

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



جامعة باجي مختار – عنابة  
كلية علوم الهندسة  
قسم الإلكترونيك

## Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de :

### Doctorat en Sciences

Thème :

## Modélisation et Commande d'une chaîne de conversion d'énergie renouvelable

Option : Automatique Industrielle

Par : **BEDOUD Khouloud**

DEVANT LE JURY

<i>Président :</i>	BAHI Tahar	Professeur	<i>Université de Annaba</i>
<i>Rapporteur :</i>	ALI RACHEDI Mahieddine	Professeur	<i>EPST Annaba</i>
<i>Co-Rapporteur :</i>	LAKEL Rabah	Professeur	<i>Université de Annaba</i>
<i>Examineurs :</i>	MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	<i>Université de Guelma</i>
	DIB Djalel	Professeur	<i>Université de Tébessa</i>
	KHELIL Khaled	Professeur	<i>Université de Souk Ahras</i>

Année: 2016

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord, mes remerciements vont tout premièrement à *Allah* tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'il m'a donné pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à mon encadreur Monsieur *ALI RACHEDI Mahieddine* Professeur à l'école préparatoire en sciences et techniques de Annaba (EPST-Annaba) et mon co-encadreur Monsieur *LAKEL Rabeih* Professeur au département d'électronique de l'université Badji-Mokhtar Annaba, d'avoir acceptés la direction de ma thèse. Qu'ils trouvent ici mon respect pour leurs conseils, leurs disponibilités, leurs qualités humaines, leurs suivis et surtout la confiance qu'ils m'ont témoigné.

**J'**adresse également mes remerciements à tous les membres de jury : Pr. BAHI Tahar, Pr. MOUSSAOUI Abdelkrim, Pr. DIB Djalel et le Pr. KHALED Khelil d'avoir accepté d'examiner ce travail.

**U**n grand merci à tous mes collègues de travail de l'unité de recherche en matériaux avancés-Annaba, mes amies et tous ceux qui m'ont soutenu, aidé et encouragé afin que je puisse mener ce travail à terme.

# ملخص

## ملخص

إن الاستنفاد المتواصل و المثبت للموارد الأحفورية, حفز الباحثين في جميع أنحاء العالم لإيجاد حلول بديلة ومبتكرة للتغلب على العجز الطاقوي من اجل تحقيق التوازن من الاحتياجات الطاقوية الذي لا يتوقف عن النمو, والحد من التأثير على البيئة. من هذه الخلاصة, تطوير مصادر انتاج الطاقة الغير ملوثة على اساس الطاقة المتجددة اصبح اكثر فاكثرا ملتصقا و مشجع على حد سواء من منتجي الطاقة الكهربائية و القطاعات العامة . لذلك انه في هذا الإطار يكمن العمل المعروض في هذه الأطروحة. انه يتعلق بالنمذجة والتحكم في سلسلة تحويل طاقة الرياح على أساس الة غير متزامنة مزدوجة التغذية تعمل على سرعة متغيرة وفي الأرباع الأربعة من الخريطة عزم الدوران-سرعة. نستعمل التركيبية حيث الجزء الثابت يكون متصلا مباشرة بشبكة التوزيع, في حين الجزء المتحرك يوصل الى نفس الشبكة عبر اثنين من محاولات الطاقة المركبين حسب النمط جنب الى جنب. التحكم الغير مباشر للاستطاعات الفاعلة والغير فاعلة، الضامن للأداء الأمثل قد عرض، علاوة على ذلك، وبسبب التغيرات التي لا مفر منها للمعلمات التحكم المتكيف الغامض والتحكم العصبي تم عرضهما، لتقييم أداء ومثانة التحكم وجها لوجه مع التحول المعلماتي.

**كلمات البحث:** الرياح، التحكم المتكيف، الشبكة العصبية، المنطق الغامض، فعالية.

# Résumé

\*\*\*\*\*

## Résumé

L'épuisement imminent et incontesté des ressources fossiles a motivé les chercheurs à travers le monde à rechercher des solutions alternatives et innovantes palliant le déficit énergétique afin d'assurer l'équilibre en besoin énergétique, qui ne cesse de croître, et limitant l'impact sur l'environnement. De ce constat, le développement des sources de production d'énergie non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité et encouragé à la fois par les producteurs d'énergie électrique et les secteurs publics. Ainsi, c'est dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté dans cette thèse. Il concerne la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) fonctionnant à vitesse variable et dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse. On utilise une configuration où le stator est branché directement au réseau de distribution, tandis que le rotor est connecté au même réseau par l'intermédiaire d'une cascade de deux convertisseurs statiques de puissance, montés en mode back à back. Une commande indirecte des puissances active et réactive assurant un fonctionnement optimale est présentée. Par ailleurs, à cause des variations inévitables des paramètres, une commande adaptative floue et une commande neuromimétique ont été proposées et leurs performances et robustesse vis-à-vis des variations paramétriques ont été évaluées.

**Mots clefs :** *éolienne, GADA, commande adaptative, réseau de neurone, logique floue, performances.*

---

# Abstract

© 2008 / 2009 / 2010 / 2011 / 2012 / 2013 / 2014 / 2015 / 2016 / 2017 / 2018 / 2019 / 2020 / 2021 / 2022 / 2023 / 2024 / 2025 / 2026 / 2027 / 2028 / 2029 / 2030 / 2031 / 2032 / 2033 / 2034 / 2035 / 2036 / 2037 / 2038 / 2039 / 2040 / 2041 / 2042 / 2043 / 2044 / 2045 / 2046 / 2047 / 2048 / 2049 / 2050 / 2051 / 2052 / 2053 / 2054 / 2055 / 2056 / 2057 / 2058 / 2059 / 2060 / 2061 / 2062 / 2063 / 2064 / 2065 / 2066 / 2067 / 2068 / 2069 / 2070 / 2071 / 2072 / 2073 / 2074 / 2075 / 2076 / 2077 / 2078 / 2079 / 2080 / 2081 / 2082 / 2083 / 2084 / 2085 / 2086 / 2087 / 2088 / 2089 / 2090 / 2091 / 2092 / 2093 / 2094 / 2095 / 2096 / 2097 / 2098 / 2099 / 2100

## Abstract

The imminent exhaustion and uncontested from fossil resources has motivated researchers worldwide to find alternatives and innovative solutions to the energy deficit to such resources in order to ensure equilibrium in energy requirements, which continues to grow, and limiting the impact on the environment. For this, the development of non-polluting energy sources based on renewable energy is increasingly solicited and encouraged both by electric power producers and the public sector. So it is in this context fits the work presented in this thesis. It concerns the modeling and the control of wind energy conversion chain based on a double fed induction machine DFIG operating at variable speed and in the four quadrants of the torque-speed plane. We use a configuration in which the stator is connected directly to the distribution network, while the rotor is connected to the same network via a cascade of two static power converters, mounted in back-to-back mode. An indirect control of active and reactive power ensuring optimal functioning is presented. Furthermore, due to the inevitable variations of the parameters, fuzzy adaptive control and neuromimetic control have been proposed and their performance and robustness were evaluated.

**Keywords:** *wind, DFIG, adaptive control, neural network, fuzzy logic, performances.*

---

# Table des matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>Chapitre I :</b>	<b>Etat de l'art</b>
1.1 Introduction.....	7
1.2 Energie éolienne.....	8
1.3 Evaluation de l'énergie en Algérie.....	9
1.3.1 Consommation de l'énergie primaire .....	10
1.3.2 Production d'électricité.....	11
1.3.3 Puissance installée.....	12
1.4 Potentiel éolien en Algérie.....	13
1.5 Evaluation de l'énergie renouvelable dans le monde.....	14
1.5.1 Production mondiale d'énergie primaire.....	15
1.5.2 Capacité éolienne installée.....	16
1.6 Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie.....	20
1.7 Principe de la conversion d'énergie éolienne.....	23
1.8 Les types des éoliennes.....	25
1.8.1 Disposition géométrique.....	25
1.8.2 Puissance délivrée .....	27
1.8.3 Types des générateurs utilisés.....	28
1.8.3.1 Système éolien à vitesse variable.....	28
1.8.3.1.1 Machine asynchrone à double alimentation.....	28
1.8.3.1.2 Machine asynchrone à rotor bobiné.....	29
1.8.3.1.3 Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimant permanent	31
1.8.3.2 Système éolien à vitesse fixe.....	32
1.8.3.2.1 Machine asynchrone à cage.....	32
1.9 Conclusion. ....	36
<b>Chapitre II:</b>	<b>Modélisation et commande de la chaîne de conversion éolienne</b>
2.1 Introduction.....	38
2.2 Description du système de conversion.....	39

# Table des matières

---

2.3 Modélisation de la chaîne de conversion.....	40
2.3.1 Modélisation de la turbine éolienne.....	40
2.3.2 Modélisation du multiplicateur.....	42
2.3.3 Modélisation de l'arbre.....	43
2.3.4 Modélisation de la GADA.....	44
2.3.5 Modélisation du bus continu.....	45
2.3.6 Modélisation du convertisseur côté réseau dans le repère de Park.....	45
2.4 Commande de la chaîne de conversion.....	48
2.4.1 Avantage du fonctionnement à vitesse variable.....	48
2.4.2 Stratégie de commande.....	50
2.4.3 Contrôle de la vitesse de rotation.....	51
2.4.4 Commande vectorielle de la GADA.....	53
2.4.5 Contrôle du convertisseur côté réseau.....	56
2.4.5.1 Contrôle des courants.....	56
2.4.5.2 Contrôle de la tension du bus continu.....	56
2.4.6 Contrôle du convertisseur côté machine.....	57
2.5 Simulation et interprétation.....	58
2.6 Evaluation et analyse du potentiel éolien dans la ville de Annaba.....	66
2.6.1 Analyse de la puissance du vent.....	66
2.6.1.1 Fonction de densité de weibull.....	66
2.6.1.2 Calcul des paramètres de weibull.....	67
2.6.1.2.1 Méthode graphique.....	67
2.6.1.2.2 Méthode du maximum de vraisemblance.....	68
2.6.1.2.3 Méthode du maximum de vraisemblance modifiée.....	68
2.6.1.2.4 Méthode du facteur de modèle d'énergie.....	68
2.6.1.2.5 Méthode empirique.....	69
2.6.1.3. Extrapolation verticale de la vitesse du vent et des paramètres de weibull.....	69
2.6.1.4 Vitesse du vent la plus probable et la vitesse du vent transportant énergie maximale.....	70
2.6.2 Estimation du potentiel éolien.....	70
2.6.2.1 Densité de puissance.....	70

# Table des matières

---

2.6.2.2 Densité d'énergie.....	71
2.6.2.3 Facteur de capacité.....	71
2.6.3 Résultats et analyses.....	71
2.6.3.1 Analyse statistique.....	72
2.6.3.2 Extrapolation des paramètres de weibull.....	74
2.6.3.3 Analyse du vent de l'année 2014.....	76
2.6.3.4 Estimation de la production énergétique et choix de la turbine éolienne.....	82
2.7 Conclusion.....	84

## Chapitre III :

## Commande adaptative floue

<b>Partie I : Introduction à la logique floue.....</b>	<b>87</b>
3.1 Historique de la logique floue.....	87
3.2 Ensembles flous.....	87
3.2.1 Variable linguistique.....	88
3.2.2 Fonction d'appartenance.....	89
3.2.3 Propriétés des ensembles flous.....	90
3.2.4 Opérations sur les ensembles flous.....	91
3.3 Structure générale d'un système d'inférence flou.....	93
3.3.1 Fuzzification.....	95
3.3.2 Règles floues.....	96
3.3.3 Etapes du raisonnement flou et inférence flou.....	96
3.3.4 Défuzzification.....	97
3.3.4.1 Méthode du centre de gravité.....	98
3.3.4.2 Méthode moyenne des maximum.....	98
3.4 Modélisation floue.....	98
3.4.1 Modèle flou Mamdani.....	99
3.4.2 Modèle flou relationnel.....	99
3.4.3 Modèle flou Takagi sugeno.....	100



# Table des matières

---

<b>Partie II : Régulateur PI adaptatif</b> .....	101
3.5 Objectifs poursuivis.....	101
3.6 Introduction.....	102
3.7 Description d'un régulateur PI adaptatif.....	104
3.8 Structure du mécanisme d'un régulateur FLC-PI adaptatif.....	105
3.8.1 Fuzzification .....	105
3.8.2 Inférence .....	105
3.8.3 Defuzzification.....	106
3.8.4 Normalisation.....	106
3.9 Algorithme de conception d'un PI adaptatif.....	106
3.10 Calcul des paramètres d'adaptation.....	107
3.11 Structure générale du PI adaptatif.....	108
3.12 Stabilité.....	111
3.13 Robustesse.....	115
3.14 Simulation et résultats .....	115
3.15 Conclusion.....	118

## Chapitre IV :

## Commande neuromimétique

<b>Partie I : Réseau de neurones artificiels</b> .....	121
4.1 Introduction.....	121
4.2 Définition.....	122
4.3 Architecture des réseaux de neurones.....	126
4.3.1 Réseaux non bouclés.....	126
4.3.2 Réseaux bouclés .....	127
4.4 Processus d'apprentissage numériques des réseaux de neurones.....	128
4.4.1 Apprentissage supervisé.....	129
4.4.2 Apprentissage non supervisé.....	130
4.5 Algorithmes d'apprentissage.....	130
4.5.1 Apprentissage par correction d'erreur.....	130
4.5.2 Apprentissage à rétropropagation du gradient d'erreur.....	132

# *Table des matières*

---

4.5.3 Apprentissage compétitif.....	132
4.6 Commande neuromimétique des systèmes dynamiques.....	133
4.6.1 Commande directe.....	134
4.6.1.1 Commande directe par modèle inverse.....	134
4.6.1.2 Commande directe avec modèle de référence.....	135
4.6.2 Commande inverse-directe sans modèle de référence.....	136
4.6.3 Commande indirecte.....	136
4.6.3.1 Commande indirecte avec modèle de référence.....	137
4.6.4 Commande inverse avec modèle de référence.....	138
4.6.5 Différentes architectures pour émuler un régulateur.....	138
<b>Partie II : Régulateur neuronal.....</b>	<b>140</b>
4.7 Définition.....	140
4.8 Conception d'un système de commande.....	141
4.9 Structure du régulateur neuronal.....	142
4.10 Simulation et interprétations.....	143
4.11 Conclusion.....	152
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>155</b>
<b>Références.....</b>	<b>159</b>
<b>Annexe A.....</b>	
<b>Annexe B.....</b>	

# *Liste des figures*

---

<b>Chapitre I :</b>	<b>Etat de l'art</b>
Fig. 1. 1 Taux de couverture de la production d'électricité .....	11
Fig. 1. 2 Capacité installée .....	12
Fig. 1. 3 Evolution de la puissance de 2003 à 2013 en Algérie .....	13
Fig. 1. 4 Carte préliminaire des vents en Algérie.....	14
Fig. 1.5 Capacité d'énergie éolienne installée dans le monde en 2014.....	17
Fig. 1.6 Capacité d'installation des éoliennes annuelle par région de 2006 à 2014.....	18
Fig. 1. 7 Capacité mondiale des éoliennes installées en MW de 1996 à 2014 .....	19
Fig. 1. 8 Intégration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh....	21
Fig. 1. 9 Structure du parc de la production nationale en MW.....	22
Fig. 1.10 Eléments constitutifs d'une éolienne et principe de conversion d'énergie.....	24
Fig. 1. 11 Coefficients de puissance en fonction de la vitesse relative pour différents types de turbines .....	25
Fig. 1. 12 Types d'éoliennes selon la disposition géométrique.....	27
Fig. 1. 13 Système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation.....	29
Fig. 1. 14 Système éolien à base d'une machine asynchrone à rotor bobiné.....	30
Fig. 1. 15 Système éolien à base d'une machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants.....	31
Fig. 1. 16 Eolienne à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage.....	33
Fig. 1. 17 Système éolien à base d'une machine asynchrone à cage.....	34
Fig. 1. 18 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs.....	34
 <b>Chapitre II:</b>	 <b>Modélisation et commande de la chaîne de conversion éolienne</b>
Fig. 2. 1 Schéma synoptique d'un système éolien basé sur une GADA.....	40
Fig. 2. 2 Coefficient de puissance en fonction de lambda .....	42
Fig. 2. 3 Partie mécanique de la turbine éolienne.....	42
Fig. 2. 4 Modèle de l'arbre de l'éolienne.....	43
Fig. 2. 5 Structure d'un convertisseur triphasé à deux niveaux connecté au réseau.....	46
Fig. 2. 6 Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel tournant dq.....	48

## *Liste des figures*

---

Fig. 2. 7 Courbes de la puissance en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse du vent.....	49
Fig. 2. 8 Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation.....	49
Fig. 2. 9 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....	50
Fig. 2. 10 Schéma bloc du contrôle MPPT de la vitesse de rotation.....	53
Fig. 2. 11 Diagramme vectoriel de la GADA correspondant à une magnétisation par le stator.....	53
Fig. 2. 12 Schéma bloc du modèle de la GADA.....	55
Fig. 2. 13 Schéma de principe du contrôle des courants.....	56
Fig. 2. 14 Schéma de principe du contrôle de la tension du bus continu.....	57
Fig. 2. 15 Schéma de principe du contrôle des courants rotoriques.....	58
Fig. 2. 16 Bloc diagramme du principe de contrôle du système éolien.....	59
Fig. 2. 17 Variation de la vitesse de rotation : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	60
Fig. 2. 18 Puissance active et réactive statoriques : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	61
Fig. 2. 19 Puissance active et réactive rotoriques : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	61
Fig. 2. 20 Tension du bus continu : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	62
Fig. 2. 21 Courants statoriques d'axe d-q : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	63
Fig. 2. 22 Courants rotoriques d'axe d-q (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	63
Fig. 2. 23 Courants du filtre d'axe d-q : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone.....	64
Fig. 2. 24 Vitesse moyenne mensuelle du vent .....	73
Fig. 2. 25 Vitesse moyenne et variance annuelles du vent .....	73
Fig. 2. 26 Vitesse du vent la plus probable et la vitesse du vent produisant le maximum d'énergie durant 15 années (2000÷2014).....	74
Fig. 2. 27 Valeurs annuelle des paramètres de weibull (c, k) et de la vitesse moyenne du vent (2000÷2014).....	75

## *Liste des figures*

---

Fig. 2. 28 Valeurs annuelle de la densité de puissance et de la densité d'énergie (2000÷2014).....	76
Fig. 2. 29 Moyennes de la vitesse journalière du vent de l'année 2014.....	77
Fig. 2. 30 Moyennes de la vitesse mensuelle du vent de l'année 2014.....	77
Fig. 2. 31 Valeurs mensuelles des vitesses du vent les plus probables et les vitesses produisant le maximum d'énergie.....	78
Fig. 2. 32 Paramètres mensuelles de weibull (c, k) et la vitesse moyenne du vent.....	80
Fig. 2. 33 Densités de puissance et d'énergie mensuelles de la vitesse du vent.....	81
Fig. 2. 34 Distribution de la densité de probabilité de weibull de vitesses du vent.....	81

### **Chapitre III :**

### **Commande adaptative floue**

Fig. 3. 1 Ensemble flou.....	88
Fig. 3. 2 Exemple d'une variable linguistique avec trois termes linguistiques.....	89
Fig. 3. 3 Intersection.....	91
Fig. 3. 4 Union.....	92
Fig. 3. 5 Complément .....	92
Fig. 3. 6 Représentation interne d'un système flou.....	94
Fig. 3. 7 (a) Moyenne des maximums, (b) Centre de gravité.....	98
Fig. 3. 8 Schéma synoptique d'un adaptateur flou.....	105
Fig. 3. 9 Fonctions d'appartenance de l'erreur et de la variation de l'erreur.....	109
Fig. 3. 10 Fonctions d'appartenance.....	110
Fig. 3. 11 Structure générale de la commande du convertisseur côté MADA.....	111
Fig. 3. 12 Action du correcteur PI dans le diagramme de Bode.....	112
Fig. 3. 13 Diagramme de bode pour le système sans correction.....	114
Fig. 3. 14 (a) Puissances actives et réactives statoriques, (b) puissances actives et réactives rotoriques.....	117
Fig. 3. 15 (a) Courants rotoriques d'axes d-q, (b) courants statoriques d'axes d-q.....	118

### **Chapitre IV :**

### **Commande neuromimétique**

Fig. 4. 1 Structure d'un neurone biologique.....	122
--	-----

## *Liste des figures*

---

Fig. 4. 2 Structure d'un neurone artificiel.....	124
Fig. 4. 3 Fonction d'activation d'un réseau de neurone.....	125
Fig. 4. 4 Réseau de neurones non bouclé.....	127
Fig. 4. 5 Réseau de neurones bouclé.....	128
Fig. 4. 6 Classification des processus d'apprentissage.....	129
Fig. 4. 7 Schéma synoptique de l'apprentissage supervisé.....	129
Fig. 4. 8 Schéma synoptique de l'apprentissage non supervisé.....	130
Fig. 4. 9 Un élément ADALINE.....	131
Fig. 4. 10 Structure d'un réseau de neurones avec apprentissage compétitif.....	133
Fig. 4. 11 Structure de la commande basée sur l'inverse du modèle.....	134
Fig. 4. 12 Commande directe d'un système par modèle inverse.....	135
Fig. 4. 13 Commande directe avec modèle de référence.....	136
Fig. 4. 14 Commande inverse directe sans modèle de référence.....	136
Fig. 4. 15 Structure de la commande indirecte.....	137
Fig. 4. 16 Commande indirecte avec modèle de référence.....	137
Fig. 4. 17 Commande inverse avec modèle de référence.....	138
Fig. 4. 18 Commande neuronale par apprentissage d'un régulateur classique.....	139
Fig. 4. 19 Système de commande.....	141
Fig. 4. 20 Structure du régulateur neuronal .....	143
Fig. 4. 21 Réponse du système sans changement paramétrique.....	145
Fig. 4. 22 Réponse du système avec variation de l'inductance au stator .....	147
Fig. 4. 23 Réponse du système avec variation de l'inductance au rotor.....	149
Fig. 4. 24 Réponse du système avec variation simultanée des paramètres .....	150

# *Liste des tableaux*

---

<b>Chapitre I :</b>	<b>Etat de l'art</b>	
Tableau. 1. 1 Production mondiale d'énergie primaire en 2010 .....		15
Tableau. 1. 2 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne.....		19
Tableau. 1. 3 Programme des énergies renouvelables par filière de production .....		22
Tableau. 1. 4 Avantages et inconvénients des différentes génératrices .....		35
 <b>Chapitre II</b>	 <b>Modélisation et commande de la chaîne de conversion éolienne</b>	
Tableau. 2. 1 Valeurs annuelle de : caractéristique de la vitesse du vent, paramètres de weibull, densité de puissance et densité d'énergie.....		74
Tableau. 2. 2 Caractéristiques mensuelles de la vitesse du vent, paramètres de weibull, densité de puissance et densité d'énergie.....		78
Tableau. 2. 3 Caractéristiques des éoliennes .....		83
Tableau. 2. 4 Bilan énergétique .....		84
 <b>Chapitre III :</b>	 <b>Commande adaptative floue</b>	
Tableau. 3. 1 Opérateurs logiques flous les plus utilisés .....		93
Tableau. 3. 2 Matrice d'inférence floue de $K'_i$ .....		110
Tableau. 3. 3 Matrice d'inférence floue de $K'_p$ .....		110

# Nomenclature

---

$P_s$	Puissance active statorique
$Q_s$	Puissance réactive statorique
$P_r$	Puissance active rotorique
$Q_r$	Puissance réactive rotorique
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_{tur}$	Couple aérodynamique
$C_{méc}$	Couple mécanique
$V_{sd,q}$	Tensions statoriques dans le repère de Park
$V_{rd,q}$	Tensions rotoriques dans le repère de Park
$V_{dc}$	Tension du bus continu
$i_{sd,q}$	Courants statoriques dans le repère de Park
$i_{rd,q}$	Courants rotoriques dans le repère de Park
$\Phi_{sd,q}$	Flux statoriques dans le repère de Park
$\Phi_{rd,q}$	Flux rotoriques dans le repère de Park
$R_s$	Résistance statorique
$R_r$	Résistance rotorique
$R_f$	Résistance du filtre
$L_s$	Inductance statorique
$L_r$	Inductance rotorique
$L_m$	Inductance magnétique
$L_f$	Inductance du filtre
$\omega_s$	Pulsation statorique
$\omega_r$	Pulsation rotorique
$M$	Rapport de transformation entre le rotor et le stator
$P$	Nombre de paires de pôles
$\rho$	Masse volumique de l'air
$V$	Vitesse du vent
$R$	Rayon des pales
$\lambda$	Vitesse relative (vitesse spécifique)
$C_p$	Coefficient de puissance



# *Nomenclature*

---

$\Omega_{tur}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_m$	Vitesse mécanique
$g$	Glissement
$G$	Gain du multiplicateur
$J$	Moment d'inertie total
$J_{tur}$	Moment d'inertie de la turbine
$J_{gen}$	Moment d'inertie de la MADA
$f$	Fréquence du réseau de distribution
$\sigma$	Coefficient de dispersion
$k$	Paramètre de forme de Weibull
$c$	Paramètre d'échelle de Weibull
$C_f$	Facteur de capacité d'une éolienne
$v_{mp}$	Vitesse du vent la plus probable
$v_{maxE}$	Vitesse de vent transportant le maximum d'énergie
$P_{dens}$	Densité de puissance
$E_{dens}$	Densité d'énergie
$v_c$	Vitesse de démarrage
$v_r$	Vitesse nominale
$v_f$	Vitesse de coupure
$P_{out}$	Puissance produite
$P_r$	Puissance nominale

---

## *Introducción general*

---

# *Introduction générale*

De nos jours, la demande croissante en énergie électrique à travers le monde, présente un sérieux problème pour satisfaire les besoins énergétiques. Face à cette demande, les ressources d'énergie fossiles sont actuellement majoritairement exploitées comparativement aux énergies renouvelables. Ainsi, de telles exploitations sont incontestablement les conséquences principales de la pollution atmosphérique, du danger du réchauffement climatique dû à l'effet de serre, des risques du nucléaire et des limites des ressources (pétrole, gaz, charbon et uranium). Alors, ce constat a relancé la prise de conscience qu'un développement économique de l'environnement dans le domaine des énergies renouvelables est absolument nécessaire pour l'avenir de notre planète. Cependant, les sources d'énergies de types renouvelables les plus utilisées sont : l'éolien, photovoltaïque, géothermique, marine et l'hydraulique.

En 2010, 87,1% de la production mondiale d'énergie était basée sur des ressources non renouvelables. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité et elle est exploitable à l'aide des systèmes éoliens qui permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne est en plein développement en termes de puissance installée dans le monde. Selon le Conseil Mondial pour l'Energie Eolienne, l'éolien représentait 282 GW de puissance installée soit plus de 19 % qu'en 2012, est 45 GW supplémentaires au niveau mondial dont 35 % en Europe et 2,5 % en France. 2014 a été l'année record pour l'industrie éolienne dépassant pour la première fois la barre de 50 GW. Plus de 51 GW était mise en ligne ce qui induit une forte hausse par rapport à l'année 2013. L'éolien reste l'énergie renouvelable la plus importante après l'énergie hydraulique avec 750 GW installés à l'échelle mondiale mais loin devant le solaire qui vient seulement de dépasser la barre des 100 GW.

En Algérie, la satisfaction des besoins énergétiques du pays est actuellement basée sur les hydrocarbures, notamment le gaz naturel qui est la principale source d'énergie utilisée, Il n'est fait appel aux autres formes d'énergies que lorsque le gaz ne peut pas être mis à contribution. Cette stratégie de consommation énergétique est confortée par le fait que le gaz naturel se place comme l'énergie la moins chère pour le consommateur. Cependant, dont le

# *Introduction générale*

but de préparer l'Algérie de demain et en raison de la consommation d'électricité en Algérie qui devrait se situer entre 75 à 80 TWh en 2020 et entre 130 et 150 TWh en 2030, le gouvernement algérien vise à maitre en valeur les ressources inépuisables pour diversifier les sources d'énergies. Pour cela, l'Algérie lance un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique, adopté par le Gouvernement Algérien en date du 3 février 2011. L'énergie solaire constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Il devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Tandis que le second axe de développement : l'éolien, devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. Cet écart de production est expliqué par le fait que le potentiel national en éolien comparés à celui du solaire est beaucoup moins importants.

La demande croissante pour l'installation des éoliennes dans ces derniers temps a attiré la curiosité de beaucoup de chercheurs qui continuent de travailler sur le choix et l'amélioration des performances des éoliennes ainsi que l'augmentation de la capacité de production. Plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché :

- génératrice asynchrone à cage ;
- génératrice asynchrone à double alimentation ;
- génératrice synchrone à aimants permanents ou à inducteur.

Ce travail de thèse s'inscrit dans l'accompagnement de la volonté du gouvernement Algérien pour l'augmentation de la production de l'énergie électrique à base de sources renouvelables. Il a pour objectif de contribuer à l'amélioration de la commande d'une éolienne pour assurer une meilleure qualité de l'énergie fournie au réseau. Cependant, une commande robuste vis-à-vis des variations paramétriques de l'installation est proposée et testée.

Le système éolien considéré est à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) fonctionnant à vitesse variable. La GADA offre plusieurs avantages: un

# *Introduction générale*

très bon rendement énergétique, une bonne robustesse ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. En plus, elle permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques, le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles. Par ailleurs, la GADA offre plusieurs possibilités de reconfigurations du mode de fonctionnement.

Le contenu de la thèse est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre expose l'évaluation de l'énergie renouvelable et du potentiel éolien dans le monde, particulièrement, en Algérie en termes de production de l'électricité, de la puissance installée et du potentiel éolien. On y présente aussi le programme des énergies renouvelable proposé par le gouvernement Algérien. A cet effet, on présente une synthèse sur des travaux publiés sur l'intérêt de l'utilisation de l'énergie éolienne, l'estimation et l'évaluation de la puissance du vent, ainsi que, l'optimisation des paramètres de la turbine et le placement optimale des éoliennes. Le principe de la conversion d'énergie éolienne, les principales composantes d'un générateur éolien et la classification des différentes éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel la nacelle est montée sont présentés. En fin, le domaine d'utilisation et les principaux avantages et inconvénients sont exposés.

Le deuxième chapitre traite deux parties principales. La première concerne la modélisation d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) fonctionnant à vitesse variable. Dans un premier temps, les modèles des différents sous systèmes : aérodynamique, mécanique et électrique de la chaîne de conversion éolienne sont développés. Puis, afin d'assurer un fonctionnement optimal, une commande vectorielle permettant le découplage des grandeurs électromécaniques est considérée. On s'intéresse notamment aux variations du couple électromagnétique, aux facteurs de puissances au point de raccordement de la turbine avec le réseau ainsi qu'aux puissances active et réactive au stator. La seconde partie est consacrée à l'évaluation des caractéristiques, l'estimation de la

# *Introduction générale*

production énergétique et l'analyse du potentiel du vent de la ville de Annaba. Finalement, les deux parties sont programmés sous l'environnement Matlab/Simulink et les résultats sont analysés et discutés.

Le troisième chapitre présente dans sa première partie, un aperçu général sur l'historique, les domaines d'applications et les principes de base de la théorie de la logique floue. Puis, on montre la description de la commande par logique floue avec ses différentes étapes de fuzzification, inférence et défuzzification. La deuxième partie de ce chapitre est organisée comme suit : après une brève description des objectifs, on présente dans la section 2, la description du système flou d'adaptation des paramètres du régulateur PI (Adaptive Fuzzy Gain Scheduling of Proportional Integral Controller (AFGPI)). Dans la section 3, on présente une étude comparative des deux types de réglages, notamment, PI et AFGPI pour une éolienne de 2MW.

Le quatrième chapitre comprend deux parties : une partie théorique sur la commande de processus non linéaires et une autre consacrée à la commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une GADA, où les concepts et les méthodes introduites dans la première partie sont utilisés. La première présente l'architecture des réseaux de neurones, les processus d'apprentissage numérique des réseaux de neurones et une présentation globale sur la commande neuromimétique des systèmes dynamiques. La seconde présente une description succincte du concept d'un système de commande, la structure du régulateur neuronale utilisé et le contrôle des puissances active et réactive d'une éolienne de 1.5MW complété d'une étude comparative des performances de deux types de contrôle. Les résultats de simulations sont présentés et discutés en vue d'analyser les performances et la robustesse de la commande neuronale vis-à-vis des changements paramétriques.

Enfin, une conclusion générale sur les travaux réalisés et des perspectives d'amélioration à court et à moyen terme, sont présentées.

## *Chapitre I*

---

### *Etat de l'art*

---

## 1.1 Introduction

Actuellement, il existe une demande croissante en énergie électrique suite à l'intense industrialisation et la demande domestique remarquable. Face à cette demande, le monde se dirige de plus en plus vers les ressources naturelles pour la production de l'électricité, dont la consommation ne provoque pas la diminution de la ressource. Selon les stratégies étudiées pour la conservation de la nature, de l'atmosphère et le soin de l'environnement dont le but est la diminution de l'utilisation des fossiles, réduire l'émission du carbone à l'atmosphère, lutter contre la production des gaz à effet de serre et en plus éviter les risques d'accident dans les centrales nucléaires [1]. L'utilisation des ressources non-fossiles et renouvelables est très importante non seulement pour la production d'énergie à grande échelle, mais aussi pour les systèmes autonomes [2]. Par ailleurs, les technologies des énergies renouvelables peuvent être moins concurrentielles par rapport aux systèmes de conversion d'énergie électrique traditionnelle à cause des inconvénients suivants :

- la discontinuité de génération, ce qui exige des méthodes d'optimisation pour le contrôle. R. Banos [3] a présenté dans son travail une vision claire des avancées de la recherche sur les méthodes d'optimisation appliquées aux énergies renouvelables ;
- frais d'entretien élevés ;
- coûts de l'installation ;
- espace terre ;
- non-régularité des ressources ;
- les fluctuations saisonnières et journalières de la demande en puissance ne sont pas forcément synchronisées avec les ressources d'où la diversification des sources permet statistiquement de limiter ces inconvénients ainsi que le stockage de l'énergie électrique [4].

De nos jours, la pollution atmosphérique, le danger du réchauffement climatique dû à l'effet de serre, les risques du nucléaire et les limites des ressources (pétrole, gaz, charbon et uranium) sont les principales causes de la prise de conscience qu'un développement économique de l'environnement dans le domaine des énergies renouvelables est absolument nécessaire pour l'avenir de notre planète. Les sources d'énergie de type renouvelable les plus utilisées sont : l'éolien, photovoltaïque, géothermique, marine et l'hydraulique.



## 1.2 Energie éolienne

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide des systèmes éoliens qui permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Le vent se dirige spontanément des hautes pressions vers les basses pressions, ces écarts de pression sont le reflet de la différence de température existant à la surface de la terre. En outre, les circulations d'air sont générées par la différence de température existantes entre les sommets des montagnes et le fond des vallées, entre la mer et la terre. En effet, du point de vue impacts sociaux, faibles émissions de gaz à effet de serre et consommation d'eau, l'énergie éolienne est la plus favorable selon des travaux qui ont étudiés la comparaison des différentes technologies des énergies renouvelables tel que : l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, photovoltaïque et l'énergie géothermique en tenant compte du prix de l'électricité produite, les émissions de gaz à effet de serre, la disponibilité des sources d'énergies renouvelables, l'efficacité la conversion d'énergie, les besoins en terres, la consommation d'eau et impacts sociaux [5]. Cependant, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne ne peuvent pas être installés aléatoirement. Ils nécessitent des régions où le vent sera plus constant et notamment de forte vitesse. Généralement, les hautes altitudes et les sites côtiers sont les endroits préférés pour l'installation des parcs éoliens. En outre, des études ont été faites sur l'estimation et l'évaluation de la puissance du vent dans plusieurs pays au monde comme : Brazil, Arabie Saoudite, Italie, Hong Kong, Nord de l'Égée, Greece, Iran, Pakistan, Bretagne [6-16] et notamment en Algérie [17, 18].

L'objectif de ces travaux est la possibilité de mettre en valeur le vent comme source d'énergie la plus prometteuse et la faisabilité de prédire la puissance électrique produite dans un site étudié en fonction de l'historique des données de la vitesse du vent. En outre, le potentiel de la puissance du vent pour un emplacement s'articule sur la vitesse du vent, la durée du temps sur laquelle le vent est disponible, la densité de l'air, la structure de la turbine et la hauteur de la tour de la turbine [19].

Dans le but de maximiser les performances de la turbine éolienne, plusieurs chercheurs s'orientaient vers l'optimisation des paramètres de la turbine telle que l'architecture des pales [20] et du gerbox [21, 22]. En 2002 [23] une structure optimale d'une turbine éolienne d'axe horizontal utilisant un algorithme évolutionnaire multi-objectifs

(MOEA) pour l'optimisation des paramètres géométriques de la configuration du rotor a été présentée, dans le but de réaliser la meilleure performance de l'échange entre l'énergie totale produite par mètre et le coût. De même, Lund et Stegmann [24] en 2005 ont étudié une autre solution en utilisant la méthode d'asymptotes en mouvement proposée par Svanberg en 1987 pour l'optimisation structurelle [25].

Afin de trouver un compromis entre la capacité de production maximale d'une part et la limitation du nombre des éoliennes installées et la superficie de la terre d'autre part, Grady et al. en 2005 [26] ont utilisés les algorithmes génétiques (AG) pour la détermination du placement optimal des éoliennes. En outre, d'autres travaux en 2010 par Emami et Noghreh [27] ont résolu ce problème avec une nouvelle fonction objective dans les AG et qui apparait mieux en qualité de coût, puissance et efficacité de la ferme éolienne par rapport aux autres approches. En revanche, le placement des parcs éoliens qui consiste à la détermination de la position optimale des éoliennes est aussi un facteur très important à étudier pour assurer le maximum d'énergie produite [28]. Mustakerov et Borissova en 2010 proposent un travail sur le choix du type, du nombre et du placement des éoliennes par l'utilisation d'une méthode d'optimisation combinatoire [29].

La résolution des problèmes liés à l'utilisation des énergies renouvelable et plus particulièrement l'énergie éolienne a attiré la curiosité de beaucoup de chercheurs. Voire, la discontinuité du fonctionnement et la variation de l'énergie produite dans l'utilisation des éoliennes. Pour compenser les variations de la puissance produite vers le réseau électrique, des chercheurs ont travaillé sur la gestion de l'énergie éolienne à courte durée avec des batteries de stockage [30]. R. Banos and all en 2011 [3] ont présenté un travail sur les méthodes d'optimisation appliquées aux énergies renouvelables achevé par une conclusion sur les méthodes d'optimisation. Parmi ces méthodes, il y a celles qui sont basées sur des approches traditionnelles par contre d'autres sont basés sur des méthodes d'optimisation heuristique tel que les algorithmes génétiques et les PSO (Particle Swarm Optimization). Par ailleurs, le problème multi-objectif relié aux systèmes des énergies renouvelables a été résolu par l'utilisation des techniques de Pareto-optimization. Comme tous les systèmes de conversion, l'énergie éolienne a ses avantages et ses inconvénients :

➤ **Avantages :**

- non polluante ;
- inépuisable ;
- rentable dans les sites isolés ;
- l'exploitation de l'énergie éolienne évite l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17.5 mille tonnes de NO<sub>x</sub>, qui sont les principaux responsables des pluies acides [31] ;
- préservation des ressources fossiles.

➤ **Inconvénients :**

- rendement aléatoire dépendant de la vitesse du vent ;
- bruit des pales ;
- impact visuel ;
- interférences électromagnétiques ;
- l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent influent sur la qualité de la puissance produite.

### **1.3 Evaluation de l'énergie en Algérie**

L'énergie consommée par l'homme est répartie en quatre grandes catégories : production d'électricité, usage domestique, industrie et transports. Elle est issue de différentes formes d'énergies dites primaires qui sont soit épuisables comme les fossiles : le charbon, le pétrole, le gaz naturel, l'uranium où renouvelables : hydraulique, éolienne, géothermique, solaire, biomasse.

#### **1.3.1 Consommation de l'énergie primaire**

Le bilan énergétique national de l'année 2013 publié par l'autorité de régulation des hydrocarbures (ARH) confirme la tendance baissière en volume physique de la production d'énergie primaire de l'Algérie. Suite au rapport du ministère de l'énergie en septembre 2014 sur le bilan énergétique pour l'année 2013, l'énergie disponible, somme de la production nationale, des importations et des stocks en Algérie a atteint 154,6 Mtep en 2013 en baisse de 3,8% par rapport à 2012. La production commerciale d'énergie primaire a baissé de 3,9% à 148,8 Mtep, tirée par celle du gaz naturel et du pétrole brut. Alors que les importations de l'énergie ont augmenté de 7,1% à 5,9 Mtep [32, 33].

### 1.3.2 Production d'électricité

Aujourd'hui, la plus grande part de la consommation énergétique est dédiée à la production d'électricité. La configuration du système électrique national est constituée :

- ✓ D'un réseau interconnecté qui couvre le Nord et une partie du Sud du pays et comprenant le réseau de transport auquel sont raccordés les centrales de production et les principaux clients industriels, ainsi que les réseaux de distribution desservant le reste de la clientèle (ménages, services, PME/PMI) ;
- ✓ Réseau Adrar, In Salah, Timimoune ;
- ✓ Vingt-six réseaux isolés alimentés par des turbines à gaz (Illizi, Tamanrasset) ou par des groupes diesel desservant les villes du Sud, à travers des réseaux de distribution.

La production d'électricité sur le réseau national à la fin 2013 est en hausse de 3.8% par rapport à celle de l'année 2012 et s'établit à 56.2 TWh, dont 54.8 TWh sur le réseau interconnecté, 0.742 TWh pour le pôle d'Adrar et 0.67 TWh sur les réseaux isolés du sud. La Fig.1.1 présente les taux de couverture de la production par société de production, par technologie et par actionnaire [34, 35].

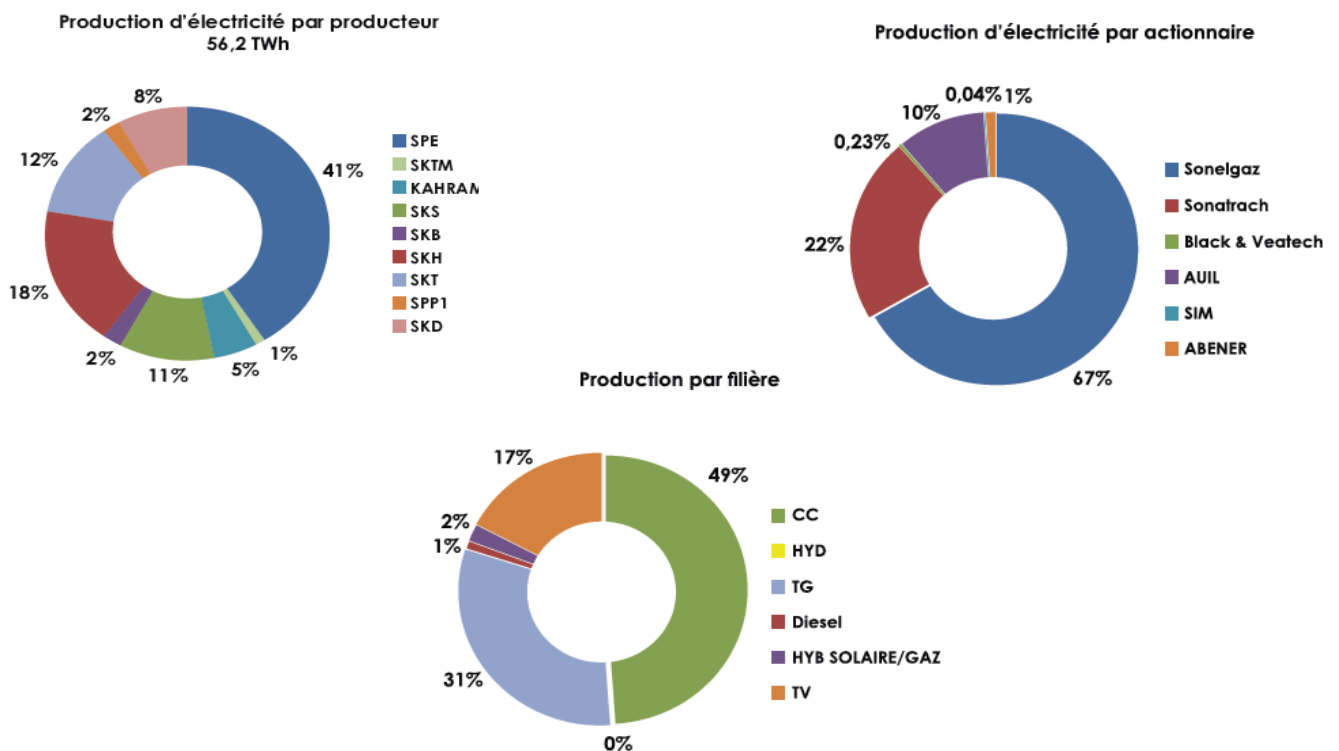


Fig. 1.1 Taux de couverture de la production d'électricité [34]

### 1.3.3 Puissance installée

Selon le rapport d'activité de la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) pour l'année 2013, une grande partie des travaux de la commission a été consacrée aux adaptations de la réglementation relative au soutien des énergies renouvelables. Et ce, dans le cadre de la mise en œuvre du programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique pour la période 2011-2030. A la fin de l'année 2013, la capacité de production d'électricité installée a progressé d'environ 18%, atteignant les 15,1 GW en 2013. Cette augmentation en capacité en production est dû essentiellement à la mise en service de la centrale de Shariket Kahraba Koudiet Eddraouch (SKD) de 1146 MW, la mise en service de près de 1240 MW en TG mobiles (dont 318 MW mis en exploitation en 2012), et le renforcement des réseaux isolés par la mise en service de près de 100 MW en diesel. L'année 2013 a également connu la création d'une nouvelle société de production Shariket Kahraba oua Takat Moutadjadida (SKTM), en charge des réseaux isolés du sud et des énergies renouvelables. La capacité installée par société de production, par actionnaire et par filière est décrite par la figure 1.2 [34, 35].

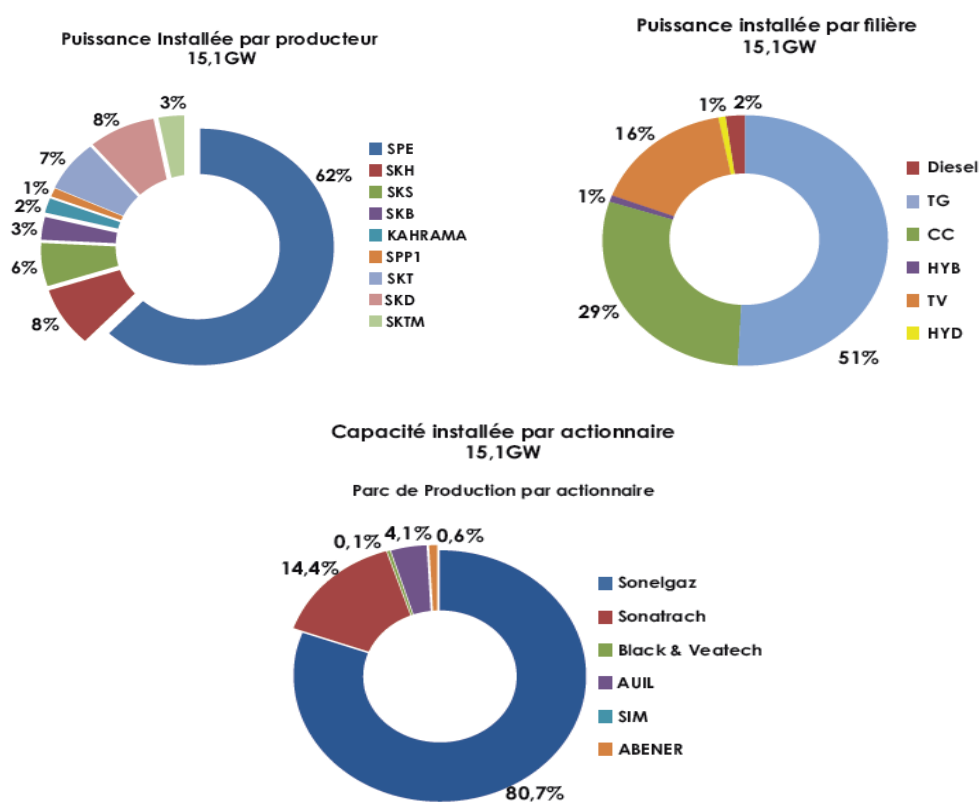


Fig. 1. 2 Capacité installée [34]

La figure 1.3 illustre l'évolution de la puissance de l'année 2003 jusqu'au 2013. La puissance maximale du réseau a été enregistrée le 07 août 2013 à 21h 00 à un niveau estimé à 10 464 MW, en hausse de 1% par rapport à l'année 2012. En outre, la puissance minimale du réseau enregistrée en 2003, a été estimée à 5 206 MW. Par ailleurs, la puissance moyenne a été estimée à 6 995 MW en 2008.

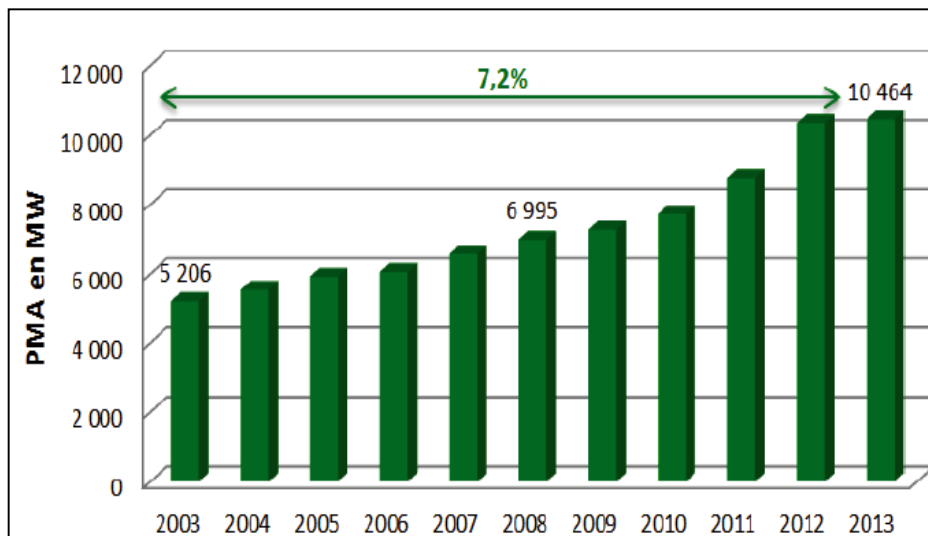


Fig. 1. 3 Evolution de la puissance de 2003 à 2013 en Algérie [34]

#### 1.4 Potentiel éolien en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Ce prototype de 30 mètres de haut et de 25 mètres de diamètre, conçu par l'ingénieur français ANDREAU, avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre [36]. En effet, les services de la colonisation et de l'hydraulique ont installé la plus grande éolienne de pompage en 1953 [37]. Elle contient trois pales de 15 mètres de diamètre et de 25 mètres de hauteur. Dernièrement, la société Algérienne « SPE » de production d'électricité a installé sur une superficie de 33 hectares à Kabertenne-Adrar, une ferme éolienne de 10.2MW constituée de 12 éoliennes (type G-52) d'une vitesse et puissance nominales égales, respectivement, à 16m/s et 850KW. La figure 1.4 de la carte préliminaire des vents montre que l'Algérie a un régime de vent modéré de 3 à 7m/s.

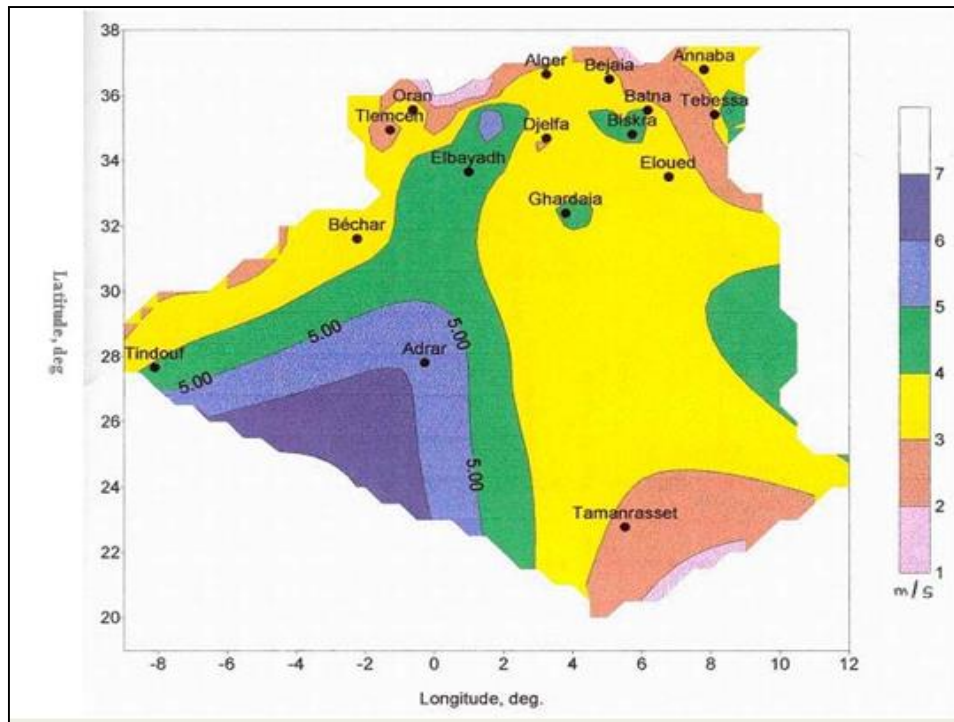


Fig. 1. 4 Carte préliminaire des vents en Algérie [38]

### 1.5 Evaluation de l'énergie renouvelable dans le monde

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse. Aujourd'hui 80 % de l'électricité au monde est produite à partir des ressources épuisables et polluantes à la fois comme : combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire) [39]. L'inconvénient majeur de ces sources est le dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. Les 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> sont dûs à l'utilisation des combustibles fossiles pour la production de l'électricité. Par ailleurs, l'inconvénient de l'utilisation des centrales nucléaires est le coût élevé du traitement des déchets ainsi les réserves d'uranium sont limitées [40]. Suite à une publication de l'agence internationale de l'énergie (*World Energy Outlook 2006*), la production mondiale d'électricité devrait doubler au cours des 25 prochaines années. La part de la production des énergies renouvelables devrait augmenter de 57%. L'utilisation à grande échelle des énergies renouvelables (ER) est importante pour l'avenir grâce aux avantages suivants :

- ✓ éliminer la dépendance aux combustibles fossiles ;
- ✓ combattre le réchauffement planétaire ;
- ✓ accroître le niveau de vie des personnes vivant dans les pays en développement.

