



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Ahmed Draya d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

*De Projet de fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme de Master en
Commande électrique*

THEME

Commande à base des techniques de l'intelligence artificielle d'une génératrice éolienne

Présenté par :

- **Mimouni Abdelkrim**
- **Yousfi Abderrahim**

Devant le jury :

Président : Dr. Abdi Djillali

Univ. Adrar

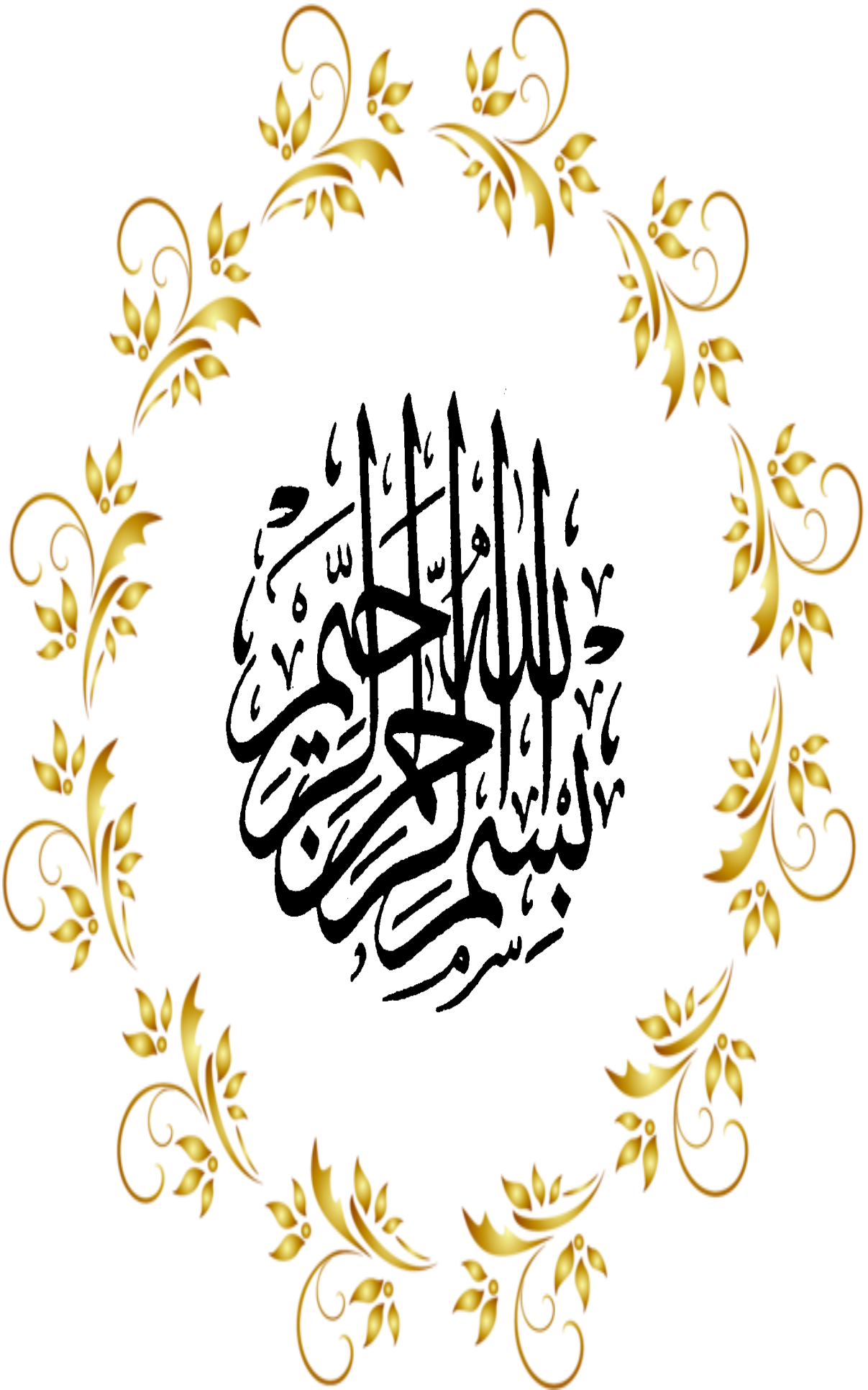
Encadreur : Dr Yaichi Ibrahim

Univ. Adrar

Examineur : Mr. Masmoudi Mohamed

Univ. Adrar

Année Universitaire : 2021/2022



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث البيئوغرافي

الرقم م.م/م.ب.ب.ج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): بجورنتي ابراهيم

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: Commande à base des techniques de l'intelligence artificielle d'une génératrice colienne.

من إنجاز الطالب(ة): ميمو في عبد الكريم

و الطالب(ة): يوسف عبد الرحيم

كلية: علوم وتكنولوجيا

القسم:

التخصص: حتم حرم باي

تاريخ تقييم / مناقشة:

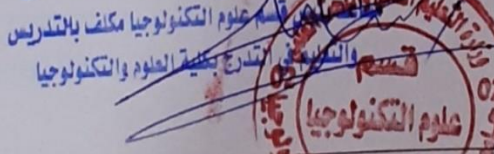
أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
وإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في:

مساعد رئيس القسم:

م.م. بصروي رمضان



Dr. Bournti

The page is framed by a decorative border consisting of a light brown, textured scroll at the top and bottom, and two black, ornate floral motifs on the left and right sides. The central text is on a white, slightly torn-edged paper background.

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je remercie spécialement mon directeur de thèse, Monsieur **Dr. Ibrahim Yaichi**, Maître de conférences « classe A » à l'université D'adrar, pour ses conseils et le partage de ses compétences scientifiques. J'ai également apprécié la grande liberté qu'il m'a accordée dans la gestion de ma thèse ainsi sa passion pour la recherche et sa bonne humeur toujours présente.

Je tiens à remercier **Dr. Abdi Djillali**, Maître de Conférences « classe A » à l'Université d'Adrar, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer mes remerciements aux membres du jury examinateurs

:

Monsieur **Mr. Masmoudi Mohamed**, Maître assistant « classe A » à l'Université d'Adrar, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier les membres de ma famille pour tout ce qu'ils ont fait pour moi durant toute mon existence, qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et mon intime respect.

Je remercie aussi toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce travail à :

Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens tout le long de notre vie scolaire.

Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible pour nous aider.

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.



ABDELKRIM_Mimouni

Dédicaces

دعوات

Je dédie ce modeste travail

**À l'esprit de ma chère mère, A mon père,
A mes frères et sœurs, A toute ma famille,**

**Et Je dédie ce travail à mon meilleur ami et
collègues, Et mes amis partout,
Toute la promotion 2022 d'Electrotechnique.**



ABDERRAHIM-Yousfi

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations et symboles

Introduction générale

CHAPITRE 1 : Généralité sur la system éolien à bas de la MADA

I.1.Introduction	04
I.2.Energies renouvelables	04
I.3.Systèmes éoliens	04
I.3.1. Historique des éoliennes	04
I.3.2. Aperçu sur l'énergie éolienne	05
I.3.3. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale	05
I.3.4. Définition de l'énergie éolienne	05
I.3.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne	06
1.L'énergie cinétique en énergie mécanique	06
2.L'accélération de la vitesse de l'arbre mécanique	07
3.L'énergie mécanique en énergie électrique	07
I.3.6. Principales composantes d'une éolienne	07
1-Les pales	07
2-La nacelle	07
3- Le système d'orientation	08
4- Le mât (ou tour)	08
I.3.7 Etat de l'art sur l'énergie éolienne	09
I.3.7.1. Dimensions pour les éoliennes à venir	09
I.3.7.2. Le vent	10
I.3.7.3. Mesure de la vitesse du vent	10
I.3.8. Application des éoliennes	11
1 Systèmes Isolés	11
2 Systèmes Hybrides	12
3.Systèmes Liés au Réseau	12

I.3. 9.LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES	13
1.Les éoliennes à axe vertical	13
2.Les éoliennes à axe horizontal	14
I.3.10. Avantages & inconvénients de l'énergie éolienne	15
1. Avantages	15
2 . Inconvénients	15
I.4.Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	16
4.1. Générateur synchrone	16
4.2. Machines à structures spéciales	17
4.3. Générateur Asynchrone.....	17
I.5. Evolution des systèmes éoliens à vitesse variable vers la double alimentation.....	18
I.6. Description de la machine asynchrone à double alimentation	18
I.7.Classification des machines à double alimentation	18
.1. Machine à double alimentation simple	18
2. Machine à double alimentation en cascade	19
3. Machine asynchrone à double alimenté sans balai	19
4. MADA à réductance	20
5. MADA "tandem".....	20
I.8.Régimes de fonctionnement de la MADA	20
I.9.Avantages et les inconvénients d'une MADA	21
1.Avantages	21
2.Inconvénients	21
I.10.Conclusion	22

CHAPITRE II : Modélisation du système éolienne à base de la MADA

II.1.Introduction	24
II.2. Systèmes De Conversion Eoliens (SCE)	24
II.3. Modélisation de la partie mécanique	24
II.3.1. Modélisation du vent	24

II.3.2. Modélisation de la turbine éolienne	25
II.3.2.1. Limite de Bet	25
II.3.2.2. Hypothèse la modélisation mécanique de la turbine.....	27
II.3.2.3. Modèle de la turbine	28
II.3.3. Modèle du multiplicateur	29
II.3.4. Modélisation de l'arbre mécanique	29
II.3.5. Stratégie de commande d'une éolienne	30
II.3.6. Méthodes de recherche du point maximum de puissance	31
II.4. Modélisation de la partie électrique	32
II.4.1. Topologie de la MADA	32
II.4.2. Mode de fonctionnement de MADA	33
a. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	33
b. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	34
c. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	34
d. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	35
II.4.3. Modélisation de la MADA	35
II.4.4. Hypothèses simplificatrices	35
II.4.5. Equations mathématiques de la MADA dans le repère (abc)	36
.1. Equations des tension.....	36
.2. Equations des flux	36
.3. Equation mécanique	37
II.4.6. Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park)	38
II.4.7. Modélisation de l'onduleur de tension	41
II.4.8. Simulation du model de la MADA	42
II.5. Conclusion	44

CHAPITRE III :Commande vectoriel directe et indirecte de la MADA

III.1. INTRODUCTION	47
III.2. But et principe de la commande vectorielle	47
III.3. Commande vectorielle de la MADA	49
3.1 - Rappel sur le modèle de la MADA	49

3.2. Commande vectorielle directe	50
3.3. Commande vectorielle indirecte	50
III.4. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	51
A. Equation électriques	51
b. Equations magnétiques	51
III.5. Relation entre courants statoriques et courants rotoriques	51
III.6. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	52
III.7- Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques	53
III.8 -Commande directe des puissances active et réactive	54
III.9. Commande indirecte des puissances active et réactive	54
1-Commande Indirecte sans Boucles des Puissances (en boucle ouverte)	54
2-Commande Indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé)	55
III.10- Etude de la régulation	55
1 - Objectifs de la régulation	55
2. Type des régulateurs utilisés	56
3. Dimensionnement du régulateur PI	56
III.11- Résultats de simulation	57
III.13- Conclusion	62

CHAPITRE IV : Amélioration de la commande de la MADA par la technique de RNA

IV.1. Introduction	64
IV.2. Historique	64
IV.3. Définition des réseaux de neurones	65
IV.4. Objectifs de la commande par les RNA	66
IV.5. Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels	66
IV.6. Les neurones formels	67
IV.7. Modélisation d'un neurone formel	68
IV.8. Fonctions d'activations	70
IV.9. Architecture des réseaux de neurones	72

1-Les réseaux de neurones non bouclés	72
2-Réseaux de neurones monocouches	72
3 Réseaux de neurones multicouches	73
4 Les réseaux de neurones bouclés	73
IV.10.Modèles des réseaux de neurones	74
.1 - Modèle de Hopfield	74
.2 - Modèle de Kohonen	74
.3 - Le modèle de Perceptron	75
4 - Le modèle ADALINE	75
IV.11.L'apprentissage	76
IV.11.1:Types d'apprentissage	76
1:Apprentissage supervisé	76
-2-Apprentissage non supervisé	77
3-Apprentissage auto-supervisé	77
- IV.11.2- Les méthodes d'apprentissage	77
-1-Règle de Hebb	77
2-Retro-propagation du gradient de l'erreur	77
. IV.11.3: Algorithmes d'apprentissages	78
IV.12.LES RESEAUX MULTICOUCHES ET L'APPROXIMATION DE FONCTIONS	
..78	
IV.12.1.LE PERCEPTRON MULTICOUCHE (MLP)	78
1.Structure du réseau	78
2. L'algorithme de la rétropropagation du gradient d'erreur (Back propagation)	78
Cet Algorithme de rétropropagation se résume en Exemple	79
IV.12.2. PROPRIETES ET PROBLEMES	81
1. Propriété d'approximation universelle	81
2. Problème des valeurs initiales des poids du réseau	81
3. Problème du sur-apprentissage	82
4. Problème du réglage du pas d'apprentissage	82
IV.13.Modélisation à l'aide de réseaux de neurones	82
1-Modèle « boîte noire » :.....	82

2-Modèle « boîte grise » ou hybride	83
3-Conception d'un réseau de neurones	83
IV-12-Avantages et inconvénients des réseaux de neurones	83
1-Avantage des réseaux de neurones	83
2-Inconvénients des réseaux de neurones	84
IV.15. Commande vectorielle indirecte par réseaux de neurones	84
IV.16. Résultats de simulation	85
IV.17. Conclusion	88
IV.18. Conclusion générale.....	90

Liste Figure

CHAPITRE 1 : Généralité sur la system éolien à bas de la MADA

Figure I.1: énergie éolienne.....	06
Figure I.2: Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	07
Figure I.3: Principales composantes d'une.....	08
Figure I.4: Evolution de la taille des éoliennes en 20 ans (Compilation de plusieurs sources internet).....	10
Figure I.5: Outils de mesure de la vitesse du vent.....	11
Figure I.6: Systèmes Isolés.....	12
Figure I.7: Systèmes Hybrides.....	12
Figure I.8: Systèmes Liés au Réseau.....	13
Figure I.9: éoliennes à axe vertical.....	14
Figure I.10: éoliennes à axe horizontal.....	14
Figure I.11: Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.....	17
Figure I.12: Schéma de principe d'une simple MADA.....	19
Figure I.13: Schéma de principe de deux MADA en cascade.....	19
Figure I.14 : Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.....	20

CHAPITRE II : Modélisation du système éolienne à base de la MADA

Figure II.1 : Principaux organes du système de convers.....	24
Figure II.2 : Profile du vent.....	25
Figure II.3 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	26
Figure II.4: Coefficient de puissance.....	27
Figure II.5: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	27
Figure II.6: Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	28
Figure II.7: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine.....	29

Figure II.8: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	30
Figure II. 9: Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.....	31
Figure II.10: Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation	32
Figure II.11: Structure du stator et rotor dans une MADA.....	33
Figure II.12 : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	33
Figure II.13 : Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	34
Figure II.14: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	34
Figure II.15: Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	35
Figure. II.16: Représentation schématique de la machine asynchrone.....	36
Figure II.17: Représentation de la GADA dans le repère (dq).....	38
Figure II.18: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	41
Figure II.19: la puissance active.....	43
Figure II.20: puissance réactive.....	43
Figure II.21: courant statorique.....	43
Figure II.22: courant rotorique.....	44
Figure II.23: Comportement de la MADA.....	44

CHAPITRE III : Commande vectoriel directe et indirecte de la MADA

Figure III.1: Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la MCC...	48
Figure III.2 : Schéma bloc du système à commander.....	49
Figure III.3: Orientation du flux statorique.....	51
Figure III.4: Schéma bloc du système à réguler.....	53
Figure III.5: Schéma bloc de la commande directe du puissant.....	54
Figure III.6: Schéma bloc de la commande indirecte (en boucle fermé).....	55
Figure III.7: Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	56
Figure III. 8: Puissance active et réactive de la MADA.....	57
Figure III. 9: Courant rotorique et statorique.....	58

Figure III.10 : harmonique de courant statorique et rotorique.....	58
Figure III.11: Puissance active et réactive de la MADA.....	59
Figure III.12: Courant rotorique et statorique généré par la MADA.....	59
Figure III.13: harmoniques de courants.....	60
Figure III.14: comparaison entre CVD et CVI un facteur la puissance réactive.....	60
Figure III.15: la comparaison entre CVD et CVI un facteur la puissance active.....	61
Figure III.15: Facteur de puissance	61
Figure III.17: Couple électromagnétique.....	61

CHAPITRE IV : Amélioration de la commande de la MADA par la technique de RNA

Figure IV.1: Structure d'un réseau de neurone biologique et le cerveau humain.....	65
Figure IV.2: Modèle d'un neurone artificiel.....	67
Figure IV.3: Représentation matricielle du modèle d'un neurone artificiel.....	69
Figure VI.4 : Fonctions d'activations:(a) du neurone «seuil»;(b) du neurone «linéaire», et(c) du neurone «sigmoïde».....	70
FigureVI.5: Schéma d'un réseau den eurones monocouche.....	72
Figure VI.6: Schéma d'un réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches).....	73
Figure VI.7: Schéma de réseau de neurones boucl.....	73
Figure IV.8: modèle de Kohonen.....	74
Figure IV.9: séparation linéaire entre la classe A et B.....	75
Figure IV.10: Schéma bloc de l'apprentissage supervisé.....	76
Figure IV.11: Algorithme de Rétropropagation.....	79
Figure IV.12: Diagramme schématique d'un modèle neuronal « boîte noire ».....	82
Figure IV.13: Perceptron multicouches: structure (2-3-1).....	84
Figure IV.14: Schéma global de la commande indirecte par réseaux de neurones.....	85
Figure IV.15: Puissance Active et réactive.....	86
Figure IV.16: Puissance Active et réactive.....	87

Liste des Tableau

Tableau I.1: catégories des éoliennes selon leurs puissances.	15
Tableau. IV.1: Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel.....	68
Tableau.IV.2 : Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.....	70
Tableau IV.3 : comparaison entre CVI et RNA.....	85

ABREVIATIONS

CCM : Convertisseur Coté Machine
CCR : Convertisseur Coté Réseau.
FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée.
MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.
MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.
PI : Proportional Intégral.
THD : Total Harmonic Distortion.
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

NOMENCLATURE

V_v	Vitesse du vent	m/s
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	W
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine	W
S	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi \cdot R^2$	m ²
C_p	Coefficient de puissance	=
C_{p-max}	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance	
C_c	Coefficient du couple	
R	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne)	m
G	Gain du multiplicateur	
B	Angle de calage des pales	deg
α	Angle d'incidence des pales	deg
K_p	Composante proportionnelle du correcteur PI	
K_i	Composante intégrale du correcteur PI	
J	Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice »	Kg. m ²
C_F	Couple de frottement visqueux	N.m
λ_{opt}	Vitesse relative optimale	

λ	Vitesse relative ou Ratio de vitesse	
J_t	Moment d'inertie de la turbine	Kg. m ²
J_g	Moment d'inertie de la génératrice	Kg. m ²
Ω_t^*	Vitesse de référence de la turbine	rad/s
Ω_g	Vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
C_t	Couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine	N.m
ρ	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)	Kg/m ³
R_s	Résistance statorique par phase	Ω
R_r	Résistance rotorique par phase	Ω
L_s	Inductance cyclique statorique par phase	H
L_r	Inductance cyclique rotorique par phase	H
M	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor), inductance magnétisante	H
l_s	Inductance propre d'une phase statorique	H
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique	H
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	H
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	H
σ	Coefficient de dispersion de Blondel -	-
p	Nombre de paires de pôles -	-
F_v	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice	N.m.s/rd
C_{em}	Couple électromagnétique de la génératrice	N.m ($S_a S_b S_c$)
	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique	-
	($r_a r_b r_c$) Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques	-

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est un élément crucial de tout développement socio-économique. Elle est devenue un besoin très important que nous ne pouvons pas vivre sans pollution.

La croissance de la demande des énergies électrique est devenue très importante vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructif pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. [01].

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. Les énergies éoliennes peuvent contribuer avec une part significative aux nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre [02].

Le développement des éoliennes présente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables.

L'énergie éolienne peut être utilisée de plusieurs manières soit par la conservation de l'énergie mécanique : le vent est alors utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin. Soit par la transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides, etc.). Ou encore par la production d'énergie électrique, l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour débiter du courant continu ou alternatif [03].

Dans le domaine des entraînements des grandes puissances, il utilise une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier. Il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et « double feed asynchrone machine » (DFAM) en Anglais [02].

L'objectif principal de notre travail consiste à l'étude de la commande d'une éolienne à base d'une MADA par les techniques de l'intelligence artificielle

Ce mémoire est consacré aux quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les énergies éoliennes. On a présenté les principaux composants d'une éolienne et ses différents types, après on a exprimé le principe de conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique. Ensuite, les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens on base sur la machine asynchrone à double alimentation, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés.

Le second chapitre présente une étude sur la modélisation et simulation de système de conversion (turbine et la machine asynchrone à double alimentation) à travers les équations électriques, de tension et flux l'équation mécanique du couple à l'aide de la transformation de Park et certaines hypothèses.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons deux algorithmes de commandes pour obtenir une bonne qualité d'énergie électrique produite par le système. Ces algorithmes permettront de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées ; l'une des applications concerne la commande vectorielle (directe et indirecte) aux moyens de régulateurs PI basée sur l'orientation du flux statorique pour linéariser le modèle de la machine.

Le quatrième chapitre consacré à une commande classée comme un outil d'Intelligence Artificielle, c'est la commande par réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette commande consiste à remplacer les régulateurs proportionnel-intégral (PI) de la puissance active et réactive utilisés dans la commande vectorielle (directe et indirecte) par des régulateurs neuronaux.

CHAPITRE I
Généralité sur la system éolien à bas
de la MADA

I.1.Introduction:

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [04].

Dans ce chapitre, nous nous sommes consacrés aux dernières technologies d'éoliennes telles que les éoliennes et leur contrôle, ainsi qu'aux différents types et compositions d'éoliennes, en particulier les génératrices asynchrones à double alimentation, que nous avons classées.

I.2.Energies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne; la lumière solaire excitant les photopiles; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie [05].

On distingue plusieurs types d'énergie renouvelable:

- L'énergie éolienne
- L'énergie solaire: thermique et photovoltaïque
- L'énergie hydraulique
- La géothermie
- La biomasse

I.3.Systèmes éoliens :**I.3.1. Historique des éoliennes :**

L'utilisation du vent pour alimenter les humains ou les animaux n'est pas nouvelle. La première utilisation de l'énergie éolienne, et sans doute la plus simple, fut la propulsion des voiliers. Cette énergie aide le bateau à avancer et remplace l'énergie des esclaves de cuisine.

En moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Ce type d'éoliennes va se répandre dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades.

Au 16ème siècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois. En 1891, le danois Poule La Cour inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité. Aux débuts du 20ème siècle, a été marquée par la conception de la première

éolienne à axe verticale, même si la puissance générée restait assez faible. Il faut attendre jusqu'à 1957 pour que la puissance atteigne les 200kW par le constructeur Danois Gedser. Mais ce n'est qu'après le premier choc pétrolier en 1973, quand les pays exportateurs de pétrole ont diminué leurs exportations que de nombreux pays se sont lancés dans le marché éolien.

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en termes de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [06].

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés [07]).

I.3.2. Aperçu sur l'énergie éolienne :

I.3.3. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale :

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait : -Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année. -Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes. - Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5 MW. À titre de comparaison, la puissance installée en énergie nucléaire est de 21 000 MW en Allemagne, de 63 000 MW en France et de 98 000 MW aux Etats-Unis [08].

I.3.4. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [09].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.[09]



Figure I.1: l'énergie éolienne

I.3.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne:

1.L'énergie cinétique en énergie mécanique :

La transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de l'arbre lent par les pales : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique mettant en mouvement l'arbre mécanique lent par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les pales sont orientables[10].

2.L'accélération de la vitesse de l'arbre mécanique :

L'accélération de la rotation de l'arbre mécanique par un multiplicateur : les pales de l'éolienne tournent lentement, à une vitesse comprise entre 5 et 15 tours par minute en moyenne. Les générateurs (dans notre cas la machine asynchrone) doivent tourner à une très grande vitesse, de l'ordre de 1000 à 2000 tours par minute pour produire de l'électricité. On intègre donc un multiplicateur pour accélérer la vitesse de l'arbre lent et ainsi obtenir l'arbre rapide [10].

3.L'énergie mécanique en énergie électrique :

La création d'électricité par la machine asynchrone : l'énergie mécanique transmise par l'arbre rapide fait tourner le rotor de la machine asynchrone à grande vitesse. La rotation du rotor crée un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ magnétique tournant va permettre la création d'électricité. Cette électricité est fournie au réseau.[07]

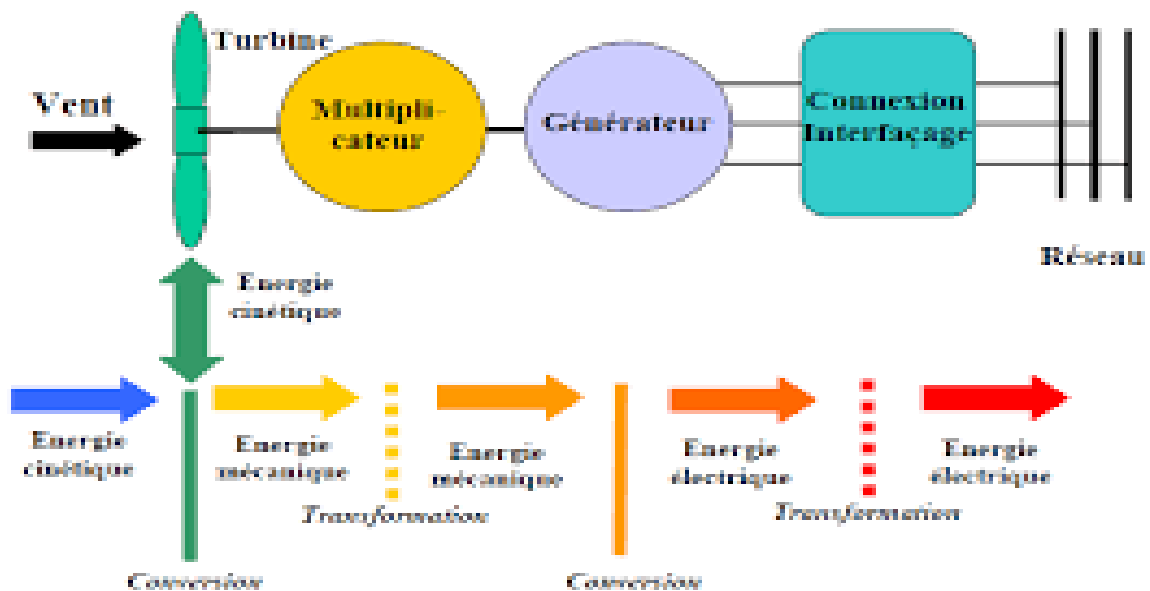


Figure I.2: Principe de fonctionnement d'une éolienne

I.3.6. Principales composantes d'une éolienne:

Le système éolien est généralement constitué des éléments principaux Comme le montre dans la figure

1- Les pales:

Sont un dispositif aérodynamique (surface portante) en matériaux composites à base de fibres de verre, de plastique ou de bois. Leur conception est le fruit d'études aérodynamiques diverses. Les pales sont fixées à un moyeu pour former le rotor. Elles sont destinées à tourner autour de l'axe du rotor dès la présence de vent suffisant.

2- La nacelle :

C'est l'enveloppe qui protège la boîte d'engrenages, le générateur et les autres composants contre l'action des éléments de dégradation. Elle renferme :

- **Un moyeu** pourvu d'un système qui lui permet d'orienter les pales afin de réguler leur vitesse de rotation.
- **Un rotor**, qui transforme l'énergie cinétique reçue des pales en énergie mécanique de rotation.
- **Des freins** permettant d'arrêter les pales pour les cas de vitesses de vent très fortes qui pourraient endommager l'éolienne ou la rendre incontrôlable.
- **Un multiplicateur**, qui est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. Il permet de réduire le couple et/ou d'augmenter la vitesse de rotation.
- **Un générateur** assurant la production électrique en transformant l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il fonctionne comme un alternateur (produisant du courant alternatif) ou une dynamo (produisant du courant continu). De nos jours, l'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- **Un système de régulation électrique** servant à ralentir le rotor du générateur en cas de surrégime.
- **Un système de refroidissement** à huile, à eau ou à air, destiné au multiplicateur et au générateur.

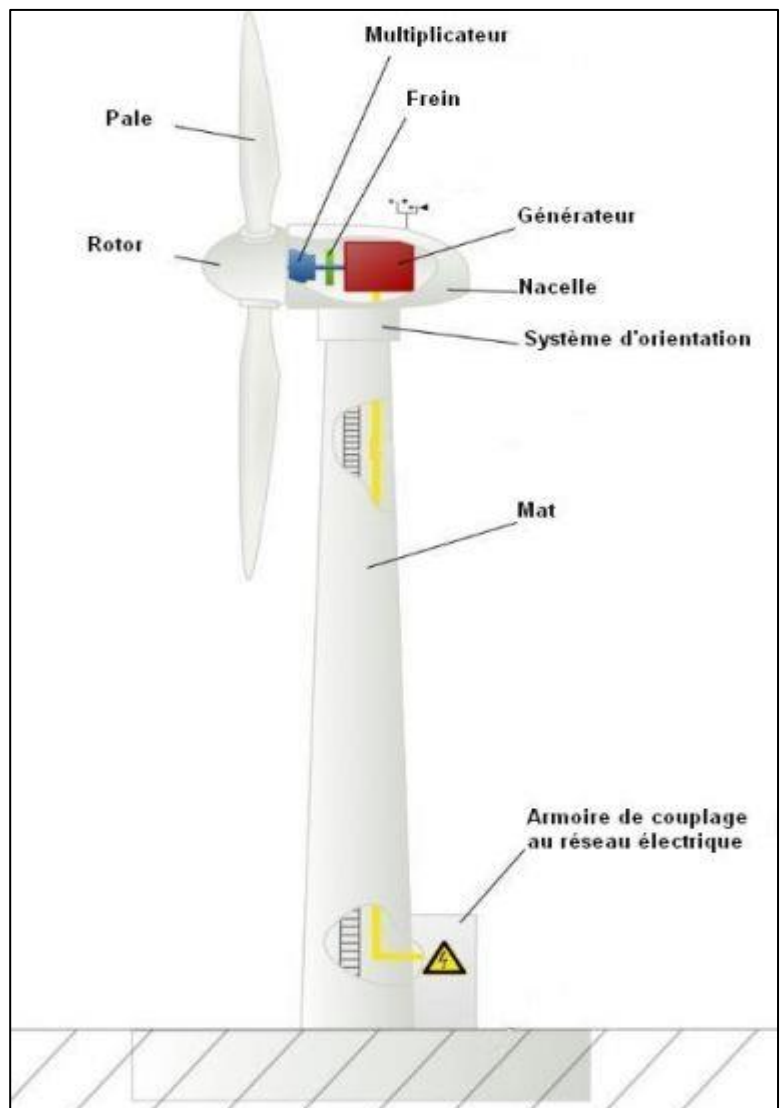


Figure I.3: Principales composantes d'une éolienne

.3. Le système d'orientation :

C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter les pales de l'éolienne face au vent (dans l'axe du vent) et de les verrouiller.

