الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Électrotechnique

Option : Réseaux Électriques

THEME

COMMANDE D'UN SYSTEME HYBRIDE (PV-EOLIEN) PAR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Proposé et dirigé par,

Dr. ABBADI Amel

Mr. MORSLI Abdelkader

Préparé et présenté par ,

KALACHE Mohamed Amine

KESSEIR Youcef

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents, pour

Leurs

Sacrifices et encouragements,

A toute ma famille.

A tous mes amis.

Amine

Dédicace

A ma très chère mère Safia

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le

symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et

l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et

de prier pour moi.

A mon Père Bachir
Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour,
l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu
Pour vous.
Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et
nuit pour mon éducation et mon bien être.
Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as
consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère sœur Amina,

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de

l'affection que je porte pour vous.

vous êtes toujours dans mon

cœur. Je vous remercie pour votre hospitalité sans égal et

votre affection si sincère.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de

bonheur, de santé et de réussite.

mes chers frère, Mohamed Amine, Toufik, Elhachemi

les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour

et l'affection que je porte pour vous.

Mes anges gardien et mes fidèle compagnon dans

les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de

bonheur, de santé et de réussite…

A tous les membres de ma famille, petits et grands
Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon
Affection.

A notre chère et dynamique promotrice
Abbadi Amel
Un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts
fournis. Vous avez toujours été présente.
Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond
respect.

A mes chers ami(e)s

Berkane.Imane, Souad, Hamza, Achraf, Mahfoudh, Abd elmalek, Amine, Faiza.

A mes chers collègues
mohamed, hsino, Sofiane, Amine, , Issam, Abd Allah
Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous
exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des
frères, soeurs et des amis sur qui je peux compter.
En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de
tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie
ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de
bonheur.

YOUCEF

Remerciements

D'abord nous tenons à remercier Allah qui nous a aidés à achever notre modeste travail.

Aussi, nous tenons à adresser du fond du cœur nos remerciements les plus chaleureux à nos encadreur et Co-encadreur Dr. ABBADI Amel et Mr .MORSLI Abdelkader

en nous soutenant et nous encourageant avec leurs précieux conseils,

Nos profonds remerciements vont à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant notre cursus universitaire.

Nous remercions aussi vivement Dr.HAMIDIA.F pour son aide.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui vont évaluer notre travail.

Et un grand merci à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة نظام هجين (طاقة ضوئية-ريحية) متصل بشبكة الكهرباء ، تليها نقطة الطاقة القصوى لكل من مصادر الطاقة النقاط الرئيسية التي تم تناولها في هذه الدراسة هي: نمذجة نظام طاقة ضوئية-ريحية ، دراسة محولات تيار كهربائي(مستمر-مستمر)و(مستمر-متناوب)و(متناوب-مستمر) مع طريقة مبنية على الذكاء الاصطناعي (المنطق الضبابي –الشبكة العصبية الإصطناعية و الشبكة العصبية المشوشة) و المقارنة بين جميع التقنيات المستخدمة .

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي - النظام الهوائي - متجددة- MPPT - الذكاء الاصطناعي - المنطق الضبابي- الشبكة العصبية الاصطناعية - الشبكة العصبية المشوشة.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude d'un système hybride (photovoltaïque-éolien), connecté au réseau électrique, suivi par le point de puissance maximum (MPPT) pour les deux sources d'énergie. Les points essentiels traités dans cette étude sont : la modélisation d'un système photovoltaïque-éolienne, l'étude des convertisseurs DC-DC et DC-AC et AC-DC Avec une méthode basé sur l'intelligence artificielle (la logique floue, réseau de neurone artificiel et réseau de neuro-floue), et la comparaison entre tous les technique utilisé.

Mots clés : Système hybride - système PV- système éolienne - renouvelable - MPPT- L'intelligence artificielle - logique floue - Réseau de neurone artificiel - neuro-floue.

Abstract

This work focuses on the study of a hybrid (photovoltaic-wind) system, connected to the power grid, followed by the maximum Power Point (MPPT) for both energy sources. The key points addressed in this study are: the modeling of a photovoltaic-wind system, the study of DC-DC and DC-AC and AC-DC converters with a method based on artificial intelligence (fuzzy logic, artificial neural network and neuro-fuzzy network), and the comparison between all the techniques used.

Key words : Hybrid system - photovoltaic system - wind system - renewable - MPPT- artificial intelligence - fuzzy logic - artificial neural network - neuro-fuzzy network.

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I :*Généralités sur les énergies renouvelable solaire et éolienne*

I.1 Introduction 2

I.2 Gisement solaire 2

I.2.1 Le spectre solaire 2

I.2.2 Rayonnement solaire 3

I.3 Définition d'un système PV 5

I.4 L'effet photovoltaïque 6

I.5 La cellule photovoltaïque 7

I.6 Différents types des cellules photovoltaïques 8

I.6.1 Cellules monocristallines 8

I.6.2 Cellules poly cristallines 9

I.6.3 Cellules amorphes 10

I.7 Représentation des cellules PV 11

I.7.1 Modèle d'une cellule PV idéale 11

I.7.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale 12

I.7.2.1 Avec une seule diode 12

I.7.2.2 Avec deux diodes 13

I.8 Influence des différents paramètres 13

I.8.1 Influence de l'éclairement 13

I.8.2 Influence de la température 14

I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 14

I.9.1 Avantages 14

I.9.2 Inconvénients 15

I.10 L'énergie éolienne 15

I.10.1 Définition du système éolien 15

I.11 Principe de fonctionnement 16
I.12 Les différents types d'un système éolien 16
I.12.1 Le système à axe vertical 17
I.12.2 Le système à axe horizontal 18
I.13 Les principaux composants d'un système éolien 18
I.14 Notions théoriques sur l'éolien 19
I.14.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 19
I.14.2 Loi de Betz 20
I.14.3 Vitesse spécifique ou normalisée 21
I.14.4 Coefficient de puissance 22
I.14.5 Coefficient de couple 23
I.14.6 Distribution de Weibull 23
I.15 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne 24
I.16 Impact de l'intégration d'énergies éolienne sur les réseaux électriques 24
I.17 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 25
I.17.1 Avantages 25
I.17.2 Inconvénients 26
I.18 Conclusion 26

Chapitre II : *Système hybride (pv-éolien)*

II.1 Introduction 27
II.2 Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien 27
II.3 l'origine de la notion du système 28
II.4 Description D'un Système Hybride 28
II.5 Principaux Composants des systèmes hybrides 28
II.6 Principe de fonctionnement 29
II.7 Convertisseur statique DC-DC (Hacheur) 29
II.7.1. Hacheur dévolteur (Buck) 30

II.7.2 Hacheur survolteur (Boost) 32
II.7.3. hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) 34
II.8 Adaptation du système par un convertisseur élévateur DC- DC (Hacheur Boost) 35
II.9 Convertisseur statique DC-AC (Onduleur) 37
II.9.1 Principe de fonctionnement 38
II.10 Modèle de l'onduleur a trois niveaux 39
II.11 Convertisseur AC-DC (Pont redresseur de diodes triphasé) 42
II.12 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque 44
II.12.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque 45
II.12.1.1 Courant de court-circuit 45
II.12.1.2 Tension de circuit-ouvert 46
I.12.1.3 Rendement énergétique 46
I.12.1.4 Facteur de forme 46
II.13 Modèle triphasé de la MSAP 47
II.13.1 Représentation de la machine dans l'espace électrique 47
II.13.2 Equations de la MSAP 47
II.13.2.1 Equations électriques 47
II.13.2.2 Equations électromagnétiques 48
II.13.2.3 Equations mécanique 48
II.13.3 Transformation de Park 49
II.13.4 Application de la transformation du Park 50
II.13.4.1 Equations électriques 50
II.13.4.2 Equations électromagnétiques 50
II.13.4.3 Equation mécanique 51
II.13.5 Modélisation de la Turbine éolienne 51
II.13.5.1 Modélisation de la Turbine 51
II.13.5.2 Modélisation du Multiplicateur 54

II.13.5.3 Modélisation de l'Arbre Mécanique 54
II.14 Conclusion 55
Chapitre III : *Poursuite point de puissance maximale par l'intelligence artificielle*
III.1 Introduction 56
III.2 La logique floue 56
III.2.1 Définition 56
III.2.2 Les fonctions d'appartenance 57
III.2.3 Structure générale d'un régulateur par logique floue 58
III.2.4 Les avantages et les inconvénients 59
III.2.4.1 Avantage 59
III.2.4.2 Les Inconvénients 59
III.3 Réseau de neurone 60
III.3.1 Historique 60
III.3.2 Le neurone biologie 60
III.3.2.1 Le corps cellulaire 60
III.3.2.2 Les dendrites 60
III.3.2.3 L'axone 60
III.3.3 Le neurone artificiel 61
III.3.4 Les composants d'un réseau de neurone 62
III.3.5 Les différentes structures des réseaux de neurones 62
III.3.5.1 Réseau de neurones multicouches 63
III.3.5.2 Réseau à connexions locales 63
III.3.5.3 Réseau à connexions récurrentes 64
III.3.5.4 Réseau à connexions complètes 65
III.3.6 Les fonctions d'activations 65
III.3.7 Les techniques d'apprentissage 66
III.3.7.1 Apprentissage supervisé 66

III.3.7.2 Apprentissage non supervisé 66
III.3.8 Les avantages et les inconvénients 66
III.3.8.1 Les Avantage 66
III.3.8.2 Inconvénients 66
III.4 Les systèmes Neuro-flous 67
III.4.1 Méthodes des combinaisons Neuro-floues 67
III.4.2 Modèles Neuro-flous hybrides 68
III.4.2.1 Le système Neuro-flou hybride de type Mamdani 68
III.4.2.2 Le système Neuro-flou hybride de type Takagi-Sugeno 69
III.4.3 Les avantages des systèmes Neuro-flous 70
III.4.3.1 La rapidité de calcul 70
III.4.3.2 La flexibilité 70
III.4.3.3 Généralisation des connaissances 70
III.4.4 Les types d'implémentation des réseaux Neuro-flous 71
III.4.5 NEFCLASS (Neuro-fuzzy classification) 71
III.4.6 NEFCON (Neuro-Fuzzy Controller) 72
III.4.7 NEFPROX (Neuro Fuzzy function approximator) 73
III.4.8 ANFIS (adaptative -network-based fuzzy inference system) 74
III.5 Conclusion 74

chapiter IV: *Description du système et résultat de simulation*

IV.1 Introduction 75
IV.2 Description du système 75
IV.2.1.Régulateur MPPT 76
IV.3.Simulation 78
IV.3.1 Simulation avec la logique floue 79
IV.3.1.1 Simulation de système PV 79
IV.3.1.2 Simulation de système éolien 82

IV.3.1.3.Simulation de système hybride 85
IV.3.2 Simulation de système avec le réseau de neurone 88
IV.3.2.1 Simulation de système PV 88
IV.3.2.2 Simulation de système éolien 91
IV.3.2.3 Simulation de système hybride 95
IV.3.3 Simulation de système avec le réseau de neuro-floue 97
IV.3.3.1 Simulation de système PV 97
IV.3.3.2 Simulation de système éolien 100
IV.3.3.3 Simulation de système hybride 104
IV.4. Etude comparative de la puissance entre les Trois contrôleurs 106
IV.5. Conclution 112
Conclusion générale.....113

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : *Généralités sur les énergies renouvelable solaire et éolienne*

Figure I.1: Analyse spectrale du rayonnement solaire 3

Figure I.2: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion d'AM 4

Figure I.3: Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur 5

Figure I.4 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique 6

Figure I.5 : Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque solaire 8

Figure I.6 : Cellule photovoltaïque (monocristalline). 9

Figure I.7 : Cellule PV poly cristalline 9

Figure I.8 : Cellule PV amorphe 10

Figure I.9 : Modèle électrique d'une cellule PV idéale 12

Figure I.10 : Modèle électrique d'une cellule PV idéale 12

Figure I.11 Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes. 13

Figure I.12 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(v) et p(v) à 25°c 13

Figure I.13 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) à G=1000W/m2 14

Figure I.14 : schéma d'un system éolien..... 15

Figure I.15 : Principe de la conversion 16

Figure I.16 : Eoliennes à axes vertical 17

Figure I.17 : Eoliennes à axes horizontal 18

Figure I.18 : Colonne d'air animée d'une vitesse V 20

Figure I.19 : (Théorie de Betz) Schéma de principe. 21

Figure I.20 : Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t.R_t$ 22

Chapitre II: *Système hybride (Pv-éolien)*

Figure II.1: Schéma fonctionnel du système hybride proposé. 29

Figure II.2 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage. 30

Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. 30

Figure II.4 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur, ... 31

Figure II.5 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur. 33
Figure II.6 : Schémas équivalents du hacheur survolteur, *(a) : K fermé,*(b) : ouvert. 33
Figure II.7 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur. 34
Figure II.8 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur, ... 35
Figure II.9 : Schéma électrique du convertisseur boost 36
Figure II.10 : Principe de conversion de l'onduleur. 38
Figure II.11 : Symbole et signal d'un onduleur. 38
Figure II.12 : Onduleur à trois niveaux à structure NPC. 39
Figure II.13 : Diagramme vectoriel de l'onduleur. 41
Figure II.14 : Etapes de la MLI vectorielle. 41
Figure II.15 Pont redresseur de diode triphasé 42
Figure II.16 Tension redressée 43
Figure II.17 : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque. 44
Figure II.18 : représentation de la GSAP sur le repère (abc). 47
Figure II.19 : Schéma de la turbine éolienne 51
Figure II.20 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine. 52
Figure II.21 : Caractéristiques typiques de puissance par rapport à la vitesse d'une éolienne.53

Chapitre III: *Poursuite point de puissance maximale par l'intelligence artificielle*

Figure III.1 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance 58
Figure III.2 : Structure générale d'un régulateur par logique floue 58
Figure III.3 : Le modèle d'un neurone biologique. 61
Figure III.4 : Neurone Artificiel. 62
Figure III.5 : Réseau de neurones multicouches. 63
Figure III.6 : Réseau à connexions locales. 64
Figure III.7 : Réseau à connexions récurrentes. 64
Figure III.8 : Réseau à connexions complètes. 65
Figure III.9 : Quelque fonction d'activations. 65
Figure III.10 : principe de Neuro flou 67
Figure III.11 : Le système Neuro-flou de Mamdani. 68
Figure III.13 : Architecture de NEFCLASS. 71
Figure III.14 : Architecture de NEFCON. 72
Figure III.15 : Architecture de NEFPROX. 73

Figure III.16 : Architecture de l'ANFIS. 74

Chapitre IV : *Description de système et résultat de simulation*

Figure IV.1 : La structure du modèle. 75
Figure IV.2 : la structure de régulateur MPPT. 76
Figure IV.3 : Fonction d'appartenance des variables d'entrées. 76
Figure IV.4 : Fonction d'appartenance des variables de sortie 76
Figure IV.5 : La variation de l'irradiation. 79
Figure IV.6 : La tension PV, le courant PV puissance PV. 79
Figure IV.7 : Le rapport cyclique D. 80
Figure IV.8 : La tension Vdc Pv. 80
Figure IV.9 : Les tensions Vabc. 80
Figure IV.10 : Les courants Iabc. 81
Figure IV.11 : La tension Va et le courant Ia. 81
Figure IV.12 : La puissance Pa. 82
Figure I.13 : La tension Vdc. 82
Figure IV.14 : La puissance Pa. 82
Figure IV.15 : Les tensions Vab. 83
Figure IV.16 : Le courant I Line 83
Figure IV.17 : Vrms,Irms,Pa 84
Figure IV.18 : La vitèsse rotorique 85
Figure IV.19 : Le couple éléctromagnetique. 85
Figure IV.20 : La tension Vdc. 85
Figure IV.21 : La puissance Pa 86
Figure IV.22 : La tension Va et le courant Ia. 86
Figure IV.23 : Les tensions Vabc 87
Figure IV.24 : Les courants Iabc 87
Figure IV.25 : La tension PV, le courant PV puissance PV. 88
Figure IV.26 : Le Raport cyclique 89
Figure I.27 : La tension Vdc. 89
Figure IV.28 : Les tensions Vabc. 89
Figure IV.29 : Les courants Iabc. 90
Figure IV.30 : La tension Va et le courant Ia. 90

Figure IV.31 : La puissance Pa. 91
Figure IV.32 : La tension Vdc 91
Figure IV.33 : La puissance Pa. 91
Figure IV.34 : La tension Va et le courant Ia. 92
Figure IV.35 : Les tensions Vab 92
Figure IV.36 : Le courant ILine 93
Figure IV.37 :Vrms,Irms,Pa. 94
Figure IV.38: La vitèsse rotorique 95
Figure IV.39: Le couple éléctromagnetique. 95
Figure IV.40 : La tension Vdc 95
Figure IV.41 : La puissance Pa. 96
Figure IV. 42 : Le rapport cyclique. 96
Figure IV.43 : La tension Va et le courant Ia. 96
Figure IV.44 : Les tensions Vabc 97
Figure IV.45 : Les courants Iabc 97
Figure IV.46 : La tension PV, le courant PV puissance PV. 98
Figure IV.47 : Le rapport cyclique. 98
Figure IV.48 : Les tensions Vabc. 99
Figure IV.49 : Les courants Iabc 99
Figure IV.50 : La tension Va et le courant Ia. 100
Figure IV.51 : La puissance Pa. 100
Figure IV.52 : La tension Vdc. 101
Figure IV.53 : La puissance Pa. 101
Figure IV.54 : La tension Va et le courant Ia 101
Figure IV.55 : Les tensions Vab. 102
Figure IV.56 : Le courant I line. 102
Figure IV.57 : Vrms,Irms,Pa. 103
Figure (IV.58 : La vitesse rotorique. 104
Figure IV.59 : le couple electromagnetique. 104
Figure IV.60 : La tension Vdc 105
Figure IV.61 : La puissance Pa. 105
Figure IV.62 : La tension Va et le courant Ia. 105
Figure IV.63 : Les tensions Vabc 106
Figure (IV.64 : Les courants Iabc 106