Une grande part des énergies renouvelables constitue un domaine émergent de la recherche, des technologies et de la fabrication et une nouvelle industrie est en train de se développer [41].

### 1.5.1 Production mondiale d'énergie primaire

Au début du 21<sup>ème</sup> siècle la production mondiale de l'énergie primaire peut se résumer par le tableau 1. 1, extrait des statistiques de l'agence internationale de l'énergie (IEA) pour l'année 2010. Il ressort de ce tableau que plus de 80% de la production mondiale d'énergie s'est basée en 2010 sur les combustibles fossiles. Si l'on ajoute la source nucléaire, on constate que 87,1% de la production mondiale d'énergie primaire s'est basée sur des ressources non renouvelables [42-44].

Tableau. 1. 1 Production mondiale de l'énergie primaire en 2010 [44]

Source primaire	Mtep	%
Pétrole	4120	32,4
Charbon	3470	27,3
Gaz naturel	2720	21,4
Nucléaire	725	5,7
Hydraulique	292	2,3
Renouvelables+déchets	1386	10,9
Total	12 717	100



### 1.5.2 La capacité éolienne installée

La capacité mondiale des vents est de 2000 à 3000 térawatts où l'énergie utilisée est de 14 térawatts. Ainsi, les vents de surface pourraient fournir plus de 20 fois la demande énergétique mondiale.

Entre les années 1997 et 2007, la puissance éolienne installée dans le monde est passée de 7584 à 93 678 MW. Selon global wind energy council, à la fin de 2008, la puissance installée des parcs éoliens totalisait plus de 120 798 MW. En outre, une puissance de 37.500 MW d'éoliennes a été installée dans le monde en 2009. Par ailleurs, 193 GW d'éolien étaient installés fin 2010 et 200 GW en 2011 [45, 46].

En 2009, 16 % de l'énergie finale consommée dans le monde a été assurée par les énergies renouvelables. Cependant, en 2010, dans les 27 États membres de l'Union européenne (UE), on estimait à 12,4 % la part de l'énergie issue de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie, contre 11,7 % en 2009 et 10,5 % en 2008. L'UE devrait atteindre l'objectif des 20 % de la consommation totale issue de sources d'énergie renouvelables d'ici 2020 [46].

Selon le Conseil Mondial pour l'Energie Eolienne, l'éolien représentait 282 GW de puissance installée plus de 19 % en 2012, soit 45 GW supplémentaires au niveau mondial dont 35 % en Europe et 2,5 % en France. L'éolien reste l'énergie renouvelable la plus importante après l'énergie hydraulique avec 750 GW installées mais loin devant le solaire qui vient seulement de dépasser la barre des 100 GW [45-47].

La capacité mondiale de production d'énergie éolienne a augmenté de 12,5% en 2013 et de 10,3% en Europe pour atteindre 318.137 MW fin 2013 l'équivalent de 227 réacteurs nucléaires (source GWEC -conseil Mondial pour l'Energie Eolienne).

Selon une estimation faite par siemens, la capacité éolienne installée dans le monde est de 273 GW fin 2013 devrait augmenter de plus de 400% pour atteindre les 1.107 GW en 2013. L'année 2014 a été l'année record pour l'industrie éolienne dépassant la barre de 50 GW pour la première fois. Plus de 51 GW était mise en ligne ce qui induit une forte hausse par rapport à l'année 2013. Ce rapport a été établi en 2012, lorsque plus de 45 GW a été installée à l'échelle mondiale [45-48].

A la fin de l'année 2013, six (6) pays avaient plus que 10 000 MW des capacités installées : Chine (114,609 MW), USA (65,879 MW), Allemagne (39,165 MW), Espagne

(22,987MW), Inde (22,465 MW) et Royaume-Uni (12,440 MW). En 2014, la Chine qui est déjà leader mondial dans l'utilisation généralisée des chauffe-eau solaires, est également sur le point de devenir numéro un en matière d'éoliennes depuis l'année 2005. Elle a franchi la barre de 100 000 MW. Grâce à la chine la capacité d'installation des éoliennes dans l'Asie a dépassé l'Europe à la fin de l'année 2014 [45-48].

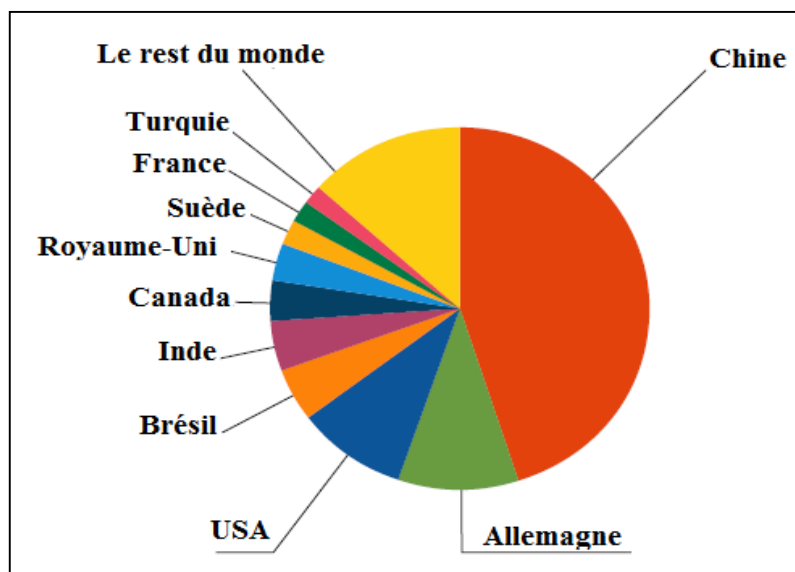


Fig.1. 5 Capacité d'énergie éolienne installée dans le monde en 2014 [47]

L'année 2014 a été l'année record pour l'industrie éolienne, les installations annuelles des éoliennes ont franchi la barre des 50 GW en premier temps. Plus de 51GW d'énergie éolienne ont été mises en ligne, une forte hausse par rapport à 2013, lorsque l'installation mondiale était un peu plus de 35,6 GW. Ce record a été établi en 2012, lorsque plus de 45 GW de nouvelles capacités a été installée à l'échelle mondiale. La Chine, le plus grand marché global pour l'énergie éolienne depuis 2009, a conservé la première place en 2014, la deuxième place a été assurée par L'Europe, et l'Amérique du Nord une lointaine troisième place.

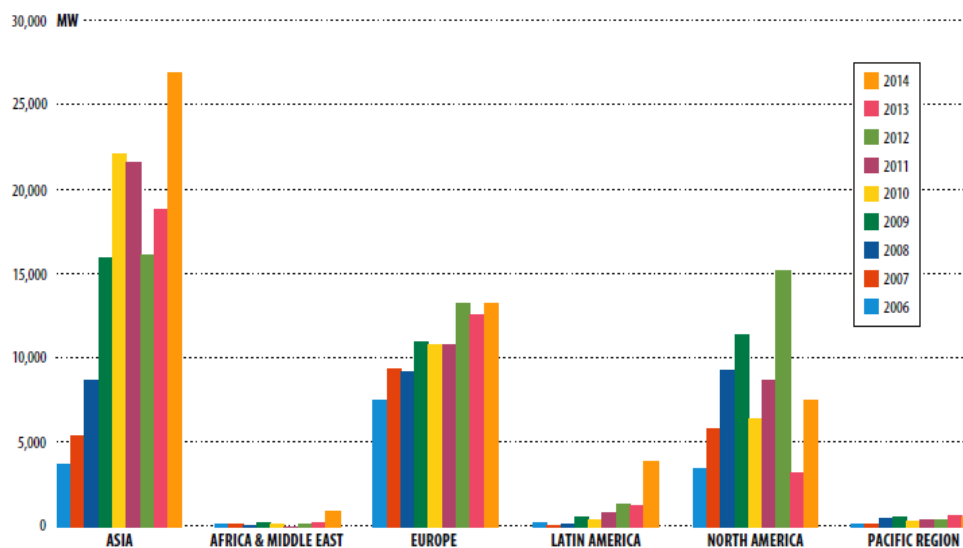


Fig. 1. 6 Capacité annuelle d'installation des éoliennes par région de 2006 à 2014 [47]

Au cours de l'année 2014, 12 858 MW d'énergie éolienne ont été installée à travers l'Europe, avec l'Union européenne (UE-28) représentant 11 829MW du total. L'Amérique latine a connu une excellente année. 3749 MW de nouvelles capacités viennent en ligne, portant la capacité totale installée dans la région à 8,5 GW. L'an dernier, L'Afrique et le Moyen-Orient ont ajoutant près de 1 GW (933 MW), ce qui porte la capacité cumulative de la région jusqu'à 2545MW. Pour la région du pacifique, le marché australien a ajouté 567 MW en 2014 contre 655MW en 2013, ce qui porte sa capacité totale installée de 3806 MW. Selon une étude récente menée par Clean Energy Council, 14,76% de l'électricité de l'Australie est assurée à partir des sources renouvelables en 2013.

La technologie des éoliennes a vu une augmentation croissante notamment en Chine et en Europe et aussi dans les pays en développement. L'association commerciale internationale pour l'industrie de l'énergie éolienne Global Wind Energy Council (GWEC) en 2014 a exposée les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne (Tableau 1.2). Durant les dernières années, la demande croissante d'installation des éoliennes a attiré la curiosité de beaucoup de chercheurs pour travailler sur la maximisation des performances des éoliennes et l'augmentation de la capacité de production. En effet, les éoliennes modernes sont plus fiables, plus performantes et plus grandes.

Tableau. 1. 2 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne [47]

Payé	MW	part %
Chine	23.196	45.1
Allemagne	5.279	10.2
USA	4.854	9.4
Brésil	2.472	4.8
Inde	2.315	4.5
Canada	1.871	3.6
Royaume-Uni	1.736	3.4
Suède	1.050	2.0
France	1.042	2.0
Turquie	804	1.6
Le reste du monde	6.852	13.3
Totale	51.473	100

Depuis la fin des années 90 l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a connu un départ considérable. La figure 1.7 présente la capacité annuelle des éoliennes installées dans le monde de l'année 1996 jusqu'à l'année 2014.

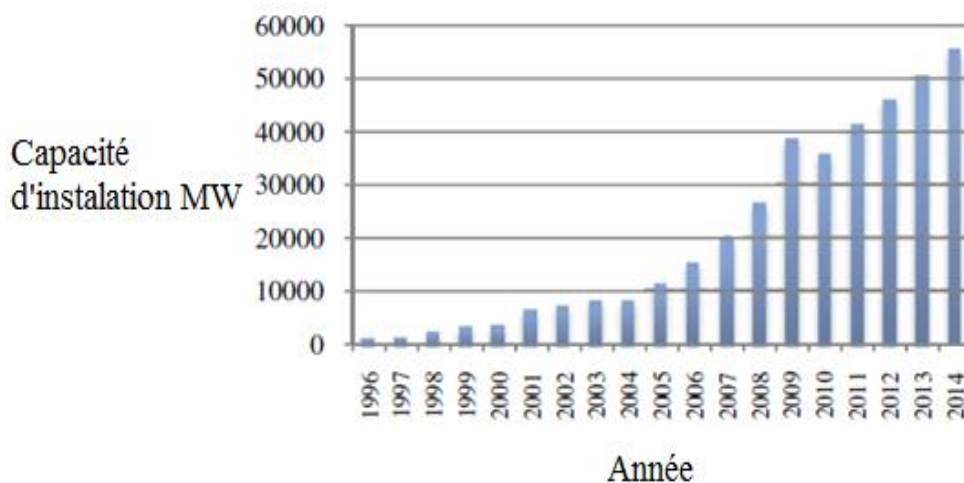


Fig. 1. 7 Capacité mondiale des éoliennes installées en MW de 1996 à 2014 [47]

## 1.6 Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie

La satisfaction des besoins énergétiques du pays est basée actuellement sur les hydrocarbures, notamment le gaz naturel qui est la principale source d'énergie utilisée; Il n'est fait appel aux autres formes d'énergie que lorsque le gaz ne peut pas être mis à contribution. Cette stratégie de consommation énergétique est confortée par le fait que le gaz naturel se place comme l'énergie la moins chère pour le consommateur.

Afin d'apporter des solutions durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables et décide d'encourager fortement l'implantation des sources à énergie renouvelable ainsi que la production d'électricité décentralisée. Cependant, dont le but de préparer l'Algérie de demain et en raison de la consommation d'électricité en Algérie qui devrait se situer entre 75 à 80 TWh en 2020 et entre 130 et 150 TWh en 2030, le gouvernement algérien vise à maitre en valeur les ressources inépuisables pour diversifier les sources d'énergies. Pour cela, l'Algérie lance un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique, adopté par le Gouvernement Algérien en date du 3 février 2011. L'Algérie ambitionne de produire près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont environ 12 000 MW (40%) de son électricité à partir des énergies renouvelables tout en accordant un rôle important aux économies d'énergies, et également de se positionner comme fournisseur majeur d'électricité verte en direction du marché européen en se fixant un objectif d'exportation de 10 000 MW en partenariat à la même échéance si l'accès au marché européen est garanti. Ce programme constituera aussi le vecteur de développement d'une industrie nationale des énergies renouvelables [49]. Les trois points ci-dessous illustrent les étapes du programme national de production de l'électricité verte dédié au marché national :

- 2011-2013 : réalisation de projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles ;
- 2014-2015 : début du déploiement du programme ;
- 2016-2020 : déploiement à grande échelle.

L'énergie solaire constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Il devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de

la production nationale d'électricité. Tandis que le second axe de développement : l'éolien, devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. Cet écart de production est expliqué par le fait que le potentiel national en éolien comparés à celui du solaire est beaucoup moins importants. De plus, l'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable [49-52].

Aujourd'hui, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a prévu dans son programme de développement des Énergies Renouvelables (EnR), d'installer sept (7) autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [50], pour atteindre 1700 MW [51] à l'horizon 2030. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales.

Selon le programme des énergies renouvelables (Fig.1.8 & Fig.1.9), durant l'année 2015 une puissance totale de près de 650 MW serait installée, et d'ici 2020, il est attendu non seulement l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2000 MW. Mai encore, d'ici 2030 il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10000 MW.

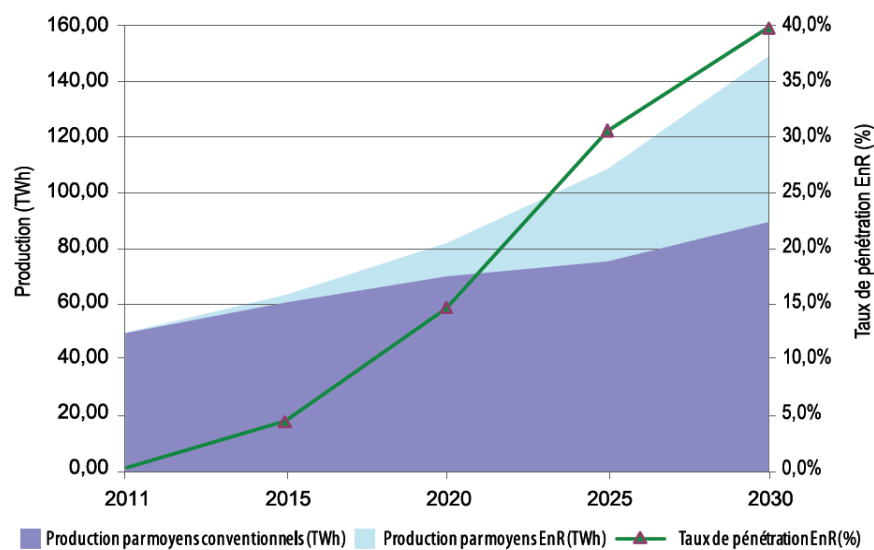


Fig. 1. 8 Intégration des énergies renouvelables (EnR) dans la production nationale [53]

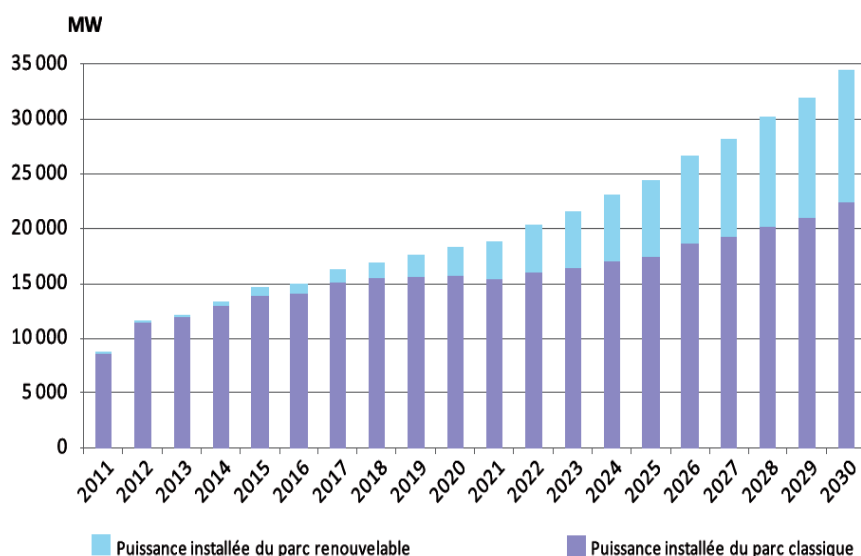


Fig. 1. 9 Structure du parc de la production nationale en MW [53]

Le programme des EnR est défini ainsi pour les différentes phases :

- d'ici 2013, il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW;
- à l'horizon 2015, une puissance totale de près de 650 MW serait installée;
- d'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW;
- d'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12 000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW.

La synthèse du programme des énergies renouvelables par filière de production est résumée sur le tableau 1.3, comme suit :

Tableau. 1. 3 Programme des énergies renouvelables par filière de production [51, 52]

	Solaire photovoltaïque	Solaire thermique	éolien
2011-2013	800MW	02 centrales de 150MW chacune	01 ferme de 10MW
2014-2015			02 fermes de 20MW chacune
2016-2020		04 centrales d'une puissance totale de 1200MW	Une puissance ≈1700MW
2021-2030	200MW	500MW/ an jusqu'au 2023 600MW/ an jusqu'au 2030	

### 1.7 Principe de la conversion d'énergie éolienne

Le vent en mouvement entraîne les pales de la turbine et par conséquent le rotor. Le système de conversion d'énergie éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur. La nacelle est l'élément centrale de l'éolienne, elle est composée de deux pièces principales: le multiplicateur et la génératrice. Les turbines peuvent transférer de l'énergie électrique à un réseau de puissance à travers des transformateurs, lignes de transport et sous-stations associés. Quand on veut installer une éolienne, il faut bien considérer que la distribution du vent n'est pas homogène. La vitesse du vent est généralement comprise entre 4 et 8 m/s. Pour augmenter l'efficacité de l'éolienne si le vent est très faible, la nacelle pivote de manière à capter le maximum de vent. Si le vent est trop fort l'éolienne s'arrête en mesure de sécurité. Les différents constituants de l'éolienne sont [53, 55]:

- ✓ **Le rotor** est constitué généralement de trois pales ;
- ✓ **Le multiplicateur** ou la boîte à vitesse de l'éolienne est un engrenage planétaire qui permet de multiplier le nombre de tours par minute. Par ailleurs, la génératrice permet de transmettre la vitesse de rotation en électricité. Finalement, le convertisseur permet de synchroniser l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau électrique ;
- ✓ **La nacelle** possède un anémomètre permettant de mesurer la vitesse du vent ainsi que des capteurs (la girouette) qui mesurent la direction du vent permettant ainsi la commande des quatre moteurs qui font pivoter la nacelle pour faire toujours face au vent. L'anémomètre et la girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent. En cas d'urgence, un frein est actionné pour arrêter les pales. Elle possède aussi, un élément de sécurité « le feu d'obstacle » qui permet aux trafics aériens de repérer l'éolienne à distance ;
- ✓ **Le système de refroidissement** comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur pour le multiplicateur ;



- ✓ **Le mât** c'est un support pour la nacelle et le rotor, de 10 à 100 m de longueur fixé sur une fondation en béton implantée dans le sol pour assurer la stabilité de l'éolienne. Il dispose, à son intérieur, de câbles pour le transport de l'énergie électrique, des transformateurs et l'échelle d'accès à la nacelle ;
- ✓ **Le convertisseur** permet de synchroniser l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau électrique.

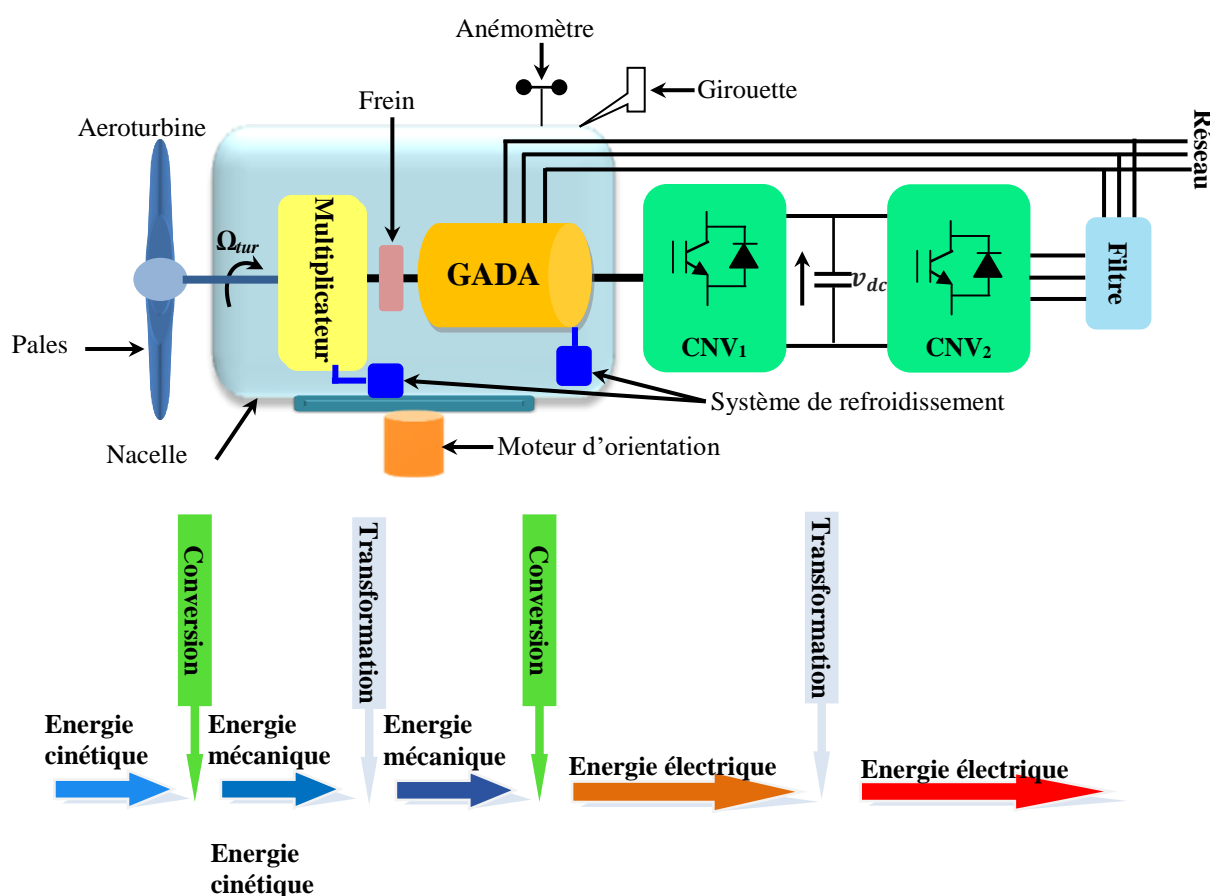


Fig. 1. 10 Eléments constitutifs d'une éolienne et principe de conversion d'énergie.

En pratique, la puissance récupérée par une voilure éolienne est de 59% seulement (limite de Betz) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformé en énergie mécanique [55, 56]. Le rendement énergétique appelé aussi coefficient de puissance est une grandeur variable propre à chaque éolienne dépend de chaque voilure. Nous pouvons comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$ . La figure 11 présente le coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

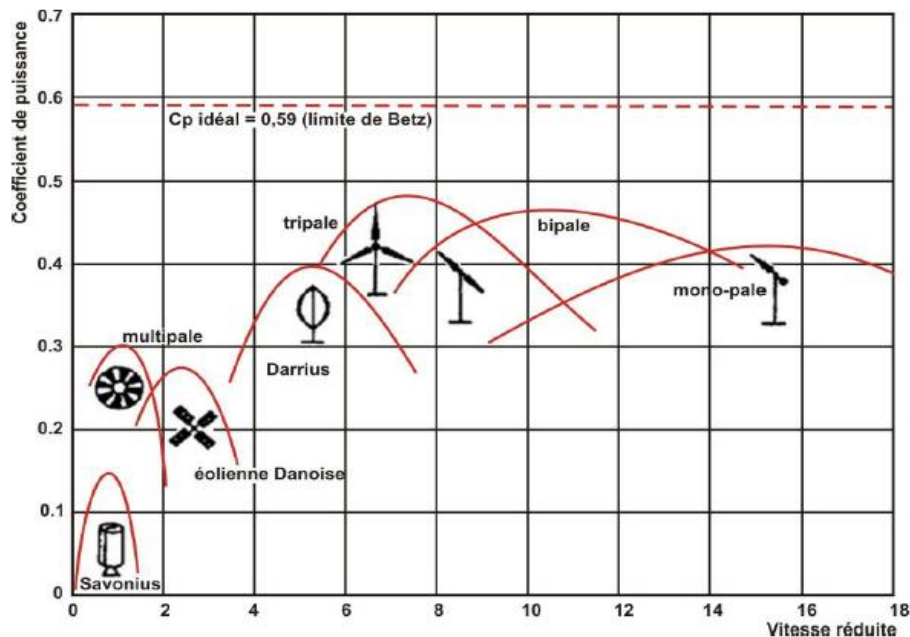


Fig. 1. 11 Coefficients de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour différents types de turbines [57]

La figure 1.11 montre bien que les éoliennes à axe horizontal disposent d'un rendement plus important par rapport aux autres types d'éoliennes. Il atteint sa valeur maximale pour  $\lambda \approx 7$ . Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour  $5 < \lambda < 15$ . Celles à rotor vertical et celles de plus de trois pales présentent des valeurs plus faibles de  $C_{P_{max}} \approx 0,15$ . Pour la Savonius  $C_{P_{max}} \approx 0,4$  et  $C_{P_{max}} \approx 0,3$  pour la Darrius. Ainsi, la variation du coefficient de puissance est toujours en dessous de la limite de Betz. Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, du nombre de pales utilisées.

## 1.8 Les types des éoliennes

De nos jours, il existe de nombreuses technologies d'éoliennes selon : la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée la nacelle, le domaine d'utilisation et en fonction du type de générateur utilisé.

### 1.8.1 Disposition géométrique

Selon la disposition géométrique, on distingue trois types [4, 57, 58]:

- les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- les turbines éoliennes à axe vertical de type Darrieus ;
- les turbines éoliennes à axe vertical de type Savonius ou à godets.

Actuellement, la majorité des éoliennes installées utilisent des turbines à axe horizontal à trois pales et des turbines à axe vertical de type Darrieus pour les fortes vitesses de vent. Elles utilisent la force de portance du vent comme le font les avions. L'avantage majeur des éoliennes à axe horizontal est la possibilité de capter le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol. Cette disposition présente aussi les inconvénients suivants :

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

Par ailleurs, les turbines éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de traînée du vent à la façon des roues à aube de bateaux. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. En effet, les turbines éoliennes à axe vertical en général sont très peu répandues grâce aux difficultés dues à leur guidage mécanique et à leur rendement énergétique faible. En plus, elles occupent une surface importante. En revanche, elles ont les avantages suivants :

- un couple résistant au démarrage proche de zéro ;
- conception simple, robuste et nécessite peu d'entretien ;
- tournent à faible vitesse ;
- peu bruyantes ;
- possibilité de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol ;
- son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.



Fig. 1. 12 Types d'éoliennes selon la disposition géométrique [45, 59].

### 1.8.2 Puissance délivrée

Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur puissance délivrée et le diamètre de leur hélice ainsi qu'à leur domaine d'utilisation. La puissance des éoliennes varie de moins 1kW à plus 350 kW, comme suit [45]:

- le grand éolien : puissance  $> 350$  kW ;
- le moyen éolien : puissance entre 36 kW et 350 kW ;
- le petit éolien : puissance entre 1 kW et 36 kW ;
- le très petit éolien : puissance  $< 1$  kW.

Selon le diamètre de l'hélice, nous avons trois types :

- Petite : pour un diamètre de moins de 12m et une puissance délivrée moins de 40kW ;
- Moyenne : pour un diamètre entre 12m à 45m et une puissance délivrée entre 40kW et 999kW ;
- Grande : pour un diamètre de 46m et au-delà et une puissance délivrée de 1MW et plus.

De même, on distingue deux types d'éoliennes selon le domaine d'utilisation :

- Les éoliennes de type industriel ayant une puissance entre 02 et 2.5 MW ;
- Les éoliennes de type domestique ayant une puissance entre : 0.0004 et 0.05 MW.

### 1.8.3 Types des générateurs utilisés

Aujourd'hui, il existe deux principales structures de systèmes éoliens raccordées au réseau électrique : système éolien à vitesse fixe et système éolien à vitesse variable, classifiés en fonction du type de générateur utilisé. La possibilité de fonctionnement d'un générateur à vitesse variable pour une large gamme de vents permet de récupérer un maximum de puissance. Pour les générateurs à vitesse variable, le système éolien sera régulé de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. Ce qui permet d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine.

#### 1.8.3.1 Système éolien à vitesse variable

L'utilisation des convertisseurs de puissance dans les systèmes à vitesse variable, donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine. Ce qui implique une amélioration du rendement énergétique du système. Les structures à vitesse variable permettent d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne pour des vents faibles et moyens et augmente la capacité de production de la machine de 5 à 15%. L'inconvénient majeur des systèmes éoliens à vitesse variable est le surcoût des convertisseurs ainsi que les performances des composants électroniques utilisés tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance [60, 61]. Différentes structures sont proposées :

##### 1.8.3.1.1 Machine asynchrone à double alimentation

La machine est directement liée au réseau par le stator et également par son rotor à travers deux convertisseurs triphasés (Fig. 1.13). Où l'un d'eux fonctionne en mode redresseur et l'autre en onduleur afin d'assurer un fonctionnement à vitesse variable en contrôlant la qualité des courants et des puissances active et réactive injectées au réseau. Cette structure permet d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme. En général, le dimensionnement de la chaîne du rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine, permettant ainsi un fonctionnement sur 30% de la plage de vitesse.

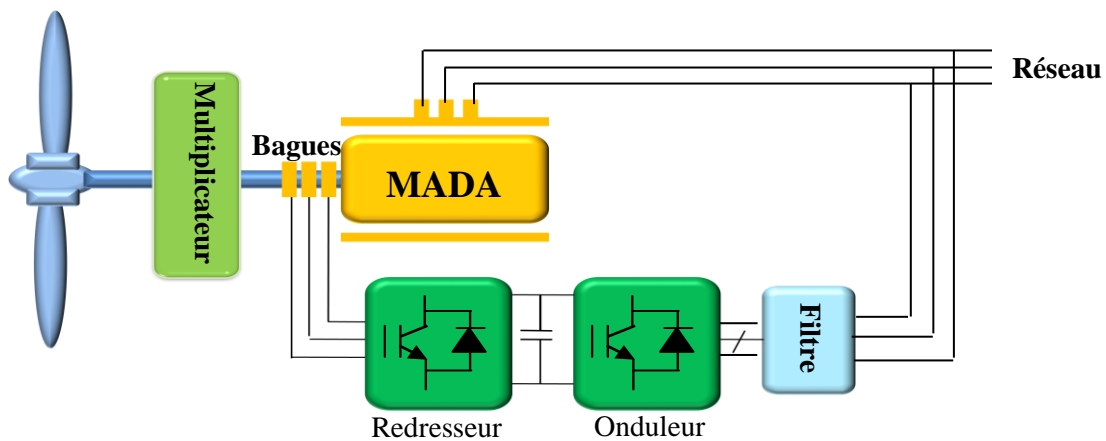


Fig. 1. 13 Système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation

Cette structure présente les avantages et les inconvénients suivants :

**Avantages :**

- augmentation de la plage de fonctionnement (fonctionnement à vitesse variable ( $\pm 30\% \omega_{sync}$ )) ;
- dimensionnement des convertisseurs à 30% de la puissance nominale ;
- puissance optimale pour des faibles et moyennes vitesses du vent ;
- connexion de la machine facile à gérer ;
- réduction du rôle du système d'orientation des pales pour les faibles vitesses des vents grâce au contrôle de la vitesse du générateur via le couple électromagnétique ;
- réduction du bruit quand la vitesse des vents est lente ;
- meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

**Inconvénients :**

- surcoût des convertisseurs ;
- maintenance de la boîte de vitesse ;
- commande complexe.

### 1.8.3.1.2 Machine asynchrone à rotor bobiné

Le stator de la génératrice asynchrone à rotor bobiné est directement couplé au réseau tandis que le rotor est triphasé et bobiné mais non connecté. La résistance rotorique est contrôlée à

travers une interface électronique. Le contrôle de cette interface permet d'obtenir une résistance rotorique variable ce qui implique la variation du glissement. Permettant ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse de l'ordre de 10% au-delà de la vitesse de synchronisme  $\omega_{\text{sync}}$ . Une grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25 % de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor [60]. La figure 1.14 montre la structure d'une éolienne à vitesse variable avec machine asynchrone à rotor bobiné.

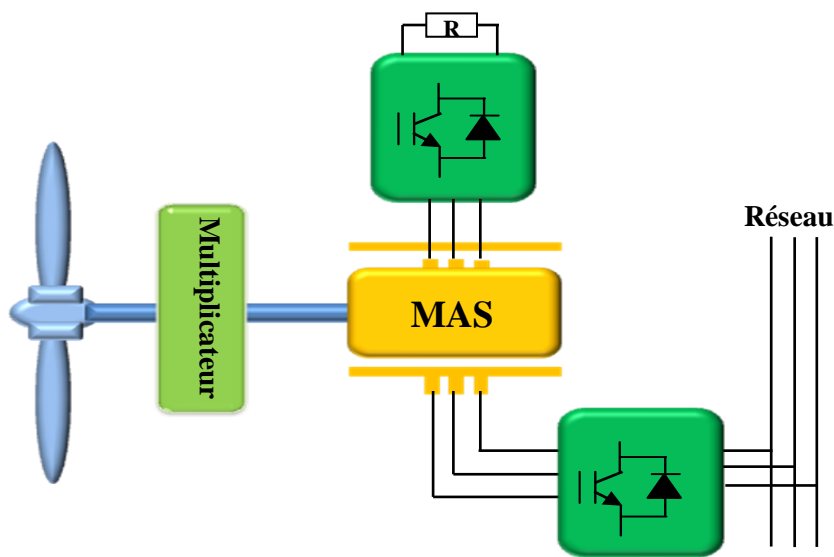


Fig. 1. 14 Système éolien à base d'une machine asynchrone à rotor bobiné

#### Avantages :

- fonctionnement à vitesse variable de +10% de la vitesse de synchronisme ;
- robustesse ;
- faible dimensionnement des convertisseurs ;
- fonctionnement à vitesse variable.

#### Inconvénients :

- maintenance de la boîte de vitesse ;
- énergie réactive non gérée par la machine ;
- magnétisation de la machine non gérée ;
- pertes supplémentaires ;
- dissipation de la puissance du rotor dans les éléments résistifs [61] ;

- nécessite l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse ;
- présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance.

### 1.8.3.1.3 Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimant permanent

La vitesse de rotation influence sur la fréquence et l'amplitude de la tension délivrée par la machine synchrone. Les convertisseurs de ces structures sont dimensionnés au moins à la puissance nominale de la machine. Cependant, l'avantage principal d'une machine synchrone à inducteur est le contrôle direct du facteur de puissance de la machine elle-même. Chose qui permet de diminuer le courant statorique. Le contrôle dynamique du couple (autopilotage) de la machine synchrone à inducteur ou à aimants par commande d'un convertisseur à MLI ne nécessite pas obligatoirement une structure de commande dans un référentiel tournant. Ce sont plutôt les courants triphasés réels qui sont contrôlés. Cette configuration (Fig. 1.15) permet donc d'assurer un découplage entre le comportement de la génératrice et le comportement du réseau électrique.

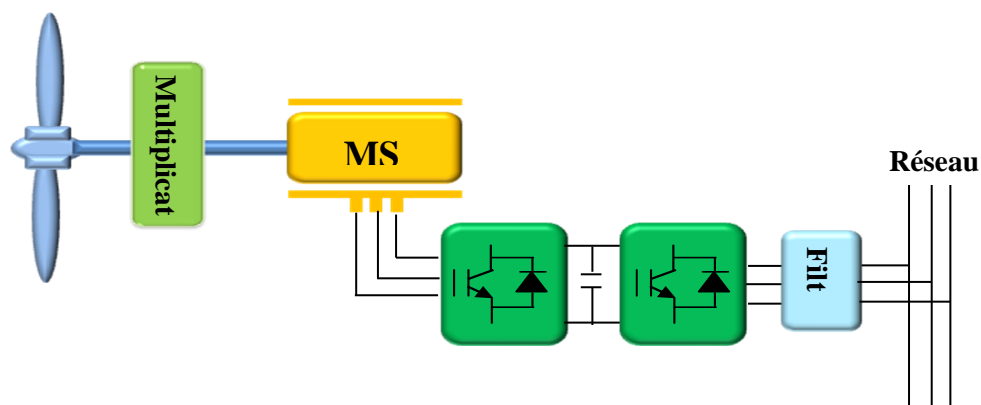


Fig. 1. 15 Système éolien à base d'une machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants

Comme toute machine, elle présente les avantages et les inconvénients suivants :

#### Avantages :

- fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse ;
- puissance optimale extraite pour les vents faibles et moyens ;
- la connexion de la machine est plus facile à gérer ;
- absence de la boîte de vitesse ;
- couples très importants à dimensions géométriques convenables ;
- faible taux de défaillance ;



- suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes.

**Inconvénients :**

- coût important de la machine et des convertisseurs ;
- grand diamètre de la machine ;
- dimensionnement des convertisseurs au moins à 100% de la puissance nominale ;
- nécessite un système de bagues et balais et un multiplicateur ;
- entretien régulier de système des bagues et balais.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à de coûts compétitifs.

**1.8.3.2 Système éolien à vitesse fixe**

Les premiers systèmes éoliens mis en œuvre s'appuient sur l'utilisation des machines asynchrones à cage connectées directement au réseau électrique.

**1.8.3.2.1 Machine asynchrone à cage**

La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique [62]. Les machines asynchrones à cage ne sont pas simples à installer, elles sont souvent associées avec une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive appelée au réseau et un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter l'appel de courant en régime transitoire au moment de la connexion au réseau (Fig. 1.16). Ce type d'éolienne ne donne pas la possibilité de régler la puissance générée. D'autant plus, certaines éoliennes de ce type sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales (stall control). L'augmentation de la vitesse du vent est accompagnée d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent supérieur que la vitesse nominale (passive stall). Ce qui cause la diminution de la puissance captée. Quoique, les possibilités de l'optimisation de la puissance restent marginales [61-65].

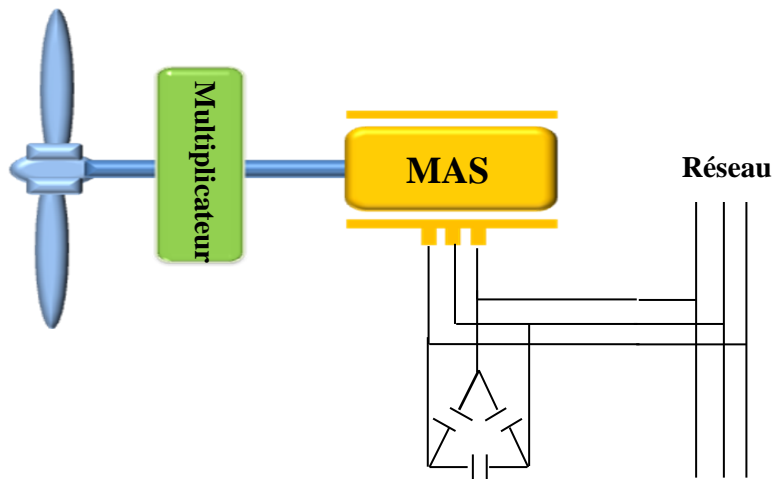


Fig. 1. 16 Eolienne à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage

Cette configuration présente les avantages et les inconvénients suivants :

#### Avantages

- machine simple à fabriquer et moins coûteuse ;
- standard ;
- robuste ;
- moins exigeantes en termes d'entretien ;
- taux de défaillance très faible ;
- facilité d'utilisation ;
- absence de balais-collecteurs.

#### Inconvénients

- multiplicateur mécanique de vitesse ;
- fonctionnement à vitesse fixe ;
- variations brusque de puissance ;
- problèmes de décrochage du réseau en cas de la chute du vent.

Pour rendre la machine asynchrone fonctionnelle à vitesse variable une autre configuration a été proposée (Fig. 1. 17). Piloté au stator, la machine est directement liée au réseau grâce à un redresseur et un onduleur. Pour la magnétisation de la machine, on a besoin de condensateurs montés en parallèle avec le stator. Le redresseur à diodes fournit une tension continue variable

en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne qui peut être exploitée par un onduleur MLI pour renvoyer sur le réseau une tension alternative à la fréquence adéquate et des courants sinusoïdaux [63-66]. Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent.

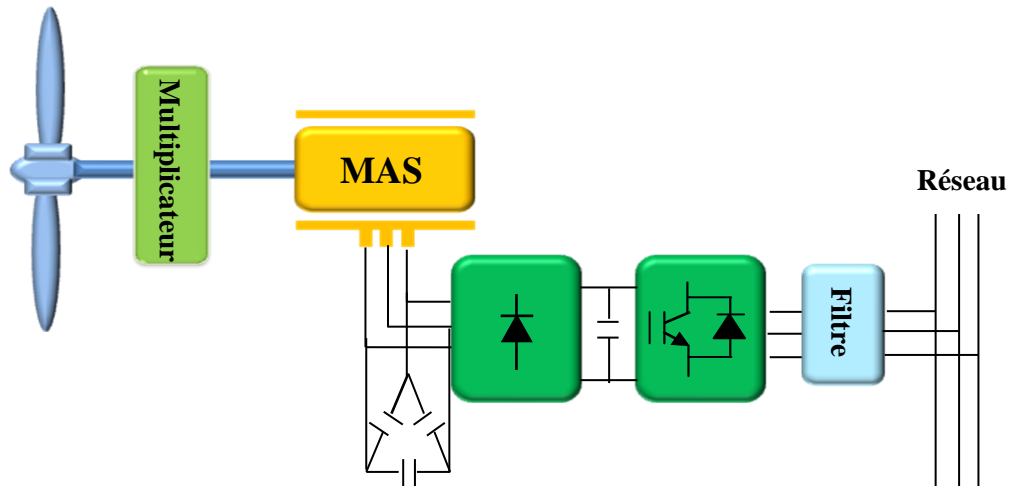


Fig. 1. 17 Système éolien à base d'une machine asynchrone à cage

En revanche, pour permettre le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (Fig. 1.18) et ainsi fournir de la puissance réactive à la machine asynchrone sans l'utilisation des condensateurs du montage précédent, le redresseur peut être remplacé par un onduleur avec l'utilisation d'un variateur de fréquence [66].

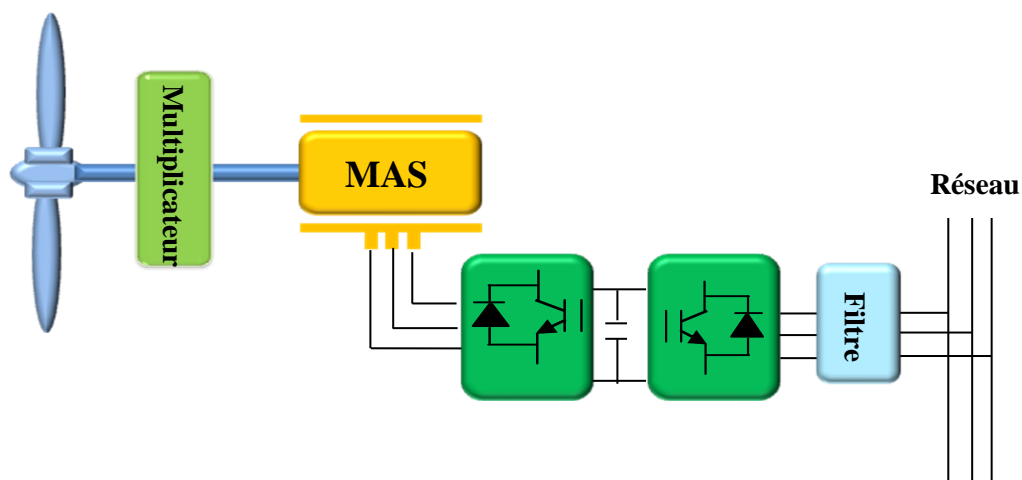


Fig. 1. 18 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs

Ces deux solutions présentent plusieurs inconvénients [62-66] :

- augmentation considérable du coût ;
- augmentation des pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine ;
- complexité de mise en œuvre ;
- la puissance réelle extraite est beaucoup plus faible à cause de l'association du multiplicateur, la génératrice et les convertisseurs.

Le tableau. 1.4 résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation des différentes génératrices pour les systèmes éoliens [61]. Avec deux inconvénients contre quatre avantages, on choisit la MADA pour la suite de notre étude. La modélisation et la commande d'un système éolien fonctionnant à vitesse variable à base d'une GADA seront étudiées au chapitre II.

Tableau. 1. 4 Avantages et inconvénients des différentes génératrices

		Type de la génératrice			
		MAS	MASRe	MADA	MS
Avantages	Robustesse	×	×		
	Faible coût	×			
	Pas d'électronique de puissance	×			
	Fonctionnement à des vitesses variables		×	×	×
	Electronique de puissance en régime permanent		×		
	Gestion du réactif			×	×
	Optimisation de la production des vitesses du vent faible			×	×
	Facilité de connexion au réseau électrique			×	×
	Découplage possible entre la turbine et le réseau				×
	Possibilité de suppression du multiplicateur de vitesse ou de réduction de sa taille				×

Inconvénients	Spécificité de la machine				×
	Taille de la machine				×
	Présence de l'électronique de puissance				×
	Coût élevé de la machine			×	×
	Puissance extraite non optimisable	×	×		
	Pas de gestion du réactif	×	×		
	Pas de possibilité de démarrage en Black Start	×	×		
	Maintenance et bruit du multiplicateur de vitesse	×	×	×	

### 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie éolienne et les différents travaux publiés ont été considérés. En effet, une étude sur l'évaluation des énergies renouvelables dans le monde et notamment en Algérie a été présentée. Le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie a été exposé. En outre, une synthèse des différents types d'éoliennes a été présentée ainsi que les différents types de générateurs électriques utilisés dans les turbines éoliennes tout en soulignant les avantages et les inconvénients de chaque structure. Du point de vue optimisation de la production pour de faibles vitesses du vent, les systèmes éoliens à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation offrent plus d'avantages que les autres structures. Ce type de système éolien fera l'objet de ce travail et sera présenté dans le chapitre II.

## *Chapitre II*

---

### *Modélisation et commande de la chaîne de conversion éolienne*

---

## 2.1 Introduction

Grâce à son potentiel énergétique important, l'énergie éolienne est devenue la première source d'énergie renouvelable après l'hydraulique [66]. Par conséquent, leur nombre d'installations à travers le monde a augmenté considérablement car en produisant de l'électricité, elles ne propagent pas de gaz à effet de serre [67]. De nos jours, le système éolien à vitesse variable à base de génératrice asynchrone à double alimentation « GADA » est le plus utilisé dans les fermes éoliennes. La GADA offre plusieurs avantages : un très bon rendement énergétique, une bonne robustesse ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. En plus, elle permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques [60]. Le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles. Par ailleurs, la GADA offre plusieurs possibilités de reconfigurations du mode de fonctionnement de la machine. Grâce à ces avantages, elle a suscité la curiosité des chercheurs qui ont développé des stratégies de commandes exploitant au mieux ses points forts [68, 69].

Ce chapitre traite deux parties principales : la première concerne la modélisation d'un système éolien à base d'une GADA fonctionnant à vitesse variable. Au début de cette partie, les modèles des différents sous-systèmes : aérodynamique, mécanique et électrique de la chaîne de conversion éolienne sont développés. Puis, une commande vectorielle dont le principe consiste à découpler le flux et le couple électromagnétique est considérée. La seconde partie concerne l'évaluation du potentiel éolien, l'estimation de la production énergétique ainsi que le choix d'une éolienne à installer à proximité de l'aéroport international Rabah Bitat de Annaba, en fonction des données de la vitesse mesurée du vent par la station météorologique de l'aéroport. Une analyse statistique des caractéristiques du vent ainsi que l'extrapolation des paramètres de weibull sont présentées [70-73]. Par ailleurs, nous allons estimer et analyser la production énergétique et le facteur de capacité de neuf éoliennes de différents constructeurs. Le modèle le plus utilisé dans la littérature [74] pour l'analyse de la distribution fréquentielle des vitesses de vent, est la distribution de weibull grâce aux avantages suivants :

- un très bon suivi de la distribution du vent ;
- structure flexible et évolutive ;

- détermination facile des paramètres (fonction à deux paramètres) ;
- peu de paramètres.

La principale limitation de la fonction de densité de weibull (FDW) c'est qu'elle ne présente pas exactement les probabilités des faibles vitesses du vent.

## **2.2 Description du système de conversion**

Le système éolien étudié dans ce manuscrit est présenté sur la Fig. 2.1. La chaîne de conversion éolienne est constituée de la turbine, du multiplicateur et de la GADA. La GADA est connectée directement au réseau électrique par le stator mais aussi par son rotor au travers d'un dispositif d'électronique de puissance constituée de deux onduleurs de tensions, l'un fonctionnant en mode redresseur et l'autre en mode onduleur. Ces deux convertisseurs, commandés par modulation de largeur d'impulsion MLI [75, 76], permettent le changement énergétique entre le réseau et la GADA à la vitesse de synchronisme. Un fonctionnement en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone est possible grâce à la bidirectionnalité des convertisseurs. Les convertisseurs alimentant le rotor sont, généralement, dimensionnés pour une puissance comprise entre 25 à 30% de la puissance nominale de la GADA [69, 77]. Par conséquent, Cette économie réalisée sur les convertisseurs permet de compenser le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues/balais de la GADA, comparé à un système éolien pour lequel les convertisseurs seraient dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice [78].

En outre, la possibilité de contrôler la puissance réactive pour imposer le facteur de puissance au point de connexion de la GADA avec le réseau ainsi que l'extraction optimale de la puissance pour des vents faibles et moyens sont les raisons majeures pour lesquelles le choix de cette machine présente une solution très intéressante pour la production des hautes puissances [79]. Dans ce chapitre, nous allons étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne et convertit ainsi en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Par la suite, la transformation de la puissance mécanique en puissance électrique par la GADA, tout en modélisant les différents sous modèles des deux parties : mécanique et électrique.