.4. Le mât (ou tour) :

C'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante car plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente, mais en même temps le coût de la structure augmente aussi. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre du rotor [11].

I.3.7Etat de l'art sur l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Eole, connu en Grèce antique comme le maître des vents. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie calorifique du Soleil : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer de systèmes d'énergie propres durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales [12].

I.3.7.1. Dimensions pour les éoliennes à venir :

La taille des éoliennes est en constante évolution, en 20 ans les dimensions ont été multipliées par un facteur proche de 10 (**Figure I.2**). Ainsi le record récemment établi par Alstom avec l'inauguration, début 2012 de la plus grande éolienne du monde (6 MW pour un diamètre de rotor de 150 m, nacelle distante de 100 m du sol) sur le site du Carnet en Loire Atlantique vient d'être battu par Siemens. Depuis octobre 2012, le groupe a en effet mis en service à Astrild (Danemark) une machine de même puissance mais dotée d'un rotor de 154 m de diamètre et on annonce déjà pour 2020 des machines de 10 MW avec des rotors de 200 m de diamètre [13].

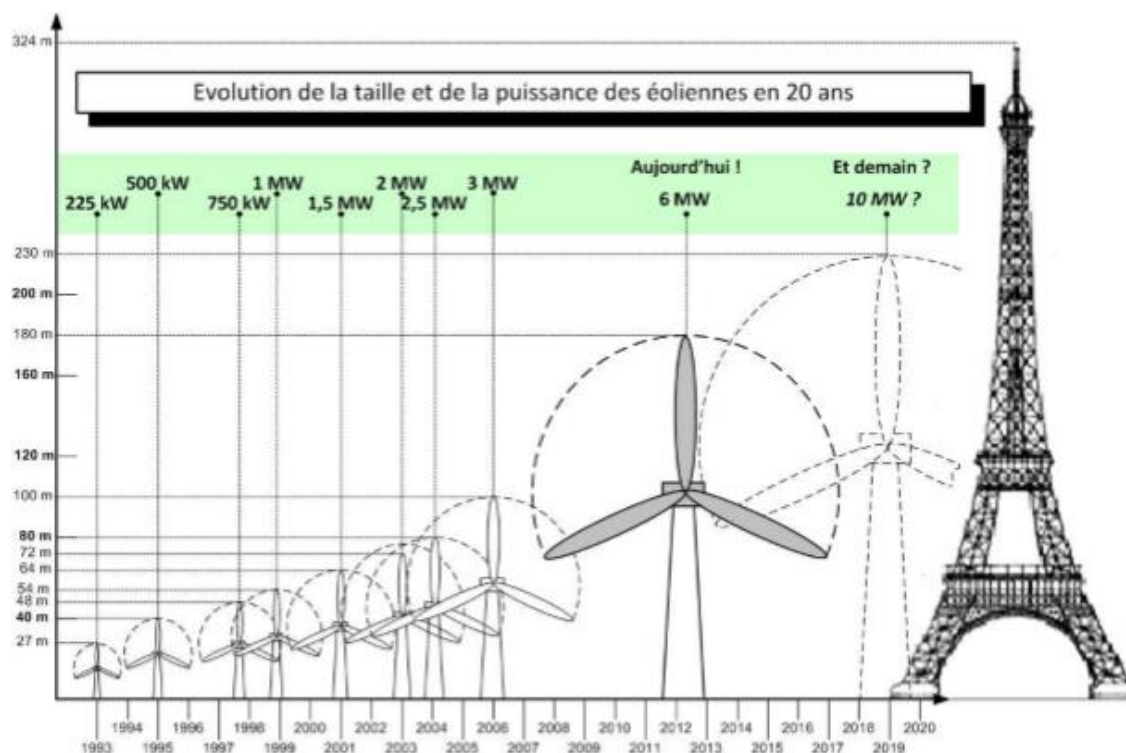


Figure I.4: Evolution de la taille des éoliennes en 20 ans (Compilation de plusieurs sources internet)

I.3.7.2. Le vent :

Le vent est le mouvement des masses d'air résultant du réchauffement inégal de la surface de la Terre par le Soleil. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués par deux phénomènes se produisant simultanément : un réchauffement inégalement reparti à la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète. Jusqu'à environ 100 m de hauteur, l'influence de la surface du sol sur les vents est importante. Ainsi, la rugosité du terrain et les obstacles naturels ou artificiels peuvent freiner les vents. A cette hauteur, le vent devient donc plus fort et plus régulier. Le vent est une variable dans le temps et selon l'endroit [12].

I.3.7.3. Mesure de la vitesse du vent :

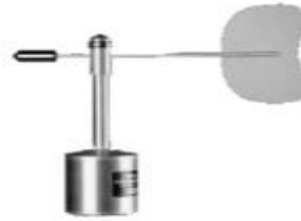
La composante horizontale du déplacement de l'air en un point et à un instant donné se dispose selon une certaine direction. Elle atteint en outre une vitesse déterminée appelée « vitesse du vent ». Elle est mesurée généralement en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h), mais aussi en nœuds ou miles par heure.

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles. Un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse de rotation est enregistrée

électronique ment. En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent. Au lieu de couple les, l'anémomètre peu tête munie d'une hélice, une solution qui est cependant assez rare [12].



A:anemometer



b:pirouette

Figure I.5: Outils de mesure de la vitesse du vent

I.3.8. Application des éoliennes :

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

1. Systèmes Isolés :

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général utilisent quelques formes de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipement qui opère avec un réseau alternatif, il est nécessaire d'utiliser un onduleur [14].

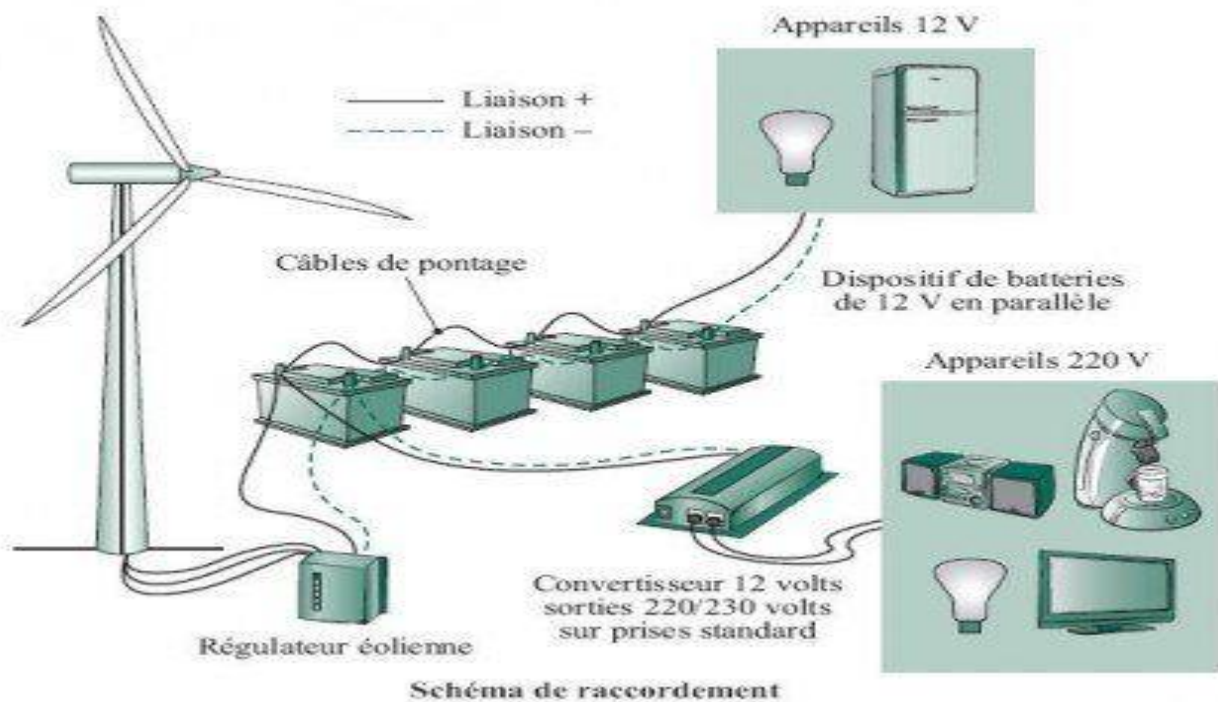


Figure 1.6: Systèmes Isolés

2. Systèmes Hybrides :

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme par exemple, turbines éoliennes, génératrice Diesel, modules photovoltaïques, entre autres. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur [14].



Figure I.7: Systèmes Hybrides

3. Systèmes Liés au Réseau :

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne est raccordée à des grands réseaux de puissance. Ceci s'explique par les nombreux avantages du fonctionnement des centrales éoliennes sur les réseaux :

- La puissance des turbines éoliennes ne doit pas être nécessairement commandée en fonction de la demande instantanée d'un client spécifique,
- Le manque de puissance délivrée par les éoliennes est compensé par les centrales conventionnelles, ainsi, le fonctionnement des turbines éoliennes connectées aux réseaux est techniquement moins complexe que son application individuelle isolée[14].

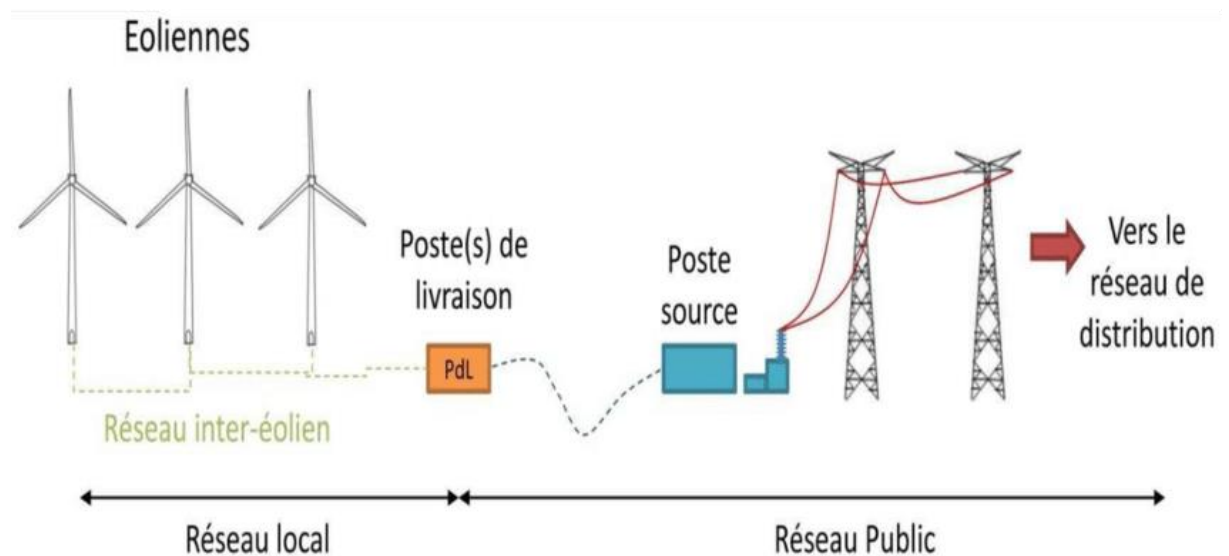


Figure I.8: Systèmes Liés au Réseau

I.3.8.LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :

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

1.Les éoliennes à axe vertical :

Ces éoliennes ont un axe de rotation à la verticale du sol et presque perpendiculaire à la direction du vent. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que l'unité de production d'énergie est au sol, il n'est donc pas nécessaire de construire une tour. De plus, les éoliennes à axe vertical fonctionnent quelle que soit la direction du vent, éliminant ainsi le besoin de moyens d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de

charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité.

Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par l'haubanage est très conséquente.

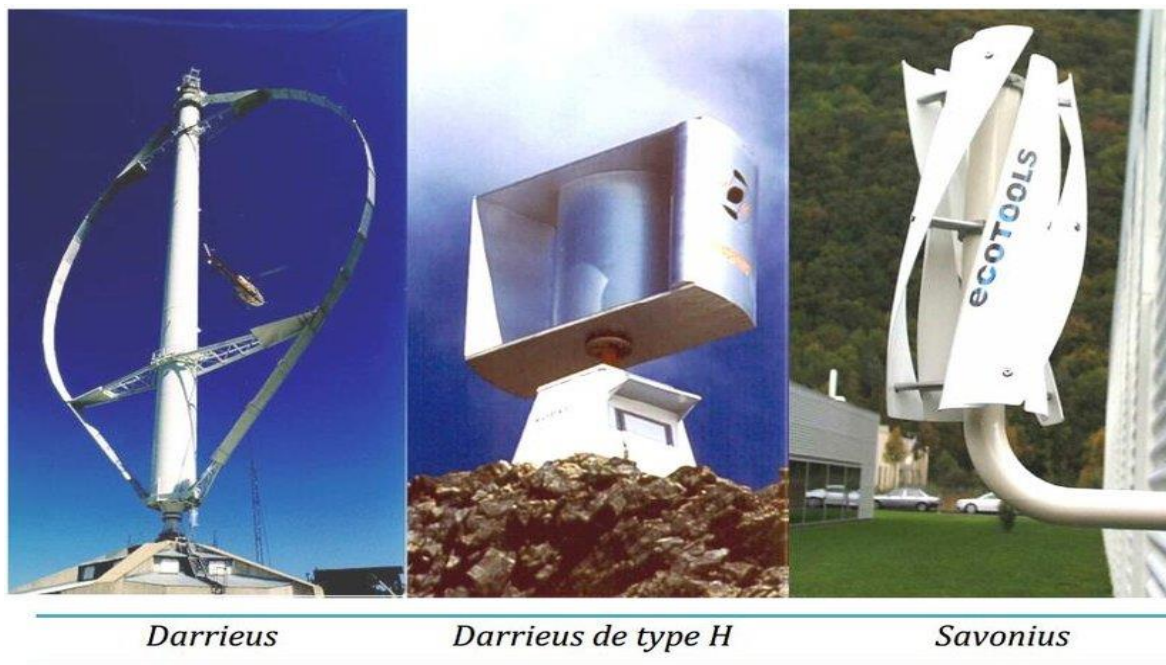


Figure I.9: Les éoliennes à axe vertical

2. Les éoliennes à axe horizontal :

L'axe de rotation de ces éoliennes est au niveau du sol, mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La plupart des éoliennes sur le marché entrent dans cette catégorie. Bien qu'ils nécessitent généralement un mécanisme d'orientation des pales, ils ont toujours une efficacité aérodynamique plus élevée. De plus, ils démarrent de manière autonome et ont une faible empreinte au sol.

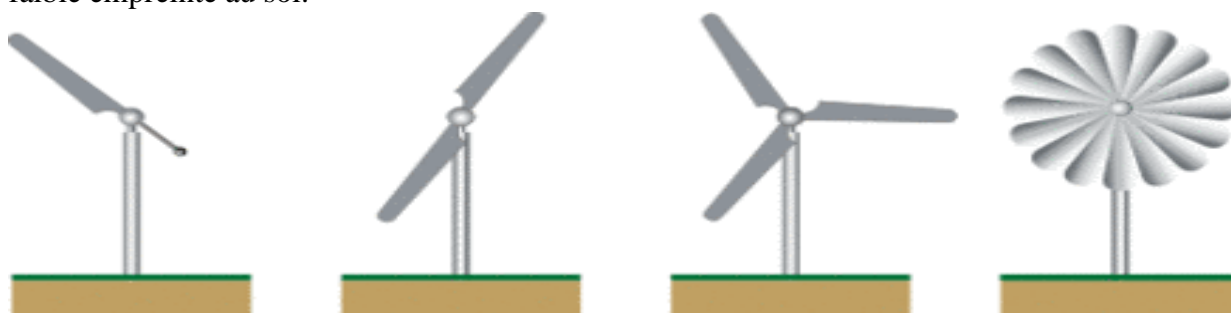


Figure I.10: Les éoliennes à axe horizontal

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de

mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse.

Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12 m	< 40 kW
moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
grande puissance	> 46 m	> 1 MW

Tableau I.2: Les catégories des éoliennes selon leurs puissances

I.3.9. Avantages & inconvénients de l'énergie éolienne :

1. Avantages :

Les évolutions technologiques ont permis de développer des éoliennes et par la suite de rendre la conversion de l'énergie éolienne de plus en plus rentable. En effet, les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. L'avantage de ce fonctionnement est que la puissance maximale peut être utilisée à toutes les vitesses de vent (efficacité énergétique optimale), améliorant ainsi la qualité de l'énergie électrique produite par rapport à une éolienne fonctionnant à vitesse fixe.

La demande croissante de l'énergie rend les éoliennes parmi les technologies les plus efficaces pour remédier aux problèmes de réchauffement climatique et de l'épuisement des ressources pétrolières.

Il s'agit d'une énergie considérable et puissante ; en plus, elle est propre, abondante et sans risque. Contrairement aux combustibles conventionnels, cette énergie est presque disponible dans chaque coin du monde et peut donc alimenter les sites isolés non raccordés au réseau électrique général.

Outre ces nombreux avantages, l'énergie éolienne a d'autres atouts à savoir qu'elle est modulable et peut être parfaitement adaptée au capital disponible ainsi qu'aux besoins en énergie. En plus, la période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante. Un autre avantage très important de ce type d'énergie est le fait qu'elle ne soit pas soumise aux variations de coûts de combustibles (surtout avec l'évolution du prix du baril de pétrole).

.2 Inconvénients :

L'inconvénient majeur de cette énergie réside dans le fait que le vent, source de l'énergie électrique produite, est une grandeur stochastique ; elle est variable dans le temps et dans l'espace. Cette variabilité est amplifiée par le fait que l'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Dans le cas d'installations autonomes, il est donc nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui

augmente le coût. Dans le cas d'un couplage au réseau, les éoliennes peuvent entraîner une perturbation de sa stabilité.

Ce problème devient de moins en moins important grâce à l'utilisation de l'électronique de puissance. L'effet le plus important de l'éolienne sur l'environnement est son effet visuel, il est donc important de bien l'intégrer dans le paysage. Le bruit produit par une éolienne est de plus en plus minime, comparable à celui d'un ruisseau distant de 50 à 100 mètres et certainement très faible comparé au bruit du trafic routier ou aérien.

I.4. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne :

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité.

Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [14].

4.1. Générateur synchrone:

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts.

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesse. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique Figure(9), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petite taille, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20KW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [14].

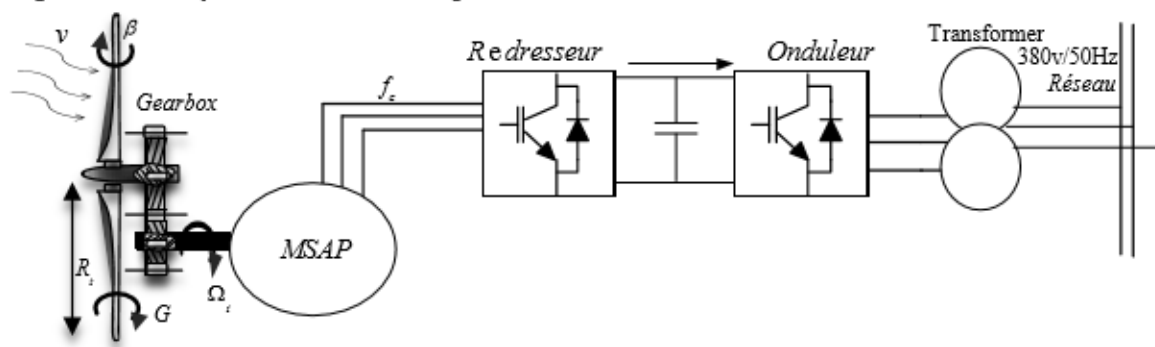


Figure I.11: Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

4.2. Machines à structures spéciales:

Conçues au départ pour produire des courants de fréquence élevée, les machines à réluctance variable (MRV) sont principalement destinées à des applications exigeant de grandes vitesses de rotation ou des entraînements lents à couple élevé. Elles sont également utilisées comme actionneur de positionnement électromécanique tel que les moteurs pas à pas.

On distingue deux types de structures de MRV, les machines à réluctance non-excitées et les machines à réluctances excitées :

- Les MRV non-excitées sont principalement destinées à des fonctionnements à hautes vitesses, ne possèdent pas de contact glissant et sont très robustes. L'inconvénient majeur est qu'elles possèdent un facteur de puissance médiocre.
- Les MRV excitées pallient à ce problème de facteur de puissance en intégrant une excitation constituée d'une alimentation continue et de bobines ou d'aimants permanents.

L'application des machines à réluctance dans les systèmes éoliens est plutôt rare, cependant certaines éoliennes intègrent, comme alternateur de moyenne puissance, des machines à réluctances excitées à denture répartie. L'excitation est plus souvent réalisée par des aimants permanents, on parle alors de machines hybrides [14].

4.3. Générateur Asynchrone:

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 90, les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant[14].

I.5. Evolution des systèmes éoliens à vitesse variable vers la double alimentation

La machine asynchrone double alimentation (MADA) joue un très grand rôle dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. L'utilisation d'une telle machine exige l'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau ce qui permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau. C'est la raison pour laquelle on trouve cette génératrice dans la production d'énergie électrique de grande puissance dans une grande gamme de vitesse du vent [14].

I.6. Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La MADA est un générateur à rotor bobiné avec un système de balais et des bagues. Le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique et le rotor connecté au réseau au travers d'une chaîne de convertisseurs électroniques à bus continu intermédiaire.

La MADA est alimentée à partir de la tension réseau et de la tension à la sortie du convertisseur électronique de puissance à fréquence variable associé au rotor. Afin d'obtenir des vitesses de rotation hypo-synchrone ou hyper-synchrone, la chaîne de conversion électronique associée au rotor doit être bidirectionnel. Cela est effectué à partir d'un deux convertisseurs (coté rotor et coté réseau) avec un bus continu en commun. Le convertisseur de tension coté réseau est connecté à celui ci via trois bobines permettant de filtrer les harmoniques du courant

A cause de ce système de contact glissant, la MADA présente l'inconvénient de nécessiter une maintenance plus régulière que pour une machine asynchrone à cage. En effet, les balais doivent frotter sur les bagues pour réaliser le contact électrique entre ces deux pièces. Mais le frottement entre deux pièces provoque de l'échauffement mais surtout de l'usure. Généralement, les balais sont constitués d'une matière (graphite) moins dure que les bagues, ce sont donc eux qu'il faut remplacer quand leur usure devient importante. C'est donc un inconvénient important pour ce type de MADA, mais l'utilisation des machines asynchrones à double alimentation sans balai (Brushes Doubled Fed Induction Machine) permet d'avoir une maintenance moins fréquente

I.7. Classification des machines à double alimentation:

La Machine à double alimentation est classée par:

1. Machine à double alimentation simple:

Comme montre dans la figure I.10 les enroulements statoriques dans cette catégorie de MADA sont connectés à un réseau triphasé, le rotor est relié à son propre onduleur [11].

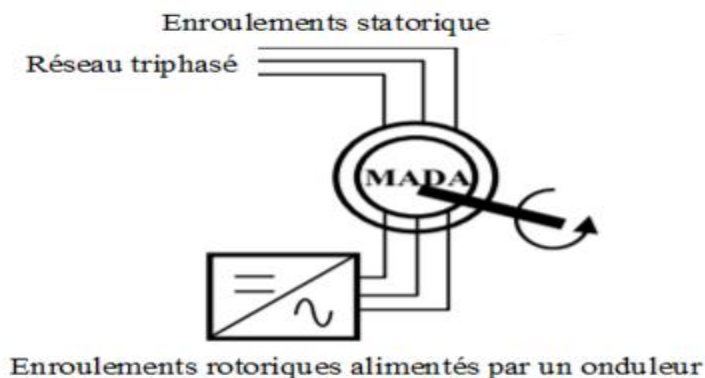


Figure I.12 : Schéma de principe d'une simple MADA.

2. Machine à double alimentation en cascade :

Deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, la figure I.11 présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [11].

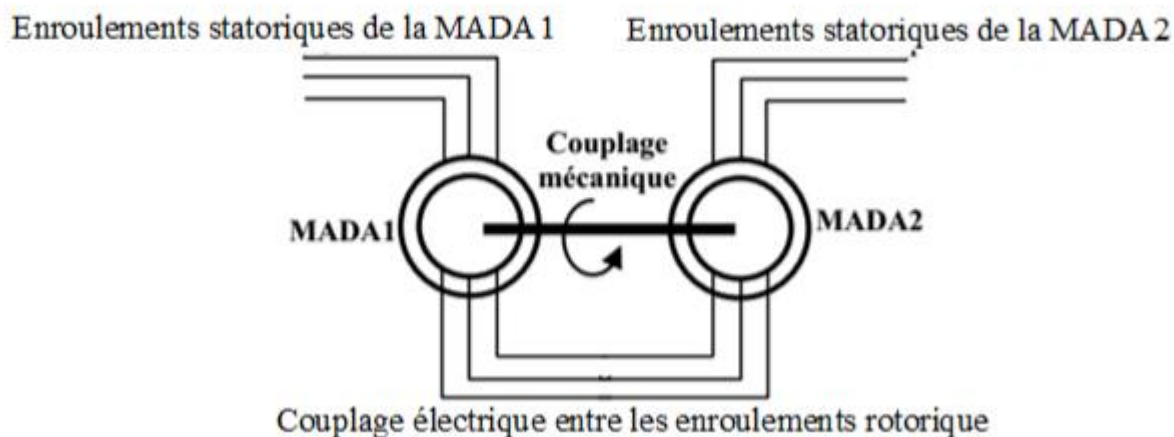


Figure I.13 : Schéma de principe de deux MADA en cascade.

3. Machine asynchrone à double alimenté sans balai:

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la machine asynchrone à cage et de la machine asynchrone à rotor bobiné. Elle est constituée par un rotor à cage et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator figure I.12. Un des bobinages du stator, appelé bobinage de puissance, est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé bobinage de commande, est alimenté par un convertisseur bidirectionnel. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique [08].

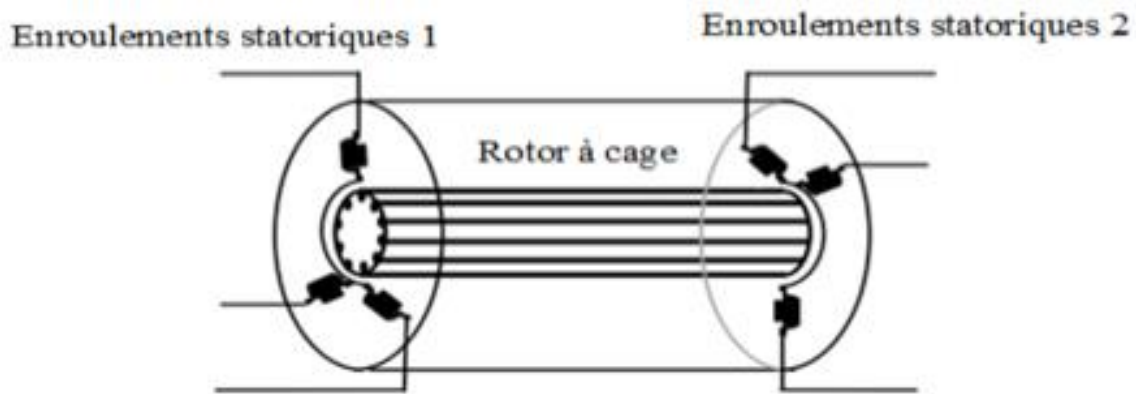


Figure I.14 : Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

4. MADA à réluctance:

Cette machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à réluctance variable. Elle est nommée « Doublé Fed Reluctance Machine»[08] .

5. MADA "tandem"

Cette machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques. Un stator est fixe tandis que l'autre peut être tournant[08] .

I.8.Régimes de fonctionnement de la MADA :

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

- ✓ **Stationnaire($g=1$):** Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence " F_s " ; par conséquent le rotor est le siège d'un F.e.m induite avec une fréquence " F_r " identique avec F_s donc cette condition la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- ✓ **Hypo synchrone($0 < g < 1$) :** en tournant le rotor dans la direction du flux du stator ; la fréquence " F_r " du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus " F_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor" décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.
- ✓ **Synchrone ($g=0$) :** Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence « F_r » du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).
- ✓ **Hyper synchrone ($g < 0$) :** Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor [15].

I.9. Avantages et les inconvénients d'une MADA :**1. Avantages :**

- la mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement. Une loi de répartition des fréquences est donnée dans. De plus, l'alimentation de la machine par deux onduleurs va nous permettre de travailler autour de l'arrêt à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété nous assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances. Le lecteur pourra se référer à pour des amples informations. La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.[15]

2. Inconvénients :

Difficile de lui en trouver! Mais tout de même, trois aspects retiendront notre attention:

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi Convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire.
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator [15].

I.10. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un aperçu de l'énergie renouvelable.

On présente les généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne, nous avons présenté un bref historique sur les premières utilisations dès

l'énergie éolienne, l'énergie éolienne à l'échelle mondiale, définition d'énergie éolienne et leur composantes, et un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éolienne et le système de Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ainsi différents types des Générateurs électriques les plus utilisés. Enfin nous avons présente un aperçu sur la machine asynchrone double alimentation, Classification des machines à double alimentation, les avantages et les inconvénients de cette machines.

CHAPITRE II
Modélisation du système éolienne à base
de la MADA

II.1. Introduction :

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était l'exploit de la puissance et de la vitesse de rotation pour générer de l'énergie électrique. De nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de taille et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués. De plus, on s'est attendu à ce que les systèmes de commande pas simplement gardent la turbine dans sa zone de fonctionnement sûre, mais également améliorer l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante [16].

Dans ce chapitre, nous commençons par la modélisation de la source primaire, le vent, en essayant d'être le plus proche de la réalité, puis les différentes parties mécaniques de l'éolienne seront aussi modélisées sous certaines hypothèses simplificatrices. Ensuite, la modélisation de la machine concernée ainsi que la simulation seront illustrées dans le reste de ce document.

II.2. Systèmes De Conversion Eoliens (SCE) :

Le SCE est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur électromécanique. Selon la figure (II.1), il est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin l'injection dans un réseau électrique [17].