Figure IV.65 : variation de la puissance des trois régulateurs. 107
Figure IV.66: Zoom1.a 107
Figure IV.67: Zoom1. 107
Figure IV.68: Zoom2. 108
Figure IV.69: Zoom3. 108
Figure IV.70: Zoom4 108
Figure IV.71: Zoom5.. 109
Figure IV.72: Zoom5.. 109
Figure IV.73: Zoom6. 109
Figure IV.74: Zoom7. 110
Figure IV.75: Zoom8. 110

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : *Généralités sur les énergies renouvelables solaire et éolienne.*

Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologies. 11

Chapitre IV : *Description de système et résultat de simulation.*

Tableau IV.1 : la table des règles pour la commande logique floue. 77
Tableau IV.2 : la table des caractéristiques de régulateur MPPT 77
Tableau IV.3 : la table des caractéristiques du régulateur MPPT 78
Tableau IV.4 : les puissances de panneau dans certains intervalles. 111

LISTE DES SYMBOLES

A : la zone balayée par turbine (m^2)

β : L'angle d'orientation de la pale

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par la machine

C_{ent} : Couple d'entrainement appliqué sur l'arbre de la machine

c : Facteur d'échelle de Weibull

C_p : le coefficient de puissance

C_t : Couple de la turbine

C_g : Couple du générateur

D: variable de sortie

e : la charge de l'électron (e=1,6 10^{-19} C)

E_{eq} : Tension equivalent

E : l'erreur

ΔE : changement d'erreur

E_C : Energie cinétique du vent (Joules)

ΔEc : la variation de l'énergie cinétique (J)

F : la force de l'air (N)

Ψ_d ,Ψ_q : Flux des axes d et q

f : Le coefficient de frottement visqueux

$[\Psi_{sf}]$: Vecteur de projection du flux de l'aimant permanant sur les trois phases (a,b,c)

$[\Psi_s]$: Vecteur des flux statoriques

G : Coefficient de multiplicateur

I_{sat} : le courant de saturation(A)

I_{pv} **:** le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit)

I_{cc} : Courant de court-circuit(A)

I_{opt} : Courant optimum (A)

I_{PH} : Le courant généré par la cellule solaire (A)

I : courant de MPPT

I_C : Le courant de sortie de la cellule PV (A)

I_D : Le courant de diode (A)

I_{d1} : Le courant de diode 1 (A)

I_{d2} : Le courant de diode 2 (A)

I_{RP} : le courant de résistance parallèle (A)

i_d, i_q : Courant dans le repère (d,q)

$[i_s]$: Vecteur des courants statoriques

I_{GSAP} : courant du générateur synchrone a aiment permanent (v)

J : Le moment d'inertie total ramené sur l'arbre.

J_g : L'inertie de la génératrice

J_t : Inertie de la turbine

K : Facteur de forme de Weibull

K **:** la constante de Boltzmann (1,381 10^{-23} J/K)

L_{sa}, L_{sb}, L_{sc} : Inductances propres aux phases (a,b,c)

L_{ls} : Inductance de fuite

L_d ,L_q : Inductances des axes d et q

$M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{bc}$: Inductance mutuelle entre phases (a,b,c).

M : la masse d'air qui traverse l'éolienne.(kg)

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

η : Rendement énergétique.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

n **:** le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<3)

P_{aer} : Puissance aérodynamique.(w)

P_{ex} : la puissance extraite du vent.(w)

P_T : Puissance totale(w)

P : Nombre de paires de pôles

$P_{méc}$: Puissance mécanique de la turbine

P_{pv} **:** Puissance de panneau(W)

R_{shu} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction .

R : Longueur de pales

R_{ch} : resistance de charge

R_S : Résistance Série (Ω)

R_P : Résistance parallèle(Ω)

R_t : Rayon de la surface balayée (m)

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques

R_{ser} : la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

T **:** la température effective des cellules en Kelvin(K)

T_C : Température (C°)

U_{GSAP} : Tension du générateur synchrone a aiment permanent.(v)

V_{pv} **:** la tension aux bornes de cette même cellule

V_{co} : Tension de circuit-ouvert(V)

V_{opt} : Tension optimale (V)

V : tension de MPPT

V_C : La tension de sortie de la cellule PV (V

v : Vitesse instantanée du vent (m/s)

V_n : vitesse du vent nominale (m/s)

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques

λ : rapport pointe-vitesse

$\Omega_{méc}$: Vitesse du générateur

Ω_t : vitesse de la turbine

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s)

λ_n : vitesse spécifique ou normalisée.($m.s^{-1}$)

ϕ_d, ϕ_q : Flux dans le repère (d q)

θ_r : Position électrique du rotor

ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m3)

ABREVIATION UTILISEE

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

MOSFET : Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

FF : Facteur de forme.

MSAP : Machine synchrone *à* aiment permanent.

***NPC* :** Neural Point Clamped

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

NEFCLASS : Neuro-fuzzy classification

NEFCON : Neuro-Fuzzy Controller

NEFPROX : Neuro Fuzzy function approximator

ANFIS : Adaptative -network-based fuzzy inference system

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. [1]

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles puisque une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir du : charbon, gaz naturel, pétrole et l'uranium ....

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques, c'est à dire: l'ensoleillement, le vent, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers, les matières organiques et la chaleur des entrailles de la terre. [1]

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies. [1]

Cependant, quatre chapitres ont été mis à l'œuvre :

Dans le chapitre 1, nous allons présenter une généralité sur les systèmes photovoltaïque et éolienne. On présentera le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fera un rappel sur les systèmes éoliens et leurs paramètres.

Dans le chapitre 2, Nous allons présenter les différentes caractéristiques du système hybride, on étudiera les types des convertisseurs statiques utilisés. Aussi, on décrire la modélisation du système Pv-éolien.

Dans le chapitre 3, nous allons présenter les principes des techniques de l'intelligence artificielle (logique floue, Réseau de neurone, Neuro-flous),

Dans le chapitre 4, nous allons voir les résultats de la simulation du Système (PV, Eolien) Et faire une comparaison entre les techniques de l'intelligence artificielle.

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelable solaire et éolienne

I.1 Introduction

On appelle énergie renouvelable un ensemble des sources d'énergies qui sont inépuisable à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental [2].elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [3].

Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité, la biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique, c'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).

L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique. La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestre ou de sources chaudes [2], dans ce premier chapitre, nous allons décrire les différents caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiée dans ce mémoire.

I.2 Gisement solaire

I.2.1 Le spectre solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10 μm

La figure (I.I) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ($0,20< \lambda <0,38\ \mu m$).
- 48% dans la bande visible ($0,38< \lambda <0,78\ \mu m$).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ($0,78< \lambda <10\ \mu m$).

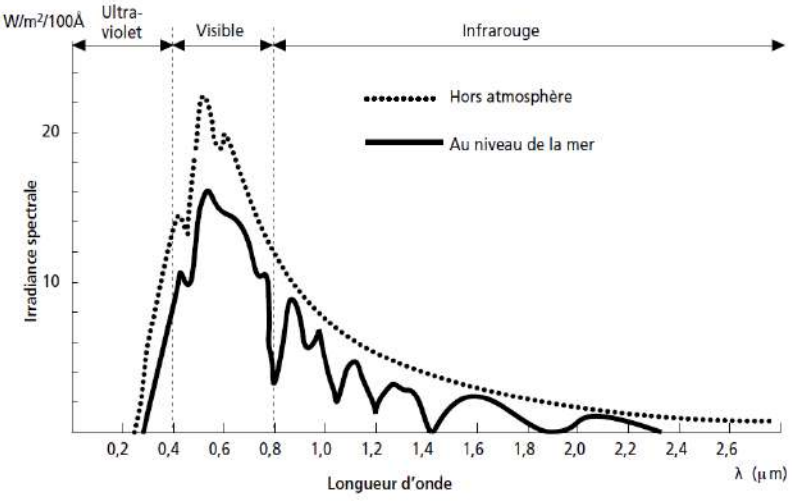


Figure I.1: Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I.2.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (2,5 μm) à l'infrarouge lointain (3 μm), et transportant chacun une énergie E_{ph}, qui répond elle-même à la relation suivante :

$$E_{ph} = h\frac{c}{\lambda_0} \qquad \text{(I.1)}$$

E_{ph} : L'énergie du photon (J).

h : *Constante de Planck* $(h = 6.63.10^{-34}\, J.s)$.

c : Célérité de la lumière dans le vide $(3.10^{8}\, m.s^{-1})$.

λ_0 : *Longueur d'onde (m).*

D'après l'équation (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c.-à-d. plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. On utilise la notion AM (pour Air Mass) afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [4].

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil - terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Voir Figure. I.2).

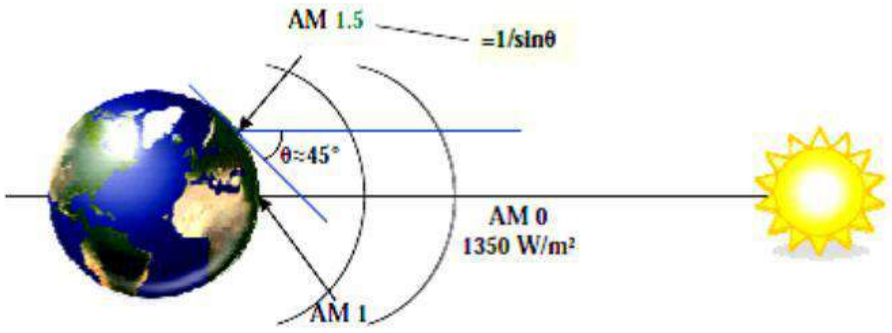


Figure I.2: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion d'AM [1].

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m2), l'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

Il y a quatre types de rayonnement:

- **Le rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du Soleil.

- **Le rayonnement diffus** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.

- **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface.

- **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre, La Figure (I.3) présente les trois rayonnements incidents sur un plan.

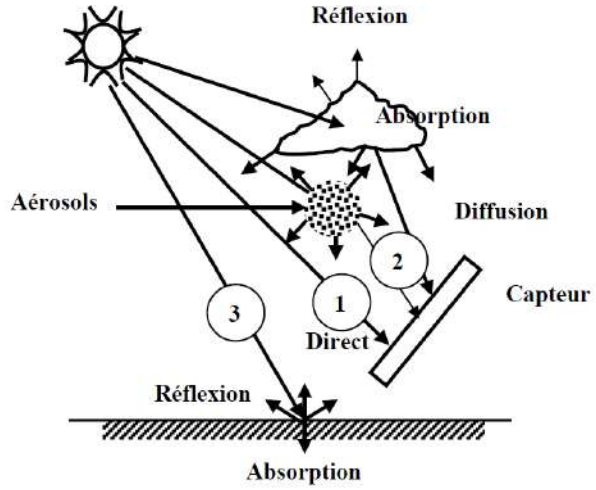


Figure I.3: Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur.

I.3 Définition d'un système PV

Le terme « Photovoltaïque » vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta. Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le choc

pétrolier dans les années 70, la découverte de la méthode pour trouver le MPPT (conséquence des recherches dans le domaine spatial) ainsi que les efforts consentis pour réduire le coût des panneaux, ont favorisé la commercialisation de cette énergie renouvelable. En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïque est construire, ainsi d'équipements de télécommunications. Aujourd'hui, des centrales solaires sont en construction dans le monde entier. [5][6].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois ou quatre types à savoir [7]:

- Les systèmes autonomes.
- Les systèmes connectés au réseau.
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).
- Les systèmes hybrides.

Le type que vous choisissez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

I.4 L'effet photovoltaïque

Les cellules solaires utilisent du silicium comme matériau semi-conducteur. Les cellules sont ensuite assemblées dans un module solaire qui convertit la lumière du soleil directement en électricité. Lorsque la lumière du soleil est absorbée par le matériau de silicium, l'énergie solaire frappe les électrons gratuitement dans la structure en cristal de silicium, ce qui permet aux électrons de circuler à travers le matériau de silicium pour générer de l'électricité. La conversion de la lumière (photon) en électricité (tension) est appelée « *effet photovoltaïque* ». Cet effet photovoltaïque est un phénomène physique propres à certains matériaux communément appelés les semi-conducteurs (souvent le silicium).

Il est composé à partir de 3 étapes qui se résument en l'absorption de lumière par le matériau de la cellule PV. Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques et finalement la collecte de charge. L'absorption d'un photon (grain de lumière) dans le matériau semi-conducteur entraîne la formation d'une paire électron-trou. L'électron et le trou sont séparés sous l'effet de la différence de potentiel dans la jonction. Si on ferme le circuit par une charge (ampoule, etc...), un courant électrique circule. Comme la montre dans la figure (I.4) ci-dessous.

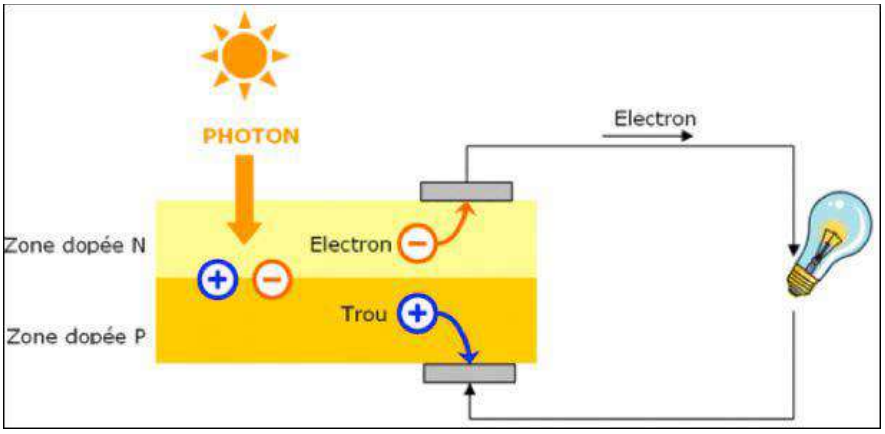


Figure I.4 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique. [11]

I.5 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium (matériau semi-conducteur) : une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P), une couche dopée avec du Phosphore qui possède plus d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N) [8].

Nous allons ici exposer les principes de fonctionnement principaux de cette technique. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone

p. une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Les électrons ne circulent que de la zone p à n et inversement pour les trous .Ceci est du à l'utilisation de semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un *électron* de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un *trou* capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire *électron-trou*. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule. La tension électrique fournie par une cellule en silicium cristallin est de l'ordre de 0,5 Volts. Pour obtenir des tensions plus élevées, on dispose plusieurs cellules en série.la figure (I.5) représente ce fonctionnement [8].

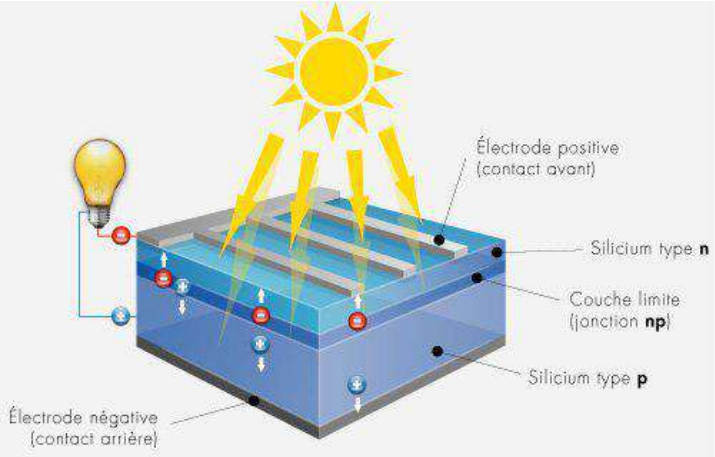


Figure I.5 : Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque solaire [11]

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants: Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des pairs électrons/trous dans le matériau semi-conducteur, Collecte des particules générées dans le dispositif [9].

I.6 Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [10].

I.6.1 Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal Voir Figure (I.6). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin, du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule, les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [11].

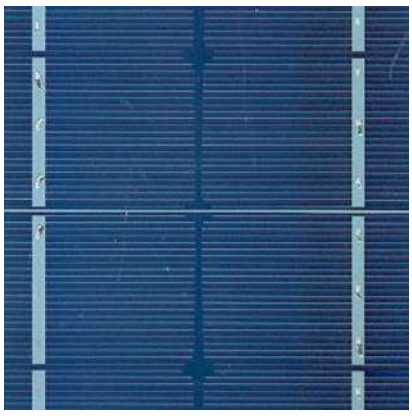


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque (monocristalline). [10]

I.6.2 Cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes), Voir Figure (I.7). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a crée une structure Poly-cristalline, durée de vie estimée : 30 ans [11].