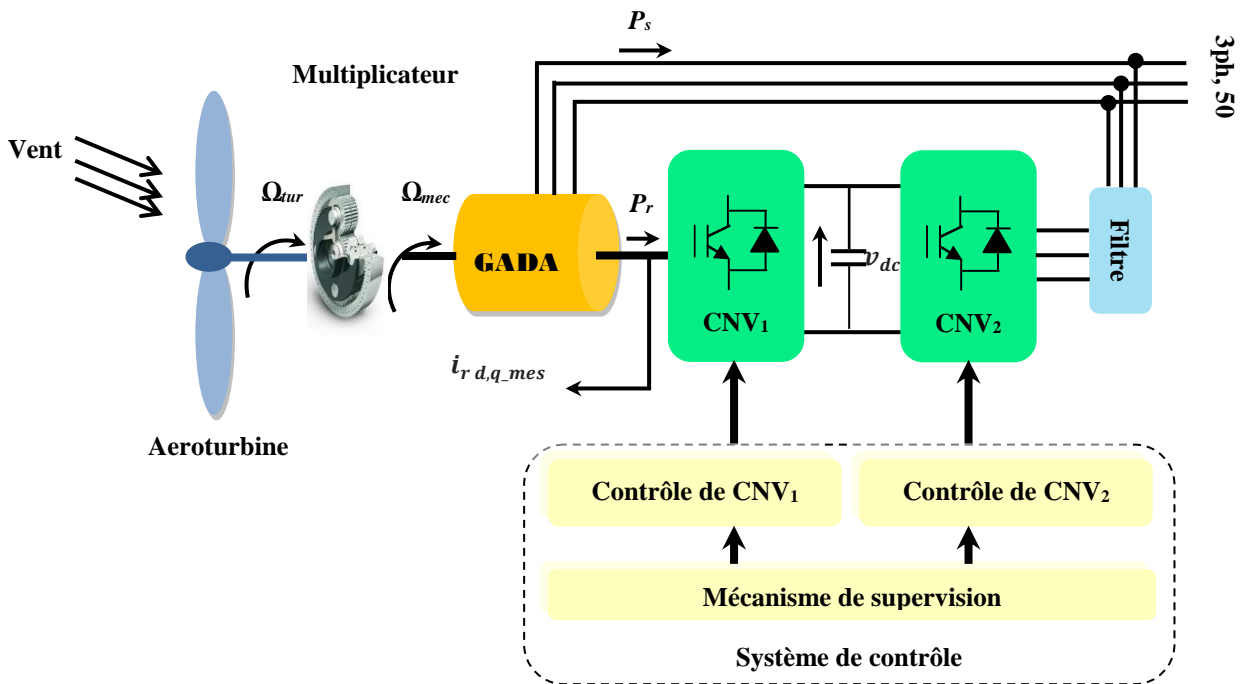


Fig. 2. 1 Schéma synoptique d'un système éolien équipé d'une GADA

## 2.3 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

### 2.3.1 Modélisation de la turbine éolienne

Dans le but de connaître le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne. Nous allons modéliser la turbine éolienne pour exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et de sa vitesse de rotation. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air ( $m$ ) qui se déplace avec la vitesse ( $V$ ), l'énergie cinétique de cette masse est [62, 80]:

$$E_c = 0.5 m V^2 \quad (2.1)$$

La puissance instantanée de l'éolienne est l'énergie cinétique du vent traversant une surface  $S$ , elle est définie par [81] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (2.2)$$

Avec  $\rho$  : la masse volumique de l'air ( $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ )

En tenant compte du coefficient de puissance  $C_p$ , la puissance mécanique de la turbine éolienne est alors :

$$P_{tur} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.3)$$

L'évolution du  $C_p$  dépend de l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{V} \quad (2.4)$$

Le coefficient de puissance est une grandeur variable, dit aussi rendement. Ce dernier est propre à chaque éolienne qui lie la puissance fournit par l'éolienne et la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure. Dans la littérature [62], on retrouve plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière. A partir des relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance pour ce type de turbine a été approchée par l'équation suivante [78, 82]:

$$C_p = \left(0.45 - (0.0167(\beta - 2))\right) \left(\sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{(15.5-(0.3(\beta-2)))}\right)\right) - (0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2)) \quad (2.5)$$

La valeur maximale du coefficient de puissance correspond à la limite dénommée la limite de Betz est de 0.593 [83, 84]. Ce qui démontre qu'indépendamment du modèle de la turbine, seuls 59% de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergie mécanique. 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 réduite ( $\lambda$ ) .

La Fig. 2.2 illustre la variation du coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour les différentes valeurs de l'angle de calage :  $\beta=2^\circ$ ,  $3^\circ$  et  $4^\circ$ . Cette figure montre que pour  $\beta=2^\circ$ , il y a un seul point ( $\lambda_{opt}, C_{popt}$ ) qui permet à la turbine d'extraire le maximum de puissance.

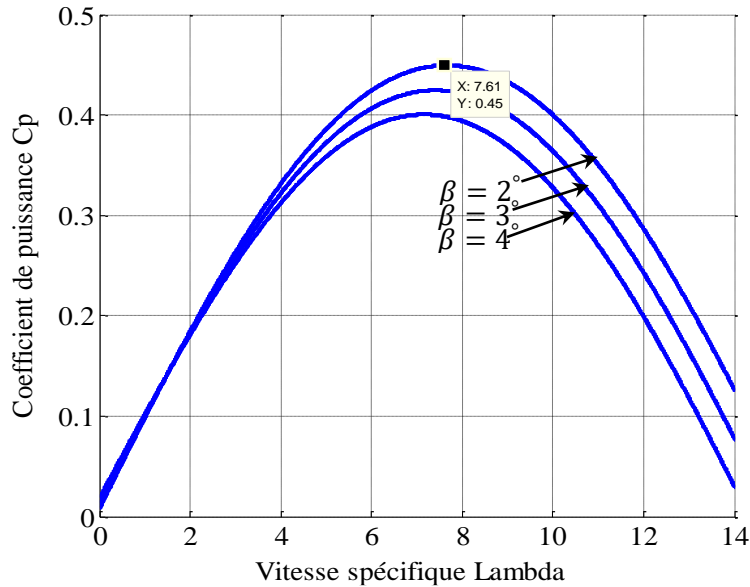


Fig. 2. 2 Coefficient de puissance en fonction de lambda ( $\lambda$ )

L'expression du couple aérodynamique est donnée par [79]:

$$C_{tur} = \frac{P_{tur}}{\Omega_{tur}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{tur}} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 Modélisation du multiplicateur

La partie mécanique comprend un moyeu sur lequel sont reliées les pales, l'axe lent, le multiplicateur de vitesse et l'axe rapide (rotor de la génératrice). En tenant compte des hypothèses simplificatrices [78, 85], la partie mécanique de l'éolienne peut être présentée comme suit:

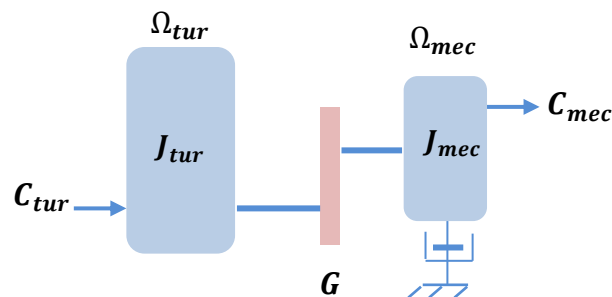


Fig. 2. 3 Partie mécanique de la turbine éolienne

Le multiplicateur sert de liaison entre la turbine et le générateur pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice [67].

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{tur} \quad (2.7)$$

Le frottement, l'élasticité et les pertes énergétiques dans le multiplicateur étant négligés, alors :

$$G = \frac{C_{tur}}{C_{mec}} \quad (2.8)$$

### 2.3.3 Modélisation de l'arbre

L'équation dynamique est modélisée par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad (2.9)$$

On considère que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale est donnée par l'expression suivante [86] :

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_{gen}$$

La figure 2.4 montre le schéma bloc du modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.

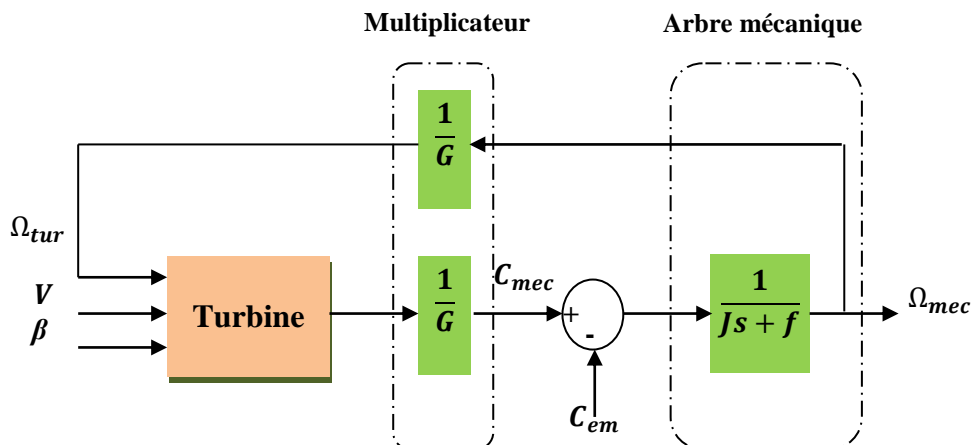


Fig. 2. 4 Modèle de l'arbre de l'éolienne

A partir du schéma bloc de la figure 2.4, nous pouvons remarquer que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse

du vent est une variable aléatoire dans le temps, pour capter le maximum possible de l'énergie éolienne, il faut ajuster d'une façon permanente la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. Ceci est réalisé en utilisant une technique appelée MPPT pour l'extraction du maximum de la puissance.

### 2.3.4 Modélisation de la GADA

L'objectif de modéliser la GADA est de faciliter l'évaluation de ses performances. Pour cela, nous nous sommes basés sur le modèle mathématique dans le repère de Park en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes [69, 76, 87, 88]:

- l'entrefer est constant ;
- l'effet d'encoche est négligeable ;
- la saturation du circuit magnétique sont négligeables ;
- les résistances des enroulements sont constantes ;
- pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté ;
- la force magnétomotrice est à répartition sinusoïdale.

L'utilisation d'une représentation vectorielle des grandeurs électriques est une manière d'obtenir un modèle invariant : cette représentation présente l'avantage de permettre, selon le référentiel choisi, de manipuler des grandeurs continues plutôt qu'alternatives, ce qui est intéressant à la fois pour un modèle pour la simulation et surtout pour la commande. Le modèle mathématique de la GADA est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec:  $L_s = L_{fs} + L_m$

$$L_r = L_{fr} + M^2 L_m$$

Les équations des puissances statorique et rotorique sont définis par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} \\ Q_r = V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq} \end{cases} \quad (2.15)$$

Le couple électromagnétique de la machine peut être exprimé par les différentes formes d'équations ci-dessous [87]:

$$\begin{cases} C_{em} = P L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \\ C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \\ C_{em} = P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \varphi_{sd}) \\ C_{em} = -P (\varphi_{rd} i_{rq} - \varphi_{rq} i_{rd}) \end{cases} \quad (2.16)$$

### 2.3.5 Modélisation du bus continu

A partir de la loi des nœuds, le courant circulant dans le condensateur peut être écrit comme suit :

$$i_{cond} = i_{red} - i_{ond} \quad (2.17)$$

Par ailleurs, la tension aux bornes du condensateur est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_{cond} \quad (2.18)$$

### 2.3.6 Modélisation du convertisseur côté réseau dans le repère de Park

Les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée [89]. La partie à modéliser est constituée du bus continu, du convertisseur et du filtre ( $R_f, L_f$ ). La figure 2.5 illustre le schéma du convertisseur et du filtre côté réseau.

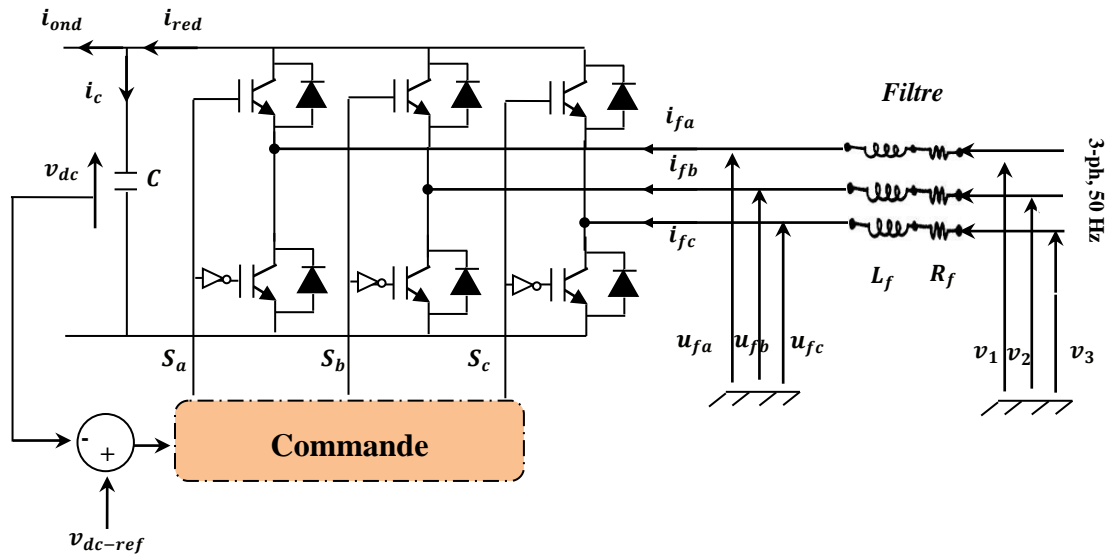


Fig. 2. 5 Structure d'un convertisseur triphasé à deux niveaux connecté au réseau

Afin de réduire le temps de simulation, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les interrupteurs sont considérés comme parfaits (résistance de valeur nulle à l'état passant et infinie à l'état bloqué) ;
- Les sources sont considérées comme parfaites ;
- Les éléments passifs sont considérés comme linéaires et invariants [31].

L'état des interrupteurs est défini par [90, 91]:

$$S_j = \begin{cases} +1, \bar{S}_j = -1 \\ -1, \bar{S}_j = +1 \end{cases} \quad \text{Pour } j = a, b, c.$$

Le modèle mathématique du convertisseur côté réseau dans le repère triphasé, selon la loi de Kirchhoff, peut être écrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{fa}}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_{fa} - \frac{1}{L} \left( S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \cdot v_{dc} + \frac{1}{L} u_{fa} \\ \frac{di_{fb}}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_{fb} - \frac{1}{L} \left( S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \cdot v_{dc} + \frac{1}{L} u_{fb} \\ \frac{di_{fc}}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_{fc} - \frac{1}{L} \left( S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \cdot v_{dc} + \frac{1}{L} u_{fc} \\ \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc}) - \frac{1}{C} i_{ond} \end{cases} \quad (2.19)$$

Le modèle dans le repère tournant d-q est obtenu à l'aide de la transformation de Park (Annexe A) par [92]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{fd}}{dt} \\ \frac{di_{fq}}{dt} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_f}{L_f} & 0 & \frac{-S_d}{L_f} \\ -\omega_s & \frac{-R_f}{L_f} & \frac{-S_q}{L_f} \\ \frac{3S_d}{2C} & \frac{3S_q}{2C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ i_l \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Avec  $S_q, S_d$  : fonctions de commutations

A partir de l'équation (2.20), on peut écrire:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} + e_{fd} - S_d v_{dc} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} + e_{fq} - S_q v_{dc} \end{cases} \quad (2.21)$$

On remarque que nous avons obtenu un modèle découplée, chaque fonction de commutation n'affectant que le courant correspondant. Par conséquent, les courants circulant dans le filtre peuvent être contrôlés indépendamment. La tension de sortie du convertisseur côté réseau peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} v_{fd} = S_d v_{dc} \\ v_{fq} = S_q v_{dc} \end{cases} \quad (2.22)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_{fd} = \omega_s L_f i_{fq} + v_{sd} \\ e_{fq} = -\omega_s L_f i_{fd} + v_{sq} \end{cases} \quad (2.23)$$

Les puissances active et réactive générées par le convertisseur sont définies par [92, 93]:

$$\begin{cases} P_f = v_{fd} \cdot i_{fd} + v_{fq} \cdot i_{fq} \\ Q_f = v_{fq} \cdot i_{fd} - v_{fd} \cdot i_{fq} \end{cases} \quad (2.24)$$

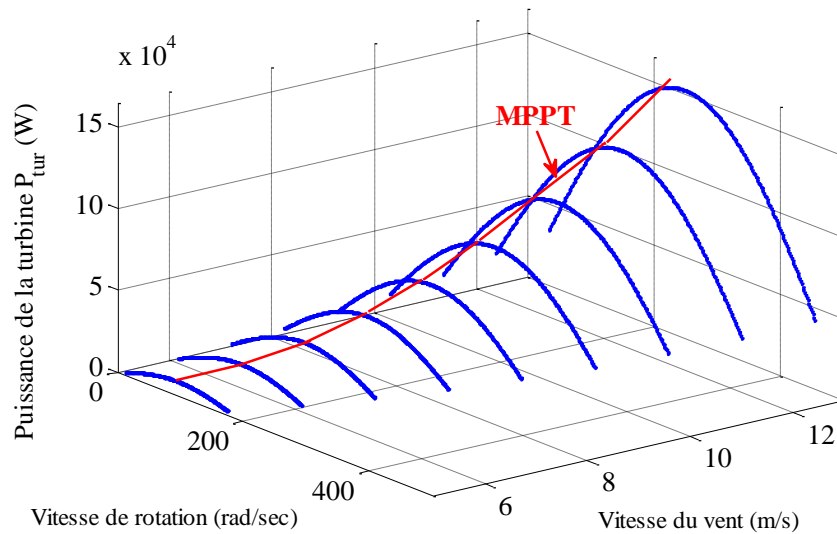
Tenant compte de l'orientation du repère d-q lié au champ tournant statorique ( $v_{sd} = 0$ ), l'équation (2.24) devient :

$$\begin{cases} P_f = v_{sq} \cdot i_{fq} \\ Q_f = v_{sq} \cdot i_{fd} \end{cases} \quad (2.25)$$

La figure 2.6 montre le schéma fonctionnel du convertisseur dans le référentiel tournant d-q.







La Fig. 2. 7 Courbes de la puissance en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse du vent

La figure 2.8 montre clairement l'avantage crucial des éoliennes fonctionnant à vitesse variable où le surcoût entraîné par la vitesse variable est compensé par le surplus de production [94]. En outre, elles fournissent un rendement énergétique de 10-35% plus élevée comparés aux éoliennes à vitesse constante avec effort mécanique moindre et moins de fluctuations de puissance [95].

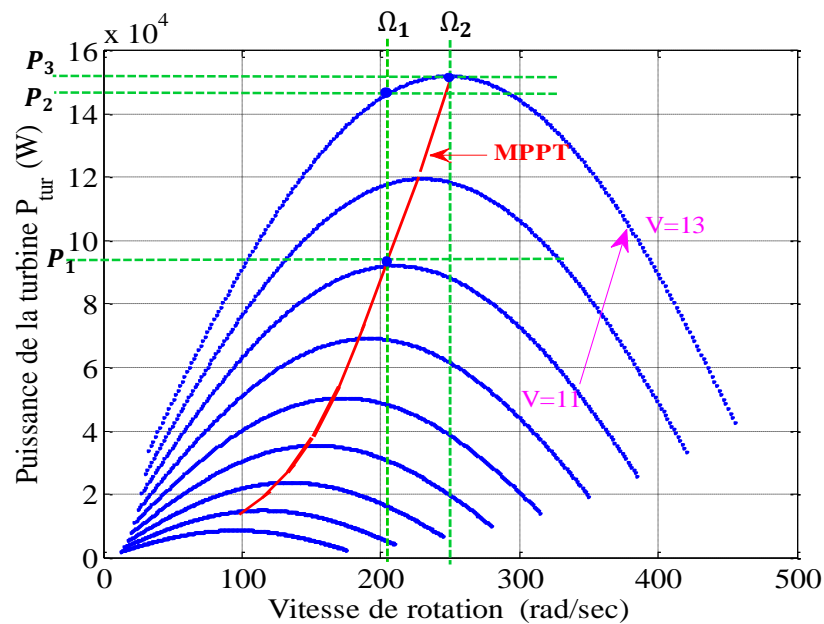


Fig. 2. 8 Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation

Par ailleurs, si la vitesse du vent varie de la vitesse  $v_1$  vers la vitesse  $v_2$  et la vitesse de rotation de la machine reste fixe à la vitesse  $\Omega_1$ , la puissance de la turbine varie de  $P_1$  à  $P_2$  sachant que la puissance maximale est égale à  $P_3$ . Par conséquent, pendant que la vitesse de vent change, la vitesse du rotor de l'éolienne doit changer de la vitesse  $\Omega_1$  à la vitesse  $\Omega_2$  afin d'extraire le maximum de puissance. La puissance est maximale lorsque le coefficient de puissance atteint sa valeur optimale ( $C_{popt}$ ). Par conséquent, la vitesse relative doit être égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$ . Le but est donc de rester constamment au point  $(\lambda_{opt}, C_{popt})$ . Cette technique se trouve dans la littérature sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [96-98].

### 2.4.2 Stratégie de commande

L'objectif visé dans la commande des éoliennes est de maximiser, tant que possible, leur exploitation. Selon [62, 69, 78, 87] le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon la vitesse du vent en trois zones (Fig. 2.9).

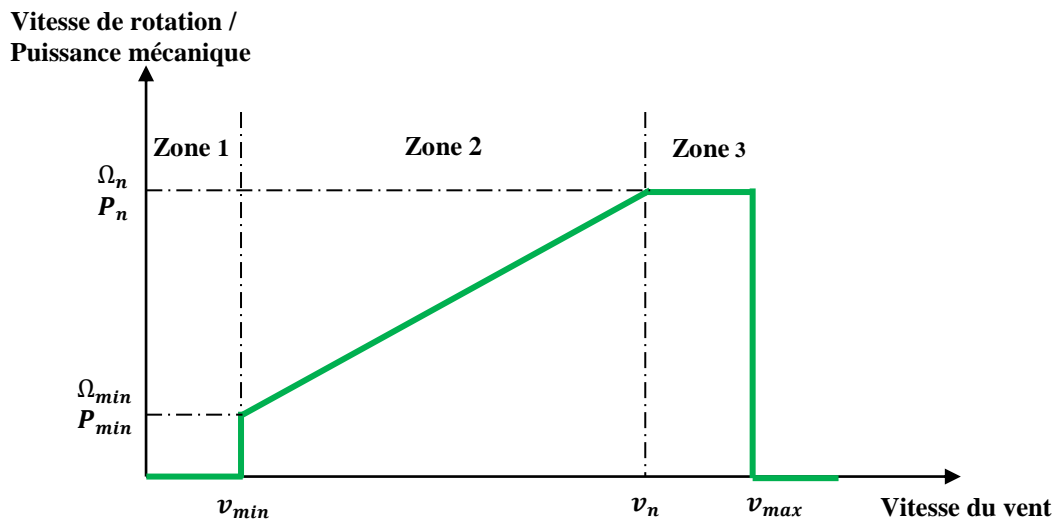


Fig. 2. 9 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Avec :

$v_{min}$  : vitesse du vent minimale à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie ;

$v_n$  : vitesse nominale à partir de laquelle la turbine éolienne doit modifier ses paramètres de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante ;

$v_{max}$  : la vitesse maximale du vent pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne.

Les vitesses :  $v_{min}$ ,  $v_n$  et  $v_{max}$  définissent trois zones de fonctionnement de l'éolienne:

- **Zone 1** : dans cette zone la vitesse du vent est faible et insuffisante pour le démarrage de l'éolienne. Par conséquent, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont nulles.

- **Zone 2** : c'est la zone où la vitesse du vent atteint une vitesse minimale  $v_{min}$  pour le démarrage de la turbine. Après le démarrage, l'éolienne fonctionne de façon à optimiser la puissance capturée par la turbine jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $v_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$ . Le contrôle vise extraire le maximum de puissance tout en variant la vitesse de rotation de l'éolienne pour avoir une vitesse relative optimale ( $\lambda_{opt}$ ) et par la suite un coefficient de puissance optimal ( $C_{popt}$ ), l'angle de calage étant fixe.

- **Zone 3** : dans cette zone, la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale. Le contrôle de l'angle de calage des pales vise à maintenir la vitesse de rotation et la puissance mécanique à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne.

Dans les zones 2 et 3 la vitesse du vent est toujours inférieure à la vitesse d'arrêt de l'éolienne  $v_{max}$  pour des raisons de sécurité.

Dans ce travail, on s'intéresse au fonctionnement de l'éolienne dans la zone 2 où la vitesse de rotation de l'éolienne est asservie en contrôlant le couple électromagnétique de la GADA de manière à maximiser le rendement énergétique. Le but de ce contrôle est la recherche permanente du point maximum de la puissance.

### 2.4.3 Contrôle de la vitesse de rotation

La technique d'extraction du maximum de puissance consiste à déterminer la vitesse de rotation qui permet d'obtenir le maximum de puissance. Deux approches d'extraction de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent ont été développées dans la littérature, à savoir le contrôle avec ou sans asservissement de la vitesse de rotation. Cependant, la première approche consiste à régler le couple électromagnétique de manière à avoir une vitesse de rotation égale à une vitesse de référence. Afin de réaliser cette régulation, nous devons effectuer un asservissement de la vitesse de rotation de la GADA. En effet, si on fixe

la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance optimale  $C_{popt}$ , la vitesse de rotation de référence est :

$$\Omega_{tur\_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (2.26)$$

Par ailleurs, la deuxième technique repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Par conséquent, le couple mécanique de la turbine est nul. A partir de l'équation dynamique de la turbine, nous pouvons écrire [67, 78]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_{mec} - C_{em} = 0 \quad (2.27)$$

En outre, l'effet du couple dû aux frottements visqueux est négligeable par rapport au couple mécanique. De là, on peut écrire :

$$C_{mec} = C_{em} \quad (2.28)$$

En effet, si on fixe la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance optimale  $C_{popt}$ , le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par [99]:

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{popt} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_m^2 \quad (2.29)$$

La figure 2.10 illustre le schéma de principe de la commande MPPT avec et sans asservissement de la vitesse de rotation.

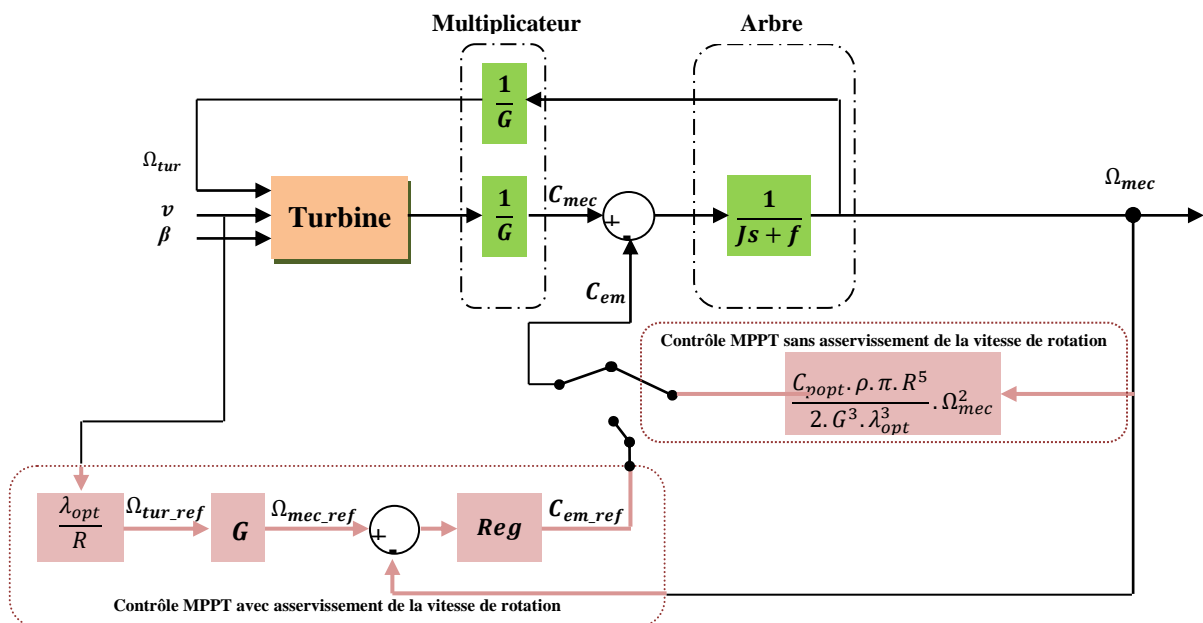


Fig. 2. 10 Schéma bloc du contrôle MPPT de la vitesse de rotation

### 2.4.4 Commande vectorielle de la GADA

La représentation vectorielle permet de réduire le calcul matriciel, de simplifier la résolution des équations, d'étudier le fonctionnement en régime permanent de la machine ainsi que sa stabilité autour d'un point de fonctionnement. Afin de réaliser la loi de commande, nous choisissons d'orienter le flux statorique ( $\varphi_s$ ) suivant l'axe « d » et en négligeant la résistance des bobinages statoriques. La représentation vectorielle de l'ensemble des grandeurs caractéristiques de la GADA est représentée sur la figure 2.11.

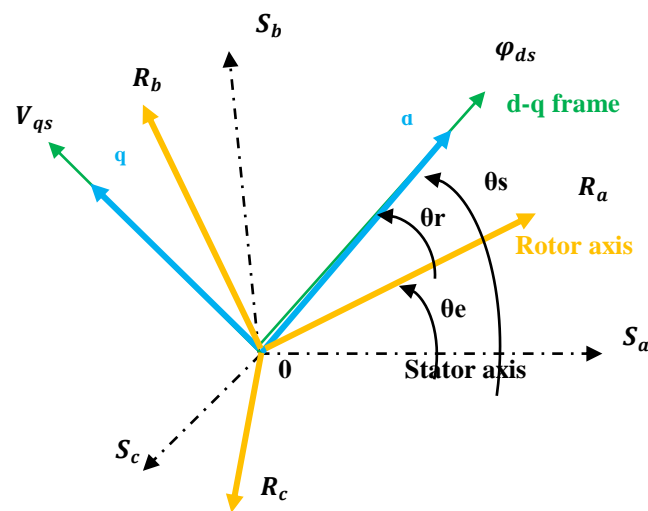


Fig. 2. 11 Diagramme vectoriel de la GADA correspondant à une magnétisation par le stator

$$\begin{cases} \dot{\theta}_s = \omega_s \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{\theta}_e = \omega_e = \omega_s - \omega_r = p\omega_m \end{cases} \quad (2.30)$$

Par conséquent, nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases} \quad (2.31)$$

Les tensions statoriques d'axes d-q sont représentées par :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.32)$$

On suppose que le réseau est stable avec une tension  $v_s$  et la vitesse de synchronisme est aussi constante ce qui implique  $\varphi_{sd} = cst$ .

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.33)$$

Par conséquent, la relation entre les courants statorique et rotorique est représentée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (2.34)$$

De l'équation (13) et (34), on peut écrire:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \end{cases} \quad (2.35)$$

En remplaçant les équations (2.33, 2.35) dans (2.10, 2.11) nous pouvons écrire les tensions statoriques et rotoriques simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{R_s}{L_s} \varphi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} L_m i_{rd} \\ V_{sq} = -\frac{R_s}{L_s} L_m i_{rq} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.36)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma \cdot L_r \frac{di_{rd}}{dt} + e_{rd} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma \cdot L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_{rq} + e_\varphi \end{cases} \quad (2.37)$$

Avec:

$$\begin{cases} e_{rd} = -\sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rq} \\ e_{rq} = \sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rd} \\ e_\varphi = \omega_r \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{sd} \\ \sigma = 1 - \left(\frac{M}{\sqrt{L_s L_r}}\right)^2 \end{cases} \quad (2.38)$$

Les équations (2.14) et (2.15) des puissances statorique et rotorique deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{M V_s}{L_s} \cdot i_{rd} \\ P_r = g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{rq} \\ Q_r = g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{rd} \end{cases} \quad (2.39)$$

La puissance réactive statorique est divisée en deux parties : la partie de magnétisation :  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  et la puissance réactive échangée avec le réseau électrique :  $\frac{M V_s}{L_s} \cdot i_{rd}$ . La figure 2.12 illustre le schéma bloc du modèle de la machine asynchrone à double alimentation. De l'équation (2.39) nous pouvons remarquer que la puissance active statorique est proportionnelle au courant rotorique d'axe « q » contrairement à la puissance réactive statorique à cause de la constante :  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  imposée par le réseau électrique. L'énergie réactive sera toujours fournit à la machine par le stator et ceci quel que soit le signe de  $\omega_s$ . Le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_{em} = -P \cdot \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} \cdot i_{rq} \quad (2.40)$$

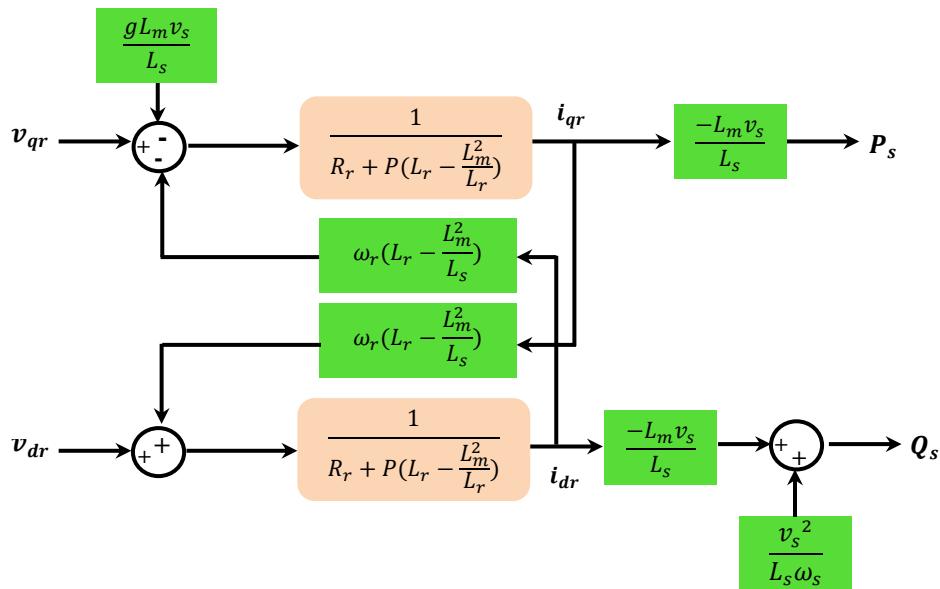


Fig. 2. 12 Schéma bloc du modèle de la GADA



### 2.4.5 Contrôle du convertisseur côté réseau

Le convertisseur est contrôlé de façon à garder la tension du bus continu constante à une valeur de référence désirée, tout en absorbant un courant qui doit être le plus sinusoïdal possible. Ainsi que, la correction du facteur de puissance au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique. Grâce à la bidirectionnalité du convertisseur, il peut fonctionner en mode hypo-synchrone ( $g > 0$ ) et en mode hyper-synchrone ( $g < 0$ ).

#### 2.4.5.1 Contrôle des courants

Le modèle électrique du filtre est donné par l'équation (2.20). Les courants de références sont issus respectivement du contrôle du bus continu et du contrôle de la puissance réactive (équation 2.25).

$$i_{fq\_ref} = \frac{P_{f\_ref}}{V_{sq}} \quad (2.41)$$

$$i_{fd\_ref} = \frac{Q_{f\_ref}}{V_{sq}} \quad (2.42)$$

Le schéma block du contrôle des courants qui circulent à travers le filtre, selon le repère de Park est représenté sur la figure 2.13.

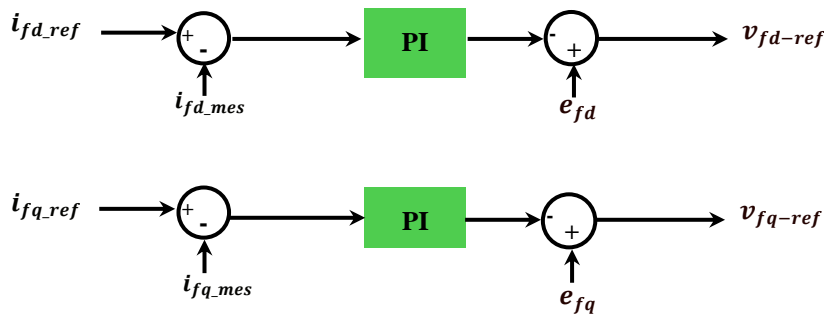


Fig. 2. 13 Schéma de principe du contrôle des courants

#### 2.4.5.2 Contrôle de la tension du bus continu

Le contrôle de la tension du bus continu permet d'avoir la référence de la puissance active  $P_{c\_ref}$ . De l'équation (2.17), nous pouvons écrire :

$$P_{cond} = P_{red} - P_{ond} \quad (2.43)$$

Sachant que les puissances  $P_{red}$ ,  $P_{cond}$  et  $P_{ond}$  sont respectivement les puissances du redresseur, bus continu et de l'onduleur :

$$P_{red} = v_{dc} \cdot i_{red} \quad (2.44)$$

$$P_{cond} = v_{dc} \cdot i_c \quad (2.45)$$

$$P_{ond} = v_{dc} \cdot i_{ond} \quad (2.46)$$

En considérant que les pertes dans le condensateur, le convertisseur et le filtre sont négligeables ( $P_f = P_{red}$ ), le courant de référence d'axe « q » circulant à travers le filtre  $i_{fq\_ref}$  est toujours égale au courant  $i_{fq}$  parce que le temps de réponse de la boucle interne est plus faible que celui de la boucle externe. Le schéma bloc du contrôle de la tension du bus continu est présenté sur la figure 2.14.

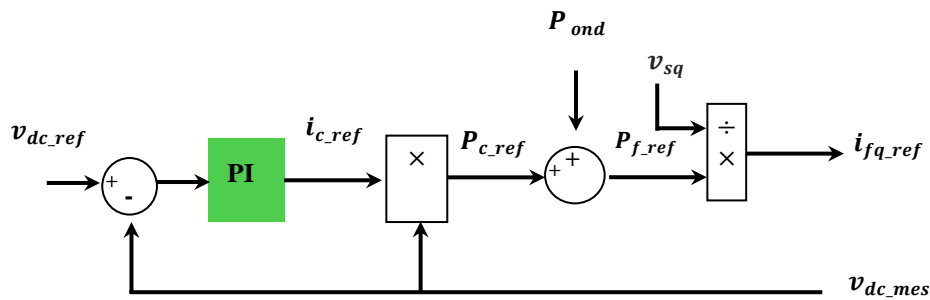


Fig. 2. 14 Schéma de principe du contrôle de la tension du bus continu  $v_{dc}$

#### 2.4.6 Contrôle du convertisseur coté machine

Le convertisseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. En outre, il permet de contrôler les puissances active et réactive produites par la GADA. Les équations des puissances statoriques (modèle mathématique) de la machine montre bien que la puissance active est proportionnelle au courant rotorique d'axe « q ». Par contre, la puissance réactive n'est pas proportionnelle au courant rotorique d'axe « d », à cause de la partie de magnétisation ( $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ ) imposée par le réseau. Par conséquent, ce découplage permet par la suite de contrôler les courants rotoriques d'axe « d » et « q » indépendamment, en supposant que le temps mort imposé par les interrupteurs du convertisseur est négligeable.

La figure 2.15, présente le schéma bloc des boucles de régulation des courants rotoriques. Les courants rotoriques d'axe d-q de références  $i_{rd\_ref}, i_{rq\_ref}$  sont, respectivement, issu du contrôle de la puissance réactive statorique et de la commande MPPT, donnés par :

$$\begin{cases} i_{rd\_ref} = \frac{\varphi_{sd}}{M} - \frac{L_s}{M.V_{sq}} \cdot Q_{s\_ref} \\ i_{rq\_ref} = -\frac{L_s}{M.V_{sq}} \cdot P_{s\_ref} \end{cases} \quad (2.47)$$

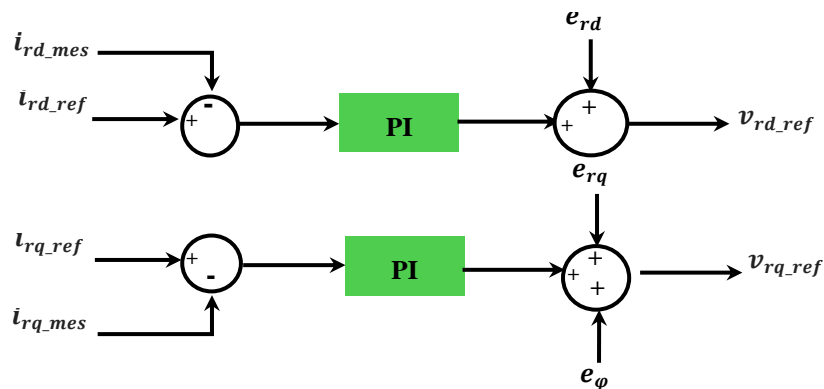


Fig. 2. 15 Schéma de principe du contrôle des courants rotoriques

## 2.5 Simulation et interprétation

De la commande des deux parties mécanique et électrique, on a décrit un schéma bloc (Fig. 2.16). Il présente le principe du contrôle d'un système éolien. On remarque que pour contrôler, séparément, les courants à travers le filtre et les puissances active et réactive échangées entre le réseau électrique et le convertisseur, le schéma bloc contient un module de découplage et de compensation. Les deux parties : modélisation et commande développées dans ce chapitre ont été illustrées et validées par simulation sous Matlab/Simulink afin d'analyser par simulation le comportement de la chaîne de conversion pour deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone. En pratique, une mesure de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Dans ce cas, une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation de la puissance extraite selon la technique MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation. C'est la raison pour laquelle la majorité des turbines éoliennes installées dans le monde sont contrôlées par la technique MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation. Dans ce travail, afin de régler la vitesse de rotation, nous avons choisis la commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation qui correspond à la zone 2 (Fig. 2.9) de la

caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. Par ailleurs, les deux convertisseurs sont commandés par modulation de largeur d'impulsion. Pour le contrôle des courants du filtre et du rotor ainsi que le contrôle du bus continu, on a utilisé des régulateurs classiques de type PI. Nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur (Tableau. A.1 de l'Annexe A). Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau A.2 de l'Annexe A.

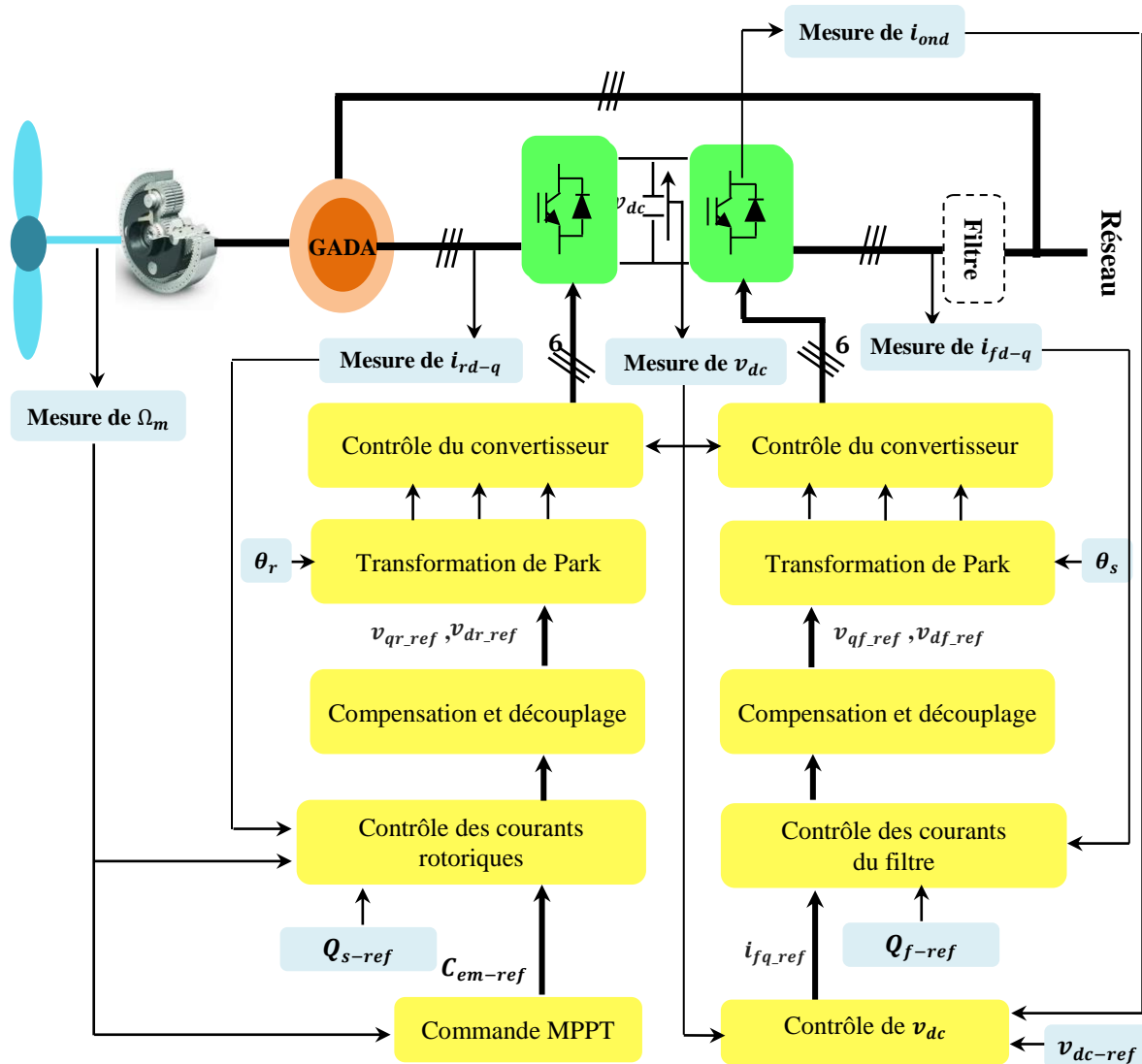


Fig. 2. 16 Bloc diagramme du principe de contrôle du système éolien

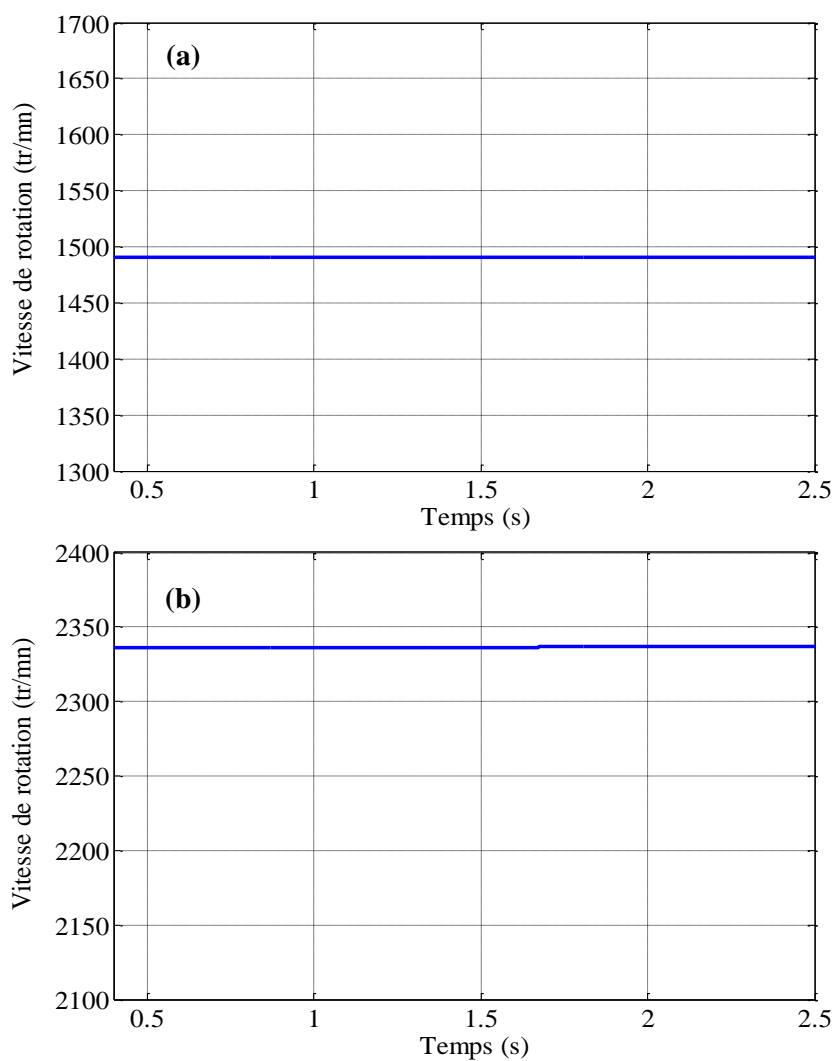
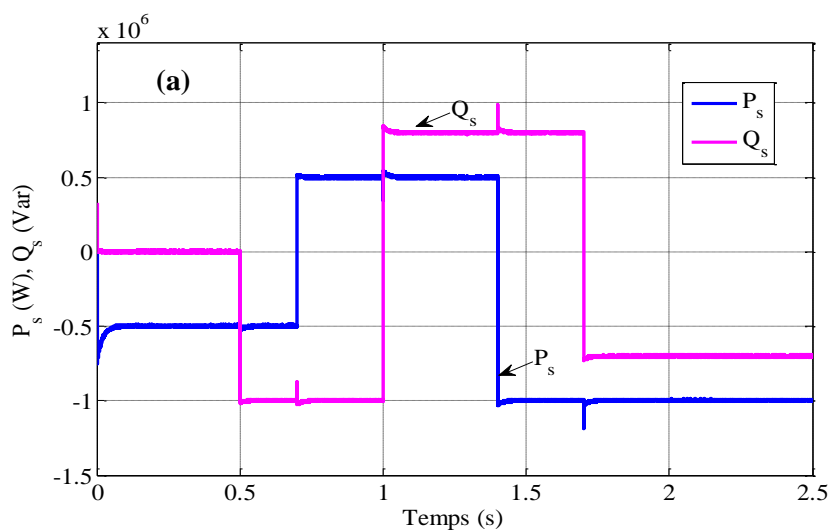


Fig. 2. 17 Variation de la vitesse de rotation  
 (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone



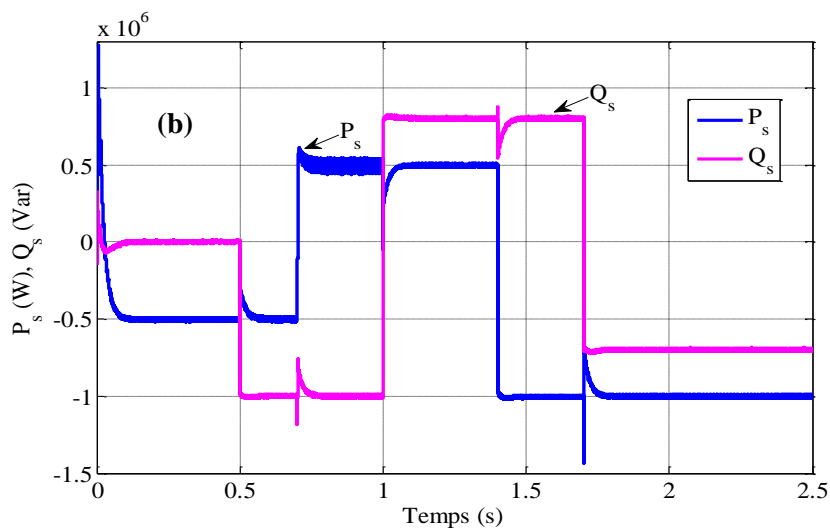


Fig. 2. 18 Puissance active et réactive statorique  
(a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone

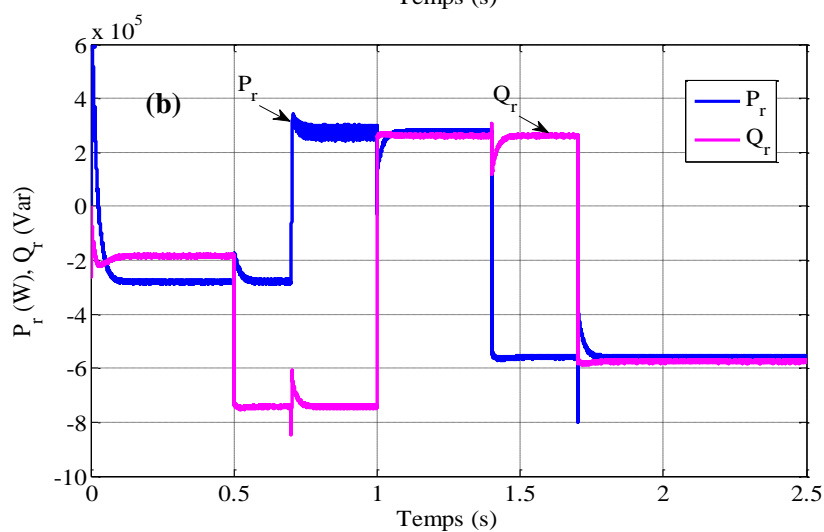
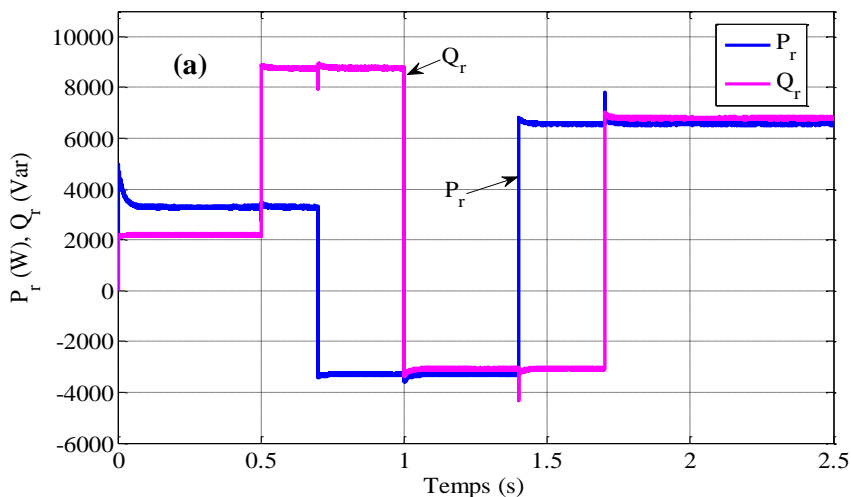


Fig. 2. 19 Puissance active et réactive rotorique  
(a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone

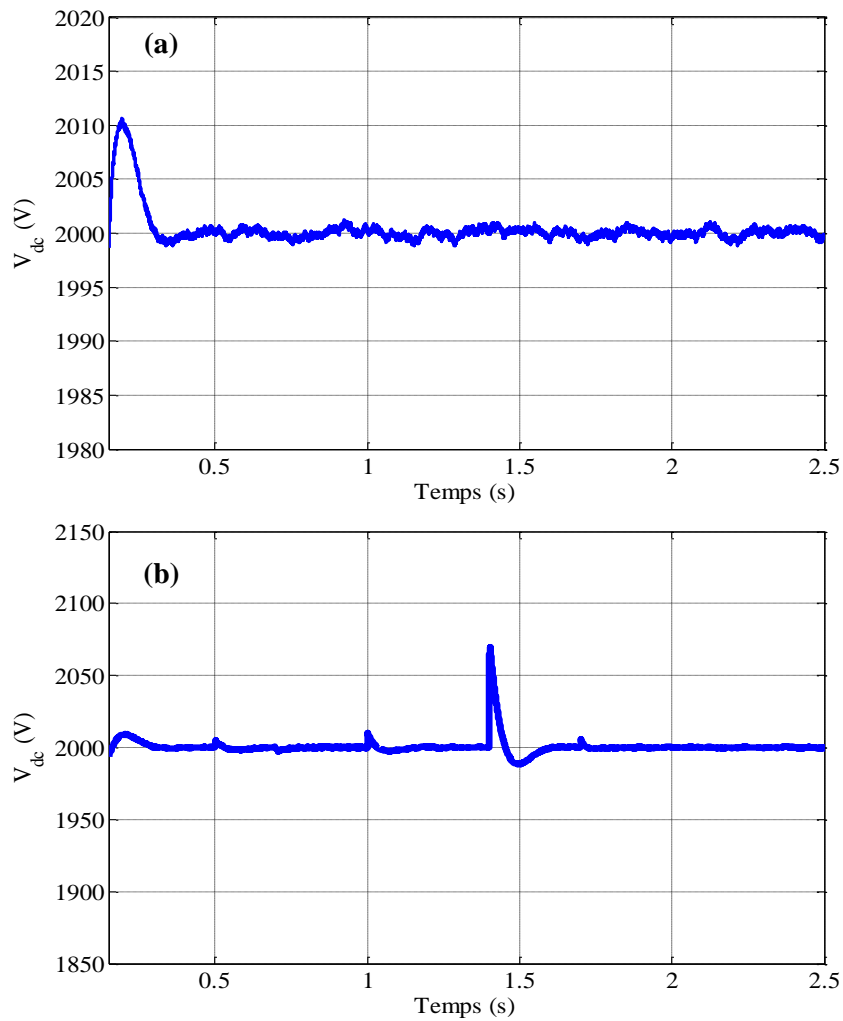
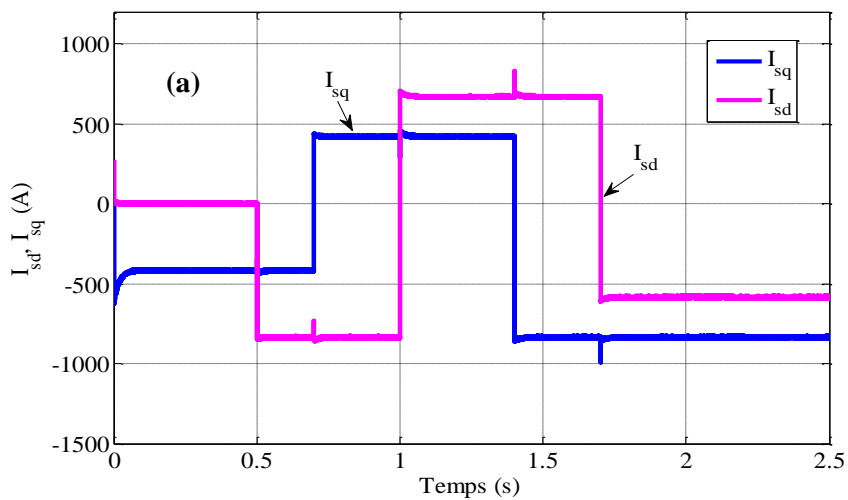


Fig. 2. 20 Tension du bus continu (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone



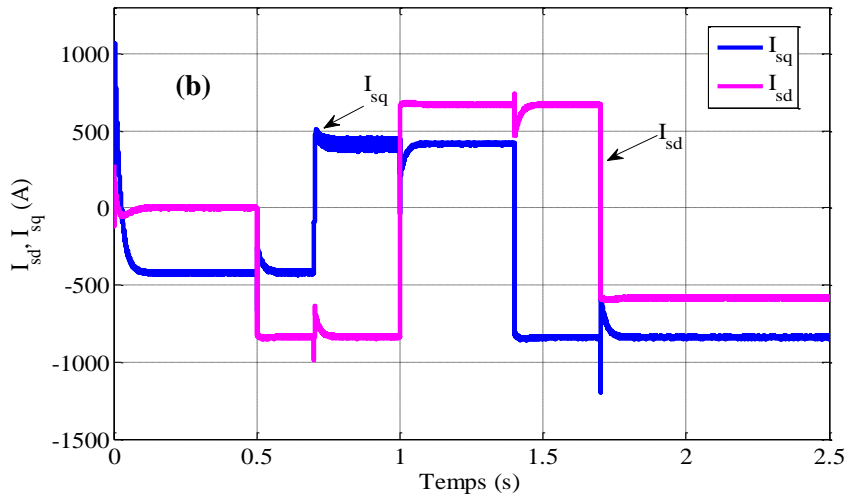


Fig. 2. 21 Courants statoriques d'axe d-q (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone

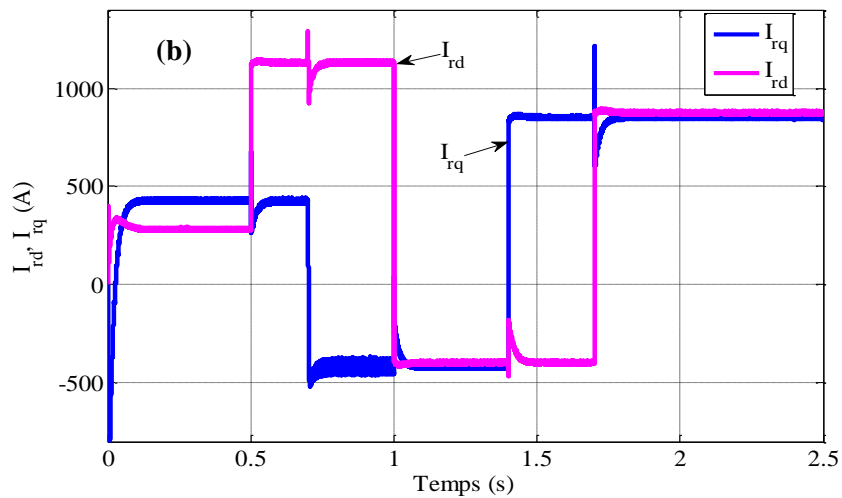
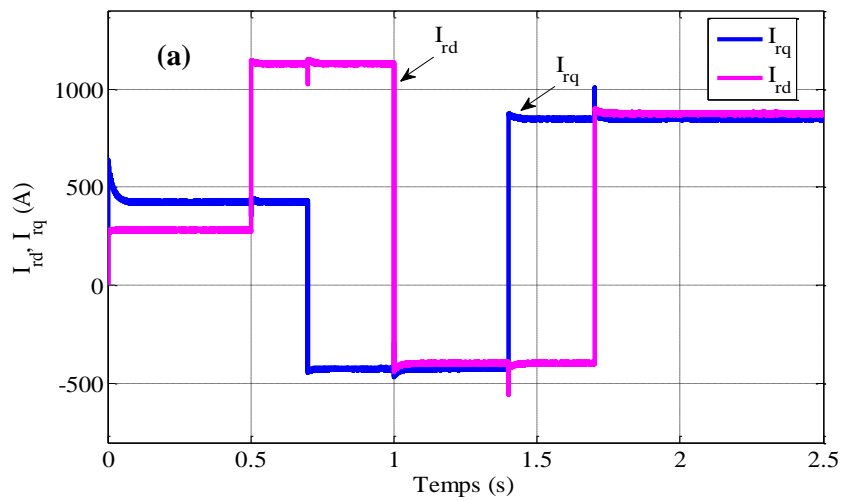


Fig. 2. 22 Courants rotoriques d'axe d-q (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone



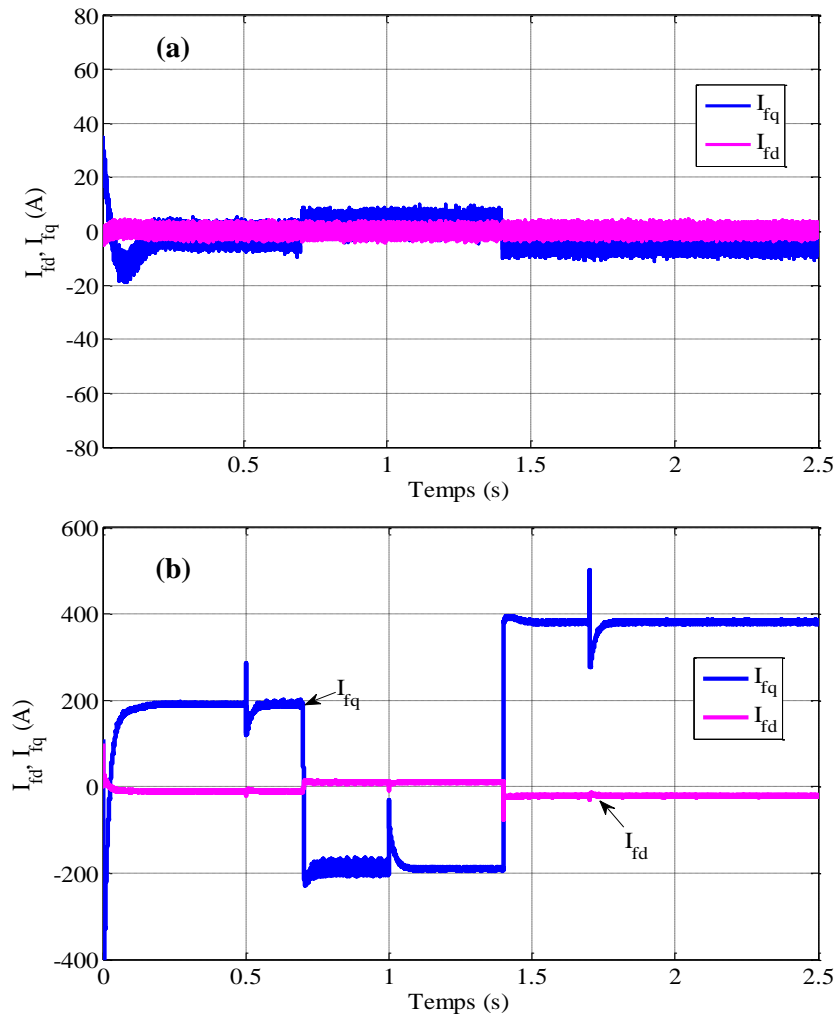


Fig. 2. 23 Courants du filtre d'axe d-q (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone

Les figures de 2.17 à 2.23 représentent les résultats de simulations pour deux modes de fonctionnement : le mode hypo-synchrone et le mode hyper-synchrone. Afin d'avoir, un facteur de puissance unitaire au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique on fixe la puissance réactive de référence à  $Q_{f-ref} = 0$ . Et, on varie la puissance réactive statorique de référence ( $Q_{s-ref}$ ) dans la partie contrôle du convertisseur côté GADA. Les vitesses du vent 8m/s et 12m/s appliquées à l'éolienne, correspondent, respectivement, aux vitesses de rotation de la machine en contrôle MPPT 1556 tr/s et 2336 tr/s (Fig. 2.17 a, b). Fig. 2.18 a, b et Fig. 2.19 a, b illustrent la variation des puissances active et réactive statoriques ainsi que les puissances active et réactive rotoriques. On remarque que les puissances  $P_s$  et  $Q_s$  statoriques, suivent parfaitement leurs références  $P_{s-ref}$ ,  $Q_{s-ref}$

présentées sur le tableau A.3 de l'annexe A. Pour le premier intervalle de temps  $0 < t \leq 0.5$ , statut 1, on a tenu à montrer le fonctionnement du système éolien avec un facteur de puissance unitaire ( $P_{s-ref} = -0.5$ ,  $Q_{s-ref} = 0$ ). Concernant, le deuxième statut  $0.5 < t \leq 1$ , on a changé  $Q_{s-ref}$  à l'instant  $t=0.5s$  puis  $P_{s-ref}$  à l'instant  $t=0.7s$  comme le montre les figures (2.18 a) et (2.18 b). Ce qui correspond aux changements non seulement des puissances réactives rotoriques  $Q_r$  (Fig. 2.19 a, b). Mais également, sur les références des courants rotoriques  $i_{rd}$  (Fig. 2.22 a, b). On remarque que, le changement d'une grandeur n'influence pas le changement de l'autre, ce qui démontre que les deux puissances active et réactive peuvent être contrôlées indépendamment pour les deux modes de fonctionnement grâce aux termes de découplage et de compensation mis en place dans la commande du convertisseur côté réseau. Cependant, en tenant compte du fonctionnement de la machine dans les différents quadrants, pendant le statut 3, on varie  $P_{s-ref}$  et  $Q_{s-ref}$  dans le sens opposé du statut 2. Il est trouvé que le contrôle reste découplé.

Finalement, pendant le statut 4, on change que  $Q_{s-ref}$  et on maintient  $P_{s-ref}$  constante. Sous ces conditions d'exploitation, on remarque que les puissances active et réactive rotoriques (Fig. 2.19 a, b) évoluent correctement. Cependant, notant que la GADA a besoin de la puissance réactive nécessaire pour sa magnétisation et comme la puissance réactive statorique est nulle ( $Q_s=0$ ), la machine absorbe de la puissance réactive par le rotor ( $Q_s \neq 0$ ).

Les Fig. 2.20 a et Fig. 2.20 b, présentent, respectivement, la tension du bus continu  $v_{dc}$  en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone. En outre, grâce à la partie compensation dans le contrôle du convertisseur côté réseau, on a remarqué que  $v_{dc}$  suit parfaitement sa valeur de référence  $v_{dc-ref}$  (Tableau. A.2 de l'Annexe A). D'autre part, on remarque une légère variation pour le mode hyper-synchrone due à l'importante variation de la puissance réactive au rotor. Sachant que les puissances rotoriques ne sont pas découplées contrairement aux puissances statoriques. Toutefois, la variation de la puissance réactive rotorique impose une variation de la puissance active rotorique ce qui implique la variation de la tension du bus continu bien que la compensation dans le contrôle du bus continu affaiblit cette variation.

La Fig. 2.23 a, b, montre l'évolution des courants qui circulent à travers le filtre pour les deux modes. On note que, les courants restent faibles pour le cas de mode hypo-synchrone la Fig. 2.23 a est la composante directe du courant qui traverse le filtre est nulle pour les deux modes.

## 2.6 Evaluation et analyse du potentiel éolien dans la ville de Annaba

### 2.6.1 Analyse de la puissance du vent

La vitesse du vent est une variable aléatoire, changeant constamment sa valeur au cours du temps. Pour évaluer le potentiel éolien, il est important de connaître la distribution de la vitesse du vent. Pour cela, on utilise le modèle de weibull pour la caractérisation des données du vent par la fonction de densité de probabilité et la fonction de distribution cumulée.

#### 2.6.1.1 Fonction de densité de weibull

La fonction de densité de probabilité de la vitesse du vent (PDF) peut être calculée comme suit [13, 19, 73, 100, 101] :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.48)$$

Avec

$f(v)$  : probabilité de la vitesse du vent observée ;

$c(m/s)$  : paramètre d'échelle de weibull ;

$k$  : paramètre de forme de weibull (représente la fréquence du vent).

La fonction de distribution cumulée de (CDF) est donnée par l'équation suivante [13, 19, 73, 100, 101] :

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.49)$$

La vitesse du vent et l'écart-type sont les indicateurs essentiels pour l'évaluation et l'estimation du potentiel éolien. Les expressions de la vitesse moyenne et la variance du vent sont définis comme suit:

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.50)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \quad (2.51)$$

L'écart-type peut être écrit par la formule :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2} \quad (2.52)$$

Où  $n$  est le nombre total de la vitesse du vent enregistrée,  $v_i$  est la vitesse du vent mesurée tous les trois heures et  $v_m$  la vitesse moyenne du vent. D'autre part, la moyenne et la variance

de la vitesse du vent peuvent être calculées par les équations (2.53) et (2.54), en utilisant les paramètres de weibull comme suit [19, 102]:

$$v_m = c \gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.53)$$

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \gamma \left(1 + \frac{2}{k}\right) - \gamma^2 \left(1 + \frac{2}{k}\right) \right] \quad (2.54)$$

Avec la fonction gamma ( $\gamma$ ) donnée par:

$$\gamma(v) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{v-1} du \quad (2.55)$$

### 2.6.1.2 Calcul des paramètres de weibull

Il existe plusieurs méthodes de calcul des paramètres d'échelle ( $c$ ) et de forme ( $k$ ) de weibull pour l'estimation et l'évaluation du potentiel de l'énergie du vent [70-72, 100, 103-105]. On définit par la suite les méthodes les plus utilisées. Il est à noter que, le paramètre de forme indique la fréquence du vent, si la variation de la vitesse du vent est faible le paramètre de forme est grand. D'autre part, le paramètre d'échelle représente la fréquence cumulée relative de la vitesse du vent. En effet, lorsque la vitesse du vent est élevée, le paramètre d'échelle est grand (équation (2.53)).

#### 2.6.1.2.1 Méthode graphique

Dans la méthode graphique, les paramètres d'échelle et de forme de weibull peuvent être déterminés par la transformation de la fonction cumulative de weibull, en lui appliquant le logarithme naturel. En effet, l'équation de la fonction cumulative peut être reformulée comme suit [72, 19, 103] :

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (2.56)$$

Par ailleurs, l'équation (2.56) peut être écrite sous la forme linéaire suivante :

$$y = ax + b \quad (2.57)$$

Avec :  $x = \ln(v)$ ,  $a = k$  et  $b = -k \ln(c)$

Dans ce cas,  $x$  et  $y$  sont calculés en fonction des données de la vitesse du vent mesurées. Avec  $a$  et  $b$  représentant, respectivement, l'inclinaison de la droite et l'ordonnée à l'origine. Finalement, les paramètres  $c$  et  $k$  peuvent être calculés par les formules suivantes :

$$k = a \quad (2.58)$$

$$c = e^{-\frac{b}{k}} \quad (2.59)$$

### 2.6.1.2.2 Méthode du maximum de vraisemblance

C'est une méthode très efficace basée sur la résolution numérique d'un processus itératif pour la détermination du paramètre de forme optimale donné par l'équation (2.60). Après, il sera remplacé dans l'équation (2.61) pour le calcul du paramètre d'échelle [73, 101, 102, 105, 106].

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right)^{-1} \quad (2.60)$$

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.61)$$

Avec:

N : nombre total de données de vitesses de vent mesurées;

$v_i$ : valeur de la  $i^{\text{ème}}$  mesure de vitesse de vent.

### 2.6.1.2.3 Méthode du maximum de vraisemblance modifiée

Cette méthode peut être considérée seulement si les données de la vitesse du vent sont déjà dans la forme de la distribution de weibull [105]. Les paramètres de weibull sont calculés comme suit [73, 101, 102, 105, 107]:

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right)^{-1} \quad (2.62)$$

Où:

$f(v_i)$ : fréquence de la vitesse du vent  $v_i$ ;

$f(v \geq 0)$ : probabilité pour que  $v \geq 0$ .

### 2.6.1.2.4 Méthode du facteur de modèle d'énergie

Pour calculer le facteur de modèle d'énergie (Energy Pattern Factor Method ( $E_{pf}$ )) et par la suite les paramètres de weibull, cette méthode utilise la moyenne du cube de la vitesse du vent et le cube de la moyenne de la vitesse du vent [62, 73, 102] comme suit :

$$E_{pf} = \frac{(v^3)_m}{(v_m)^3} \quad (2.63)$$

$$k = 1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^2} \quad (2.64)$$

### 2.6.1.2.5 Méthode empirique

La méthode empirique est une méthode très efficace, fréquemment utilisée pour la détermination des paramètres de weibull. En effet, cette méthode nécessite seulement la connaissance de la vitesse moyenne du vent et l'écart-type ( $\sigma$ ). Les paramètres de forme et d'échelle de weibull peuvent être déterminés par les équations suivantes [74, 107] :

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (2.65)$$

$$c = \frac{v_m}{\gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (2.66)$$

### 2.6.1.3 Extrapolation verticale de la vitesse du vent et des paramètres de weibull

La vitesse du vent ainsi que les paramètres de weibull varient proportionnellement en fonction de la hauteur. Justus et Mikhail [108] ont exprimés la vitesse du vent ( $v_2$ ) à la hauteur désirée ( $h_2$ ) par une loi de puissance donnée par [102, 106, 109]:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (2.67)$$

Le coefficient de cisaillement du vent  $\alpha$  peut être calculé par l'équation suivante [109]:

$$\alpha = \left(\frac{0,37-0,088.\ln(v_1)}{1-0,088.\ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}\right) \quad (2.68)$$

L'extrapolation verticale des paramètres de weibull peuvent être ajustés pour une hauteur désirée en utilisant les expressions suivantes [102, 106, 109] :

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad (2.69)$$

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{1-0,088.\ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1-0,088.\ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \quad (2.70)$$

L'exposant  $n$  est calculé par [109]:

$$n = \left( \frac{0,37 - 0,088 \cdot \ln(c_1)}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right) \quad (2.71)$$

Avec:  $c_2$ ,  $h_2$  et  $v_2$  sont, respectivement, le paramètre d'échelle, la hauteur désirée et la vitesse du vent désirée. En outre,  $c_1$ ,  $k_1$  et  $v_1$  sont, respectivement, les paramètres d'échelle, de forme et la vitesse du vent à la hauteur de mesure  $h_1$ .

#### 2.6.1.4 Vitesse du vent la plus probable et la vitesse du vent transportant énergie maximale

La vitesse du vent la plus probable ( $v_{mp}$ ) et la vitesse du vent transportant l'énergie maximale ( $v_{maxE}$ ) sont des paramètres utiles, couramment utilisés pour la caractérisation de la vitesse du vent. Elles peuvent être estimées à partir des expressions suivantes en fonction de la distribution de weibull [102, 106]:

$$v_{mp} = v_f = c \cdot \left( \frac{k-1}{k} \right)^{1/k} \quad (2.72)$$

$$v_{maxE} = v_e = c \cdot \left( \frac{k+2}{k} \right)^{1/k} \quad (2.73)$$

### 2.6.2 Estimation du potentiel éolien

#### 2.6.2.1 Densité de puissance

La puissance instantanée du vent ( $P$ ) et la puissance théorique produite du vent ( $P_{tur}$ ) sont données par [110]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_m^3 \quad (2.74)$$

$$P_{tur} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.75)$$

Avec  $\rho$  : densité de l'air ( $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ );

$S$  : surface;

$C_p$ : coefficient de puissance de la turbine éolienne.

En pratique, la puissance récupérée par la turbine éolienne est seulement 59% (appelée limite de Betz) de l'énergie cinétique du vent peut être transformée en énergie mécanique [55, 56, 110, 111]. Le coefficient de puissance est une grandeur variable propre à chaque turbine, son évolution dépend de l'angle de calage ( $\beta$ ) et de la vitesse relative lambda ( $\lambda$ ) définit par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{v} \quad (2.76)$$

La densité de puissance du vent (Wind Power Density WPD) illustre le potentiel éolien dans un site spécifique. Elle est donnée par:

$$P_{dens} = \frac{P_{tur}}{S} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot v^3 \quad (2.77)$$

La WPD peut être calculée en fonction des paramètres de weibull comme suit [111]:

$$P_{dens} = \frac{P(v)}{S} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^3 \gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.78)$$

### 2.6.2.2 Densité d'énergie

La densité de l'énergie éolienne (Wind Energy Density WED) extraite par une éolienne est la densité de puissance du vent sur une période souhaitée T (h). Elle peut être estimée par [101]:

$$E_{dens} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^3 \gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) \cdot T \quad (2.79)$$

T : nombre d'heures comprises dans un nombre de journée d'une période définie.

### 2.6.2.3 Facteur de capacité

Le facteur de capacité d'une turbine éolienne ( $C_f$ ) peut être calculé par l'équation suivante [111, 112]:

$$C_f = \left( \frac{e^{-\left(\frac{v_c}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k}}{\left(\frac{v_r}{c}\right)^k - \left(\frac{v_c}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_f}{c}\right)^k} \right) \quad (2.80)$$

La puissance moyenne produite ( $P_{out}$ ) par une turbine éolienne est le produit du facteur de capacité par la puissance nominale ( $P_r$ ). La formule est donnée par la relation suivante :

$$P_{out} = C_f \cdot P_r \quad (2.81)$$

Où  $v_c$ ,  $v_r$  et  $v_f$  sont, respectivement, les vitesses de démarrage, nominale et coupure du vent. Représenté par le rapport de la puissance moyenne sur la puissance nominale.

## 2.6.3 Résultats et analyses

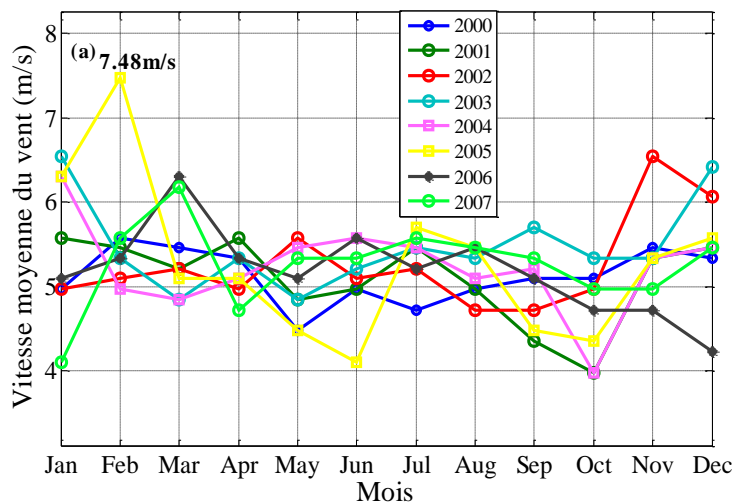
Pour déterminer le potentiel éolien à proximité de l'aéroport Rabeh Bitat de Annaba, une analyse profonde des caractéristiques du vent est présentée [113]. Les données anémométriques pour cette étude ont été enregistrées durant 15 ans de janvier 2000 à



décembre 2014 à partir de la station météorologique de l'aéroport international Rabah-Bitat avec  $3,6^{\circ} 50'$  Nord d'altitude et  $7^{\circ} 48'$  Est de longitude.

### 2.6.3.1 Analyse statistique

La vitesse du vent, considérée dans cette étude, est mesurée chaque trois heures (08 observations par jour) pour l'année 2014 et de janvier 2000 à décembre 2014 pour les quinze ans. Par la suite, nous avons converties les données à la hauteur de 12m. La Fig. 2.24 montre la vitesse moyenne mensuelle du vent durant les quinze années. Nous pouvons remarquer que la vitesse moyenne du vent est d'environ 5.25m/s et 5m/s du 2000 jusqu'au 2007 (Fig. 2.24 a) et du 2008 au 2014 (Fig. 2.24 b), respectivement. Les valeurs maximales des vitesses moyennes mensuelles du vent sont 7.48m/s et 7.13m/s, respectivement, en février 2005 et juillet 2008. Cependant, les valeurs minimales sont 3,9m/s en octobre 2001, octobre 2004, et 4.1m/s en février 2008, Janvier 2007 et mars 2009. Les vitesses moyennes du vent ainsi que les variances annuelles pour les quinze ans sont représentées par la figure 2.25.



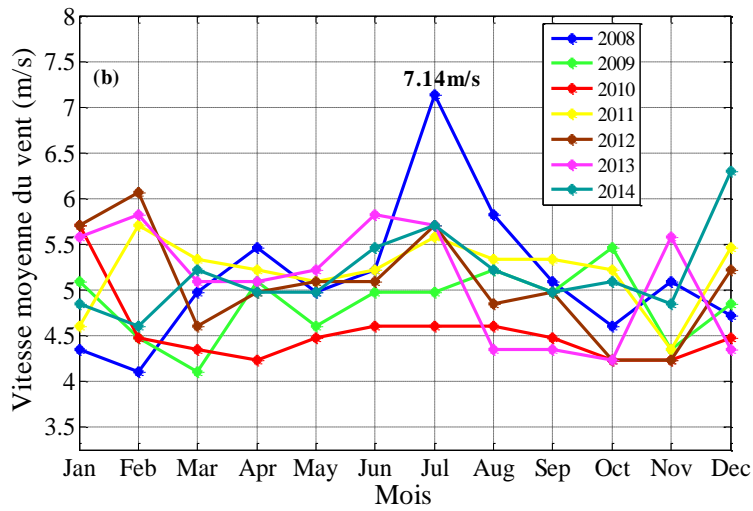


Fig. 2. 24 Vitesse moyenne mensuelle du vent

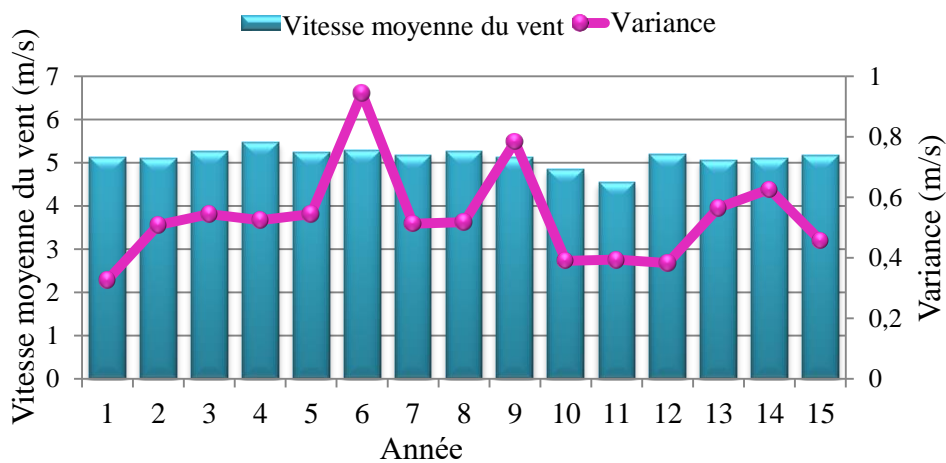


Fig. 2. 25 Vitesse moyenne et variance du vent

Le maximum de la vitesse du vent la plus probable et la vitesse du vent qui permet de produire l'énergie maximale durant les quinze ans (Fig. 26) sont respectivement 5.66m/s en 2003 et 5.9872m/s en 2005 (Tableau. 2.1).

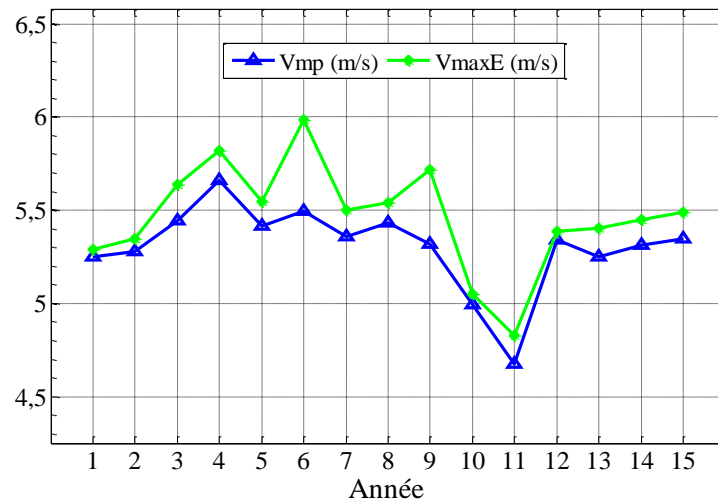


Fig. 2. 26 Vitesse du vent la plus probable et la vitesse du vent produisant le maximum d'énergie durant 15 années (2000=2014)

### 2.6.3.2 Extrapolation des paramètres de weibull

Parmi les différentes méthodes qui existent dans la littérature, on a choisi la méthode empirique pour la détermination des paramètres d'échelle et de forme de weibull. Le Tableau. 2. 1, présente les valeurs annuelles pendant 15 ans de : la vitesse moyenne du vent, l'écart type, la vitesse du vent la plus probable, la vitesse du vent produisant le maximum d'énergie, paramètres de weibull et la densité de puissance ainsi que la densité d'énergie. Le paramètre d'échelle varie de 5.0122m/s en 2009 à 5.7193m/s en 2003. En revanche, le paramètre de forme varie de 5.7096 en 2005 à 19.7130, 15.1396 en 2000, 2001, respectivement.

Tableau. 2. 1 Valeurs annuelles de : caractéristique de la vitesse du vent, paramètres de weibull, densité de puissance et densité d'énergie.

Période	Caracteristiques							
	$v_m$	$\sigma$	$v_{mp}$	$v_{maxE}$	$c$	$k$	$P_{dens}(W/m^2)$	$E_{dens}(KWh/m^2)$
2000	5.1221	0.3269	5.2508	5.2906	5.2647	19.7130	83.3923	720.51
2001	5.0999	0.5082	5.2765	5.3440	5.3004	15.1396	83.7449	723.56
2002	5.2627	0.5450	5.4462	5.6372	5.5160	9.1193	91.8357	793.46
2003	5.4759	0.5245	5.6620	5.8201	5.7193	10.2271	102.8379	888.52
2004	5.2320	0.5449	5.4130	5.5455	5.4608	10.9253	89.8388	776.21

2005	5.2870	0.9440	5.4920	5.9872	5.6804	5.7096	99.6424	860.91
2006	5.1816	0.5129	5.3572	5.5001	5.4089	10.4640	90.1389	778.80
2007	5.2527	0.5178	5.4307	5.5376	5.4690	12.1849	90.8117	784.61
2008	5.1270	0.7837	5.3162	5.7155	5.4668	6.2459	88.6397	765.85
2009	4.8452	0.3906	4.9909	5.0513	5.0122	15.5658	71.0249	613.66
2010	4.5359	0.3938	4.6731	4.8267	4.7291	9.4212	57.9549	500.73
2011	5.2031	0.3827	5.3426	5.3842	5.3571	19.4360	87.8631	759.14
2012	5.0585	0.5653	5.2498	5.4013	5.3048	10.0569	82.0592	708.99
2013	5.0985	0.6268	5.3107	5.4520	5.3618	10.4736	84.8813	733.37
2014	5.1822	0.4578	5.3470	5.4883	5.3981	10.5103	86.6161	748.36

La figure 2.27 montre que le paramètre d'échelle varie en fonction de la vitesse moyenne du vent. Quand la vitesse moyenne du vent est élevée, le paramètre d'échelle est grand.

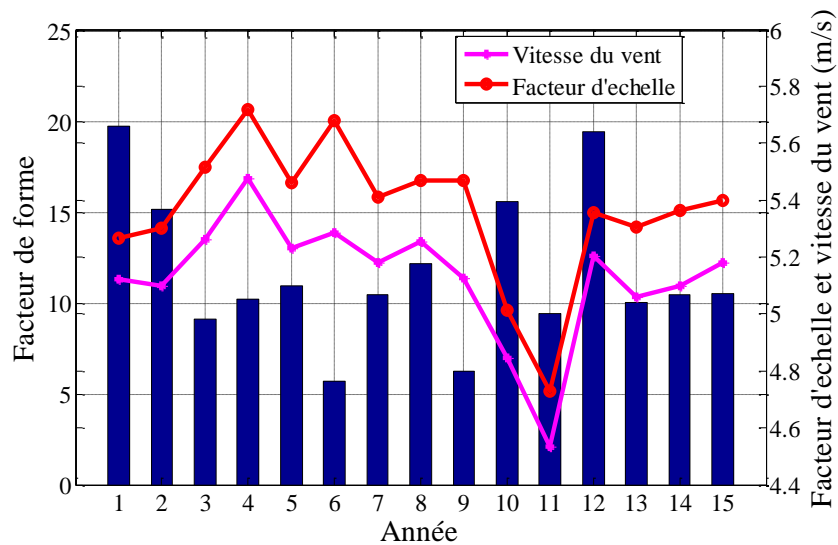


Fig. 2. 27 Valeurs annuelles des paramètres de weibull (c, k) et de la vitesse moyenne du vent (2000-2014)

La Fig. 2.28 présente la variation annuelle de la densité de puissance et de la densité d'énergie du 2000 au 2014 dans le site étudié. On remarque que la densité de puissance varie en fonction de la vitesse moyenne du vent. Durant les quinze ans, la densité de puissance a atteint sa valeur maximale en 2003 et 2005 avec  $102.8379 \text{ W/m}^2$  et  $99.6424 \text{ W/m}^2$ , respectivement. Cependant, sa valeur minimale est de  $57.9549 \text{ W/m}^2$  enregistrée en 2010. Par

ailleurs, la densité d'énergie est élevée du 2002 au 2008. Sa valeur minimale a été enregistrée en 2010 avec  $500.73 \text{ KWh/m}^2$ .

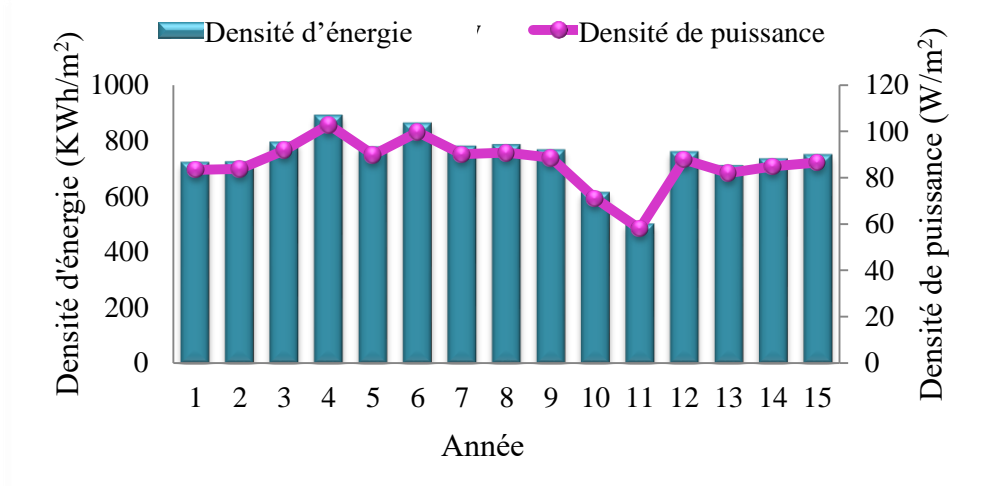


Fig. 2. 28 Valeurs annuelles de la densité de puissance et de la densité d'énergie (2000÷2014)

### 2.6.3.3 Analyse du vent de l'année 2014

Dans cette section, les données de la vitesse du vent du mois janvier 2000 au décembre 2014 à une hauteur de 12m ont été présentées et analysées. La Fig. 2.29 montre les données journalières de la vitesse moyenne du vent. Les moyennes de la vitesse du vent les plus élevées sont de  $10.44\text{m/s}$ ,  $11.34\text{m/s}$  et  $11\text{m/s}$  enregistrées, respectivement, en janvier, novembre et décembre. En outre, la valeur minimale de la vitesse moyenne journalière du vent est de  $2.54\text{m/s}$  en janvier 2014. Par ailleurs, les valeurs mensuelles de la vitesse moyenne du vent ainsi que leurs variances sont illustrées par la Fig. 2.30. Les valeurs mensuelles de la vitesse du vent sont comprises entre  $6.34\text{m/s}$  en janvier et  $4.65\text{m/s}$  en décembre.

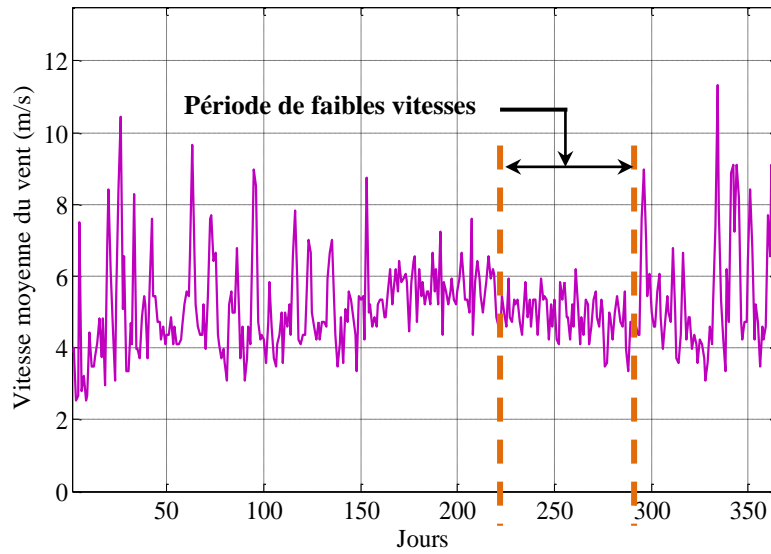


Fig. 2. 29 Moyennes journalière de la vitesse du vent de l'année 2014

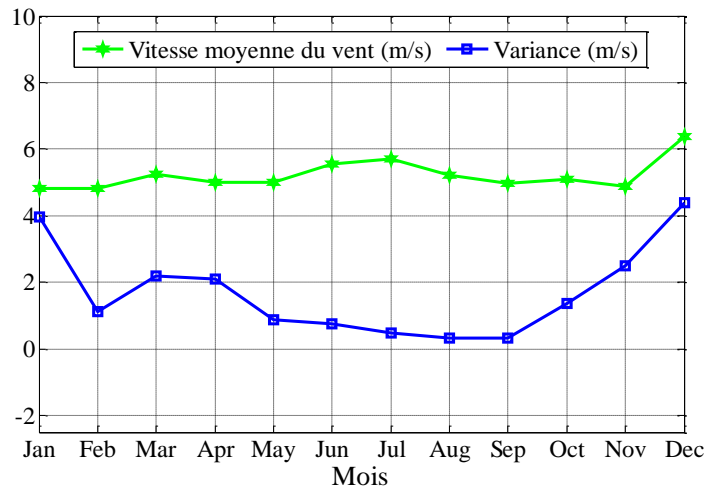


Fig. 2. 30 Moyennes mensuelle de la vitesse du vent de l'année 2014

Comme le montre la Fig. 2.31, les valeurs maximales de  $v_{mp}$  durant les douze mois sont de 6.1317m/s en janvier et 6.5899m/s en décembre. De plus, les valeurs de  $v_{maxE}$  les plus élevées pour la même période sont 6.75m/s, 6.76m/s, 6.56m/s, 6.70m/s et 8.42m/s respectivement en janvier, mars, avril, novembre et décembre. Cependant, les plus basses valeurs de  $v_{mp}$  et  $v_{maxE}$  sont, respectivement, 4.77m/s en janvier et 5.53m/s en septembre.

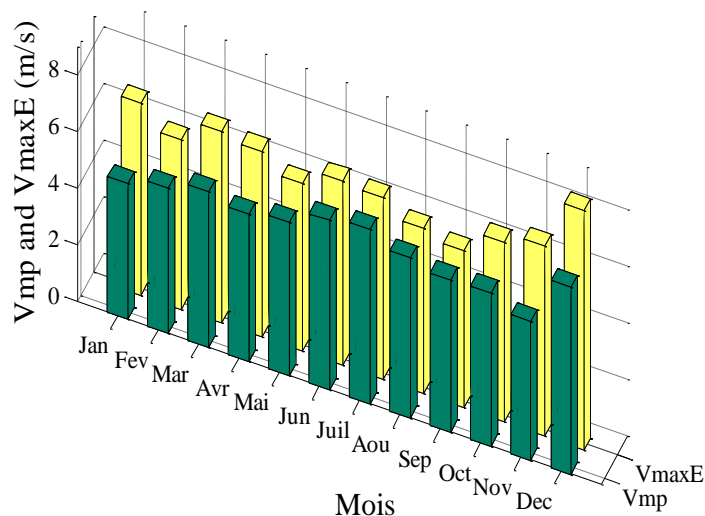


Fig. 2. 31 Valeurs mensuelles des vitesses du vent les plus probables et les vitesses produisant le maximum d'énergie

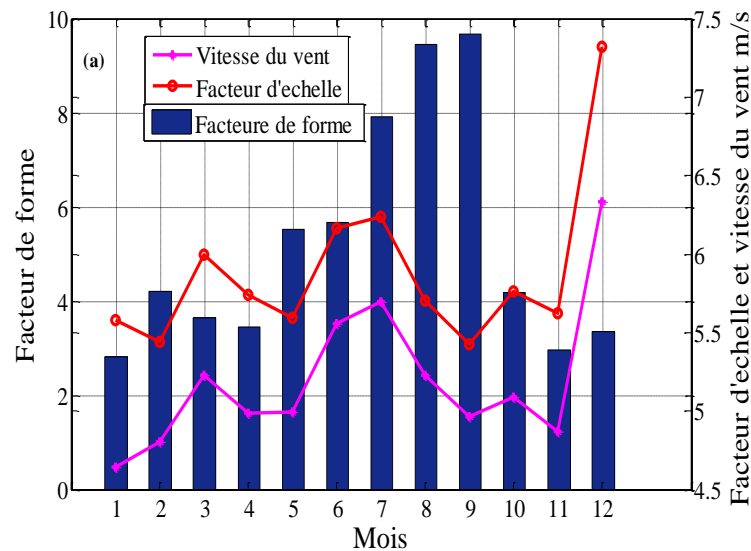
La variation mensuelle de la vitesse du vent, l'écart-type, la vitesse du vent la plus probable, la vitesse du vent permettant de produire le maximum d'énergie, paramètres de weibull et la densité de puissance ainsi que la densité d'énergie à 12 mètres d'hauteur, durant douze mois sont récapitulés dans le tableau 2.2.

Tableau. 2. 2 caractéristiques mensuelles de la vitesse du vent, paramètres de weibull, densité de puissance et densité d'énergie

Période	Caractéristiques							
	$v_m$	$\sigma$	$v_{mp}$	$v_{maxE}$	$c$	$k$	$P_{dens}(W/m^2)$	$E_{dens}(KWh/m^2)$
Jan	4.6460	3.9670	4.7687	6.7544	5.5776	2.8088	109.6379	78.94
Fev	4.8036	1.1129	5.1021	5.9679	5.4416	4.2100	89.8644	64.70
Mar	5.2264	2.1895	5.4951	6.7585	5.9975	3.6542	123.7930	89.13
Avr	4.9879	2.1103	5.2010	6.5550	5.7424	3.4528	110.3965	79.49
Mai	4.9913	0.8867	5.3983	5.9172	5.5963	5.5335	95.3459	68.65
Jun	5.5597	0.7663	5.9595	6.5042	6.1668	5.6714	127.4953	91.80
Juil	5.6955	0.4898	6.1317	6.4178	6.2375	7.9082	132.0704	95.09
Aou	5.2269	0.3378	5.6388	5.8229	5.7059	9.4529	101.7945	73.29

Sep	4.9620	0.3274	5.3623	5.5295	5.4231	9.6724	87.5314	63.02
Oct	5.0857	1.3525	5.4022	6.3290	5.7658	4.1884	107.1397	77.14
Nov	4.8661	2.4838	4.8922	6.6964	5.6240	2.9588	109.8399	79.09
Dec	6.3366	4.3893	6.5899	8.4190	7.3234	3.3543	230.5587	166.002
Année	5.1822	0.4578	5.3470	5.4883	5.3981	10.5103	86.6161	748.36

Les figures 2.32 a et 2.32 b représentent la variation mensuelle des paramètres d'échelle et de forme durant les douze mois de l'année 2014. Nous pouvons remarquer que le paramètre d'échelle de weibull varie en fonction de la vitesse moyenne du vent (Fig. 2.32 a). En effet, le paramètre d'échelle relativement plus élevé du mois de mars au mois de décembre avec une valeur maximale de 7.32m/s en décembre, et une légère baisse du mois de janvier (5.5776m/s) au mois de février (5.44m/s). Tandis que le facteur de forme, il varie de 2.81 en janvier à 9.67 en septembre. En outre, le facteur de forme croît considérablement au milieu de l'année entre mai et septembre avec 5.5335 et 9.6724, respectivement. Cela explique que durant les mois chauds, même si le vent est relativement élevé, il est uniforme, constant et stable dans cette période.





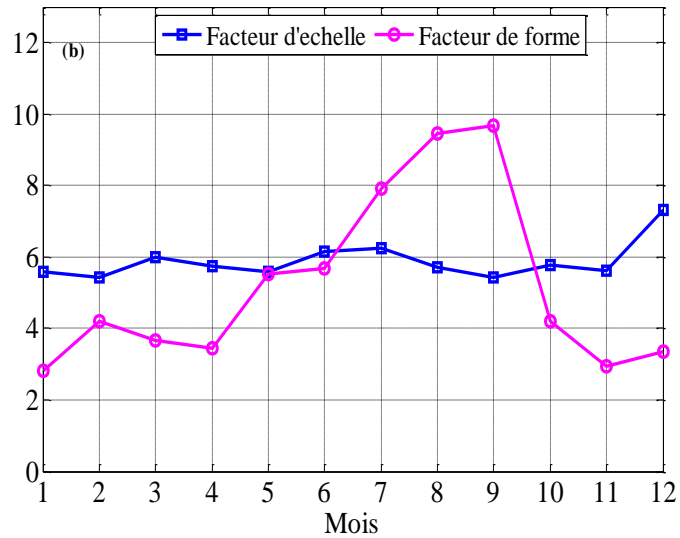


Fig. 2. 32 Paramètres mensuels de weibull (c, k) et la vitesse moyenne du vent

La figure 2.33, illustre la variation mensuelle de la densité de puissance moyenne et la densité d'énergie moyenne pour l'année 2014. Nous pouvons déduire que durant les douze mois de l'année, la densité de puissance moyenne suit l'évolution de la vitesse moyenne du vent. En effet, Annaba qui est une ville située à l'Est Algérien ouverte sur la mer méditerranée, présente un gisement éolien assez moyen avec un pic en termes de vitesse moyenne au mois de décembre atteignant 6.34m/s et une densité de puissance moyenne égale à 230.56W/m<sup>2</sup>. Par ailleurs, la valeur minimale de la densité de puissance moyenne est de 87.53W/m<sup>2</sup> enregistrée au mois de septembre. Quant à la densité d'énergie moyenne, la valeur la plus élevée ainsi que la valeur minimale enregistrée sont, respectivement, de 166 KWh/m<sup>2</sup> en décembre et 63 KWh/m<sup>2</sup> en septembre. La variation de la densité de puissance ainsi que la densité d'énergie annuelle sont respectivement de 86.62W/m<sup>2</sup> et 748.36 KWh/m<sup>2</sup> (Tableau. 2.1).

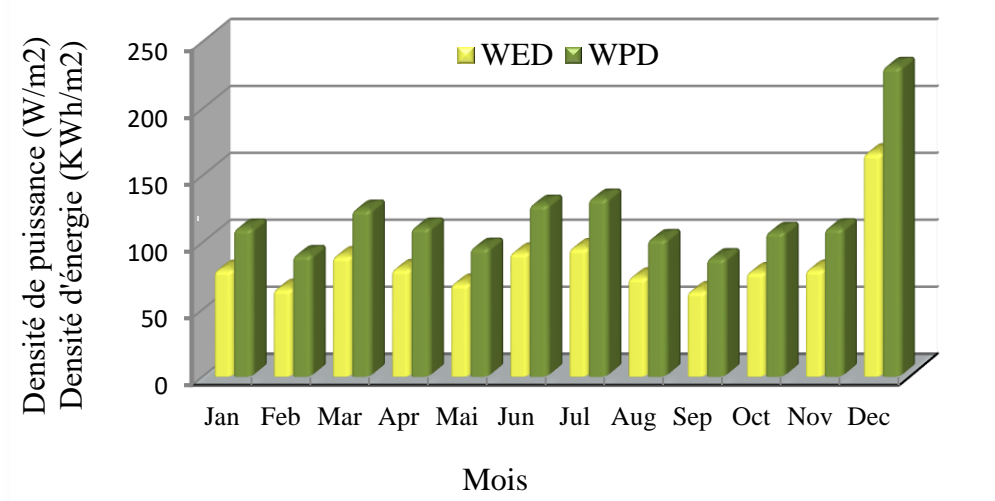


Fig. 33. Densités de puissance et d'énergie mensuelles de la vitesse du vent

La densité de probabilité de la vitesse mensuelle du vent représentée sur la figure 2.34, a été estimée en utilisant l'équation (2.48). Nous pouvons déduire que les valeurs maximales de la densité de probabilité couvrent une gamme allant de 0.4 jusqu'à 0.7 en juillet, août et septembre.

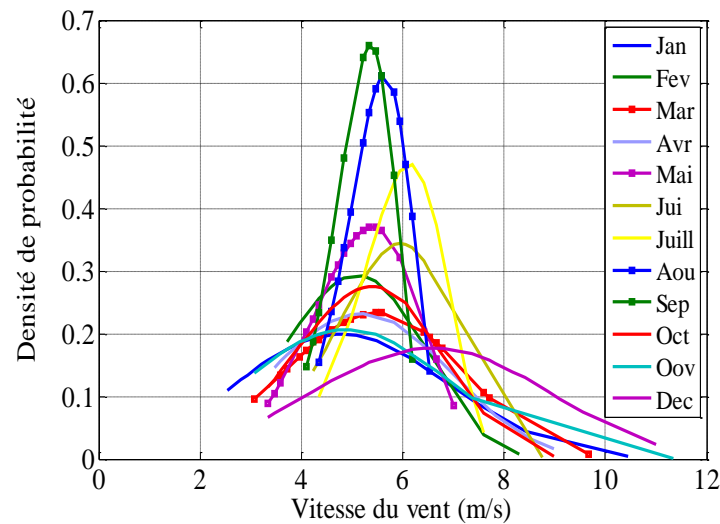


Fig. 2. 34 Distribution de la densité de probabilité de weibull de vitesses du vent

En revanche, le maximum de la densité de probabilité pour les autres mois est inférieur à 0.4. De plus, la vitesse du vent la plus probable durant les douze mois couvre une gamme allant de 4.76m/s en janvier jusqu'à 6.59m/s en décembre. Par ailleurs, la vitesse du vent durant le

mois de décembre varie entre 6m/s et 7m/s. En dernière analyse, la densité de probabilité de weibull est maximale pour des vitesses de vent variant entre 5m/s et 6m/s.

#### ***2.6.3.4 Estimation de la production énergétique et choix de la turbine éolienne***

Ce paragraphe est consacré au choix du système de conversion éolien adéquat pour le site étudié, et cela en fonction des caractéristiques du vent, tout en assurant une efficacité de production maximale. La quantité de la puissance produite sur un intervalle de temps ainsi que le facteur de capacité de la turbine permettent d'analyser et d'évaluer les performances de l'éolienne en termes de production énergétique. D'après l'équation (2.80), nous pouvons remarquer que le facteur de capacité dépend des paramètres d'échelle et de forme de weibull et aussi des caractéristiques de l'éolienne. En outre, la puissance produite par l'éolienne varie proportionnellement en fonction de la variation de la vitesse du vent dans l'intervalle ( $v_c \div v_r$ ). Tandis que, dans l'intervalle ( $v_r \div v_f$ ) est constante. Après le calcul de la vitesse du vent pour les différentes hauteurs, nous avons remarqué que la vitesse du vent augmente avec l'augmentation de la hauteur de l'éolienne. En effet, la valeur minimale de la vitesse du vent à 60m et 100m est égale, respectivement, à 4m/s et 5m/s. Afin de choisir correctement la hauteur et le modèle de la turbine adéquat pour le site étudié, l'évaluation des performances des neuf éoliennes (Tableau. 2.3) de différents constructeurs [106] a été présentée et analysée. Le choix de ces différents modèles est justifié par leurs intervalles de vitesse de démarrage (2.5m/s÷3m/s) et de vitesse nominale (11.5÷15m/s). En outre, ils ont une puissance nominale couvrant une gamme allant de 600kW (Bonus 600/44, De Wind 48 et Enercon E-40/600) jusqu'à 2300kW (Bonus 2300/82.4). Le facteur de capacité, la puissance produite par l'éolienne ainsi que l'énergie annuelle produite des modèles sélectionnés, pour différentes hauteurs, sont calculés et récapitulés dans Tableau. 2.4.