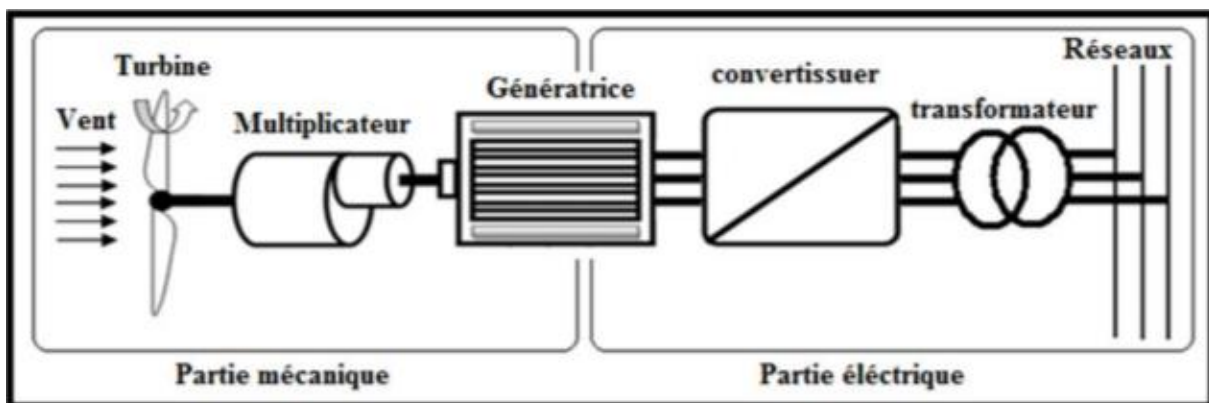


Figure II.1 : Principaux organes du système de convers

II.3. Modélisation de la partie mécanique :

II.3.1. Modélisation du vent :

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. La masse exacte du vent à la hauteur de la turbine est assez complexe. Cependant le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et du vent. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps : $v(t) = f(t)$ [18].

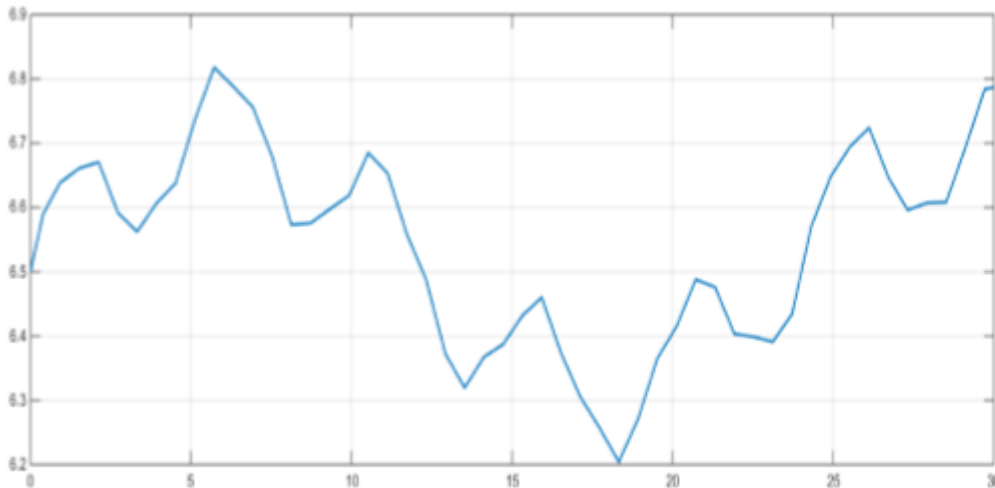


Figure II.2 : Profile du vent

II.3.2. Modélisation de la turbine éolienne :

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [19].

II.3.2.1. Limite de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure II-3 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant 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 [20].

Le rotor V_2 soit, $\frac{V_1 + V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface s des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho s (V_1 + V_2)}{2} \tag{II.1}$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)}{2} \tag{II.2}$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (2):

$$P_m = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{II.3}$$

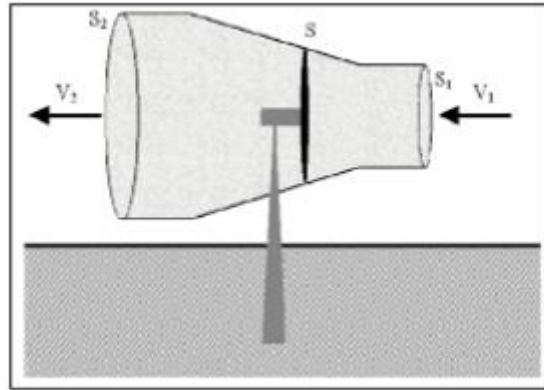


Figure II.3: Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface s sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v_1^3 \tag{II.4}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (\frac{v_1}{v_2})) (1 - (\frac{v_1}{v_2})^2)}{2} \tag{II.5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Fig.II.3), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance « C_p » présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est

en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative « λ » représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent (Fig. II.3). [18]

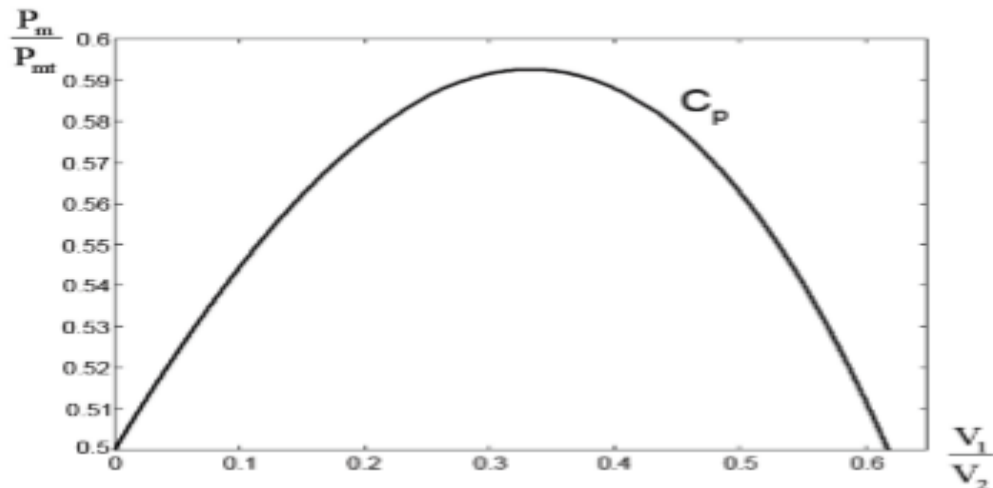


Figure II.4: Coefficient de puissance

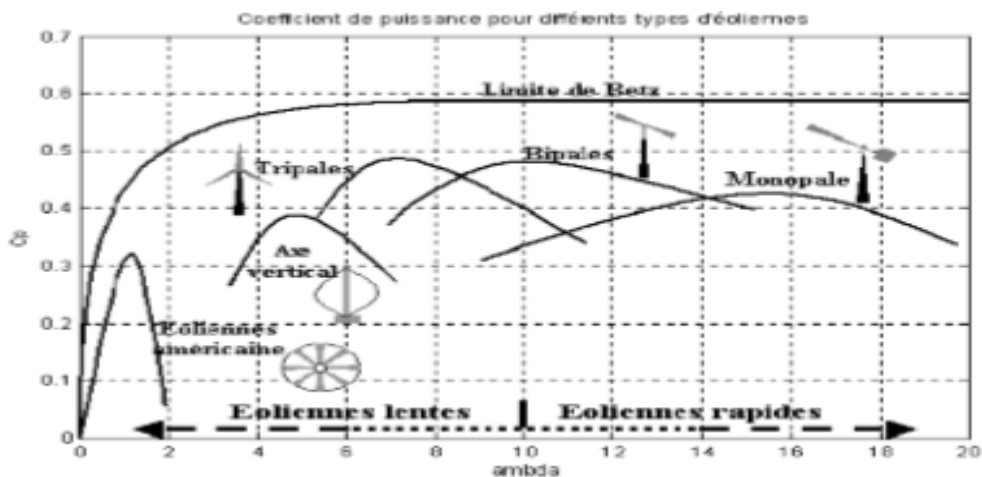


Figure II.5: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

II.3.2.2. Hypothèse simplificatrice pour la modélisation mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [21], [22]:

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques. On obtient alors un modèle mécanique simple

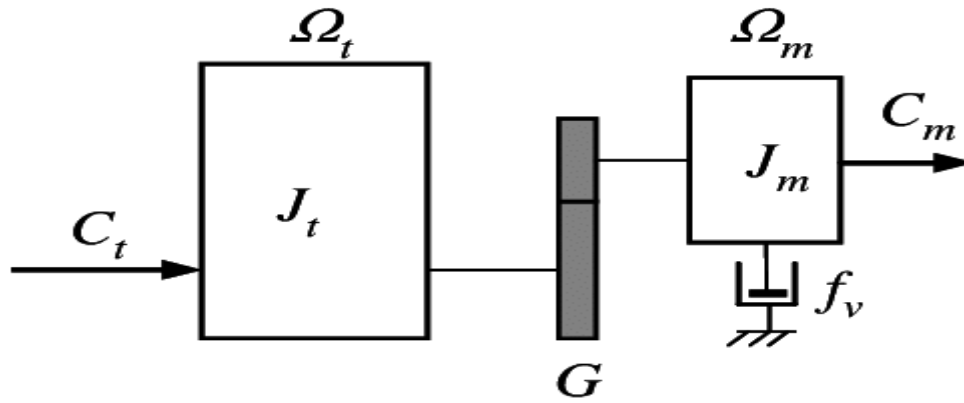


Figure II.6: Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.3.2.3. Modèle de la turbine :

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [23]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \tag{II.5}$$

Avec :

$$S = \pi R^2 \tag{II.7}$$

Où:

ρ : est la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C).

S : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v : est la vitesse du vent.

La puissance extraite par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peut s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p(\lambda, \beta) * P_v \tag{II.8}$$

$C_p(\lambda, \beta)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ , qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β . A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [17], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante :

$$C_p = F(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167 * (\beta - 2)) * \sin \left[\frac{\pi * (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184 * (\lambda - 3) * (\beta - 2)$$

Avec :

β : angle d'orientation des pales.

λ : Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \tag{II.9}$$

Ω : est la vitesse de la turbine.

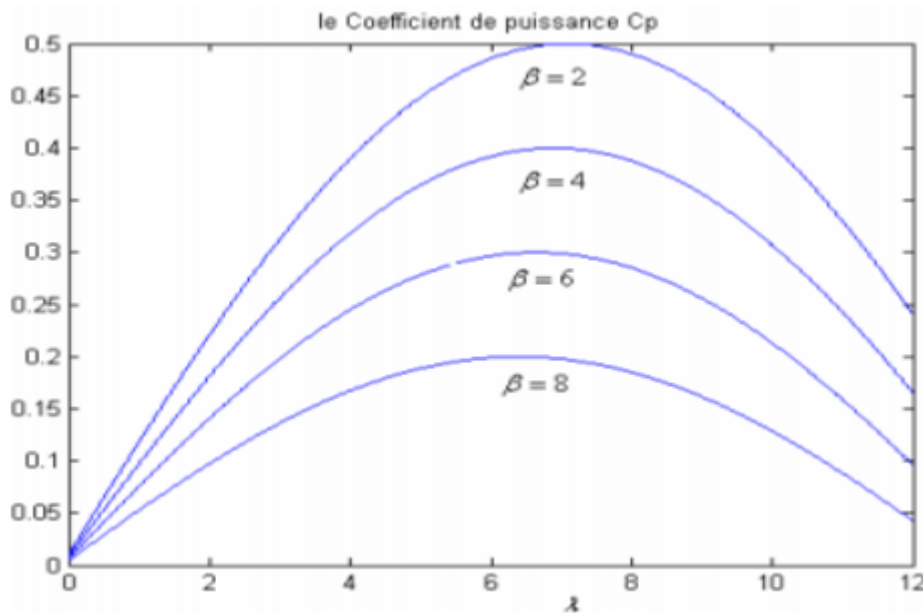


Figure II.7: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

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

$$C_{aer} = \frac{P_{éolienne}}{\Omega} \tag{II.9}$$

II.3.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur de vitesse transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre Mécanique de l'éolienne (vitesse lente) à l'arbre mécanique du rotor de la génératrice

(Vitesse rapide Ω) avec un rapport de vitesse G . Cela se traduit mathématiquement par les équations :[24]

$$\Omega = G\Omega_t \tag{II.10}$$

$$T_g = GT_{em} \tag{II.11}$$

II.3.4. Modélisation de l'arbre mécanique :[24]

La transmission de puissance est composée de l'inertie du rotor de la turbine et de l'inertie de la génératrice. Le modèle mécanique équivalent proposé intègre ces deux inerties.

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{II.12}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique ($T_{méc}$) appliqué au rotor:

$$T_{méc} = J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \tag{II.13}$$

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

$$T_{méc} = T_g - T_{em} - T_f \tag{II.14}$$

T_f est exprimé comme :

$$T_f = f \Omega_{méc} \tag{II.15}$$

f Est le coefficient de frottement équivalent de l'arbre égale à $f = \frac{f_t}{G^2} + f_g$. Ou f_t et f_g sont les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement.

Le schéma bloc correspondant à l'ensemble de ces modélisations se traduit sur la figure II.8.

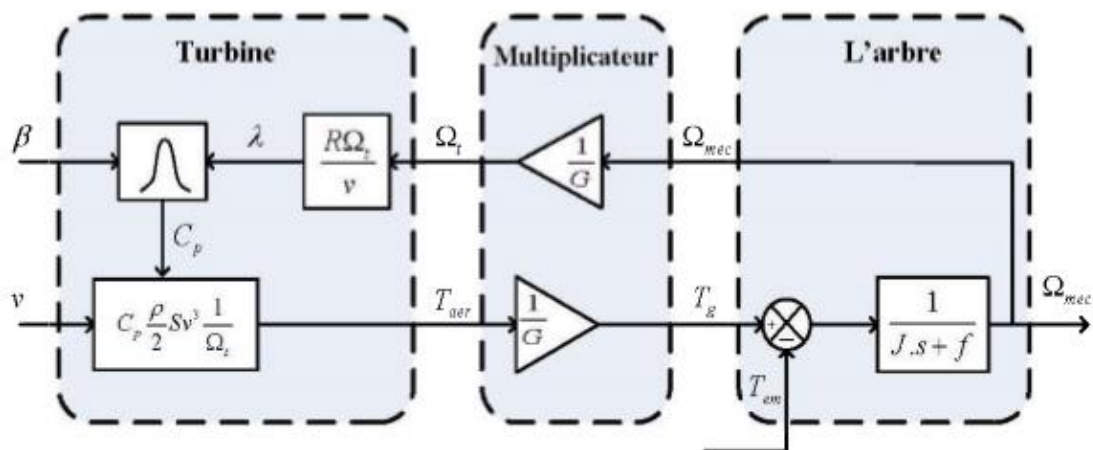


Figure II.8: Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3.5. Stratégie de commande d'une éolienne :

L'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_m qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement Fig. II.9.[25]

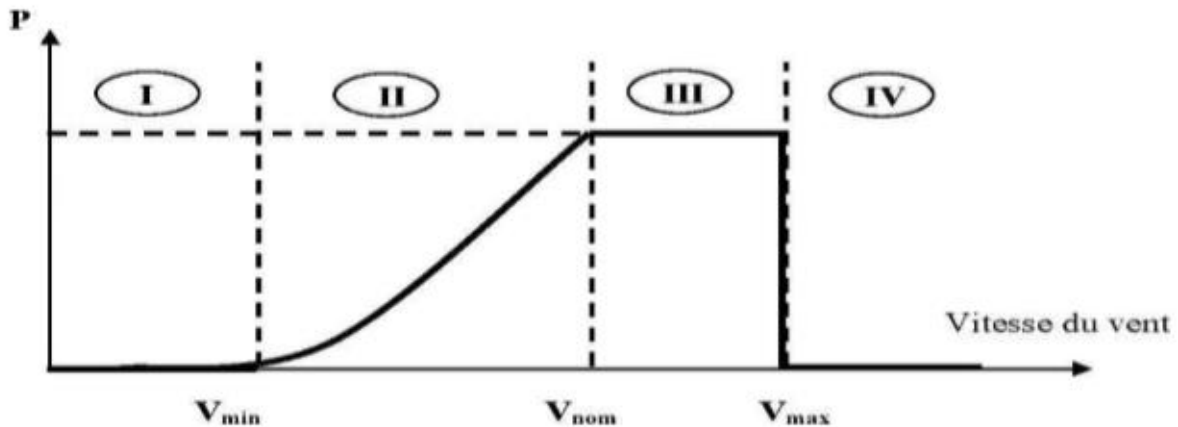


Fig. II. 9: Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

- **La zone I**, zone de démarrage de la machine ou la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_D de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit pas d'énergie ($P_{turbine}=0$) ;
- **La zone II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ;
- **La zone III**, ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance $P_{turbine}$ fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- **La zone IV**, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M . Il faut donc limiter la puissance captée par l'aérogénérateur lorsque le vent devient trop important.

II.3.6. Méthodes de recherche du point maximum de puissance :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure 3-6 illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque combe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques qui sont les points optimaux recherchés, définit une combe dite de puissance optimale définie par l'équation: [24]

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(h_{opt}) \rho s v_v^3 \quad (II. 16)$$

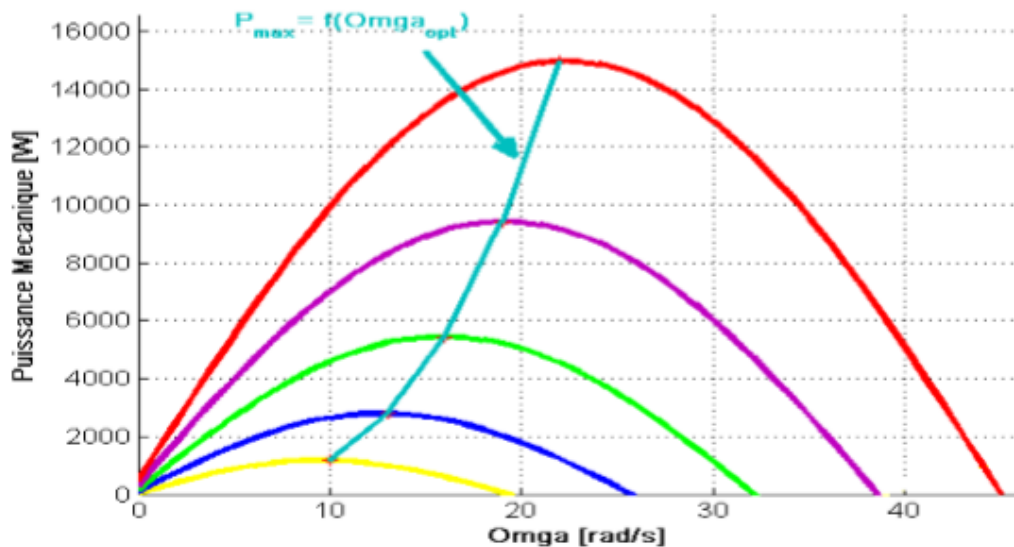


Figure II.10: Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette combe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Track Ting (MPPT) correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

- 1- La première approche, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p = f(h)$ n'est pas connue.
- 2- La deuxième approche considère que la caractéristique $C_p = f(h)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

II.4. Modélisation de la partie électrique :

II.4.1. Topologie de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation possède un stator analogue à celui des machines triphasées à induction (asynchrone à cage ou synchrone) contenant le plus souvent des tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage court-circuitée et coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais constitué de trois bobinages placés en étoile de 120° dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne, [26].

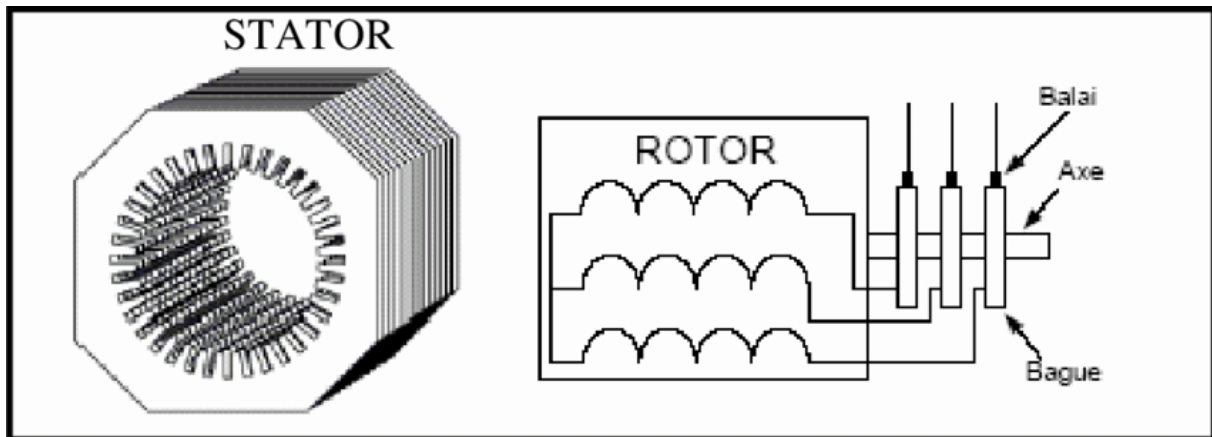


Figure II.11: Structure du stator et rotor dans une MADA.

II.4.2. Mode de fonctionnement de MADA :

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur.

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [23].

a. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :

La figure (II.12) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement figure (II.12) [23].

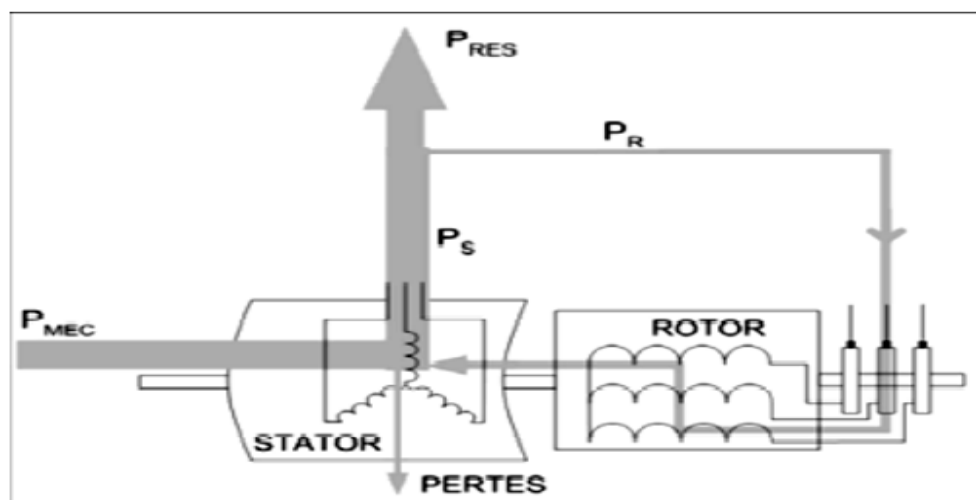


figure (II.12) : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

b. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :

La figure (II.13) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissements est dissipée en pertes joule dans le rotor figure(II.13) [23] .

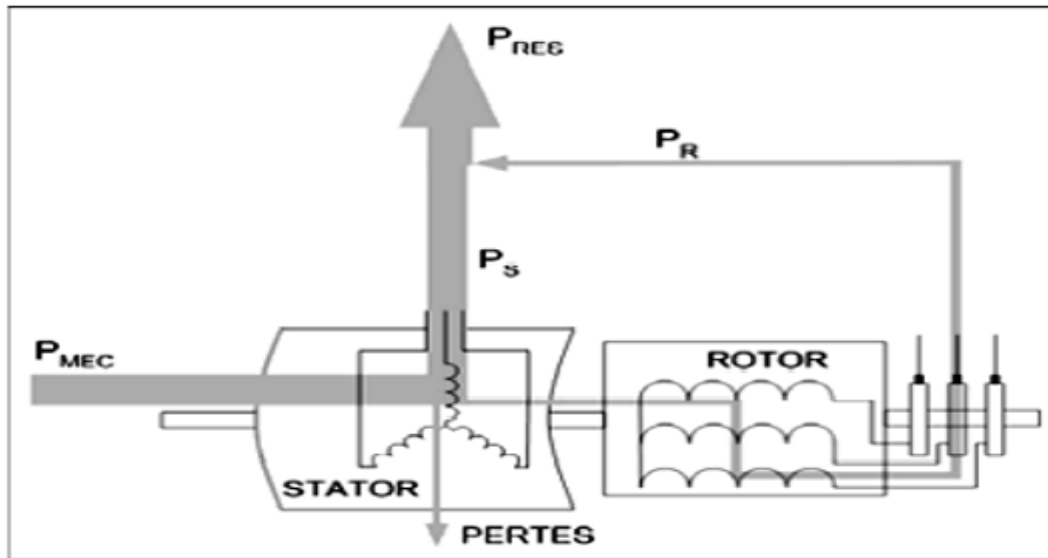


figure (II.13) Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone [8]

c. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

La figure (II.14) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joules dans le rotor figure (II.14) [23].

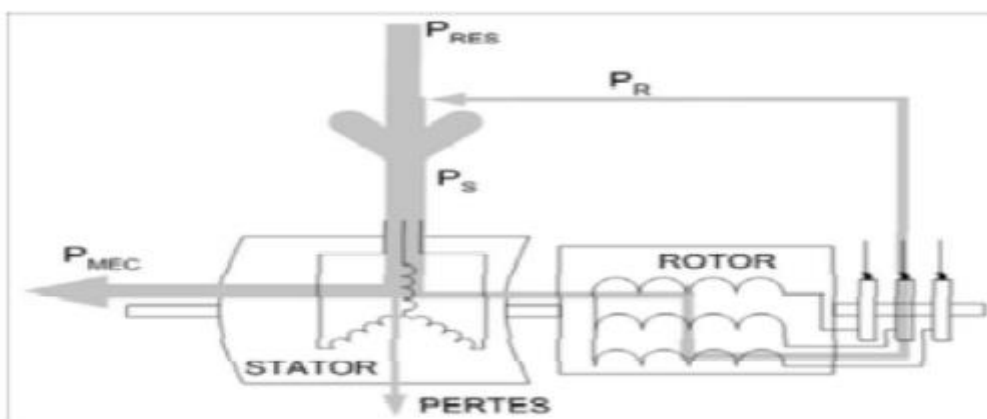


figure (II.14):Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

d. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

La figure (II.15) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement figure(II.15) [23].

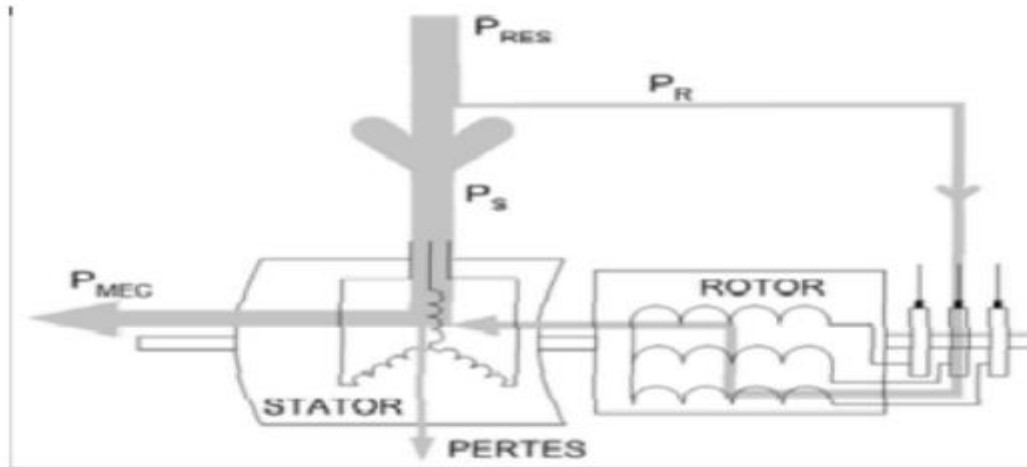


Figure (II.15): Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.4.3. Modélisation de la MADA :

La machine asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

II.4.4. Hypothèses simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [27].

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches est négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additivité des flux,
- La constance des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est fonction de la vitesse de rotation Ω , tel que $\Omega=d\theta /dt$ où θ est l'angle entre l'enroulement statorique (A) et l'enroulement rotor (a) enchaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous.

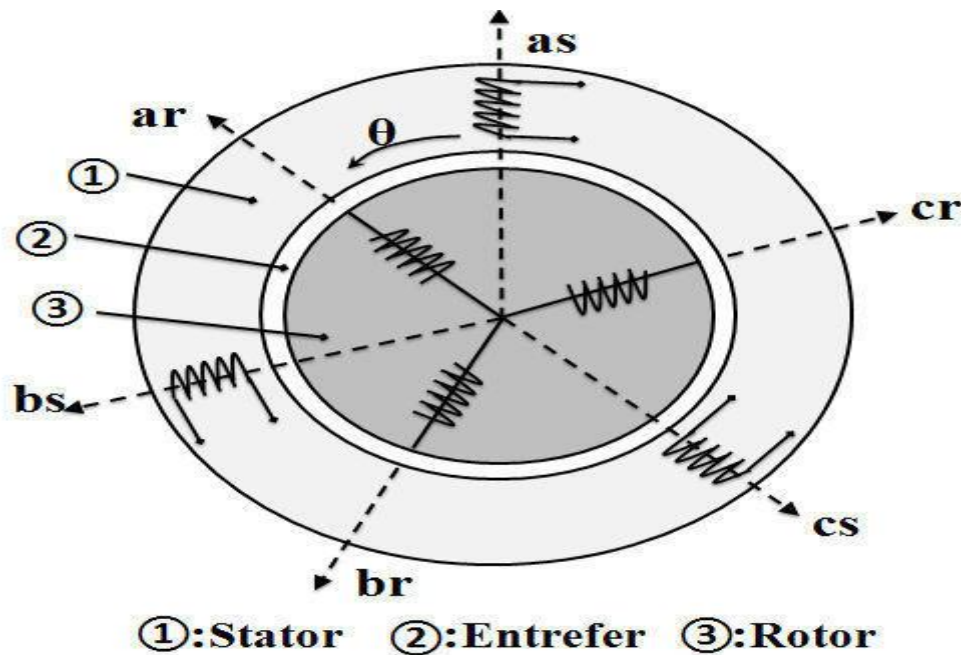


Figure. (II.16): Représentation schématique de la machine asynchrone

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique de la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant.

II.4.5. Equations mathématiques de la MADA dans le repère (abc) :

II.4.5.1. Equations des tensions :

Les équations de tension de la MADA s'écrivent sous la forme suivante :

$$[V_s]=[R_s].[I_s]+\frac{d[\phi_s]}{dt} \quad (II.17)$$

$$[V_r]=[R_r].[I_r]+\frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (II.18)$$

Les équations de tensions du stator sont écrites dans un repère lié au stator et les équations du rotor dans un repère lié au rotor, ce qui explique l'absence des tensions induites dues au mouvement[24].