Figure I.7 : Cellule PV poly cristalline.[13]

I.6.3 Cellules amorphes

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Voir Figure (I.8)

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Poly-cristallines ou monocristallines, Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [11].

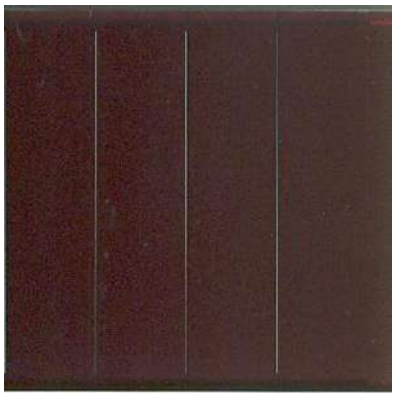


Figure I.8 : Cellule PV amorphe [13]

Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologies. [11]

Matériau	**Rendement**	**Longévité**	**Caractéristiques**	**Principales utilisations**
Silicium monocristallin	12 à 18% *(24,7% en laboratoire)*	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,…
Silicium poly-cristallin	11 à 15% *(19,8% en laboratoire)*	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs…
Amorphe	5 à 8% *(13% en laboratoire)*	20 a 30 ans	* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment

I.7 Représentation des cellules PV

Les cellules PV sont représentées par deux différents modèles :

- Cellule idéale (parfait).
- Cellule non-idéale (réelle) avec une seule diode et deux diodes.

I.7.1 Modèle d'une cellule PV idéale

Une cellule PV idéale (parfait) peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure (I.9), Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [12].

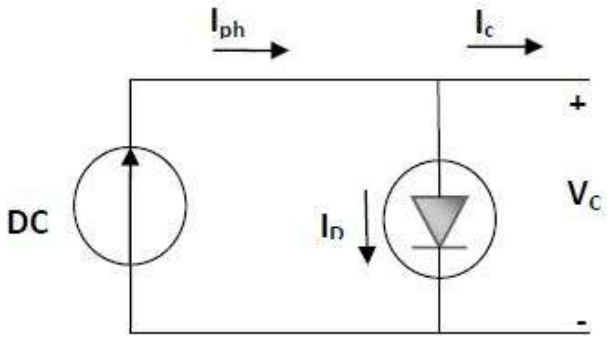


Figure I.9 : Modèle électrique d'une cellule PV idéale. [14]

Avec :

- I_{PH} : Le courant généré par la cellule solaire (A).
- I_C : Le courant de sortie de la cellule PV (A).
- V_C : La tension de sortie de la cellule PV (V).
- I_D : Le courant de diode (A).

I.7.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale

I.7.2.1 Avec une seule diode

La figure se dessue présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque, Il correspond à un générateur de courant Iph monté en parallèle avec une diode et Deux résistances, résistance série (Rs) et résistance parallèle (Rp). [14]

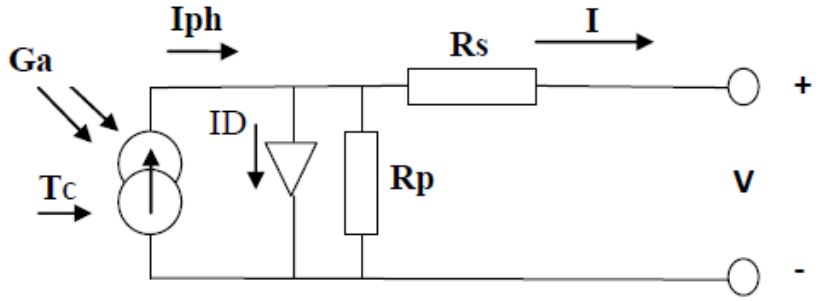


Figure I.10 : Modèle électrique d'une cellule PV idéale. [14]

Avec :

- Ga : rayonnement solaire (W/M2)
- Tc : température (C°)
- Rs : Résistance Série (Ω).
- Rp : Résistance parallèle(Ω).

I.7.2.2 Avec deux diodes

Ce modèle a en plus une deuxième diode attachée en parallèle à la source de courant [13]. Cette diode est utilisée pour améliorer la précision des caractéristiques de cellule PV. En plus elle prend en considération la différence dans le flux de courant lorsque le courant est faible à cause de la recombinaison des charges dans la zone de déplétion du semi-conducteur. [14]

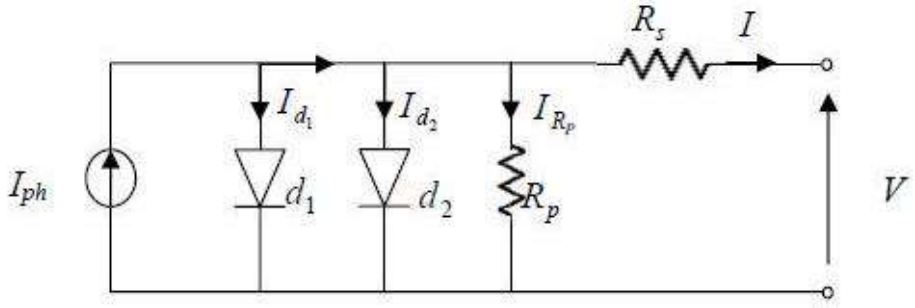


Figure I.11 Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes. [14]

Avec :

- I_{d1} : Le courant de diode 1 (A).

- I_{d2} : Le courant de diode 2 (A).

- I_{RP} : le courant de résistance parallèle (A).

I.8 Influence des différents paramètres

I.8.1 Influence de l'éclairement

Dans la figure (I.12), nous représentons les résultats concernent les caractéristiques I(V) et P(V) du module Sun power SPR-305-WHT-U(305W) à 25°C obtenus pour divers valeurs de l'éclairement.

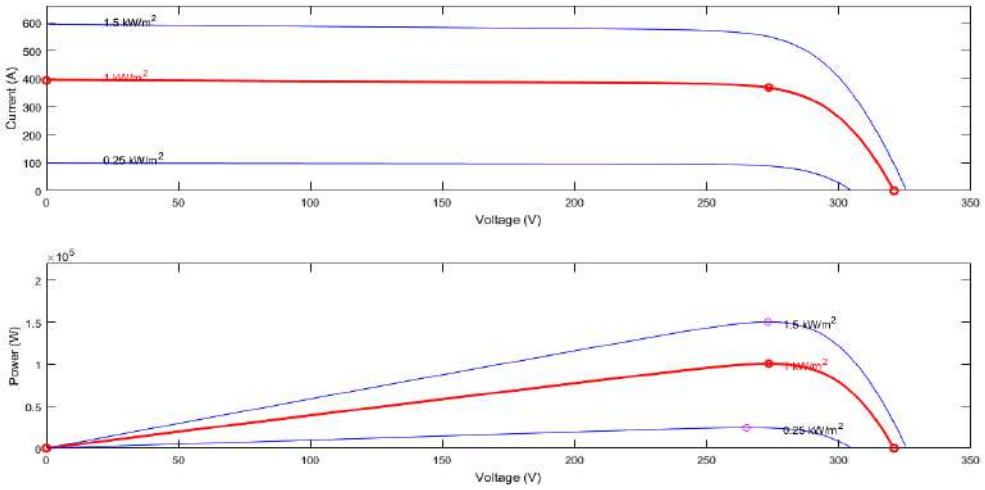


Figure I.12 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(v) et p(v) à 25°c

I.8.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. La Figure (I .13) décrit le comportement du module power SPR-305-WHT-U(305W) sous un éclairement fixe de 1000W/m², et à des températures comprises entre 0°C, 25°C, et 50°C.

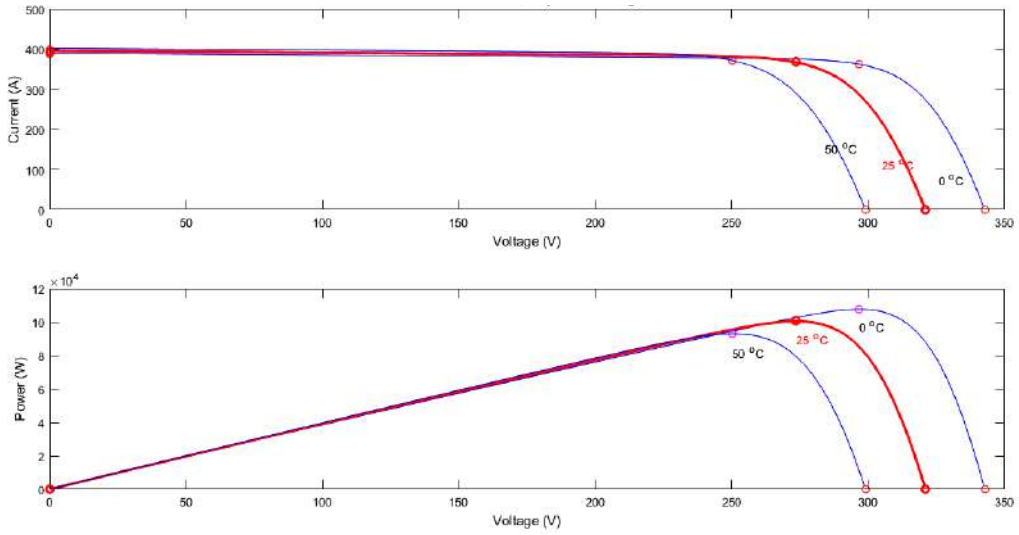


Figure I.13 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) à G=1000W/m2

I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont :

I.9.1 Avantages

+ Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
+ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
+ Génère l'énergie requise.
+ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
+ L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
+ La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
+ Entretien minimal.
+ Aucun bruit. [15]

I.9.2 Inconvénients

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher. [15]

I.10 L'énergie éolienne

I.10.1 Définition du système éolien

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.[16]

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal, la part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire.[16]

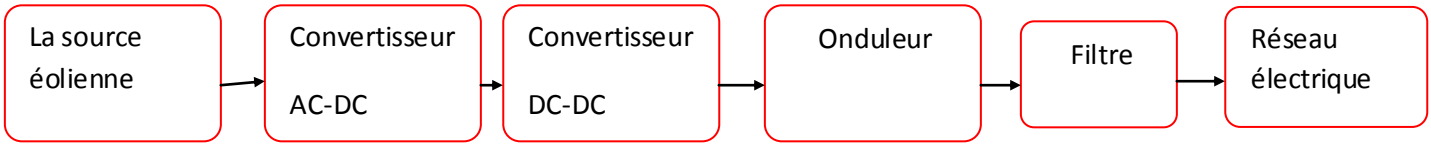


Figure I.14 : schéma d'un system éolien

I.11 Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes [17] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

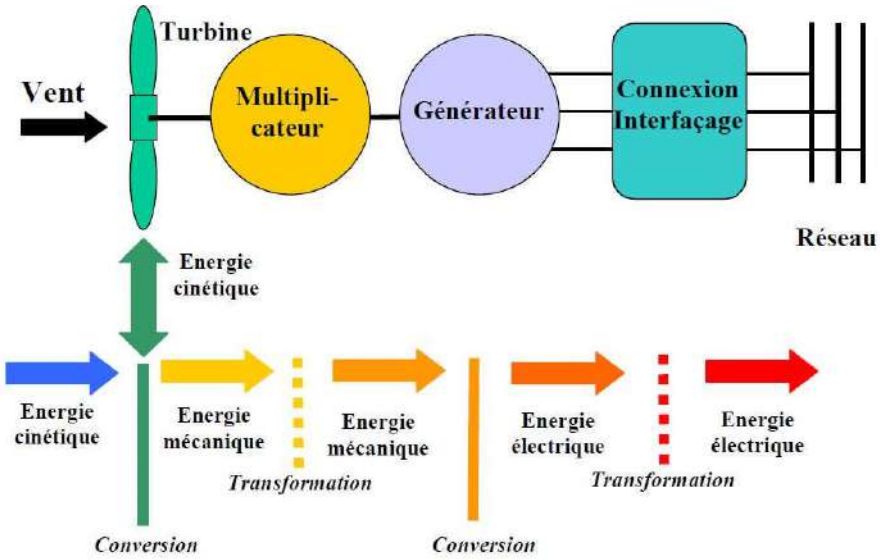


Figure I.15 : Principe de la conversion [18].

I.12 Les différents types d'un système éolien

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent :

I.12.1 Le système à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité car elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Les structures les plus répondues dans le stade de l'industrialisation sont :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur. [19]
- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure est la plus répandue sont celles de darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30), leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif, ces forces sont créées par la Combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).[19]

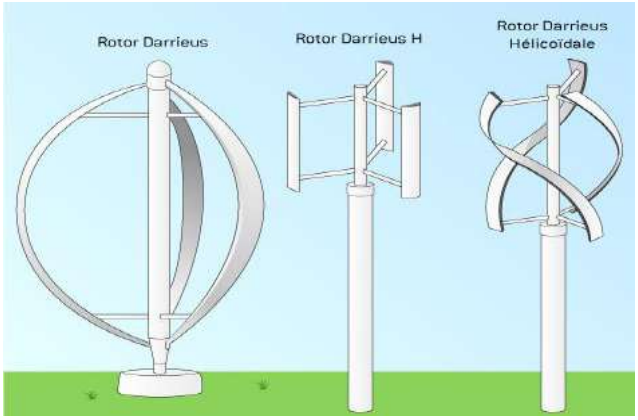


Figure I.16 : Eoliennes à axes vertical. [20]

I.12.2 Le système à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamique ment à la manière des ailes d'avion, dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien,ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi critères.[19]

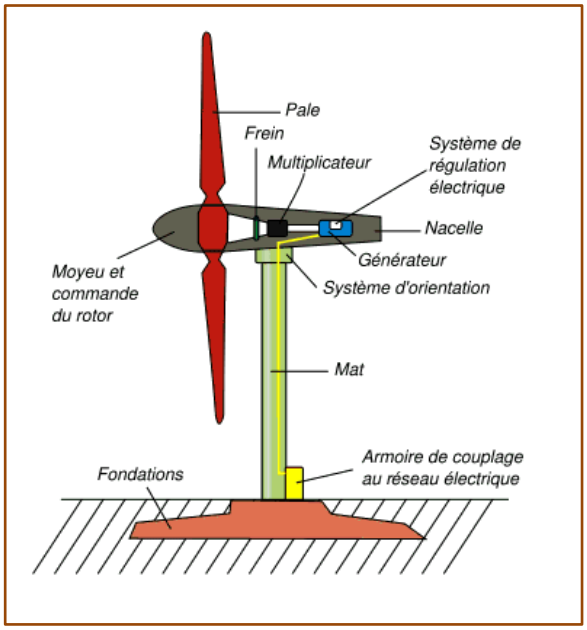


Figure I.17 : Eoliennes à axes horizontal.[30]

I.13 Les principaux composants d'un système éolien

Comme mentionné précédemment, il existe deux types de systèmes éoliens : les systèmes axe vertical et ceux à axe horizontal, mais dans ce mémoire on s'intéressera qu'a ceux à axe horizontal, [19] une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux :

a. La turbine : qui représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est généralement constituée de :

• **Mat :** un tube d'acier à la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. Le mat doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur. [19]

• **Nacelle (supportée par le mat)** est une carcasse qui regroupe plusieurs éléments (générateur, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de refroidissement, système de control, …).[19]

• **Rotor (supporté par la nacelle)** Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. A trois pales, le rotor tripale (concept Danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [19]

b. Le système électromécanique (intégré dans la nacelle)

Qui transforme l'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique et qui regroupe une génératrice électrique avec son environnement (génératrice asynchrone à cage, MADA, génératrice synchrone, batteries de condensateurs, multiplicateur, tension à courant continu, …etc.) plus le système de commande (contrôle) en cas de besoin (redresseur, onduleur, capteur, système de sécurité électrique, ...etc.).[19]

c. Le système d'interconnexion

Qui relie le système électromécanique (producteur d'électricité) au consommateur d'électricité. C'est un système simple (câbles seulement) en cas d'une énergie mécanique stable ; ou composé (redresseur, onduleur, système de control.…) en cas d'une énergie mécanique instable.[19]

d. Le système de contrôle

(Utilisé généralement pour les systèmes éoliens de grande puissance) : comportant un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à ces puissances maximales. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, …etc.), le système arrête automatiquement l'éolienne. [19]

I.14 Notions théoriques sur l'éolien

I.14.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx, de section S, de masse volumique , animée d'une vitesse v , (Figure I.17) s'écrit [21]:

$$dE_C = \frac{1}{2}\rho S dV^2 \tag{I.2}$$

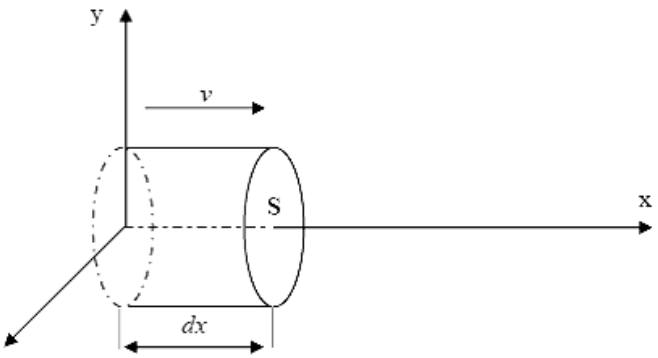


Figure I.18 : Colonne d'air animée d'une vitesse V. [21]

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.[21]

En supposant $dx=v.dt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_C}{dt} = \frac{1}{2}\rho S_0 v^3 \tag{I.3}$$

ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m3).

v : Vitesse instantanée du vent (m/s).

