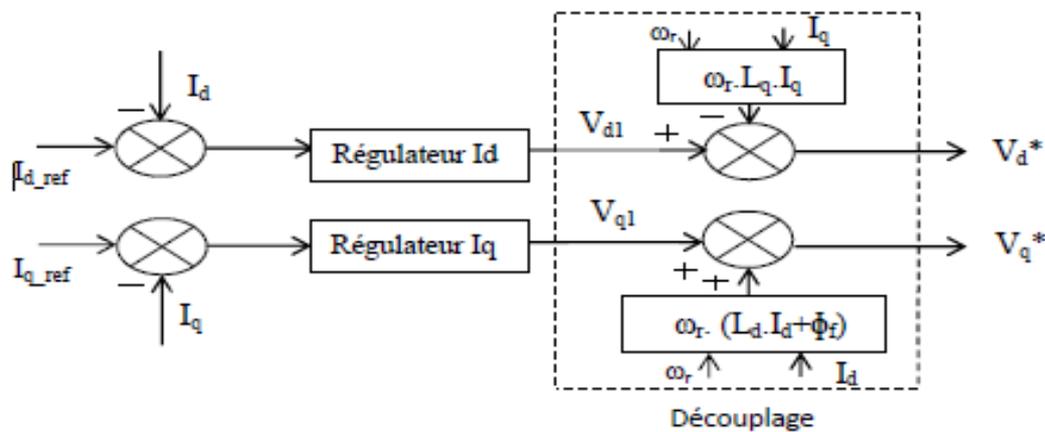
Donc le modèle mathématique de la machine s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s \cdot i_d + w \cdot L_q \cdot i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s \cdot i_q - w(L_d \cdot i_d - \Phi_f)) \\ w = P \cdot \Omega \end{array} \right. \quad (III.7)$$

### III.6 Le découplage par compensation

Les équations différentielles qui représente le modèle de la machine étudiée dans le référentielle de Park (d, q), sont couplée entre elles où les courants  $i_d$  et  $i_q$  (pas indépendants l'un de l'autre), reliés par des termes non linéaires ( $\omega_r L_d i_d$ ) et ( $\omega_r L_q i_q$ ) comme montré dans les équations (III.1, III.3)

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, Cette méthode à pour but de découpler les axes (d, q), qui permet d'écrire les équations de la machine et de la partie de régulation d'une manière simple et ainsi de calculer de façon simple les coefficients des régulateurs [10].



**Figure III.1** Principe de découplage par compensation

On aura donc :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} + e_q \\ V_q = V_{q1} + e_d \end{cases} \quad (III.8)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_d = \omega_r (L_d i_d - \Phi_f) \\ e_q = -\omega_r L_q i_q \end{cases} \quad (III.9)$$

$e_d$  et  $e_q$  sont les termes de compensation.

$$\begin{cases} V_{d1} = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \\ V_{q1} = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (III.10)$$

Dans le repère (d,q) :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + s L_d) i_d \\ V_{q1} = (R_s + s L_q) i_q \end{cases} \quad (III.11)$$

On a donc un découplage de courant  $i_d$  et  $i_q$ , on peut écrire :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_d1}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_q1}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

### III.7 La régulation

Pour assurer une meilleure précision et un bon temps de réponse, on utilise des régulateurs.

Il existe plusieurs type de régulateurs a savoir les régulateurs par hystérésis et des régulateurs proportionnelles (P) et des régulateurs intégrale (I) et des régulateurs dérivées (D).

Dans notre travaille on utilise des régulateurs de type proportionnelle intégral (PI), comme il est indiqué dans la (fig. III.2).

Ce type de régulation est rempli par deux fonction :

- Il fournit un signal de commande  $u(t)$  en tenant compte de l'évolution du signal de la sortie  $y(t)$  par rapport à la consigne  $w(t)$ .
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.

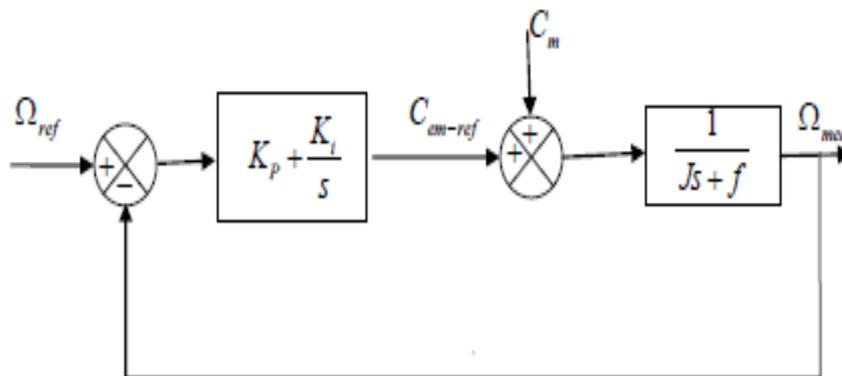
La relation entre la sortie de régulateur et le signale de l'écart  $e(t)$  est donné :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t). dt \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$\frac{u(t)}{e(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.14})$$

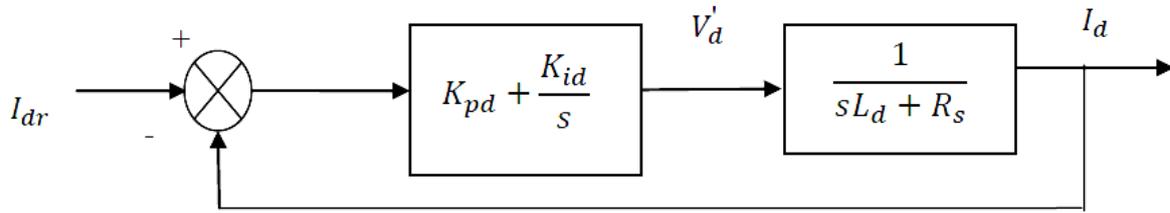
- $$\begin{cases} K_p: \text{Gain proportional} \\ K_i: \text{Gain integral} \end{cases}$$



**Figure III.2** Schéma bloc de l'asservissement en utilisant PI.

### III.7.1 Régulation de courant id

La boucle de régulation de courant id est montrée par la figure (III.3) [31],[10] :



**Figure III.3** Boucle de régulation du courant id

A partir de la fonction (III.12) on peut écrire la fonction de transfert qui représente un système du 1<sup>er</sup> ordre suivante :

$$F_d(s) = \frac{L_d}{V_{d1}} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \left(\frac{L_d}{R_s}\right)s} \quad (III.15)$$

Avec:

$$t_e = \frac{L_d}{R_s} \text{ est le constante de temps électrique.}$$

La fonction de transfert en BO est écrite donc :

$$FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{dp}}{K_{id}}s\right) \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + t_e s} \quad (III.16)$$

$$FTBO_d = \left(K_{dp} + \frac{K_{id}}{s}\right) \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + t_e s} \quad (III.17)$$

En posant que :  $t_e = \frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}}$  alors :

$$FTBO_d = \frac{(K_{pd}s + K_{id}) \cdot K_{id}}{(K_{pd}s + K_{id}) \cdot (R_s \cdot s)} \quad (III.18)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte aura :

$$FTBO_d = \frac{K_{id}}{R_s \cdot s} \quad (III.19)$$

La fonction de transfert en boucle fermée de courant id sur l'axe d est donnée par la fonction suivante :

$$FTBO_f = \frac{FTBO_d}{1 + FTBO_d} \quad (III.20)$$

$$FTBO_f = \frac{1}{\left(\frac{R_s}{K_{id}}\right)s + 1} \quad (III.21)$$

$$FTBO_f = \frac{1}{t_e \cdot s + 1} \quad (III.22)$$

On a un système de 1<sup>er</sup> ordre donc :

$$tr = 3te$$

$$tr = 3 \frac{Rs}{K_{id}}$$

$$K_{id} = 3 \frac{Rs}{tr} \quad (III.23)$$

$$\frac{L_d}{Rs} = \frac{K_{pd}}{K_{id}}$$

$$K_{pd} = \frac{L_d \cdot K_{id}}{Rs} \quad (III.24)$$

Alors :

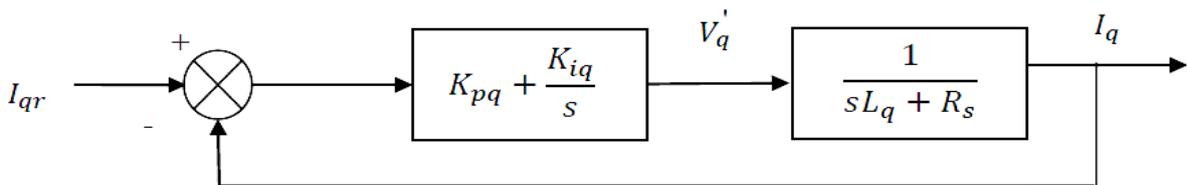
$$K_{pd} = \frac{3 \cdot L_d}{te}$$

Donc on a les paramètres  $K_{id}$  et  $K_{pd}$  sont :

$$\begin{cases} K_{id} = 3 \frac{Rs}{tr} \\ K_{pd} = 3 \frac{L_d}{te} \end{cases} \quad (III.25)$$

### III.7.2 Régulation de courant $i_q$

La boucle de régulation de courant  $i_q$  est montrée par la figure (III.4)



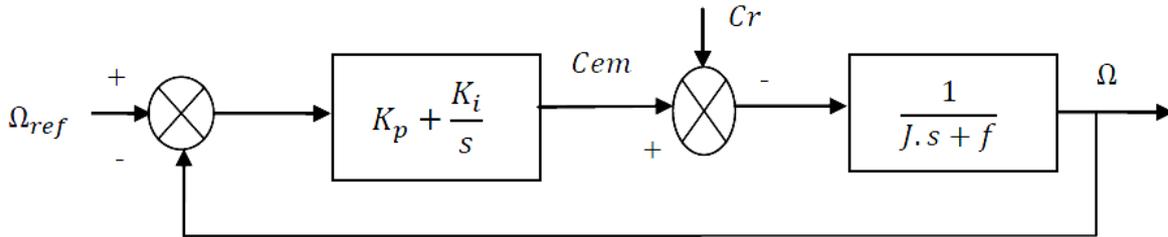
**Figure III.4** Boucle de régulation du courant  $i_q$

Notre machine a deux inductances égales donc  $L_d=L_q$

$$\text{Donc on a : } \begin{cases} K_{iq} = 3 \frac{Rs}{tr} \\ K_{pq} = 3 \frac{L_q}{te} \end{cases} \quad (III.26)$$