II.4.5.2. Equations des flux :

De la même manière on peut écrire les équations des flux sous la forme suivante :

$$[\phi_s]=[L_{ss}].[I_s]+[M_{sr}].[I_r] \quad (II.19)$$

$$[\Phi_r]=[L_{rr}].[I_r]+[M_{sr}].[I_s]$$

(II.20)

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.25) dans (II.24), on obtient le système d'équations ci-dessous, qui représente le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel :

$$[V_s]=[R_s].[I_s]+\frac{d[[L_{ss}].[I_s]+[M_{sr}].[I_r]]}{dt}$$

(II.21)

$$[V_r]=[R_r].[I_r]+\frac{d[[L_{rr}].[I_r]+[M_{sr}].[I_s]]}{dt}$$

(II.22)

$$\text{Avec : } [V_s]=\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [I_s]=\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s]=\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[V_r]=\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, \quad ; \quad [I_r]=\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r]=\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[R_s]=\text{diag}[R_s R_s R_s] [R_r]=\text{diag}[R_r R_r R_r]$$

$$[L_{ss}]=\begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

(II.23)

$$[L_{rr}]=\begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

(II.24)

$$[M_{sr}]=[M_{rs}]=\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

II.4.5.3. Equation mécanique :

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em}=\left(\frac{1}{2}\right).P\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} L(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

Sachant que les matrices inductances L_{ss} et L_{rr} sont à termes constante, l'expression du couple devient comme suit.

$$Cem = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot P \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \tag{II.27}$$

D'autre part nous avons l'équation du mouvement qui est donnée par :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = Cem - Cr - f_g \cdot \Omega \tag{II.28}$$

Les systèmes d'équations différentielles (II.26), (II.27) et (II.28) représente le modèle de laMADA dans le repère naturel. Les équations différentielles de ce système sont fortement couplées l'une à l'autre par la mutuelle inductance entre les bobines. Plus particulièrement, la mutuelle inductance entre les bobines statoriques et rotoriques qui est fonction de la position du rotor θ . Cecouplage rend la résolution de ce système très complexe.

Les transformations mathématiques comme la transformation de Park (d, q) ou la transformation (α, β) peuvent faciliter la résolution d'un tel système en transformant ces équations différentielles à paramètres variable dans le temps en équations différentielles à paramètres constantes écrites dans un repère à axes orthogonaux [28].

II.4.6. Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park) :

Pour passer du système triphasé abc, au système biphasé (dq), (et réciproquement) il faut utiliser la transformation de Park.

La transformation de Park constitue d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (ab), puis vers le repère (dq).

Le repère(ab) est fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile il forme avec le repère fixe(ab) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park figure (II.17) [29].

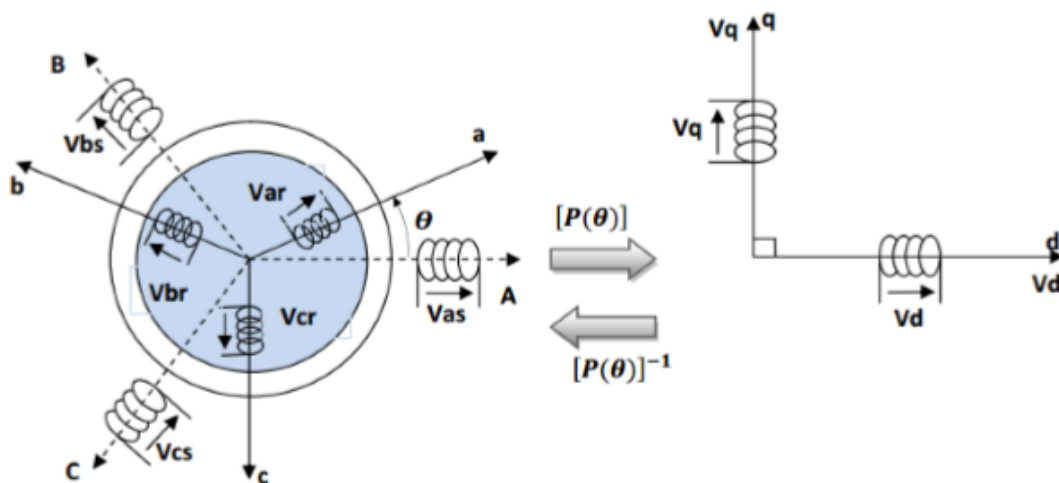


Figure II.17: Représentation de la GADA dans le repère (dq)

L'angle θ_r donne la position du rotor par rapport au stator.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

Où

X_a, X_b, X_c : Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

X_d, X_q : Sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

X_0 : La composante homopolaire.

$[P(\theta)]$: La matrice de Park.

$[P(\theta)]^{-1}$: La matrice inverse de Park

Les matrices de Park sont données ensuite :

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

$$[P(\theta)]^t = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

Où :

θ_{st} l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (θ_s pour les grandeurs statorique et θ_r pour les grandeurs rotorique).

II.4.6. Modèle de la machine en représentation d'état :

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (d,q) car c'est la solution la plus générale.

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation, pour le modèle complet Ce est un variable d'état, pour les quatre variables électriques, notre choix pour la modélisation est le vecteur d'état suivant : $[I_{sd}, I_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}]$

Les équations des courants et de tension dans le repère (dq) :

$$I_{sd} = \frac{1}{L_r} \Phi_{rd} - \frac{M}{L_r} I_{sd} \quad (II.33)$$

$$I_{sq} = \frac{1}{L_r} \Phi_{rq} - \frac{M}{L_r} I_{sq} \quad (II.34)$$

$$\Phi_{sd} = L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rd}$$

(II.35)

$$\Phi_{sq} = L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rq}$$

(II.36)

$$\text{Avec : } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

(II.37)

En remplaçant Φ_{sd} et Φ_{sq} en fonction de Φ_{rd} et Φ_{rq} dans l'équation de tension, on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{dI_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - w_s [L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rq}] \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{dI_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + w_s [L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \Phi_{rd}] \end{cases}$$

(II.38)

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = -R_s I_{sd} + (w_s - w_r) \Phi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = -R_s I_{sq} - (w_s - w_r) \Phi_{rd} + V_{rq} \end{cases}$$

(II.39)

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BU$$

(II.40)

$$Y = Cx$$

(II.41)

Avec :

X : vecteur d'état du système $[I_{sd}, I_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}]^T$

A : matrice d'état du système.

B : matrice de commande. U : vecteur de commande $[V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}]^T$

Y : vecteur de sortie.

C : matrice d'observation

$$A = \begin{bmatrix} -h & w_s & \frac{k}{T_r} & w_r k \\ -w_s & -h & -w_r k & \frac{k}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & w_s l \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -w_s l & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

(II.42)

$$\text{Avec : } Tr = \frac{Lr}{Rr}, : Ts = \frac{Ls}{Rs}, : h = \frac{1}{\sigma.Tr}, K = \frac{M}{\sigma.Ls.Lr}$$

(II.43)

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma Ls} & 0 & K & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma Ls} & K & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(II.44)

La décomposition des équations d'état nous donne :

$$\frac{dIsd}{dt} = -h.Isd + ws.Isq + \frac{k}{Tr}\Phi rd + wr.K.\Phi rq + \frac{1}{\sigma Ls}Vsd + K.Vrd$$

(II.44)

$$\frac{dIsq}{dt} = -h.Isq - ws.Isd + \frac{k}{Tr}\Phi rq - wr.K.\Phi rd + \frac{1}{\sigma Ls}Vs q + K.Vrq$$

(II.45)

$$\begin{cases} \frac{d\Phi rd}{dt} = \frac{M}{Tr}.Isd - \frac{1}{Tr}\Phi rd + wsL\Phi rq + Vrd \\ \frac{d\Phi rd}{dt} = \frac{M}{Tr}.Isq - \frac{1}{Tr}\Phi rd + wsL\Phi rq + Vrq \end{cases} \quad (II.46)$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{-3}{2}p \frac{M}{J.Ls} (\Phi rd.Isq - \Phi rq.Isd) - \frac{Cr}{J} - \frac{fr}{J}\Omega$$

(II.47)

$$Ce = \frac{-3}{2}p \frac{M}{Ls} (\Phi rd.Isq - \Phi rq.Isd)$$

(II.48)

II.4.7. Modélisation de l'onduleur de tension :

Le long de tout notre travail, les différentes structures de commande sont constituées de l'association d'une machine asynchrone à double alimentation avec un onduleur de tension na utilisée structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors, ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées.

Donc, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI. L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Deux ponts triphasés d'IGBT Il est formés de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle [30].

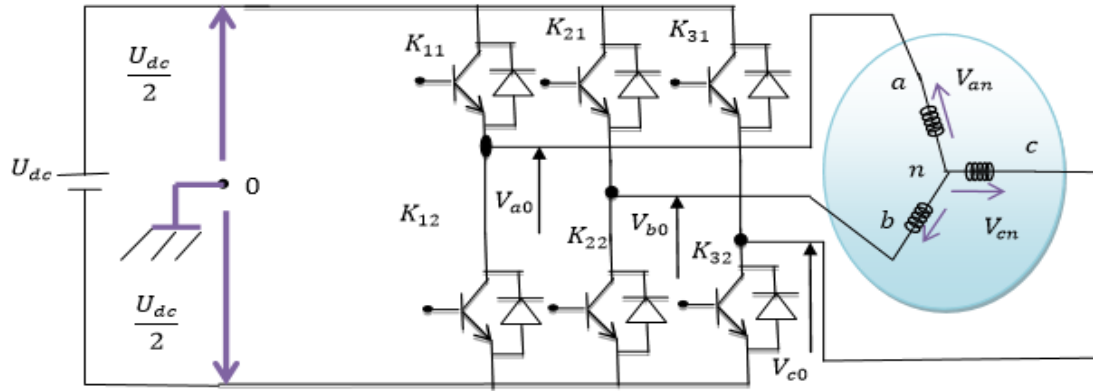


Figure II.18: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} . 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) : $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert, $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$V_{an} - V_{nno} = V_{ano} \tag{II.49}$$

$$V_{bn} - V_{nno} = V_{bno} \tag{II.50}$$

$$V_{cn} - V_{nno} = V_{cno} \tag{II.51}$$

Donc, on peut déduire que :

$$\left\{ V_{nno} = \frac{1}{3} [V_{ano} + V_{bno} + V_{cno}] \right. \tag{II.52}$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits Si ($i=a, b, c$) on a : donc

$$V_{ano} = (V_a - 0.5)U_0 \tag{II.53}$$

$$V_{bno} = (V_b - 0.5)U_0 \tag{II.54}$$

$$V_{cno} = (V_c - 0.5)U_0 \tag{II.55}$$

En remplaçant (II.52) dans (II.49.50.51), on obtient :

$$V_{an} = \frac{2}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \tag{II.56}$$

$$V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ano} + \frac{2}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno}$$

(II.55)

$$V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} + \frac{2}{3}V_{cno}$$

(II.56)

En remplaçant (II.53.54.55) dans (II.56.55.56), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_{ano} \\ V_{bno} \\ V_{cno} \end{bmatrix}$$

(II.57)

Il suffit d'appliquer la transformation de Concordia pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

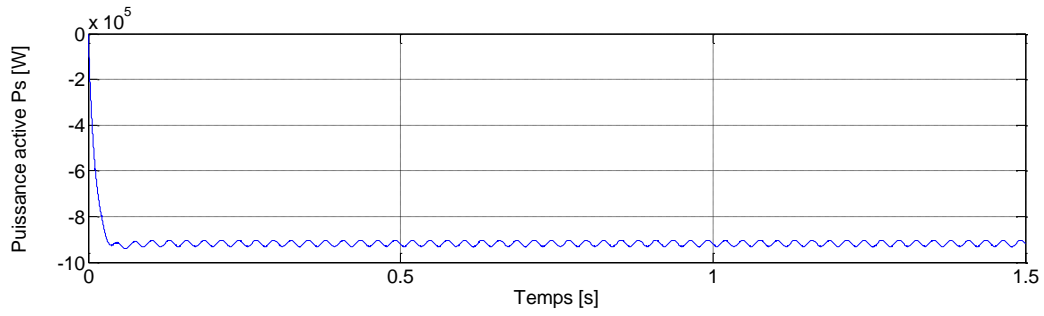
II.4.8. Simulation du model de la MADA :

Les résultats de la simulation sous Matlab/Simulink du modèle la MADA qui est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (d-q) liée au champ tournant sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1.5MW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec un réseau de fréquence de 50Hz et une tension de valeur efficace égal à 398V. Le rotor est alimenté par un onduleur de tension commandé par MLI sinus triangle dont l'amplitude est de 20V et la fréquence égale à la fréquence rotorique.

La figure II.19 représente la puissance active générée par la MADA et la figure II.20 représente la puissance réactive absorbée par la MADA. La figures II.21montrent que le courant statorique généré par la MADA est de forme sinusoïdale.

La même observation est faite pour le courant rotorique illustré par la figures II.22, et qui confirme le passage doux du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone de la MADA à l'instant 0.5s (à cet instant la puissance active rotorique sera nulle par la relation $Pr = gPs$, car le glissement est nul au synchronisme).

Le couple électromagnétique appliqué au niveau de l'arbre de la MADA (figure II.23-a) tende vers une valeur de -9000N.m. Des ondulations peuvent être observées au niveau des formes d'onde des puissances et du couple, et qui sont dues à l'utilisation de la technique MLI dans la commande de l'onduleur de tension qui alimente le rotor de la MADA.



La figure II.19: la puissance active

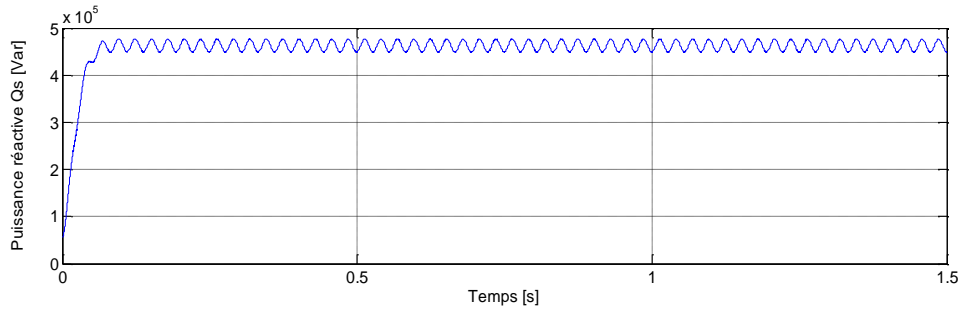


figure II.20: la puissance réactive

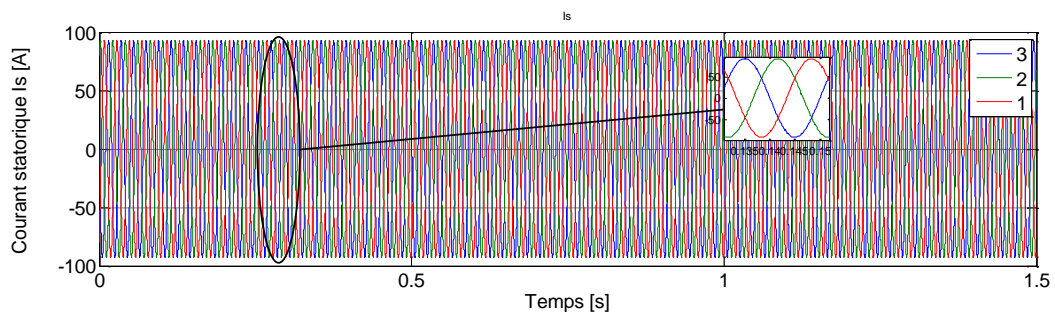


figure II.21: le courant statorique

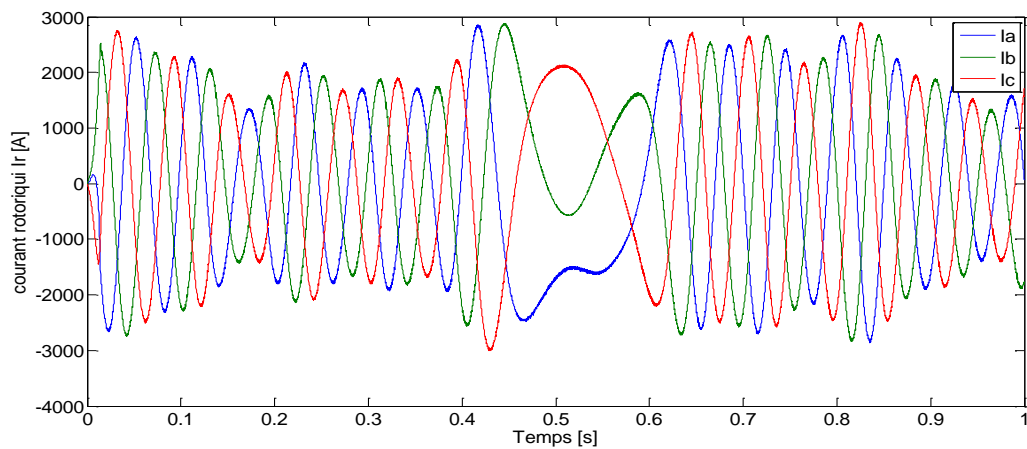
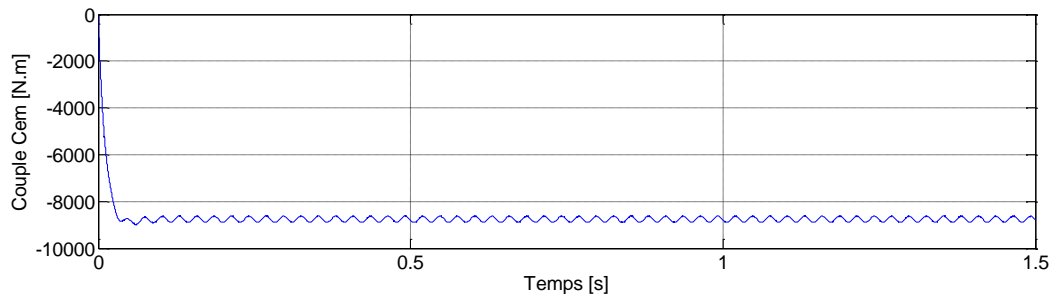
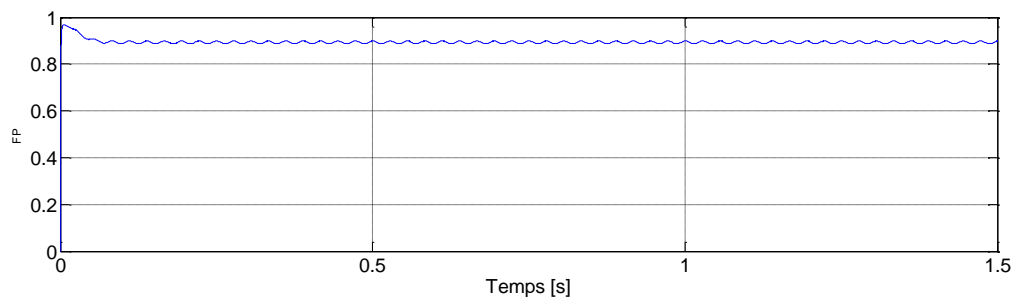


figure II.22: le courant rotorique



(a)



(b)

Figure II.23: Comportement de la MADA

II.5.Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation des différents éléments d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, à vitesse variable, basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). La première partie est consacrée à la modélisation du système de conversion d'énergie cinétique mécanique (vent, turbine, multiplicateur,...).

La deuxième partie est destinée à la modélisation du système de conversion mécanique-électrique (MADA), sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons pu exploiter un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation. La complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé, dans lequel les équations de la machine étaient à coefficients variables dans le temps, à un repère orthogonal dans lequel les équations sont devenues à coefficients constants dans le temps. Le modèle de la MADA a été simulé sous MATLAB/Simulink, et les résultats de simulation ont montré une bonne conformité au comportement dynamique de la machine.

CHAPITRE III :
Commande vectoriel directe et
indirecte de la MADA

III.1.INTRODUCTION:

La commande vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques. Elle repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le contrôle vectoriel de la MADA sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur) [31].

Les techniques de régulation classique PI utilisées dans la commande vectorielle ont apporté une stabilité remarquable de réglage, mais il reste à signaler que ces régulateurs sont calculés pour imposer en boucle fermée une réponse du deuxième ordre.

Nous nous proposons dans ce chapitre d'étudier le comportement de la machine asynchrone à double alimentation en commande vectorielle directe indirecte.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA alimentée par deux onduleurs de tension basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en moteur. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques.

III.2.But et principe de la commande vectorielle :

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent.

Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit établi un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quelque soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge (différent de 90°), il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle. L'idée proposée par Blaschke [31] et Hasse au début des années 70, c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle

de 90° entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

La figure III.1 illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machines à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA.

Pour une MCC, le courant d'induit i_a est la grandeur génératrice du couple et le courant d'excitation i_f est la grandeur génératrice du flux. Ainsi, dans une machine à courant continu tout se passe comme si les variables de commandes i_a et i_f étaient orthogonales. C'est à dire que le flux commandé par le courant i_f et le couple par le courant i_a . On dit que l'induit et l'inducteur sont découplés.

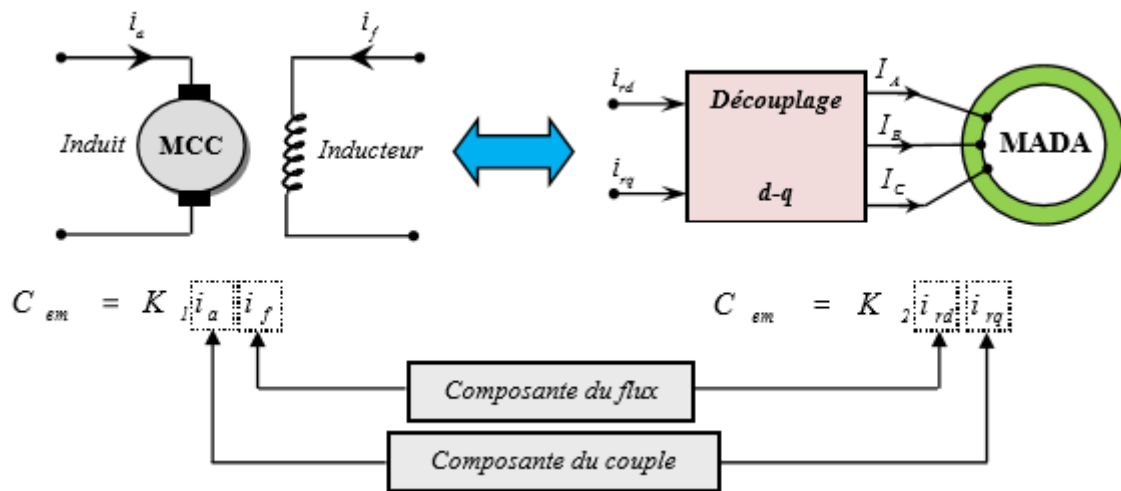


Figure III.1 :Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la MCC

Pour une MADA, la relation du couple électromagnétique est donnée par l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sq} i_{rd} - \varphi_{sd} i_{rq}) \tag{III.1}$$

Dans le cadre de ce travail, nous développons la commande vectorielle de la MADA avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique.

En partant de l'équation (3.1), on peut réaliser un découplage de telle façon que le couple sera commandé uniquement par le courant i_{rq} et ainsi donc le flux par le courant i_{rd} . La relation finale du couple est :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \psi_s \tag{III.2}$$

On voit que cette relation est similaire à celle d'une MCC à excitation séparée. A l'examen de ces dernières relations, on constate que :

- La composante i_{rd} joue le rôle du courant d'excitation qui génère et contrôle le flux d'excitation Ψ_r .
- La composante i_{rq} joue le rôle du courant induit qui, à flux d'excitation donné, contrôle le couple C_{em} .

III.3. Commande vectorielle de la MADA :

3.1 - Rappel sur le modèle de la MADA :

Rappelons que la synthèse de la commande vectorielle sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la figure(III.2) (c'est à dire celui établi en négligeant la résistance d'une phase statorique avec orientation du flux statorique) et non pas sur le modèle réel de la machine. Dans ce schéma, les termes de couplage sont désignés par C_d , C_q et les (f.e.m)'s par F_d et F_q . Nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe « q » rotorique et la puissance réactive pour l'axe « d » rotorique. La consigne de puissance réactive peut être maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

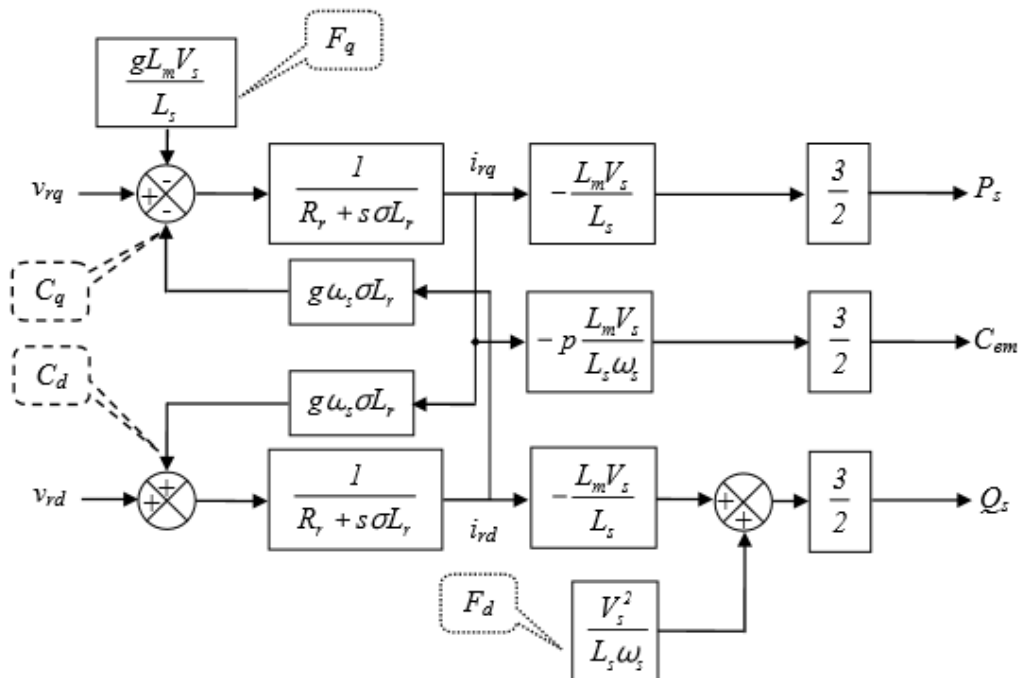


Figure III.2 : Schéma bloc du système à commander.

Ainsi, il est apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine

[32].

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte**.

Ces deux méthodes vont être étudiées et implémentées dans la suite de ce chapitre. L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA comme filtre actif, mais elle est complexe à mettre en œuvre.

3.2. Commande vectorielle directe:

Ce mode de contrôle est ainsi appelé par ce qu'une régulation du flux statorique est introduite par une boucle de contre réaction nécessitant la mesure ou l'estimation de ses variations. Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quelque soit le régime de fonctionnement. Pour cela deux procédés sont utilisés :

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine à l'aide de capteur. L'inconvénient principal de cette technique réside dans le fait que les capteurs du flux sont mécaniquement très fragiles et ne peuvent travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables.
- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement. La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations de paramètres de la machine. L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes :

1- La non fiabilité de la mesure de flux :

- Problème de filtrage du signal mesuré.
- Précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.

2- Le coût de production élevé (capteur + filtre) [33].

3.3. Commande vectorielle indirecte:

Cette technique de commande est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations [33].

III.4. Modèle de la MADA avec orientation du flux satyrique:

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constat au stator de la machine [34].

Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA :

❖ **Equation électriques:**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (III.3)$$

❖ **Equations magnétiques**

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (III.4)$$

Le couple électromagnétique est donné par la relation suivante :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - I_{sd} \varphi_{rq}) \quad (III.5)$$

III.5. Relation entre courants statoriques et courants rotoriques

Dans ce paragraphe, nous considérons que la MADA fonctionne en mode hyper- synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine. Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant (figure III.3).

On a donc : $\varphi_{sq} = 0$ et par suite $\varphi_{sd} = \varphi_s$

Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut de façon légitime négliger la résistance statorique R_s tout en considérant le flux statorique constant.

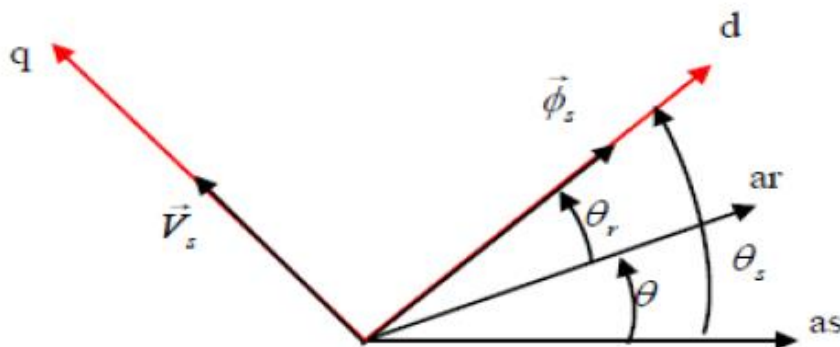


Figure III.3: Orientation du flux statorique[8].

Dans l'hypothèse où le flux φ_{sd} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q .

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq}) \quad (III.6)$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

A partir des équations (III.7), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

III.6. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{sd}=0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (9) dans l'équation (11) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.12), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{rd} \quad (\text{III.13})$$

III.7- Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.3) les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.9) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (III.14). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Où (g) correspond au glissement de la machine asynchrone.

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphassées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme $g \cdot \frac{MV_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [35].

Les équations (III.9), (III.12) et (III.15) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (figure 4).

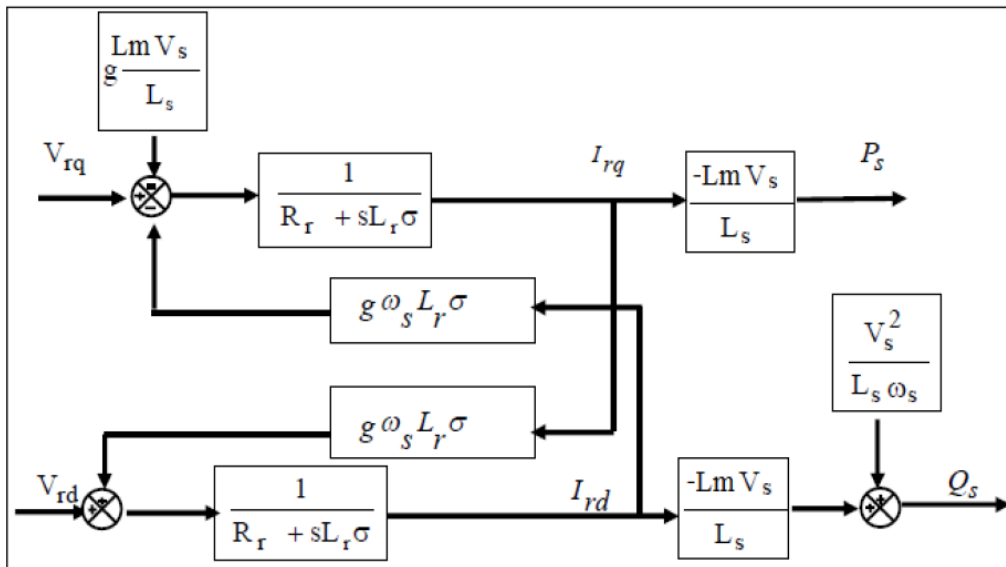


Figure III. 4: Schéma bloc du système à réguler.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique [17].