E_C : Energie cinétique du vent (Joules).

I.14.2 Loi de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2. La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1. Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant [22,23]. Soit V', la vitesse au travers de S, la section balayée par les pales de l'éolienne Voir Figure (I.18), et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔEc est :

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} M (V_1^2 - V_2^2) \tag{I.4}$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne P_{aer} s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho S V' (V_1^2 - V_2^2) \tag{I.5}$$

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho S V' (V_1 - V_2) \tag{I.6}$$

D'où :

$$P_{aer} = F.V' = \rho S V'^2 (V_1 - V_2) \tag{I.7}$$

En identifiant les équations (I.7) et (I.9), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{I.8}$$

Et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2).(V_1 + V_2) \tag{I.9}$$

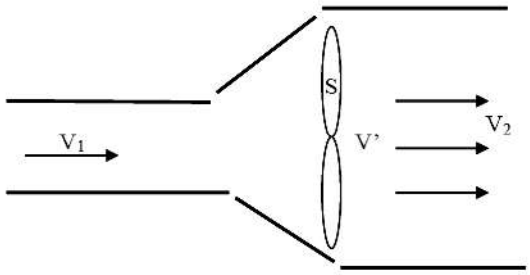


Figure I.19 : (Théorie de Betz) Schéma de principe.[24]

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{\partial P_{aer}}{\partial V_2}$ est nulle, soit pour $V_2 = \frac{V_1}{3}$, la puissance est maximale et vaut [22, 23] :

$$P_{aer} = P_{aer\ \max} = C_{P\ \max} \frac{\rho.S.V_1^3}{2} = \frac{16}{27}.\frac{\rho.S.V_1^3}{2} \tag{I.10}$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = \frac{V_1}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$P_{aer} = C_P.\frac{\rho.S.V_1^3}{2} \tag{I.11}$$

Où Cp est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont V_1, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

I.14.3 Vitesse spécifique ou normalisée

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ_n comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t.R_t$ sur la vitesse instantanée de vent V Voir Figure (I.19) et donné par l'expression suivante [21, 25]:

$$\lambda_n = \frac{\Omega_t.R_t}{V} \tag{I.12}$$

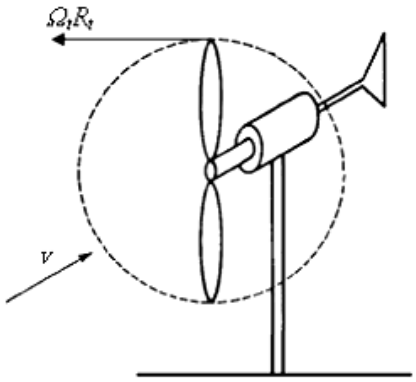


Figure I.20 : Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t.R_t$ [24]

λ_n : vitesse spécifique ou normalisée.

R_t : Rayon de la surface balayée (m).

V : Vitesse de vent (m/s).

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

I.14.4 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [25].

$$C_P = \frac{P_{ex}}{P_T} = \frac{\left(1+\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1-\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \qquad \text{(I.13)}$$

Le coefficient C_P est variable, il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage [22]. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ. La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de 16/27 soit 0.593 [26].

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [21, 25]:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p\max} \tag{I.14}$$

$C_{P\max}$ Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_P. Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} [22].

I.14.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple Cm est assez proche du coefficient de puissance C_P. Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_P nulle pour une valeur de Cm non nulle [27].

En combinant les équations (I.13), (I.14), et (I.15), la puissance mécanique Pm disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_P(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{I.15}$$

Avec :

$$\lambda_n = \frac{\Omega_t R}{V_1} \tag{I.16}$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \tag{I.17}$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_P}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho S_t R_t V^2} \tag{I.18}$$

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).

I.14.6 Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme, [28] :

$$f(V) = \left(\frac{K}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \tag{I.19}$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité (V) représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées, K et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull.

Le paramètre K (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences et classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \le V_x) = \int_0^{V_x} f(V)dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right)$$
$$f(V \ge V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V)dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad \text{(I.20)}$$

I.15 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure [29], effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants aux dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes [29].

I.16 Impact de l'intégration d'énergies éolienne sur les réseaux électriques

L'énergie produite par les nouveaux moyens de production d'énergie electrique telles que l'énergie éolienne est destinée à etre produite localement (au plus prés des centres de consommation) et n'est donc pas destinée à etre transportée sur de grandes distances. Elle peut s'etaler de quelques kilowatts à quelques megawatts et peut etre couplée avec le réseau electrique. La connexion est prévue dans la majorité des cas dans les réseaux de distribution selon l'ordre de grandeur des puissances injectées.

L'insertion croissante de cette énergie au sein du système electrique existant n'est pas sans impact sur l'exploitation et le fonctionnement de ce dernier, la production à base d'énergie renouvelable a toujours existé dans les réseaux de distribution, mais sa présence n'a jamais été d'une ampleur significative pour avoir un impact sur le fonctionnement du réseau. Aujourd'hui la situation commence à changer car la production d'électricité à base d'énergie renouvelable augmente d'année en année. Au-delà d'une « masse critique » cela peut avoir des conséquences négatives pour les réseaux et pour les consommateurs avec des :

- Impacts sur les niveaux de tension
- Impacts sur la fréquence du réseau
- Impacts fonctionnelle des protections dues à la modification des transits de puissance
- Impacts sur la stabilité des réseaux et sur les temps d'élimination de défauts.

Le caractère stochastique, parfois peu prévisible et surtout non-pilotable des générateurs à base d'énergies renouvelables renforcent encore plus ces impacts. Les systèmes de réglage déjà en place ne sont plus suffisants, car leur fonctionnement n'est pas adapté à faire face à la dynamique et aux besoins additionnels de puissance [30].

I.17 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.17.1 Avantages

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.

- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO2.

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidement pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [24].

I.17.2 Inconvénients

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.

- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.

- Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs [24].

I.18 Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : solaire photovoltaïque et éolienne, et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnements, ce qui permet d'introduire à l'analyse des systèmes d'énergétiques au chapitre II.

Chapitre II

Système hybride (Pv-éolien)

II.1 Introduction

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif.

Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer. [31].

Nous allons présentés dans ce chapitre les différentes caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien et l'étude des types des convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques et éolien. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur), l'onduleur, le redresseur, Ainsi on décrive la modélisation des systèmes (pv-éolien).

II.2 Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique, et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit [32], nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption.
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système.
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques [33].

II.3 l'origine de la notion du système

Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.

- Le système est un outil conceptuel,
- L'ensemble doit former une identité ou une unité cohérente et autonome,
- Les objets ou éléments peuvent être réels ou conceptuels,
- La notion d'organisation implique des relations, interrelations, interactions dynamiques entre les objets [34].

II.4 Description D'un Système Hybride

Le terme système hybride s'applique à tout système de production d'énergie utilisant des sources de natures différentes ; soient une source passive ou renouvelable (hydraulique, solaire ou éolienne) et une source active (Générateur thermique). Plus spécifiquement, les systèmes hybrides autonomes visés dans cette étude sont une combinaison des éléments suivants :

- un champ de panneaux PV
- une turbine éolienne
- une turbine hydroélectrique
- une ou plusieurs génératrices.
- un banc de batteries pour stocker l'énergie produite
- une unité de contrôle de charge de la batterie
- un onduleur pour adapter l'alimentation DC aux charges AC ,iI s'agit le plus souvent d'un onduleur bidirectionnel pouvant aussi assurer la fonction de redresseur lorsque la génératrice doit recharger les accumulateurs.
- et parfois une station de monitoring pour mesurer les paramètres (courant, tension, insolation, température). [35].

II.5 Principaux Composants des systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire), Ils peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.), des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène…), des charges principales et de délestages et un système de surveillance. [18]

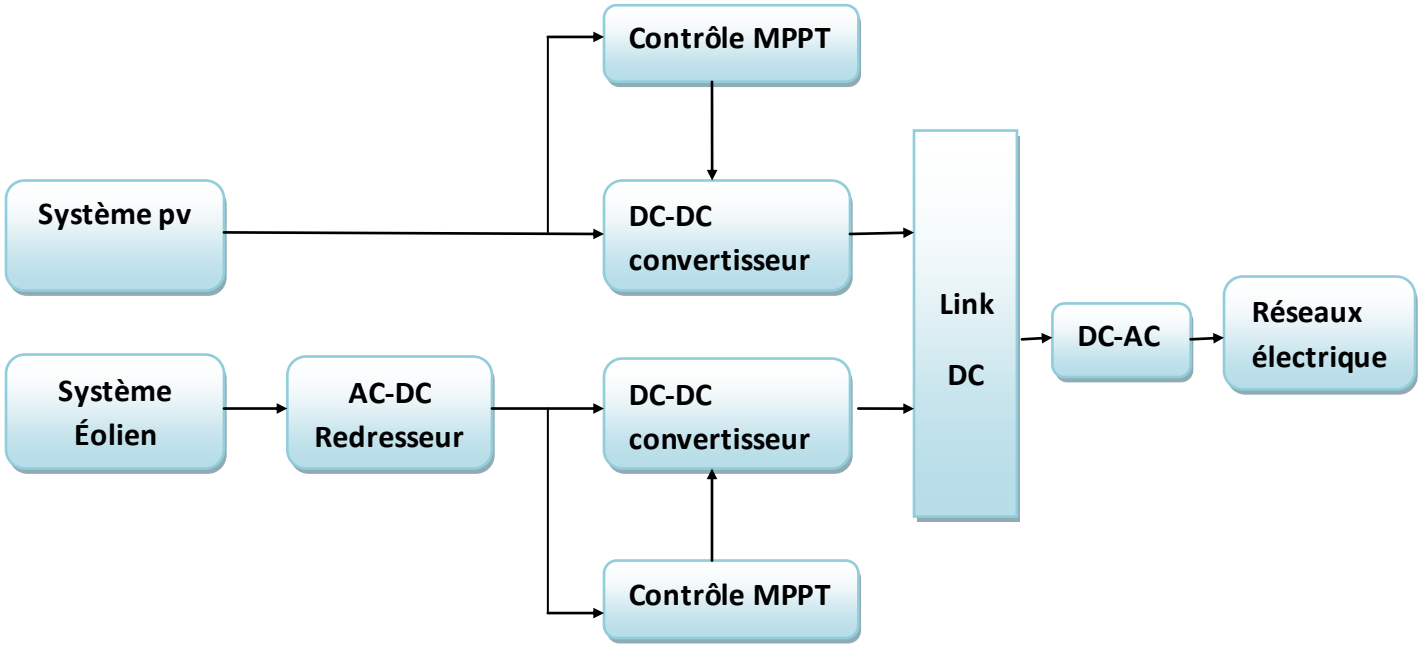


Figure II.1: Schéma fonctionnel du système hybride proposé.

II.6 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur un phénomène physique : l'effet photovoltaïque, éolien ou hydraulique sont captés puis transformés en électricité (courant continu ou alternatif) respectivement par le panneau photovoltaïque, l'aérogénérateur, la turbine hydroélectrique. Cette électricité est stockée dans les batteries par l'intermédiaire d'un régulateur assurant l'équilibre instantané entre production et consommation, elle peut ensuite être utilisée directement sous forme de courant continu ou sous forme de courant alternatif après transformation par un onduleur et un automate programmable gère les transitions entre les différents modes d'exploitation du système : diesel, et le mode hybride [36].

II.7 Convertisseur statique DC-DC (Hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits de fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. [8]

Le hacheur se compose deux condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [8]

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries,

dans une alimentation à découpage (Figure II.2), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [37].

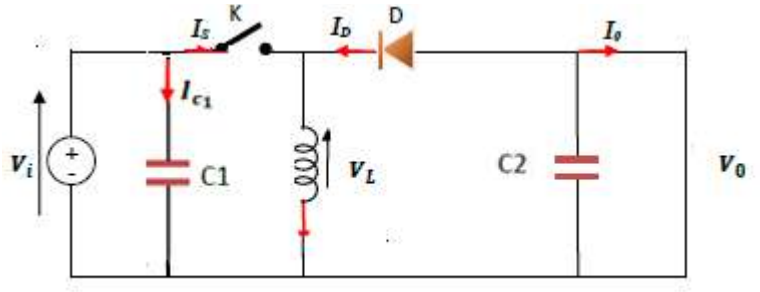


Figure II.2 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.[8]

On trouve trois types de convertisseur

- Hacheur dévolteur (Buck).
- Hacheur survolteur (Boost).
- Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

II.7.1. Hacheur dévolteur (Buck)

La figure (II.3) présente le convertisseur buck ou convertisseur dévolteur (abaisseur de tension) ou hacheur série. Son rôle principal est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

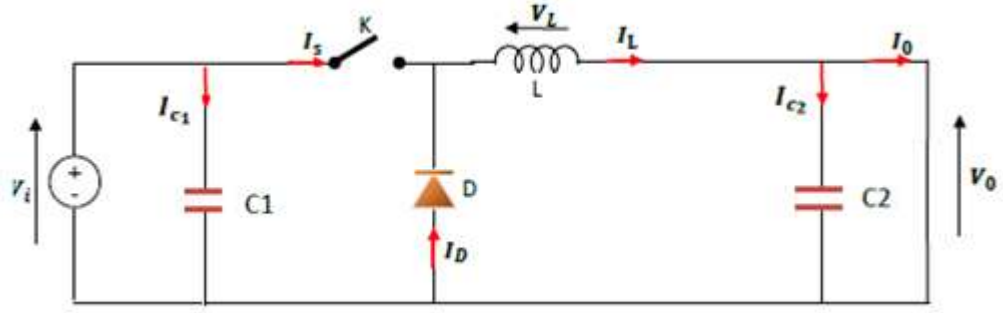


Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. [8]

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.4) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans

les deux cas : l'interrupteur fermé pendant ***dTs*** et l'interrupteur ouvert pendant ***(1-d)T***$_S$ [37,38,39,40].

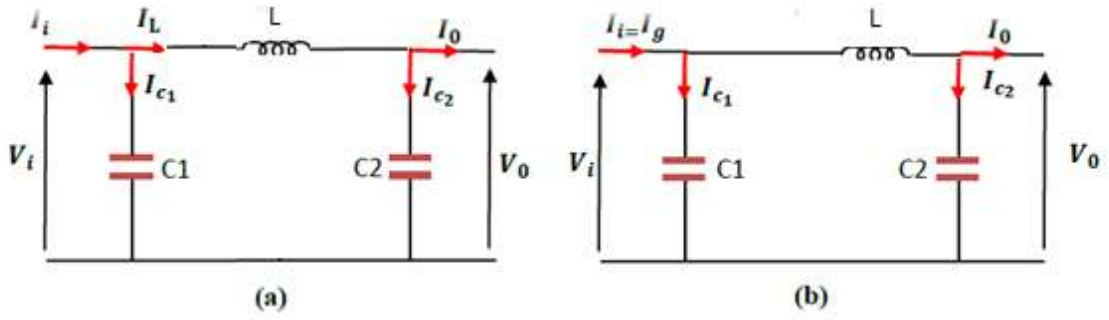


Figure II.4*:* Schémas équivalents du hacheur dévolteur, [8]
(a) : K fermé, (b) : ouvert.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.3), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période d.T$_S$:

$$\begin{cases} I_{c1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_1 \dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dL_i}{dt} = V_i - V_0 \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

Pour la deuxième période (1-d)T$_S$:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i \\ I_{C2} = L \dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = -V_0 \end{cases} \quad \text{(II.2)}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période Ts, on utilise généralement l'expression suivante [41] :

$$< \frac{dx}{dt} > Ts = \frac{dx}{dt_{(DTs)}} + DTs + \frac{dx}{dt_{(1-D)Ts}} (1-d)Ts \quad \text{(II.3)}$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C1\frac{dV_i}{dt} T_S = dT_S(I_i - I_L) + (1-d)T_S Ii \\ C_2 \frac{dV_0}{dt} T_S = dT_S\left(I_L - I_0\right) + (1-d)T_S(I_L - I_0) \\ L\frac{dI_L}{dt} = dT_S(V_i - V_0) + (1-d)T_S(-V_0) \end{cases} \quad \text{(II.4)}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} I_0 = I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \\ I_L = \frac{1}{d}(I_i - C_1 \frac{dV_L}{dt}) \\ V_I = \frac{1}{d}(L\frac{dI_L}{dt} + V_0) \end{cases} \quad \text{(II.5)}$$

II.7.2 Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.5). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [37].