### III.7.3 Régulation de vitesse

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donnée par (tenant compte que la dynamique du courant  $i_q$  est plus rapide que celle de la vitesse) :



**Figure III.5** Boucle de régulation de vitesse

$$FTBO_{\Omega} = \left( K_{d\Omega} + \frac{K_i\Omega}{s} \right) \cdot \frac{1}{Js+f} = \frac{K_i\Omega}{s} \left( 1 + \frac{K_p\Omega}{K_i\Omega} s \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{J}{f}s} \right) \quad (III.27)$$

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_i\Omega}{s} \left( 1 + \frac{K_p\Omega}{K_i\Omega} s \right) \quad \text{avec } T_{\Omega} = \frac{J}{f} \quad (III.28)$$

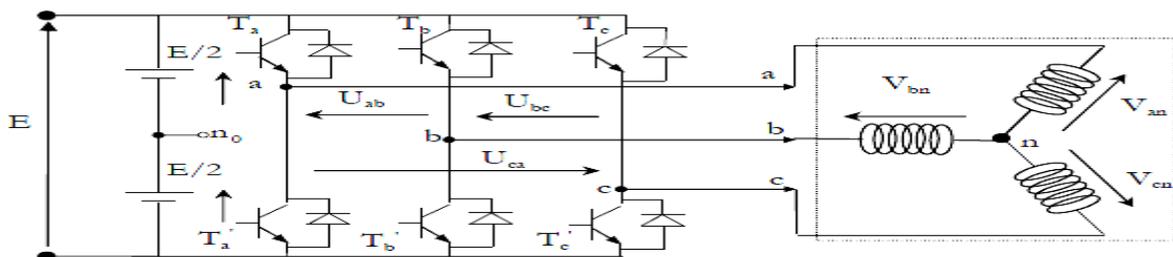
En posant que :  $T_{\Omega} = \frac{J}{f} = \frac{K_p\Omega}{K_i\Omega}$  donc la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$FTBf_{\Omega} = \frac{1}{\frac{f}{K_i\Omega} \cdot s + 1} \quad (III.29)$$

### III.8 Modélisation de l'onduleur MLI

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continu(DC) à la forme alternatif(AC) de système de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude variables.

Cependant, se posent plusieurs problèmes, généralement la forme des harmoniques d'ondes supérieures. Ces harmoniques ont un effet indésirable sur le comportement dynamique de la machine. Plusieurs méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs d'un onduleur. Le procédé le plus utilisé est la modulation de largeur d'impulsions(MLI) [31], [28].



**Figure III.6** Schéma d'un onduleur de tension triphasé

## Chapitre III : La commande vectorielle d'une GSAP

---

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (III.6), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à  $\frac{E}{2}$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé  $n$ .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

$$S = \begin{cases} 1 & ; \bar{S} = 0 \\ 0 & ; \bar{S} = 1 \end{cases} \quad \text{pour } S = a, b, c$$

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} = E(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = E(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} = E(S_c - S_a) \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

Les tensions  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{(III.31)}$$

De (III.30) et (III.31); on a :

$$\begin{cases} V_{an} = E/3 (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bn} = E/3 (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cn} = E/3 (2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad \text{(III.32)}$$

Donc on a :

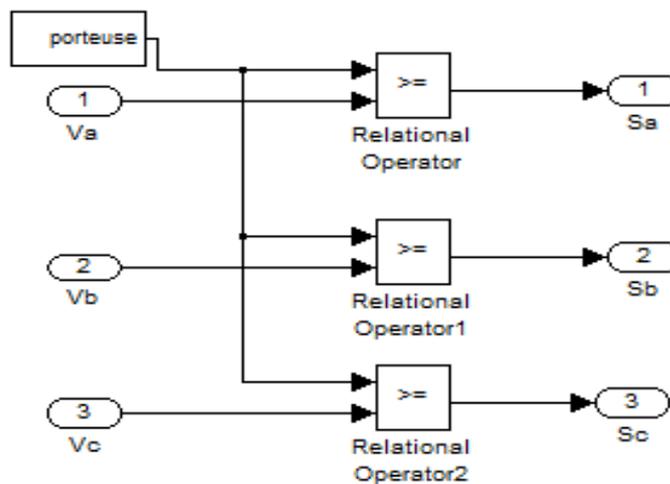
$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = E/3 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad \text{(III.33)}$$

### III.9 Modulation de largeur d'impulsions (MLI)

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles (c.à.d. avec des harmoniques, de plus faibles amplitudes et de fréquences élevées pour qu'ils soient filtrés aisément) [31].

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI en français et PWM pour Pulse Width Modulation en anglais). Permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence et tension fixes (en générale une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

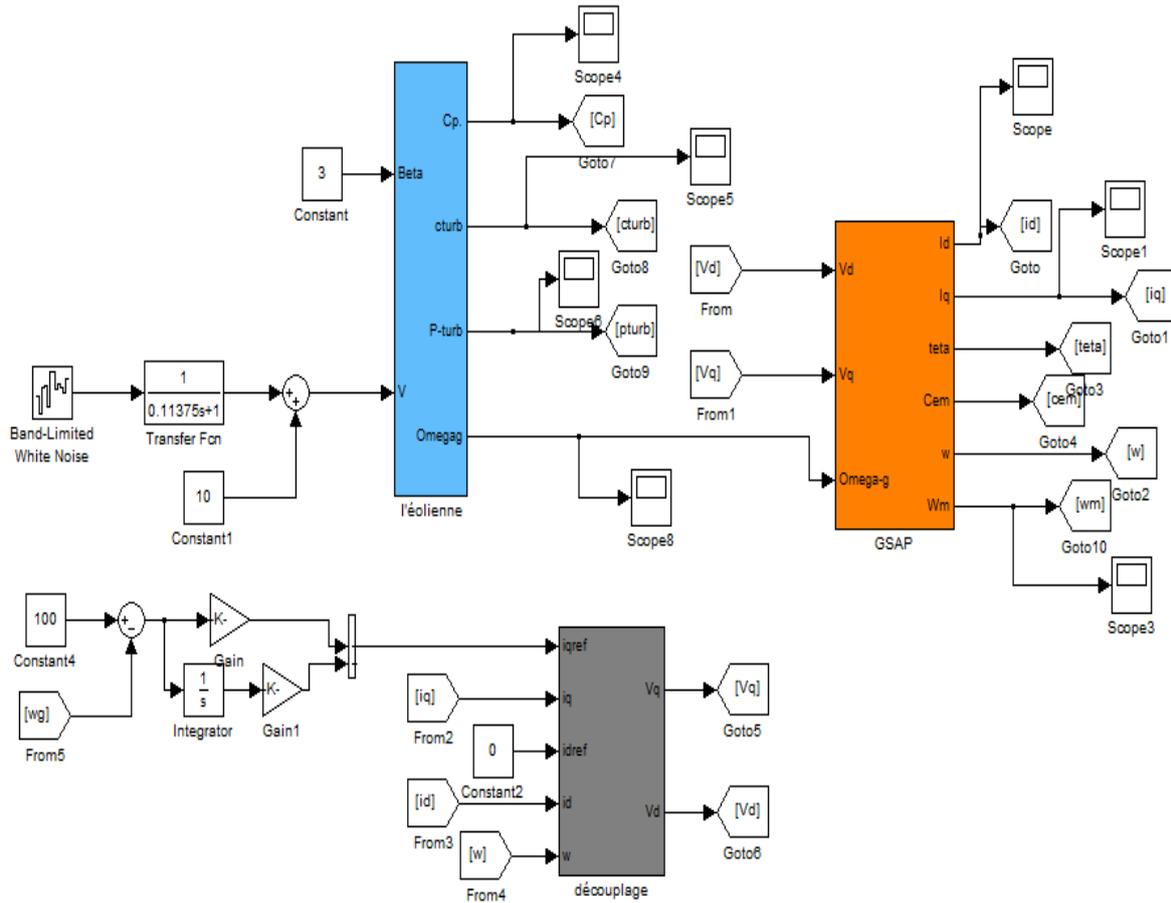
Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et fermeture des interrupteurs et par les rapports cycliques. Elle consiste de comparer l'erreur entre le signal de tension et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées.



**Figure III.7** Schéma bloc de la commande MLI sur MATLAB

### III.10 schéma global de la commande vectorielle

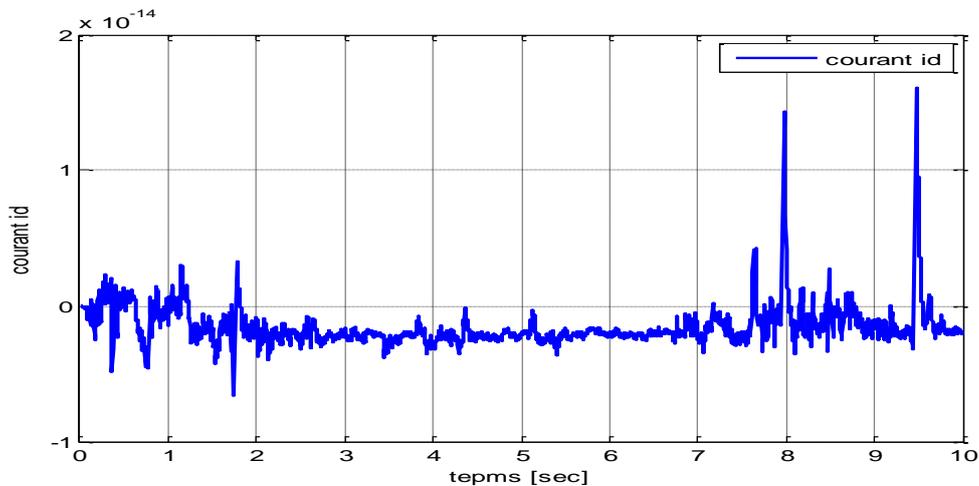
Le schéma synoptique de la commande vectorielle est représenté totalement avec ces composants qui la constituent, dans la (Figure III.8) ci-dessous :