III.8-Commande directe des puissances active et réactive :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [34].

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (figure III.5) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. La commande des puissances de sortie de la MADA dépendent des tensions rotoriques V_{rd} et V_{rq} à contrôlée. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$.

Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \omega_s \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(III.15)}$$

V_{rd} et V_{rq} : les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus.

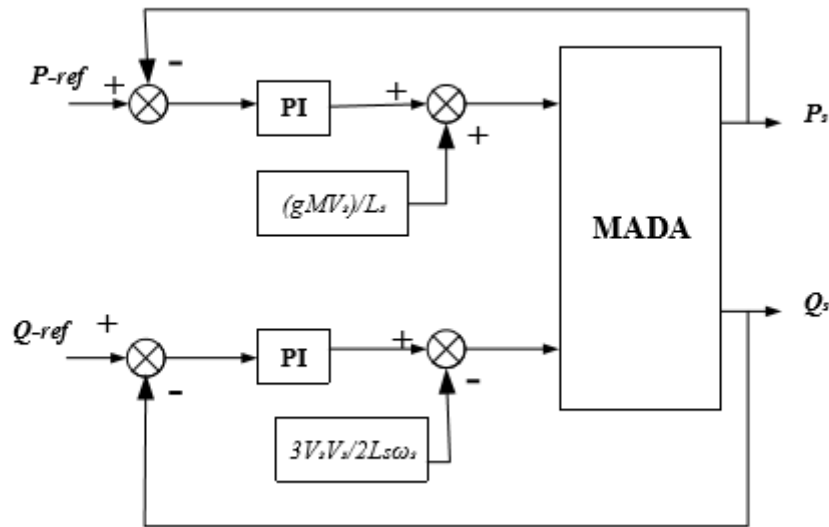


Figure III. 5: Schéma bloc de la commande directe de la puissance.

III.9.-Commande indirecte des puissances active et réactive:

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler[34], [35]. Par conséquent, le schéma bloc du système est reproduit dans le sens inverse, résultant en un modèle correspondant au modèle de la machine mais dans l'autre sens, contenant tous les éléments du schéma bloc MADA.

1-Commande Indirecte sans Boucles des Puissances (en boucle ouverte) :

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt directement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q. A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système, les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} P_{s-ref} \\ I_{rd-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} Q_{s-ref} \frac{V_s}{MW_s} \end{cases} \quad \text{(III.16)}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous. Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive [36].

2-Commande Indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé) :

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la (figure III. 5)

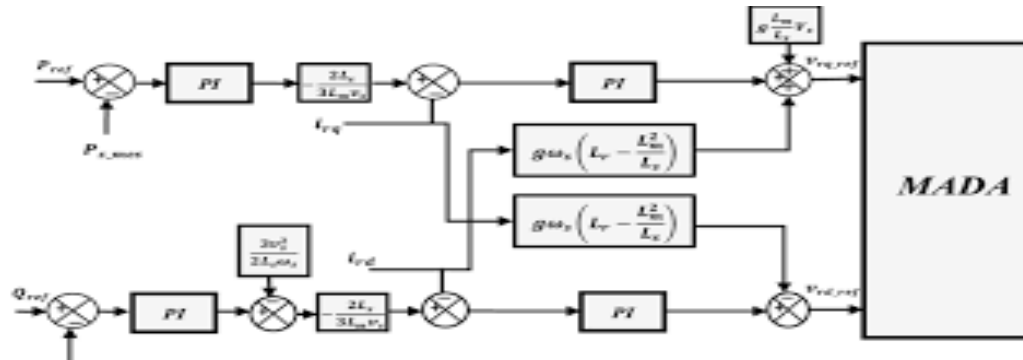


Figure III.6:Schéma bloc de la commande indirecte (en boucle fermé)

III.10-Etude de la régulation

1 - Objectifs de la régulation :

Bien que la dynamique du système éolien soit relativement lente par rapport à l'évolution de l'électricité, le correcteur de régulation de puissance est calculé de manière à obtenir les performances les plus élevées possibles en termes de dynamique ainsi que de robustesse et d'immunité. Lors de la synthèse de ces correcteurs, nous veillerons à ce que la dynamique électrique du système soit obtenue le plus rapidement possible dans la plage autorisée par la fréquence PWM du convertisseur rotorique. La loi de commande développée doit permettre cette évolution dynamique sans créer de dépassement susceptible de compromettre la durée de vie de la machine et du convertisseur. Ils devaient également faire un bon travail pour rejeter la grande quantité d'interférences qui pourraient être présentes sur un tel système, compte tenu de la complexité et du grand nombre de capteurs impliqués. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température et de saturation. La consigne de la puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire coté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

2.Type des régulateurs utilisez :

Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de la Commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux système de régulation industrielle.

La fonction de transfert du régulateur (PI) est de la forme : $K_p + \frac{K_i}{P}$

3. Dimensionnement du régulateur PI :

La rapidité et la simplicité du régulateur PI constituent ses principales performances pour lesquelles on l'utilise dans la commande de la MADA. La figure III.5 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI.

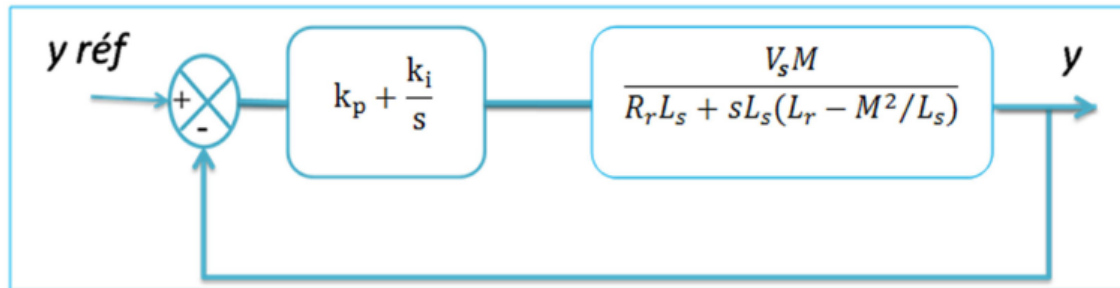


Figure III.7: Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} * \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}} \tag{ III.17 }$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)} \tag{ III.18 }$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$FTBO = F_0(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{\frac{s}{K_p}} \tag{ III.19 }$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant.

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_0(t)}{1 + F_0(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r s} \tag{ III.6 }$$

Avec:

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M} \tag{ III.21 }$$

τ_r est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_P = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M}, \quad (III.22)$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M} \quad (III.23)$$

III.11- Résultats de simulation :

Les stratégies de contrôle de puissance direct et indirect de MADA ont été vérifiées par des simulations numériques avec le logiciel MATLAB/SIMULINK. Les paramètres MADA utilisés pour la simulation sont donnés en annexe A. Pour tester et comparer les performances de régulation de chaque stratégie de contrôle, une série de tests a également été réalisée.

La comparaison portera sur les performances et les caractéristiques dynamiques et statiques des deux modes de contrôle : direct (CVD) et indirect (CVI). Chaque série de tests suivra des consignes, la sensibilité aux perturbations et la robustesse. Il s'agit d'évaluer l'impact de la commande à sélectionner sur les performances dynamiques et statiques du système. Cela conduirait à prédire a priori les avantages et les inconvénients inhérents à l'utilisation d'une méthode de contrôle ou d'une autre.

Commande vectorielle directe :

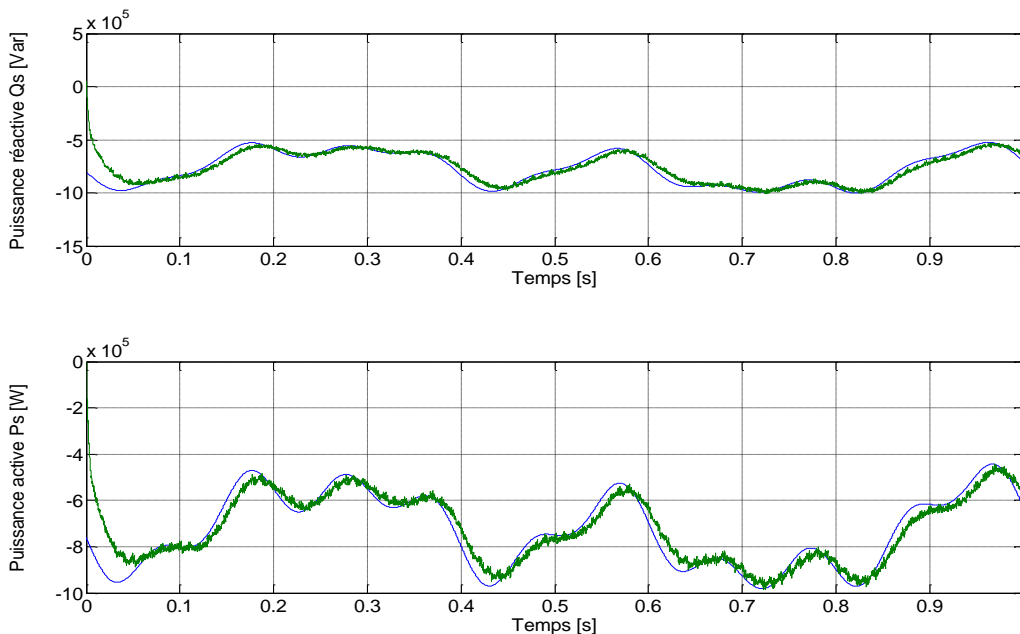
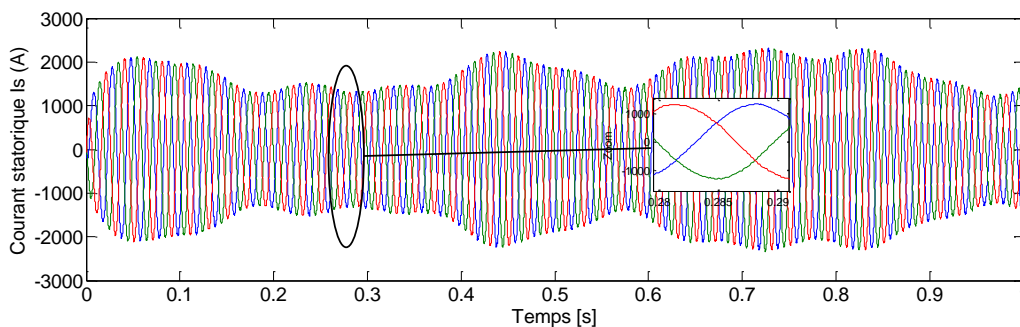


Figure III.8 : Puissance active et réactive de la MADA



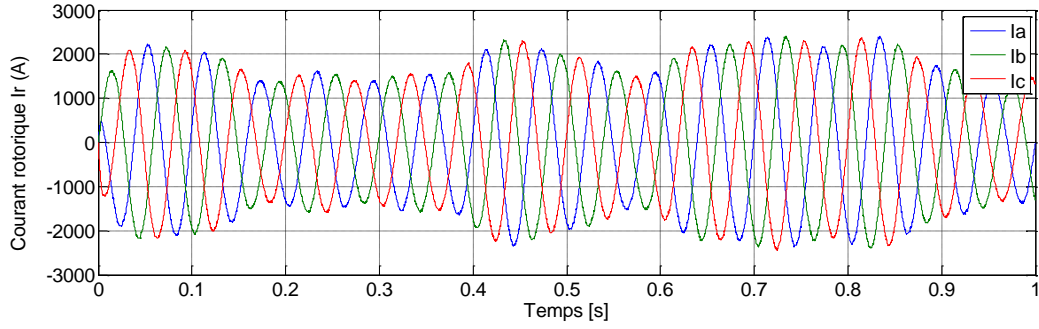
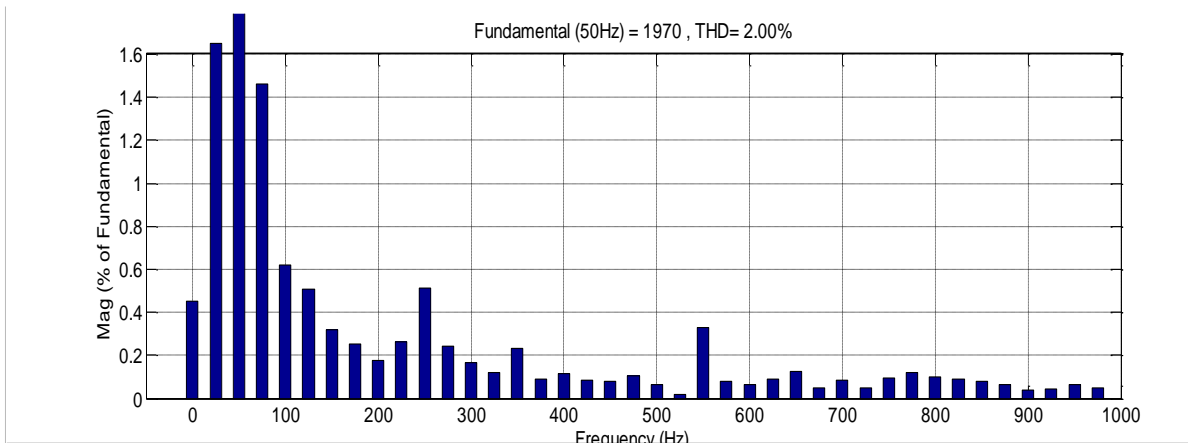
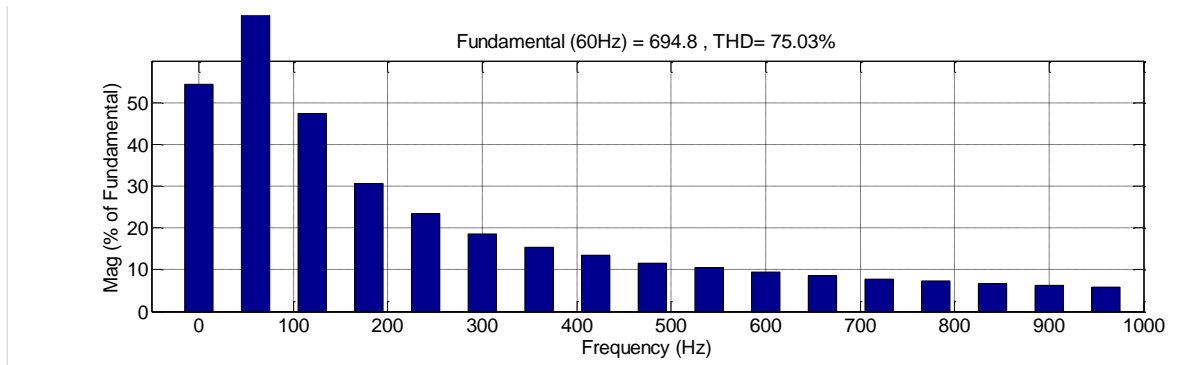


Figure III.9 : Courant rotorique et statorique



THD Is



THD Ir

Figure III.10 : Les harmonique de courant statorique et rotorique

Commande vectorielle indirecte :

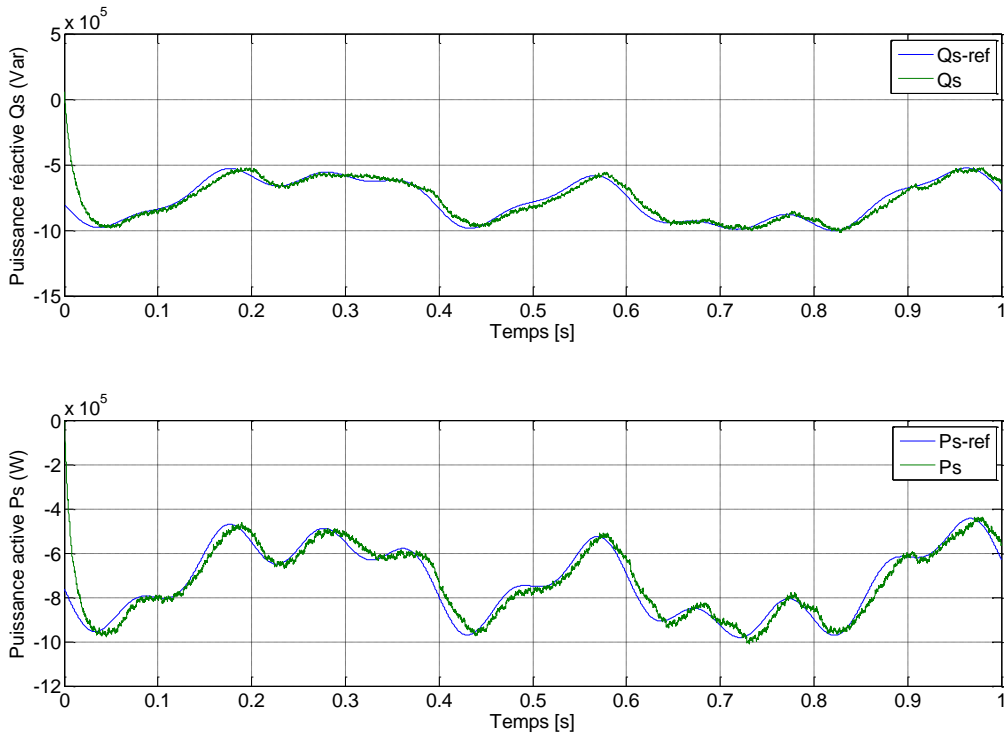


Figure III.11 : Puissance active et réactive de la MADA

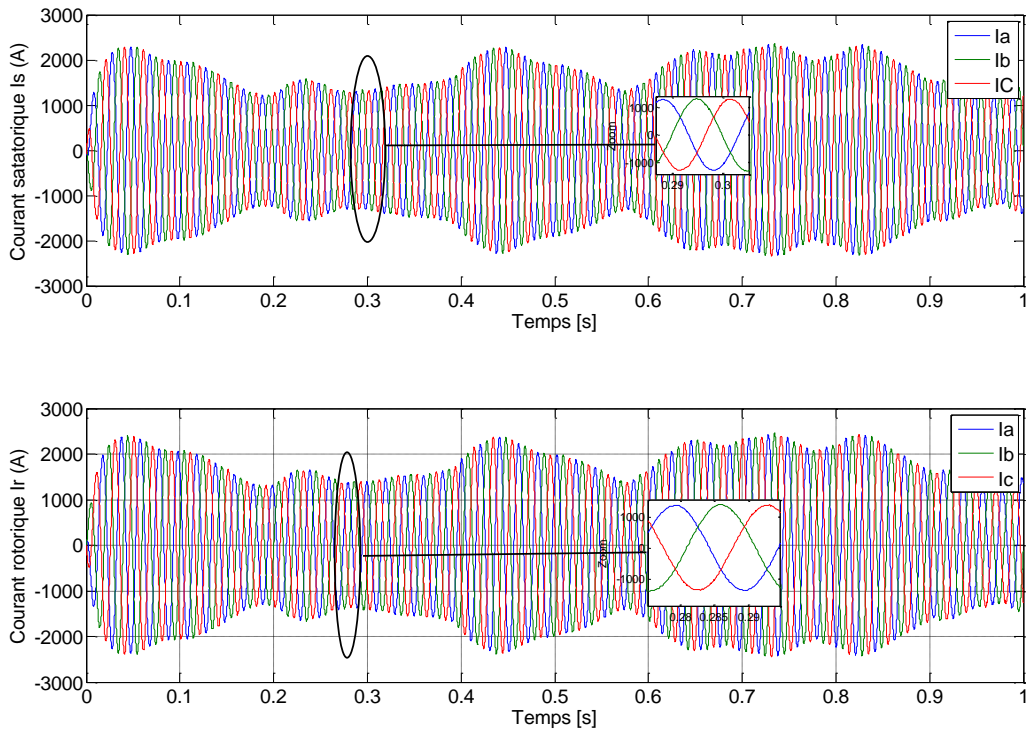
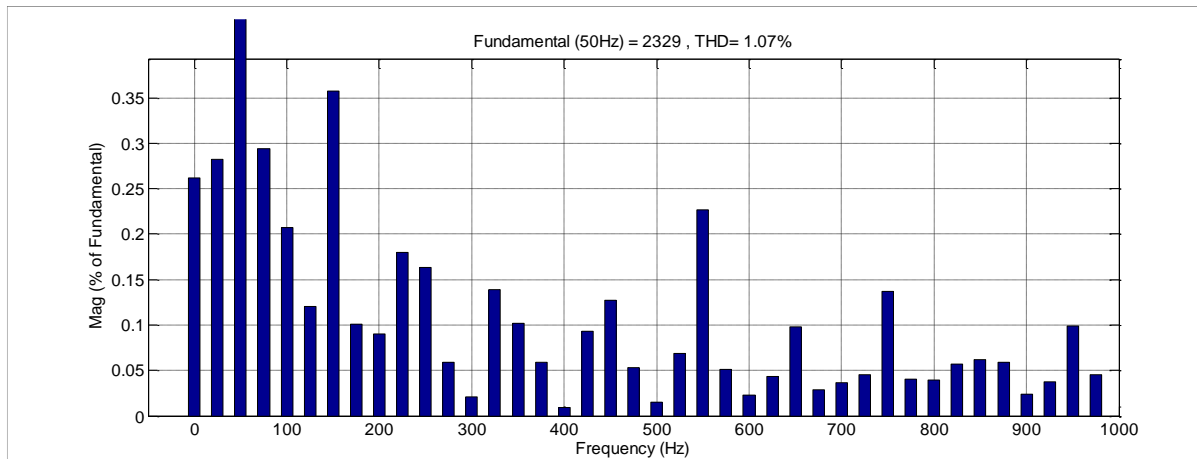
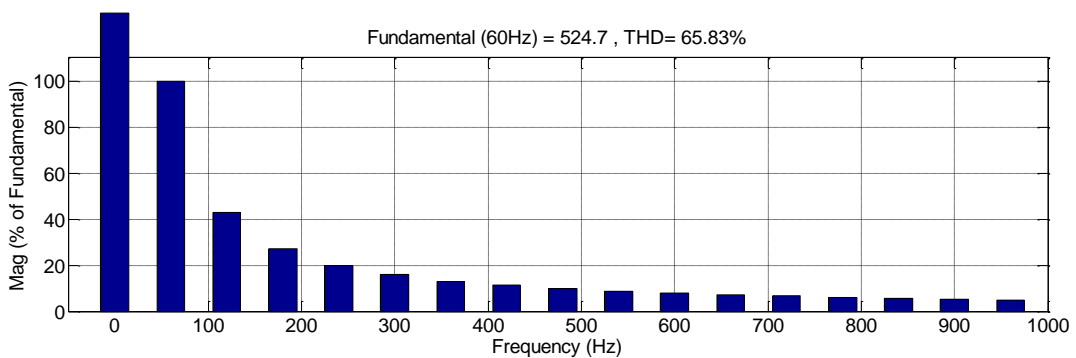


Figure III.12: Courant rotorique et statorique généré par la MADA



THD Is



THD Ir

Figure III.13: Les harmoniques de courants

III.12. Test de suivi de consigne avec la vitesse de vent variable en utilisant la technique MPPT et un FP=1 :

Ce test de simulation a donc été réalisé en utilisant le profil de vent précédent, en appliquant la stratégie de contrôle MPPT. Puissance réactive appliquée avec une valeur nulle ($Q_s=0$) pour avoir un facteur de puissance unitaire sur le réseau. La figure III.13 illustre la comparaison des performances entre le contrôle direct et indirect appliqué au MADA.

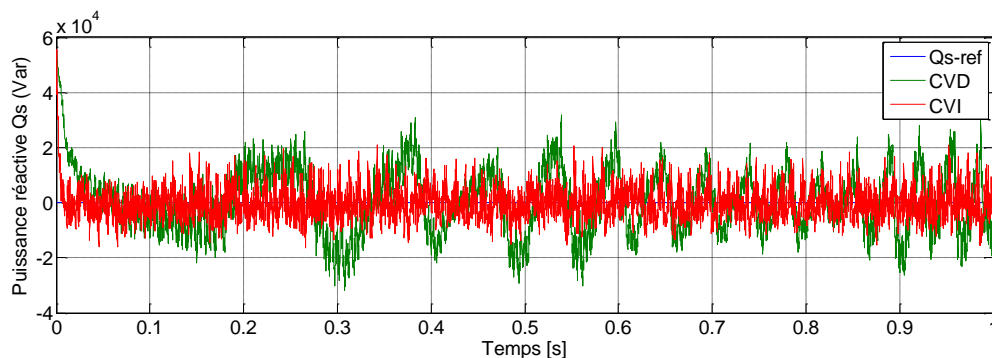


Figure III.14: la comparaison entre CVD et CVI un facteur la puissance réactive

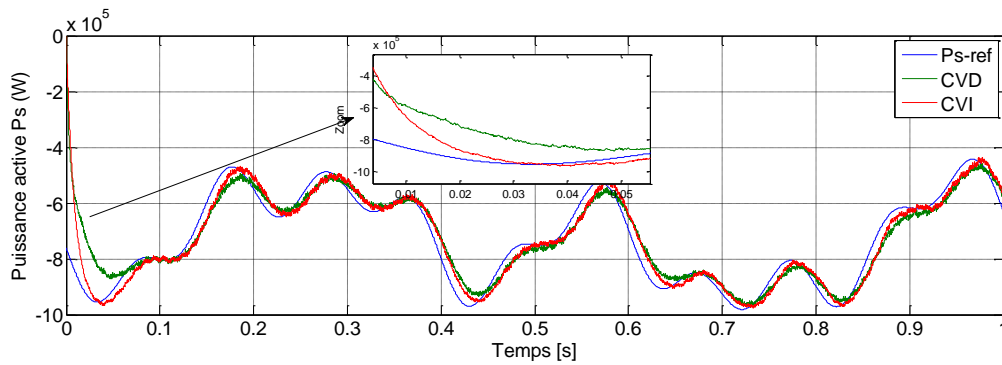


Figure III.15: la comparaison entre CVD et CVI un facteur la puissance active

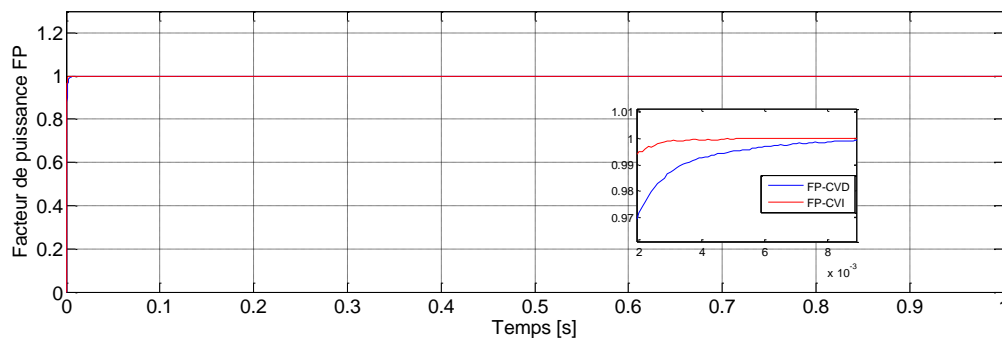


Figure III.16: Facteur de puissance

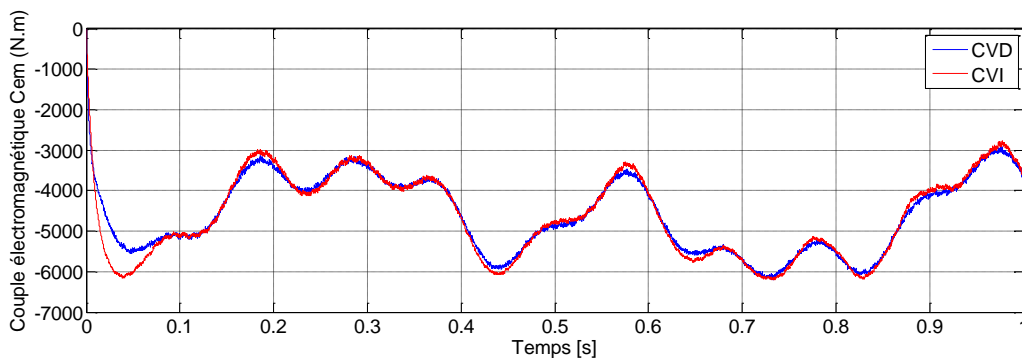


Figure III.17: Couple électromagnétique

Selon les **Figure III.14,III.15,III.16 et III.17**, la méthode indirecte offre de bonnes performances dynamiques et statiques pour la puissance active et réactive. Par conséquent, le temps de réponse et le dépassement sont réduits par rapport à la commande directe.

III.13-Conclusion:

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. A partir de la

CHAPITRE III Commande vectoriel directe et indirecte de la MADA

simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux rotorique permet de découpler les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique commande la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active

Dans ce chapitre, nous avons évalué et examiné par simulation les performances des différents systèmes de régulations des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA pour un fonctionnement déterminé. D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que la méthode indirecte offre de bonnes performances dynamiques et statiques; la méthode directe de réglage des puissances présente la simplicité à mettre en œuvre.

Dans le dernier chapitre étudier les techniques intelligentes, la commande par réseaux de neurones artificiels (RNA) qui est utilisés de plus comme contrôleur dans plusieurs applications industrielles.

CHAPITRE IV
Amélioration de la commande de la MADA
par la technique de RNA

IV.1. Introduction :

La recherche sur les réseaux de neurones a connu un développement important ces dernières années, tant du côté architecture où plusieurs modèles sont proposés, que du côté algorithmes d'apprentissages utilisés pour entraîner ces réseaux. En effet, ces travaux de recherche ont montré que les réseaux de neurones sont des approximateurs universels, ce qui permet de modéliser n'importe quel système non linéaire, et ils sont principalement, dotés de deux propriétés importantes : l'apprentissage et la généralisation. Ces travaux de recherche ont donné lieu à des applications très intéressantes des réseaux de neurones dans plusieurs domaines, et en particulier le domaine de la commande des systèmes non linéaires.

Dans ce chapitre on va présenter une nouvelle stratégie de contrôle de la MADA en utilisant le contrôle par les réseaux de neurones artificiels. Cette commande est ensuite simulée sur Matlab/Simulink

IV.2. Historique :

- ❖ 1890: W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.
- ❖ 1943 : J. Mc Culloch et W. Pitts, laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).
- ❖ 1949 : D. Hebb, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.
- ❖ 1957 : F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuroordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. Notons qu'à cet époque les moyens à sa disposition sont limités et c'est une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes.
- ❖ 1960 : B. Widrow, un automaticien, développe le modèle Adeline (Adaptative Liner Elément). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de retro propagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adeline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières.
- ❖ 1982 : J.J. Hop Field est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels. Il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones.
- ❖ 1983 : La machine de Boltzmann est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du Perceptron. Mais

l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables).