Le facteur de capacité des neuf turbines varie de 0.23 à 0.56 assurés respectivement par Bonus 600/44 et Enercon E-58/1000. Il apparaît clairement que l'importante valeur du facteur de capacité du modèle E-58/1000, est dûe à sa faible vitesse de coupure (2.5m/s) et sa vitesse nominale de (12m/s). En outre, Enercon E-82/2000 et De Vent 48 présentent également un important facteur de capacité de 0,49 et 0,47, respectivement. Le facteur de capacité du modèle Enercon E-58/1000 est plus élevé que celui de Enercon E-82/2000, sachant qu'il a la même vitesse de coupure mais d'une vitesse nominale de 12m/s et moins de

9m d'hauteur. D'autre part, avec une hauteur de 100m, Bonus 2300/82.4 présente un petit facteur de capacité (0.29), et cela grâce à sa vitesse nominale élevée (15m/s) par rapport aux autres éoliennes. Par ailleurs, pour les turbines éoliennes qui ont la même hauteur (70m), le modèle De Wind 48 a le facteur de capacité le plus élevé avec  $v_r$  et  $v_c$  égale, respectivement, 11.5m/s et 3m/s. Bien que la vitesse de démarrage du modèle De Wind D6 est de 2.8m/s.

Le facteur de capacité du modèle Bonus 600/44 avec  $v_r$  et  $v_c$  égale respectivement à 13m/s et 3m/s est inférieur à celui du modèle Bonus 2300/82.4 avec les même  $v_r$ ,  $v_c$  et 100m d'hauteur. En dernière analyse, nous pouvons dire que la vitesse nominale  $v_r$  est plus importante que la vitesse de démarrage  $v_c$  et la hauteur de l'éolienne.

De même, la puissance produite couvre une gamme allant de 139.38kW (Bonus 600/44) jusqu'à 979.2kW (Enercon E-82/2000). De plus, l'énergie annuelle couvre une gamme allant de 1220.97MWh (Bonus 600/44) jusqu'à 8577.79MWh (Enercon E-82/2000).

Finalement, les valeurs les plus élevées de la capacité de production sont de 4905.6 et 4292.4 assurées respectivement par Enercon E-58/1000 et Enercon E-82/2000.

Tableau. 2. 3 Caractéristiques des éoliennes

Modèles	Hauteur du mat (m)	$v_c$ (m/s)	$v_r$ (m/s)	$v_f$ (m/s)	$p_r$ (kW)
Bonus 2300/82.4	100	3	15	25	2300
Bonus 600/44	60	3	13	25	600
De Wind D8	80	3	13.5	25	2000
De Wind D6	70	2.8	12.5	25	1250
De Wind 48	70	3	11.5	22	600
Enercon E-82/2000	98	2.5	13	28	2000
Enercon E-58/1000	89	2.5	12	28	1000
Enercon E-40/600	65	2.5	12	28	600
Nordex N-70/1500	70	3	13	25	1500

Tableau. 2. 4 Bilan énergétique

Modèles	$C_f$	$E_c$	$P_{out}$ (kW)	$E_p$ (MWh)
Bonus 2300/82.4	0.29	2540.4	657.34	5758.3
Bonus 600/44	0.23	2014.8	139.38	1220.97
De Wind D8	0.31	2715.6	615	5387.4
De Wind D6	0.34	2978.4	427.38	3743.81
De Wind 48	0.47	4117.2	280.8	2459.81
Enercon E-82/2000	0.49	4292.4	979.2	8577.79
Enercon E-58/1000	0.56	4905.6	560.3	4908.23
Enercon E-40/600	0.36	3153.6	216.18	1893.74
Nordex N-70/1500	0.29	2540.4	437.7	3834.25

## 2.7 Conclusion

Au cours de la première partie de ce chapitre, une brève description de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation a été présentée. La modélisation des deux parties : mécanique et électrique a été développée ainsi que la partie commande pour l'optimisation de la puissance électrique par l'adaptation de la vitesse de rotation en fonction des vitesses du vent. En outre, on a développé un algorithme de contrôle pour les deux convertisseurs permettant ainsi le contrôle des courants au rotor et du filtre aussi le contrôle de la tension du bus continu tout en garantissant un fonctionnement optimal de l'éolienne. Finalement, les parties modélisation et commande ont été validées et développées sur une éolienne de 1.5 MW sous Matlab/Simulink pour deux modes de fonctionnement. A partir des résultats obtenus, on note que les puissances actives et réactives du système éolien pouvaient être contrôlées indépendamment.

Dans la deuxième partie, on s'intéresse particulièrement à l'analyse des données du vent enregistrées du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2014, par la station météorologique de l'aéroport international Rabah Bitat de la ville de Annaba, située à l'Est Algérien et ouverte sur la mer méditerranée. Pour l'évaluation et l'estimation de la puissance éolienne, on a utilisé le modèle de weibull, d'où ses paramètres ont été calculés par la méthode empirique. De plus, l'analyse ainsi que l'évaluation de : la densité de puissance, le facteur de capacité, et la

puissance produite via neuf éoliennes de différents constructeurs ont été présentés. En guise de conclusion, nous avons tirés les points suivants :

✓ La ville de Annaba présente un gisement éolien assez moyen avec un pic de 6.34m/s à 12m d'hauteur au mois de décembre 2014. Les valeurs mensuelles de la densité de puissance moyenne varient entre  $87.53\text{W/m}^2$  et  $230.56\text{W/m}^2$  à 12m en 2014. Quant aux valeurs annuelles durant les quinze ans, elles varient entre  $99.6424\text{W/m}^2$  et  $102.8379\text{W/m}^2$ . En revanche, les valeurs mensuelles de la densité d'énergie couvrent une gamme allant de  $63\text{KWh/m}^2$  jusqu'à  $166\text{KWh/m}^2$  à 12m en 2014. De plus, les valeurs annuelles de la densité d'énergie durant les quinze ans couvrent une gamme qui s'étend de  $51.138\text{KWh/m}^2$  et  $888.52\text{KWh/m}^2$ .

✓ Pour un investissement rentable du potentiel éolien, les turbines éoliennes recommandées sont celles qui ont un facteur de capacité supérieur ou égale à 0.25 [109, 113]. En effet, s'appuyant sur les valeurs estimées du facteur de capacité, les modèles Enercon E-58/1000, Enercon E-82/2000 et De Wind 48, seront le meilleur choix pour le site étudié avec un facteur de capacité de 0.56, 0.49 et 0.47, respectivement. Cela non seulement grâce à leurs vitesses nominales de 12 m/s, 13 m/s et 11.5m/s, respectivement, mais aussi grâce à leurs vitesses de coupures variant de 2.5m/s à 3m/s. Tandis que les autres modèles, ils ont un facteur de capacité variant de 0.23 à 0.36, une vitesse nominale couvre une gamme qui s'étend de 12m/s jusqu'à 15m/s, peuvent être aussi choisis ou d'autres modèles avec les mêmes caractéristiques.

Finalement, Annaba en étant une ville côtière, peut être proposée comme un des emplacements favorables pour l'installation des turbines éoliennes.

## *Chapitre III*

---

### *Commande adaptative floue*

---

## Partie I : Introduction à la logique floue

### 3.1 Historique de la logique floue

Au Début la théorie de la logique floue, s'affirmait comme une technique opérationnelle. Utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé. Elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies au début des années 1965 par le professeur **Lotfi Zadeh** de l'université Berkeley en Californie [114]. Cette technique associe les notions de « sous-ensemble flou », le terme de variables linguistiques où la valeur n'est pas un nombre et de « théorie des possibilités ». En 1970, c'était la première application de la logique floue dans les systèmes experts d'aide à la décision en médecine. Ainsi, en 1975 Mamdani de l'université de Londres a réalisé une régulation floue d'une chaudière à vapeur. Par la suite, Smith et Co.A/S mettent en application la théorie de la logique floue dans le contrôle de fours à ciment en 1980. Toutefois, les Japonais [115] en 1985 étaient les premiers à avoir utilisé la logique floue dans les produits grand public « Fuzzy Logic Inside » [116, 117]. Nous citons par exemple : appareils électroménagers (lave-linge, aspirateur, autocuiseur, ... etc), systèmes audio-visuels (appareil photographique autofocus, caméscope à stabilisateur d'image, photocopieur, ... etc), systèmes automobiles embarqués (suspension, climatisation, ... etc), systèmes de transports (train, métro, ascenseur, ... etc). Contrairement à la logique de Boole, qui n'admet que deux valeurs 0 et 1. La logique floue est une logique fondée sur des variables qui peuvent prendre des valeurs entre 0 et 1. Ce qui caractérise le raisonnement humain basé sur des données imprécises ou incomplètes.

### 3.2 Ensembles flous

La théorie des ensembles flous est un cas particulier de la théorie des sous-ensembles classiques où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires ( $\{0,1\}$ ) [115].

La notion d'ensemble flou a pour but de permettre l'idée d'une appartenance partielle d'un élément à un ensemble ou à une classe, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe [118]. Cette notion permet l'utilisation de catégories de données aux limites mal définies, de situations intermédiaires entre le tout et le rien, le passage progressif d'une propriété à une autre, etc...



Soit l'ensemble  $U$  des valeurs de la variable  $x$ , appelé l'univers du discours ; un sous-ensemble  $A$  de  $U$  et une fonction  $\mu_A(x)$  comprise entre 0 et 1. Cette fonction  $\mu_A(x)$  quantifie le degré avec lequel chaque élément  $x$  de  $U$  appartient à  $A$ .

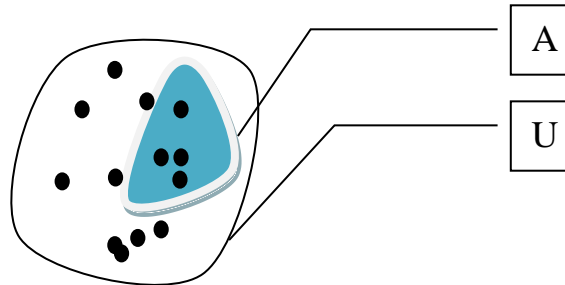


Fig. 3.1 Ensemble flou

### 3.2.1 Variable linguistique

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs associées sont linguistiques plutôt que numériques. La variable linguistique est caractérisée par un ensemble décrit par [116, 118] :

$\{x, T(x), U, G, M\}$ , avec :

$x$  : nom de la variable de base ;

$T(x)$  : ensembles des valeurs linguistiques que peut prendre  $x$  ;

$U$  : l'univers du discours associé avec la variable de base ;

$G$  : la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de  $x$  ;

$M$  : la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique  
(ensemble flou dans  $U$ ).

#### Exemple

Prenons comme exemple la variable linguistique température où :

Univers du discours  $U$ : gamme de température de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C}$ .

Variable linguistique  $x$ : la température.

Valeurs linguistiques  $T(x)$ : « Faible » « Moyenne » « Elevée ».

Règle syntaxique  $G$  : Si  $20 < T < 40$  température moyenne.

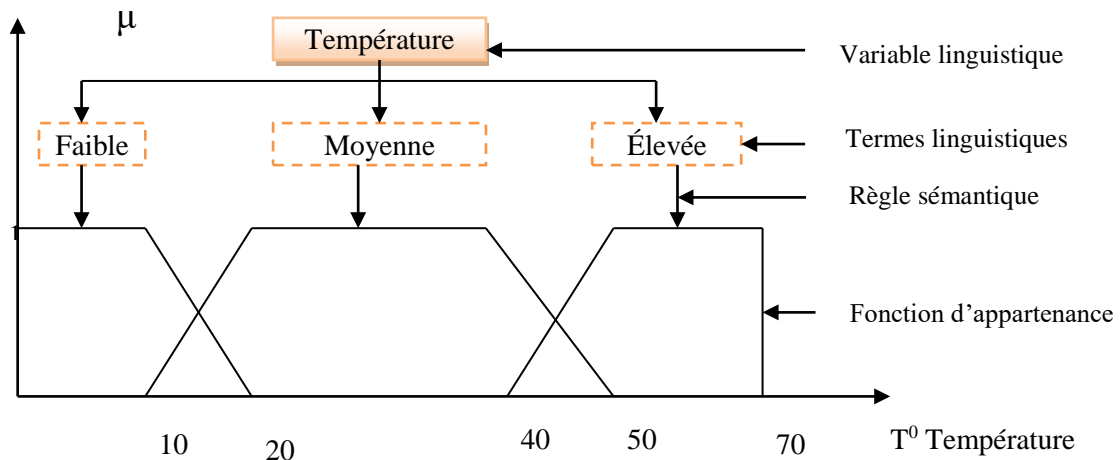


Fig. 3. 2 Exemple d'une variable linguistique avec trois termes linguistiques

La température ambiante (variable de base) peut être définie avec un ensemble de termes  $T(x) = \{ \text{Faible, Moyenne, Elevée} \}$ , le terme Faible représente une valeur linguistique.

### 3.2.2 Fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance mesure le degré avec lequel un élément  $x$  appartient à un ensemble flou  $A$ . elles sont de distribution uniforme ou aléatoire [114, 116]. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir plusieurs formes :

- ▶ Triangulaire ;
- ▶ En forme de cloche ;
- ▶ Monotone (croissante ou décroissante) ;
- ▶ Trapézoïdale.

L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée. Cependant, pour un ensemble flou, ce qui importe est moins la valeur précise des degrés d'appartenance des éléments du support que l'ordonnement de ces degrés d'appartenance entre eux. Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont en forme de trapèze ou de triangle, et permettent de respecter cette contrainte tout en gardant une forme analytique très simple. Dans certaines applications, où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on choisira plutôt des fonctions en  $S$  ou des fonctions de type gaussien, continûment dérivables sur leur support.

### 3.2.3 Propriétés des ensembles flous [118]

➤ **Egalité**

Deux ensembles flous  $A$  et  $B$  de  $U$  sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de  $U$  :

$$\forall x \in U: \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (3.1)$$

➤ **Inclusion**

Un ensemble flou  $A$  est inclus dans un ensemble flou  $B$  si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de  $B$  sur tout le domaine  $U$ .

$$\forall x \in U: \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (3.2)$$

➤ **Support**

Le support est un sous-ensemble de l'univers de discours  $U$  pour lequel la fonction d'appartenance de ses éléments n'est pas nulle.

$$Supp(A) = \{\forall x \in U / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (3.3)$$

➤ **Hauteur**

La hauteur d'un ensemble flou  $A$  est la valeur max, de la fonction d'appartenance sur le domaine  $U$ . l'ensemble flou  $A$  est dit normal si  $h(A)=1$ .

$$h(A) = \max_{x \in U} \mu_A(x) \quad (3.4)$$

➤ **Noyau**

Le noyau d'un ensemble flou  $A$  est un sous-ensemble de l'univers de discours  $U$  qui contient tous les éléments qui appartiennent à  $A$  avec un degré d'appartenance qui est égal à 1.

$$Core(A) = \left\{ \forall x \in \frac{U}{\mu_A(x)} = 1 \right\} \quad (3.5)$$

➤ **Cardinal**

Le cardinal d'un ensemble flou discret  $A = \{\mu_A(x_1)/x_1, \mu_A(x_2)/x_2 \dots \mu_A(x_n)/x_n\}$  est la somme des fonctions d'appartenance.

$$|A| = Card(A) = \sum_{x \in U} \mu_A(x) \quad (3.6)$$

➤ **Partition floue**

Soit  $N$  ensembles flous  $A_j$  du référentiel  $U$ ,  $(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N)$  est dit une partition floue si :

$$\forall x \in U, \sum_{j=1}^N \mu_{A_j}(x) = 1 \quad (3.7)$$

Avec :  $A_j \neq \emptyset$ , et  $A_j \neq U \forall 1 \leq j \leq N$ .

Qui énonce que pour chaque  $x$ , la somme des degrés d'appartenance soit égale à 1.

➤  ***$\alpha$ -coupe***

$A_\alpha$  d'un ensemble flou  $A$  est un sous-ensemble de l'univers de discours  $U$  telle que la fonction d'appartenance de ses éléments est supérieur ou égal à  $\alpha$  :

$$A_\alpha = \{\forall x \in U / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.8)$$

Avec  $\alpha \in [0 \ 1]$ .

### 3.2.4 Opérations sur les ensembles flous

Au niveau des inférences les variables linguistiques sont liées entre elles par des opérateurs 'ET' et 'OU'. Ce sont des opérateurs de la logique floue qui interviennent sur des fonctions d'appartenance attribuées aux variables linguistiques [117], d'autre part il existe l'opérateur NON (inverse). Les opérateurs 'ET' et 'OU' sont souvent réalisés par les opérations 'MIN' et 'MAX'. Les opérateurs logiques de conjonction (intersection), disjonction (union) et négation (complément) peuvent être utilisés afin de construire une proposition floue composée. Nous présentons les opérateurs les plus utilisés parmi les nombreux disponibles en logique floue.

➤ **Intersection** : L'opérateur 'ET' correspond à l'intersection de deux ensembles.

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (3.9)$$

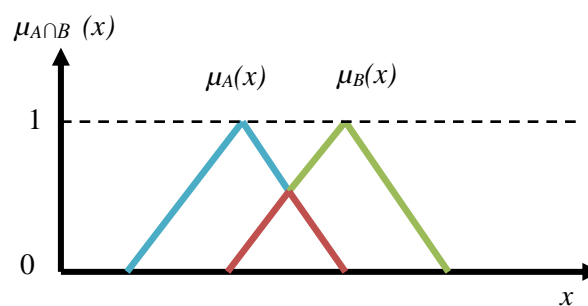


Fig. 3. 3 Intersection

➤ **Union** : L'opérateur 'OU' correspond à l'union de deux ensembles  $A$  et  $B$

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (3.10)$$

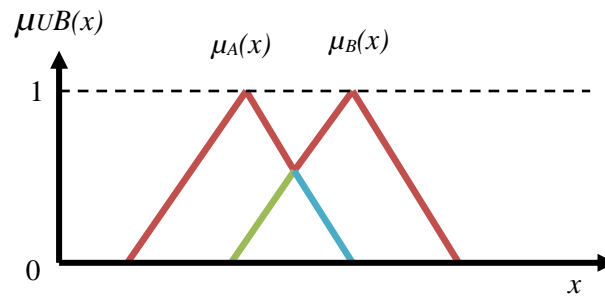


Fig. 3. 4 Union

➤ **Complément** : Selon la théorie des ensembles flous, l'opérateur 'NON' correspond à l'ensemble complémentaire.

$$\overline{\mu_A(x)} = 1 - \mu_A(x) \quad (3.11)$$

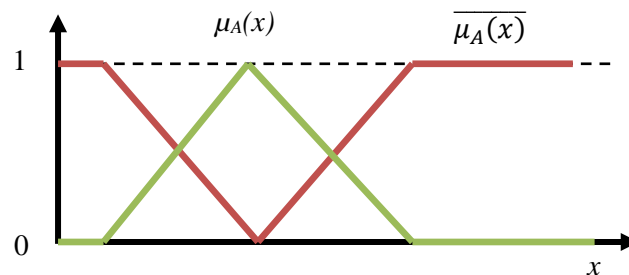


Fig. 3. 5 Complément

Les opérateurs flous interviennent dans des règles qui expriment les connaissances de l'expert. En effet, ces règles établissent des relations entre les variables floues comme suit :

$$R_i: \text{Si } x_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } x_2 \text{ est } A_{i2} \text{ Alors } y \text{ est } B_i \quad (3.12)$$

Les ensembles flous [119] unidimensionnels  $A_i$  sont définis pour chaque composant du vecteur antécédent. Le degré d'accomplissement  $\beta_i$  de la règle est alors calculé en employant les opérateurs d'intersection, d'union et de complément approprié :

$$\beta_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) \cap \mu_{A_{i2}}(x_2) \cup (1 - \mu_{A_{i3}}(x_3)) \quad (3.13)$$

Où, l'opérateur minimum ( $\cap$ ) représente dans ce cas la conjonction (ET), l'opérateur maximum ( $\cup$ ) représente la disjonction (OU), et le complément représente la négation (NON). Néanmoins, la généralisation des opérations d'union et d'intersection ensembliste classique aux sous-ensembles flous n'est pas définie de manière unique. Il existe, en fait, une multitude d'opérateurs de disjonction et de conjonction utilisée dans les propositions floues. Ces

opérateurs sont regroupés en deux familles : les normes triangulaires, notées t-normes, qui définissent les opérateurs d'intersection ou de conjonction et les conormes triangulaires, notées t-conormes ou s-normes, qui définissent les opérateurs d'union ou de disjonction. De manière générale ces opérateurs sont des fonctions définies dans l'espace :  $[0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ , mais elles ont des propriétés distinctes qui vont influencer le type de raisonnement approché. Le tableau. 3.1 regroupe quelques définitions de t-normes et t-conormes duales utilisées fréquemment [118]:

Tableau. 3. 1 Opérateurs logiques flous les plus utilisés

	t-normes	t-conormes
Zadeh (1973)	$\text{Min}(x, y)$	$\text{Max}(x, y)$
Bandler et Kohout (1980)	$x * y$	$x + y - (x * y)$
Lukasiewicz, Giles (1976)	$\text{Max}(x + y - 1, 0)$	$\text{Min}(x + y * y)$
Weber (1983)	$x, \begin{cases} \text{si } y = 0 \\ y, \text{ si } x = 0 \\ 1, \text{ sinon} \end{cases}$	$x, \begin{cases} \text{si } y = 1 \\ y, \text{ si } x = 1 \\ 0, \text{ sinon} \end{cases}$
Hamacher (1978)	$\frac{x \cdot y}{\lambda + (1 - \lambda)(x + y - xy)}$	$\frac{x + y - (2 - \lambda)x \cdot y}{1 - (1 - \lambda)x \cdot y}$
$\lambda > 0$		
Dubois et Prade (1986)	$\frac{x \cdot y}{\max(x, y, \alpha)}$	$\frac{x + y - x \cdot y - \min(x, y, 1 - \alpha)}{\max(1 - x, 1 - y, \alpha)}$
$\alpha \in [0, 1]$		

### 3.3 Structure générale d'un système d'inférence flou

Un système d'inférence floue FIS (Fuzzy Inference System) est formé de cinq blocs fonctionnels comme indiqué sur la figure 3.6 [116, 118]. Les systèmes flous permettent d'exploiter et de manipuler efficacement les informations linguistiques émanant de l'expert humain grâce à un arsenal théorique important. En outre, le système d'inférence flou peut être intégré dans une boucle de commande [120, 121].

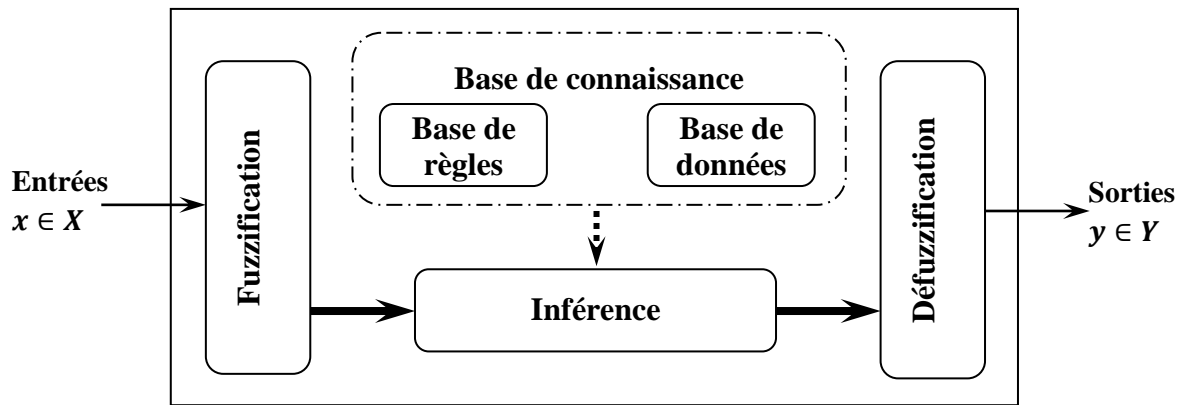


Fig. 3. 6 Représentation interne d'un système flou

Le premier bloc est l'étage de fuzzification qui transforme les valeurs numériques en degrés d'appartenance aux différents ensembles flous de la partition. Le second bloc est le moteur d'inférence constitué de l'ensemble des règles et la base de données. En sortie, l'étage de défuzzification permet si nécessaire, d'inférer une valeur nette, utilisable en commande par exemple, à partir du résultat de l'agrégation des règles.

Les systèmes flous basés sur des règles du type « **Si... Alors** » ont des antécédents et des conséquents qui sont spécifiés de manière symbolique. Dans le cadre de la modélisation et la commande de systèmes, l'exploitation d'une telle connaissance nécessite en général la mise en place d'interfaces numérique/symbolique (N/S) et symbolique/numérique (S/N). Ces dernières sont en effet des passerelles indispensables à l'établissement d'un lien entre l'ensemble de règles (base de règles) qui interfacent le système flou et le procédé, sur lequel seules des mesures et des actions numériques sont envisageables. De manière classique, le fonctionnement interne des systèmes flous repose sur une structure, représentée sur la figure 3.6, qui inclut:

- Une base de règles contenant un nombre de règles **Si... Alors** de la stratégie de commande de l'expert; et une base de données qui regroupe l'ensemble des définitions utilisées dans la commande floue (univers de discours, partitions floues, choix des opérateurs...).
- Une unité de décision (Inférence) qui transforme les opérations d'interférences en règles à partir d'une base de connaissance (fournie par l'expert) et du sous-ensemble flou correspondant à la fuzzification du vecteur de mesure. En général, plusieurs valeurs de

variables floues, convenablement défini par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par des règles, afin de tirer des conclusions. On parle alors de déductions floues. Dans ce contexte, on peut distinguer deux genres de règles d'inférences :

- Inférence avec plusieurs règles ;
- Inférence avec une seule règle.

Dans le cas d'une inférence avec plusieurs règles, celles-ci s'expriment sous la forme générale :

Si condition 1, Alors opération 1, OU  
Si condition 2, Alors opération 2, OU  
Si condition 3, Alors opération 3, OU  
.....  
Si condition m, Alors opération m,

Les conditions peuvent dépendre d'une ou de plusieurs variables.

Dans le deuxième cas, les variables sont liées entre elles par des opérateurs flous ET et OU. A chaque variable sont attribuées des fonctions d'appartenance, tenant compte des ensembles flous formés par ces variables.

- Une interface de fuzzification qui transforme les entrées crisp en degrés de vérification des valeurs linguistiques.
- Finalement, une interface de défuzzification, avec éventuellement un post-traitement d'information qui transforme les résultats flous d'inférence en une sortie crisp.

### 3.3.1 Fuzzification

La fuzzification est l'étape de passage du domaine numérique au domaine symbolique (flou). Cette étape est nécessaire dès lors que nous voulons manipuler à l'aide de la théorie des ensembles flous des grandeurs physiques mesurables (précises ou imprécises). Suivant l'application, la fuzzification peut se faire de différentes manières. Cela peut consister à transformer les données numériques en valeurs linguistiques [119] afin de donner un avis subjectif sur l'état du système observé. Il est nécessaire de transformer les variables non floues provenant du monde extérieur en sous-ensembles flous. Pour se faire, on utilise un opérateur dit de fuzzification qui associe à une mesure une fonction d'appartenance



particulière. Les systèmes à logique floue traitent de variables d'entrées floues et fournissent des résultats sur des variables de sorties elles-mêmes floues [122]. Pour fuzzifier, il faut donner :

- 1 / L'univers du discours (Plage de variations possibles de l'entrée considérée).
- 2/ Une partition en classe floue de cet univers (nombre des ensembles floues).
- 3/ Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

### 3.3.2 Règles floues

Les règles d'inférence floue forment le noyau des systèmes flous. Elles expriment un lien entre des propositions floues élémentaires ou des conjonctions de propositions élémentaires sous la forme.

R : **Si** proposition antécédente **Alors** proposition conséquent.

Les systèmes à logique floue utilisent une expertise exprimée sous forme d'une base de règles Si....Alors...

Si ( $x$  est  $A$ ) Alors ( $y$  est  $B$ )

Avec la variable floue  $x$  appartient à la classe floue  $A$  avec un degré de validité  $\mu(x_0)$  et la variable floue  $y$  appartient à la classe floue  $B$  à un degré qui dépend du degré de validité  $\mu(x_0)$  de la prémisse.

Le niveau de précision avec lequel peut être représenté un système donné par un modèle flou est associé avec la granularité du traitement de l'information, qui dépend entre autres, du nombre de termes linguistiques ainsi que de la forme particulière et du degré de chevauchement des fonctions d'appartenance utilisées dans le modèle [122].

### 3.3.3 Etapes du raisonnement flou et inférence flou

Les étapes du raisonnement flou réalisé par un SIF (Système d'Inférence Flou) sont [118, 122] :

- 1) Projeter les variables d'entrée sur les fonctions d'appartenance dans la partie antécédente pour obtenir les valeurs d'appartenances de chaque valeur linguistique (fuzzification).

- 2) Combiner (à travers un opérateur spécifique Max ou Min) les valeurs d'appartenance dans la partie antécédente pour obtenir la pondération de chaque règle.

Puisque les inférences comportent les opérateurs flous comme l'opérateur 'ET' et 'OU' liant les variables et les règles floues, d'autre part et à cause de l'empiétement des fonctions d'appartenance, deux règles ou plus peuvent être actives en même temps. Donc, il faut prévoir une méthode efficace permettant de réaliser les opérations floues dans une inférence, ce qui permet un traitement numérique de cette dernière. On parle de méthode ou mécanisme d'inférence. Les mécanismes d'inférence les plus utilisés sont [116, 122] :

- ✓ Le mécanisme *MIN-MAX* (type Mamdani 1974)
- ✓ Le mécanisme *MAX-PROD* (type Larsen 1980)
- ✓ Le mécanisme *SOMME-PROD* (type Zadeh)

- 3) Générer le conséquent qualifié de chaque règle.
- 4) Faire une moyenne pondérée des conséquents qualifiés pour obtenir une sortie crisp (non floue).

### 3.3.4 Defuzzification

L'opération inverse qui permet de passer d'une représentation sous forme de variable linguistique à une variable numérique applicable physiquement s'appelle la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes permettant d'obtenir une valeur précise à partir d'un ensemble flou en entrée. On cite comme exemples la moyenne des maxima et le centre de gravité [116, 118]. La défuzzification appelée aussi combinaison des règles est nécessaire lorsque plusieurs règles d'inférence sont validées, car on se retrouve dans ce cas avec plusieurs ensembles flous de sortie, il faut donc appliquer une technique pour trouver une valeur de sortie [122]. Les méthodes de defuzzification couramment utilisées dans la littérature sont :

- ✓ La méthode de centre de gravité ;
- ✓ La méthode du maximum ;
- ✓ La méthode des surfaces ;
- ✓ La méthode des hauteurs.

Dans ce qui suit on présente les deux méthodes les plus utilisées :

### 3.3.4.1 Méthode du centre de gravité (COG)

En commande floue, la défuzzification COG est la plus utilisée. La valeur défuzzifiée est donnée dans le cas continu par :

$$y_0 = \frac{\int_{y_1}^{y_2} y \mu(y) dy}{\int_{y_1}^{y_2} \mu(y) dy} \quad (3.14)$$

et dans le cas discret par :

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i y_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3.15)$$

Avec  $n$  : niveau de discrétisation

$y_i$ :  $i^{\text{ème}}$  sortie.

$\mu_i$ : valeur d'appartenance de la  $i^{\text{ème}}$  sortie.

### 3.3.4.2 Méthode moyenne des maximums (MM)

C'est la moyenne des valeurs de sorties les plus vraisemblables. La défuzzification MM est plutôt utilisée lorsqu'il s'agit de discriminer une valeur de sortie (Ex: reconnaissance de formes). Dans le cas discret la valeur défuzzifiée est donnée par :

$$y_0 = \sum_{i=1}^L \frac{r_i}{L} \quad (3.16)$$

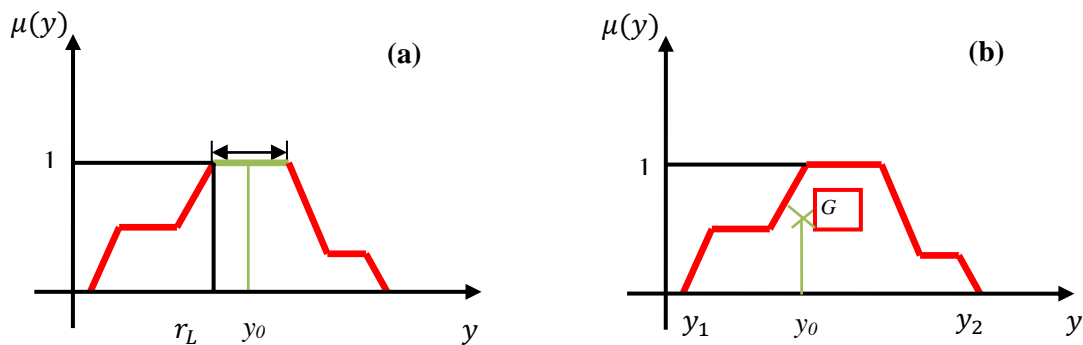


Fig. 3. 7 (a) Moyenne des maximums, (b) Centre de gravité

$L$ :  $n^{\text{bre}}$  de valeurs quantifiées  $r_i$  où l'appartenance est max.

## 3.4 Modélisation floue

Un modèle de raisonnement flou est généralement constitué d'un ensemble de règles « Si-Alors » qui permettent de représenter les relations entre les variables d'entrées et de sorties. Il

existe plusieurs modèles qui ont été développés, mais les plus courants sont : le modèle de **Mamdani** [123] et le modèle de **Takagi-Sugeno** [124]. Pour faciliter l'interprétation, on peut considérer l'antécédent comme une description linguistique qui indique les conditions de validité du phénomène représenté. Pour sa part, le conséquent (conclusion) représente le comportement associé aux conditions de validité décrites par l'antécédent. Les règles floues établissent des relations logiques entre les variables du système en associant valeurs qualitatives d'une variable (la concentration de polluant est élevée) avec celles d'une autre variable (le temps de dégradation est long). Les valeurs qualitatives ont typiquement une interprétation linguistique, elles sont nommées termes linguistiques (étiquettes). La signification des termes linguistiques par rapport aux variables d'entrée/sortie numériques (concentration de polluant, temps de dégradation) est définie par des ensembles flous appropriés. Dans ce sens, les ensembles flous, ou plus précisément leurs fonctions d'appartenance, fournissent une interface entre les variables numériques d'entrée/sortie et les valeurs linguistiques qualitatives dans les règles. Selon la structure particulière de la proposition conséquente, on peut distinguer trois types de modèles flous basés sur des règles [118]:

### 3.4.1 Modèle flou Mamdani

Pour ce modèle l'antécédent et le conséquent sont des propositions floues qui utilisent des variables linguistiques, d'où l'appellation de modèle flou linguistique [123, 124]. Pour un système SISO (Single Input Single Output) la forme générale des règles de Mamdani est :

**Si  $x$  est  $A_i$  Alors  $y$  est  $B_i$**

- $x$  est l'entrée du système flou (variable antécédente).
- $y$  la sortie (variable de conséquence).

La majorité des systèmes sont cependant décrits par plusieurs variables (MISO ou MIMO). Dans ce cas, les propositions antécédentes des règles sont une combinaison logique à l'aide des opérateurs flous.

### 3.4.2 Modèle flou Relationnel

Ce modèle peut être considéré comme une généralisation du modèle linguistique dans lequel il est possible d'associer une proposition « antécédent » spécifique avec plusieurs propositions « conséquents » différentes via une relation floue [125]. Cette relation floue

représente des associations entre les ensembles flous individuels définis dans les domaines d'entrée/sortie du modèle.

### 3.4.3. Modèle flou Takagi-sugeno (TS)

La partie « conséquent » du modèle TS utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à la proposition antécédente [126]. Les conséquences des règles sont des fonctions « strictes » des entrées du système flou. Elles s'écrivent, dans le cas général sous la forme :

$$R_i: \text{Si } x \text{ est } A_i \text{ alors } y_i = f_i(x)$$

La sortie de chaque règle est une combinaison linéaire des variables d'entrée plus un terme constant, et la sortie finale est la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle.

## Partie II : Régulateur PI adaptatif

### 3.5 Objectifs poursuivis

Les performances exigées pour un système asservi dépendent de la phase de fonctionnement. En régime transitoire, on cherche à ce que notre système soit rapide en passant le plus rapidement possible d'un régime permanent à l'autre. Le régime transitoire est caractérisé par le dépassement et le temps de réponse à partir duquel la réponse reste dans la bande des 5%. Par ailleurs, le régime permanent est caractérisé par sa précision. En pratique, cette précision n'est jamais absolue, elle est caractérisée par l'erreur.

La GADA est un procédé fortement non linéaire, alors l'utilisation d'un adaptateur non linéaire peut donner de meilleures performances au système non linéaire à régler par rapport à celles d'un régulateur conventionnel de type PI. Cela est confirmé non seulement par le développement croissant dans beaucoup de domaines d'applications comme : les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile voire impossible, les systèmes contrôlés par des experts humains, les systèmes ayant de nombreuses entrées / sorties continues ou discontinues, les systèmes ayant des réponses non linéaires. Mais aussi, par des travaux de recherche. Afin d'obtenir un système de commande de haute performance, nous utilisons un régulateur adaptatif non linéaire. Ce qui explique l'intérêt majeur de l'utilisation d'un régulateur adaptatif par la logique floue pour la commande de la machine GADA.

L'objectif visé par ce travail est l'amélioration des performances du système tel que la précision, la stabilité, la rapidité et la robustesse. Pour répondre à ces exigences, nous nous sommes, essentiellement, intéressés à développer une stratégie de contrôle basée sur l'adaptation en ligne des paramètres du régulateur PI par la technique de la logique floue. Le programme d'adaptative des gains du régulateur PI flou (AFGS-PI) d'une manière prédéfinie permet d'utiliser ce régulateur pour le contrôle des systèmes non linéaires. Le AFGS-PI est utilisé pour la commande du couple électromagnétique et la puissance réactive statorique, à travers les courants rotoriques de la GADA ( $i_{rq}$  et  $i_{rd}$ ), respectivement. L'adaptateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais il utilise des inférences avec plusieurs règles à base de variables linguistiques. Dans cette section, on va présenter la procédure générale de la conception d'un adaptateur des paramètres d'un régulateur PI par la logique floue.

### 3.6 Introduction

Un système est une partie de notre univers. On peut agir sur ce système par l'intermédiaire de ses entrées. En outre, des informations sur le système peuvent être obtenues par l'intermédiaire de ses sorties. Les systèmes asservis peuvent avoir une précision insuffisante, une stabilité trop relative, un temps de réponse trop lent ou un dépassement trop important. Il est donc souvent nécessaire d'introduire dans la boucle de commande un régulateur dont l'objectif est d'améliorer la précision, la stabilité et la rapidité du système. L'automatique a pour but de réaliser des régulateurs capables de changer le comportement du système dans le sens que l'on souhaite. Pour cela, le régulateur devra calculer les entrées à appliquer au système à partir des sorties et de la consigne que nous lui donnerons. En effet, les méthodes, telles que la très ancienne méthode de Ziegler-Nichols, sont largement répandues dans l'industrie car elles ne nécessitent aucun modèle du système et conduisent à des correcteurs de type PI ou PID ayant un ordre réduit. Par contre, elles ne permettent pas l'analyse du système et l'optimisation du fonctionnement. La plupart des régulateurs utilisés dans les applications industrielles sont les régulateurs de type PI et PID [127]. Ils sont adaptés à la commande des systèmes déjà stables et avec des comportements qui s'apparentent à un système du premier ordre. De nos jours, la logique floue est très utilisée dans les applications à procédé complexe, où la modélisation mathématiquement est impossible en raison de ses non-linéarités ou de réponses variables dans le temps. Cette constatation est à l'origine du développement des commandes à base de la logique floue. Un domaine d'application de la logique floue qui devient fréquent est celui du réglage et de la commande des régulations industrielles. Cette méthode permet d'obtenir une loi de commande souvent efficace, sans devoir faire appel à des développements théoriques importants. Elle présente l'intérêt de prendre en compte les expériences acquises par les utilisateurs et opérateurs du processus à commander. La commande par des régulateurs à base de la logique floue réunit les avantages suivants [128,129] :

- ✓ la non-nécessité d'une modélisation ;
- ✓ la possibilité d'implanter et d'intégration du savoir-faire de l'expert (connaissances heuristiques) ;
- ✓ la maîtrise des processus non-linéaire et difficile à modéliser ;
- ✓ l'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire) ;

- ✓ facilité d'implantation ;
- ✓ solutions de problèmes multivariables complexes ;
- ✓ robustesse vis-à-vis des incertitudes ;
- ✓ possibilité d'intégration.

Malgré tous ces avantages la commande par la logique floue présente les inconvénients suivants :

- ✓ le manque de directives précises pour : le choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification ;
- ✓ implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile ;
- ✓ la possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire ;
- ✓ la cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

Le régulateur classique de type PI est largement utilisé dans le contrôle de la machine asynchrone à double alimentation grâce à ses performances et sa simple structure. Le problème qui se pose avec le PI classique est que ses paramètres sont initialement calculés en fonction des paramètres de la GADA. Mais en pratique, les paramètres de la machine changent inévitablement dans le temps. Toutefois, le régulateur PI flou peut être considéré comme un PI non-linéaire où leurs paramètres sont déterminés en ligne basé sur l'erreur et sa dérivée [130, 131] et si le nombre des entrées du FLC augmentent la dimension de la base des règles augmentent. Il faut noter que, ce type de régulateur peut être vu comme un intégrateur pur dont le gain est un gain non linéaire. Cependant, ce régulateur standard ne réagit pas si les conditions de fonctionnement changent. Le régulateur FLC a besoin de plus d'information pour compenser la non linéarisation quand les conditions de fonctionnement change. Pour surmonter les inconvénients du PI classique et FLC et afin d'éviter ces imperfections, nous proposons dans cette partie une stratégie de commande adaptative à base de l'intelligence artificielle qui est une combinaison entre la logique floue et le régulateur PI classique. En effet, quand les conditions de fonctionnement changent, le superviseur flou où le mécanisme d'adaptation flou ajuste les paramètres du régulateur PI en fonction des règles de type Si-Alors, il génère de nouveaux paramètres durant le processus de commande. Finalement, dans le but d'intensifier l'utilisation du potentiel éolien ainsi que l'amélioration de la qualité de



puissance produite de l'éolienne sélectionnée dans une seconde partie on propose, un contrôle performant de puissances, par un mécanisme d'adaptation flou des paramètres du régulateur PI (Adaptive Fuzzy Gain Scheduling of Proportional Integral Controller (AFG-PI)) pour une éolienne de 2MW est présentée.

### 3.7 Description d'un régulateur PI adaptatif

Lofti Zadeh en 1965, a étendu la logique booléenne (0 et 1) à la logique graduelle ([0 ; 1]). Ensuite, Mamdani et Sugeno ont introduit les systèmes d'inférences à base de règles « Si..Alors ... ». Le calcul des paramètres du régulateur classique PI est essentiellement basé sur le modèle mathématique et donc les paramètres de la machine. Les commandes à base de logique floue apportent une amélioration significative des performances par rapport à des commandes linéaires plus classiques. Dans un objectif de rendre le régulateur et par la suite le contrôle plus performant et plus précis, nous avons utilisés un adaptateur de paramètres flou qui ne nécessite pas un modèle mathématique précis. Dans ce travail, le schéma d'adaptation flou est décrit pour contrôler les courants rotoriques et les tensions de commande du convertisseur MLI par la suite. La figure 3.8 présente le système d'adaptation flou à deux entrées  $Ei_{r-dq}$ ,  $dEi_{r-dq}$  et deux sorties  $K'_{p-dq}$ ,  $K'_{i-dq}$ .

Les entrées de l'adaptateur flou sont données par :

$$Ei_{r-dq} = i_{rdq\_ref} - i_{rdq\_mes} \quad (3.17)$$

$$dEi_{r-dq}(k) = \frac{Ei_{r-dq}(k) - Ei_{r-dq}(k-1)}{T} \quad (3.18)$$

Avec T : période d'échantillonnage

Ainsi,  $K'_{p-dq}$ ,  $K'_{i-dq}$  sont les sorties de l'adaptateur.

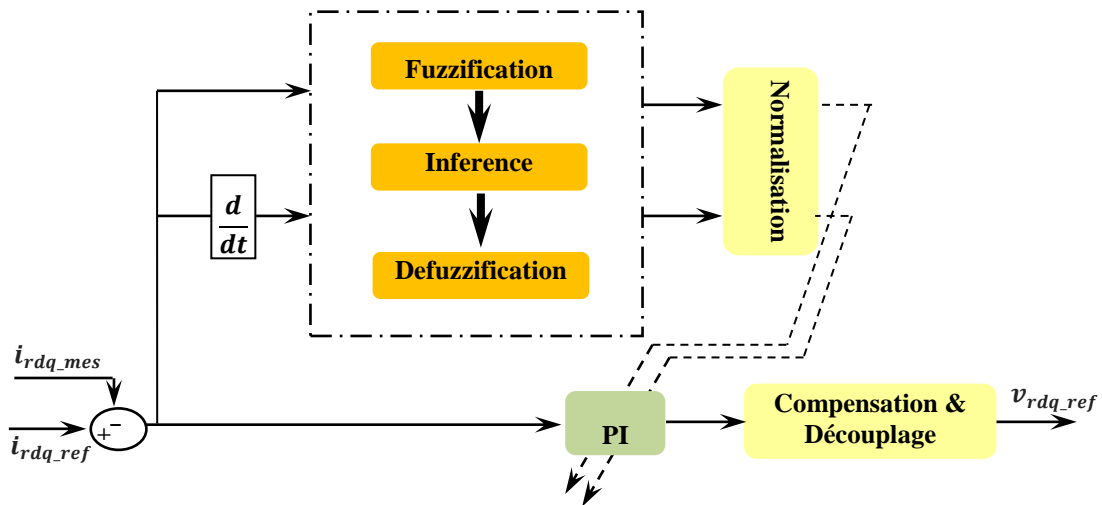


Fig. 3. 8 Schéma synoptique d'un adaptateur flou

### 3.8 Structure du mécanisme d'un régulateur FLC-PI adaptatif

Le système d'adaptation flou des paramètres du régulateur PI appelé aussi superviseur est divisé en trois parties comme suit :

#### 3.8.1 Fuzzification

L'erreur et la variation de l'erreur seront classifiées et convertis à des valeurs linguistiques. L'étape de fuzzification permet de fournir les degrés d'appartenance de la variable floue aux sous-ensembles flous en fonction de la valeur réelle de la variable d'entrée.

#### 3.8.2 Inférence

L'opération d'agrégation des règles autrement dit, prise de décision en fonction des règles Si...Alors. Les règles d'inférences permettent de déterminer le comportement de l'observateur flou. Cette partie possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence. Dans ce travail, nous optons la méthode d'inférence Max-Min parce qu'elle présente l'avantage d'être facile à implémenter d'une part et donne de meilleurs résultats d'autre part.

### 3.8.3 Defuzzification

Conversion de l'action d'adaptation d'inférence floue à des valeurs crisper. Par ailleurs, cette étape permet de calculer l'abscisse de la valeur de sortie et cela en fonction de ses degrés d'appartenance à tous les ensembles flous. Selon Mamdani, consiste à faire un calcul du centre de gravité des fonctions-membres de la sortie et selon Sugeno consiste à réaliser une moyenne pondérée des coefficients d'implication des sorties des règles. Dans ce travail, les règles de defuzzification ont été calculées par la méthode du centre de gravité, cela aide pour supprimer les variations des paramètres et les troubles stochastiques ainsi que sa facilité d'exploitation dont les performances sont prouvées par rapport aux autres méthodes [132]. Les sous-ensembles flous obtenus en sortie du système d'inférence ne sont pas directement utilisés pour contrôler un processus. Les sorties d'un système de commande doivent être des grandeurs non floues. Alors, il est nécessaire de convertir les sorties floues à des valeurs réelles strictes.

### 3.8.4 Normalisation

Le block de normalisation offre la possibilité de définir le domaine de variation normalisé des sorties de l'observateur flou.

## 3.9 Algorithme de conception d'un PI adaptatif

La procédure générale de conception d'un régulateur PI supervisé par un adaptateur de paramètres (gain) flou est décrite par les étapes de l'algorithme suivant :

- étape 1 : les courants de références  $d_q$  sont comparés aux valeurs de références ;
- étape 2 : calcul de l'erreur et de la variation de l'erreur ;
- étape 3 : choix de la structure de l'adaptateur (superviseur) flou ;
- étape 4 : choix de la stratégie de fuzzification (détermination du nombre des sous ensembles flous et des fonctions d'appartenances de l'erreur et de la variation de l'erreur) ;
- étape 5 : détermination des règles d'inférence floues ;
- étape 6 : choix de la méthode d'inférence ;
- étape 7 : changement du cycle d'adaptation des paramètres en fonction des règles

individuelles floues ;

- étape 8 : choix de la stratégie de défuzzification ;
- étape 9 : normalisation et calcul des nouveaux paramètres du régulateur PI ;
- étape 10 : implémentation ;
- étape 11 : test sur l'installation, si : l'erreur, le dépassement et le temps de réponse sont acceptés alors aller à l'étape 12 si non : retour aux étapes 4, 5 et 9 ;
- étape 12 : aller à l'étape 1.

En ce qui nous concerne, on choisit la structure de Mamdani à deux entrées (l'erreur et la variation de l'erreur) et deux sorties (les nouveaux paramètres du PI) pour la conception du système d'adaptation flou. Et, on considère des univers de discours normalisés, partitionnés en trois classes pour les deux entrées et en quatre et deux classes pour  $K_p'$  et  $K_i'$  respectivement. En outre, les opérateurs Min et Max sont utilisés pour inférer les règles.

### 3.10 Calcul des paramètres d'adaptation

Les domaines de variation des paramètres du régulateur PI, qui sont liés au choix des paramètres  $K_p$  et  $K_i$  sont déterminés de façon à garantir la stabilité en boucle fermée du système et à permettre d'exprimer au mieux les spécifications de l'utilisateur concernant la dynamique du système à réguler. Les deux paramètres  $K_p$  et  $K_i$  ont été réglés de façon à ce que l'ensemble des modèles simulés aient des réponses globalement optimales. Lorsqu'une action positive grande d'adaptation est recommandée par la table de règles, le problème posé est de fournir une commande forte par le régulateur PI. Cette conséquence peut être obtenue en augmentant le  $K_p$ , d'où le signe d'addition de la formule de réglage de gain proportionnel et en réduisant également la constante de temps intégrale, d'où le signe de soustraction dans l'équation. En outre, lorsqu'une action négative plutôt grande d'adaptation est recommandée par la table de règles, le problème posé est de diminuer fortement la commande de façon à anticiper sur les oscillations à venir. En effet, la réduction du comportement oscillatoire de la réponse peut être obtenue en diminuant le  $K_p$ , en augmentant également la constante de temps intégral. [133, 134]. L'erreur à un instant sert à agir sur le réglage des paramètres du régulateur à l'instant d'échantillonnage suivant, lors du fonctionnement en ligne une matrice floue permet d'adapter les gains de façon à optimiser les caractéristiques de la réponse

temporelle. Les changements sur les paramètres des gains du régulateur PI sont calculés en multipliant un élément de la table de décision du superviseur par un des deux coefficients  $K_p$  et  $K_i$ . Ces facteurs sont liés aux domaines de variation des gains du régulateur PI ; ils sont déterminés par des choix caractéristiques en boucle fermée. Les paramètres  $K_p'$  et  $K_i'$  sont donnés par les règles de défuzzification comme suit [130, 135, 136]:

$$K'_p = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j K'_{p,j}}{\sum_j^m \mu_j} \quad (3.19)$$

$$K'_i = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j K'_{i,j}}{\sum_j^m \mu_j} \quad (3.20)$$

Avec :

$K'_{p,j}$  et  $K'_{i,j}$  : valeurs de  $K'_p$  et  $K'_i$  respectivement qui correspondent à la  $j^{\text{ème}}$  règle ;

$m$  : nombre des règles de supervision ou d'adaptation ;

$\mu_j$  : probabilité d'appartenance des entrées au sous-ensembles flou calculée dans la phase de fuzzification.