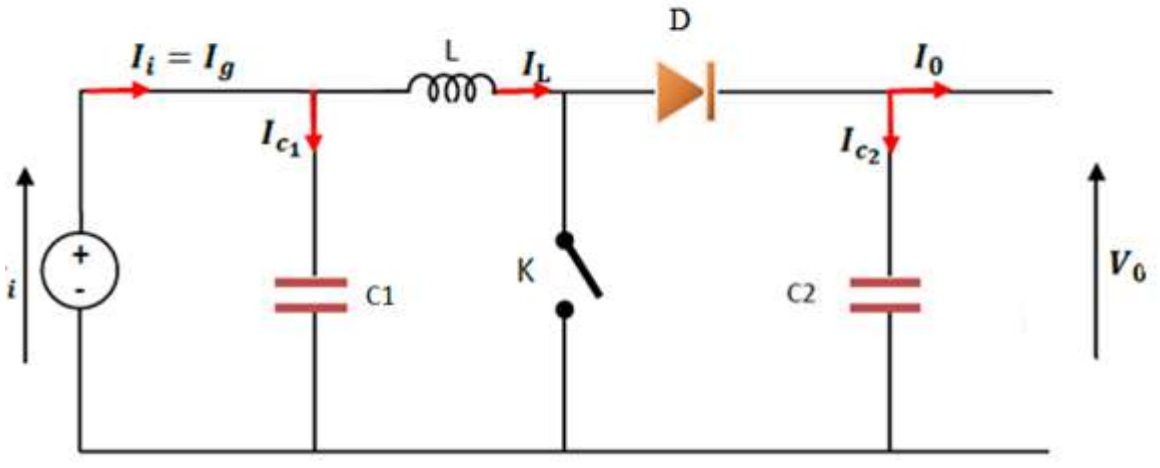


Figure II.5 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur. [8]

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur voir figure (II.6) des deux phases de fonctionnement donne [37] :

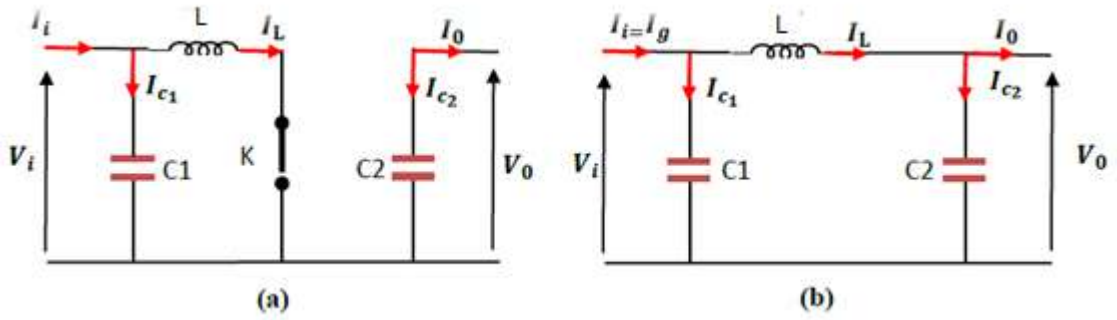


Figure II.6 : Schémas équivalents du hacheur survolteur, *(a) : K fermé,*(b) : ouvert.

Pour la première période d.T_S [8]

$$\begin{cases} I_{C1} = C1\dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C2\dfrac{dV_0}{dt} = -I_0 \\ V_L = L\dfrac{dI_L}{dt} = -V_i \end{cases} \qquad \text{(II.6)}$$

Pour la deuxième période (1-d)T_S:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1\dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C2\dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L\dfrac{dI_L}{dt} = V_i - V_0 \end{cases} \qquad \text{(II.7)}$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.6) et (II.7), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} I_L = I_i - C_1 \dfrac{dV_i}{dt} \\ I_0 = (1-d) I_L - C_2 \dfrac{dV_i}{dt} \\ V_i = L \dfrac{dI_L}{dt} + (1-d) V_0 \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

II.7.3. hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (II.6) [37] :

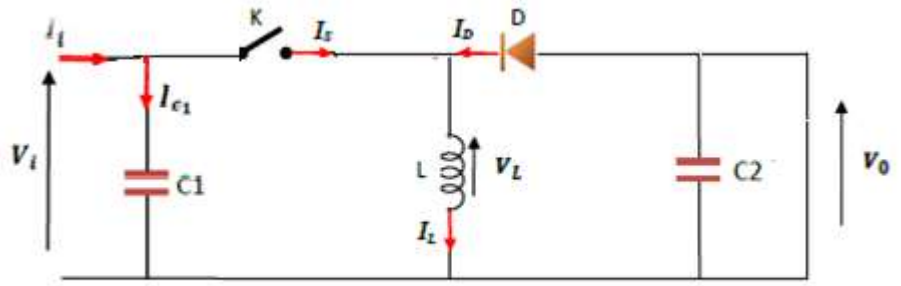


Figure II.7 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur. [8]

La figure (II.8) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [37].

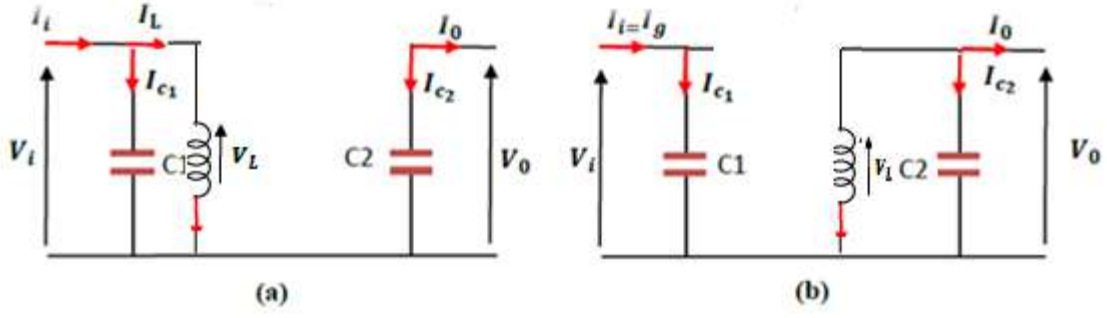


Figure II.8 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur,

(a) : K fermé, (b) : K ouvert. [8]

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient:

Pour la première période d.T_S:

$$\begin{cases} I_{c1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = V_0 \end{cases} \quad \text{(II.9)}$$

Pour la deuxième période (1-d)T_S:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = V_0 \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.9) et (II.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur :

$$\begin{cases} I_L = \dfrac{1}{d}(I_i - C_1 \dfrac{dV_i}{dt}) \\ I_0 = -(1-d) I_L - C_2 \dfrac{dV_0}{dt} \\ V_i = \dfrac{1}{d}(-(1-d)V_0 + L \dfrac{dL_i}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

II.8 Adaptation du système par un convertisseur élévateur DC- DC (Hacheur Boost)

Le système PV est formé par un générateur PV, convertisseur d'énergie (survolteur) et une charge (RS). L'interrupteur Mosfet est commandé par un signal de période T et de rapport cyclique D.

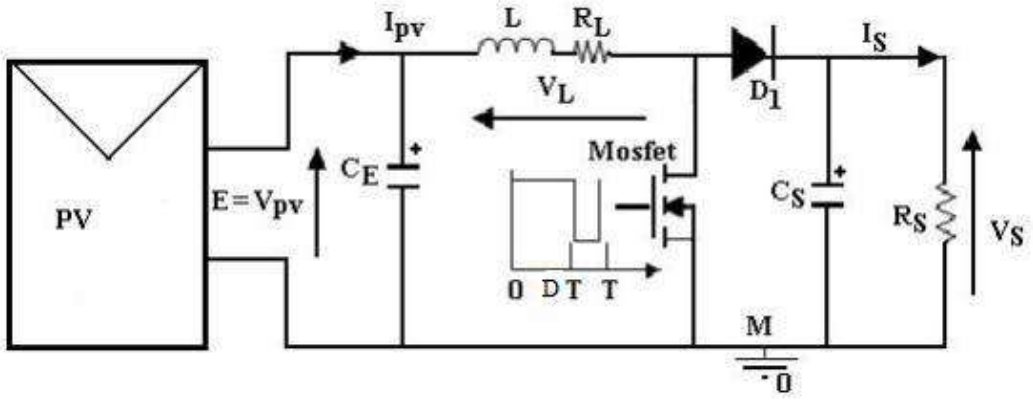


Figure II.9 : Schéma électrique du convertisseur boost.

Les grandeurs électriques des sorties (V_S et I_S) dans le convertisseur élévateur sont liées à celles d'entrées (E et I_{PV}) en fonction du rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur Figure (II.8) par les relations:

$$V_S = E / (1 - D) \quad \text{(II.12)}$$

$$I_S = (1 - D)\, I_{PV} \quad \text{(II.13)}$$

A partir des équations (II-12) et (II-13), nous pouvons déduire la résistance à la sortie du panneau P_V (R_{PV}) en fonction de D et R_S :

$$R_{PV} = R_S(1-D)^2 \quad \text{(II.14)}$$

Le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances R_{PV} et R_S :

Ou bien

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{PV}}{R_S}}$$

$$\frac{V0}{V_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad \text{(II.15)}$$

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{ch}}$$

Puisque le rapport D est inférieur à 1 (D < 1), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge RS remplit la condition suivante

$$R_S > R_{PV} \quad \text{(II.16)}$$

Dans les conditions optimales et pour une charge Rs donnée, la résistance interne du panneau ($R_{PV} = R_{Opt}$) et le rapport cyclique ($D = D_{Opt}$) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - D_{Opt})^2 . R_S \quad \text{(II.17)}$$

La relation (II-15) montre que, pour une puissance incidente W, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (D_{Opt}) point PPM.

II.9 Convertisseur statique DC-AC (Onduleur)

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue, en ce qui concerne les applications industrielles, nous rencontrerons l'onduleur en sortie des variateurs de fréquence pour alimenter les moteurs asynchrones [42].

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés des onduleurs. la fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant.

D'autre part, si la tension d'entrée est fixe et qu'elle est non contrôlable, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur. le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée, pour des applications de faibles et moyennes puissances, les tensions de forme d'onde carrée ou quasi carrée pourront être acceptables; alors que pour les applications de fortes puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion des harmoniques sont exigées. Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse, l'harmonique contenue dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement par des techniques de commande.

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple :

variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues.

L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu obtenu à partir d'un redressement monophasé ou triphasé comme le montre la figure (II.10).[43]

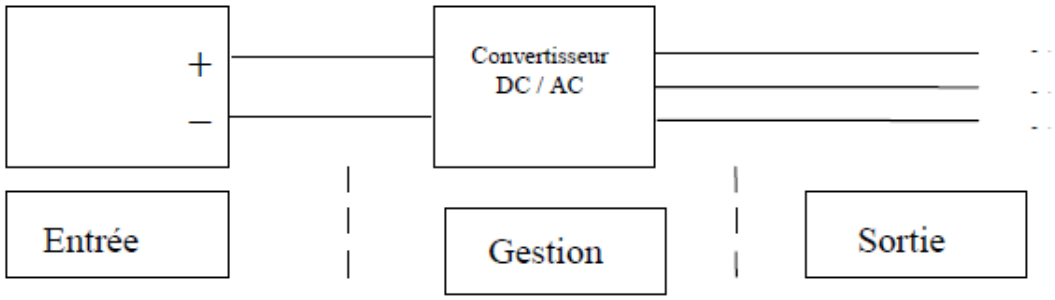


Figure II.10 : Principe de conversion de l'onduleur.

De façon générale, les onduleurs peuvent être classifiés en deux types : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés. Chaque groupe peut utiliser les dispositifs de commande comme : BJT, MOSFET, MCT, SIT ou commande forcée des thyristors en fonction des applications.

II.9.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure (II.11), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

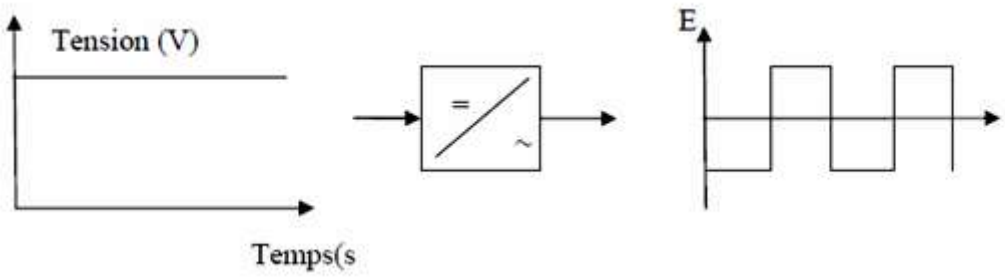


Figure II.11 : Symbole et signal d'un onduleur.

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources [44].

II.10 Modèle de l'onduleur a trois niveaux

La figure (II.12) montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion F_{Ki} de l'interrupteur. elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. [45]

en mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation.

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K4} \end{cases} \qquad \text{(II.18)}$$

Avec, k = 1, 2 ou 3, représente le numéro du bras.

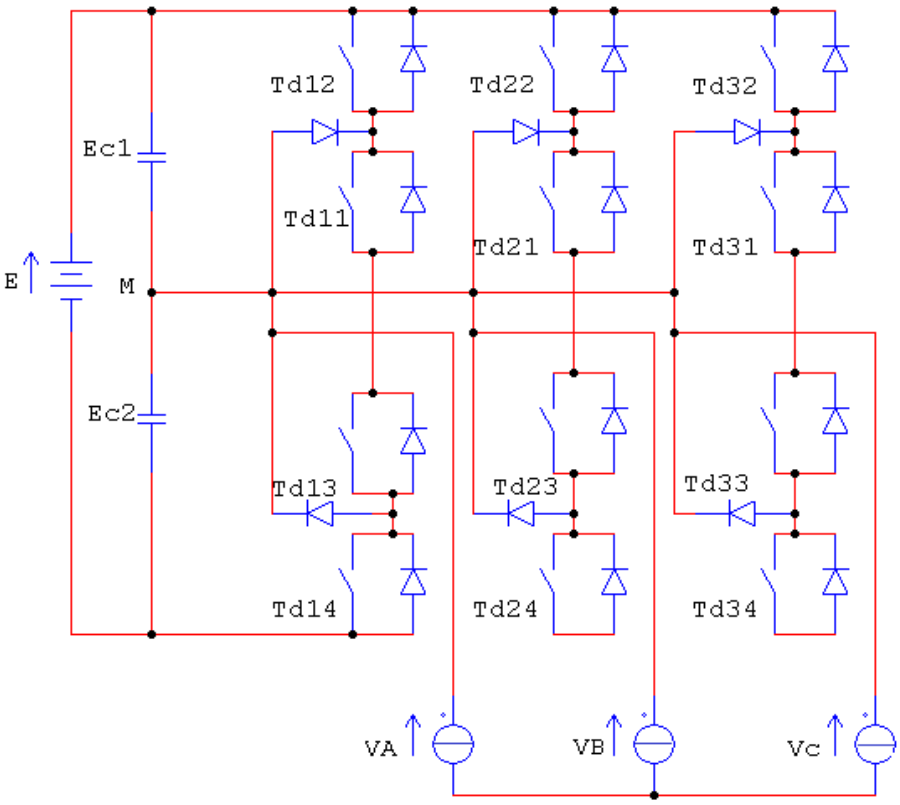


Figure II.12 : Onduleur à trois niveaux à structure NPC. [45]

On définit la fonction de connexion F_{Km}^{b} du demi-bras comme suit:

$$\begin{cases} F_{K1}^{b} = F_{K1} \times F_{K2} \\ F_{K0}^{b} = F_{K3} \times F_{K4} \end{cases} \quad \text{(II.19)}$$

On désigne par: m = 1: le demi-bras du haut et m = 0 : le demi-bras du bas. les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^{b} \times U_{c1} - F_{10}^{b} \times U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^{b} \times U_{c1} - F_{20}^{b} \times U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^{b} \times U_{c1} - F_{30}^{b} \times U_{c2} \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

Etude et réalisation d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI

Les tensions simples de sortie s'écrivent:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{30}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad \text{(II.21)}$$

La stratégie de commande proposée est une MLI vectorielle. Pour chaque pas de calcul, le vecteur de référence est constitué de trois des dix-neuf vecteurs que constitue le diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux Figure (II.13).