- ❖ 1985 : La rétro propagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches (aussi appelés Perceptrons multicouches). Sa découverte réalisée par trois groupes de chercheurs indépendants indique que « la chose était dans l'air ». Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétro propagation de gradient reste le modèle le plus productif au niveau des applications.

IV.3. Définition des réseaux de neurones:

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de W.M. Culloch et W. 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 neurone interconnecté (figure IV.1)

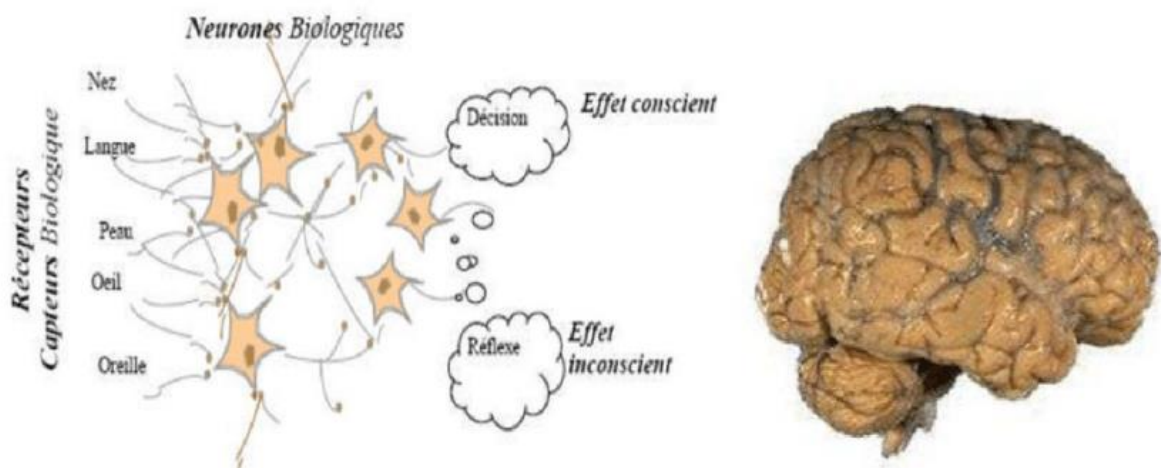


Figure IV.1: Structure d'un réseau de neurone biologique et le cerveau humain.

Un réseau de neurones est un assemblage de constituants élémentaires interconnectés (appelés « neurones » en hommage à leur modèle biologique), qui réalisent chacun un traitement simple mais dont l'ensemble en interaction fait émerger des propriétés globales complexes. Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble forme un système massivement parallèle. L'information est stockée de manière distribuée dans le réseau sous forme de coefficients synaptiques ou de fonctions d'activation, il n'y a donc pas de zone de mémoire et de zone de calcul, l'une et l'autre sont intimement liés.

Un réseau de neurone ne se programme pas, il est entraîné grâce à un mécanisme d'apprentissage. Les tâches particulièrement adaptées au traitement par réseau de neurones sont: l'association, la classification, la discrimination, la prévision ou l'estimation, et la commande de processus complexes.

Les réseaux de neurones artificiels consistent en des modèles plus ou moins inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain en se basant principalement sur le concept de neurone.

IV.4. Objectifs de la commande par les RNA :

Les réseaux de neurones sont bien connus pour leurs capacités d'apprentissage et d'approximation de fonctions continues quelconques. Ils ont été appliqués à l'identification des paramètres, l'estimation dans l'espace d'états des systèmes de commande des moteurs alternatifs. Cependant, la commande par réseaux des neurones artificiels des moteurs à induction ou synchrone est rarement utilisée à cause de la complexité du contrôleur à utiliser. La commande directe du couple DTC ou de puissance DPC est une commande dynamique, récurrente et linéaire qui confère d'excellentes performances à un moteur à asynchrone/synchrone alimenté par un onduleur de tension. Vu la complexité des calculs que requière cette méthode, il est difficile de l'implanter à l'aide des circuits intégrés classiques. Dans la DTC ou la DPC conventionnel, les algorithmes de calcul sont réalisés séquentiellement à l'aide de cartes (DSP : Digital Signal Processor).

La puissante capacité d'apprentissage les rend capables d'approximer une fonction non linéaire très complexe et par conséquent ils sont considérés comme des "approximateurs universels". Les réseaux de neurones ont aussi la propriété d'être adaptatif, cette propriété les rend très puissants dans les applications où la dynamique du système change avec le temps ou si le modèle du système est partiellement connu. Ils sont utilisés de plus comme contrôleur dans plusieurs applications industrielles, car ils présentent de meilleures performances que les contrôleurs conventionnels. Cependant il nécessite plusieurs itérations d'apprentissages pour maîtriser le modèle du processus. Les algorithmes d'apprentissages utilisés ont un effet sur la vitesse d'apprentissage, la stabilité et la convergence des poids et constituent actuellement les problèmes majeurs de la recherche dans ce domaine [37].

IV.5. Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels :

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés :

- Traitement d'images : reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de forme, cryptage, classification, etc.
- Traitement du signal : filtrage, classification, identification de source, traitement de la parole...etc.
- Contrôle : commande de processus, diagnostic, contrôle qualité, asservissement des robots, systèmes de guidage automatique des automobiles et des avions...etc.
- Défense : guidage des missiles, suivi de cible, reconnaissance du visage, radar, sonar, lidar, compression de données, suppression du bruit...etc.
- Optimisation : planification, allocation de ressource, gestion et finances, etc.
- Simulation : simulation du vol, simulation de boîte noire, prévision météorologique, recopie de modèle...etc.

IV.6. Les neurones formels :

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend des paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie".

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure IV.2 [38].

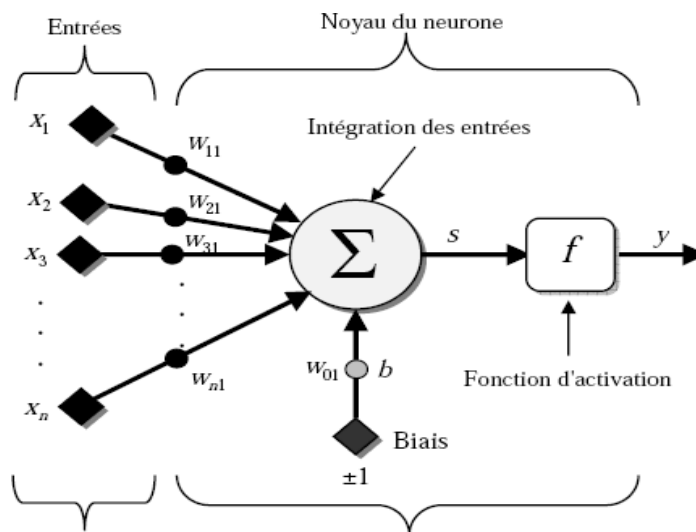


Figure IV.2 : Modèle d'un neurone artificiel

Des observations de neurone biologique, découle le modèle du neurone formel proposé par W. M. Culloch et W. Pitts en 1943 :

- ✓ Les x représentent les vecteurs d'entrées, elles proviennent soit des sorties d'autres neurones, soit de stimuli sensoriels (capteur visuel, sonore...);
- ✓ Les w_{ij} sont les poids synaptiques du neurone j . Ils correspondent à l'efficacité synaptique dans les neurones biologiques ($w_{ij} > 0$: synapse excitatrice; $w_{ij} < 0$: synapse inhibitrice). Ces poids pondèrent les entrées et peuvent être modifiés par apprentissage ;
- ✓ Biais : entrée prend souvent les valeurs -1 ou +1 qui permet d'ajouter de la flexibilité au réseau en permettant de varier le seuil de déclenchement du neurone par l'ajustement des poids et du biais lors de l'apprentissage ;
- ✓ Noyau : intègre toutes les entrées et le biais et calcule la sortie du neurone selon une fonction d'activation qui est souvent non linéaire pour donner une plus grande flexibilité d'apprentissage.

IV.7. Modélisation d'un neurone formel :

La modélisation consiste à mettre en œuvre un système de réseau de neurones sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique on aura une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique, donc une

modélisation pour chacun d’entre eux. On pourra résumer cette modélisation par le tableau IV.1, qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel

Neurone biologique	Neurone formel
Synapses	Poids des connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrites	Signal d'entrée
Noyau ou Somma	Fonction d'activation

TAB. IV.1.: Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel

Le model mathématique d’un neurone artificiel est illustré à la figure IV.2. Un neurone est essentiellement constitué d’un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat s de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert f qui produit la sortie y du neurone. En suivant les notations présentées à la section précédente, les n entrées du neurone correspondent au vecteur $x = [x_1, x_2, x_3 \dots x_n]^T$ alors que $w = [w_{11}, w_{21}, w_{31} \dots w_{n1}]^T$ représente le vecteur des poids du neurone. La sortie de l’intégrateur est donnée par l’équation suivante :

$$s = \sum_{i=1}^n W_{i1}X_i \pm b = W_{11}X_1 + W_{21}X_2 + W_{31}X_3 + \dots + W_{n1}X_n \pm b \tag{IV.1}$$

Que l’on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$s = W^T X \pm b \tag{IV.2}$$

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées plus ce qu’on nomme le biais b du neurone. Le résultat s de la somme pondérée s’appelle le niveau d’activation du neurone. Le biais b s’appelle aussi le seuil d’activation du neurone. Lorsque le niveau d’activation atteint ou dépasse le seuil b, alors l’argument de f devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif [38].

On peut faire un parallèle entre ce modèle mathématique et certaines informations que l’on connaît (ou que l’on croit connaître) à propos du neurone biologique. Ce dernier possède trois principales composantes : les dendrites, le corps cellulaire et l’axone.

Les dendrites forment un maillage de récepteurs nerveux qui permettent d’acheminer vers le corps du neurone des signaux électriques en provenance d’autres neurones. Celui-ci agit comme une espèce d’intégrateur en accumulant des charges électriques. Lorsque le neurone devient suffisamment excité (lorsque la charge accumulée dépasse un certain seuil), par un processus électrochimique, il engendre un potentiel électrique qui se propage à travers son axone pour éventuellement venir exciter d’autres neurones. Le point de contact entre l’axone d’un neurone et la dendrite d’un autre neurone s’appelle la synapse. Il semble que c’est l’arrangement spatial des neurones et de leur axone, ainsi que la qualité des connexions synaptiques individuelles qui détermine la fonction précise d’un réseau de neurones biologique. C’est en se basant sur ces connaissances que le modèle mathématique décrit ci-dessus a été défini. Un poids d’un neurone artificiel représente donc l’efficacité d’une connexion synaptique. Un poids négatif vient inhiber une entrée, alors qu’un poids positif

vient l'accentuer. Il importe de retenir que ceci est une grossière approximation d'une véritable synapse qui résulte en fait d'un processus chimique très complexe et dépendant de nombreux facteurs extérieurs encore mal connus. Il faut bien comprendre que notre neurone artificiel est un modèle pragmatique qui, comme nous le verrons plus loin, nous permettra d'accomplir des tâches intéressantes. La vraisemblance biologique de ce modèle ne nous importe peu. Ce qui compte est le résultat que ce modèle nous permettrons d'atteindre. Un autre facteur limitatif dans le modèle que nous nous sommes donnés concerne son caractère discret. En effet, pour pouvoir simuler un réseau de neurones, nous allons rendre le temps discret dans nos équations. Autrement dit, nous allons supposer que tous les neurones sont synchrones, c'est à dire qu'à chaque temps t , ils vont simultanément calculer leur somme pondérée et produire une sortie :

$$y(t)=f(s(t))$$

(IV.3)

Dans les réseaux neurones biologiques, tous les neurones sont en fait asynchrones.

Revenons donc à notre modèle artificiel tel que formulé par l'équation (VI.3) et ajoutons la fonction d'activation f pour obtenir la sortie du neurone :

$$y = f(s) = f(w^T x \pm b)$$

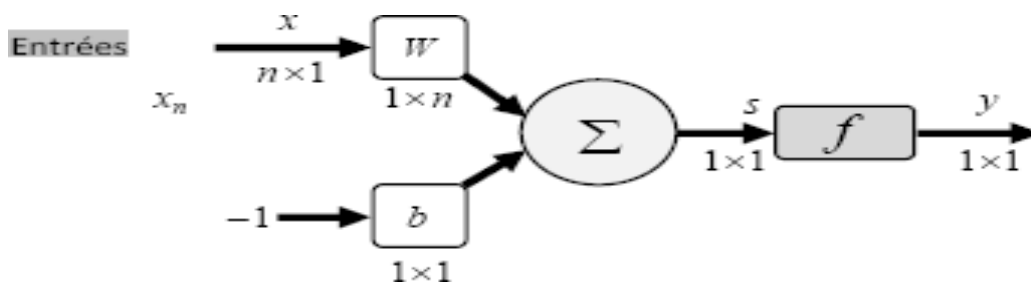
(IV.4)

En remplaçant w^T par une matrice $W = w^T$ d'une seule ligne, on obtient une forme générale que nous adopterons tout au long de ce chapitre :

$$y = f(Wx \pm b)$$

(IV.5)

L'équation (IV.5) nous amène à introduire un schéma de notre modèle plus compact que celui de la figure IV.2. La figure IV.3 illustre celui-ci. On y représente les n entrées comme un rectangle noir. De ce rectangle sort le vecteur x dont la dimension matricielle est $n * 1$. Ce vecteur est multiplié par une matrice W qui contient les poids (synaptiques) du neurone. Dans le cas d'un neurone simple, cette matrice possède la dimension $1 * n$. Le résultat de la multiplication correspond au niveau d'activation qui est ensuite comparé au seuil b (un scalaire) par soustraction. Finalement, la sortie du neurone est calculée par la fonction d'activation f . La sortie d'un neurone est toujours un scalaire [37].



FigureIV.3 : Représentation matricielle du modèle d'un neurone artificiel

IV.8: Fonctions d'activations

Jusqu'à présent, nous n'avons pas spécifié la nature de la fonction d'activation de notre modèle. Il se trouve que plusieurs possibilités existent. Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone sont énumérées au tableau IV.1. Les fonctions d'activations les plus utilisées sont les fonctions «seuil» (en anglais «hard limit»), «linéaire» et «sigmoïde». Comme son nom l'indique, la fonction seuil applique un seuil sur son entrée. Plus précisément, une entrée négative ne passe pas le seuil, la fonction retourne alors la valeur 0 (on peut interpréter ce 0 comme signifiant faux), alors qu'une entrée positive ou nulle dépasse le seuil, et la fonction retourne à 1 (vrai). Utilisée dans le contexte d'un neurone, cette fonction est illustrée à la figure IV.4-a. On remarque alors que le biais b dans l'expression de $y = \text{hard lim}(w^T x - b)$ (équation IV.4) détermine l'emplacement du seuil sur l'axe $w^T x$, où la fonction passe de 0 à 1. Nous verrons plus loin que cette fonction permet de prendre des décisions binaires.

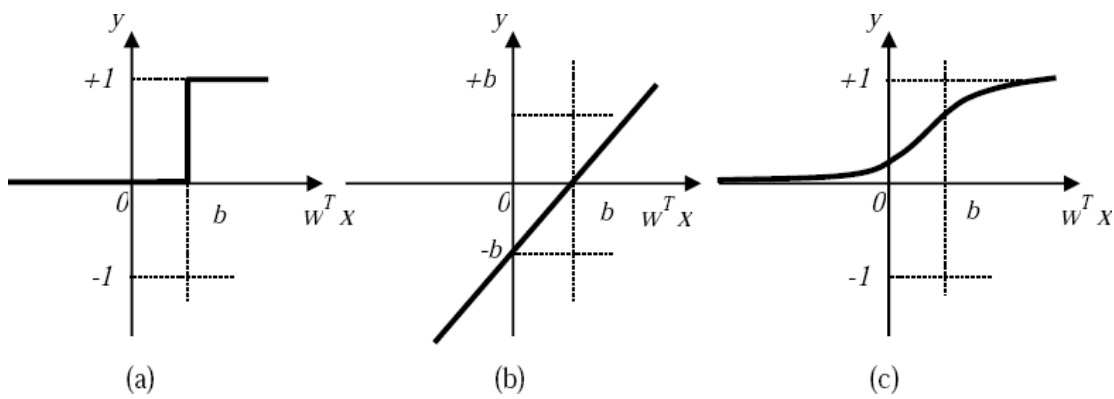


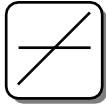




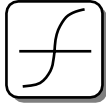
Figure IV.4 Fonctions d'activations: (a) du neurone « seuil » ; (b) du neurone « linéaire », et (c) du neurone « sigmoïde »

La fonction linéaire est très simple, elle affecte directement son entrée à sa sortie :

$$y = s \tag{IV.6}$$

Appliquée dans le contexte d'un neurone, cette fonction est illustrée à la figure IV.4-b. Dans ce cas, la sortie du neurone correspond à son niveau d'activation dont le passage à zéro se produit lorsque $w^T x = -b$.

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Icône	Nom MATALB
Seuil	$y = 0 \quad \text{si} \quad s < 0$ $y = 1 \quad \text{si} \quad s \geq 0$		Hard Lim
Seuil symétrique	$y = -1 \quad \text{si} \quad s < 0$ $y = 1 \quad \text{si} \quad s \geq 0$		Hard limas

Linéaire	$y = s$		Pure lin
Linéaire saturée	$y = 0$ si $s < 0$ $y = s$ si $0 < s < 1$ $y = 1$ si $s > 1$		Staline
Linéairesaturéesymétrique	$y = -1$ si $s < -1$ $y = s$ si $-1 < s < 1$ $y = 1$ si $s > 1$		Satins
Linéaire positive	$y = 0$ si $s < 0$ $y = s$ si $s > 0$		Polin
Sigmoïde	$y = \frac{1}{1 + \exp^{-s}}$		Logis
Tangentehyperbolique	$y = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$		Tansig
Compétitive	$y = 1$ si s maximum $y = 0$ autrement	C	Compet

Tab.IV.2-Différentesfonctionsd'activationsutiliséesdansles RNA

La fonction de transfert sigmoïde est quant à elle illustrée à la figure 6.6.c. Son équation est donnée par :

$$y = \frac{1}{1 + \exp^{-s}} \tag{IV.7}$$

Elle ressemble soit à la fonction seuil, soit à la fonction linéaire, selon que l'on est loin ou près de b , respectivement. La fonction seuil est très non linéaire car il y a une discontinuité lors que $wT x = b$. De son côté, la fonction linéaire est tout à fait linéaire. Elle ne comporte aucun changement de pente. La sigmoïde est un compromis intéressant entre les deux précédentes. Notons finalement, que la fonction «tangente hyperbolique (tanh)» est une version symétrique de la sigmoïde.

IV.9.Architecture des réseaux de neurones :

L'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux dans un même réseau. En d'autres termes, il s'agit de la façon dont ils sont ordonnés et connectés. La plupart des réseaux de neurones utilisent le même type de neurones. Certaines architectures rares sont basées sur des neurones spécialisés. L'architecture du réseau de neurones dépend de la tâche à apprendre.

Un réseau de neurone est en général composé de plusieurs couches de neurones, des entrées jusqu'aux sorties. On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones : les réseaux de neurones non bouclés et les réseaux de neurones bouclés.

1-Les réseaux de neurone non bouclés :

Les réseaux de neurones acycliques exécutent une (ou plusieurs) fonctions algébriques de leurs entrées en combinant les fonctions exécutées par chaque neurone. Les réseaux de neurones acycliques sont représentés graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" les uns aux autres, les informations circulant de l'entrée à la sortie sans "retour en arrière" ; si nous représentons le réseau sous forme de graphe, ses nœuds sont des neurones et les arêtes sont entre eux des "connexions". , alors le graphe d'un réseau acyclique est acyclique. Le terme « connexion » est une métaphore : dans la grande majorité des applications, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs sont calculées par des programmes informatiques plutôt que des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; le terme connexion d'origine biologique a été utilisé car c'est pratique, si trompeur. Il a même donné naissance au terme de connexionnisme.

2-Réseaux de neurones monocouches :

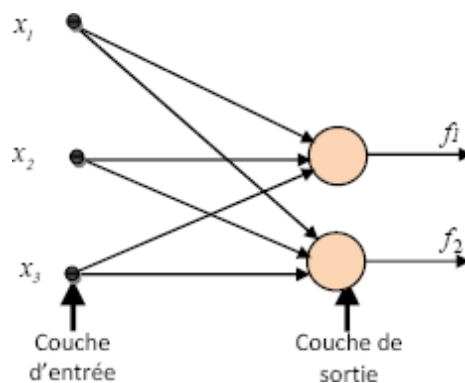


Figure VI.5 : Schéma d'un réseau de neurones monocouche.

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids (figure IV.5) .

3 Réseaux de neurones multicouches :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. La figure IV.6 représente un réseau de neurones non bouclé qui a une structure particulière, très fréquemment utilisée : il comprend des entrées, deux couches de neurones cachés et des neurones de sortie. Les neurones de la

couche cachée ne sont pas connectés entre eux. Cette structure est appelée Perceptron multicouches, [37].

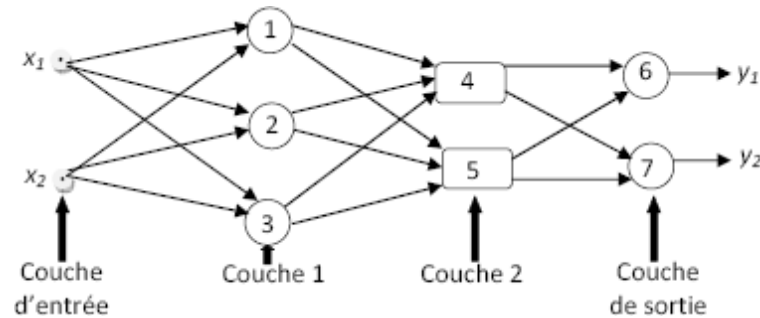


Figure VI.6: Schéma d'un réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches)

On note aussi que Les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche. En utilisant deux couches (une couche cachée et une couche de sortie), à condition d'employer une fonction d'activation sigmoïde sur la couche cachée, on peut entraîner un réseau à produire une approximation de la plupart des fonctions, avec une précision arbitraire (cela peut cependant requérir un grand nombre de neurones sur la couche cachée).

4 Les réseaux de neurones bouclés :

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un retard : un réseau de neurones bouclé est donc un système dynamique, régi par des équations différentielles ; comme l'immense majorité des applications sont réalisées par des programmes d'ordinateurs, on se place dans le cadre des systèmes à temps discret, où les équations différentielles sont remplacées par des équations aux différences. Il s'agit donc de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network or recurrent network), (figure IV.7).

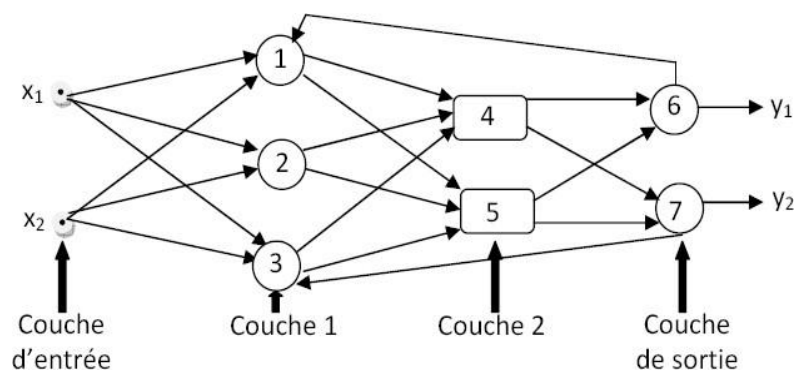


Figure VI.7 Schéma de réseau de neurones bouclé

Les réseaux de neurones boucles sont utilisés pour effectuer des tâches de modélisation de systèmes dynamiques, de commande de processus, ou de filtrage.

IV.10. Modèles des réseaux de neurones :

1 - Modèle de Hop Field :

Le modèle de Hopfield fut présenté en 1982. Ce modèle très simple est basé sur le principe des mémoires associatives. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ce type de réseau est dit associatif (par analogie avec le pointeur qui permet de récupérer le contenu d'une case mémoire). Le modèle de Hopfield utilise l'architecture des réseaux entièrement connectés et récurrents (dont les connexions sont non orientées et où chaque neurone n'agit pas sur lui-même). Les sorties sont en fonction des entrées et du dernier état pris par le réseau.

2 - Modèle de Kohonen :

Ce modèle a été présenté par T. Kohonen en 1982 en se basant sur des constatations biologiques. Il a pour objectif de présenter des données complexes et appartenant généralement à un espace discret de grandes dimensions dont la topologie est limitée à une ou deux dimensions. Les cartes de Kohonen sont réalisées à partir d'un réseau à deux couches, une en entrée et une en sortie. Notons que les neurones de la couche d'entrée sont entièrement connectés à la couche de sortie (figure IV.8).

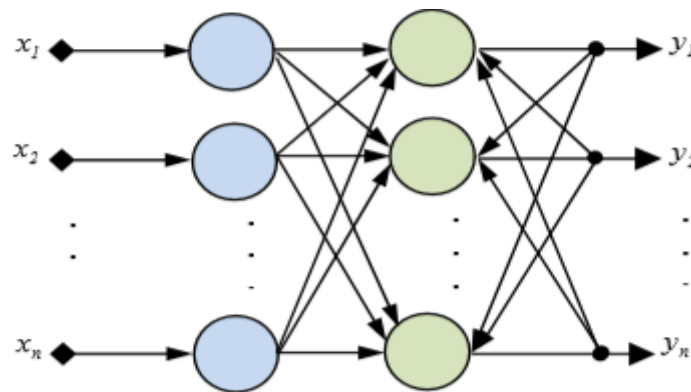


Figure IV.8:- Le modèle de Kohonen.

Les neurones de la couche de sortie sont placés dans un espace d'une ou de deux dimensions en général, chaque neurone possède donc des voisins dans cet espace. Et qu'enfin, chaque neurone de la couche de sortie possède des connexions latérales récurrentes dans sa couche (le neurone inhibe, les neurones éloignés et laisse agir les neurones voisins).

.3 - Le modèle de Perceptron :

Le mécanisme perceptron fut inventé par le psychologue F. Rosenblatt à la fin des années 50 m. Il représentait sa tentative d'illustrer certaines propriétés fondamentales des systèmes intelligents en général.

Le réseau dans ce modèle est formé de trois couches : Une couche d'entrée, fournissant des données à une couche intermédiaire, chargée des calculs, cela en fournissant la somme des impulsions qui lui viennent des cellules auxquelles elle est connectée, et elle répond

généralement suivant une loi définie avec un seuil, elle-même connectée à la couche de sortie (couche de décision), représentant les exemples à mémoriser. Seule cette dernière couche renvoie des signaux à la couche intermédiaire, jusqu'à ce que leurs connexions se stabilisent.

4 - Le modèle ADALINE :

L'ADALINE de Widrow et Hoff est un réseau à trois couches : une d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Ce modèle est similaire au modèle de perceptron, seule la fonction de transfert change, mais reste toujours linéaire (voir figure IV.9).

Les modèles des neurones utilisés dans le perceptron et l'ADALINE sont des modèles linéaires. Séparation linéaire : on dit que deux classes A et B, sont linéairement séparables si on arrive à les séparer par une droite coupant le plan en deux (Figure IV.9).

Le problème est résolu avec les réseaux multicouches, car il peut résoudre toute sorte de problèmes qu'ils soient linéairement séparables ou non [38].

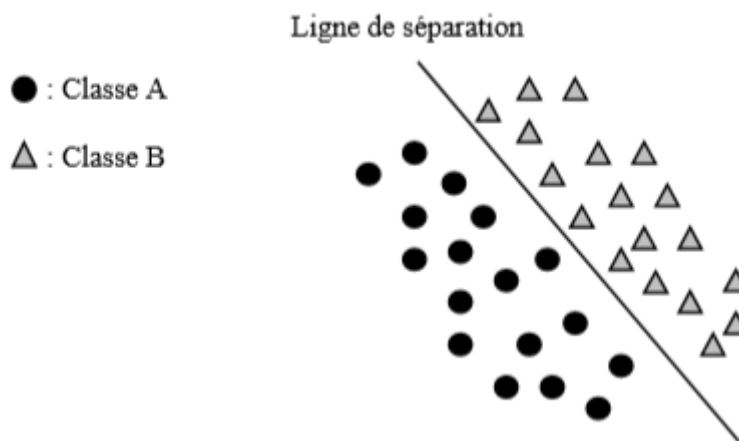


Figure IV.9:- La séparation linéaire entre la classe A et B

IV.11. L'apprentissage :

L'apprentissage et l'adaptation constituent deux caractéristiques essentielles des réseaux de neurones. Le rôle de l'apprentissage est de définir le poids de chaque connexion. De nombreuses règles existent pour modifier le poids des connexions et donc pour arriver à un apprentissage correct. Lorsque la phase d'apprentissage est achevée, le réseau doit être capable de faire les bonnes associations pour les vecteurs d'entrées qu'il n'aura pas appris. C'est l'une des propriétés importantes dans les réseaux de neurones, car elle permet de donner la capacité de reconnaître des formes ressemblantes et même dégradées des prototypes, c'est la phase de reconnaissance [39]

IV.11.1: Types d'apprentissage :

1: Apprentissage supervisé :

L'apprentissage dit "supervisé" est caractérisé par la présence d'un « professeur » qui possède une connaissance approfondie de l'environnement dans lequel évolue le réseau de neurones. En pratique,

les connaissances de ce professeur prennent la forme d'un ensemble de Q couples de vecteurs d'entrée et de sortie que nous noterons $\{(x_1, d_1), (x_2, d_2), \dots, (x_Q, d_Q)\}$, où x_i désigne un stimulus (entrée) et d_i la cible pour ce stimulus, c'est-à-dire les sorties désirées du réseau.

Chaque couple (x_i, d_i) correspond donc à un cas d'espèce de ce que le réseau devrait produire (la cible) pour un stimulus donné. Pour cette raison, l'apprentissage supervisé est aussi qualifié d'apprentissage par des exemples [40].

L'apprentissage supervisé est illustré d'une manière conceptuelle à la figure IV.10. L'environnement est inconnu du réseau. Celui-ci produit un stimulus x qui est acheminé à la fois au professeur et au réseau. Grâce à ses connaissances intrinsèques, le professeur produit une sortie désirée $d(t)$ pour ce stimulus. On suppose que cette réponse est optimale.

Elle est ensuite comparée (par soustraction) avec la sortie du réseau pour produire un signal d'erreur $e(t)$ qui est réinjecté dans le réseau pour modifier son comportement via une procédure itérative qui, éventuellement, lui permet de simuler la réponse du professeur. Autrement dit, la connaissance de l'environnement par le professeur est graduellement transférée vers le réseau jusqu'à l'atteinte d'un certain critère d'arrêt. Par la suite, on peut éliminer le professeur et laisser le réseau fonctionner de façon autonome.