En effet, nous pouvons écrire les équations utilisées pour définir les nouvelles valeurs des paramètres du régulateur PI par [130-132, 136,137]:

$$K'_p = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \quad (3.21)$$

$$K'_i = \frac{K_i - K_{imin}}{K_{imax} - K_{imin}} \quad (3.22)$$

### 3.11 Structure générale du PI adaptatif

La base des données du contrôleur flou consiste à une série de règles de type « Si...Alors ». Le but du contrôleur flou consiste à réajuster les paramètres du régulateur PI initialement calculés par la méthode de placement de pôle. La sortie du contrôleur flou donnera le poids qu'il faut affecter au régulateur PI afin de lui permettre de s'adapter à toutes les conditions de fonctionnement spécialement en régime transitoire ou lors de présence d'éventuelles perturbations. Cette approche permet d'ajuster les paramètres du régulateur en permanence durant le régime transitoire de façon à les faire converger vers leurs valeurs optimales, ce qui permet d'améliorer chaque portion de la réponse temporelle du système. Les figures 3.9 et

3.10, montrent les sous-ensembles flous et les fonctions d'appartenances trapézoïdales des variables floues. Nous avons optés pour 03 ensembles flous pour les deux entrées (erreur et variation d'erreur) et 04 sous-ensembles pour  $K_p$  ainsi que 02 sous ensembles pour  $K_i$ . Les sous-ensembles flous sont définis comme suit : Z=zéros, PP=petit positive, P=positive, MP=moyen positive, GP= grand positive, GN= grand négative. Les fonctions d'appartenances pour l'erreur et la variation de l'erreur sont définies respectivement dans les intervalles  $[-1, 1]$  et  $[-1, 0.2]$ . De plus, les fonctions d'appartenance pour les sorties  $K_p'$  et  $K_i'$  sont définies respectivement dans les intervalles  $[0,5]$  et  $[0, 0.6]$ . D'autre part, la base de données des règles de contrôle consiste à une série de conditions de type « Si...Alors... » d'un nombre de  $2^x$  où  $x$  est le nombre des sous-ensembles flous. Une fois que les valeurs des paramètres  $K_p'$  et  $K_i'$  sont obtenues par le block de défuzzification, les nouveaux paramètres du régulateur PI seront calculés comme suit [130-132, 136-140]:

$$K_p = (K_{pmax} - K_{pmin})K_p' + K_{pmin} \quad (3.23)$$

$$K_i = (K_{imax} - K_{imin})K_i' + K_{imin} \quad (3.24)$$

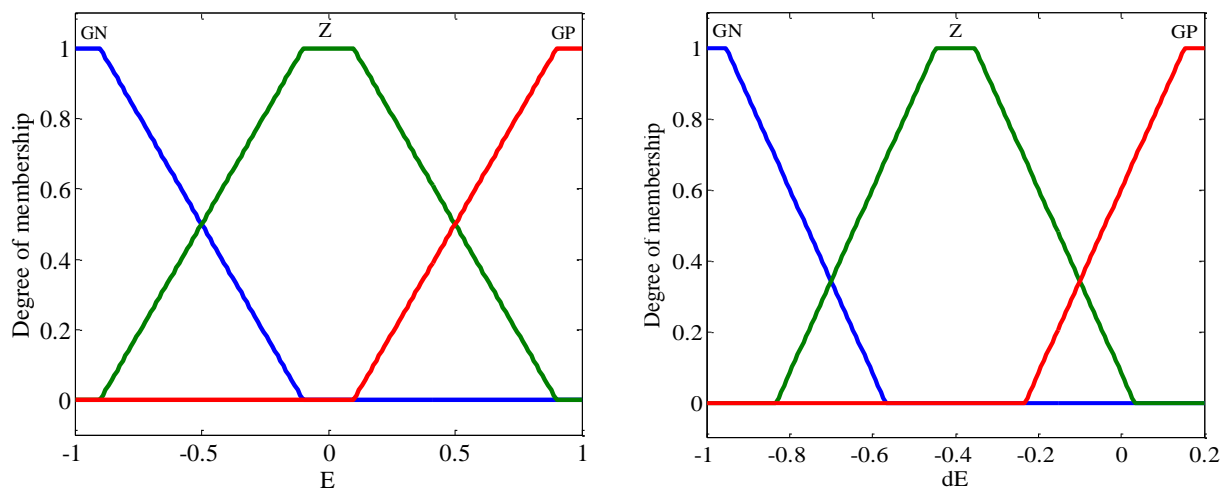


Fig. 3. 9 Fonctions d'appartenance de l'erreur et de la variation de l'erreur

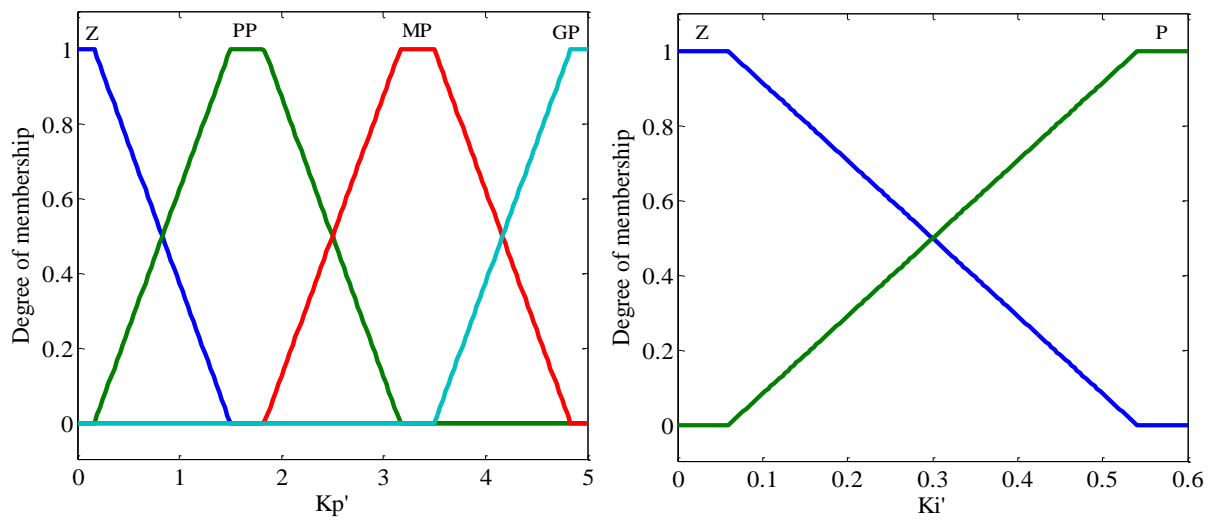


Fig. 3. 10 Fonctions d'appartenance des paramètres  $K_p'$  et  $K_i'$

Les matrices d'inférences utilisées sont décrites par les tableaux suivants :

Tableau. 3. 2 Matrice d'inférence floue de  $K_i'$

<b>E/dE</b>	<b>GN</b>	<b>Z</b>	<b>GP</b>
	$K_i'$	$K_i'$	$K_i'$
<b>GN</b>	P	Z	P
<b>Z</b>	P	P	P
<b>GP</b>	P	Z	P

Tableau. 3. 3 Matrice d'inférence floue de  $K_p'$

<b>E/dE</b>	<b>GN</b>	<b>Z</b>	<b>GP</b>
	$K_p'$	$K_p'$	$K_p'$
<b>GN</b>	Z	GP	Z
<b>Z</b>	Z	PP	MP
<b>GP</b>	Z	GP	Z

Nous reprenons le schéma synoptique de la commande classique (Chapitre II), et nous remplaçons le régulateur classique par un régulateur adapté par le superviseur flou.

La Fig. 3.11, illustre la structure de la commande indirecte par un régulateur PI adaptatif (AFG-PI).

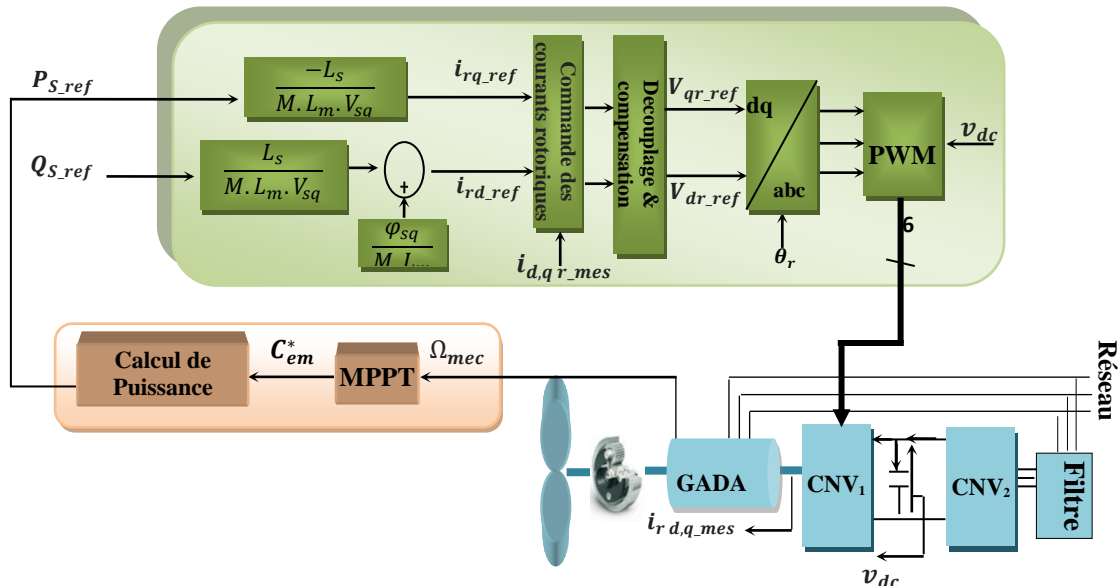


Fig. 3. 11 Structure générale de la commande du convertisseur côté GADA

### 3.12 Stabilité

Notre objectif s'articule sur l'amélioration des performances du système en qualité de précision, stabilité et rapidité. Le régulateur PI introduit un pôle à l'origine ce qui augmente la classe du système sans dégrader sa marge de phase et de lui permettre d'avoir un rôle très important sur les basses fréquences. La présence d'un intégrateur annule l'erreur statique, mais s'il est mal placé il ralentit le système et le déstabilise même. En régime transitoire, le régulateur PI a un effet dynamique ce qui permet d'augmenter le temps de réponse et il introduit même un déphasage supplémentaire de  $-90^\circ$ . Fig. 3.12 montre bien que ce régulateur n'influence pratiquement plus la phase pour des pulsations telles que  $\omega > 10/T_i$ .



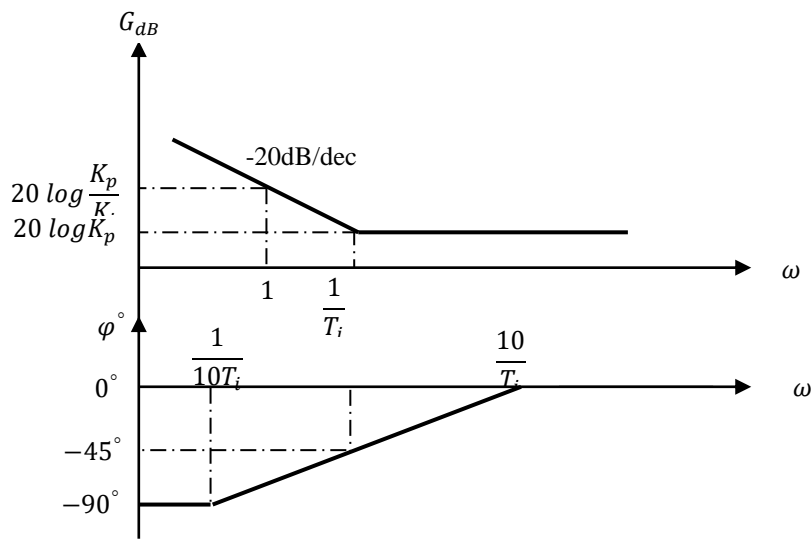


Fig. 3. 12 Action du correcteur PI dans le diagramme de Bode

Les variations des gains  $K_p$  et  $K_i$  influent sur la dynamique du système qui varie dans le même sens. En fonction de la position dans le plan de phase, il s'agit de reconnaître le positionnement sur la courbe temporelle, puis de mener une action en termes de performances.

L'étude de la stabilité d'un système contrôlé par un régulateur classique peut être étudiée par les différentes méthodes connues de l'automatique (Niquist, Routh, Bode...). Dès qu'un régulateur flou est introduit dans la commande d'un système, l'étude de sa stabilité devient complexe, puisqu'on a affaire à un système non linéaire. Dans ce cas, plusieurs méthodes sont proposées afin de vérifier la stabilité locale et globale du système. On distingue différentes méthodes où le modèle mathématique du processus existe. La liste des méthodes citée ici est non exhaustive et le lecteur peut se référer à [124] pour avoir un aperçu plus complet [135].

- Si le contrôleur flou peut facilement se mettre sous forme analytique [131] l'on est ramené à l'étude de la stabilité asymptotique d'un système en boucle fermée non-linéaire et on peut alors utiliser la méthode directe de Lyapunov.
- Pour des contrôleurs flous plus complexes, l'expression mathématique est inexploitable, on doit alors se contenter d'une propriété de secteur géométrique [124, 130]

Une des méthodes les plus utilisées pour l'étude de la stabilité de la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) à partir de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) est la

méthode de Bode. Cette méthode a l'intérêt d'être directement utilisable lors de la synthèse du régulateur. Les principaux indicateurs de robustesse en stabilité sont : la marge de gain qui est l'inverse du gain du système en boucle ouverte lorsque la phase atteint  $-180^\circ$ , et la marge de phase qui représente le supplément de phase du système en boucle ouverte par rapport à  $180^\circ$  lorsque le gain atteint 1 (ou 0 dB). Le système avant correction présente sur le diagramme de Bode une marge de phase  $\approx 90^\circ$  pour une pulsation de coupure  $\omega_G = 702 \text{ rad/s}$  avec  $|G(s)| = 1$  (0 dB) et une précision de 57.6dB. La fonction de transfert en boucle ouverte du système est donnée par l'équation suivante :

$$G(s) = \frac{1}{R_r + \sigma L_r s} \quad (3.25)$$

La marge de gain du système en boucle ouverte est donnée par :

$$\begin{aligned} M_{dB} &= 20 \log |G_{BO}| = 20 \log \left( \frac{1}{R_r} \right) - 20 \log \sqrt{\left( \left( \frac{\sigma L_r \omega}{R_r} \right)^2 + 1 \right)} \\ &= 20 \log \left( \frac{1}{R_r} \right) - 20 \log \sqrt{\left( \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 + 1 \right)} \end{aligned} \quad (3.26)$$

La marge de phase du système en boucle ouverte peut être écrite comme suit :

$$\varphi^\circ = \arg(G_{BO}) = -\arctan \frac{\sigma L_r}{R_r} \omega_G \quad (3.27)$$

La Fig. 3.13 présente le diagramme de bode de la fonction de transfert du système en boucle ouverte.

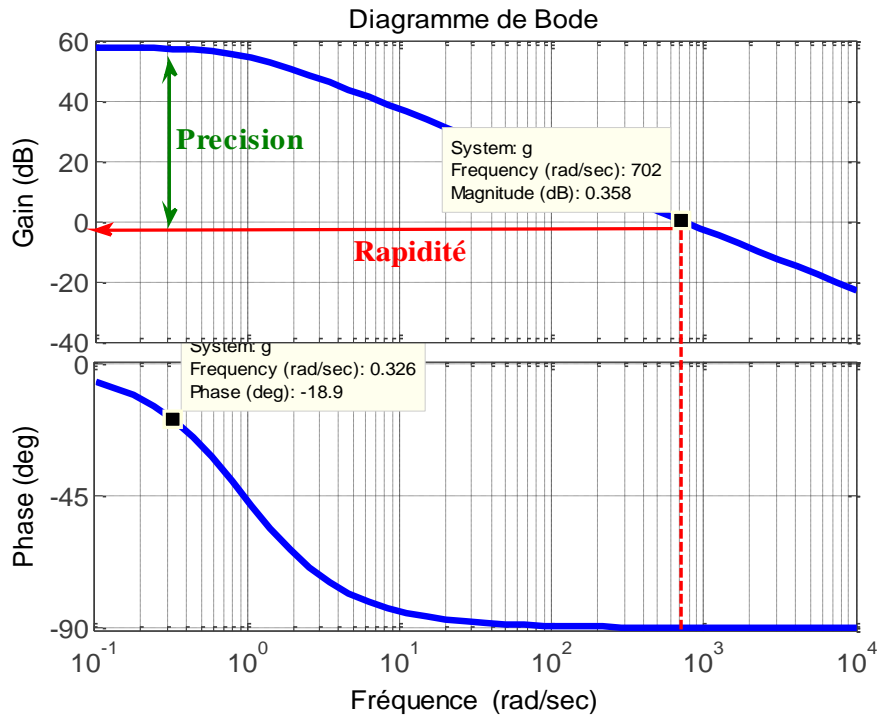


Fig. 3.13 Diagramme de Bode pour le système sans correction

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par l'équation suivante :

$$PI = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i S} \right) = K_p + \frac{K_i}{S} \tag{3.28}$$

Avec :  $T_i = \frac{K_p}{K_i}$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système avec correcteur est comme suit :

$$FT_{BO} = C(S) * G(S) = K_p \frac{(T_i S + 1)}{T_i S} \frac{1/R_r}{1 + \frac{\sigma L_r}{R_r} S} \tag{3.29}$$

Dans le but de compenser la constante du temps du système à corriger correspondant au pôle défavorable du point de vue de la stabilité, on peut écrire :

$$T_i S + 1 = 1 + \frac{\sigma L_r}{R_r} S$$

$$\omega_c = \frac{1}{T_i} = \frac{R_r}{\sigma L_r} \approx 0.95$$

De ce fait, on place le correcteur à la pulsation de coupure  $\omega_c=0.95$ .

Dans ce cas, le système possède toujours une marge de phase égale à  $\frac{\pi}{2}$  dû à l'action intégrale du correcteur. S'appuyant sur la réponse harmonique du système sans correction en boucle ouverte (BO) dans le diagramme de Bode, on constate qu'on peut placer le correcteur PI à la pulsation de coupure  $\omega_c$ , en avant de la pulsation de coupure  $\omega_G$ , de manière que le déphasage positif soit effectif avant la pulsation de résonance du système non corrigé mais, de façon de ne pas trop réduire la marge de phase pour ne pas dégrader la stabilité du système en boucle fermée ou le déstabiliser complètement.

$$\begin{cases} 0.326 \leq \omega_c \leq 702 \\ 0.002 \leq T_i \leq 3.067 \end{cases} \quad (3.39)$$

De l'équation (3.39), on peut déterminer l'univers de discours des paramètres de sorties de l'observateur flou  $K_p'$  et  $K_i'$  de telle sorte d'avoir une marge de phase suffisante.

### 3.13 Robustesse

La robustesse d'un système est définie par sa possibilité d'être stable et performant en boucle fermée quelque soit les variations du comportement du système en boucle ouverte. Son sens est donc impérativement associé à une propriété, telles que la stabilité ou la performance, à l'égard d'une grandeur perturbatrice comme l'erreur de mesure ou les perturbations externes, les incertitudes sur le modèle ou sur les paramètres du système. Afin de tester la robustesse est de comparer les performances des contrôleurs : PI adaptatif et PI classique, seulement les variations paramètres de la machine ont été prises en compte. Pour cela, nous avons varié les valeurs des paramètres de la GADA comme suit:

- ✓ variation de la résistance rotorique  $R_r$  (+45%);
- ✓ variation des inductances : statorique, rotorique et mutuelle (+25%).

### 3.14 Simulation et résultats

Dans ce travail, nous visons non seulement à développer une méthode de découplage entre les puissances active et réactive. Mais aussi, d'améliorer les performances et la stabilité du système asservi vis-à-vis des variations paramétriques. Pour cela, nous avons testé par simulation les performances ainsi que la robustesse des deux types de commandes toute en appliquant les mêmes variations paramétriques. En effet, après l'étude précédemment réalisée

sur le choix de l'éolienne adéquate pour le site étudié (Chapitre II), nous avons opté pour une éolienne de 2MW où les caractéristiques sont récapitulées dans le tableau B.1 (Annexe B). Sous ces conditions, la synthèse de notre analyse est résumée dans le tableau B.2 (Annexe B).

La Fig. 3.14. a, b illustre l'évolution des puissances statoriques et rotoriques. On remarque que les puissances active et réactive statoriques  $P_{s_{AFG-PI}}$  et  $Q_{s_{AFG-PI}}$  suivent parfaitement leurs références  $P_{s_{ref}}$  et  $Q_{s_{ref}}$  (Tableau. B.3 (Annexe B)). Pendant le premier statut, on a opté pour un fonctionnement du système avec un facteur de puissance unitaire ( $Q_{s_{ref}}=0$ ). En outre, pour  $0.4 < t \leq 0.6$  (statut 2) la puissance  $P_{s_{ref}}$  a été variée de -0.2MW à 0.2MW. Par contre, on a maintenu  $Q_{s_{ref}}$  nulle, ce qui correspond aux changements des puissances active et réactive rotoriques  $P_{r_{AFG-PI}}$  et  $Q_{r_{PI}}$ . Par conséquent, on remarque aussi la variation des courants rotoriques et statoriques sur la composante « q » :  $I_{rq_{AFG-PI}}$ ,  $I_{rq_{PI}}$ ,  $I_{sq_{AFG-PI}}$  et  $I_{sq_{PI}}$ . Cependant, les courants de la composante « d » :  $I_{rd_{AFG-PI}}$ ,  $I_{rd_{PI}}$ ,  $I_{sd_{AFG-PI}}$  et  $I_{sd_{PI}}$ , restent invariants (Fig. 3.15. a, b).

Dans le statut 3, on a fait varier  $Q_{s_{ref}}$  dans le sens positif à 0.8MVar et on a maintenu  $P_{s_{ref}}$  constante. Ainsi, on a remarqué que les puissances active et réactive évoluent correctement et le contrôle reste toujours découplé. En effet, nous pouvons observer dans autres statuts que la variation d'une grandeur n'implique pas la variation de l'autre et vice versa. En d'autres termes, malgré les variations paramétriques, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées indépendamment, et cela grâce aux termes de découplage et de compensation. Les figures 3.14 et 3.15, montrent clairement que pour le cas du régulateur PI classique, les puissances actives et réactives rotoriques et statoriques ainsi que les courants des deux composantes d-q rotoriques et statoriques, présentent un important dépassement aux moments des changements de leurs grandeurs de références. Par contre, le dépassement est acceptable pour le cas du régulateur PI adaptatif AFG-PI. En plus, le temps de réponse reste aussi très faible par rapport au PI classique. Toutefois, d'après les résultats de simulation résumées sur le tableau B.2 (Annexe B), on note que les dépassements maximaux des puissances et des courants pour les régulateurs PI et AFG-PI sont respectivement de 45% et 0.1%. De plus, le temps de réponse du régulateur AFG-PI est aussi très petit (0.01s) comparé

à celui du régulateur PI (0.03s). Finalement, nous pouvons affirmer la robustesse et la performance de la commande adaptative par AFG-PI vis-à-vis des variations paramétriques.

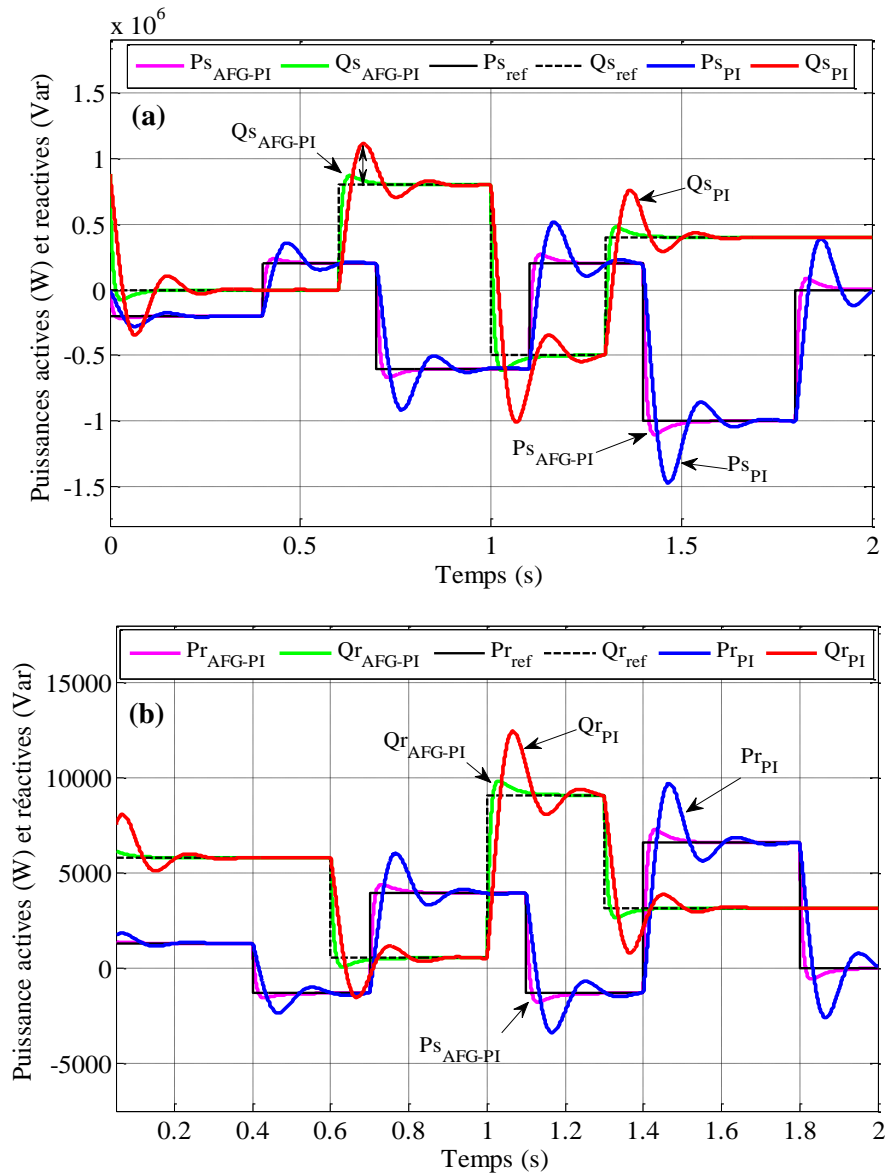


Fig. 3. 14 (a) Puissances actives et réactives statoriques, (b) Puissances actives et réactives rotoriques

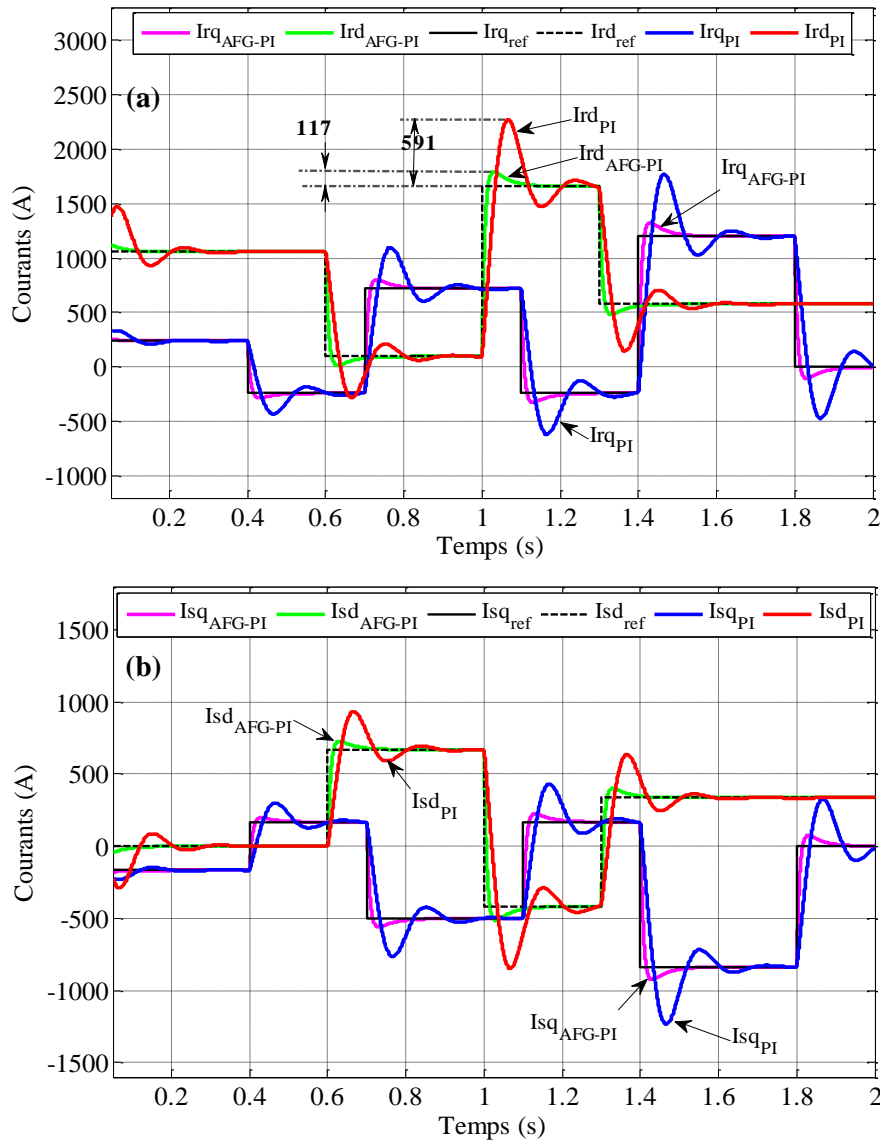


Fig. 3. 15 (a) Courants rotoriques d'axes d-q, (b) courants statoriques d'axes d-q

### 3.15 Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de contrôle des puissances de la GADA qui permet un découplage des puissances est présentée. Cependant, la description d'un superviseur flou des gains du régulateur PI adaptative a été développée. On a validé nos travaux par simulation sur une éolienne de 2MW comparés avec un PI classique. Toutefois, on a mis en évidence l'amélioration apportée par le PI adaptatif sur les performances de la GADA par rapport au régulateur PI classique. Les résultats de simulation montrent le comportement remarquable du

PI adaptatif par rapport au PI classique en qualité de performances et robustesse. Bien que, les paramètres du PI sont ajustés par la collection des règles floues de type « Si..Alors.. » ils restent insensibles aux variations paramétriques. Ainsi, l'utilisation d'une telle solution hybride (PI ajusté par un FLC) permet d'exploiter de façon rationnelle les avantages des régulateurs PI classique et flou et de remédier à leurs inconvénients. Finalement, les résultats auxquels nous avons aboutis, montrent que l'utilisation de la logique floue pour la supervision ainsi que l'adaptation des paramètres du régulateur PI permet d'améliorer de manière considérable les performances du système. Les comparaisons effectuées entre les deux types de régulateurs confirment que l'utilisation du PI adaptatif permet de réduire le temps de réponse du système de commande. D'un autre côté, il permet de diminuer les fluctuations du régime transitoire. Le PI adaptatif AFG-PI a donné une amélioration de performances dynamiques pour les régimes transitoires. Par conséquent, il peut contribuer à améliorer l'utilisation de l'énergie éolienne dans le site étudié (Chapitre II).



## *Chapitre IV*

---

### *Commande neuromimétique*

---

## Partie I : Réseaux de neurones artificiels

### 4.1 Introduction

L'intelligence artificielle qui est une discipline scientifique relative au traitement des connaissances et au raisonnement humain (la compréhension, le dialogue, l'adaptation, l'apprentissage) a joué un rôle très important dans le domaine de l'automatique ces dernières décennies. Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux réseaux de neurones artificiels (RNA) afin de donner au système de commande la capacité d'améliorer des simples connaissances. La commande par les réseaux de neurones existe sous plusieurs structures : un contrôleur conventionnel utilisant des paramètres produits par un émulateur neuronal du système, un réseau de neurones entraîné pour copier le comportement d'un contrôleur analytique existant ou un mélange des deux. Les réseaux de neurones sont constitués des neurones connectés entre eux par l'intermédiaire des poids. Ils font partie des Réseaux Adaptatifs Non-linéaires, cela signifie que le système de commande neuronale s'organise et adapte ses poids lors d'une procédure fondamentale appelée apprentissage. Ils permettent de réaliser par apprentissage, une très large classe de modèles et de correcteurs. L'étape principale dans la commande neuronale est la technique d'apprentissage utilisée, pour assurer la maturation du réseau et de réduire au minimum les erreurs de sortie. Dans la première partie de ce chapitre, on présente trois algorithmes d'apprentissage : l'apprentissage par correction d'erreur, l'apprentissage à rétro-propagation du gradient d'erreur et l'apprentissage compétitif. Comme toutes les techniques de l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones ont les avantages et les inconvénients [141-144]:

#### ✓ **Avantages**

- la capacité d'adaptation : adaptation facile vis-à-vis le changement du système (commande adaptatif) ;
- il est capable de reproduire un fonctionnement en ajustant uniquement ses poids ;
- amélioration des performances de la commande ;
- certaines architectures sont moins coûteuses en terme d'implémentation matérielle ;
- la capacité de généralisation (l'aptitude d'un réseau à présenter un comportement acceptable en réponse à des Stimuli externes de son environnement non rencontrés lors de l'apprentissage (interpolation et extrapolation).

**✓ Inconvénient**

- le choix de la topologie tel que le choix du nombre de couches ainsi que nombre de neurones dans chaque couche ;
- les données du problème sont entachées de bruit (en raison des imperfections des capteurs et de l'environnement lui-même) ;
- le problème est de nature évolutive ;
- le problème nécessite un traitement temps réel ;
- il n'existe pas de solutions technologiques courantes au problème ;
- l'apprentissage d'un réseau.

**4.2 Définition**

Les neurones sont les principales cellules du système nerveux, dont le rôle est d'acheminer et traiter les informations dans l'organisme. La cellule nerveuse constitue une unité élémentaire de calcul qui est l'unité de base du traitement de l'information effectué par les réseaux de neurones. La structure d'un neurone biologique est décrite par la figure 4.1. Les neurones sont des cellules distinctes. Chaque neurone a un corps cellulaire complet, un axone et éventuellement une ou plusieurs dendrites. L'axone d'un neurone est lié à une dendrite d'un autre neurone par les biais d'une synapse. Entre deux neurones, l'information se déplace par inversion de polarisation, de proche en proche, des dendrites vers les axones.

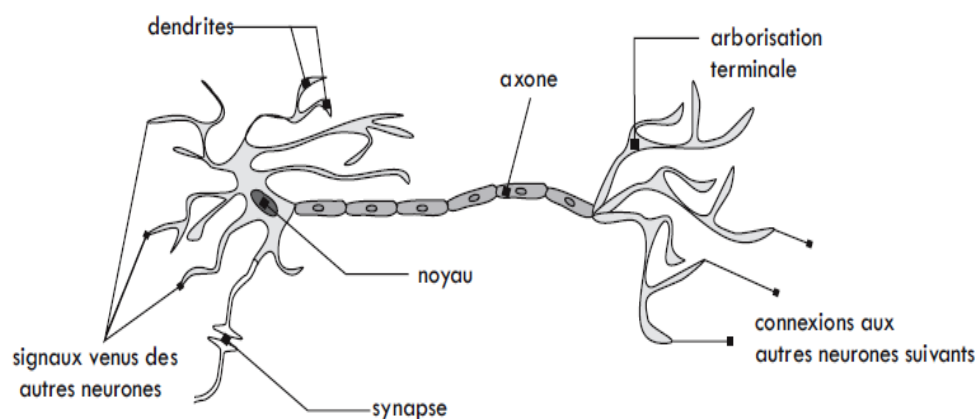


Fig. 4. 1 Structure d'un neurone biologique [145]

Les réseaux de neurones artificiels sont apparus dans les années 40 lors d'essais de modélisation du neurone biologique. Les applications concrètes basées sur les Réseaux de Neurones (RN) se sont popularisées dans les années 90 grâce aux progrès réalisés dans le domaine du calcul numérique. Depuis, ils ont attiré la curiosité des chercheurs et des communautés scientifiques dans plusieurs autres domaines : l'automatique, le diagnostique, la médecine, l'aéronautique, l'informatique, l'électronique, l'électronique de puissance, etc.

Cependant, le neurone artificiel est une opération mathématique non linéaire paramétrée à valeurs bornées où la sortie est une combinaison des entrées, pondérées par les poids  $W_i$ . L'analogie entre un réseau de neurones formels (artificiel) et le cerveau suscite par deux remarques [141, 145, 146]:

- un réseau de neurones artificiels acquiert la connaissance de son environnement par l'intermédiaire d'un apprentissage qui "simule" la plasticité du cerveau. En cours d'apprentissage, le réseau peut être amené à modifier sa structure en créant ou en supprimant des neurones ou des liaisons entre neurones ;
- la connaissance acquise par un réseau de neurones est encodée par les forces ou intensités évolutives des connexions établies entre neurones formels. Les forces des connexions liant les neurones réfèrent aux valeurs des poids ou coefficients synaptiques qui définissent les paramètres du modèle interne du réseau.

La Fig. 4.2 représente la structure d'un neurone artificiel. Les entrées du neurone sont désignées par  $x_i$  ( $i = 1..n$ ). Les paramètres  $w_i$  reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids, à laquelle s'ajoute une constante « b » appelé biais qui joue un rôle de translation du domaine d'activité du neurone. La sortie du neurone est calculée par la fonction d'activation (f) donnée par la formule suivante :

$$y = f(v) = f(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b) \quad (4.1)$$

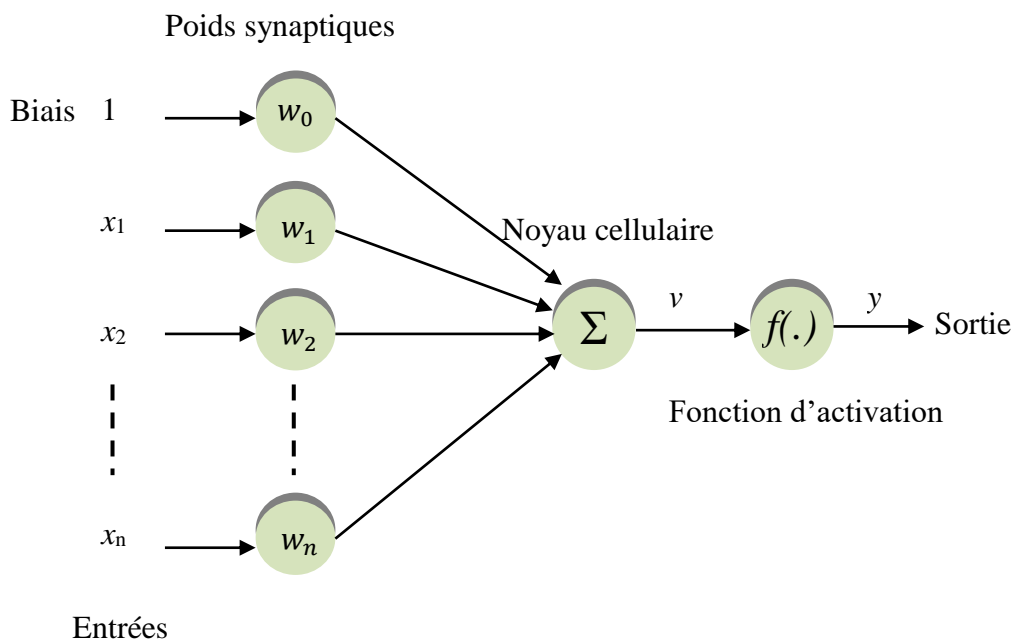


Fig. 4. 2 Structure d'un neurone artificiel

Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde. La figure 4.3 montre les fonctions d'activation les plus utilisées [147]. La fonction bipolaire linéaire (a), la fonction de seuil (b), la fonction tangente hyperbolique (c), la fonction de seuil bipolaire (d) et la fonction sigmoïdale (e). Il existe d'autres types de fonctions d'activation comme la fonction de Gauss et la fonction en forme de cloche (Bell-shaped function) [148]. Quand la pente  $k$  tend vers l'infini, la fonction bipolaire linéaire devient la fonction de seuil bipolaire (c). Les fonctions de seuil peuvent être utilisées pour la résolution des problèmes de classification. Les deux fonctions sigmoïdale et hyperbolique sont utilisées dans diverses applications relevant du domaine de l'électronique de puissance. Ces deux fonctions non linéaires ont la caractéristique non linéaire du neurone et par conséquent elles permettent au RNA de résoudre des problèmes non linéaires liés à la commande et à l'identification.

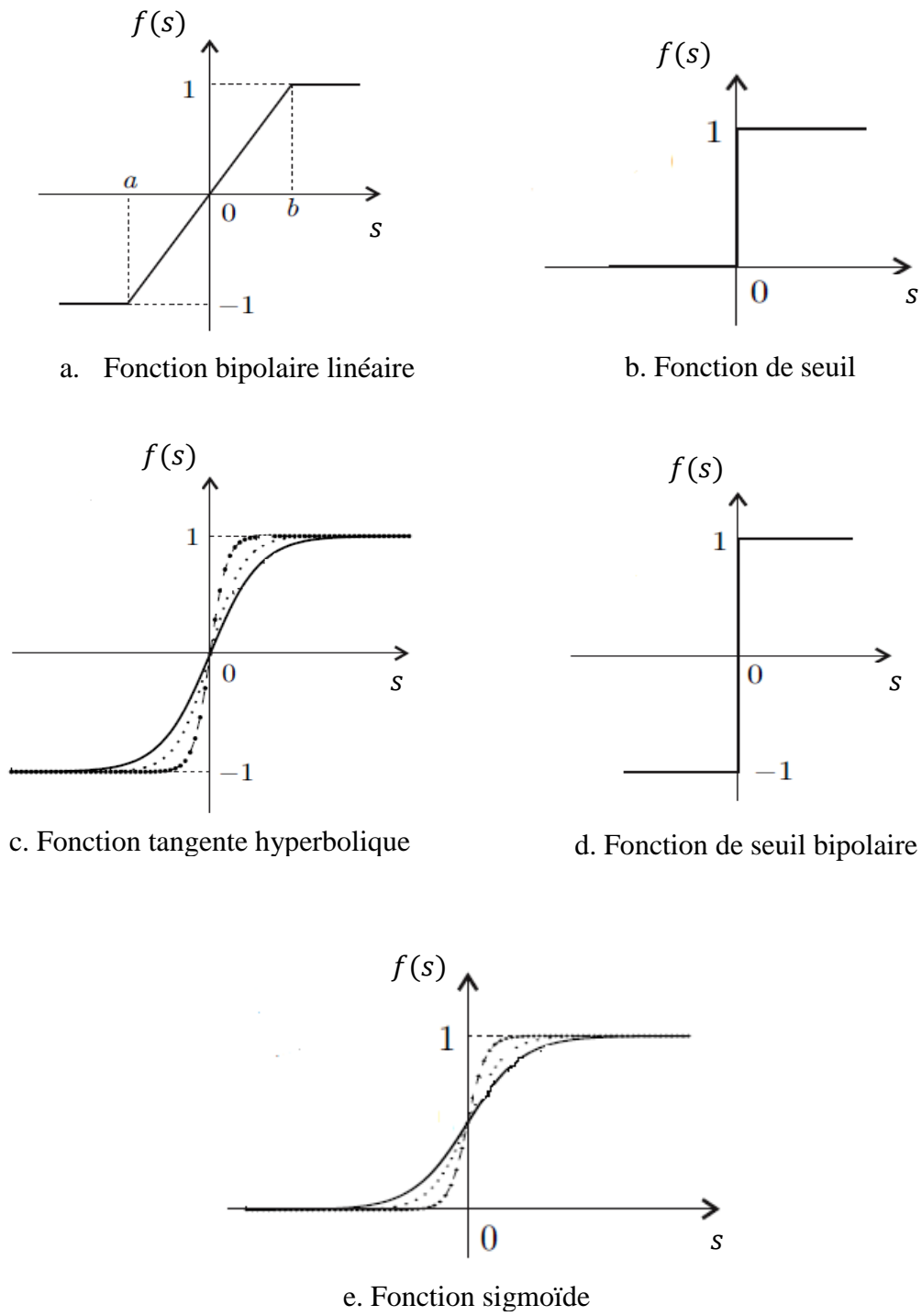


Fig. 4. 3 Fonctions d'activation d'un réseau de neurone

### 4.3 Architectures des réseaux de neurones

Comme nous venons de le définir, le neurone artificiel est une opération mathématique non linéaire paramétrée à valeurs bornées où la sortie est une combinaison des entrées, pondérées par les poids  $w_i$ . L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est à dire de la composition des fonctions non linéaires réalisées par chacun des neurones. Dans le contexte du traitement du signal et de l'automatique, un réseau de neurones est considéré comme un filtre non linéaire à temps discret. Pour caractériser un réseau de neurones, il est pratique d'utiliser son graphe. Ses nœuds sont les neurones, ses racines les entrées du réseau et les arcs sont les connexions pondérées par leur retard. S'il n'y a pas de cycle dans ce graphe, le réseau est non bouclé, sinon, il est bouclé. On distingue deux types de RNA : les réseaux non bouclés et les réseaux bouclés [149]. La problématique qui est posée est : quels systèmes dynamiques peuvent être réalisés par les RNA non bouclés et bouclés ?

Dans le domaine de la commande des systèmes, l'approximation de fonctions à valeurs continues présentent un très grand intérêt. Les résultats de recherche des travaux existant en bibliographie [149-153], affirment que pour toute fonction déterministe usuelle, l'existence d'une approximation par un réseau de neurones.

#### 4.3.1 Réseaux non bouclés (statiques)

Les réseaux de neurones non bouclés, réalisent des fonctions algébriques non linéaires de ses entrées et de ses paramètres par une composition des fonctions réalisées par chacun des neurones. Un réseau de neurones non bouclé est donc représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant depuis les entrées vers les sorties sans asservissement : si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les connexions entre eux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique : si l'on se déplace dans le réseau, à partir d'un neurone quelconque, en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ. Les neurones qui effectuent le dernier calcul de la composition de fonctions sont les neurones de sortie ; ceux qui effectuent des calculs intermédiaires sont les neurones cachés. La figure 4.2 représente un exemple de réseau de neurone non bouclé.

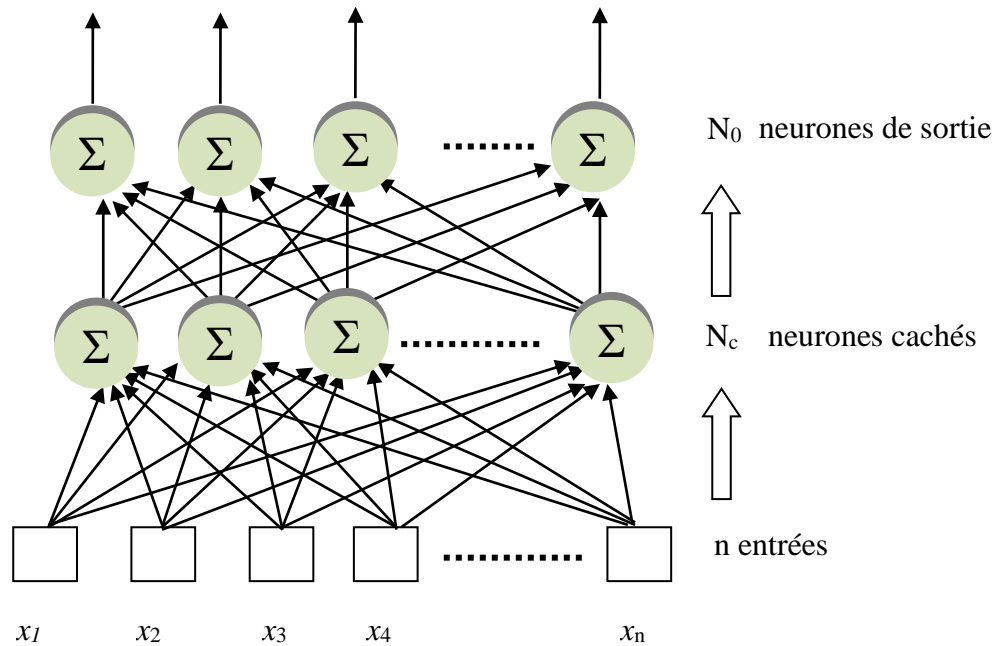


Fig. 4. 4 Réseau de neurones non bouclé

### 4.3.2 Réseaux bouclés (récurrents)

Les réseaux de neurones bouclés sont des systèmes dynamiques qui sont décrits par un système d'équations aux différences non linéaires couplées [149]. Le graphe d'un réseau de neurones bouclé (Fig. 4.3) est cyclique : lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ. Les réseaux bouclés à temps discret réalisent des équations aux différences non linéaires, par composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions. En effet, le réseau évolue au cours du temps pour atteindre un état d'équilibre stable ou instable. Comme en automatique des systèmes non linéaires, un état instable se manifeste par des cycles d'oscillations autour d'un état donné. Ils sont particulièrement adaptés pour construire des réseaux de type Hopfield ou Boltzman avec des procédures d'apprentissage non supervisés [141, 154].



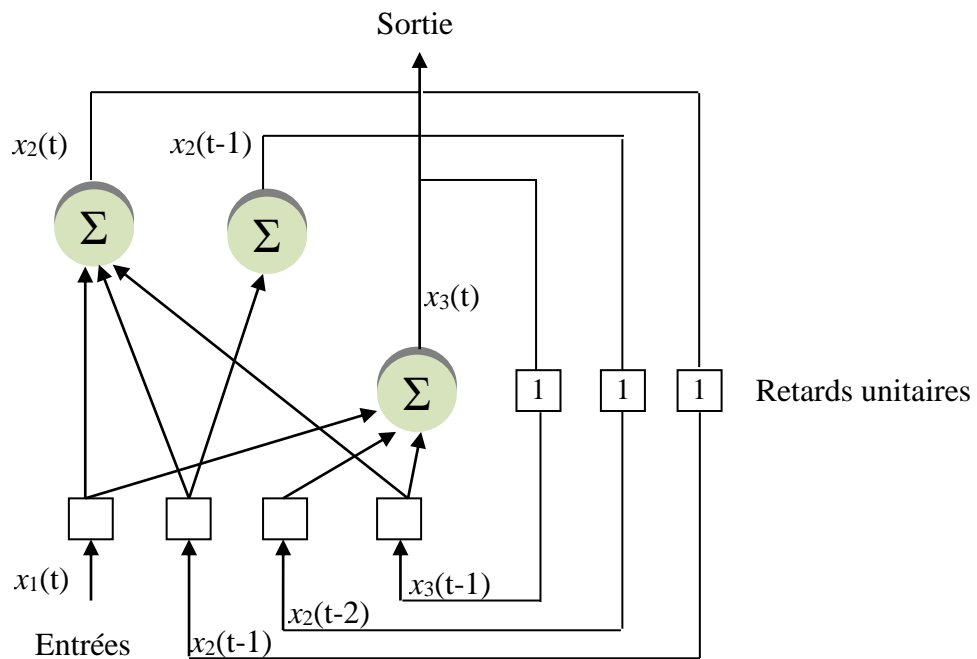


Fig. 4. 5 Réseau de neurones bouclé

### 4.3 Processus d'apprentissage numérique des réseaux de neurones

Pour que le réseau de neurone remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée, ces paramètres seront estimés à travers la procédure d'apprentissage. Ce processus offre la possibilité au RNA d'apprendre et d'améliorer ses performances [144]. Cela par la modification et l'adaptation des poids et des biais. A l'issue de cette définition, on peut distinguer deux types d'apprentissage qui sont largement utilisés : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé. En outre, il existe différents algorithmes d'apprentissage cités dans la littérature : correction d'erreur (apprentissage à rétropropagation), Boltzmann, Hebbien et compétitif [141, 144]. Grâce au processus d'apprentissage, les poids et les biais du réseau sont modifiés après chaque itération afin de converger vers les valeurs optimales du régime permanent.

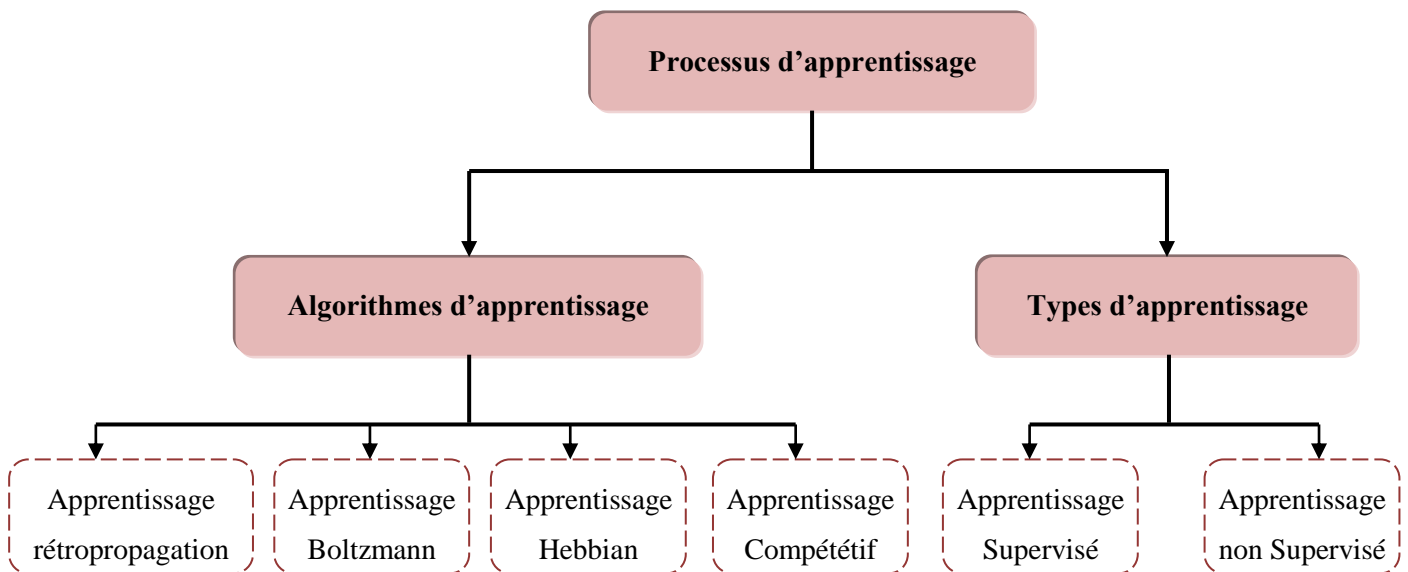


Fig. 4. 6 Classification des processus d'apprentissage

#### 4.4.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé consiste à adapter les poids du réseau de telle sorte que le signal d'erreur entre la sortie désirée ( $y_d$ ) et la sortie du RNA ( $y$ ) sera presque nul (Fig. 4.7). Ce dernier, sera utilisé par la suite pour le processus de mise à jour ou d'adaptation des paramètres du réseau. Le rôle de l'algorithme d'apprentissage est d'amener le réseau à remplir la fonction du réseau. Ce processus se répète itérativement jusqu'à ce que l'erreur sera minimale, c'est à dire que le RNA émule le comportement du superviseur en termes de relation entrées / sorties. Ce type d'apprentissage est souvent utilisé pour la commande des systèmes [154, 155].