De ce fait, la forme d'onde de la tension de sortie obtenue est meilleure que celles obtenues par les MLI classiques. Cette stratégie se compose des six étapes schématisées par l'organigramme. [46,47]

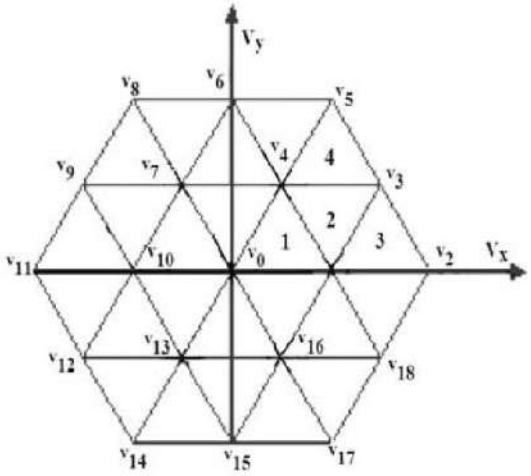


Figure II.13 : Diagramme vectoriel de l'onduleur. [45]

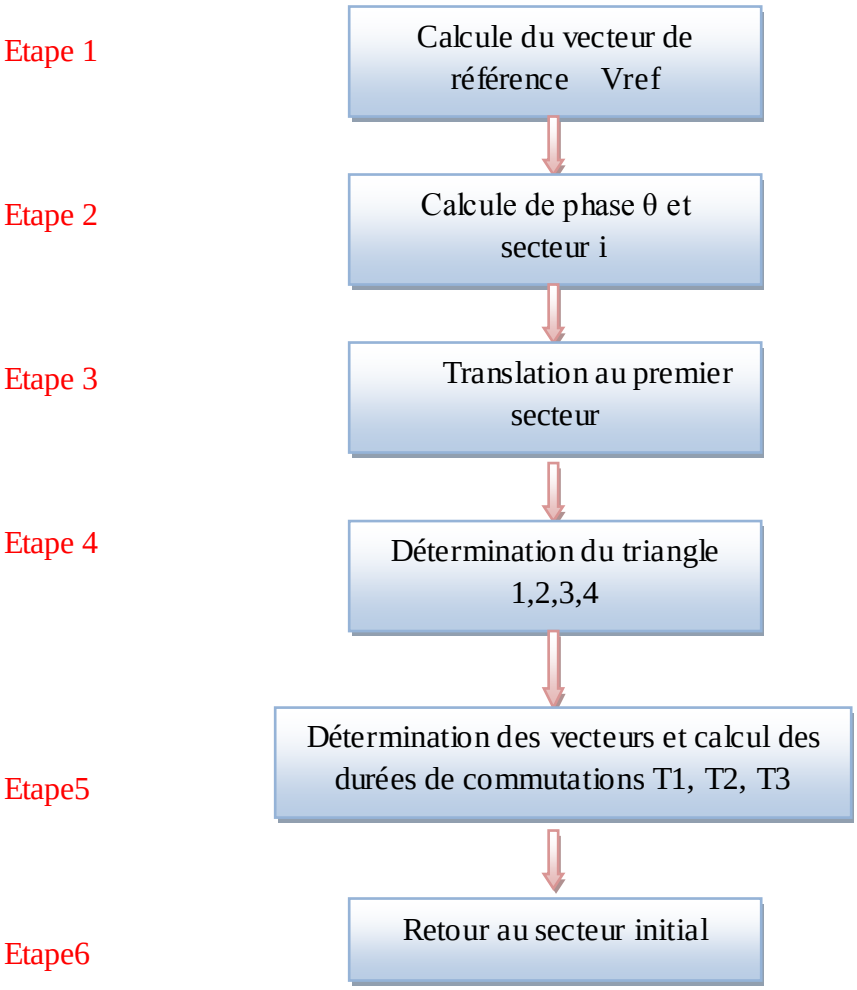


Figure II.14: Etapes de la MLI vectorielle. [45]

II.11 Convertisseur AC-DC (Pont redresseur de diodes triphasé)

Etant donné que le GSAP produit une tension à fréquence et amplitude variables, des dispositifs d'électronique de puissance supplémentaires sont nécessaires pour satisfaire les besoins demandées par la charge. La méthode souvent utilisée est de redresser la tension de sortie, puis on traite cette tension continue avant de l'introduire comme tension d'entrée de l'onduleur.

Dans cette étude, on utilise un pont de diodes triphasé pour redresser la tension produite par le GSAP, le circuit constitué par un pont de diodes (PD3) de la figure (II.15) est considéré, les diodes sont supposées parfaites (interrupteurs parfaits) et le courant de la sortie du montage redresseur est continu (charge fortement inductive) [48] :

- lorsque $v_1 > v_2 > v_3$, D_1 et $D_3^{'}$ conduisent : $u_d = v_1 - v_3$;
- lorsque $v_1 > v_3 > v_2$, D_1 et $D_2^{'}$ conduisent : $u_d = v_1 - v_2$;
- lorsque $v_2 > v_1 > v_3$, D_2 et $D_3^{'}$ conduisent : $u_d = v_2 - v_3$;
- lorsque $v_2 > v_3 > v_1$, D_2 et $D_1^{'}$ conduisent : $u_d = v_2 - v_1$;

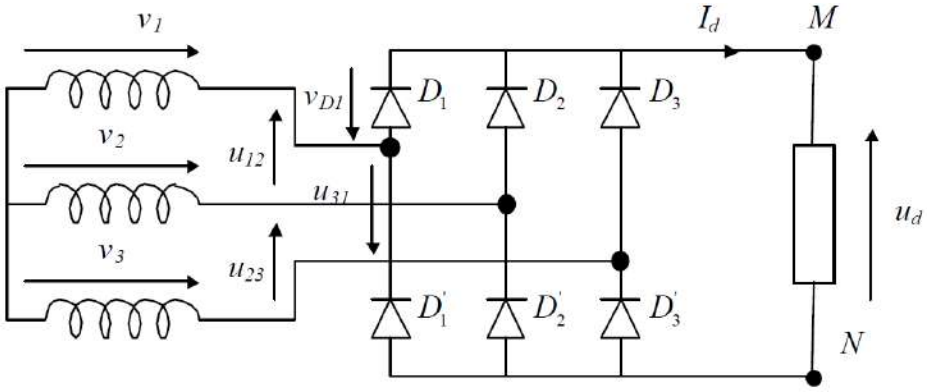


Figure II.15 : Pont redresseur de diode triphasé [48]

- lorsque $v_3 > v_1 > v_2$, D_3 et $D_2^{'}$ conduisent : $u_d = v_3 - v_1$;
- lorsque $v_3 > v_2 > v_1$, D_3 et $D_1^{'}$ conduisent : $u_d = v_3 - v_2$;

Chaque diode conduit ainsi pendant un tiers de période tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoïdale par période T. Sur la figure II.16, on a représenté l'allure de la tension redressée u_d ainsi que la tension aux bornes de la diode $D_1(v_{D1})$.[48]

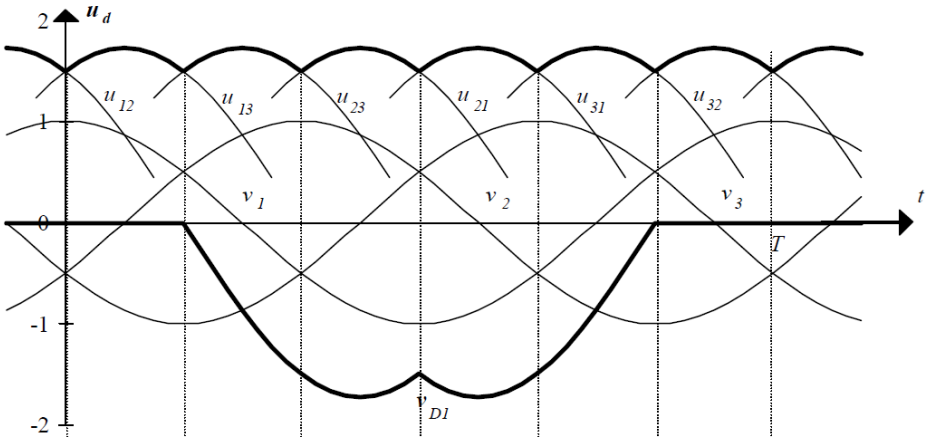


Figure II.16 Tension redressée [48]

Nous avons supposé que la source et le redresseur sont parfaits, alors que la tension redressée u_d est périodique de période $T/6$. Entre 0 et $T/6$, cette tension a pour expression : $u_d = u_s\sqrt{2}\cos(\omega t)$ avec u_s étant la valeur efficace des tensions d'entrées. Etant donné que les éléments ne sont pas parfaits (la chute due aux résistances et aux diodes, l'empiétement, la non-sinusoïdale des tensions d'entrées...) entraîne une diminution de la valeur moyenne u_d de la tension redressée. Cette chute peut être négligée. [48]

Dans ce cas, nous avons :

$$u_d = \frac{1}{T/6}\int_{-T/12}^{T/12} u_d dt = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{GSAP} \qquad \text{(II.22)}$$

$$I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_{GSAP} \qquad \text{(II.23)}$$

Ou U_d et I_d sont les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie du redresseur, U_{GSAP} et I_{GSAP} sont les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamentaux coté alternatif. [48]

II.12 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.17) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique I =f (V) de la cellule [39]:

• La résistance série R_{ser} est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

• La résistance shunt R_{shu} est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée

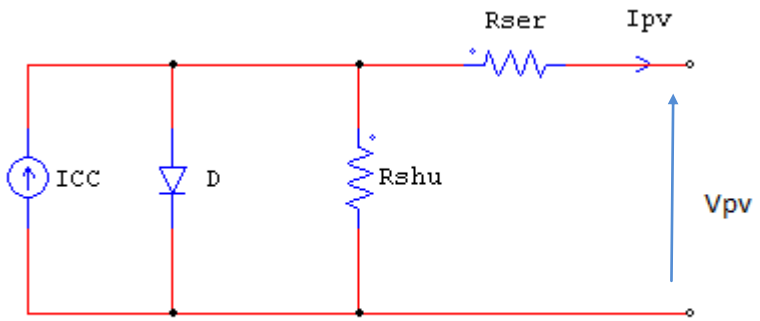


Figure II.17 : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [39, 40,41].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat}\left[\frac{\left[\exp(V_{pv} + (I_{pv} \times R_{ser}))\right]}{nKT}\right] - \frac{V_{pv} + (I_{PV} \times R_{ser})}{R_{shu}} \qquad \text{(II.24)}$$

I_{sat} : le courant de saturation(A).

K : la constante de Boltzmann (1,381 10^{-23} J/K).

T : la température effective des cellules en Kelvin(K).

e : la charge de l'électron (e=1,6 10^{-19} C).

n : le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<3).

I_{pv} : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

V_{pv} : la tension aux bornes de cette même cellule.

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit).

R_{shu} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_{ser} : la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [9].

II.12.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes:

II.12.1.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation(II.22), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{nKT}-1\right)\right]-\frac{\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{R_{shu}} \qquad \text{(II.25)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{nKT}-1\right)\right]$ Devant I_{ph} .L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1+\frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \qquad \text{(II.26)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ($I_{cc} = I_{ph}$).

II.12.1.2 Tension de circuit-ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{eV_{PV}}{nKT}\right) - 1\right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \tag{II.27}$$

I.12.1.3 Rendement énergétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt}, V_{opt}) et la puissance solaire incidente. il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \tag{II.28}$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles, ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

I.12.1.4 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fille factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt}, V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{ser} et R_{shu}. Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \tag{II.29}$$

II.13 Modèle triphasé de la MSAP

II.13.1 Représentation de la machine dans l'espace électrique

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de $\frac{2\pi}{3}$, et au rotor des aimants permanents assurant son excitation comme le montre par la figure (II.18).

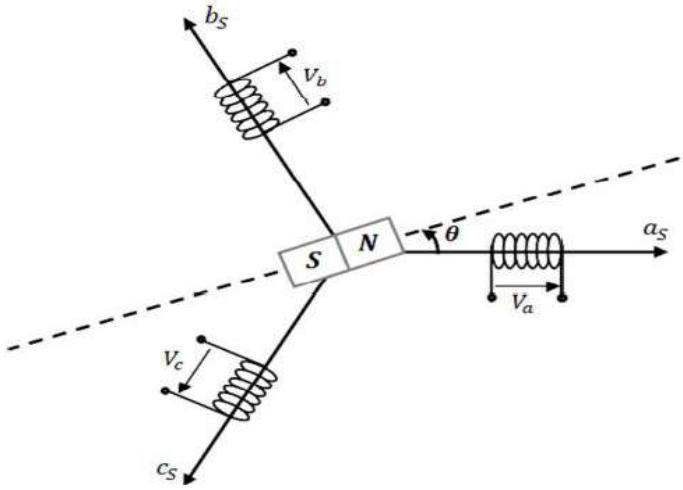


Figure II.18 : représentation de la MSAP sur le repère (abc).

II.13.2 Equations de la MSAP

Les trois types d'équations traduisant le comportement de génératrice sont :

-les équations électriques.

- les équations électromagnétiques.

-l'équation mécanique.

II.13.2.1 Equations électriques

Les équations électriques régissant le fonctionnement de la MSAP dans le repère fixe lié au stator (a,b,c) de la machine s'écrivent sous la forme suivante :

$$[V_s] = [-R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_s] \tag{II.28}$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [\Psi_s] = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \tag{II.29}$$

[V_s] : Vecteur des tensions statoriques.

[R_s] : Matrice des résistances statoriques.

[i_s] : Vecteur des courants statoriques

[Ψ_s] : Vecteur des flux statoriques.

II.13.2.2 Equations électromagnétiques

Les flux totalisés $[\psi_s]$ des phases statoriques s'écrivent dans le repère lié au stator sous la forme matricielle suivante :

$$[\Psi_s] = [-L_{ss}][i_s] + [\Psi_{sf}] \tag{II.30}$$

Avec:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix} \tag{II.31}$$

Où :

L_{sa},L_{sb} et L_{sc} : Des inductances propres aux phases (a, b et c).

M_{ab} , M_{ac} , M_{ba},M_{bc},M_{ca} etM_{cb} : Des inductances mutuelles aux phases (a, b et c).

II.13.2.3 Equations mécanique

L'équation fondamentale de la dynamique est:

$$C_{ent} - C_{em} = \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \tag{II.32}$$

Où :

P : Nombre de paires de pôles.

J : Le moment d'inertie total ramené sur l'arbre.

f : Le coefficient de frottement visqueux.

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par la machine.

C_{ent} : Couple d'entrainement appliqué sur l'arbre de la machine.

D'une façon générale, le couple électromécanique délivré par la machine, obtenu à partir de la dérivée de l'énergie mécanique par rapport à la position électrique du rotor, est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} P \left[i_s \right]^T \left[\frac{d\left[i_s \right]}{d\theta_r} \right] \left[i_s \right] \tag{II.33}$$

en faisant apparaître les grandeurs statoriques et rotoriques dans l'équation (2.7), on aboutit à la formule du couple électromagnétique suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} P \left[\frac{1}{2} \left[i_s \right]^T \frac{d\left[L_{ss} \right]}{d\theta_r} + \left[i_s \right]^T \frac{d\left[\Psi_{sf} \right]}{d\theta_r} \right] \tag{II.34}$$

II.13.3 Transformation de Park

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique. Cette transformation est appelée souvent transformation des axes. Elle représente la projection des trois phases des enroulements (a, b, c) de la machine sur un repère à deux enroulements biphasés orthogonaux (d, q). Cette transformation a pour objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation.

La représentation de Park consiste à projecteur les trois phases (a, b, c) de la machine sur un repère biphasé orthogonal (d,q), Où d est l'axe direct et q l'axe en quadrature .en plus des simplifications considérées dans la modélisation, la machine est supposée électriquement et magnétiquement équilibrée.

A partir de la conservation des forces magnétomotrices et des puissances dans les différents référentiels, le passage d'une représentation triphasée à une représentation biphasé est réalisé en utilisant la matrice de transformation (P) de Park.

Son expression est donnée par (II.35) :

$$\left[P(\theta)\right]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)\\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad \text{(II.35)}$$

Son inverse est donné par (2.9) :

$$\left[P(\theta)\right]^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad \text{(II.36)}$$

II.13.4 Application de la transformation du Park

II.13.4.1 Equations électriques

Après transformation et simplification, le système d'équations des tensions dans le repère de Park est donné par :

$$\begin{cases}V_d=-R_s i_d+\frac{d_{\Psi_d}}{dt}-W_r\Psi_q\\ V_q=-R_s i_q+\frac{d_{\Psi q}}{dt}+W_r\Psi_q\end{cases} \quad \text{(II.37)}$$

II.13.4.2 Equations électromagnétiques

Nous avons exprimés les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier exprime comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P\left[\psi_d i_q - \psi_q i_d\right] \tag{II.38}$$

Avec Les flux totalisés dans chaque phase s'expriment comme suit:

$$\begin{cases} \psi_d = -L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = -L_q i_q \end{cases} \tag{II.39}$$

II.13.4.3 Equation mécanique

L'équation mécanique est donnée par la relation suivante

On a : $$C_{ent} - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \tag{II.40}$$

II.13.5 Modélisation de la Turbine éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G, comme le montre la figure (II.19) [29].

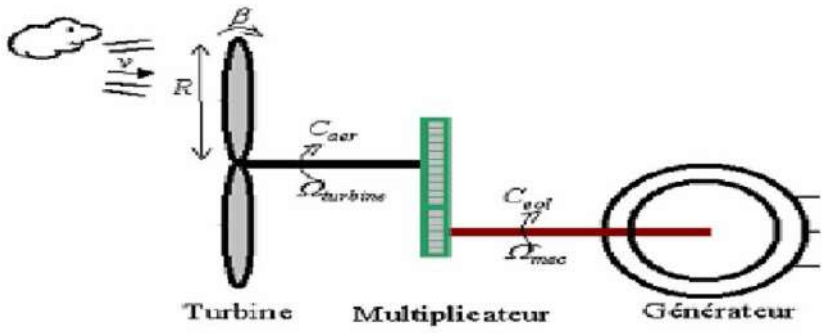


Figure II.19 : Schéma de la turbine éolienne

II.13.5.1 Modélisation de la Turbine

la puissance mécanique sur le rotor peut être en fonction de la vitesse du vent est :

$$P_{mec} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3 C_p(\lambda,\beta) \quad \text{(II.41)}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la caractéristique de la turbine, Dans ce mémoire, la fonction analytique du coefficient de puissance a été employée pour modéliser la turbine éolienne comme suit [49] :

$$C_P(\lambda,\beta) = C_1(C_2\frac{1}{\chi} - C_3\beta - C_4)e^{-C_5\frac{1}{\chi}} \quad \text{(II.42)}$$

Le paramètre $\frac{1}{\lambda}$ est défini comme :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1+\beta^2} \quad \text{(II.43)}$$

Le rapport de vitesse est défini comme suit : $\lambda = \frac{\Omega_t R}{V}$

La puissance extraite du vent est maximisée lorsque C_P est maximisée. Cette valeur optimale C_p se produit pour une valeur définie du rapport de vitesse d'extrémité λ. Pour chaque vitesse du vent il y a une vitesse optimale du rotor, où la puissance maximale est extraite du vent. Par conséquent, si la vitesse du vent est supposée être une constante, la valeur de C_p dépend de la vitesse du rotor de l'éolienne ainsi, en contrôlant la vitesse du rotor on contrôle la puissance de sortie de la turbine.