**Figure III.8** Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP.

## III.11 Les résultats de simulation

### III.11.1 Test a vitesse constante ( $V_v=8\text{m/s}$ )



**Figure III.9** L'allure de courant id (A)

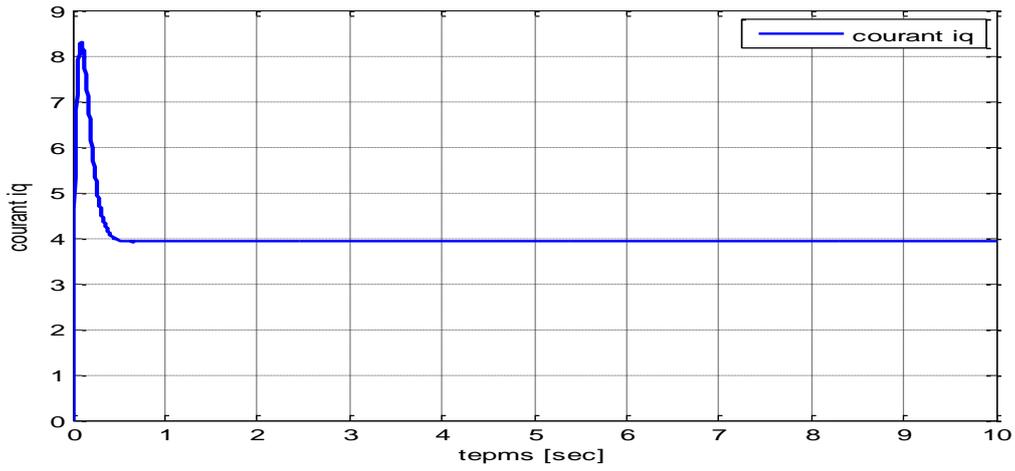


Figure III.10 L'allure de courant  $i_q$  (A)

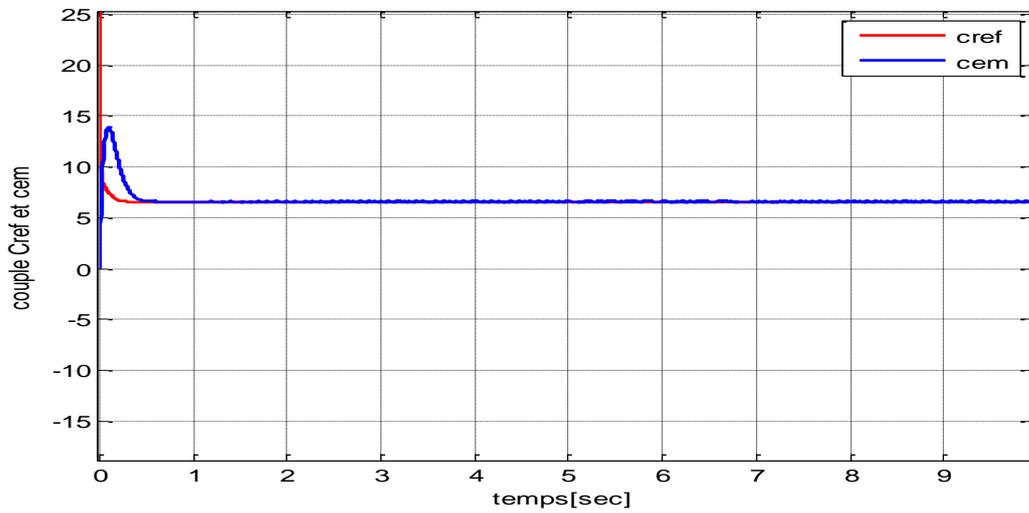


Figure III.11 L'allure de couple (N.m)

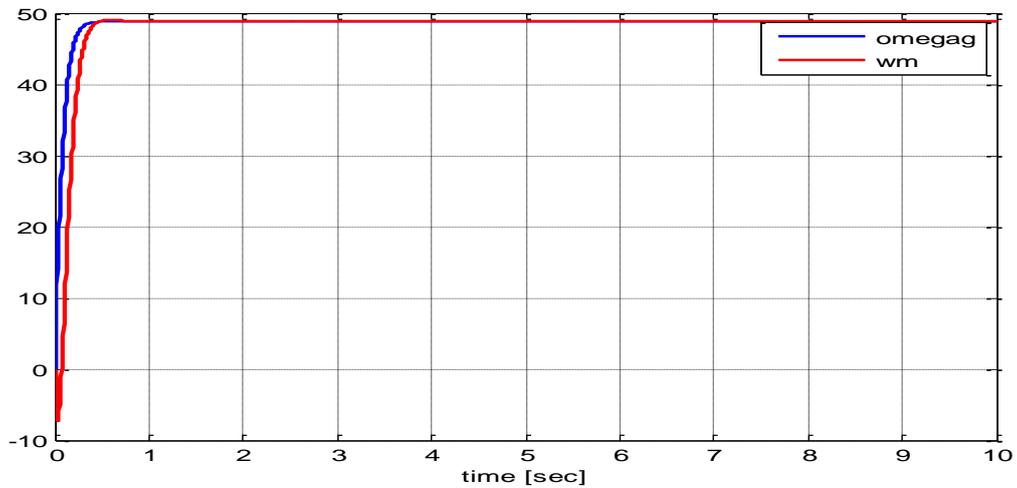


Figure III.12 L'allure de vitesse (rad/sec)

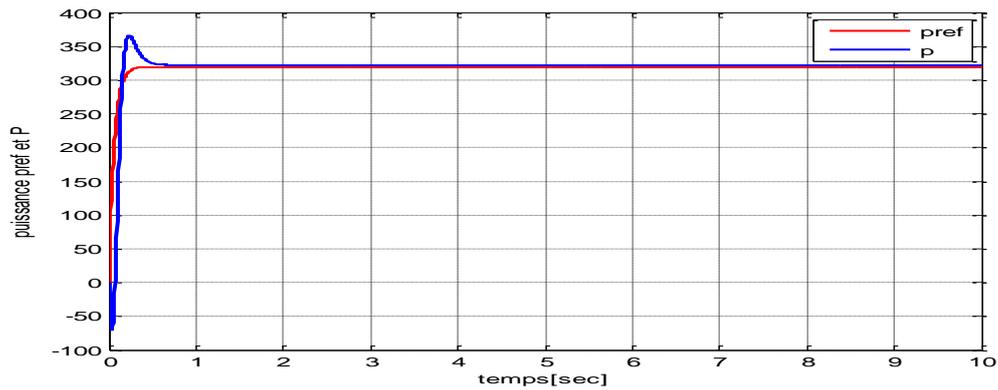


Figure III.13 L'allure de puissance (watt)

### • Interprétations

Les résultats de simulation présente une bonne réponse où on peut remarquer que chaque grandeurs suit parfaitement sa référence sauf au démarrage qui présente quelques perturbations et provoque un pique de courant et couple qui disparaîtra au bout d'un temps négligeable, le courant  $i_q$  est de même forme que celle du couple  $C_{em}$ , et le courant  $i_d$  est presque nul.

La GSAP modélisée dans le repère  $d, q$  est naturellement découplée et analogue à une machine à courant continue, le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant  $i_q$  :  $C_{em} = K \cdot i_q$

Avec  $K = C_{te}$ .

### III.11.2 Test a vitesse variable

On a appliqué un profil du vent aléatoire plus proche de l'évolution du vent réel qui on a filtré pour l'adapter à la dynamique lente du système étudié. L'objectif c'est de voir le degré de Poursuite du point à maximum de puissance et l'efficacité du réglage de vitesse assuré par le PI classique (stabilité face aux variation lorsque du vent).

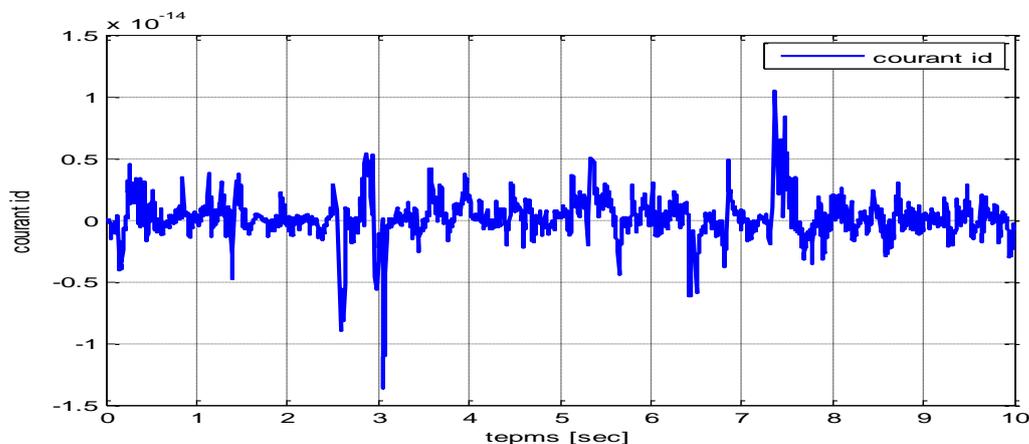


Figure III.14 L'allure de courant  $i_d$  (A)

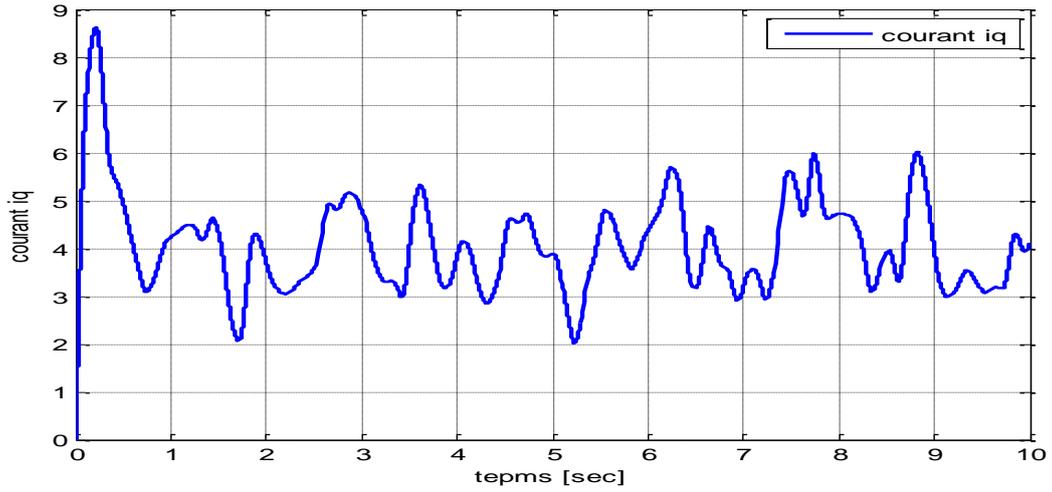


Figure III.15 L'allure de courant  $i_q$  (A)