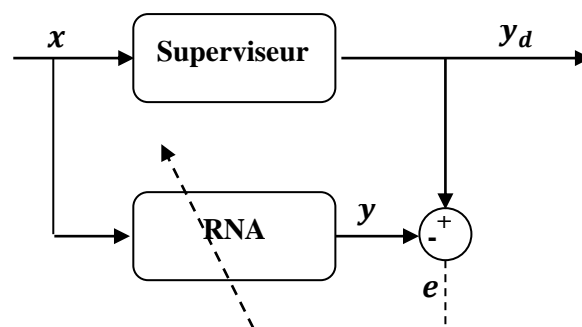


Fig. 4. 7 Schéma synoptique de l'apprentissage supervisé

#### 4.4.2 Apprentissage non supervisé

L'adaptation des paramètres du RNA par apprentissage non supervisé dépend seulement des critères internes du réseau, il est donc autodidacte, l'adaptation se fait uniquement avec les signaux d'entrées. Ce type d'apprentissage n'a pas besoin de superviseur, ni de signal critique pour générer les signaux d'entrées du réseau. L'algorithme d'apprentissage exploite pour ce faire une mesure prédéterminée de la qualité de représentation de la connaissance afin d'ajuster les paramètres du réseau. La structure du réseau change afin de coder les informations à l'entrée et créer de nouvelles classes [156]. L'algorithme d'apprentissage compétitif peut être utilisé pour la méthode d'apprentissage non-supervisé. La figure 4.8 illustre le principe de l'apprentissage non supervisé [141, 144].

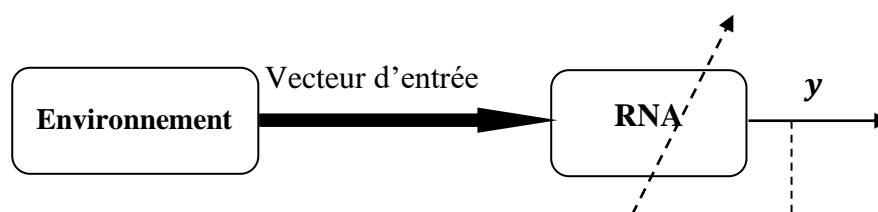


Fig. 4. 8 Schéma synoptique de l'apprentissage non supervisé

#### 4.5 Algorithmes d'apprentissage

L'ultime objectif de l'utilisation des algorithmes d'apprentissage est la modification des poids du réseau de neurone afin d'avoir la réponse désirée. Dans cette section, nous allons présenter les algorithmes d'apprentissage suivants : par correction d'erreur, à rétropropagation du gradient d'erreur et compétitif.

##### 4.5.1 Apprentissage par correction d'erreur

L'apprentissage par correction d'erreur s'articule sur la minimisation de la fonction (J) donnée par l'équation (4.2). Pour cela, des chercheurs ont utilisés la méthode de gradient [141, 144, 145]. Mais Widrow et Hoff ont proposé une solution d'approximation [157]. Dans cette approche, seules les valeurs instantanées de la somme de l'erreur au carré ont été retenues. La méthode qui en découle est aussi connue sous le nom d'algorithme des moindres carrés (Least Mean Square) (LMS). La figure 4.9 illustre un exemple d'un réseau de neurone constitué de trois couches.

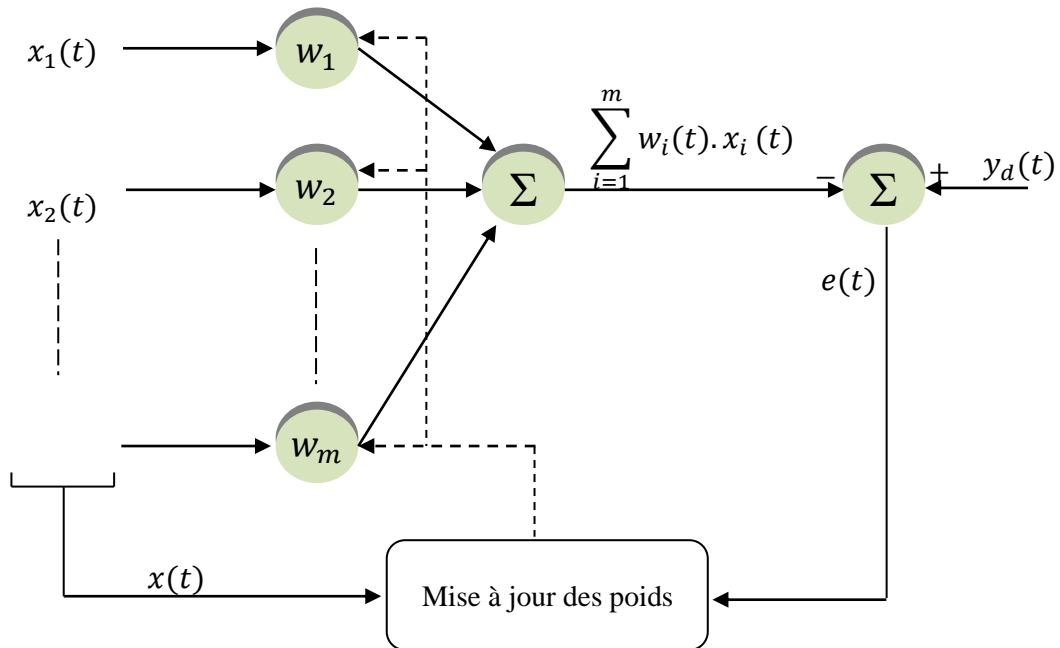


Fig. 4. 9 Elément Adaline

La première couche (couche d'entrée) et la couche cachée du réseau contiennent, respectivement, « m » et « n » neurones. Quant à la couche de sortie, elle contient « p » neurones.  $x(t)$ ,  $y_d(t)$  et  $y(t)$  représentent respectivement les vecteurs : d'entrée, de la sortie désirée et la réponse du RNA.

$$J = E \left[ \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p e_k^2(t) \right] \quad (4.2)$$

Où, E est l'espérance mathématique. La valeur  $\frac{1}{2}$  est utilisée pour simplifier l'écriture de la dérivation de J par rapport aux poids du réseau dans la méthode de correction de l'erreur [145].

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_m(t)]^T \quad (4.3)$$

$y_d$  : représente la sortie désirée :

$$y_d(t) = [y_{d1}(t) \ y_{d2}(t) \ \dots \ \hat{y}_{dp}(t)]^T \quad (4.4)$$

La réponse du réseau est donnée par :

$$\hat{y}(t) = [\hat{y}_1(t) \ \hat{y}_2(t) \ \dots \ \hat{y}_p(t)]^T \quad (4.5)$$

L'erreur  $e_k(t)$ , est définie par la différence entre la réponse désirée et la réponse du réseau de neurone pour le  $k^{\text{ème}}$  neurone de la couche de sortie comme suit :

$$e_k(t) = y_{dk}(t) - \hat{y}_k(t) \quad (4.6)$$

#### 4.5.2 Apprentissage à rétro-propagation du gradient d'erreur

Dans les années 80, le domaine de la commande neuronale a eu une grande poussée avec l'arrivée de l'algorithme de rétro-propagation et la réalisation d'un réseau simple avec une seule couche cachée peut approcher des fonctions continues avec des niveaux arbitraires de précision [158]. En 1985, Rumelhart, Mc Clelland, Werbos et Le Cun ont découvert l'algorithme de rétro-propagation du gradient pour l'apprentissage des perceptrons multicouches. En effet, cette découverte permet de réaliser une fonction non linéaire toute en la décomposant en une suite de fonctions linéairement séparables [159]. L'algorithme d'apprentissage à rétro-propagation du gradient d'erreur est une généralisation de la méthode LMS. Le problème avec l'algorithme d'apprentissage LMS c'est qu'il ne peut être utilisé que pour résoudre un réseau à une seule couche cachée (Adaline). En plus, il ne résout que les problèmes linéaires grâce à sa représentation linéaire des relations entre les entrées et la sortie. Contrairement à LMS, l'algorithme de rétro-propagation peut être utilisé pour la résolution d'un réseau multicouche. Un réseau de perceptron multicouche (Multi Layer Perceptron - MLP) avec l'algorithme de rétro-propagation de l'erreur prend en compte la non-linéarité de l'environnement en introduisant des fonctions d'activation non linéaires dans sa structure. En dernière analyse, on peut conclure que le MLP est plus performant que le réseau Adaline face aux problèmes non linéaires de l'identification et de la commande. Afin de mettre à jour les poids du RN, La sortie de chaque neurone sera dérivée et stockée localement pour calculer le gradient de l'erreur [156, 160].

#### 4.5.3 Apprentissage compétitif

Contrairement aux autres apprentissages, cet algorithme permet aux neurones de se mettre en compétition pour savoir lequel sera activé à un instant donné. En conséquence, il produit un vainqueur et parfois un ensemble de neurones voisins du vainqueur, qui seront par la suite, les seuls bénéficiaires d'une adaptation de leurs poids. Pour cela, l'apprentissage compétitif est dit local. Avec cette caractéristique, il peut être utilisé dans l'apprentissage non supervisé. La

figure 4.10 montre la structure générale de ce type de réseau. Un neurone  $j$  est dit « *neurone gagnant* » si, la somme d'activité représentée par l'équation (4.7) est la plus grande parmi toutes celles des neurones de sortie. Ce neurone est donc mis à « 1 » et les autres sont mis à zéro. En utilisant l'algorithme d'apprentissage compétitif présenté dans [141], l'adaptation  $\Delta w_{ij}$  appliquée au poids  $w_{ij}$  est donnée par :

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} \cdot x_i \quad (4.7)$$

$$\Delta w_{ij} = \begin{cases} \eta \cdot (x_i - w_{ij}) & \text{si } j^{\text{ème}} \text{ neurone gagne la compétition} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.8)$$

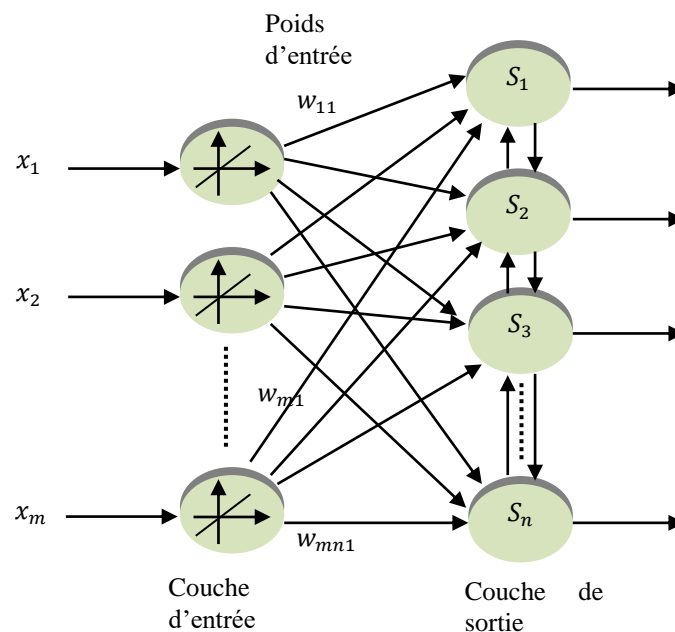


Fig. 4. 10 Structure d'un réseau de neurones avec apprentissage compétitif

#### 4.6 Commande neuromimétique des systèmes dynamiques

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle joue un rôle très important dans tous les domaines et notamment dans la commande des systèmes dynamiques et complexes. Une commande est dite intelligente, si elle peut s'adapter en fonction des changements de situations ou de configurations, et qui est capable de prendre en compte des phénomènes imprévus [143]. On distingue les types de commandes neuronales suivantes : commande directe, commande indirecte, commande inverse-directe et la commande inverse [141, 144, 145].

### 4.6.1 Commande directe

On retrouve dans cette catégorie, la commande supervisée et la commande par modèle inverse. L'adaptation en continu des modèles inverse et supervisé se fait par rétro-propagation de l'erreur qui correspond à la différence entre la commande désirée et la commande prédite par le modèle neuronal.

#### 4.6.1.1 Commande directe par modèle inverse

Une des propriétés les plus importantes des RNA, est leur aptitude à apprendre presque n'importe quelle relation à partir d'un ensemble d'exemplaires d'entrées/sorties. Cette propriété est vraie aussi pour l'apprentissage de l'inverse de ces relations. Cependant, La commande directe par modèle inverse est fondée sur l'apprentissage de l'inverse du système à commander. En pratique, un modèle dynamique n'est pas toujours inversible. Si le modèle est inversible, il est possible de concevoir un contrôleur en plaçant ce modèle inverse en série avec le système à commander (Fig. 4.11), ce qui permet de commander le système en boucle ouverte.

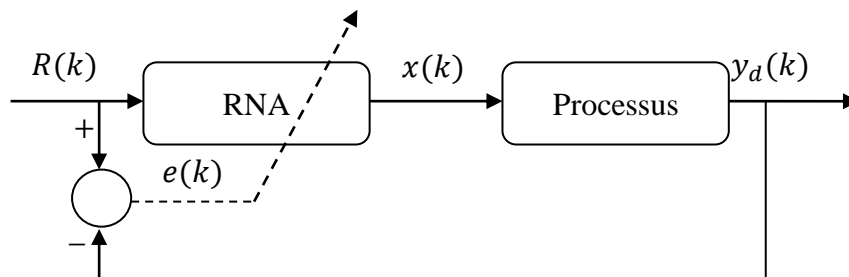


Fig. 4. 11 Structure de la commande basée sur l'inverse du modèle

En effet, le problème qui se pose pour la commande directe par modèle inverse est l'estimation de l'inverse du modèle dynamique. L'estimation du modèle inverse est imparfaite et des erreurs apparaissent. Par conséquent, nous ajoutons un correcteur classique en parallèle avec le modèle inverse (Fig. 4.12).

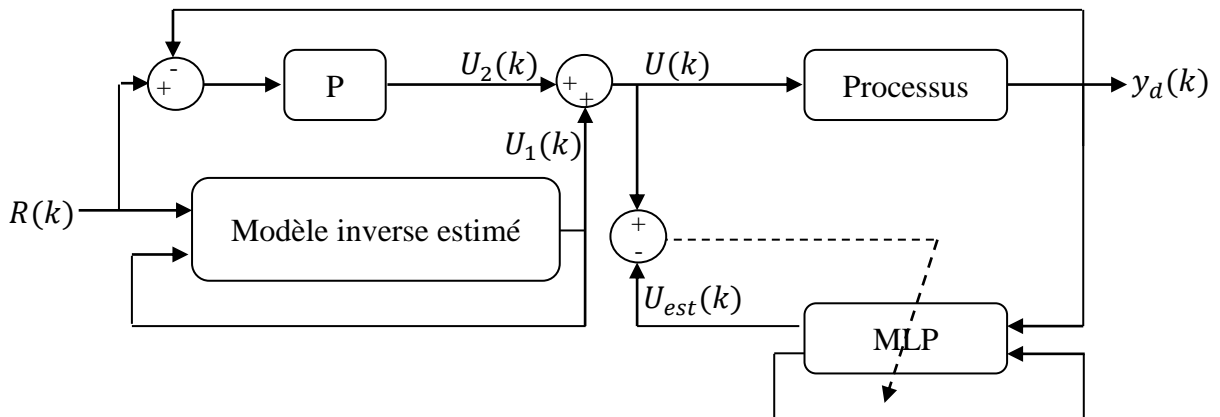


Fig. 4. 12 Commande directe d'un système par modèle inverse

L'erreur « e » est donnée par :

$$e = R(k) - y_d(k) \quad (4.9)$$

Avec :

$y_d(k)$  : sortie du processus

$R(k)$  : signal de référence

Le signal de commande  $U(k)$  est donné par le modèle neuronal inverse estimé, force la sortie  $y_d(k)$  du système de suivre sa consigne  $R(k)$ . L'action de commande auxiliaire  $U_2(k)$  fournie par le contrôleur classique aide à compenser les imperfections de l'estimation inverse du système. L'avantage de cette approche est le peu de calculs qu'elle nécessite en ligne.

#### 4.6.1.2 Commande directe avec modèle de référence

Le principe de la commande directe avec modèle de référence est l'ajustement continu des poids du réseau de neurones, pour faire suivre au processus la sortie du modèle de référence  $M(k)$ . Nous pouvons aussi l'appeler commande adaptative à base de modèle de référence (Model Referencing Adaptive Control MRAC) [144]. La figure 3.13 illustre le principe de la commande directe avec modèle de référence.



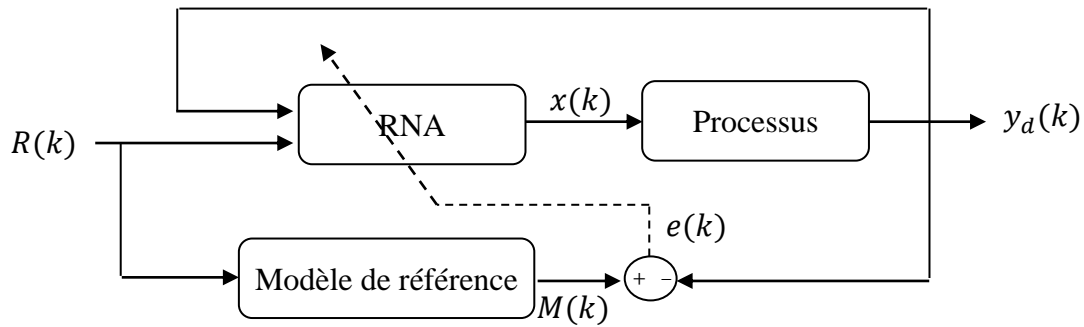


Fig. 4. 13 Commande directe avec modèle de référence

#### 4.6.2 Commande inverse-directe sans modèle de référence

La figure 4.14, montre le schéma de principe de la commande inverse-directe sans modèle de référence. Cette méthode consiste à estimer l'inverse du processus en utilisant le réseau de neurone identificateur (RNI), puis ce dernier sera utilisé pour contrôler le processus en boucle fermée.

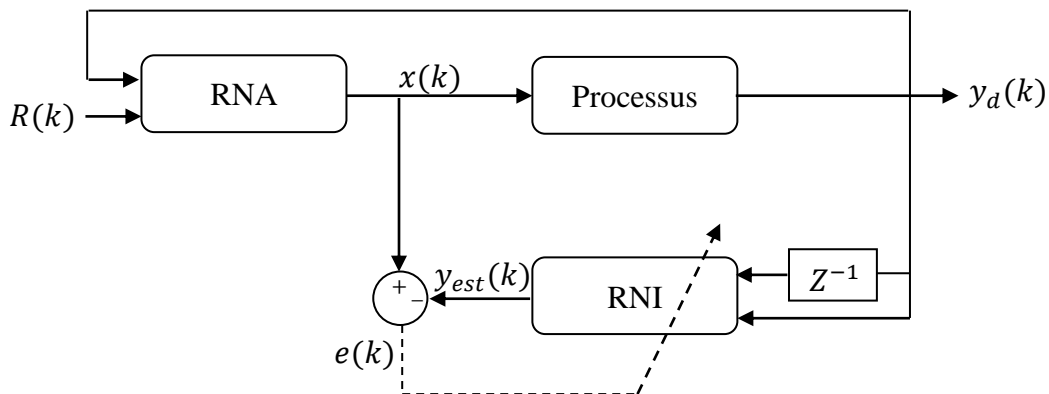


Fig. 4. 14 Commande inverse directe sans modèle de référence

#### 4.6.2 Commande indirecte

Fig. 4.15, montre l'objectif visé par la commande indirecte de réseau de neurone. Il est clair que le réseau de neurone dans cette méthode de commande est utilisé pour modéliser ou paramétrer le système. Par ailleurs, le réseau de neurone estime la sortie  $k+1$  du processus, qui sera après comparée à la consigne. L'adaptation des paramètres se fait en continu par rétropropagation de l'erreur qui correspond à la différence entre la sortie du procédé et la sortie prédite par le modèle neuronal.

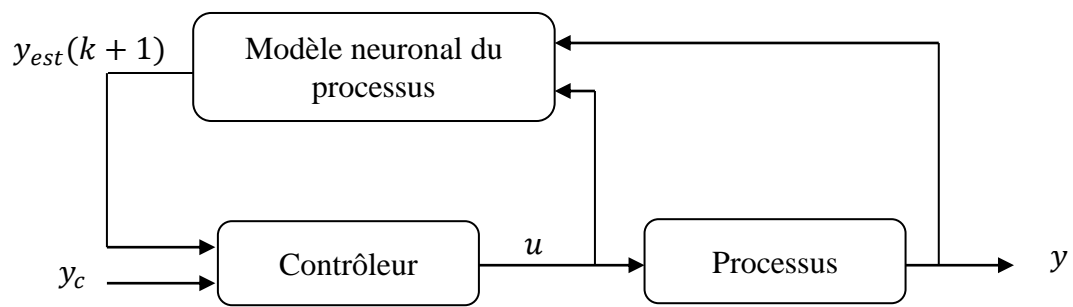


Fig. 4. 15 Structure de la commande indirecte

#### 4.6.3.1 Commande indirecte avec modèle de référence

Ce type de commande consiste à utiliser deux réseaux de neurones : un pour l'identification et le deuxième pour le contrôle du processus. Le contrôleur neuronal RNC reçoit en entrée le signal de référence ainsi que la sortie désirée du processus. En plus, l'erreurs  $e_1$  et  $e_2$  sont utilisées pour l'apprentissage des poids des réseaux RNI et RNC, respectivement. L'erreur entre  $y_d(k)$  et  $M(k)$  permet la mise à jour en ligne des poids du contrôleur neuronal et la sortie du système est forcée à suivre la sortie du modèle de référence. La figure 4.16, illustre le principe de ce type de commande. L'apprentissage en ligne de deux réseaux de neurones assure une bonne estimation vis-à-vis des perturbations et des changements paramétriques. En revanche, pour cette structure de commande l'inconvénient majeur est la quantité de calculs. La fonction de coût  $J$  est donnée par [145]:

$$J = \frac{1}{2}(y_d - M)^2 \quad (4.10)$$

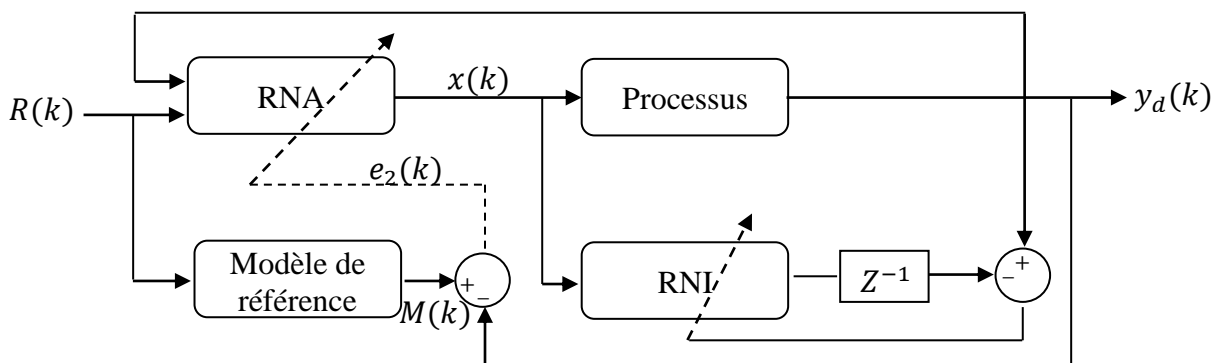


Fig. 4. 16 Commande indirecte avec modèle de référence

#### 4.6.4 Commande inverse avec modèle de référence

Contrairement à la commande indirecte, la commande inverse avec modèle de référence (Fig. 4.17), le réseau de neurone RNI est utilisé pour l'estimation du modèle inverse du processus. Le RNI reçoit en entrée la sortie désirée du processus.  $e_1(k)$ , la différence entre l'entrée du processus  $x(k)$  et la sortie estimée du RNI  $y_{est}(k)$  permet d'ajuster les paramètres du RNI.

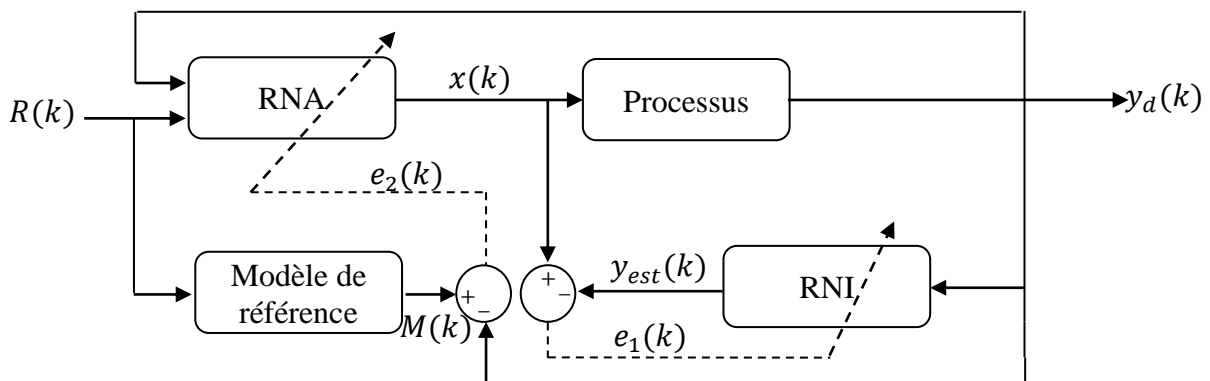


Fig. 4. 17 Commande inverse avec modèle de référence

#### 4.6.5 Différentes architectures pour émuler un régulateur

Le processus d'apprentissage permet au réseau de neurone d'adapter et d'optimiser ses poids pour l'identification des systèmes dynamiques. Par conséquent, il peut imiter d'autres régulateurs. La cause principale pour remplacer le régulateur analytique par le régulateur neuronal est due au fait que la procédure analytique pourrait être très gourmande en calcul et exigerait donc un équipement conséquent. De plus, un apprentissage en ligne permet d'adapter le neuro-contrôleur à des perturbations ou à des changements internes du système. La figure 4.18, illustre quatre architectures de commande dont le régulateur classique proportionnel intégral PI est pris comme exemple. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous verrons plus de détails concernant un émulateur du régulateur classique PI.

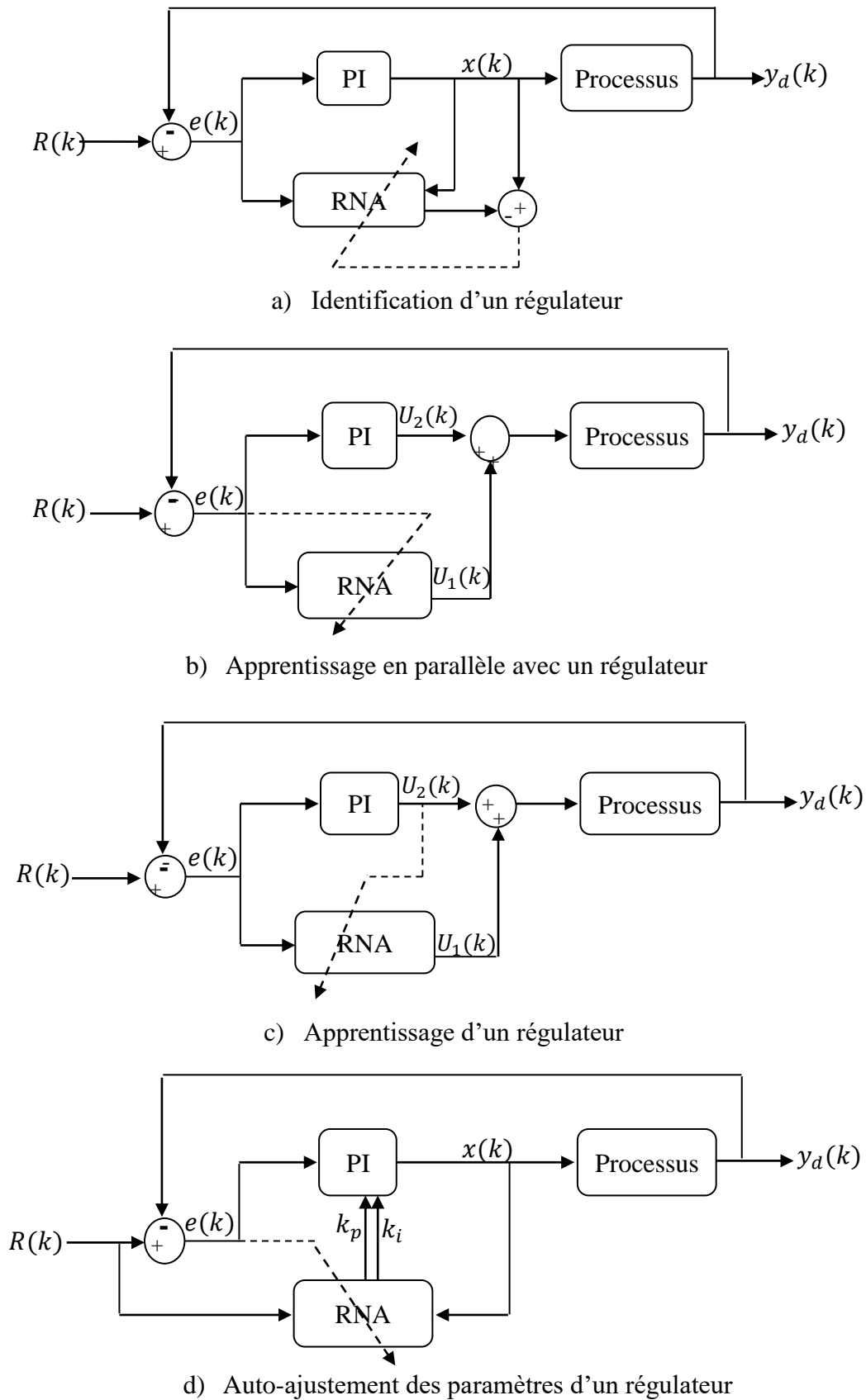


Fig. 4. 18 Commande neuronale par apprentissage d'un régulateur classique

Les régulateurs neuronaux à apprentissage supervisé, permettent d'imiter d'autres régulateurs. Ce type d'apprentissage consiste à adapter les poids du réseau de manière que sa sortie soit proche de la sortie produite par le superviseur. La figure 4.18 a, représente la structure de la commande par identification directe d'un régulateur. L'utilisation d'un réseau de neurone nous permet d'identifier le régulateur PI en hors ligne. Nous remplacerons le régulateur PI dans la boucle de commande par le régulateur neuronal. Le principe de la commande en parallèle avec le régulateur PI est représenté sur Fig. 4.18 b. Cette architecture consiste à utiliser le réseau de neurone en tant que régulateur qui fonctionne en parallèle avec le régulateur PI. L'erreur calculée à partir de la consigne  $R(k)$  et la sortie du processus  $y_d(k)$ , permet d'adapter les poids du réseau de neurone en ligne. Le principe de cette technique de commande est basé sur la correction de la sortie du régulateur, et cela par l'addition de la sortie du régulateur neuronal  $U_2(k)$  avec la sortie du régulateur classique  $U_1(k)$ . En outre, la commande par apprentissage d'un régulateur représentée sur la figure 4.18 c, consiste en la mise à jour des paramètres du réseau de neurones par la sortie  $U_2(k)$  du régulateur PI, et cela dans un objectif de minimiser  $U_2(k)$ . A la fin, après avoir une valeur très faible de  $U_2(k)$ , le réseau de neurone sera utilisé par la suite pour la commande du processus en boucle ouverte. La Fig. 4.18 d, présente la commande par auto-ajustement des paramètres du régulateur. Cependant, les paramètres : proportionnel  $K_p$  et Intégral  $K_i$  du régulateur PI seront calculés en ligne par l'intermédiaire du réseau de neurone. En dernière analyse, cette architecture est appelée commande adaptative grâce à la caractéristique adaptative du régulateur classique PI. En guise de conclusion, la première structure est très intéressante lorsqu'on veut s'affranchir des contraintes liées à l'implémentation des régulateurs classiques. Cependant, la deuxième structure de commande garde le régulateur classique est le réseau de neurone corrigé en temps réel les insuffisances du régulateur PI, notamment lors du changement des paramètres du processus. Finalement, la dernière structure (Fig. 4.18 d) permettra aux paramètres du régulateur PI de suivre en ligne les changements des paramètres du processus.

## Partie II : Régulateur neuronal

### 4.7 Définition

Les processus dynamiques sont des systèmes physiques qui évoluent au cours du temps, dont la valeur des sorties à un instant donné dépend des valeurs de ses entrées à ce même instant et de leurs valeurs précédentes. Ce concept de processus est inséparable du concept de modèle

conçu comme système représentatif d'un système physique. On suppose que les processus qui nous intéressent peuvent être convenablement décrits par des modèles mathématiques. De tels modèles sont caractérisés par des variables d'état, qui constituent l'information minimale nécessaire au calcul de l'évolution des sorties, si toutes les entrées sont connues. Dans la commande des systèmes, le perceptron multicouche MLP (Multi layer Perceptron) est très utilisé. Un perceptron est un réseau de neurones artificiel à propagation directe (feedforward). La première couche est celle des entrées qui s'occupe de la distribution des variables d'entrées. Les couches entre la couche d'entrée et la couche de sortie qui est la dernière couche du réseau, sont appelées couches cachées. Cette méthode est basée sur un seul réseau.

#### 4.8 Conception d'un système de commande

L'automatique est une science qui traite de la modélisation, de l'analyse, de l'identification et de la commande des systèmes dynamiques. La commande d'un processus consiste en la détermination des commandes à lui appliquer, de manière à assurer aux variables à contrôler (sorties) un comportement défini. L'action de commande est une action susceptible de changer l'état du système à commander. Ces commandes sont délivrées par un organe de commande ; le processus et son organe de commande constituent le système de commande (Fig. 4.19). L'élaboration de l'organe de commande s'articule en plusieurs étapes.

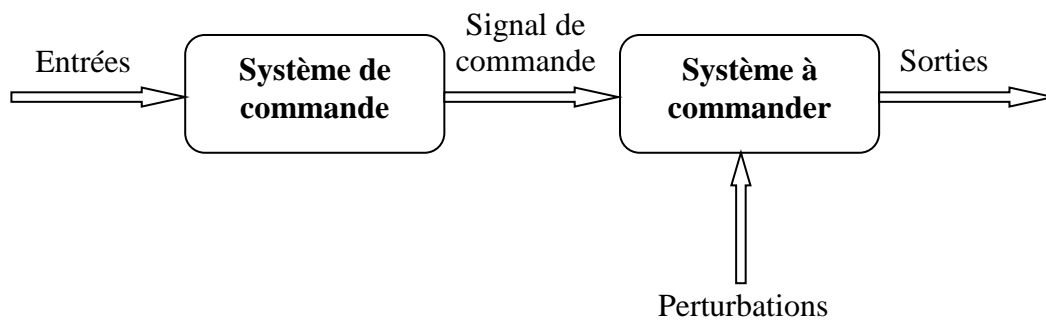


Fig. 4. 19 Système de commande

Le système (organe) de commande comprend un élément nécessaire qui est le régulateur, il effectue le calcul de la commande à appliquer au processus à partir de la consigne et de l'état du processus. L'organe de commande comprend généralement d'autres éléments : un modèle de référence, un observateur, ou encore un modèle interne. Cependant, un régulateur peut avoir la structure d'un PI classique, flou ou neuronale. Afin que le système de commande

assure une tâche bien définie, il faut configurer le régulateur, en hors-ligne à l'aide de modèle : ceci caractérise les méthodes indirectes de synthèse du régulateur. Par ailleurs, L'estimation des coefficients du régulateur correspond à la phase d'apprentissage du réseau de neurones. Dans cette section, on s'intéresse à la synthèse du système de commande adaptative, c'est-à-dire pour lesquels l'apprentissage du correcteur est entièrement réalisé avant sa connexion au processus.

#### 4.9 Structure du régulateur neuronal (CRN)

Dans le but de contrôler indépendamment les courants rotoriques d'axes  $dq$  et donc les puissances active et réactive statoriques de la GADA, d'une part, et d'assurer un contrôle robuste face aux changements paramétriques, d'autre part. On présente dans cette section, la structure du régulateur neuronale proposé. Un réseau de neurone peut avoir plusieurs couches et chaque couche a une matrice des poids  $W$ , un vecteur des biais  $b$  et un vecteur de sortie. Le nombre des couches cachées ainsi que le nombre de neurones dans chaque couche n'est pas défini. En effet, la détermination des combinaisons de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche qui peut donner de bonnes performances pour un problème donné n'a pas de directives générales. Dans notre cas, le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche cachée a été choisi heuristiquement basé sur l'erreur [161]. Après plusieurs tentatives, on a opté pour deux couches cachées qui contiennent 06 neurones, 04 neurones pour la première couche et 02 neurones pour la seconde. La figure 4.20, présente la structure du régulateur neuronal. L'algorithme d'apprentissage utilisé pour la mise à jour des poids du réseau de neurones est celui de Levenberg-Marquardt (LM), qui est combinaison des deux méthodes : gradient simple et Newton avec la minimisation de la fonction de performance du carré de l'erreur (mean square error performance function). Cet algorithme paraît être plus rapide pour l'apprentissage d'un réseau de neurones de type feedforward (jusqu'à plusieurs centaines de poids). Ses fonctions d'activation sont de type sigmoïde « tansig ». En outre, la fonction de transfert linéaire (fonction d'approximation) a été utilisée dans la troisième couche (dernière couche ou couche de sortie) du réseau neuronal multicouche. Elle est constituée ici par un seul neurone. Sa fonction d'activation est du type linéaire bornée « purelin » [162]. Les neurones cachés sont répartis en couches successives, les neurones appartenant à une couche donnée n'étant commandés que par les neurones de la couche précédente, et ceux de la première couche n'étant connectés qu'aux entrées externes.

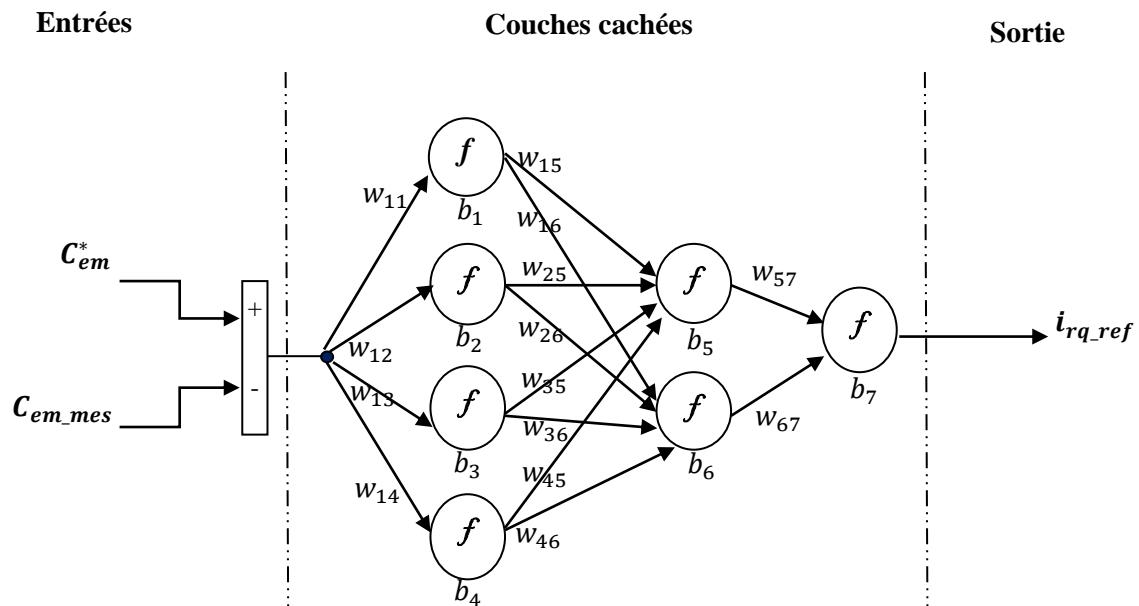


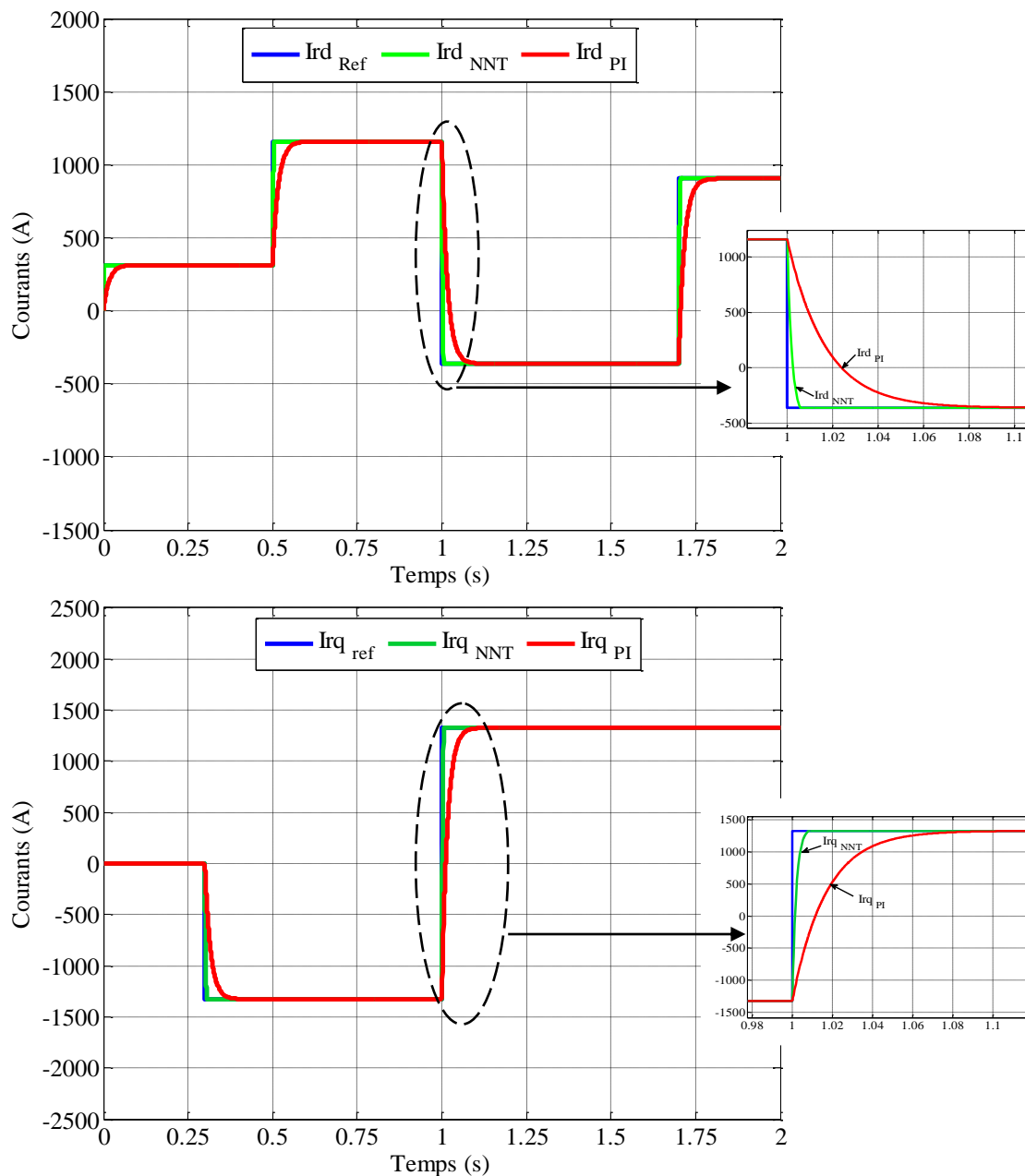
Fig. 4. 20 Structure du régulateur neuronal [163]

#### 4.10 Simulation et interprétations

Dans cette section, le comportement de la machine asynchrone à double alimentation a été simulé dans l'environnement Matlab/Simulink sous la variation des paramètres de la GADA notamment : l'inductance rotorique, l'inductance statorique et la résistance rotorique ont été étudiés. En effet, notre vision consiste à l'utilisation du réseau de neurone pour la réalisation d'un régulateur capable de rendre le système de commande plus robuste vis-à-vis des variations paramétriques. Ce choix est justifié par le fait que les poids ainsi que les biais du RN sont auto-ajustables et cela grâce à la phase d'apprentissage du réseau. Cependant, les performances du système à contrôler avec le régulateur proposé sont comparées avec le régulateur conventionnel PI. Les paramètres du système, la commande MPPT et les paramètres du régulateur PI sont respectivement données dans le tableau. A.1 (Annexe A). Pour le cas où les paramètres de la machine sont nominaux. La Fig. 4.21 montre que les composantes d et q des courants rotoriques, le couple électromagnétique et la puissance réactive suivent parfaitement leurs références (Tableau. B.4 (Annexe B)). Toutes ces grandeurs évoluent sans aucun dépassement et erreur statique notables. En plus, leurs temps de réponse est acceptable. Dans le but de tester la robustesse du régulateur proposé, les valeurs des paramètres ont été variées comme suit :



- variation des inductances statorique  $L_s$  et rotorique  $L_r$  de + 20%. Cependant, les effets des variations considérées ont été étudiés séparément (Fig. 4.22 et Fig. 4.23).
- variation des inductances statorique et rotorique ainsi que la résistance au rotor, ont été testées et représentées simultanément (Fig. 4.24).



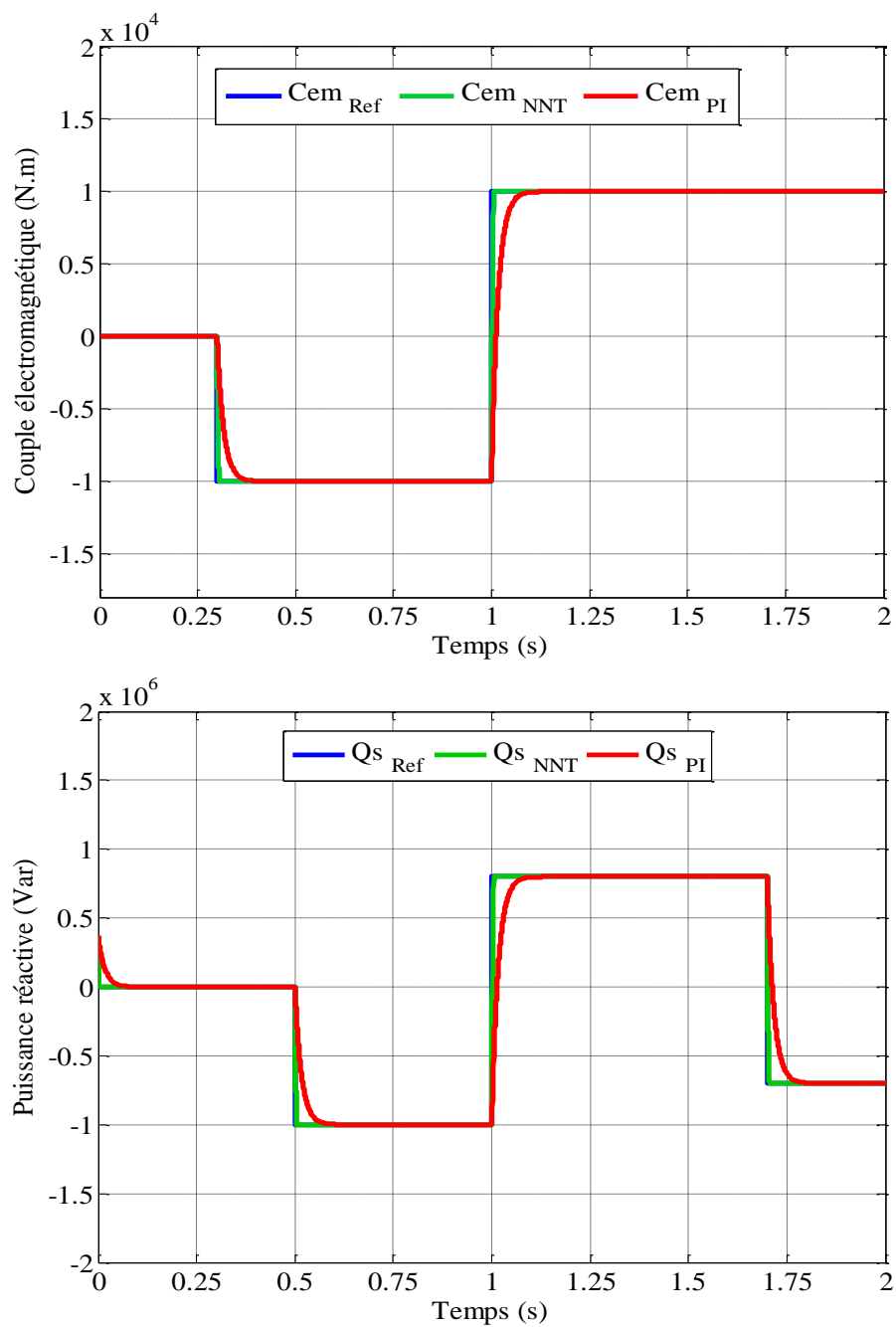
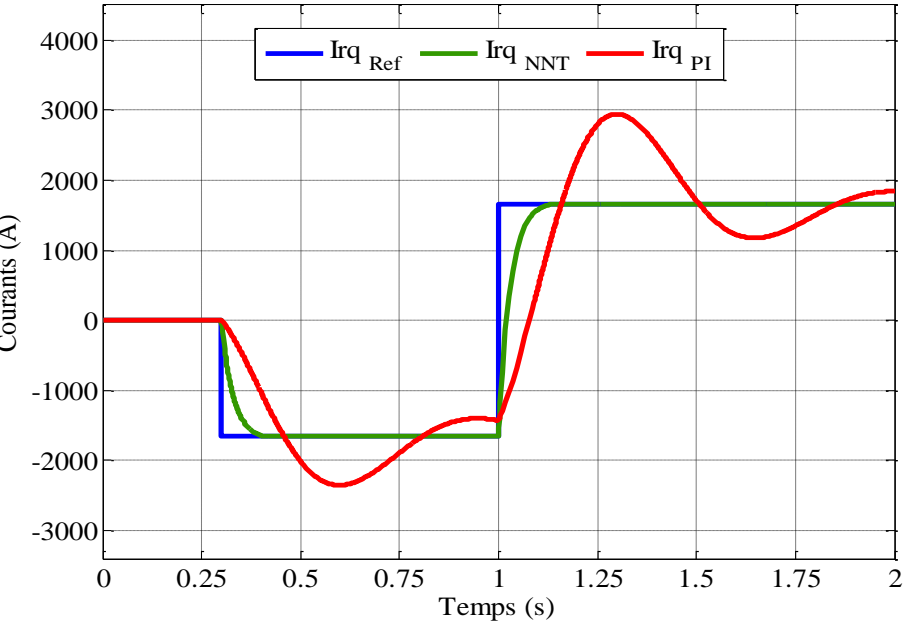
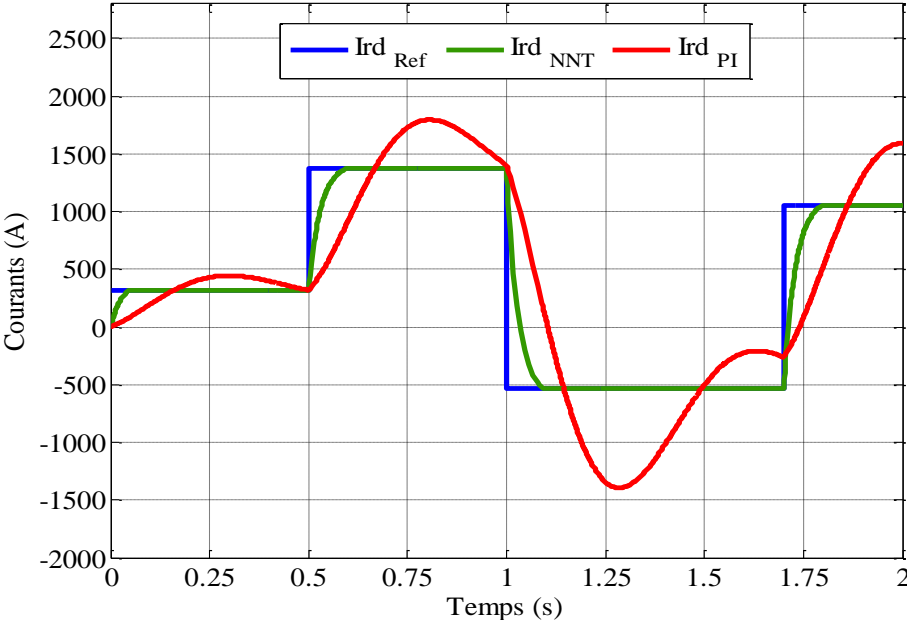