La Figure (II.20) représente la variation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent et de l'angle d'orientation des pales β.

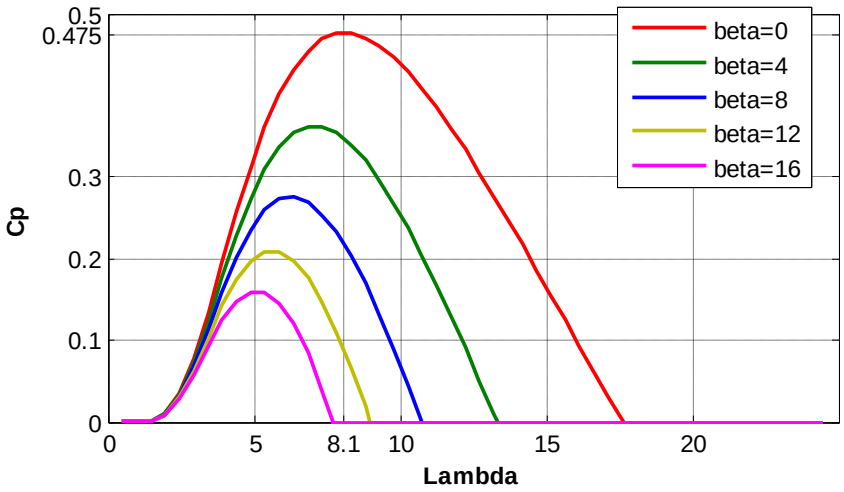


Figure II.20 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine.

D'après l'équation (II.41), la puissance mécanique extraite du vent est en fonction de la vitesse du vent et du coefficient de puissance. Pour une vitesse de vent constant, la puissance mécanique devient uniquement une fonction du coefficient de puissance. La puissance mécanique peut alors être exprimée comme suit :

$$P_{mec} = C_p(\lambda, \beta).P_0 \tag{II.44}$$

P_0 : La puissance du vent ou la puissance éolienne qui est une valeur constante définie par :

$$P_0 = \frac{1}{2}\pi R^2 \rho V^3 \tag{II.45}$$

En supposant que la vitesse du vent et l'angle de pas des pales sont constants, le coefficient de puissance devient en fonction de la vitesse du rotor. Par conséquent, la puissance mécanique peut être exprimée comme :

$$P_{mec} = C_p(\Omega_{mec}).P_0 \tag{II.46}$$

D'où :

$$P_{mec} = \frac{1}{2} A\rho V^3 C_p(\Omega_{mec}) \tag{II.47}$$

La figure (II.21) montre la puissance mécanique par rapport à la vitesse du rotor de générateur pour la conception de turbines éoliennes ci-dessus. Il est important de mentionner que chaque conception de turbine de vent aura une puissance différente par rapport au graphique de la vitesse du rotor. en outre, le coefficient de puissance de chaque éolienne a été déterminé conformément à leur conception des lames et l'angle de tangage figure (II.18).

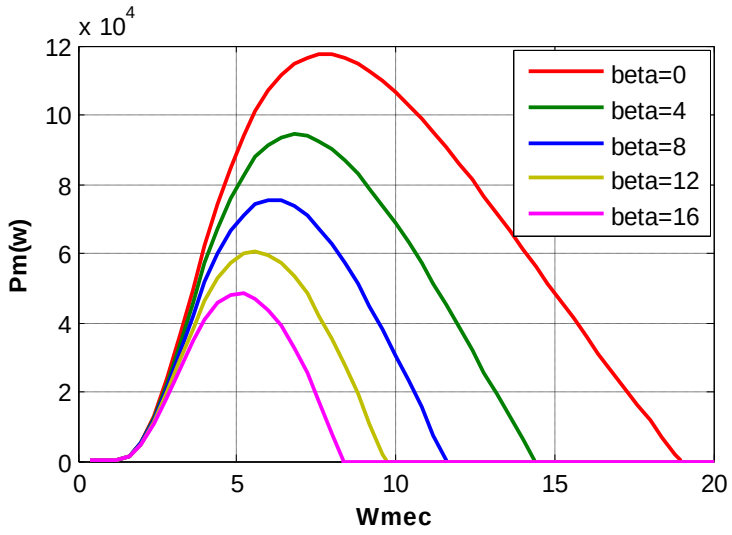


Figure II.21 : Caractéristiques typiques de puissance par rapport à la vitesse d'une éolienne.

Le profil de la courbe couple -vitesse est obtenu par la relation suivante :

$$c_t = \frac{p_{em}}{\Omega_t} \tag{II.48}$$

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

$$C_t = \frac{P_{em}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} A\rho V^3 \frac{C_p}{\Omega_t} \tag{II.49}$$

II.13.5.2 Modélisation du Multiplicateur

La turbine est normalement couplée à l'axe du générateur par un multiplicateur dont le gain de vitesse G est choisi afin de placer la vitesse d'axe du générateur dans une marge de vitesse désirée [18].

$$\begin{cases} C_g = \dfrac{C_t}{G} \\ \Omega_t = \dfrac{\Omega_{mec}}{G} \end{cases} \tag{II.50}$$

II.13.5.3 Modélisation de l'Arbre Mécanique

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

$$J = \frac{J_t}{G^2} J_g \tag{II.51}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f\Omega_{mec} \tag{II.52}$$

Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{mec} ($f\Omega_{mec}$) et le couple issu du multiplicateur C_{mec} [50].

G : Coefficient de multiplicateur.
J_t : Inertie de la turbine.
J_g : l'inertie de la génératrice.

II.14 Conclusion

Une brève description des systèmes d'énergies hybride a été présentée dans ce chapitre. Les principales notions liées à la technologie utilisée dans les systèmes d'énergies hybrides ont été données.

Notre travail portant sur un système hybride compose d'une éolienne, des Panneaux photovoltaïques, et nous avons étudions la modélisation et la commande des différents convertisseurs utilisés dans une chaîne hybride photovoltaïque – éolienne.

Dans le chapitre prochain, on utilise l'intelligence artificielle, est comme une méthode de poursuite de point de puissance maximale. Pour cela, nous avons présenté les principes des techniques de l'intelligence artificielle.

Chapitre III

Poursuite point de puissance maximale par l’intelligence artificielle

III.1 Introduction

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont était associées à la commande MPPT telle que la logique floue et le réseau de neurone artificielle. Ces technique présente est une approche intelligente pour l'amélioration l'optimisation des performances des systèmes énergétiques, afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires et des éoliennes [9]. Dans ce chapitre, nous allons présenter l'étude des commandes MPPT basées sur le principe de l'intelligence artificielle (contrôleur logique floue, neuronal, et neuro-flou).

III.2 La logique floue

III.2.1 Définition

La logique floue s'affirme comme une technique opérationnelle, utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel. La logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes de régulation conventionnels, elle est par fois même complémentaire. La logique floue est une technique très puissante issue de la théorie des ensembles flous, pour combler la lacune entre la précision de la logique classique et l'imprécision du monde réel. Sa caractéristique fondamentale est l'utilisation des variables linguistiques au lieu des variables numériques dans des situations conditionnelles floues .La logique floue est très utile dans des situations où il y a de larges incertitudes et de variations inconnues dans les paramètres et la structure du système, ou bien, lorsque des experts humains sont disponibles pour fournir des descriptions subjectives et qualitatives du comportement du système avec des termes en langage naturel.

Cette technique a pris naissance avec Pr. Lotfi A, Zadeh en Californie. Il a introduit la notion des variables linguistiques. L'évolution des microcontrôleurs a rendu l'implémentation de la logique floue plus populaire. De nos jours, la logique floue est une réalité. Elle se trouve dans une vaste gamme de nouveaux produits. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation.

Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance et le diagnostic médical [51].

III.2.2 Les fonctions d'appartenance

Une définition des variables linguistiques à l'aide des fonctions d'appartenance est nécessaire dans le but de traiter des déductions floues par calculateur .Dans ce contexte, est attribuée à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance μ, dont la valeur varie ente 0 et 1.Le plus souvent, on utilise des fonctions d'appartenance de type triangulaire ou trapézoïdale, gaussienne. On utilise pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes :

- **Fonction triangulaire :** l'allure est définie par 3 paramètres {a, b, c}.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a'}\frac{c-x}{c-b}\right),0\right) \tag{III.5}$$

- **Fonction trapézoïdale:** elle est définie par 4 paramètres {a, b, c, d}.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a'},1,\frac{d-x}{d-c}\right),0\right) \tag{III.6}$$

- **Fonction gaussienne :** elle est définie par 2 paramètres {m, σ}.

$$\mu(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-m}{2\sigma}\right)^2\right) \tag{III.7}$$

- **Fonction en forme de cloche :** elle est définie par 2 paramètres {x0, a}.

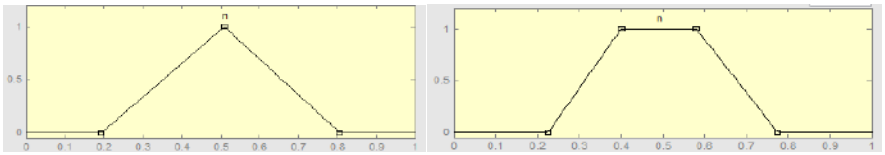
$$\mu(x) = \left(\frac{1}{1+\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2}\right) \tag{III.8}$$

- **Fonction trigonométrique :** elle est définie par 2 paramètres {x0, a}.

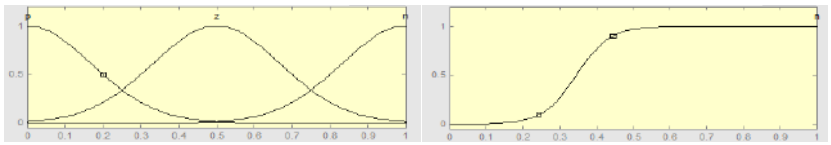
$$\mu(x) = \frac{1}{2}\left(1+\cos\frac{\pi(x-x_0)a}{2a}, x_0 - a \le x \le x_0 + 2a\right) \tag{III.9}$$

- **Fonction sigmoïdale :** elle est définie par 2paramètres {x0, c}.

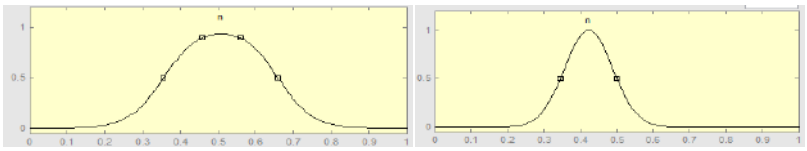
$$\mu(x) = \frac{1}{1+\exp\left(a\left(x-c\right)\right)} \tag{III.10}$$



-Fonction triangulaire -Fonction trapézoïdale



-Fonction gaussienne - Fonction sigmoïdale



-Fonction trigonométrique -Fonction en forme de cloche

Figure III.1 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance [52].

III.2.3 Structure générale d'un régulateur par logique floue

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie. En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

1. La fuzzification.
2. La lecture de la table de vérité.
3. La défuzzification.

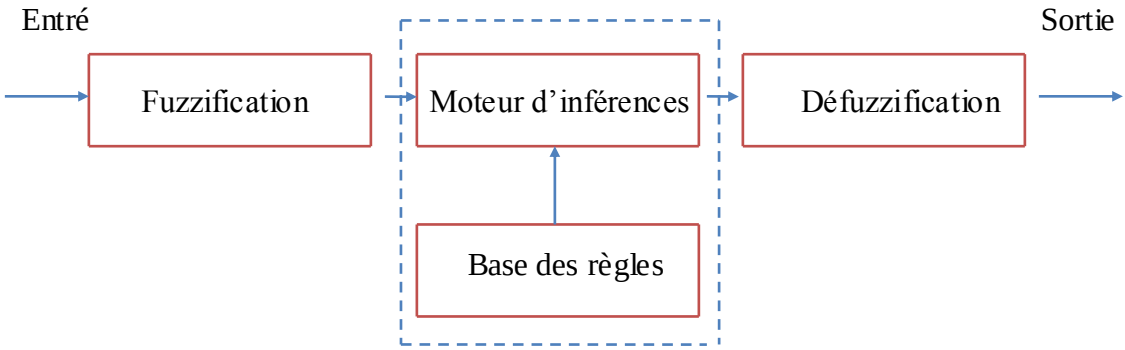


Figure III.2 : Structure générale d'un régulateur par logique floue.[53]

- **La fuzzification**

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique.

- **La lecture de la table des règles**

Le mécanisme d'inférence calcule les sous-ensembles flous relatifs à la variation de la sortie à partir d'appartenance des variables d'entrées fuzzifiées et de la table des règles fournie par l'expert.

- **Défuzzification**

La défuzzification transforme la variable floue de sortie en valeur non floue permettant la commande effective du système.la méthode de défuzzification que nous avons utilisée est celle du centre de gravité, **Méthode de la somme pondérée, Méthode du maximum, Méthode SOMME-PROD, Méthode MAX-PROD, Méthode MAX-MIN :** de la variable floue de sortie [54].

III.2.4 Les avantages et les inconvénients

III.2.4.1 Avantage

- Linguistique : pas numérique, où les variables utilisés sont similaire à la façon dont les humains pensent.
- Simplicité : ne nécessite pas d'équations analytiques complexes, facile à comprendre. Utilise moins de règles.
- Prototypage rapide : le designer n'a pas besoin de connaitre tout à propos du système avant de commencer.
- Peu couteux : plus facile à faire la conception.
- Plus robuste: plus facile à mettre au point en changeant les fonctions d'appartenance.[52]

III.2.4.2Les Inconvénients

- Systèmes d'explications limitées.
- Quand même nécessaire de consulter des experts.
- Problèmes de saturation si les fonctions d'appartenance ne sont pas bien définies [52].

III.3 Réseau de neurone

Le cerveau se compose d'environ 1012 neurones interconnectés entre eux, avec 1000 à 10000 synapses par neurone. Les neurones ne sont pas tous identiques et ils n'ont pas le même comportement. [45]

III.3.1 Historique

En 1948, deux chercheures Américains,Mac Culloch et Pitts, ont donné naissance au premier modèle mathématique de neurone biologique, qu'ils ont appelé: neurone formel. L'idée principale des réseaux de neurones est la suivante: on se donne une unité simple, un neurone, qui est capable de réaliser quelques calculs élémentaires. On relie ensuite un certain nombre de ces unités sous forme d'un réseau capable de résoudre un problème plus complexe. La structure, la taille du réseau et le mécanisme d'apprentissage utilisé dépendent du type et de la complexité de l'application en question. [45]

III.3.2 Le neurone biologie

Un neurone est une cellule particulièrement complexe spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Son rôle est de recevoir, stocker et transmettre l'information. On peut décomposer le neurone en trois régions principales : le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [55].

III.3.2.1 Le corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biologique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient ainsi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns diamètre. [45]

III.3.2.2 Les dendrites

Ce sont des fines extensions qui se ramifient autour du neurone et forment une sortie de vaste arborescence, les signaux envoyés sont captés par les dendrites. Leur taille est de quelques dizaines de micromètres de longueur. [45]

III.3.2.3 L'axone

L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signaux partent du neurone grâce a l'arborescence terminale que possède l'axone ; contrairement aux dendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie a son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones. Sa taille peut varier entre quelques millimètres à plusieurs mètres. La notion de synapse explique la transmission des

signaux entre un axone et une dendrite. Au niveau de la jonction, il existe un espace à travers lequel le signal électrique ne peut pas se propager. Les transmissions se font alors par l'intermédiaire des substances chimiques (les neurotransmetteurs). Quand un signal arrive de la synapse, il provoque l'émission des neurotransmetteurs qui vont se fixer sur des récepteurs de l'autre cote de l'espace inter synaptique. Quand suffisamment de molécules se sont fixés, un signal électrique est émis de l'autre cote, il y a donc une transmission [55].