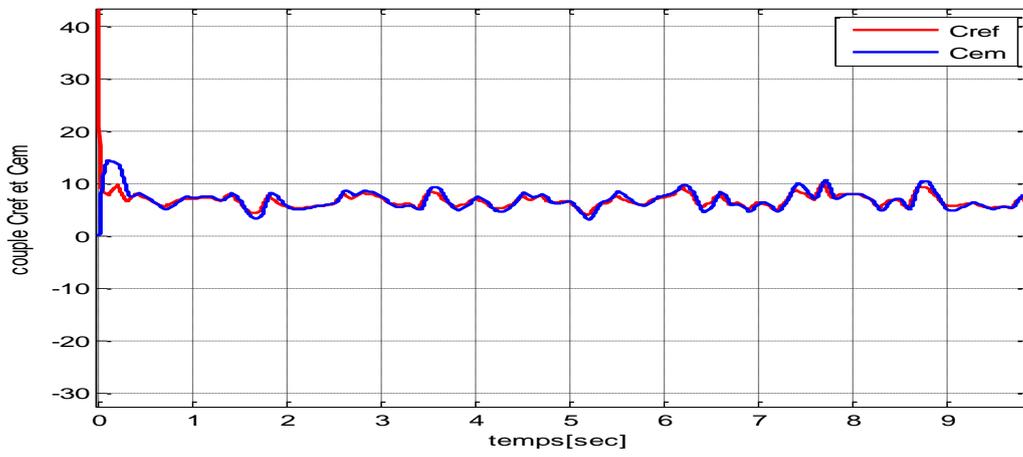


Figure III.16 l'allure de couple (N.m)

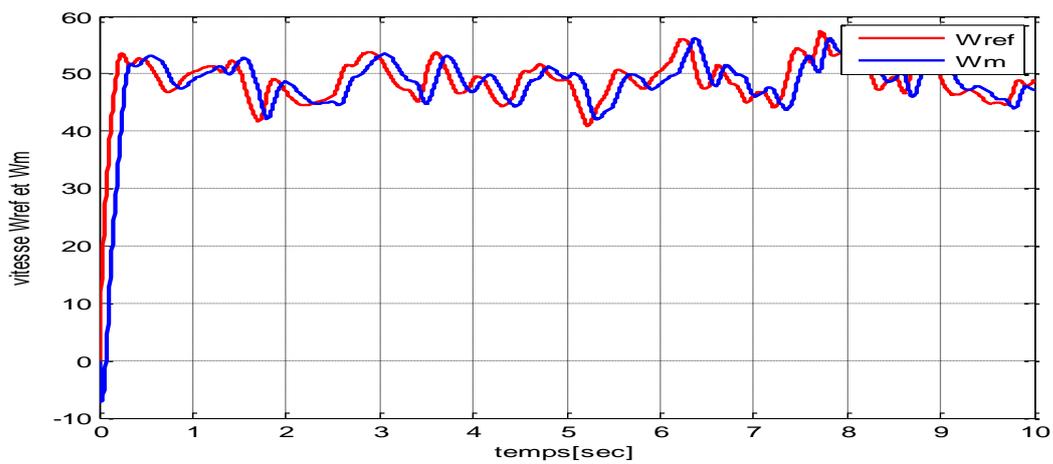
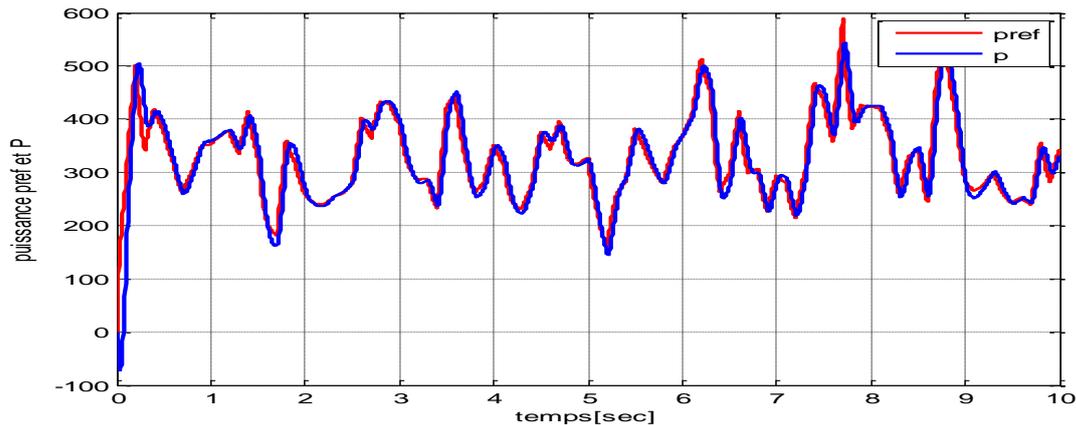


Figure III.17 l'allure de vitesse (rad/sec)



**Figure III.18** L'allure de puissance (watt)

- **Interprétations**

On a vérifié dans ce test la robustesse de notre système par les changements brusque et répétés de la vitesse du vent, il est à remarquer la bonne poursuite des différentes grandeurs (vitesse, puissance, couple, courant). On remarque toujours que le courant  $i_q$  est l'image couple tan dis que le courant  $i_d$  est maintenue presque nul.

### III.12 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent pilotée à l'aide d'un convertisseur électronique à commande MLI.

Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un des 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.

Dans le but d'augmenter ce degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système, il faut réfléchir à d'autres type des commandes plus avancés comme la commande par les réseau de Neurones de la GSAP qui sera l'objectif du chapitre suivant.

***Chapitre IV :***

***Commande intelligente de la GSAP***

### IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent on a appliqué une commande vectorielle sur notre machine, cette dernière donne des bonnes résultats (une bonne poursuite au référence), mais dans le cas des systèmes linéaires a paramètres constantes.

Dans les systèmes non linéaires ou il y a des changements paramétriques cette commande peut être insuffisante est non robuste, donc on va l'améliorer par une autre commande intelligente qui va renforcer. On va utiliser un système de commande adaptative à base de réseaux de Neurones artificielle (RNA).

Dans ce chapitre on détaillera le principe de fonctionnement des RNA. Ensuite on introduira cette technique intelligente dans la commande de la GSAP.

### IV.2 Définition

L'intelligence artificielle est une branche de l'Informatique fondamentale qui s'est développée énormément dans nos jours. Elle a pour objectif d'assimiler ou d'introduire le fonctionnement du cerveau dans des applications industrielles [32].

Les réseaux de Neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés des processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle, chaque un de ces processeurs calcule une sortie unique qui s'appelle la cible sur une base de données qu'il reçoit (l'entrée) [33].

D'autre façon, ils sont des cellules de base du système nerveux central. Chaque neurone reçoit des influx nerveux à travers ses dendrites (récepteurs), les intègre pour en former un nouvel influx nerveux qu'il transmet à un neurone voisin par le biais de son axone (émetteur).



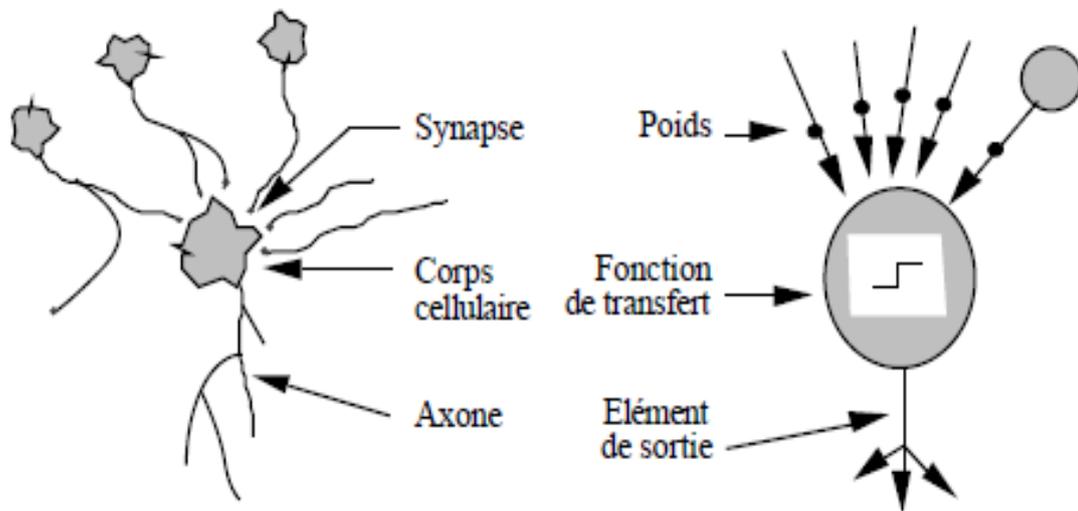
**Figure IV.1** Schéma fonctionnel du système nerveux [34].

### IV.3 Structure de RNA

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est

par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone.

La figure suivante (IV.2) montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids  $w$  (abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids [33].

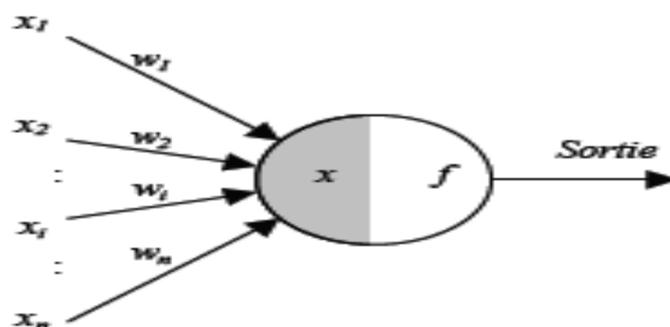


**Figure IV.2** Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel [33].

### IV.3 Principe de fonctionnement du réseau de Neurone

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation du neurone biologique par Warren McCulloch et Walter Pitts. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés [35].

Le schéma suivant présente un neurone formel :



**Figure IV.3** Représentation d'un neurone

Les entrées du neurone sont désignées par  $x_i$  ( $i=1\dots n$ ). Les paramètres  $w_i$  reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par :

$$\text{sortie} = f(x) \text{ avec } x = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (IV.1)$$

Avec :

$x$  : est l'état d'activation du neurone (également appelé état ou activité).

$f$  : est la fonction d'activation du neurone.

Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde.

Leur choix revêt une importance capitale comme nous le verrons par la suite.