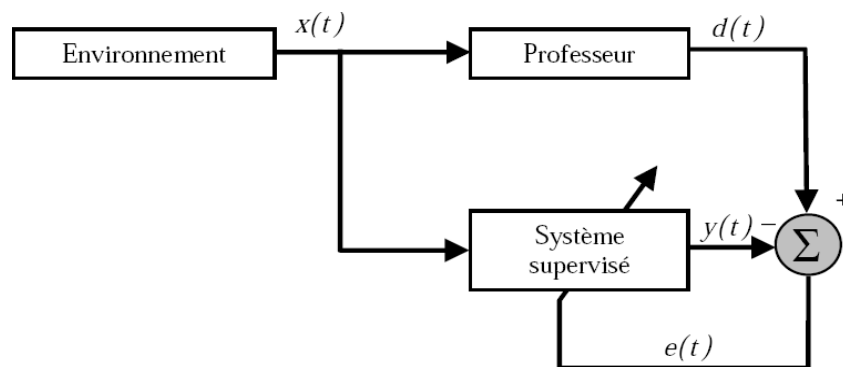


Figure IV.10: Schéma bloc de l'apprentissage supervisé

Le lecteur attentif aura remarqué qu'un apprentissage supervisé n'est rien d'autre qu'un synonyme de l'apprentissage par correction des erreurs. Il possède donc les mêmes limitations, à savoir que sans professeur pour fournir les valeurs cibles, il ne peut d'aucune façon apprendre de nouvelles stratégies pour de nouvelles situations qui ne sont pas couvertes par les exemples d'apprentissage.

2-Apprentissage non supervisé :

Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie. Les réseaux auto-organiseurs de Kohonen sont des réseaux à apprentissage non supervisé les plus connus

3-Apprentissage auto-supervisé :

Le réseau de neurones évalue lui-même ses performances, sans l'aide d'un « professeur ». Un objet est présent à l'entrée du réseau de neurones, à qui on a indiqué la classe à laquelle appartient cet objet. Si le réseau ne le classe pas correctement, il mesure lui-même l'erreur qui

le faite, le propage cette erreur vers l'entrée. Le réseau procède à autant d'itérations qu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la réponse correcte.

IV.11.2- Les méthodes d'apprentissage :

Dans les systèmes experts, les connaissances de l'expert ont une forme énumérée ; elles sont exprimées sous forme de règles. Dans le cas des réseaux de neurones, les connaissances ont une forme distribuée ; elles sont codées dans les poids des connexions, la topologie du réseau, les fonctions de transfert de chaque neurone, le seuil de ces fonctions, la méthode d'apprentissage utilisée. Il existe un certain nombre de méthodes d'apprentissage :

1-Règle de Hebb :

C'est la méthode d'apprentissage la plus ancienne (1943) elle est inspiré de la biologie,. Elle traduit le renforcement des connexions liant deux neurones activés. Si un des deux neurones au moins n'est pas activé, le poids de la connexion n'est pas modifié.

2-Retro-propagation du gradient de l'erreur :

Cet algorithme est utilisé pour les réseaux de type feedforward, ce sont des réseaux de neurones hiérarchiques avec une couche d'entrée, une couche de sortie et au moins une couche cachée. Il n'y a pas de récursivité dans les connexions, et il n'y a pas de connexions entre les neurones d'une même couche. La rétropropagation fonctionne en présentant un vecteur d'entrée au réseau pour continuer à calculer la sortie n à travers la couche. Comparez cette sortie obtenue avec la sortie souhaitée et obtenez l'erreur. A partir de cette erreur, le gradient de l'erreur est calculé, qui à son tour se propage de la couche de sortie à la couche d'entrée, d'où le nom de rétropropagation. Cela permet de modifier les poids du réseau et d'apprendre en conséquence. Répétez pour chaque vecteur d'entrée jusqu'à ce que les critères de validation.

IV.11.3: Algorithmes d'apprentissages :

Dans la plupart des architectures que nous étudierons, l'apprentissage se traduit par une modification de l'efficacité synaptique, c'est à dire par un changement dans la valeur des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre. Soit le poids w_{ij} reliant le neurone i à son entrée j . Au temps t , un changement $\Delta w_{ij}(t)$ de poids peut s'exprimer simplement de la façon suivante :

$$\Delta w_{ij}(t) = w_{ij}(t+1) - w_{ij}(t)$$

(IV.8)

Et, par conséquent, $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t)$, avec $w_{ij}(t+1)$ et $w_{ij}(t)$ représente an respectivement les Nouvo elle et ancienne valeurs du poids w_{ij} .

Un ensemble de règles bien définies permettant de réaliser un tel processus d'adaptation des poids constitue ce qu'on appelle l'algorithme d'apprentissage du réseau.

Dans la suite de ce chapitre, nous n'allons pas se renervure différents algorithmes d'apprentissages ainsi que différents principes pouvant guider l'apprentissage d'un réseau de neurone.

Les caractéristiques des réseaux de neurones sont limitées aux perceptrons multicouches spécifiques pour la régression et la classification supervisée, Structure, fonctions de transfert, algorithme d'apprentissage par rétro-propagation du gradient [Annexe.B]

IV.12.LES RESEAUX MULTICOUCHES ET L'APPROXIMATION DE FONCTIONS :

IV.12.1.LE PERCEPTRON MULTICOUCHE (MLP):

1.Structure du réseau :

Une seule couche de neurones ne pouvant réaliser que des séparations linéaires, l'idée vient alors de rajouter des couches dites cachées pour réaliser un réseau de neurone multicouche. Dans une couche, les neurones ne sont pas connectés entre eux.

Le MLP (Multi Layered Perceptron) est un exemple d'un tel réseau. On peut alors voir la sortie d'un réseau comme une somme pondérée des sorties des neurones de la couche précédente. Si au lieu de neurones linéaires, on utilise des neurones non linéaires (fonction de sortie de type sigmoïde), la sortie d'un réseau est une somme pondérée de sigmoïdes, et donc si l'on place les sigmoïdes des neurones des couches internes judicieusement (en réglant leurs poids), on peut théoriquement approcher n'importe quelle fonction, pourvu que l'on ait une couche cachée et suffisamment de neurones dans cette couche [41].

Le problème se pose alors de régler correctement les poids d'un tel réseau, donc de réaliser son apprentissage.

.2. L'algorithme de la rétropropagation du gradient d'erreur (Backpropagation):

Pour réaliser l'apprentissage d'un réseau multicouche, on utilise la règle d'apprentissage du delta généralisé pour chaque neurone j:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_j(t) \cdot x_i$$

(IV.9)

Où $\delta_j(t)$ est l'erreur faite par le neurone j.

Exemple avec un réseau à deux entrées, trois neurones dans une couche cachée, et deux neurones dans la couche de sortie (Fig.IV.11.) :

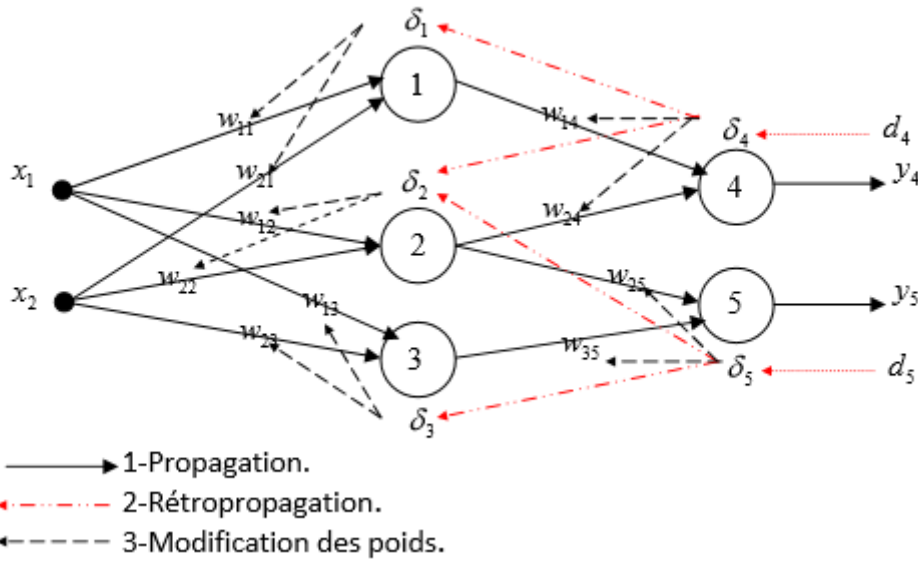


Figure IV.11: Algorithme de Rétropropagation

Pour pouvoir modifier les poids synaptiques reliant la couche d'entrée à la couche cachée

($w_{11}; w_{12}; w_{13}$ et $w_{21}; w_{22}; w_{23}$) il faut connaître les sorties désirées, d_1 et d_2, d_3 qui permettent d'appliquer la règle du delta généralisé, i.e. connaître les erreurs δ_1, δ_2 et δ_3 que font les neurones 1, 2 et 3.

L'idée consiste alors à propager les erreurs δ_4 et δ_5 vers les neurones 1, 2 et 3, au travers des poids

$w_{14}; w_{24}; w_{25}$ et w_{35} d'où le nom de rétropropagation du gradient d'erreur de

l'algorithme proposé indépendamment par Rumelhart, Le Cun et Hinton en 1984 [41].

Cet Algorithme de rétropropagation se résume en :

1 - Calculer par propagation les valeurs de sortie de tous les neurones de la couche d'entrée vers la couche de sortie:

$$y_j(t) = \sigma \sum_{i=0}^n w_{ij}(t)y_i(t) \tag{IV.10}$$

Où $x_0 = -1$ et w_{0j} est le seuil du neurone j , et i y_i correspond à l'entrée x_i du réseau connectée au neurone j ou bien à la sortie du neurone i de la couche précédente.

2 - Calculer par rétropropagation l'erreur des neurones de la couche de sortie vers la couche d'entrée : $\delta_j(t) = (d_j(t) - y_j(t)) * \sigma^r \left(\sum_{i=0}^n \omega_{ij}(t)y_i(t) \right)$

$$\sigma^r \left(\sum_{i=0}^n \omega_{ij}(t)y_i(t) \right) \tag{IV.11}$$

pour tous les neurones j de la couche de sortie reliés à n neurones i de la couche cachée précédente, et :

$$\delta_j(t) = \sum_{k=1}^m (\omega_{jk}(t) \cdot \delta_k(t)) * \sigma^r \left(\sum_{i=0}^n \omega_{ij}(t)y_i(t) \right) \tag{IV.12}$$

pour tous les neurones j d'une couche cachée reliés à m neurones k de la couche suivante, et n neurones i de la couche précédente, où i y correspond à l'entrée x du réseau connectée au neurone j ou bien à la sortie du neurone i de la couche précédente.

3 - Modifier tous les poids du réseau en appliquant la règle du delta généralisé:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_j(t) y_i \quad (\text{IV.13})$$

où y_i correspond à l'entrée x_i du réseau connectée au neurone j ou bien à la sortie du neurone i de la couche précédente.

Exemple:

1. On calcule y_1, y_2, y_3 (on n'oublie pas le seuil w_0 qui n'est jamais représenté):

$$\begin{aligned} y_1 &= \sigma(x_1 w_{11} + x_2 w_{21} - w_{01}) \\ y_2 &= \sigma(x_1 w_{12} + x_2 w_{22} - w_{02}) \\ y_3 &= \sigma(x_1 w_{13} + x_2 w_{23} - w_{03}) \end{aligned} \quad (\text{IV.14})$$

Puis y_4 et y_5

$$\begin{aligned} y_4 &= \sigma(y_1 w_{14} + y_2 w_{24} - w_{04}) \\ y_5 &= \sigma(y_2 w_{25} + y_3 w_{35} - w_{05}) \end{aligned} \quad (\text{IV.15})$$

2. On calcule les erreurs de la couche de sortie

$$\begin{cases} \delta_4 = (d_4 - y_4) \cdot \sigma'(y_1 w_{14} + y_2 w_{24} - w_{04}) \\ \delta_5 = (d_5 - y_5) \cdot \sigma'(y_2 w_{25} + y_3 w_{35} - w_{05}) \end{cases} \quad (\text{IV.16})$$

et les erreurs de la couche cachée:

$$\begin{cases} \delta_1 = w_{14} \cdot \delta_4 \cdot \sigma'(x_1 w_{11} + x_2 w_{21} - w_{01}) \\ \delta_2 = (w_{24} \cdot \delta_4 + w_{25} \cdot \delta_5) \cdot \sigma'(x_1 w_{12} + x_2 w_{22} - w_{02}) \\ \delta_3 = w_{35} \cdot \delta_5 \cdot \sigma'(x_1 w_{13} + x_2 w_{23} - w_{03}) \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

3 - on calcule la nouvelle valeur de chaque poids entre la couche d'entrée et la couche cachée:

$$\begin{cases} w_{11}(t + 1) = w_{11}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_1(t) \cdot x_1 \\ w_{21}(t + 1) = w_{21}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_1(t) \cdot x_2 \\ w_{12}(t + 1) = w_{12}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_2(t) \cdot x_1 \\ w_{22}(t + 1) = w_{22}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_2(t) \cdot x_2 \\ w_{13}(t + 1) = w_{13}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_3(t) \cdot x_1 \\ w_{23}(t + 1) = w_{23}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_3(t) \cdot x_2 \end{cases} \quad (\text{IV.18})$$

et entre la couche cachée et la couche de sortie:

$$\begin{cases} w_{14}(t + 1) = w_{14}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_4(t) \cdot y_1 \\ w_{24}(t + 1) = w_{24}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_4(t) \cdot y_2 \\ w_{25}(t + 1) = w_{25}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_5(t) \cdot y_2 \\ w_{35}(t + 1) = w_{35}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_5(t) \cdot y_3 \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

On vient de réaliser un pas d'apprentissage. Il faut recommencer ces opérations pour tous les vecteurs d'apprentissage, puis tester la qualité de l'apprentissage avec les vecteurs de test qui

n'ont pas servi à l'apprentissage : ce qui permet de tester les capacités de la généralisation du réseau.

L'algorithme de rétropropagation du gradient consiste à effectuer une descente de gradient sur la fonction de coût déjà utilisée pour le neurone seul :

$$\varepsilon(\bar{w}, k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2$$

(IV.20)

Où y est la sortie du réseau (donc une somme pondérée de sigmoïdes) et non la sortie d'un neurone seul.

En dérivant cette expression par rapport à chaque poids w , on retrouve la règle d'apprentissage donnée dans l'algorithme.

IV.12.2. PROPRIETES ET PROBLEMES :

1. Propriété d'approximation universelle :

Si chaque neurone a une fonction de sortie de type sigmoïde (ex.: tanh), et plus généralement si cette fonction est non-linéaire (sauf polynomiale) et dérivable, alors Cybenko a démontré en 1989 qu'un réseau multicouche est capable d'approximer n'importe quelle fonction, à condition que le nombre de neurones dans la couche cachée soit suffisant [41].

Le problème est qu'on ne connaît pas de méthode systématique permettant de donner a priori le nombre de neurones nécessaires dans la couche cachée pour une application donnée. Cependant il existe des méthodes qui permettent de faire évoluer la structure du réseau en cours d'apprentissage :

- Une méthode par élagage consiste à initialiser le réseau avec un très grand
- Nombre de neurones dans la couche cachée et à supprimer ceux d'entre eux dont les poids synaptiques sont très faibles et n'influencent pas trop le comportement du réseau.
- Une méthode par construction consiste à rajouter des neurones dans la Couche cachée au fur et à mesure des « besoins », i.e. lorsque l'erreur globale du réseau ne diminue plus.

2. Problème des valeurs initiales des poids du réseau :

Un autre problème est le temps de convergence de l'algorithme de rétropropagation. En effet, plus la somme pondérée des entrées d'un neurone est forte, plus le neurone se trouve dans la zone de saturation de sa fonction d'activation σ (tanh), donc plus la dérivée σ' est faible (i.e. la pente de la fonction σ en zone de saturation), et moins les poids du neurone sont modifiés.

Il faut donc démarrer l'apprentissage en initialisant les poids du réseau à des valeurs suffisamment faibles qui placent la fonction d'activation dans sa zone linéaire: on choisit donc en général des valeurs initiales inférieures à 0.1.

3. Problème du sur-apprentissage:

Il faut aussi donner suffisamment d'exemples bien répartis (i.e. représentatifs) pour que le réseau généralise correctement, mais pas trop pour qu'il ne fasse pas de surapprentissage (i.e. de l'apprentissage par cœur) au détriment des capacités de généralisation.

Un moyen simple de vérifier qu'il n'y a pas de sur-apprentissage consiste à comparer l'erreur quadratique globale du réseau qui décroît toujours, et l'erreur faite par le réseau sur la base de

test qui diminue puis augmente lorsqu'il y a sur-apprentissage. La base de test ne doit jamais servir à l'apprentissage [41].

4. Problème du réglage du pas d'apprentissage :

Le réglage du pas d'apprentissage α (t) joue aussi un rôle important dans la vitesse de convergence.

Ainsi il est préférable qu'il soit grand au début de l'apprentissage, et diminue au fur et à mesure que le réseau se rapproche de la solution. (La valeur du pas d'apprentissage est de l'ordre de 0.1 à 0.001).

IV.13-Modélisation à l'aide de réseaux de neurones :

Deux stratégies de modélisation qui emploient des réseaux de neurones peuvent être distinguées : la première appelée l'approche par « boîte noire », quand le processus entier est représenté avec le réseau neuronal approprié, et l'approche « boîte grise » ou hybride qui est une combinaison de la modélisation traditionnelle du processus avec un réseau neuronal qui représente les phénomènes moins connus du processus.

1-Modèle « boîte noire » :

Le terme de « boîte noire » s'oppose aux termes de « modèle de connaissance » ou « modèle de comportement interne » qui désignent un modèle mathématique établi à partir d'une analyse physique ou autre du processus que l'on étudie. Ce modèle peut contenir un nombre limité de paramètres ajustables, qui possèdent une signification physique. Nous verrons par la suite que les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour l'élaboration de modèle « boîte grise », intermédiaire entre les modèles « boîtes noires » et les modèles de connaissance.

Le modèle « boîte noire » figure (3-13) constitue la forme la plus primitive de modèle mathématique : il est réalisé uniquement à partir de données expérimentales ou d'observations ; il peut avoir une valeur prédictive, dans un certain domaine de validité, mais il n'a aucune valeur explicative [42]

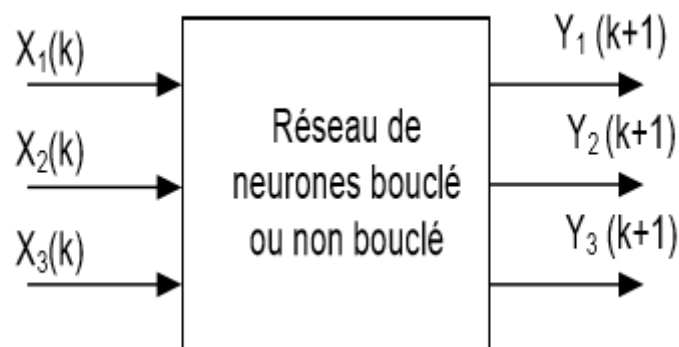


Figure IV.12:Diagramme schématisé d'un modèle neuronal « boîte noire ».

Entre la boîte noire et le modèle de connaissance se situe le modèle semi-physique, ou modèle « boîte grise » (appelé aussi modèle hybride), qui contient à la fois des équations résultant d'une théorie, et des équations purement empiriques, résultant d'une modélisation de type « boîte noire ».

2-Modèle « boîte grise » ou hybride :

Lorsque des connaissances, exprimables sous forme d'équations, sont disponibles, mais insuffisantes pour concevoir un modèle de connaissance satisfaisant, on peut avoir recours à une modélisation « boîte grise » ou (modélisation semi-physique) qui prend en considération à la fois les connaissances et les mesures. Une telle démarche peut concilier les avantages de l'intelligibilité d'un modèle de connaissance avec la souplesse d'un modèle comportant des paramètres ajustables.

3-Conception d'un réseau de neurones :

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leurs mises en œuvre nécessitent :

- ❖ La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- ❖ La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- ❖ La détermination du nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- ❖ La réalisation de l'apprentissage.
- ❖ L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

IV.14-Avantages et inconvénients des réseaux de neurones :

1-Avantage des réseaux de neurones :

- ❖ Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe ;
- ❖ Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par « rétro propagation des erreurs ». l'apprentissage ou construction du modèle est automatique ;
- ❖ Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données ;
- ❖ Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en math, informatique statistique requise ;
- ❖ Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données ;
- ❖ Pour l'utilisation novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

2-Inconvénients des réseaux de neurones :

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche (s) cachée (s) ;
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence ;
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation);
- La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur.

IV.15. Commande vectorielle indirecte par réseaux de neurones :

Comme nous avons dit dans le chapitre précédent nous gardons la commande indirecte en remplaçant les régulateurs Proportionnel-Intégral (PI) par des régulateurs neuronaux (RNA) plus robustes.

Pour notre cas, nous cherchons à construire un réseau simple capable d'apprendre le comportement de la commande indirecte par régulateurs PI.

Pour cette raison on utilise un algorithme de rétropropagation appelé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) pour l'apprentissage des poids des neurones à partir des régulateurs PI (Annexe D) [43].

Chaque réseau de neurones remplit une fonction bien définie dépendant de l'architecture choisie (nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche cachée). Le problème est de trouver celle qui donne de meilleurs résultats. Pour cela, nous avons fait plusieurs essais afin de déterminer l'architecture optimale de réseau (Annexe B).

D'après les essais effectués sur les différentes structures, nous avons constaté que le choix le plus judicieux était de prendre une structure de réseau de neurones à une seule couche cachée contenant trois neurones utilisant la fonction d'activation sigmoïde (FigureIV.13).

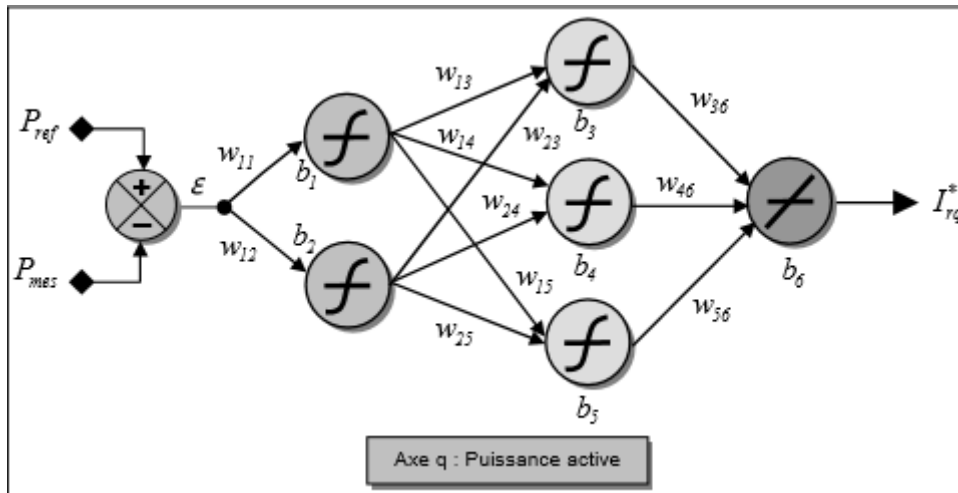


Figure IV.13: Perceptron multicouches: structure (2-3-1)

Les valeurs des poids et des biais pour tous les régulateurs des puissances et des courants sont données dans l'annexe .

Pour rendre possible, dans notre cas, la synthèse d'un régulateur neuronal (RNA) plus robuste, nous considérons que la dynamique de l'onduleur est très rapide par rapport à celle de la machine. Dans ce cas, le modèle de l'onduleur est réduit à son gain statique Kond ce qui permet de réduire l'ordre du système :

$$\begin{cases} v_{rd} = k_{ond}v_{rd} \\ v_{rq} = k_{ond}v_{rq} \end{cases} \quad (IV.21)$$

Le schéma global de la commande vectorielle indirecte avec des régulateurs neuronaux est présenté à la figure IV.14.

L'architecture du réseau de neurones utilisée dans la construction des régulateurs ainsi que le calcul des poids et biais des neurones sont donnés en détail dans l'annexe E.

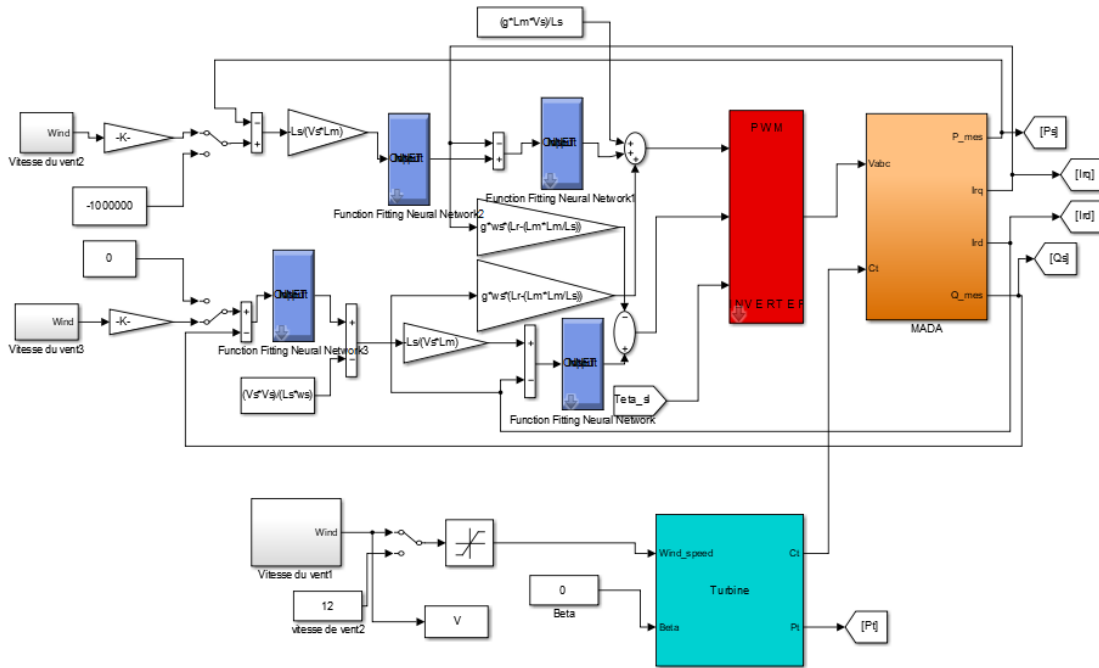


Figure IV.14: Schéma global de la commande indirecte par réseaux de neurones.

IV.16 Résultats de simulation :

On garde les mêmes conditions des simulations que l'essai de la commande indirecte avec des régulateurs PI présenté dans chapitre III.

Les mêmes échelons de la puissance active et réactive sont maintenus.

Les résultats de simulation de la commande indirecte de la puissance active et réactive avec des régulateurs neuronaux sont donnés à la figure IV.14.

Les résultats de simulation obtenus montrent de bonnes performances en termes de temps de réponse (Tableau IV.3) et suivi de consigne pour la puissance active et la puissance réactive.

Technique / Méthode	THD(Tr(ms)		Poursuit de consigne
	Is	Ir	Qs	Ps	
CVI	1.07	65.83	40	35	Bon
RNA	0.46	40.58	13	8	Très bon

Tableau IV.3 : La comparaison entre CVI et RNA

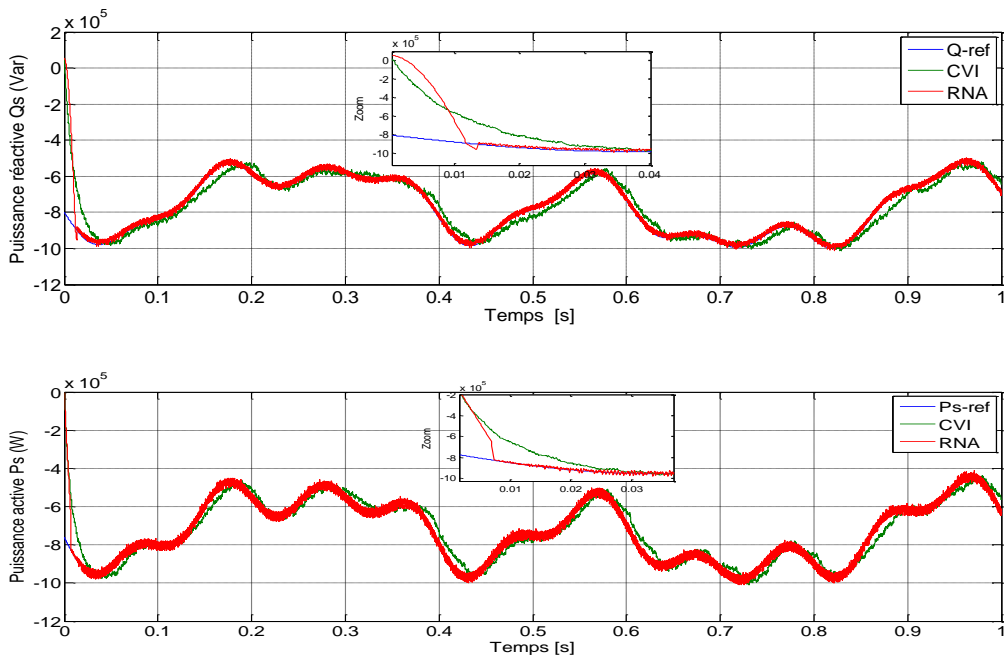
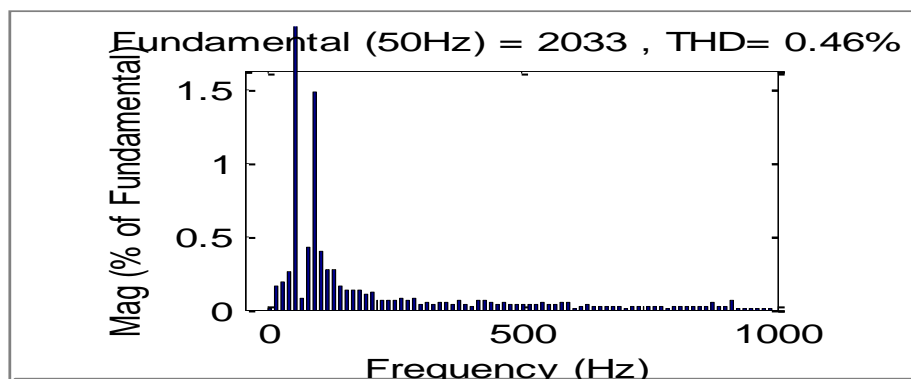
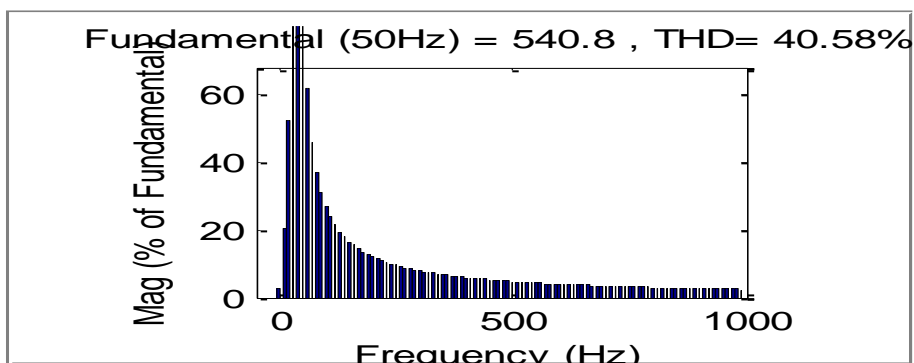


Figure IV.14: Puissance Active et réactive



THD Is



THD Ir

Test de robustesse :

Pour comparer la robustesse du régulateur neuronal par rapport à la robustesse du régulateur PI vis-à-vis des variations paramétriques de la machine, il faut soumettre le régulateur RNA aux mêmes variations appliquées au régulateur PI.