Fig. 4. 21 Réponse du système du système sans variations paramétriques



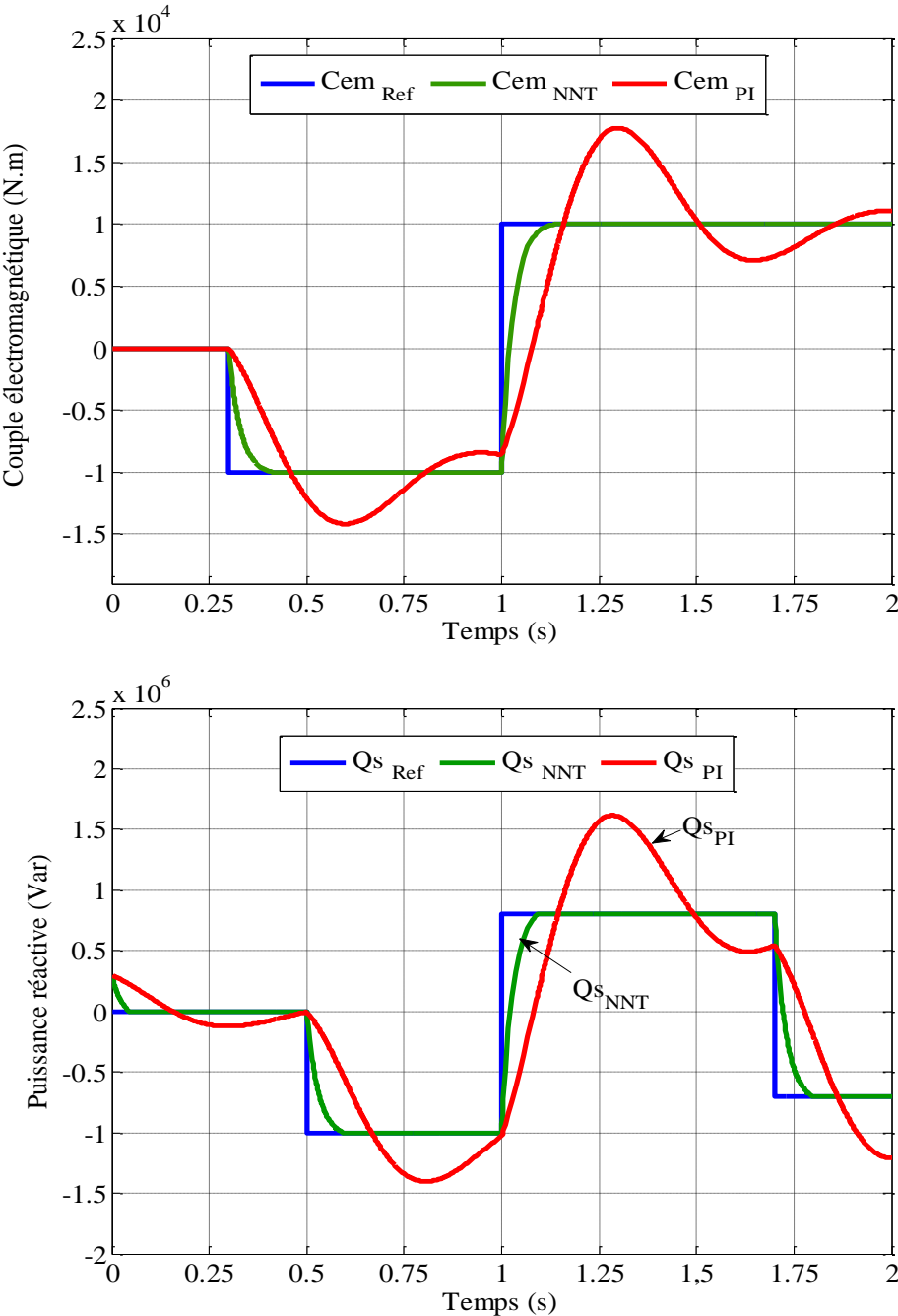
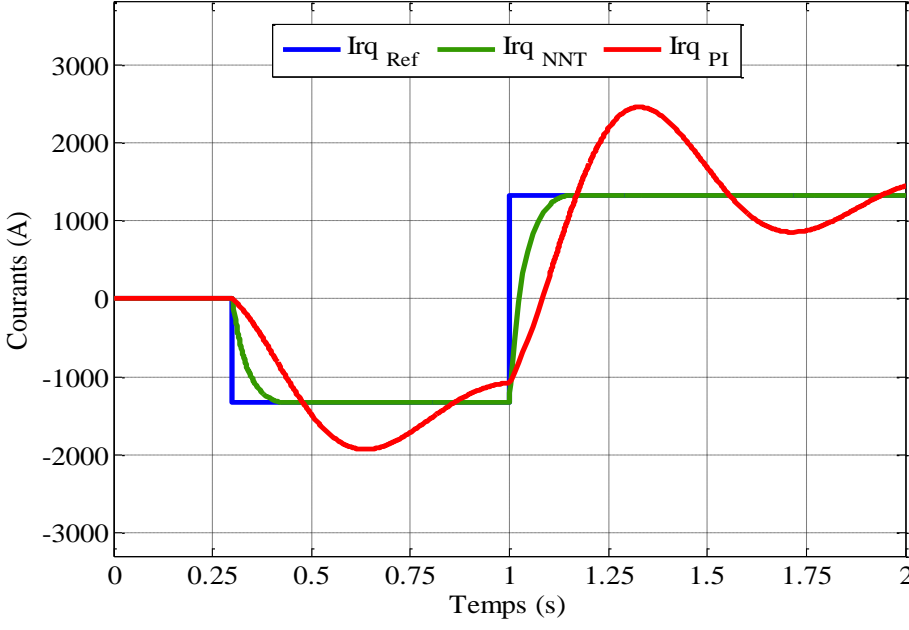
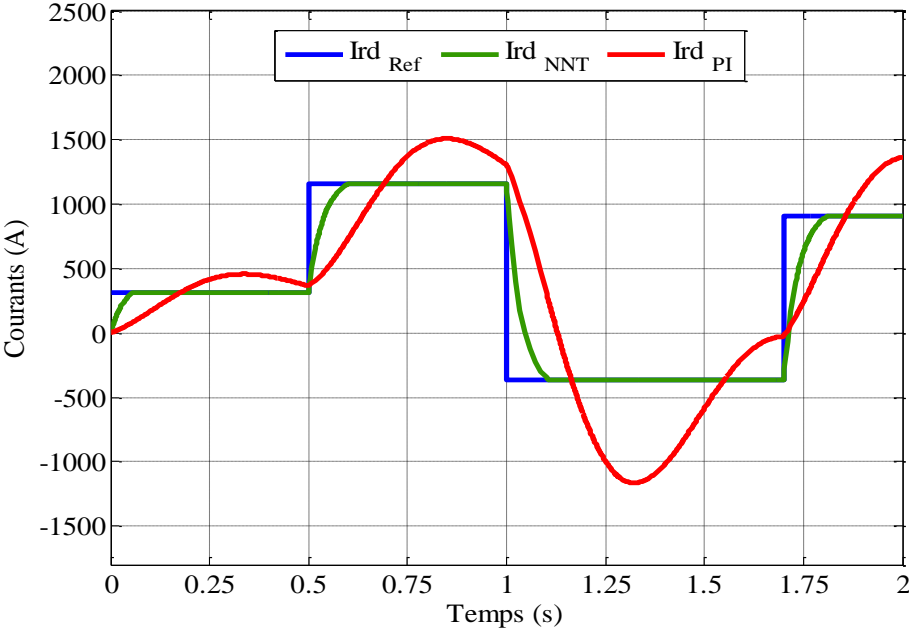


Fig. 4. 22 Réponse du système avec variation de l'inductance au stator (+20%)



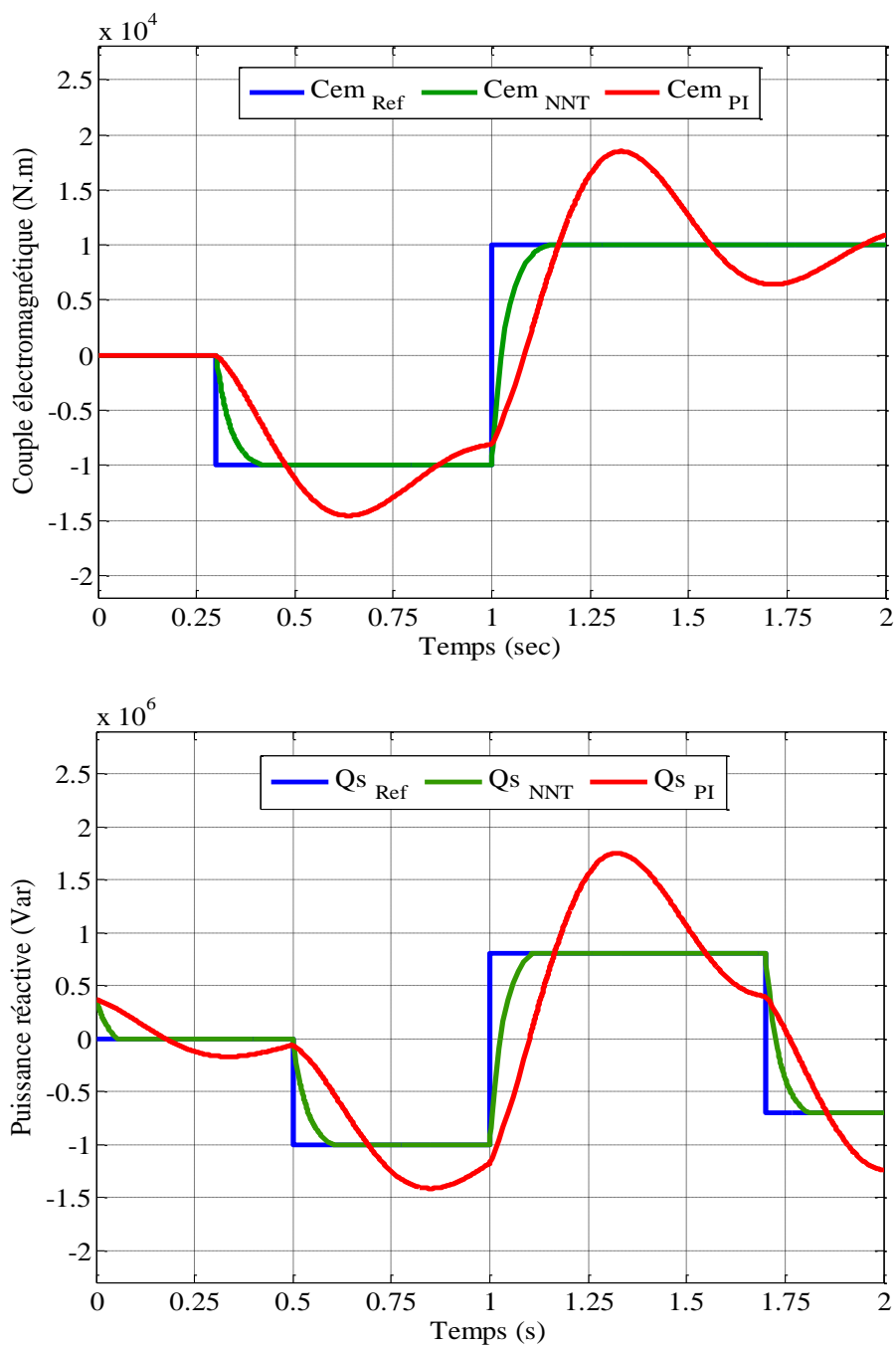
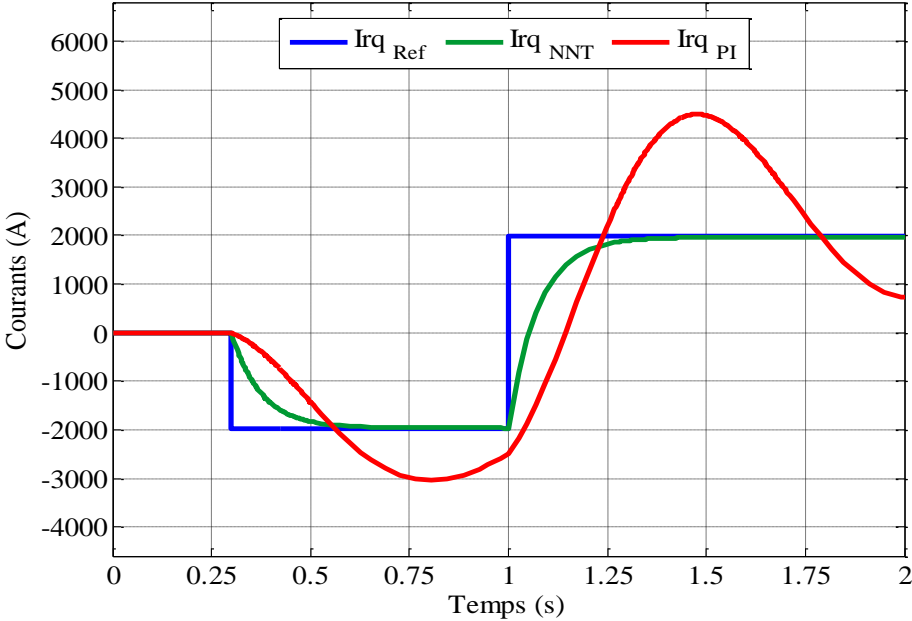
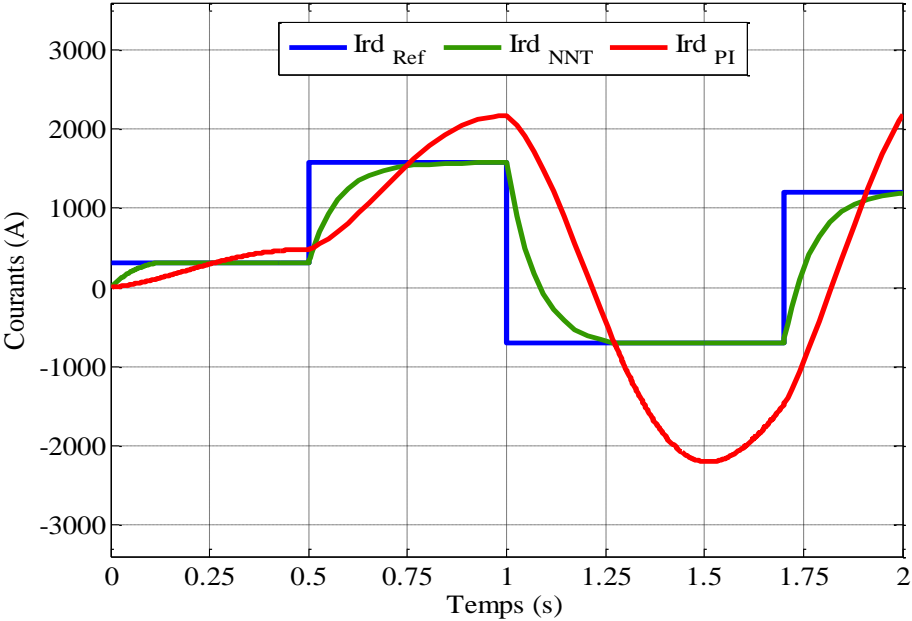


Fig. 4. 23 Réponse du système avec variation de l'inductance au rotor (+20%)



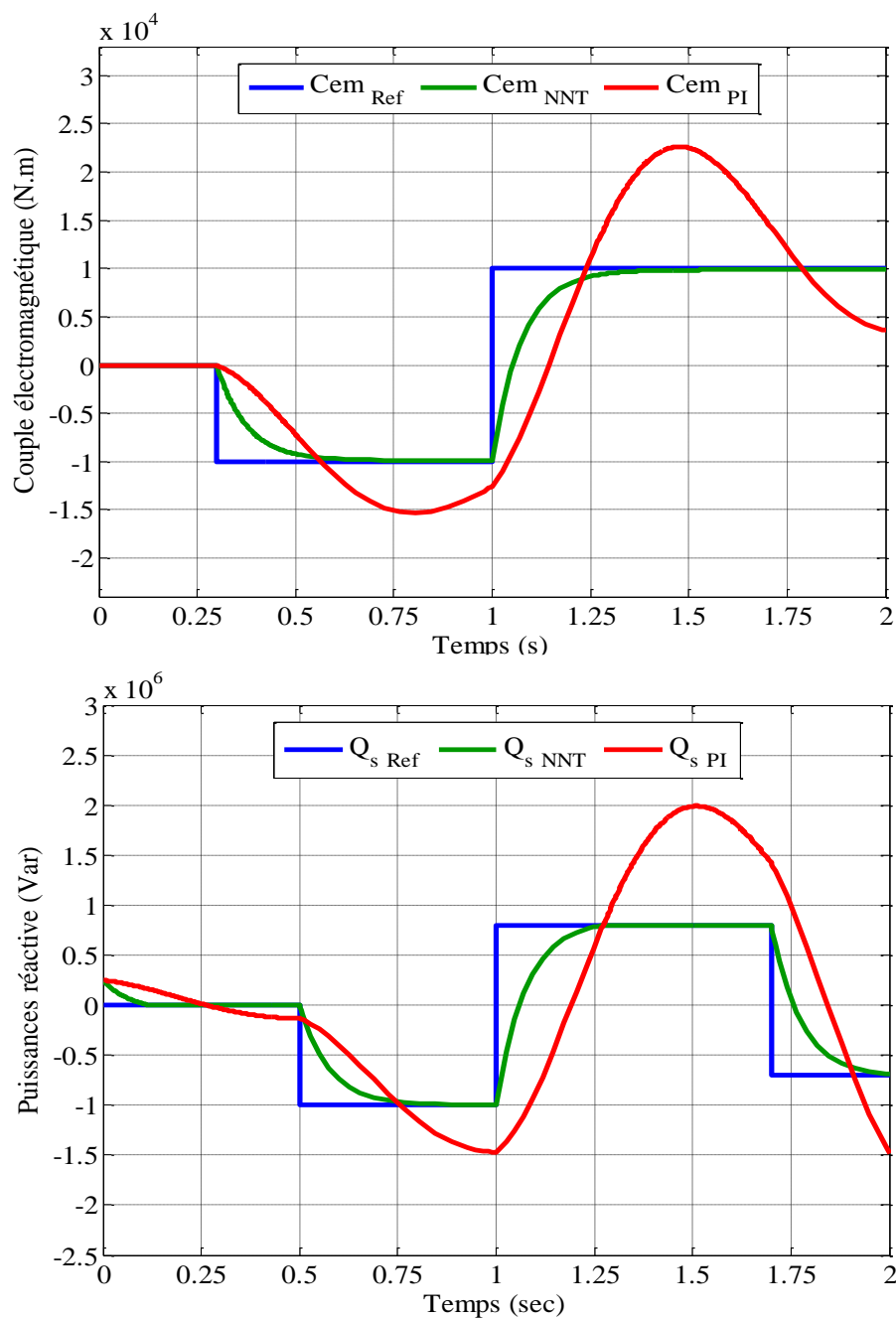


Fig. 4. 24 Réponse du système avec variation des paramètres  $L_m$  (+20%),  $L_s$  (+25%),  $L_r$  (+25%) et  $R_r$  (+50%) simultanément.

Concernant la variation de  $L_s$  (+20%), les résultats de simulation sont illustrés sur Fig. 4.22. On remarque que la réponse du système avec le régulateur neuronal reste insensible à la variation de l'inductance du stator. Par contre, la réponse du système avec le régulateur



classique PI présente un important dépassement ( $D$ ) et un temps de réponse ( $Tr$ ). Dans le cas du couple électromagnétique, le dépassement et le temps de réponse sont égaux, respectivement à 0.38% et 0.162s. Toutefois, pour la variation de l'inductance  $Lr$  à +20%, le dépassement et le temps de réponse dans le cas du PI classique (Fig. 4.23) sont très importants par rapport au régulateur NNT. Par ailleurs, la figure 4.24 présente le cas de la variation des paramètres  $Lm$  (+20%),  $Ls$  (+25%),  $Lr$  (+25%) et  $Rr$  (+50%), simultanément. En effet, les performances du système se sont considérablement dégradées et le système devient même instable. Pour conclure, les résultats de simulation du régulateur neuronal présente de bonnes performances en terme de : temps de réponse et dépassement (Tableau. B.5 (Annexe B)).

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux parties. La première partie a consisté à la présentation des éléments essentiels qui permettent de comprendre et de mettre en œuvre des réseaux de neurones. Une vue globale des : différentes architectures du réseau de neurone, processus d'apprentissage (types et algorithmes d'apprentissage) des réseaux de neurone et les types des commandes neuromimétique des systèmes dynamiques, ainsi que d'autres architectures de commandes qui permettent d'émuler un régulateur conventionnel ont été présentées. Différents schémas de commande d'un système dynamique ont également été présentés. Les commandes adaptatifs à base de réseau de neurones ont dépassées les techniques de commande classique grâce à : l'adaptation aux changements, la compensation des variations des paramètres, la compensation des non-stationnarités. Ainsi, elles permettent aussi d'éviter l'utilisation des modèles paramétriques trop lourds. La performance de la commande par un modèle inverse du système et par un émulateur neuronal est moins appréciée que celle de la commande indirecte. En effet, l'utilisation d'un deuxième réseau de neurones dans la boucle de commande tient compte des changements brusques de certains paramètres du processus au cours du temps. Dans la deuxième partie de ce chapitre on a exposés les résultats de simulation pour le régulateur proposé. Ce travail a été validé par simulation sur une éolienne de 1.5 MW. Les résultats de simulation montrent que l'utilisation des réseaux de neurones pour la commande donne de bons résultats ainsi qu'une bonne robustesse. Le calcul de la matrice des poids et le vecteur des biais du réseau de neurones est en fonction des données entrées/sorties sans connaître les paramètres de la machine ou d'une façon générale les paramètres du système à commander, ce qui explique sa robustesse vis-à-

vis des variations paramétriques par rapport au PI classique. L'utilisation de réseaux de neurones doit tenir compte de la contrainte imposée par la fréquence d'échantillonnage pour capter la dynamique d'un système.

---

*Conclusion générale et perspectives*

---

# *Conclusion générale et perspectives*

Dans ce travail de thèse, la modélisation et la conception des algorithmes de commande d'un système éolien à vitesse variable équipé d'une GADA ainsi que la robustesse de commande ont été traités. Le contrôle de la vitesse mécanique de l'éolienne a été assuré en vue d'optimiser la puissance produite par l'éolienne.

Le premier chapitre avait pour objectif de donner un aperçu sur les énergies renouvelables et spécialement sur l'énergie éolienne et les différents travaux publiés. Nous avons ainsi présenté une étude sur l'évaluation de l'énergie renouvelable dans le monde et notamment en Algérie. Le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie a été exposé. En outre, une synthèse des différents types d'éoliennes a été présentée ainsi que les différents types de générateurs électriques utilisés dans les turbines éoliennes tout en décrivant les avantages et les inconvénients de chaque structure. Du point de vue optimisation de la production pour des vitesses de vent faible, les systèmes éoliens à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation, qui a été la base de ce travail, offrent plus d'avantages que les autres structures.

Dans le deuxième chapitre, une brève description du système de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation a été présentée. Un modèle de simulation de toute la chaîne de conversion ainsi que la commande pour l'optimisation de la puissance électrique par l'adaptation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent ont été développés dans la première partie. Les différentes commandes ont été validées par simulation pour deux points de fonctionnement, l'un en mode hyposynchrone et l'autre en mode hypersynchrone, tout en garantissant un fonctionnement optimal de l'éolienne. Par ailleurs, la seconde partie traite l'évaluation des caractéristiques, l'estimation de la production énergétique et l'analyse du potentiel du vent de la ville de Annaba. Les valeurs mensuelles de la densité d'énergie couvrent une gamme allant de 63 KWh/m<sup>2</sup> jusqu'à 166 KWh/m<sup>2</sup> à 12m en 2014. De plus, les valeurs annuelles de la densité d'énergie durant les quinze ans couvrent une gamme qui s'étend de 51.138 KWh/m<sup>2</sup> et 888.52 KWh/m<sup>2</sup>. En effet, s'appuyant sur les valeurs estimées du facteur de capacité, les modèles Enercon E-58/1000, Enercon E-82/2000 et De Wind 48, seront le meilleur choix pour le site étudié avec un facteur de capacité de 0.56, 0.49

## *Conclusion générale et perspectives*

et 0.47, respectivement. Cela non seulement grâce à leurs vitesses nominales de 12 m/s, 13 m/s et 11.5m/s, respectivement, mais aussi grâce à leurs vitesses de coupures variant de 2.5m/s à 3m/s. Tandis que les autres modèles, ils ont un facteur de capacité variant de 0.23 à 0.36, une vitesse nominale couvrant une gamme qui s'étend de 12m/s jusqu'à 15m/s, peuvent être aussi choisis ou d'autres modèles avec les mêmes caractéristiques.

Dans le chapitre 3, une synthèse ainsi que la description d'un régulateur PI adaptatif a été développée. Pour accomplir, on a validé le travail de ce chapitre par simulation sur une éolienne de 2 MW comparé avec un PI classique. Toutefois, nous avons mis en évidence l'amélioration apportée par le PI adaptatif sur les performances de la GADA par rapport au régulateur PI classique. Les résultats de simulation montrent bien un comportement remarquable du PI adaptatif AFG-PI par rapport au PI classique en qualité de performances et de robustesse. Bien que, les paramètres du PI adaptatif seront ajustés par la collection des règles floues de type « Si..Alors.. » en restant insensibles aux variations paramétriques. Par ailleurs, l'utilisation d'une telle solution hybride (PI ajusté par un FLC) permet d'exploiter de façon rationnelle les avantages des régulateurs PI classique et flou et de remédier à leurs inconvénients. Finalement, les résultats présentés, confirment que l'utilisation du PI adaptatif permet de réduire le temps de réponse du système de commande et de diminuer les fluctuations du régime transitoire. Le PI adaptatif a donné une amélioration de performances dynamiques pour les régimes transitoires relatifs à tous les essais.

Dans le dernier chapitre, un autre algorithme de commande basé sur les réseaux de neurones a été exposé. La première partie consiste en la présentation des éléments essentiels qui permettent de comprendre et de mettre en œuvre des réseaux de neurones. Une vue globale des : différentes architectures du réseau de neurone, processus d'apprentissage (types et algorithme d'apprentissage) des réseaux de neurones et les types des commandes neuromimétiques des systèmes dynamiques, ainsi que d'autres architectures de commande qui permettent d'émuler un régulateur conventionnel a été présentée. En outre, la deuxième partie expose les résultats de simulation pour le régulateur proposé. Les résultats de simulation montrent que l'utilisation des réseaux de neurones pour la commande donne de bons résultats

# *Conclusion générale et perspectives*

ainsi qu'une bonne robustesse. Le calcul de la matrice des poids et le vecteur des biais du réseau de neurone est en fonction des données entrées/sorties sans connaître les paramètres de la machine ou d'une façon générale les paramètres du système à commander, assure sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques par rapport au PI classique.

En guise de recommandations et d'orientations, nous nous proposons en perspectives d'enrichir le contenu de ce travail avec les points suivants :

- ✓ Validation expérimentale des résultats de simulation ;
- ✓ Amélioration des algorithmes de commande ;
- ✓ Commande neuromimétique adaptative ;
- ✓ Utilisation d'un système de stockage qui s'avère nécessaire au vu du caractère discontinu de la production de l'énergie éolienne.

---

## *Références*

---

## *Références*

---

- [1] A. Strupczewskim, “Accident risks in nuclear-power plants”, *Applied Energy*, vol. 75, pp. 79-86, 2003.
- [2] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, H. Yang, “Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems”, *Applied Energy*, vol. 87, n° . 2, pp. 380-389, 2010.
- [3] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, C. Gila, A. Alcaydeb, J. Gomez, “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1753-1766, 2011.
- [4] Miguel Lopez, “Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée”, thèse de doctorat, Université de Paris Sud - Paris XI, 2008.
- [5] A. Evans, V. Strezov, T.J. Evans, “Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° . 5, pp. 1082-1088, 2009.
- [6] Carla Freitas de Andrade, Hely Falcão Maia Neto, Paulo Alexandre Costa Rocha, Maria Eugênia Vieira da Silva, “An efficiency comparison of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy applications: A new approach applied to the northeast region of Brazil”, *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 801-808, 2014.
- [7] S. Rehman, “Wind energy resources assessment for Yanbo, Saudi Arabia”, *Energy Convers Manage*, vol. 45, pp. 2019-2032, 2004.
- [8] Giovanni Gualtieri, Sauro Secci, “Extrapolating wind speed time series vs. Weibull distribution to assess wind resource to the turbine hub height: A case study on coastal location in Southern Italy”, *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 164-176, 2014.
- [9] L. Lu, H. Yang, J. Burnett, Investigation on wind power potential on Hong Kong islands- an analysis of wind power and wind turbine characteristics”, *Renewable Energy*, vol. 27, pp. 1-12, 2002.
- [10] N. Vogiatzis, K. S. Kotti, Spanomitsios, M. Stoukides, “Analysis of wind potential and characteristics in North Aegean, Greece”, *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 1193-208, 2004.
- [11] M. Mirhosseini, F. Sharifi, A. Sedaghat, “Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, pp. 449-459, 2011.



## *Références*

---

- [12] A. Mostafaeipour, “Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 93-111, 2010.
- [13] S. H. Pishgar-Komleh, A. Keyhani, P. Sefeedpari, “Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran)”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 313-322, 2015.
- [14] Q. Z. Chaudhry, “Wind power potential at Jamshoro-Sindh”, Pakistan Meteorological Department, 2006.
- [15] I. A. Mirza, N. A. Khan, N. Memon, “Development of benchmark wind speed for Gharo and Jhimpir, Pakistan”, *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 576-582, 2010.
- [16] D.J. Cannon, D.J. Brayshaw, J. Methven, P.J. Coker, D. Lenaghan, “Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics: A 33 year case study in Great Britain”, *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 767-778, 2015.
- [17] M. Dahbi, A. Benatiallah, M. Sellam, “The Analysis of Wind Power Potential in Sahara Site of Algeria-an Estimation Using the ‘Weibull’ Density Function”, *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 179-188, 2013.
- [18] S. M. Boudia, A. Benmansour, H. M. A. Tabet, “Wind energy resource assessment at Tindouf region, extreme southwest of Algeria”, *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 693-700, 2013.
- [19] F. K. Shahnawaz, K. Tabbassum, A. M. Soomro, L. Dong, L. Xiaozhong, “Evaluation of wind power production prospective and Weibull parameter estimation methods for Babaurband, Sindh Pakistan”, *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 956-967, 2014.
- [20] K. Y. Maalawi, H. M. Negm, “Optimal frequency design of wind turbine blades”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, n°. 8, pp. 961-986, 2002.
- [21] L. C. Henriksen, “Wind energy literature survey no 16”, *Wind Energy*, vol. 13, pp. 524-526, 2010.
- [22] Global status report. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Renewables, 2010.
- [23] E. Benini, A. Toffolo, “Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation”, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 124, n°. 4, pp. 357-363, 2002.

## Références

---

- [24] E. Lund, J. Stegmann, “On structural optimization of composite shell structures using a discrete constitutive parametrization”, *Wind Energy*, vol. 8, pp. 109-124, 2005.
- [25] K. Svanberg, “The method of moving asymptotes-a new method for structural optimization”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, pp. 359-373, 1987.
- [26] S. A. Grady, M. Y. Hussaini, M. M. Abdullah, « Placement of wind turbines using genetic algorithms”, *Renewable Energ*, vol. 30, n°. 12, pp. 259-270, 2005.
- [27] A. Emami, P. Noghreh, “New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms”, *Renewable Energy*, vol. 35, n°. 7, pp. 1559-1564, 2010.
- [28] B. P. Rasuo, A. C. Bengin, “Optimization of wind farm layout”, *FME Transactions*, vol. 38, pp. 107-114, 2010.
- [29] I. Mustakerov, D. Borissova, “Wind turbines type and number choice using combinatorial optimization”, *Renewable Energy*, vol. 35, n°. 9, pp. 1887-1894, 2010.
- [30] L. Zhang, A. Wirth, “Wind energy management with battery storage”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, pp. 1510-1522, 2010.
- [31] Haritza Camblong, “Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Bordeaux, 2003.
- [32] <http://www.maghrebemergent.info/actualite/maghrebine/item/40704?tmpl=component&print=1>
- [33] <http://portail.cder.dz/spip.php?article4158>
- [34] rapport sonelgaz, 2011.
- [35] <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=potentiels-national-des-energies-renouvelables>
- [36] E. Hau, “Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics”, 2nd edition, Springer, 2005.
- [37] A. Samil, “Bulletin des Energies Renouvelables”, n°. 4, Décembre 2003.
- [38] <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=le-programme-des-energies-renouvelables-et-de-l-efficacite-energetique>
- [39] B. Multon, “Production d’énergie électrique par sources renouvelables”, Techniques de l’Ingénieur Traité, D 4005.

## *Références*

---

- [40] C. Alonso, “Contribution à l’optimisation, la gestion et le traitement de l’énergie”, Mémoire en vue de l’obtention de l’habilitation à diriger les recherches, université Paul Sabatier Toulouse III, Décembre 2003.
- [41] Commission Internationale d’Electrotechnique « CEI », énergies renouvelables, 2008.  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)
- [42] [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [43] [http://www.afhypac.org/images/documents/fiche\\_2.1\\_situation\\_mondiale\\_de\\_l\\_energie\\_rev\\_mars\\_2013\\_th\\_a.pdf](http://www.afhypac.org/images/documents/fiche_2.1_situation_mondiale_de_l_energie_rev_mars_2013_th_a.pdf)
- [44] Key World Energy Statistics, International Energy Agency (IEA), 2012  
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,31287,en.html>
- [45] <http://www.planetoscope.com/eolienne/1060-production-mondiale-d-energie-eolienne.html>
- [46] Rapport mondial sur les énergies renouvelables « REN21 », Renewables, 2011.  
[http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/Press%20release%20short\\_French.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/Press%20release%20short_French.pdf)
- [47] Global Wind report Annual market update 2014: [www.gwec.net](http://www.gwec.net)
- [48] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp>
- [49] [www.neal-dz.net](http://www.neal-dz.net).
- [50] Lettre de la Commission de Régulation de l’Electricité et du Gaz, n°. 12, Mars 2011.
- [51] Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique pour la période 2011-2030.
- [52] [http://www.memalgeria.org/francais/uploads/enr/Programme\\_ENR\\_et\\_efficacite\\_energetique\\_fr.pdf](http://www.memalgeria.org/francais/uploads/enr/Programme_ENR_et_efficacite_energetique_fr.pdf)
- [53] Ministère de l’Energie et des Mines, conception et réalisation SATINFO société du groupe Sonelgaz, Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique, Mars 2011.
- [54] Lilia Abdelhamid, “Contribution à l’Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l’Impact des Energies Renouvelables sur l’Environnement”, Thèse de Doctorat, Batna, 2012.
- [55] N. Laverdure, “l’Intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”, Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.

## Références

---

- [56] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, “Wind Energy Handbook”, Edition Wiley, 2001.
- [57] E. Hau. Wind Turbine, Fundamentals, technologies, Application, Economics. Editions Springer, 2000.
- [58] T. Duc-Hoan, “Conception optimale intégrée d’une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale”, Thèse de Doctorat, Toulouse, 2010.
- [59] <http://lafabriqueainnovations.com/idee/tourne-pot-perpetuel>
- [60] Thierno Lamarana Sow, “Commande non linéaire de l’éolienne à MADA pour une participation au réglage de la fréquence du réseau”, Ecole Supérieure de Technologie, Université du Québec, 2012.
- [61] Arnaud Davigny, “Participation aux services système de fermes d’éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d’énergie”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies, Lille, 2007.
- [62] Nicolas Laverdure, “l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble, 2005.
- [63] CH. Belfedal, “Commande d’une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l’énergie éolienne étude et expérimentation”, Thèse de Doctorat, Université d’Oran, 2007.
- [64] Tahar Tafticht, “Analyse et commande d’un système hybride photovoltaïque éolien”, Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2006.
- [65] F. Pitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [66] L. P. a. K. E, Johnson, “Control of Wind Turbines”, *IEEE Control system magazine*, pp. 44-61, 2011.
- [67] S. El-Aimani, “Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension”, Thèse de Doctorat, L2EP de l’Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [68] W. Hofmann, F. Okafor, “Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilization”, *Proceeding of 4<sup>th</sup> IEEE International Conference on Power Engineering and Drive Systems*, vol. 1, pp. 355-361, 2001.
- [69] Sejrir khojet el khil, “Commande Vectorielle d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) : Optimisation des pertes dans les convertisseurs Reconfiguration de

## *Références*

---

- la commande pour un fonctionnement sécurisé”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [70] S.A. Akdağ, A. Dinler, “A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications”, *Energy Conversation Management*, vol. 50, pp. 1761-1766, 2009.
- [71] T. P. Chang, “Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application”, *Applied Energy*, vol. 88, pp. 272-282, 2011
- [72] B. Dursun, B. Albozacı, “An evaluation of wind energy characteristics for four different locations in Balikesir”, *Energy Sources, PartA: Recovery, Utilisation and Environmental Effects*, vol. 33, n°. 11, pp. 1086-1103, 2011.
- [73] N. Talha Arslan, Y. Murat Bulut, Y. Arzu Altın, “Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 820-825, 2014.
- [74] A. N. Celik, M. Kolhe, “Generalized feed-forward based method for wind energy prediction”, *Applied Energy*, vol. 101, pp. 582-588, 2013.
- [75] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators”, *Renewable Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2369-2385, 2007.
- [76] Vidal, Paul-Étienne, “Commande non-lineaire d'une machine asynchrone à double alimentation”. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [77] M. J. Zandzadeh, A. Vahedi, “Modeling and improvement of direct power control of DFIG under unbalanced grid voltage condition,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 59, pp. 58-65, 2014.
- [78] Arnaud Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [79] F. Poitiers, “Study and control of synchronous generator for using wind energy : Machine asynchrone à cage autonome, doubly fed induction generator joined to the network”, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, Université de Nantes, France, 2003.
- [80] S. Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, ed. John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [81] B. Beltran, al. Sliding, “Mode power control of variable speed wind energy conversion systems,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 551-558, 2008.

## Références

---

- [82] E. S. Abdin, W. Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine induction generator unit," *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol. 15, no. 1, March. 2000.
- [83] D. L. Gourieres, "Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations", *Eyrolles*, 1982.
- [84] A. Betz, "Das maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des windes durch windmotoren", *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, vol. 26, pp. 307-309, 1920.
- [85] J. Usaola, P. Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J. R. Wihelmi, "Transient stability studies in grids with great wind power penetration. Modeling issues and operation requirements", *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, September 7-12, Dallas (USA), 2003.
- [86] S. Abdeddaim, A. Betka, "Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 49, pp. 234-242, 2013.
- [87] K. Ghedamsi, "Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [88] Nesmat Abu Tabak, "Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation", Ecole centrale de Lyon, 2008.
- [89] T. K. A. Brekken, N. Mohan, "Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, no. 1, pp. 129-135, 2007.
- [90] S. Bacha, M. Brunello, A. Hassan, "A general large signal model for DC-DC symmetric switching converters", *Electric Machines and Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp 493-510, 1994.
- [91] S. Belakehal, "Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [92] A.S. Toledo, "Commande directe et observation des convertisseurs de puissance application à l'onduleur de tension triphasé", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de L'INPG, 2000.
- [93] X. Yao, C. yi, D. Ying, J. Guo and L. Yang, "The grid-side PWM Converter of the Wind Power Generation System Based on Fuzzy Sliding Mode Control", in *proc. IEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics '08*, 2008.

## *Références*

---

- [94] K. Belmokhtar, M. L. Doumbia, “Modeling and control of wind system based on doubly fed induction generator for supply power to the electricity grid”, *Journal of Scientific Research*, vol. 2, pp. 54-62, 2010.
- [95] G. L. Johnson, “Wind Energy Systems”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.  
E. Muljadi, C. P. Butterfield, “Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation”, *IEEE Trans. Ind. Application*, vol. 37, pp. 240-246, 2001.
- [96] Q. Wang, L. Chang, “An independent maximum power extraction strategy for wind energy conversion systems”, *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian conference on electrical and computer engineering*, Edmonton, 1999
- [97] R. Datta, V. T. Ranganathan, “A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 1, 2003.
- [98] Z. Chen, SA. Gomez, M. McCormick, “A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems”, *Power Electronics and Variable Speed Drives*, 2000.
- [99] K. Bedoud, M. Ali-rachedi, R. Lakel, T. Bahi, “Modeling and Control of the Wind Energy Conversion Systems Based on DFIG Under Sub- and Super-Synchronous Operation Modes”, *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, V. 9, ISSN: 2356-5608, Copyright - IPCO 2015.
- [100] C. F. de Andrade, F. M. N. Hely, P. A. C. Rocha, M. E. V. da Silva, “An efficiency comparison of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy applications: A new approach applied to the northeast region of Brazil”, *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 801-808, 2014.
- [101] L. d. A. Lima, C. R. B. Filho, “Wind resource evaluation in Sao Joao do Cariri (SJC) Paraiba, Brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 474-480, 2012.
- [102] A. Keyhani, G. M. Varnamkhashti, M. Khanali, R. Abbaszadeh, “An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran”, *Energy*, vol. 35, pp. 188-201, 2010.
- [103] R. Costa, A. Paulo, C. d. S. Ricardo, F. d. A. Carla, E. V. d. S. Maria, “Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil”, *Applied Energy*, vol. 89, pp. 395-400, 2012.
- [104] X. Li, “Green energy-basic concepts and fundamentals”, Springer, pp. 79-134, 2011.

## *Références*

---

- [105] J. V. Seguro, T. W. Lambert, “Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85, pp. 75-84, 2000.
- [106] S. F. Khahro, K. Tabbassum, A. M. Soomro, X. Liao, M. BuxAlvi, LeiDong, M. F. Manzoor, “Techno-economical evaluation of wind energy potential and analysis of power generation from wind at Gharo, Sindh Pakistan”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 460-474, 2014.
- [107] S. Persaud, D. Flynn, B. Fox, “Potential for wind generation on the Guyana coastland”, *Renewable Energy*, vol. 18, n°. 2, pp. 175-189, 1999.
- [108] C. G. Justus, A. Mikhail, “Height Variation of wind speed and wind distributions statistics”, *Geophysical Research Letters*, vol. 3:5, pp. 261-264, 1976.
- [109] S. Muiyiwa, Adaramola, M. Agelin-Chaab, S. P. Samuel, “Assessment of wind power generation along the coast of Ghana”, *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 61-69, 2014.
- [110] L. M. Fernandez, C. A. Garcia, F. Jurado, “Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation”, *Energy*, vol. 33, pp. 1438-1452, 2008.
- [111] A. Ucar, F. Balo, “Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey”, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1864-1872, 2009.
- [112] E. K. Akpinar, S. Akpinar, “An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics”, *Energy Conversation Management*, vol. 46, pp. 1848-1867, 2005.
- [113] Khouloud Bedoud, Mahieddine Ali-rachedi, Rabah Lakel, “Assessment and analysis of wind energy generation and power control of wind turbine system”, *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, v. 32, pp. 147-162, 2016.
- [114] L. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [115] J. B. Kiszka, M. M. Gupta, P. N. Nikiforuk. “Energetic stability of fuzzy dynamic systems”, *IEEE Trans Syst. Man Cybern*, vol.15, n°. 5, pp. 783-792, 1985.
- [116] Bedoud Khouloud, “Modélisation et diagnostic de défaillance d’une électrovanne pneumatique”, Magister en Automatique Industrielle, Département d’Electronique, Université Badji-Mokhtar, Annaba, 2010.



## *Références*

---

- [117] R. Baussiere, F. la brique, G. Segulier, “Les convertisseur de l’électronique de puissance : commande et comportement dynamique“, v. 5, Lavoisier TEC-DOC, 2<sup>ème</sup> édition, France, juillet 1997.
- [118] R. Babuška, “Fuzzy and neural control”, DISC Course Lecture Notes Control, Engineering Laboratory, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2001.
- [119] J. K. George, B. Yuan, “Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications”, Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, 1995.
- [120] B. Bouchon-Meunier, “La logique floue”, Presses Universitaire de France, 1993.
- [121] J. M. Kościelny, “Application of Fuzzy Logic Fault Isolation in a Three-Tank System”, In 14World Congress IFAC, Beijing, China, pp. 7e-05-1, pp. 73-78, 1999.
- [122] R. Babuška, “Fuzzy Modeling for Control”, Kluwer Academic Publishers, Boston, vol. 8, pp. 7923-8154, 1998.
- [123] E. Mamdani, “Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 26, pp. 1182-1191, 1977.
- [124] T. Takagi, M. Sugeno. “Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control”. In *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, n°. 1, PP. 116-132, 1985.
- [125] S.Y. Yi, M. J. Chung, “Identification of fuzzy relational model and its application to control”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 59, pp. 25-33, 1993.
- [126] L. Zadeh. “Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes”. In *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 1, pp. 28-44, 1973.
- [127] C. M. Lin, M. H. Lin, C. W. Chen, “SoPC-based adaptive PID control system design for magnetic levitation system,” *IEEE Syst. J.*, vol. 5, n°. 2, pp. 278–287, Jun. 2011.
- [128] H. Razik, L. Baghli, A. Rezzoug, "Neuro-fuzzy speed control of an induction motor", In proc. IMACS-CESA'98, Nabeul-Hammamet, Tunisie, 1-4 April 1998, vol. 1, pp.1026-1030.
- [129] J. M. Falus, "La régulation industrielle, régulateurs PID prédictifs et flous", Editions Hermès Science Publication, Paris 2000.
- [130] Zhen-Yu Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka, “Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers”, *IEEE Trans. on Systems, Man. and Cybernetics*, vol. 23, n°. 5, 1993.

## Références

---

- [131] P. Viljamaa, “Fuzzy Gain Scheduling and Tuning of Multivariable Fuzzy Control- Methods of Computing in Control Systems”, Technologic doctoral thesis, Temper University of technology, Finland, 2000.
- [132] N. Muskinja, B. Tovornik and D. Donlagic, “How to Design a Discrete Supervisory Controller for Real-Time Fuzzy Control Systems”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 5, n°. 2, pp. 161-166, May 1997.
- [133] L. Baghli, “Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques”, Thèse de Doctorat, Nancy, France, 1999.
- [134] L. X. Wang, “Automatic Design of Fuzzy Controllers”, *Automatica*, vol. 35, pp. 1471-1475, 1999.
- [135] PID Fuzzy Controller for Hybrid Stepper Motor in Micro-Step Operation, Center of Excellence in Design, Robotics and Automation, Tehran, Iran, 2004.
- [136] K. Bedoud, M. Ali-rachedi, R. Lakel, T. Bahi, “ Adaptive Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller for control of the Wind Energy Conversion Systems”, *Energy Procedia*, v. 74, pp. 211-225, 2015.
- [137] Laroussi Kouider, “Développement d’un superviseur flou appliqué à la commande d’un moteur à induction”, Thèse de Doctorat, Université M’hamed Bougara, Boumerdes, 2013.
- [138] A. Selk Ghafari, A. Alasty, “Design and Real-Time Experimental Implementation of Gain Scheduling PID Fuzzy Controller for Hybrid Stepper Motor in Micro-Step Operation”, *IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 421-426, June 2004.
- [139] Theerawut Chaiyatham, Issarachai Ngamroo, “Improvement of power system transient stability by pv farm with fuzzy gain scheduling of PID controller”, *IEEE Systems Journal*, 2014.
- [140] B. Hamane, M. Benghanem, A. M. Bouzid, A. Belabbes, M. Bouhamida, A. Draouf, “Control for variable speed wind turbine driving a doubly fed induction generator using fuzzy-PI control”, *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 476-485, 2012.
- [141] Mohamed Larbi Saidi, “Commande des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires par la stratégie prédictive”, Thèse de Doctorat, Université Badji-Mokhtar, 2006.
- [142] D. Ould Abdeslam, “Techniques neuromimétique pour la commande dans les systèmes électriques: Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension”, Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, 2005.

## *Références*

---

- [143] P. Wira, “Approches neuromimétiques pour l’identification et la commande”, Habilitation à Diriger des recherches, Université de Haute Alsace, 2009.
- [144] M. Bechouche Ali, “Utilisation des techniques avancées pour l’observation et la commande d’une machine asynchrone : application à une éolienne”, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [145] Ngac-Ky Nguyen, “Approche neuromimétique pour l’identification et la commande des systèmes électriques : application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones”, Engineering Sciences, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010.
- [146] S. Haykin, “A comprehensive foundation”, Neural networks, Macmillan College Publishing Company, 1994.
- [147] B. K. Bose, “Neural network applications in power electronics and motor drives - an introduction and perspective”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, n°. 1, pp. 14-33, 2007.
- [148] J. R. Jang, “Anfis : Adaptive-network-based fuzzy inference system”, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, n°. 3, pp. 665-685, 1993.
- [149] Isabelle Rivals, “Modélisation et commande de processus par réseaux de neurones ; application au pilotage d’un véhicule autonome”, Automatique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1995.
- [150] G. Cybenko, “Approximation by superpositions of a sigmoidal function”, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, vol. 2, pp. 303-314, 1989.
- [151] K. Funahashi, “On the approximate realization of continuous mappings by neural networks”, *Neural Networks*, vol. 2, pp. 183-192, 1989.
- [152] A. Barron, “Universal approximation bounds for superposition of a sigmoidal function”, *IEEE Trans. Information theory* IT-39, pp. 930-945, 1991.
- [153] E. D. Sontag, “Neural networks for control”, in [TRE93], pp. 339-380, 1993.
- [154] G. Dreyfus, J. Martinez, M. Samuelides, M. Gordon, F. Badran, L. Thiria, Hérault, “Réseaux de neurones : méthodologie and applications”, Ed. Eyrolles, Paris, 2004.
- [155] J. Sarangapani, “Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems”, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [156] S. Haykin, “Neural Networks - A Comprehension Foundation”, Prentice Hall International, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1999.
- [157] B. Widrow, E. Walach, “Adaptive Inverse Control”. Prentice-Hall, Inc., 1996.

## *Références*

---

- [158] K. Funahashi. “On the approximate realization of continuous mappings by neural networks”, *Neural Networks*, vol. 2, pp. 183-192, 1989.
- [159] M. Parizeau, “Réseaux de neurones, Notes de cours, Université Laval”, Canada, 2004.
- [160] G. Irwin, K. Warwick, and K. Hunt, “Neural Network Applications in Control”, The Institution of Electrical Engineers, London, 1995.
- [161] O. Barambones, “A robust wind turbine control using a Neural Network based wind speed estimator”, IEEE conference publications, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), pp. 1-8, 2010.
- [162] M. H. B. Martin, T. H. Howar, B. Demuth, “Neural Network Toolbox User’s Guide-Matlab”, R2014a.
- [163] K. Bedoud, M. Ali-Rachedi, R. Lakel, T. Bahi, A. Grid, “Robust Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbine Under Sub-Synchronous Operation Mode”, *Energy Procedia*, v. 74, pp. 886-899, 2015.

---

## *Annexes*

---

## Transformation de Park

La transformation de Park permet la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement.

Matrice de transformation de Park directe :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix}$$

Matrice de transformation de Park inverse :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix}$$

Pour les grandeurs rotoriques et statoriques  $\theta$  est égale respectivement à  $\theta_r$  et  $\theta_s$ .

Tableau. A. 1 Paramètres des différents régulateurs PI

Convertisseur côté GADA	Commande du bus continu	Convertisseur côté réseau	Commande MPP
$t_r = 0.01 \text{ s};$ $K = \sigma * \frac{Lr}{t_r}$ $= 0.03757$ $I = \frac{Rr}{t_r} = 2.10$	$\xi = 0.707$ $t_{r1} = 0.1 \text{ s};$ $K_c = 0.16798$ $I_c = C * \omega_c^2 = 3.2076$	$t_{r2} = 2 \text{ ms};$ $K_f = \frac{Lf}{t_{r2}} = 25$ $I_f = \frac{Rf}{t_{r2}} = 0.01$	$\begin{cases} \lambda_{opt} = 8 \\ C_{popt} = 0.45 \end{cases}$

Tableau. A. 2 Paramètres de la turbine 1.5MW

Puissance nominale	1.5MW
$R$	35.25m
$G$	90
$f$	0.0024
$J$	1000
Réseau	690V/50Hz
$R_s / R_r$ ( $\Omega$ )	0.012/0.021
$L_m/L_s/L_r$ (H)	0.0135/0.0137/0.013675
$R_f$ (H)/ $L_f$ (H)/ $C$ (F)	0.000002/0.005/0.044
Nombre de paires de pôles ( $p$ )	2
$V_{dc\_ref}$	2000V
$Q_{f\_ref}$	0

Tableau. A. 3 Etats de simulation

Status	Temps (s)	Puissances réactive (MVar)	Temps (s)	Puissance active (MW)
1	$0 < t \leq 0.5$	0	$0 < t \leq 0.7$	- 0.5
2	$0.5 < t \leq 1$	-1	$0.7 < t \leq 1.4$	0.5
3	$1 < t \leq 1.7$	0.8	$1.4 < t \leq 2.5$	-1
4	$1.7 < t \leq 2.5$	-0.7		

Tableau. B. 1 Paramètres de la turbine 2MW

Puissance nominale	2MW
$R$	41m
$G$	100
$f$	0.0024
$J$	90
Réseau	690V/50Hz
$R_s / R_r$ ( $\Omega$ )	0.001/0.0013
$L_m/L_s/L_r$ (H)	0.003/0.0007/0.0008
Nombre de paires de pôles ( $p$ )	2

Tableau. B. 2 Dépassement des régulateurs PI et AFG-PI avec variations paramétriques

	$D_{\max-PI}$ (%)	$D_{\max-AFG-PI}$ (%)
$i_{rd}$ (A)	0.36	0.07
$i_{rq}$ (A)	0.44	0.09
$i_{sd}$ (A)	0.37	0.08
$i_{sq}$ (A)	0.42	0.05
$Q_s$ (Var)	0.39	0.075
$Q_r$ (Var)	0.37	0.07
$P_s$ (W)	0.32	0.07
$P_r$ (W)	0.45	0.085

Tableau. B. 3 Etats de simulation de la GADA

Status	Temps (s)	$P_s$ (MW)	$Q_s$ (MVar)
1	$0 < t \leq 0.4$	-0.2	0
2	$0.4 < t \leq 0.6$	0.2	0
3	$0.6 < t \leq 0.7$	0.2	0.8
4	$0.7 < t \leq 01$	-0.6	0.8



5	$1 < t \leq 1.1$	-0.6	-0.5
6	$1.1 < t \leq 1.3$	0.2	-0.5
7	$1.3 < t \leq 1.4$	0.2	0.4
8	$1.4 < t \leq 1.8$	-1	0.4
9	$1.8 < t \leq 2$	0	0.4

Tableau. B. 4 Etats de simulation de la GADA (Chapitre IV)

Statut	Temps (s)	$P_r$ (MVar)	Temps (s)	$C_{em}$ (N.m)
1	$0 < t \leq 0.5$	0	$0 < t \leq 0.3$	0
2	$0.5 < t \leq 1$	-1	$0.3 < t \leq 1$	-1
3	$1 < t \leq 1.7$	0.8	$1 < t \leq 2$	1
4	$1.7 < t \leq 2$	-0.7		

Tableau. B. 5 Temps de réponse et dépassement des régulateurs NNT et PI

		$C_{em}$ $t_r(s)/D_{max}(\%)$	$Q_s$ $t_r(s)/D_{max}(\%)$
Régulateur NNT :	$L_s(+20\%)$	0.099/0	0.092/0
	$L_r(+20\%)$	0.112/0	0.105/0
Régulateur PI :	$L_s(+20\%)$	0.162/0.38%	0.146/0.45%
	$L_r(+20\%)$	0.171/0.42%	0.163/0.53%