Les réseaux de neurones sont constitués des neurones élémentaires connectés entre eux par l'intermédiaire des poids qui jouent le rôle des synapses. L'information est portée par la valeur de ces poids tandis que la structure du réseau de neurones ne sert qu'à traiter cette information et à l'acheminer vers la sortie.

Le réseau de neurones fait partie des Réseaux Adaptatifs Non-linéaires, cela signifie que ses agents (neurones) s'organisent et modifient leurs liens mutuels lors d'une procédure fondamentale qu'est l'apprentissage. Pour une tâche précise l'apprentissage du réseau de neurones consiste donc à adapter les différents poids  $w_i$  [36].

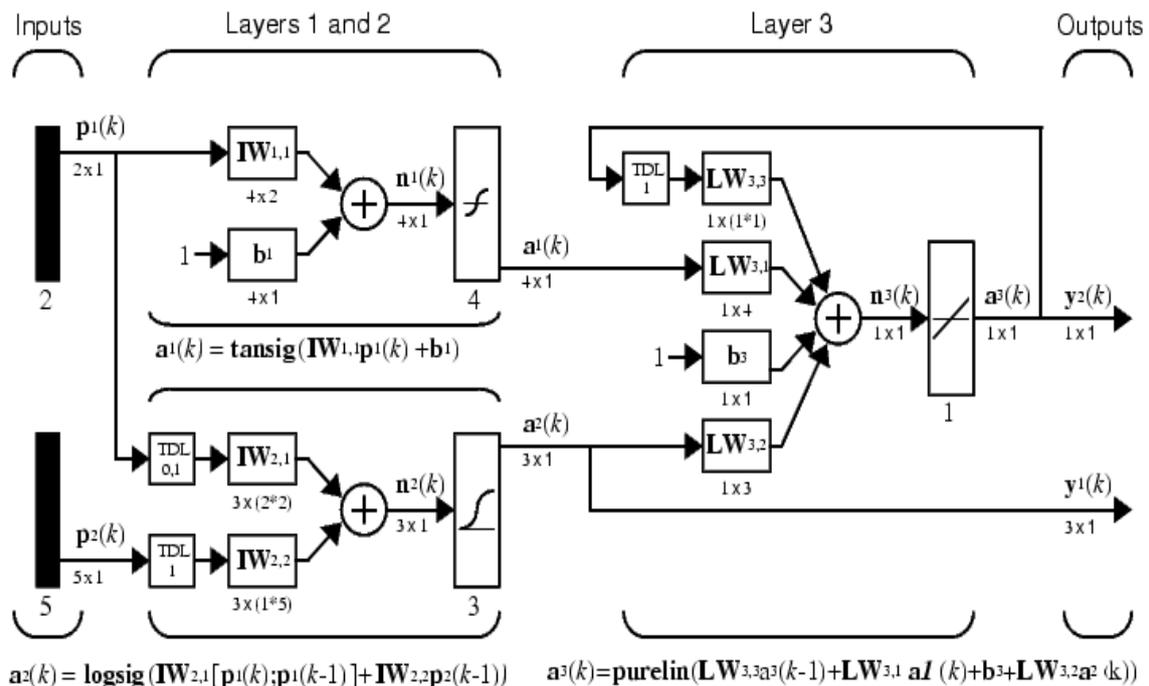


Figure IV.4 Principe de fonctionnement de RNA [39]

#### IV.4 Fonctions d'activation

On distingue deux phases. La première est habituellement le calcul de la somme pondérée des entrées (a) selon l'expression suivante :

$$a = \sum(W_i \cdot e_i) \quad (IV.2)$$

A partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones aval. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur la figure (IV.3).

La fonction de transfert ou d'activation, non linéaire et croissante, permet d'introduire un seuil et une saturation. Dans la technique de rétro propagation, l'algorithme fait intervenir la dérivée de cette fonction. Il est alors intéressant d'utiliser des fonctions dont la dérivée est facile à calculer. Les fonctions les plus courantes sont les sigmoïdes unipolaire et bipolaire transformant respectivement l'intervalle  $[-\infty; \infty]$ , en  $[0; 1]$  et  $[-1; 1]$  ainsi que la fonction tangente hyperbolique.

- **La fonction sigmoïde unipolaire**

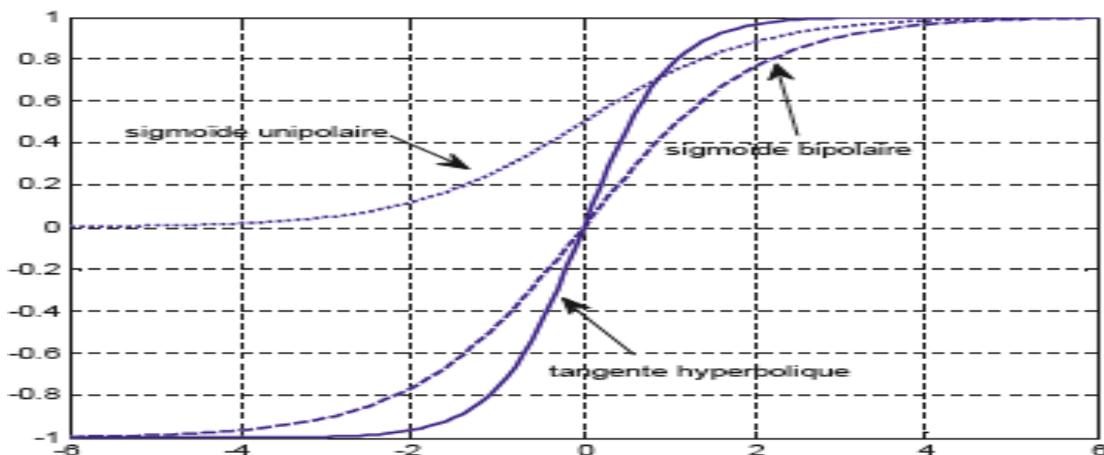
$$F(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (IV.3)$$

- **La fonction bipolaire**

$$F(x) = \frac{1-e^{-x}}{1+e^{-x}} \quad (IV.4)$$

- **La fonction hyperbolique**

$$F(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (IV.5)$$



**Figure IV.5** Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel

IV.5 Type de réseau de Neurones

IV.5.1 Perceptrons multicouches (MLP)

Ce sont les réseaux de neurones les plus connus. Un perceptron est un réseau de neurones artificiel du type *feedforward*, c'est à dire à propagation directe. Sur l'exemple suivant nous présentons un perceptron à trois couches. La première est celle des entrées (elle n'est cependant pas considérée comme couche neuronale par certains auteurs car elle est linéaire et ne fait que distribuer les variables d'entrées). La deuxième est dite couche cachée (ou couche intermédiaire) et constitue le cœur du réseau de neurones. Ses fonctions d'activation sont du type sigmoïde. La troisième, constituée ici par un seul neurone est la couche de sortie. Sa fonction d'activation est du type linéaire bornée [37].

Le perceptron multicouche est très utilisé en identification et en contrôle. Avec une couche cachée, il constitue un approximateur universel. De récentes recherches montrent qu'il peut être entraîné de manière à approximer n'importe quelle fonction entrées-sorties sous réserve de mettre suffisamment de neurones dans la couche cachée et d'utiliser des sigmoïdes pour les fonctions d'activation. Bien entendu, les théorèmes mathématiques ne démontrent pas qu'un réseau à une seule couche cachée est optimal [38].

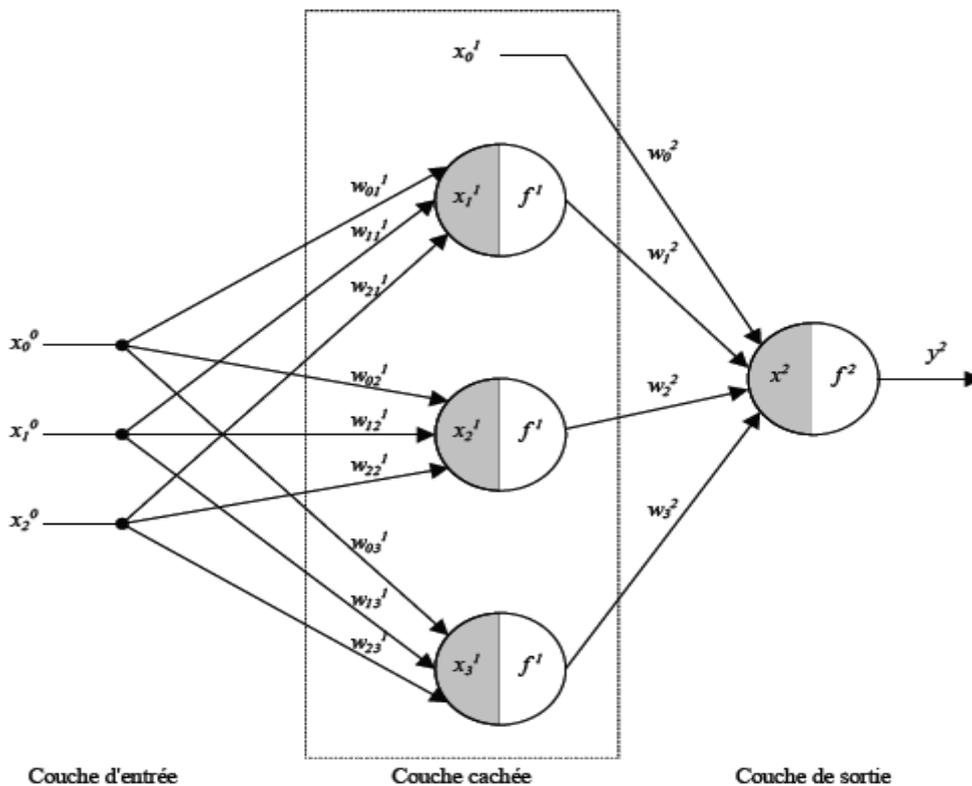


Figure IV.6 Réseau de neurones de type perceptron à une couche cachée(MLP)

### IV.5.2 Réseaux de neurones à fonction de base radiale (RBF)

Les réseaux de neurones à fonction de base radiale (Radial Basis Functions) sont des réseaux de neurones à une seule couche cachée dont les fonctions d'activation sont des fonctions à base radiale, le plus souvent des gaussiennes. La fonction d'activation du neurone de la couche de sortie est l'identité. Les entrées sont directement connectées aux neurones de la couche cachée.