Les résultats des simulations obtenus à la figure IV.25 montrent la robustesse du régulateur neuronal face aux variations des paramètres de la machine.

- ❖ Variation de la résistance rotorique R_r de +100 %;
- ❖ Variation de l'inductance statorique L_s de -20 %;
- ❖ Variation de l'inductance rotorique L_r de -20 %;
- ❖ Variation de l'inductance mutuelle L_m de -20 %.

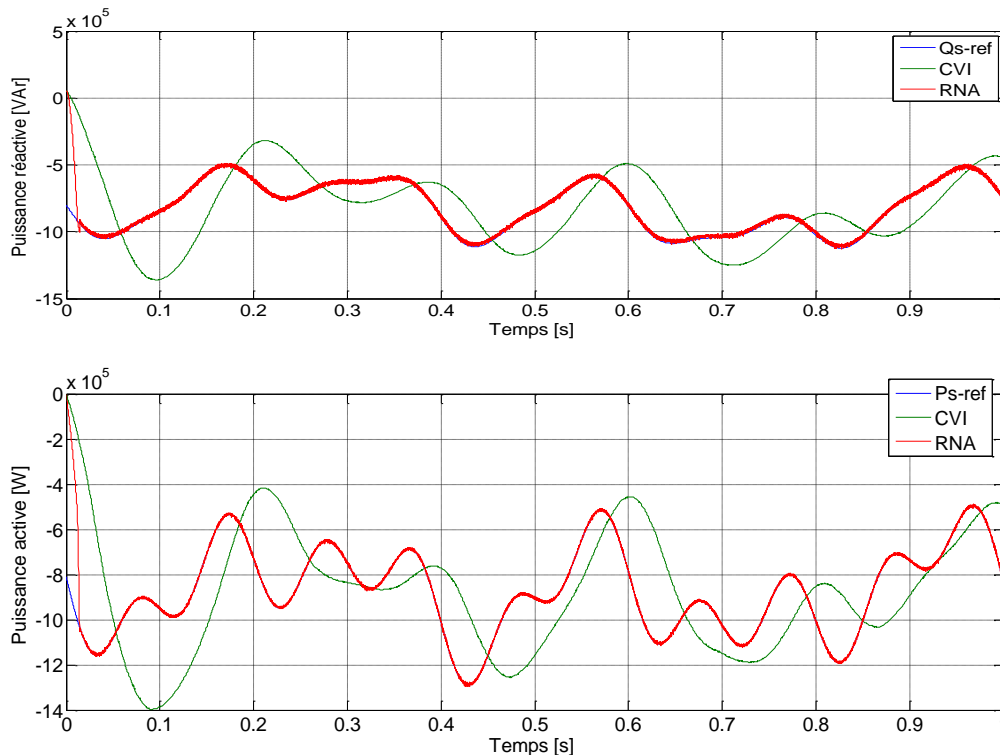


Figure IV.15: Puissance Active et réactive

Les résultats de simulation montrent que des changements simultanés de plusieurs paramètres dégradent les performances de contrôle du réseau de neurones artificiels verrouillés en temps de réponse, mais pas en suivi de consigne, contrairement au contrôle indirect PI entièrement dégenéré.

IV.17. Conclusion :

Les réseaux de neurones sont des techniques puissantes de traitement de données non linéaires qui ont fait leurs preuves dans de nombreux domaines. Ces outils permettent de calculer des fonctions complexes et de les adapter à un ensemble d'exemples grâce à des algorithmes d'optimisation utilisant différentes techniques d'apprentissage.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté quelques éléments essentiels qui permettent de comprendre pourquoi, et dans quels cas, il est avantageux de mettre en œuvre des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Les résultats de simulations ont montré que l'application des réseaux de neurones donne une bonne réponse de puissance active et réactive et une réduction au niveau du THD.

IV.18 Conclusion générale

Dans le cadre de la recherche sur la commande des machines électriques, on a fixé comme objectif principal l'étude de la commande directe de puissance combinée avec d'autres techniques de commande à savoir la modulation vectorielle, la commande par régulateur PI et la commande par réseaux de neurones de la machine asynchrone à double alimentation par deux convertisseurs multiniveaux de tension.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré à la présentation d'une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant ses modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine et les différentes techniques de la commande.

Dans le deuxième chapitre, l'intérêt a été porté sur la modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA. Dans cette partie, des modèles analytiques des différents organes mécaniques constituant le système éolien a été établis,

La commande vectorielle a fait l'objet du troisième chapitre. Le recours à cette stratégie de commande a été motivé par l'observation d'un fort couplage entre la puissance active et la puissance réactive. L'utilisation de la commande vectorielle a permis de découpler le modèle de la MADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes ont été envisagées : la commande directe (CVD) et la commande indirecte (CVI).

Afin d'améliorer la robustesse de la commande indirecte vis-à-vis aux variations paramétriques de la machine, une synthèse d'un régulateur neuronal artificiels (RNA) est proposée dans le quatrième chapitre. Après une analyse de la théorie des réseaux de neurones, nos besoins de commande et de robustesse conduisent à une structure multicouche pour l'architecture du réseau de neurones des régulateurs.

Bibliographie

- [01] **TRIA Fatma Zahra**, "Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien ", Doctorat en Électrotechnique, Université Mohamed Khider biskra, 2018.
- [02] **H. M. Amine**, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques, Mémoire Magister en Electrotechnique Sétif, 2012 .
- [03] **B. BELTRAN**, Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation, BRETAGNE OCCIDENTALE, 6 juillet 2010 .
- [04] **M. MOKHNACHE** « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS »Thème de Magister de université Ferhat Abbas — Sétif 2012
- [05] **M. LATRECHE** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » Thème de Magister de Université Ferhat Abbas de Sétif 2012.
- [06] **M. BOUDIA Sidi Mohammed**, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie", Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd dans 2011.
- [07] **BOUAMEUR Omar ;BENHAMA Youcef** "Simulation de la ferme éolienne de KABERTAN Région d'ADRAR" Mémoire MASTER : 31/05/2016
- [08] **LAHBIB MEBAREK**"Etude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de Kabertene" Mémoire de Master, 30 mai 2016
- [09] **Moumni Amel . Hadji Nesrine:**" Etude d'un forme typique en termes d'atuosuffance en électricité par les Energie rounovlable " 2020
- [10] **Rémi DEFONTAINES** " ÉTUDE ET SIMULATION DE LA MADA" , ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC" , LE 22 JUIN 2012
- [11] **TRIA Fatma Zahra** "Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien" Doctorat en sciences , 13/02/2018.
- [12] **AZZOUZ TAMAARAT** " Modélisation et commende d'un système de conversion éolien à bas de la MADA" , 08/12/2015
- [13] **Pascal Krafczyk**, "Modélisation et mise en oeuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA". 15 Dec 2015
- [14] **MOUSSA Oussama**" Contribution au contrôle d'un système éolien basé sur une MADA sans balais" 2017
- [15] **TAMER Yamina**" Détection de Défauts de la GénératriceAsynchrone a Double Alimentation(DFIG)"Mémoire Magister,22/6/2011
- [16] **BENARIOUA Sofiane** "Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable" thèse doctorat 2012 .

- [17] **Guediri Abdel Karim** « Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension » Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 11 / 01 / 2017
- [18] **LABSI ALI, KENIOUA ABDEL FETTAH** "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation" mémoire master 2021
- [19] **MAZOUZ FARIDA**, " Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents ", M A G I S T E R 27/06/2013.
- [20] **L.Khettache**, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », Mémoire de magister Université de Batna, 2007.
- [21] **LATRECHE Mohammed Tahar** «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012
- [22] **TOUAL BELKACEM** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [23] **S.Hamacha** "étude et commande d'une MSAP" mémoire Magister. Univ Tizi Ouzo Juin 2013
- [24] **Mokrane smaili**: " MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION" 2013 .
- [25] **Abdelhafidh Moualdia** "Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne" 2019
- [26] **AZEDDINE CHAIBA**" COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION PAR DES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE", Thèse de DOCTORAT, Université de Batna 11/ 07/ 2010.
- [27] **A. BOYETTE** « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, GREE de Nancy, 2006.
- [28] **I. BOLDEA**. « Variable speed generators ». Taylor & Francis 2006.
- [29] **K. Mankour N. Bentadj**" Etude et Simulation d'un Système de Conversion d'Énergie Éolienne basée sur une GADA" mémoire master.Univ.Saida. juin 2015
- [30] **A.Melloul**, "Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne". Mémoire de magister de l'université de Ferhat abbas — SETIF, 2010
- [31] **L. BENALIA**, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentés", thèse doctorat, Université de Batna. 02 /06/2010.
- [32] **A. Boyette**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de Doctorat en génie électrique 2006.

- [33] **KHENGAOUI Nafissa, KHENGAOUI Nesslerine** " Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", MASTER ACADEMIQUE,06/08: 2015
- [34] **BEKHADA HAMANE**, COMMANDE ROBUSTE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À BASE DE MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION PILOTÉE PAR UN CONVERTISSEUR MATRICIEL", Thèse de doctorat de UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES , 12 Mars 2018 .
- [35] **Yousfi Ismail, Bakou Ebd Elhakim**, "commande direct du couple DTC-SVM d'une MADA intégré dans un système éolien", master en Electronique et Génie Electrique à de l'Université de Adrar, 2021
- [36] **S. METATLA**, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à Base d'une MADA", mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique, 2009
- [37] **P. Wira**, " Approches neuromimetiques pour l'identification et la commande "; Habilitation à Diriger des Recherches, Universite de Haute Alsace, France, Novembre 2009.
- [38] **DJERIRI Youcef** , « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle »; Doctorat en Sciences, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 05 /11/2015
- [39]: **BOUHAFNA Sebti**; « Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones » ; MAGISTERE EN ELECTROTECHNIQUE/ ,2013
- [40] **YAICHI IBRAHIM**" Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA" Doctorat en Electrotechnique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 14 / 11/ /2019
- [41] **MASSOUM Sarra**, "Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation" Doctorat,2017.
- [42] **Luiz Augusto KAUARK LEITE** " Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine Agricole" 27 Oct 2010
- [43] **D. YUCEF**, "Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien", MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009 .

Annexe « A »

- Paramètres du système éolien

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Number des pales	3
Rayon du rotor R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
Moment d'inertie total J	1000 kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux f_v	0.0024 N.M.S ⁻¹
Vitesse du vent de démarrage v_d	4 M/S
Vitesse du vent d'arrête v_m	25 M/S

Tableau A.1 Paramètres de la turbine éolienne de 1.5MW

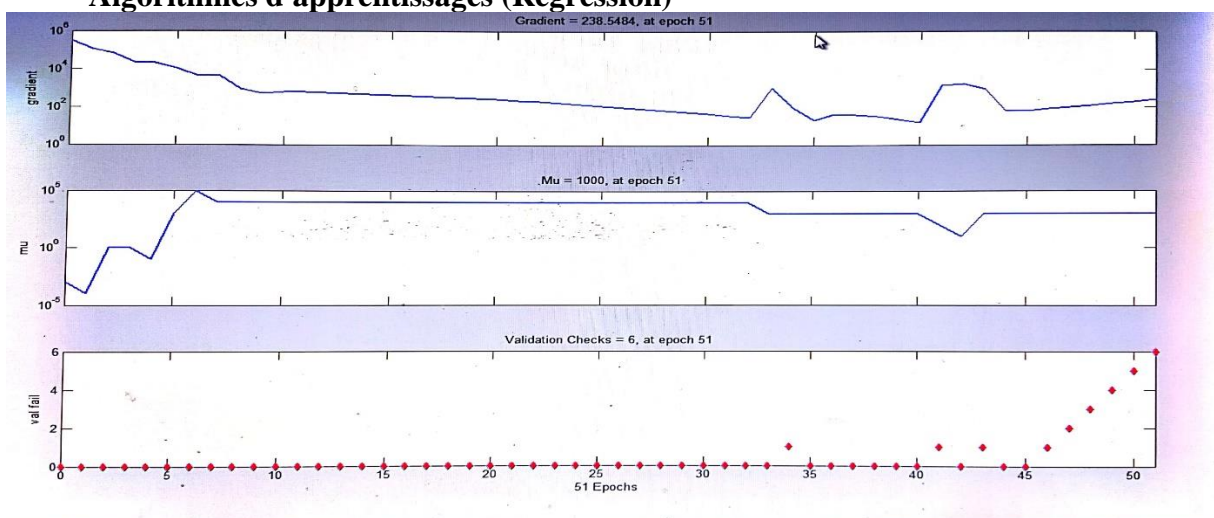
- Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Puissance nominal P_n	1.5 MW
Courant nominal I_n	1900 A
Tension nominale statorique V_s	398/690 V
Fréquence nominale statorique f	50 HZ
Tension nominal rotorique V_r	225/389 V
Résistance statorique R_s	0.012 Ω
Résistance rotorique R_r	0.021 Ω
Inductance statorique L_s	0.0137 H
Inductance rotorique L_r	0.0136 H
Inductance mutuelle M	0.0135 H
Tension du bus continu UDC	1200 V
Inertie totale J	1000 kg.m ²
Nombre de paires de pôles p	2

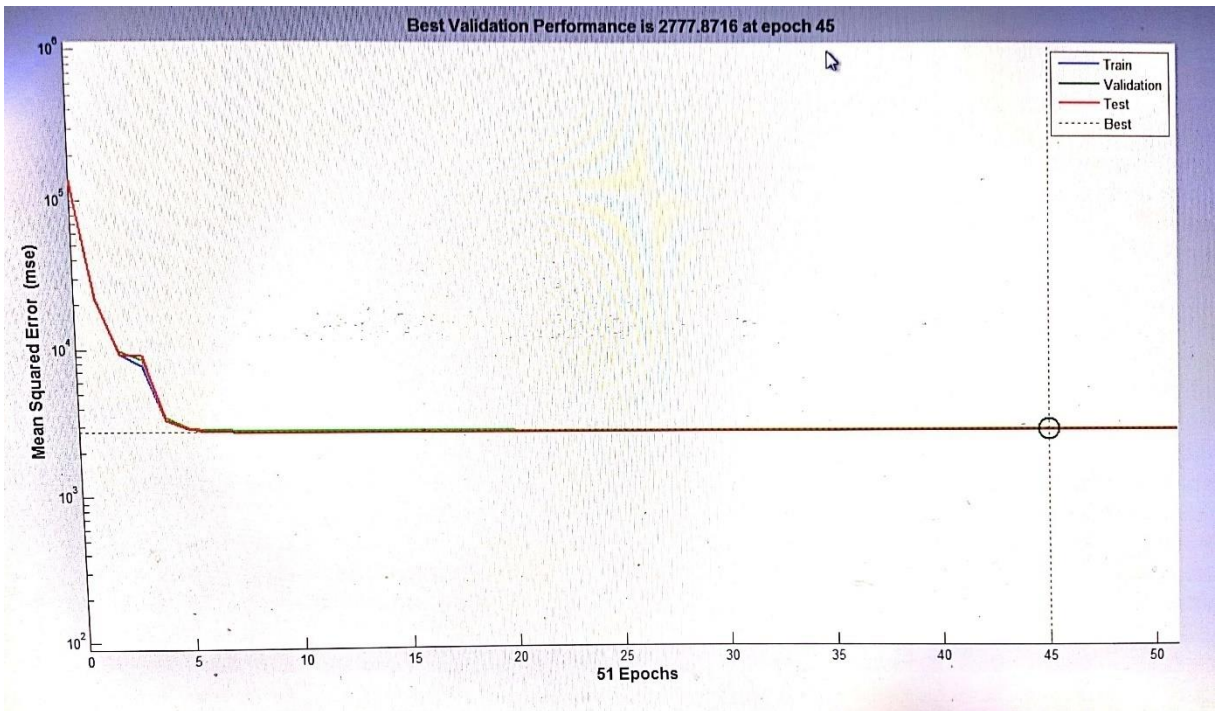
Tableau A.2 Paramètres de la MADA de 1.5MW

Annexe « B »

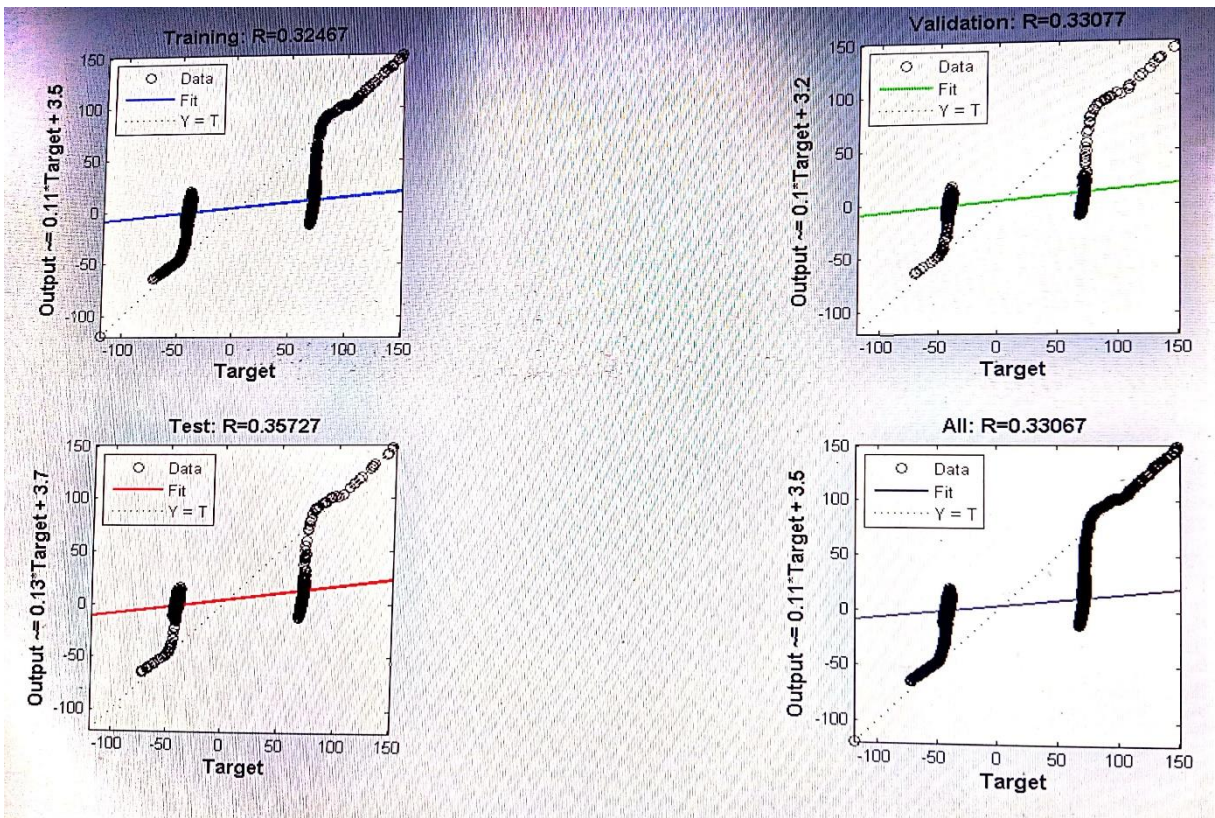
- Algorithmes d'apprentissages (Regression)



(a)



(b)



(c)

Annexe « C »

- Algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) sous MATLAB :

```

clear all;
warning off;
nntwarn off;
% Présentation de la base d'exemple.
load pi_pt; np=length(PT); P=PT(2,1:np)'; T=PT(3,1:np)';
P=P';
T=T';
pas=5;
E1=P(1:pas:np);
SD=T(1:pas:np);
ER=[E1];
% Initialisation des poids et biais.
N0=size(ER,1); N1=2; N2=3 ; N3=1;
[W1,B1] = RANDS(N1,N0);
[W2,B2] = RANDS(N2,N1);
[W3,B3] = RANDS(N3,N2);
df1='deltalog'; df2='deltasig'; df3='deltalin';
grad_min=1e-100;
mu_init=0.1;
mu_inc=3;
mu_dec=0.1;
mu_max=1e100;
It_max=100;
Erreur_seuil=1.0e-20;
W1_ind=[1:N1*N0];
B1_ind=[1:N1]+W1_ind(length(W1_ind));
W2_ind=[1:N2*N1]+B1_ind(length(B1_ind));
B2_ind=[1:N2]+W2_ind(length(W2_ind));
W3_ind=[1:N3*N2]+B2_ind(length(B2_ind));
B3_ind=[1:N3]+W3_ind(length(W3_ind));
ii=eye(B3_ind(length(B3_ind)));
dW1=W1; dB1=B1;
dW2=W2; dB2=B2;
dW3=W3; dB3=B3;
ext_p=nncpyi(ER,N3);
It=1;
% Propagation de l'activation.
x1=W1*ER+B1*ones(1,size(ER,2)); S1=1./(1+exp(-x1));
x2=W2*S1+B2*ones(1,size(ER,2)); S2=1./(1+exp(-x2));
x3=W3*S2+B3*ones(1,size(ER,2)); SR=x3;
% Calcul de l'erreur quadratique.
Er=SD-SR;
SSE=sumsq(Er);

```

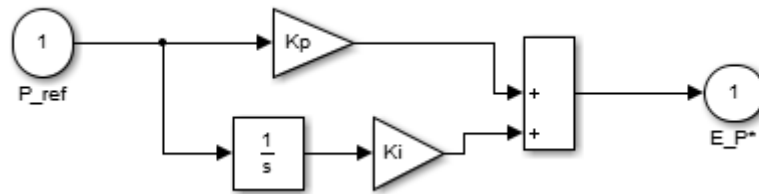
```

% Boucle de Propagation et Rétropopagation de l'erreur
jusqu'a la fin de l'apprentissage.
mu=mu_init;
while (SSE>Erreur_seuil)&(It<It_max);
ext_S1=nncpyi(S1,N3);
ext_S2=nncpyi(S2,N3);
d3=feval(df3,SR);
ext_d3=-nncpyd(d3);
ext_d2=ext_S2.*(1-ext_S2).*(W3'*ext_d3);
ext_d1=ext_S1.*(1-ext_S1).*(W2'*ext_d2);
j1=nncpy(ext_d1',size(ext_p,1)).*nncpyi(ext_p',size(ext_d1,1));
j2=nncpy(ext_d2',size(ext_S1,1)).*nncpyi(ext_S1',size(ext_d2,1));
j3=nncpy(ext_d3',size(ext_S2,1)).*nncpyi(ext_S2',size(ext_d3,1));
j=[j1, ext_d1', j2, ext_d2', j3, ext_d3'];
je=j'*Er(:);
grad=norm(je);
if grad<grad_min;break;end;
jj=j'*j;
while (mu<=mu_max);
    dx=-(jj+ii*mu)\je;
dW1(:)=dx(W1_ind);dB1=dx(B1_ind);
dW2(:)=dx(W2_ind);dB2=dx(B2_ind);
dW3(:)=dx(W3_ind);dB3=dx(B3_ind);
NW1=W1+dW1;NB1=B1+dB1;
NW2=W2+dW2;NB2=B2+dB2;
NW3=W3+dW3;NB3=B3+dB3;
x1=NW1*ER+NB1*ones(1,size(ER,2));S1=1./(1+exp(-x1));
x2=NW2*S1+NB2*ones(1,size(ER,2));S2=1./(1+exp(-x2));
x3=NW3*S2+NB3*ones(1,size(ER,2));SR=x3;
NEr=SD-SR;NSSE=sumsq(NEr);
if (NSSE<SSE);break;end; mu=mu*mu_inc;
end;
if mu>mu_max;break;end;
mu=mu*mu_dec;
W1=NW1;B1=NB1;
W2=NW2;B2=NB2;
W3=NW3;B3=NB3;
Er=NEr;SSE=NSSE;
Erreur(It)=NSSE;
It=It+1;
SSE
end;
if (SSE<=Erreur_seuil);
save wb_hpi W1 W2 W3 B1 B2 B3 SSE pas;
end;

```

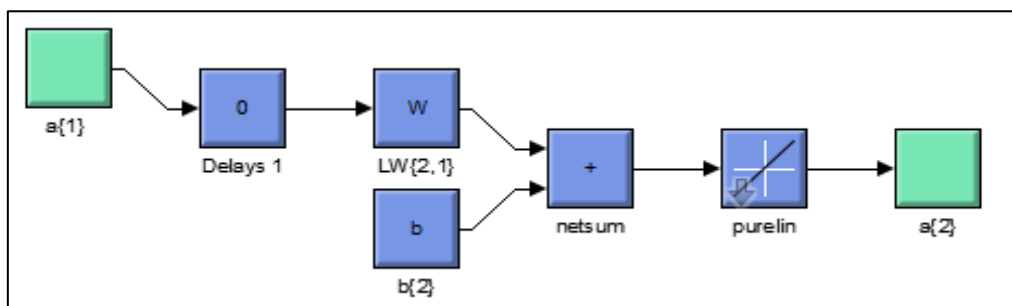
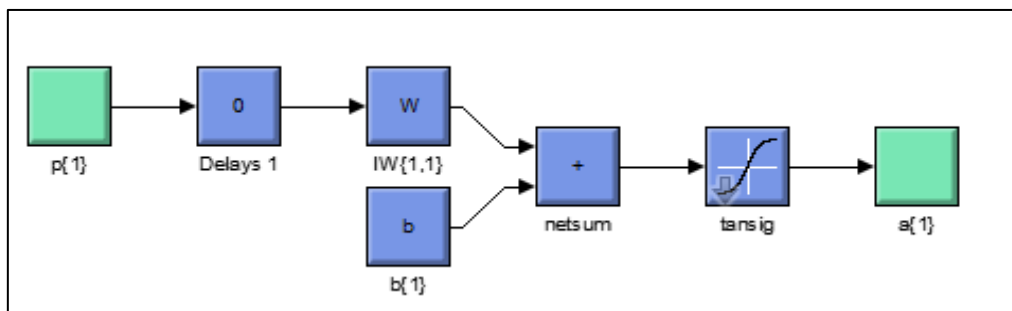
Annexe « D »

- Apprendre le comportement de PI



Annexe « E »

- Architecture du réseau de neurones sous SIMULINK



Résumé :

L'objectif du travail présenté dans cette mémoire est l'étude de la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée directement au réseau par son stator et pilotée par son rotor. L'idée consiste à implémenter un système de contrôle découplé de la MADA pour assurer une meilleure qualité d'énergie et rendre le système insensible aux perturbations. Après la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, deux types de contrôle vectoriel ont fait l'objet de l'analyse pour le contrôle indépendant de la puissance active et réactive : la commande directe et la commande indirecte, basées sur des régulateurs classiques de type PI. D'après les résultats de simulation obtenus, la commande vectorielle indirecte présente de meilleures performances pour un système invariant, Cependant dans le cas où le système est soumis à des variations pose le problème de fluctuations sur les différentes grandeurs de sortie de la MADA. Ont été préposées la technique d'intelligence artificielle à base de réseaux de neurones (RNA) pour remédier à ce problème.

La commande par réseaux de neurones artificiels est introduite pour augmenter la robustesse des correcteurs vis-à-vis des variations paramétriques de la machine. Les résultats obtenus en simulation ont été validés comparativement aux travaux des articles cités en bibliographie.

Mots clés :

Energie éolienne, Machine Asynchrone à Double alimentation (MADA), Commande vectorielle, Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).

ملخص :

الهدف من العمل المقدم في هذه الرسالة هو دراسة النمذجة والتحكم في توربينات الرياح متغيرة السرعة على أساس آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة (MADA) متصلة مباشرة بالشبكة بواسطة الجزء الثابت الخاص بها ومدفوعاً بدوارها. الفكرة هي تنفيذ نظام تحكم منفصل عن وزارة التنمية الدولية البريطانية لضمان جودة أفضل للطاقة وجعل النظام غير حساس للاضطرابات. بعد نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح ، تم تحليل نوعين من التحكم في النواقل من أجل التحكم المستقل في الطاقة النشطة والمتفاعلة: التحكم المباشر والتحكم غير المباشر ، بناءً على المنظمين ، كلاسيكيات نوع PI. وفقاً لنتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها ، فإن التحكم غير المباشر في النواقل يقدم أداءً أفضل لنظام ثابت ، ولكن في الحالة التي يتعرض فيها النظام للتغيرات تطرح مشكلة التقلبات على الكميات المختلفة من مخرجات MADA. تم اقتراح تقنية الذكاء الاصطناعي القائمة على الشبكات العصبية (RNA) لمعالجة هذه المشكلة.

يتم إدخال التحكم عن طريق الشبكات العصبية الاصطناعية لزيادة متانة المصححات مقابل الاختلافات البارامترية للجهاز. تم التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها في المحاكاة مقارنة بعمل المقالات المذكورة في البليوغرافيا.

الكلمات المفتاحية :

الطاقة الهوائية , آلة لاتزامنية , مضاعفة التغذية , التحكم الشعاعي , شبكات الخلايا العصبية الاصطناعية

Abstract :

The objective of the work presented in this dissertation is the study of the modeling and control of a variable-speed wind turbine based on a double-fed asynchronous machine (DFIM) connected directly to the network by its stator and driven by its rotor. . The idea is to implement a control system decoupled from DFID to ensure better power quality and make the system insensitive to disturbances. After the modeling of the wind energy conversion chain, two types of vector control were analyzed for independent control of active and reactive power: direct control and indirect control, based on regulators. PI type classics. According to the simulation results obtained, the indirect vector control presents better performances for an invariant system, however in the case where the system is subjected to variations poses the problem of fluctuations on the various quantities of output of the MADA. The technique of artificial intelligence based on neural networks (ANN) has been proposed to remedy this problem.

The control by artificial neural networks is introduced to increase the robustness of the correctors vis-à-vis the parametric variations of the machine. The results obtained in simulation have been validated compared to the work of the articles cited in the bibliography.

Key words :

Wind energy, Doubly Fed Induction Machine (DFIM), Vector control, Artificial Neural Networks (ANN)