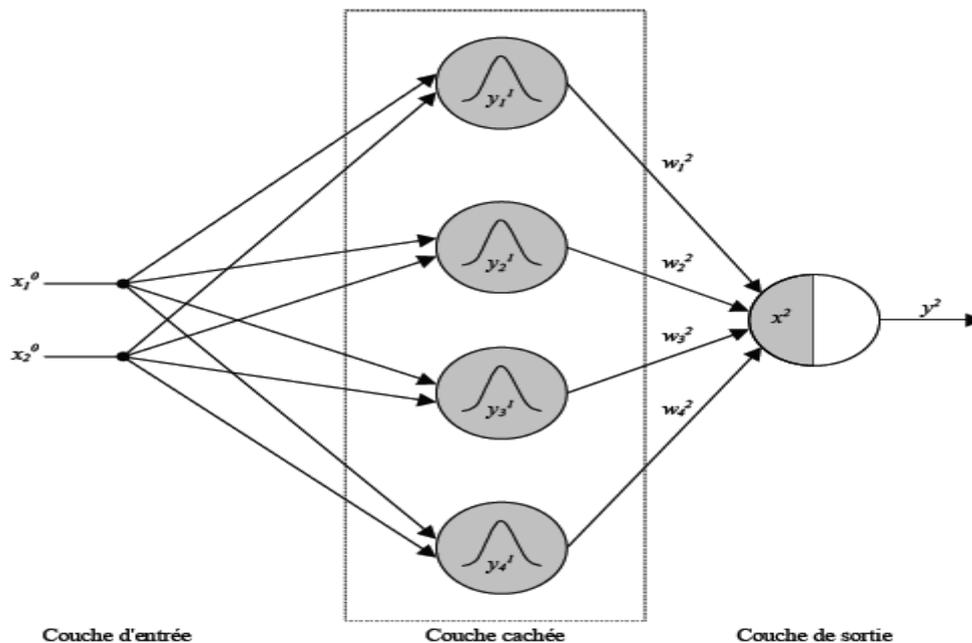


Figure IV.7 Réseau de neurones de type RBF

### IV.6 Caractéristiques de réseau de Neurone

Les RNA sont caractérisés par :

- **Le parallélisme** : Dans un RNA plusieurs informations peuvent se propager en parallèle de façon simultanée, à la différence des calculateurs séquentiels classiques qui ne peuvent traiter qu'une seule information à la fois.
- **La capacité d'adaptation** : Grâce à leur capacité d'apprendre, les RNA tiennent compte des nouvelles données du monde extérieur.
- **Pouvoir de généralisation** : A partir des exemples d'apprentissage, les RNA peuvent deviner des points non appris.
- **Résistance aux bruits** : Le réseau de neurone peut filtrer l'information à partir de données bruitées.
- **Système multi-variable** : Les réseaux de neurones sont naturellement multi-variables. Ils sont directement applicables aux systèmes MIMO (Multi-Input Multi-Output).

- **Modélisation non linéaire** : Comme nous avons vu que la fonction d'activation d'un neurone peut être non linéaire, les RNA peuvent approximer n'importe quelle fonction (linéaire ou non linéaire).

### IV.7 Domaine d'application des RNA

Aujourd'hui, les réseaux de Neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variées [37] :

- Traitement d'images : reconnaissance de caractères et des signatures, compression des images, reconnaissances de forme, cryptage, classification,....etc.
- Traitement de signal : filtrages, identifications de source, traitement de parole, ...
- Contrôle : commande de processus, diagnostique, asservissement de robots, ....
- Optimisation : planification, allocation de ressources, gestion et finances, etc...
- Simulation : simulation de boîte noire, prévision météorologique, recopie de modèle...

### IV.8 L'apprentissage

- **L'apprentissage supervisé**

Dans ce type d'apprentissage, les poids des connexions sont déterminés par les biais d'algorithmes qui consistent à minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie du réseau jusqu'à l'obtention d'une performance acceptable.

- **L'apprentissage non supervisé**

L'adaptation des poids du réseau n'est pas en fonction des erreurs, mais en présentant au réseau une quantité suffisante d'exemples contenant des corrélations de sorte que celui-ci en dégage les régularités automatiquement. Ces réseaux sont souvent appelés « auto-organiseurs » ou encore à apprentissage compétitif.

## IV.9 L'application de le RNA pour commander la GSAP

### IV.9.1 Modèle de la machine

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{w} = \frac{3.p}{2J} \cdot \emptyset f \cdot I_q - \frac{P}{J} \cdot Cr \\ \dot{I}_q = \frac{1}{Lq} (Vq - Rs \cdot I_q - w(Ld \cdot -\emptyset f)) \\ \dot{I}_d = \frac{1}{Ld} (Vd - Rs \cdot I_d + w \cdot Lq \cdot I_q) \end{array} \right. \quad (IV.6)$$

Notre système est compose de deux sous-système

- System (I) : c'est le sous-système de vitesse

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{w} = \frac{3.p}{2J} \cdot \emptyset f \cdot I_q - \frac{P}{J} \cdot Cr \\ \dot{I}_q = \frac{1}{Lq} (Vq - Rs \cdot I_q - w(Ld \cdot I_d - \emptyset f)) \end{array} \right. \quad (IV.7)$$

- System (II) : c'est le sous-système de flux

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_d = \frac{1}{Ld} (Vd - Rs \cdot I_d + w \cdot Lq \cdot I_q) \end{array} \right. \quad (IV.8)$$

### IV.9.2 Programmation du bloc de RNA

#### IV.9.2.1 Système de vitesse

Pour commander ce système avec des réseaux de Neurone il faut d'abord préciser le terme de non linéarité ( $\Delta q$ ) qui représente la cible (target), il est nommé aussi l'erreur d'inversion [40].

Donc :

$$\Delta q = -Rs \cdot I_q - w(Ld \cdot I_d - \emptyset f) \quad (IV.8)$$

Notre système devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{w} = \frac{3.p}{2J} \cdot \emptyset f \cdot I_q - \frac{P}{J} \cdot Cr \\ \dot{I}_q = \frac{1}{Lq} (Vq - \Delta q) \end{array} \right. \quad (IV.9)$$

Cette valeur de  $\Delta q$  sera la cible à estimer par notre RNA avec un minimum de base de données. Pour cela on a créé un programme sur l'environnement MATLAB qui permet d'estimer cette valeur à l'aide de l'instrument « newff ». Le principe de cette dernière est basé sur la création d'un réseau de propagation par feed-forward [39].

La première étape dans la formation d'un réseau à action directe consiste à créer l'objet de réseau. La fonction « newff » crée un réseau à anticipation. Il nécessite trois arguments et renvoie l'objet réseau.

- Le premier argument est une matrice d'échantillons de vecteurs d'entrée d'élément (P).
- Le deuxième argument est une matrice d'échantillons de vecteurs cibles d'éléments (T).
- Le troisième argument est de spécifier les tailles de chaque couche masquée. (La taille de la couche en sortie est déterminée à partir des cibles)[39].
- Le quatrième argument contient le nom de la fonction d'apprentissage à utiliser (tansig, purelin par exemple).

Une fois on a créé notre RNA on passe à la partie d'apprentissage par la fonction « train ». Le train de fonctions effectue une telle boucle de calcul. À chaque passage, le train de fonctions parcourt la séquence d'entrées spécifiée, en calculant la sortie, l'erreur et l'ajustement du réseau pour chaque vecteur d'entrée de la séquence lorsque les entrées sont présentées [39].

La partie suivante est concernée la création des poids et des biais  $N_0$  et  $M_0$ , (weight et bias en anglais), à l'aide de les fonctions « net.IW » et « net.LW ».

### ➤ Control adaptative

Une fois le bloc de la RNA est prés on passe à la création du terme adaptative  $V_{dq}$  qui représente la sortie de notre RNA. Ce terme permettre de surmonter le terme de non linéarité.

Le signal adaptatif est choisi pour être la sortie de bloc RNA :

$$V_{dq} = \hat{M}^T \cdot \sigma(N_0 \cdot \mu_q) \quad (\text{IV.10})$$

Avec :

$\sigma$  : La fonction d'activation.

$N_0$  : Les biais.

$\mu_q$  : Le vecteur d'entrée avec :  $\mu_q = P = [V_q \ w]$  (IV.11)

$\hat{M}^T$  : Est l'estimation de M mise à jour en fonction de la loi d'adaptation suivante :

$$\hat{M} = -Fd[2(\sigma \cdot N_0^T \cdot \mu_q) \cdot \tilde{i}_q + Kd \cdot (\hat{M} - M_0)] \quad (IV.12)$$

Selon que :

$\tilde{i}_q$  : L'erreur de courant en quadrature, avec :

$$\tilde{i}_q = i_{qref} - i_q \quad (IV.13)$$

Et Kd et Fd sont des gains à définir.

#### IV.9.2.2 Système de flux

Le système de flux est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_d = \frac{1}{Ld} (Vd - Rs \cdot I_d + w \cdot Lq \cdot I_q) \end{array} \right. \quad (IV.14)$$

On prend :

$$\Delta d = Rs \cdot I_d + w \cdot Lq \cdot I_q \quad (IV.15)$$

Dans ce système on va faire le même travail qu'on a fait dans le système de vitesse, on remplace seulement le  $\Delta q$  par  $\Delta d$ , et on change les entrées de notre RNA.

Donc on a :

Le terme adaptatif est représenté comme suit :

$$V_{ad} = \hat{M}^T \cdot (N_0 \cdot \mu_d) \quad (IV.16)$$

Avec :

$\sigma$  : La fonction d'activation (logsig, tangsig).

$N_0$  : Les points entre la couche cachée et la couche d'entrée.

$\mu_d$  : Le vecteur d'entrée.

Avec :

$$\mu_d = P = [Vd \ w]$$

(IV.17)

$\hat{M}^T$  est l'estimation de M mise à jour en fonction de la loi d'adaptation suivante :

$$\hat{M} = -Fd[2(\sigma \cdot N_0^T \cdot \mu_d) \cdot \tilde{i}_d + Kd \cdot (\hat{M} - M_0)] \quad (IV.18)$$

Selon que :

$\tilde{i}_d$  : L'erreur de courant en quadrature, avec :

$$\tilde{i}_d = i_{dref} - i_d \quad (IV.19)$$

Et Kd et Fd sont des gains à définir.

IV.10 Les résultats de simulation

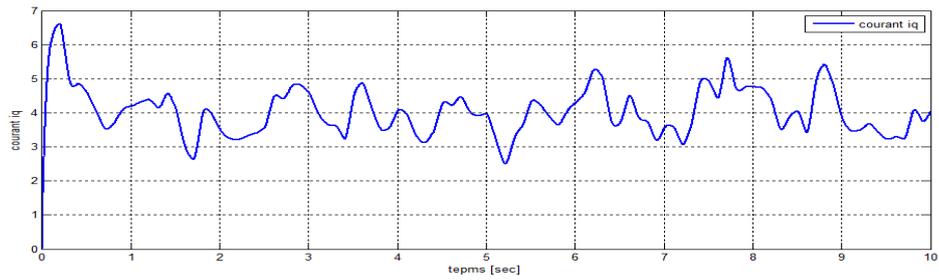


Figure IV.8 L'allure de courant iq (A)

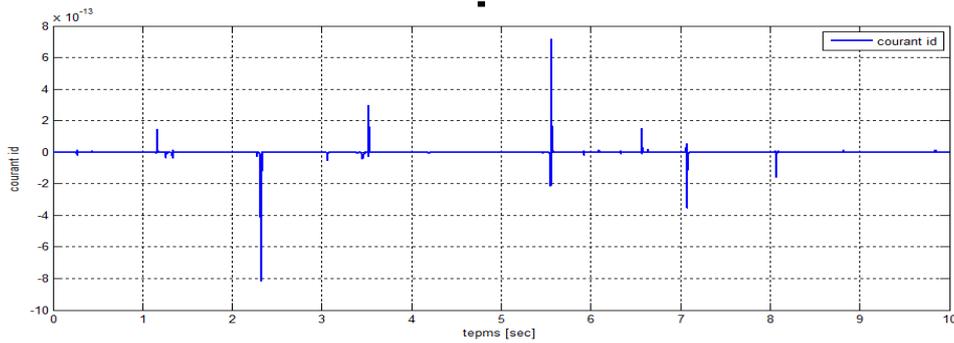


Figure IV.9 l'allure de courant id (A)

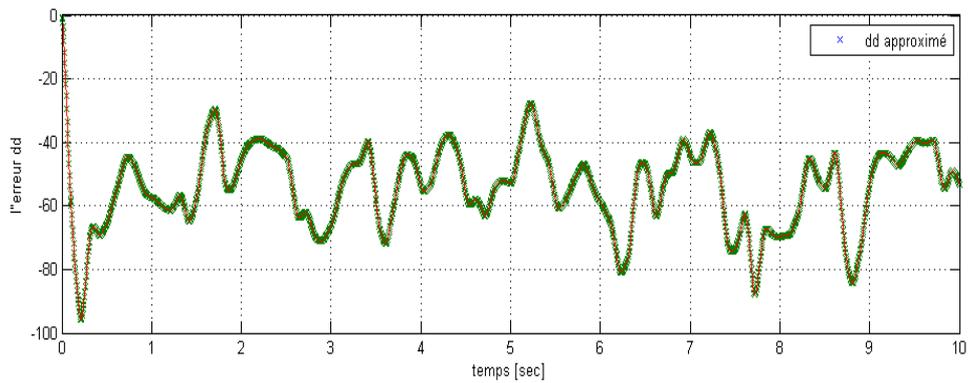


Figure IV.10 L'allure de  $\Delta d$  approximée.

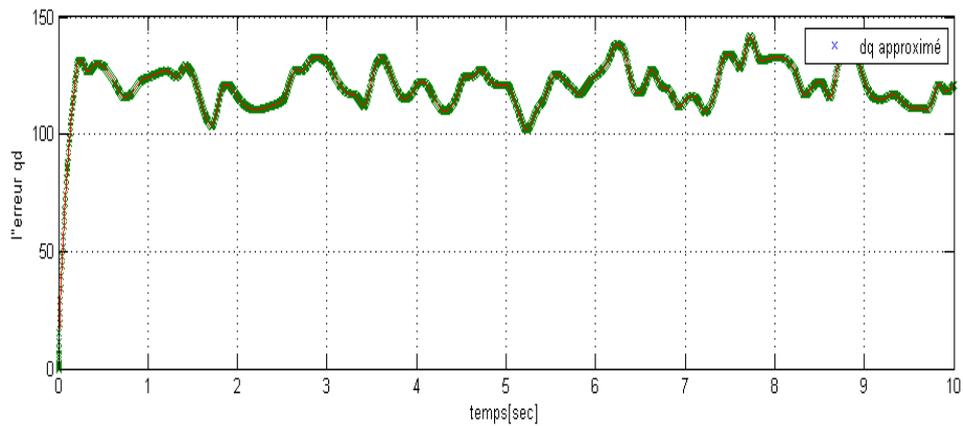


Figure IV.11 L'allure de  $\Delta q$  approximée.

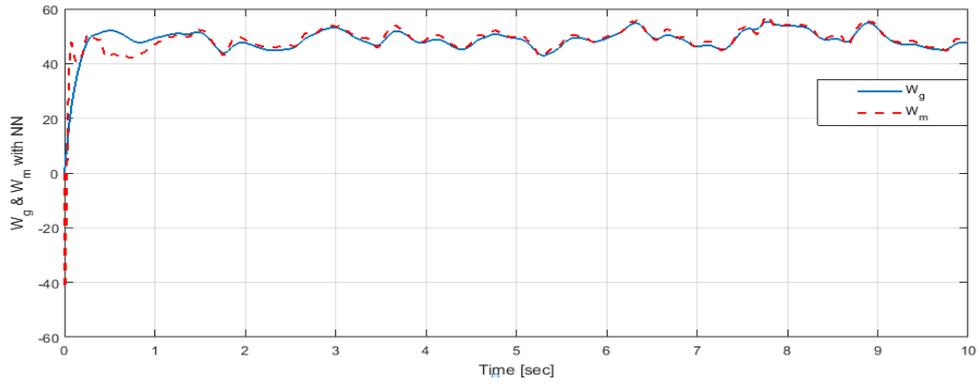


Figure IV.12 L'allure de vitesse (rad/sec).

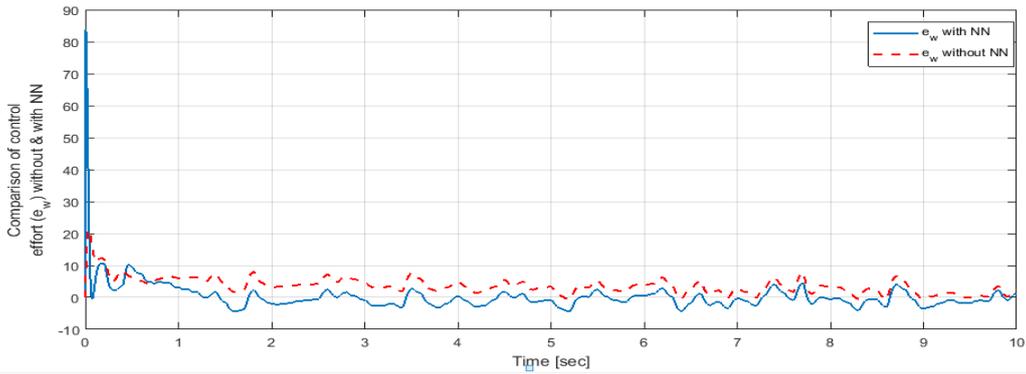


Figure IV.13 L'allure de l'erreur de vitesse avec et sans RNA.

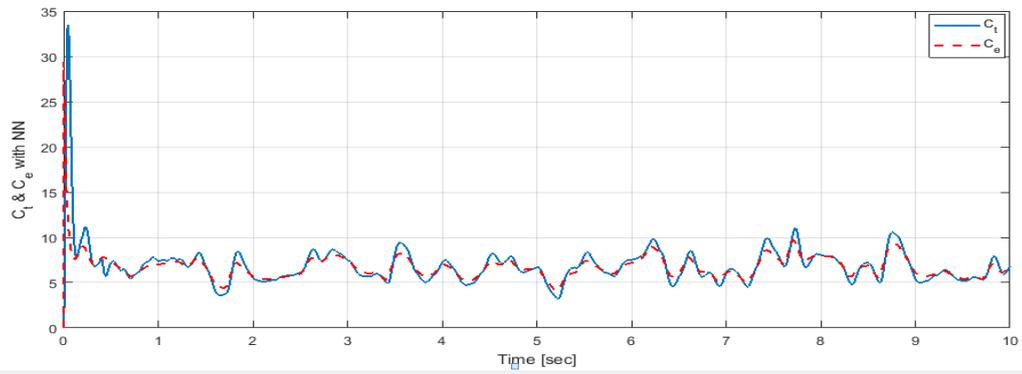


Figure IV.14 L'allure de couple (N.m)

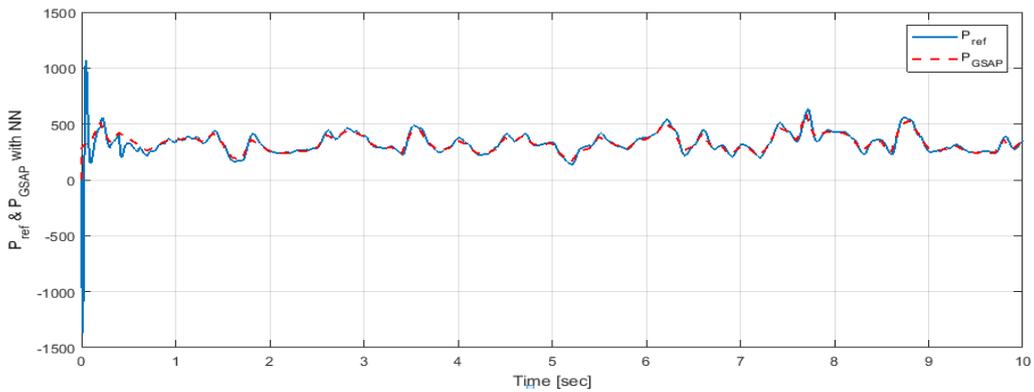


Figure IV.15 L'allure de puissance (watt)

### ➤ **Interprétation des résultats**

Les résultats montrent l'évolution des grandeurs mécaniques et électriques de la GSAP en fonction de temps. Pour la vitesse et les tensions, nous remarquons que la poursuite se fait sans dépassement avec un bon temps de réponse, et le rejet de la perturbation se fait efficacement.

### **IV.11 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la technique du RNA appliquée à notre système pour améliorer la commande vectorielle appliquée au 3ème chapitre.

Cette commande dite intelligente est conçue à une analyse de stabilité par l'élimination des erreurs commises dans le système.

Les résultats de simulation obtenus en fin du chapitre montrent la robustesse de cette commande. Ce qui a augmenté le rendement énergétique global de système.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

Dans le cadre de réalisation de mémoire de Master, nous avons choisi travailler sur le thème de commande intelligente d'une chaîne éolienne augmentée par réseaux de Neurone. Cette méthode a pour l'objectif d'améliorer la commande vectorielle classique.

Et pour se faire on a subdivisé notre thème en quatre chapitres

Dans le premier on a présenté des généralités sur les systèmes de conversion éoliennes, à savoir leur définition, historique, et son architecteur. Après on a donné ses différents composants. Puis on a présenté les différents types d'éolienne : Eolienne de petite puissance; éolienne de moyenne puissance; éolienne de grande puissance, (selon la puissance). Et éolienne à axe vertical et axe horizontal (selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice). Et selon la vitesse des turbines (fixe ou variable).

Après on a parlé brièvement sur la machine synchrone à aimant permanents MSAP.

Dans le deuxième chapitre, d'abord élaboré un modèle mathématique pour les différents composants de notre chaîne de conversion éolienne. Ensuite on a revu la modélisation des différents composants du système éolien et utiliser ces modèles pour réaliser la stratégie de commande MPPT. Afin de maximiser la puissance produit par la turbine, ainsi nous avons pu avoir un fonctionnement avec un rendement maximal en tenant le coefficient  $C_p$  à sa valeur optimale. Après on a donné le modèle de la machine dans le repère (abc) et dans le repère de Parck (dq).

Le troisième chapitre, était réservé à la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent. L'objectif de cette commande est de ramener le modèle de cette machine synchrone similaire à une machine à courant continu à excitation séparé. L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la commande choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent.

Finalement dans le quatrième chapitre, on a amélioré la commande vectorielle élaborée dans le chapitre précédent par système de commande par des réseaux de Neurones artificielle (RNA). L'objectif de cette dernière est de la utilisé dans les systèmes non linéaires ou il y a des changements paramétriques.

L'application du la RNA pour la commande GSAP a conduit à des bons résultats de simulations, ce qui montre l'efficacité de cette technique pour le suivi de la vitesse, du couple et la puissance de référence ainsi que le rejet de perturbation. Ce qui augmente le rendement du système global.

## Conclusion générale

---

Finalement, on peut envisager à la lumière de ce travail :

- Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne raccordée au domaine d'application.
- L'association d'un système de stockage d'énergie.
- L'application des contrôles MPPT intelligents pour maximiser la puissance de la turbine.

# Bibliographie

## Références

---

- [1] **MOUSSAOUI TAHA Yacine, HADA Mounir**, mémoire :« Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » ; université EL-OUES, 2015 .
- [2] **HAMZA Soumia** « Conception par la CAO des parties fixes d'une éolienne et les solutions technologiques de liaisons de l'installation ». Université de Biskra.
- [3] **HARIZ Abdelkader Abdelhafid** « Etat de l'Art sur les Energies Solaire et Eolienne en Algérie » université de Biskra 2010.
- [4] **Mlle. Boukheddam Sabrina** « Contribution à la commande d'un système de stockage inertiel », Université A. MIRA – Bejaia, 2015.
- [5] « Etat de l'art sur la conversion éolienne ».pdf
- [6] **Sadkine Smail et Rachedi Aghiles** « Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée » Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016/2017.
- [7] **REDJEM Radia** « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » université Mentouri de Constantine , 2009.
- [8] : Etat de l'art des aérogénérateurs Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nikita.
- [9] [http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/com\\_2011\\_8852\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/com_2011_8852_fr.pdf)
- [10] **NOUARI Aissa et AKKOUCHE Bellal** « commande d'une MASP dédiée a une éolienne par la méthode de backstiping », université de Bouira 2018.
- [11] : **A.DAVINCHY** « participation aux service système de forme d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », université de Lille ,France ,2007.
- [12] **F.KENDOULI** « central éolienne et qualité de l'énergie électrique », these doctorat université de Constantine, 2012.
- [13] **S. El-Aimani** « modélisation de défrent technologie intégré dans un réseau de moyenne tension », université de Lille, 2010.
- [14] **L. MOREAU** « modélisation et conseption et commande de la génératrice à reluctance variable basse vitesse », université de Nantes, France, 2005.
- [15] **S.MAGHEL** « contribution l'amélioration et la commande d'une turbine éolienne », Université de Skikda, 2012.
- [16] **IKNI Djamel** « Production d'énergie marine: Intégration de la production éolienne offshore dans un bouquet énergétique décentralisé » l'U.F.R. des Sciences Techniques de l'Université du Havre, France 2014

## Références

---

- [17] **L.LECLERC** « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services système », école doctorale science d'ingénieur, Lille, 2004.
- [18] **C. Haritza** « minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à variable », ENSA, Paris, 2003.
- [19] **K.GHEDEMSI** « contribution la modélisation et la commande des convertisseurs direct de fréquence », ENA, Alger, 20089.
- [20] **Dr. Gary L. Johnson**, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.
- [21] : **A.BOYTE** «contrôle d'un GAS double alimentation avec system de stockage pour le production éolienne », université de Nancy, France, 2006.
- [22] **ROUABHI Riyadh** , «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée», Thèse de doctorat, option : Commande Electrique, UNIV de Batna2, Algérie, 2016.
- [23] **Tarak Ghennam** « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique. Apports des convertisseurs Multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat. Ecole militaire polytechnique Alger. Ecole centrale de Lille - 2011.
- [24] **Loucif .Mourad** «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat de l'Université de A.B.Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.
- [25] **Mirecki .A** « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse présenté pour l'obtention du diplôme de Doctorat préparée au Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique Industrielle de IENSEEIH, Unité Mixte de Recherche CNRS No 5828, 2005.
- [26] **Mr. Noureddine BOUNASLA** « Thème Commande par Mode de Glissement d'ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents » , Université Ferhat ABBAS Sétif-1 (ALGERIE) 2014
- [27] **H. Amrous** « Commandes adaptatives d'une machine synchrone a aimants permanents », mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.

## Références

---

- [28] **IKNI Djamel** « Production d'énergie marine: Intégration de la production éolienne offshore dans un bouquet énergétique décentralisé » l'U.F.R. des Sciences Techniques de l'Université du Havre, France 2014
- [29] **M.I. Hemmami** « Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant », mémoire de Magister, Université de Biskra, 2012.
- [30] **N.S. Amirouche**, « Contribution à la commande adaptative et neuronale d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [31] **Mr. Noureddine BOUNASLA** « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents », Université Ferhat ABBAS Sétif -1,2014.
- [33] **Claude TOUZET** ; « LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS », INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME, COURS, EXERCICES ET TRAVAUX PRATIQUES, Juillet 1992, pp24.
- [34] **Simon Haykin**; «Neural Networks and Learning Machines » Third Edition ,McMaster University Hamilton, Ontario, Canada
- [35] Jodouin, J-F., *Les réseaux de neurones; principes et définition*, Hermes, 1994, 124p.
- [36] **Lotfi BAGHLI** « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Ecole Doctorale : Informatique-Automatique-Electrotechnique-Electronique-Mathématique,1999.
- [37] Réseaux de neurones artificiels : architectes et applications, Patrice WIRA, laboratoire MIPS université de Haute Alsace.
- [38] **Picton, P**, *Introduction to neural networks*, Ed. Macmillan, 1994, 168p.
- [39] help MATLAB

**Annexes**

## Annexes

---

### **Paramètres de générateur éolien**

- **Caractéristique du vent :**

Vitesse du vent moyenne:  $V_{\text{moy}} = 8 \text{ m/s}$  ;

Masse volumique de l'air :  $\rho = 1.225 \text{ (Kg/m}_3\text{)}$ .

- **Paramètres de la turbine :**

Puissance nominale :  $P_n = 1 \text{ kW}$  ;

Rayon de la turbine :  $R_t = 1.05 \text{ m}$  ;

Moment d'inertie :  $J = 0.021 \text{ Kg. m}$ ;

Frottement :  $f = 0.001 \text{ N.s/rad}$  ;

Le gain de multiplicateur  $G = 1$  ;

- **Caractéristique de la génératrice synchrone à aimant permanent**

$R_s = 0.5 \Omega$ .

$L = 0.16 \text{ H}$ .

$\Phi_f = 0.148 \text{ wb}$ .

$P = 17$ .

# Résumé

---

## Résumé

La mise en oeuvre d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne nécessite une connaissance des moyens de production et de conversion de l'énergie. Dans ce contexte, deux structures, de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) pour deux modes de fonctionnement (connecté au réseau électrique et en mode isolé), ont été modélisées avec des lois de comportement fines.

La modélisation d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) est présentée. L'utilisation du générateur synchrone à aimants permanents rend les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes à cause de la possibilité d'extraction optimale de l'énergie dans les différentes conditions de fonctionnement. A cause de la nature fluctuante du vent qui provoque une variation fréquente de la fréquence à la sortie du GSAP, il est nécessaire de lier ce dernier par une commande.

Différents techniques de commande de la MSAP (Commande vectorielle, contrôle de la tension du bus continu, contrôle direct du couple « DTC », contrôle séparée des puissances ont été développées). On a choisi de travailler avec la commande vectorielle, cette dernière permettant de découpler et réguler le fonctionnement de la MSAP. Et afin de l'améliorer on élaborer un commande adaptative « par réseau de Neurones artificielle».

# Résumé

---

## **Abstract**

The implementation of a wind energy conversion chain requires knowledge of the means of energy production and conversion. In this context, two structures, of the wind energy conversion chain using permanent magnet synchronous machine (MSAP) for two operating modes (connected to the electrical network and in isolated mode), have been modeled with fine behavior.

Modeling of a wind energy conversion chain using a Permanent Magnet Synchronous Generator (GSAP) is presented. The use of the permanent magnet synchronous generator makes the variable speed wind energy conversion systems more attractive than the fixed speed ones because of the possibility of optimum energy extraction under different operating conditions. Due to the fluctuating nature of the wind which causes a frequent variation of the frequency at the exit of the GSAP, it is necessary to link it with a command.

Various control techniques of the MSAP (vector control, control of the DC bus voltage, direct control of the "DTC" torque, separate control of the powers have been developed). We chose to work with the vector control, the latter to decouple and regulate the operation of the MSAP. And in order to improve it we develop an adaptive command "artificial neural network"

---