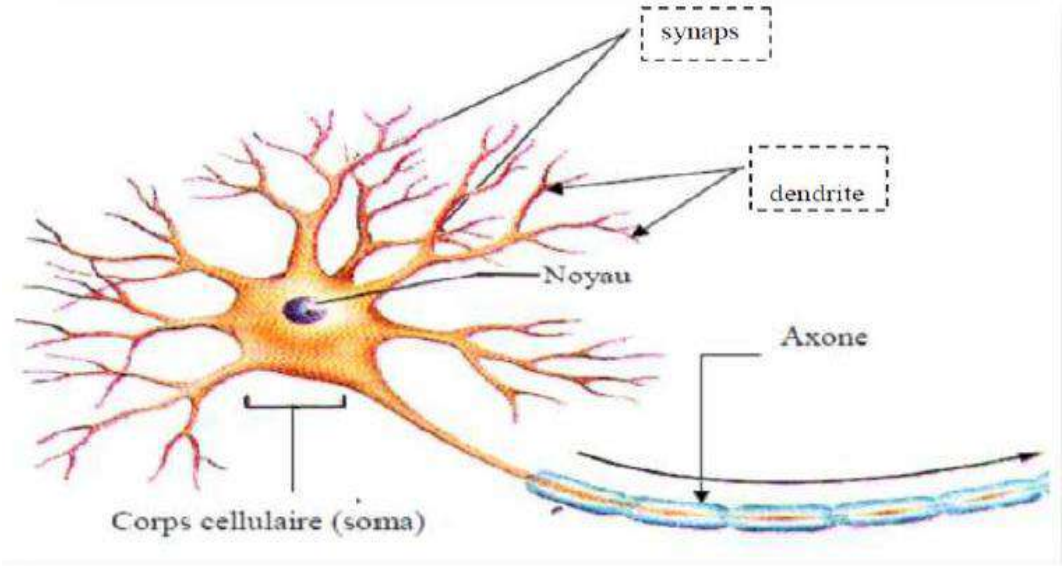


Figure III.3 : Le modèle d'un neurone biologique. [45]

III.3.3 Le neurone artificiel

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs (neurones) élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau [56].

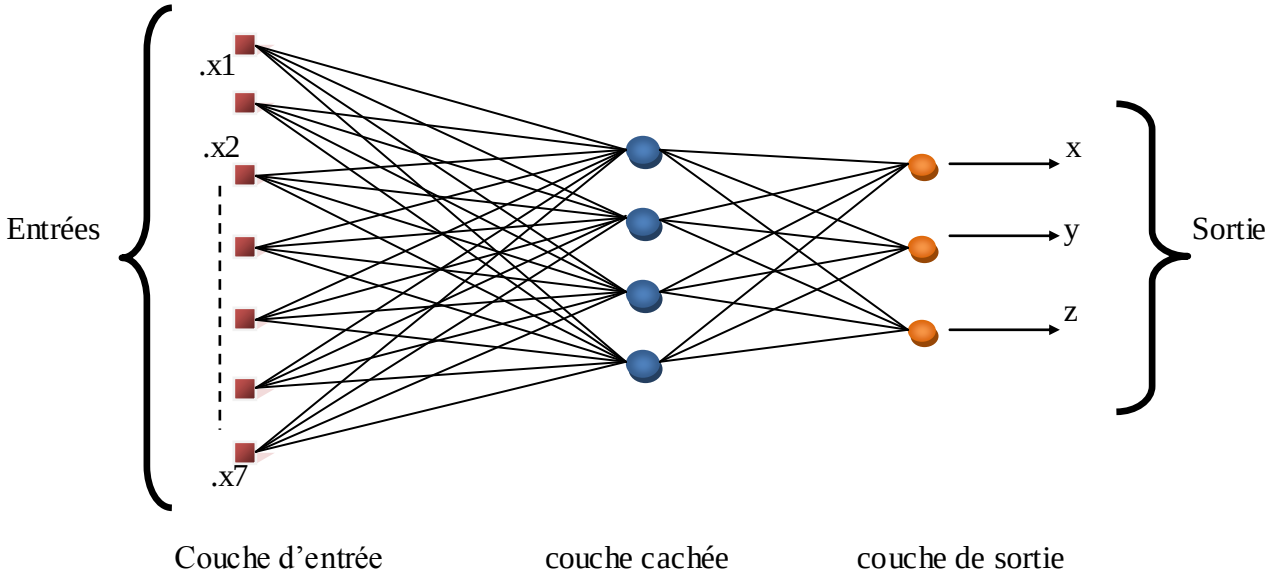


Figure III.4 : Neurone Artificiel. [45]

III.3.4 Les composants d'un réseau de neurone

Le réseau de neurone se compose en huit éléments sont :

- Un ensemble de neurone.
- Un état d'activation pour chaque neurone (actif, inactif).
- Une fonction de sortie pour chaque neurone [f(s)].
- Un modèle de connectivité entre les neurones (chaque neurone est connecté à tous les autres).
- Une règle de propagation pour propager les valeurs d'entrée à travers le réseau vers les sorties.
- Une règle d'activation pour combiner les entrées d'un neurone.
- Une règle d'apprentissage.
- Un environnement d'opération (le système d'exploitation, par exemple) [55].

III.3.5 Les différentes structures des réseaux de neurones

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle qui peut être , mais le plus souvent il est possible de distingue une certaine régularité

III.3.5.1 Réseau de neurones multicouches

Les neurones sont arrangés par couche, il n'ya pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne sont font qu'avec les neurones des couches en aval habituellement, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc de définir les concepts de neurone d'entrée et de neurone de sortie. par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie .Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées cachées. [45]

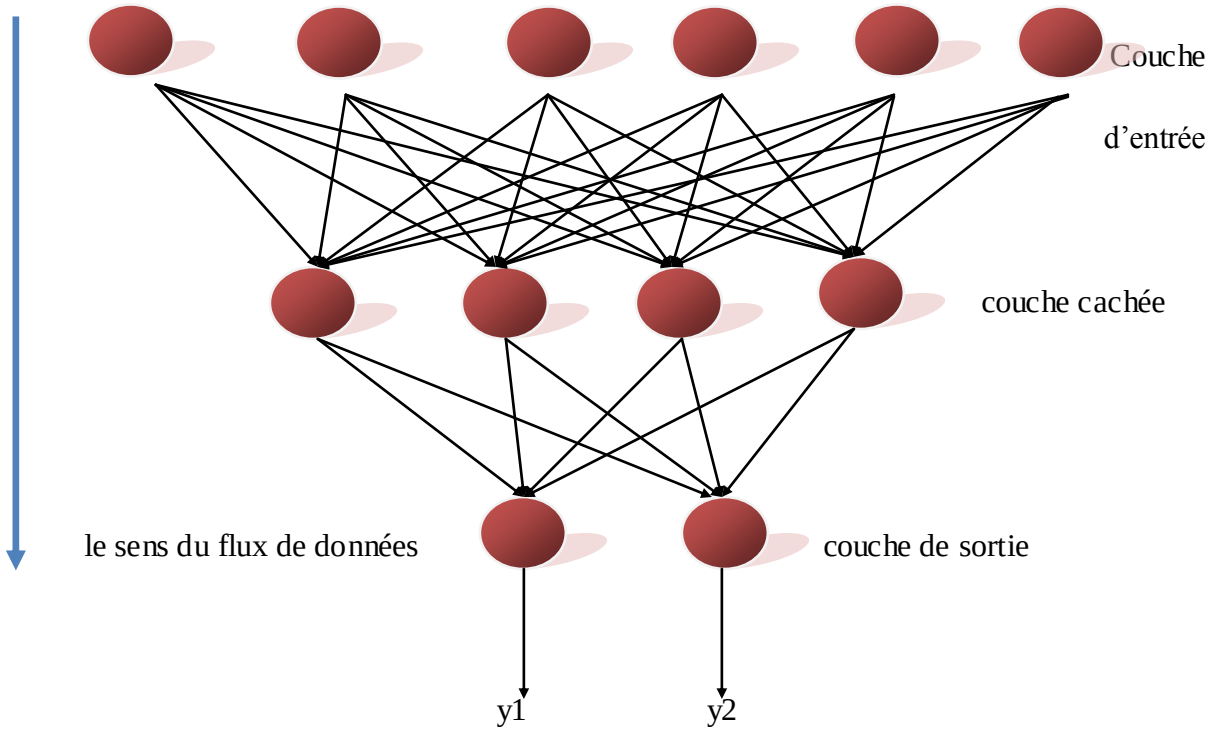


Figure III.5 : Réseau de neurones multicouches. [45]

III.3.5.2 Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une architecture multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone est connecté avec un nombre réduit et localisé de neurone de la couche aval .Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

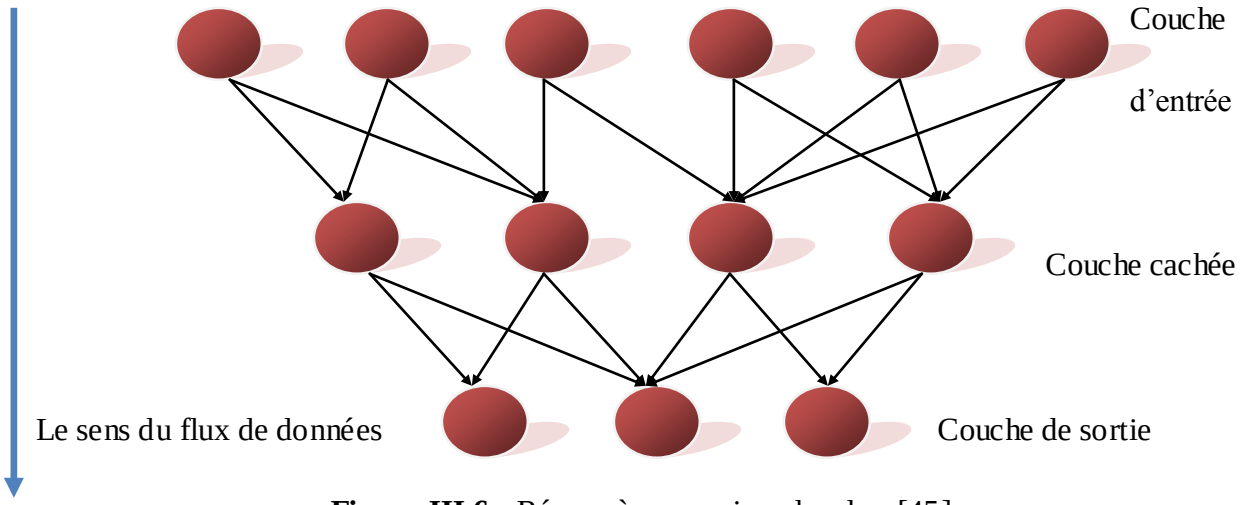


Figure III.6 : Réseau à connexions locales. [45]

III.3.5.3 Réseau à connexions récurrentes

Les connexions récurrentes ramènent en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.

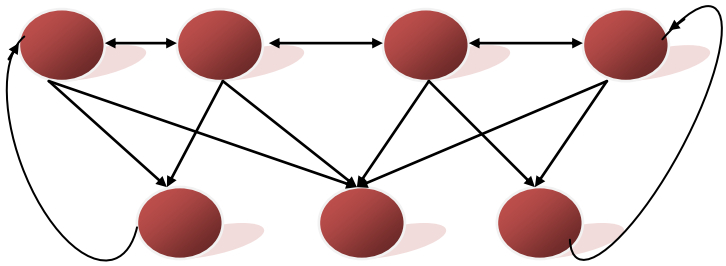


Figure III.7 : Réseau à connexions récurrentes. [45]

III.3.5.4 Réseau à connexions complètes

C'est la structure d'interconnexions la plus générale figure(III.8) Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau et à lui-même.

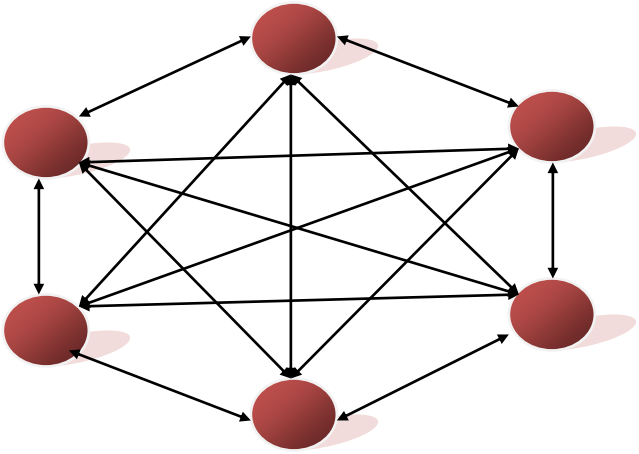


Figure III.8 : Réseau à connexions complètes. [45]

III.3.6 Les fonctions d'activations

C'est une fonction non-linéaire qui définie l'état interne (A) du neurone en fonction de son entrée totale (E) elle peut être une fonction binaire à seuil, linéaire à seuil ou multi-seuil , sigmoïde stochastique ou une autre fonction généralement choisie croissante et impaire [57].

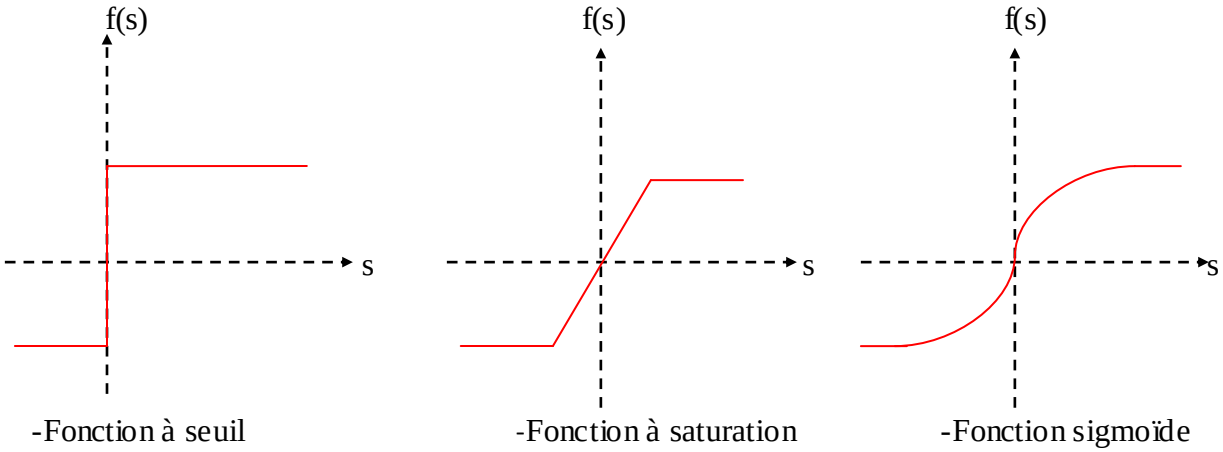


Figure III.9 : Quelque fonction d'activations. [45]

III.3.7 Les techniques d'apprentissage

On à deux techniques d'apprentissage : supervisé et non supervisé.

III.3.7.1 Apprentissage supervisé

Un apprentissage supervisé est lié à la disponibilité d'exemples, ou de modèles de réponses. L'ensemble des exemples utilisés pour l'apprentissage se présente sous forme de couples (X, Y*) ou Y* est la réponse désirée du réseau à l'entrée X. Lorsque le réseau apprend à mimer une fonction multi variable, il utilise des exemples d'entrée/sortie. Ses poids sont ajustés sous l'influence d'un signal d'erreur qui représente la différence entre la sortie estimée par le réseau et la sortie désirée par le modèle. Les caractéristiques de l'algorithme neuronal lui permettent ensuite de généraliser et de répondre à une entrée quelconque, même si elle n'appartient pas au jeu d'apprentissage. Le réseau réalise une approximation de la fonction qui lui a servi de professeur [56].

III.3.7.2 Apprentissage non supervisé

L'hypothèse d'existence d'un maître qui supervise l'apprentissage n'est pas toujours possible. Dans ce cas, on ne connaît pas les sorties désirées Y* des exemples d'apprentissage. Le réseau doit donc apprendre de lui-même et on parle d'apprentissage non supervisé. Ce type d'apprentissage permet au réseau d'extraire des propriétés contenues implicitement dans un ensemble de données, représentées par des vecteurs de grande dimension, et l'on cherche à les regrouper, selon des critères de ressemblance qui sont inconnus a priori [57].

III.3.8 Les avantages et les inconvénients

III.3.8.1 Les Avantage :

- Aucune connaissance basée sur les règles.
- Le modèle mathématique non requis.

Plusieurs algorithmes d'apprentissages sont disponibles. [45]

III.3.8.2 Inconvénients :

- Boite noir (manque de traçabilité).
- L'adaptation aux environnements différents est difficile el le réapprentissage est souvent obligatoire [56].

III.4 Les systèmes Neuro-flous

Les systèmes Neuro-flous permettent de combiner les avantages de deux techniques complémentaires. Les principaux avantages d'un système flou sont l'approche naturelle de la modélisation et la bonne interopérabilité de la description, en employant des règles linguistiques. Cependant, il n'y a aucune méthode formelle pour déterminer ses paramètres (fonctions d'appartenance et règles floues). Dans ce sens, il serait intéressant de disposer d'algorithmes permettant l'apprentissage automatique de ces paramètres. L'une des approches qui permettent de répondre à ce besoin est les réseaux de neurones connus pour leur algorithme d'apprentissage et leur précision dans l'ajustement numérique en employant des échantillons entrée/sortie.

On peut aussi noter que les systèmes Neuro-flous peuvent être utilisés comme des approximateurs universels [58].

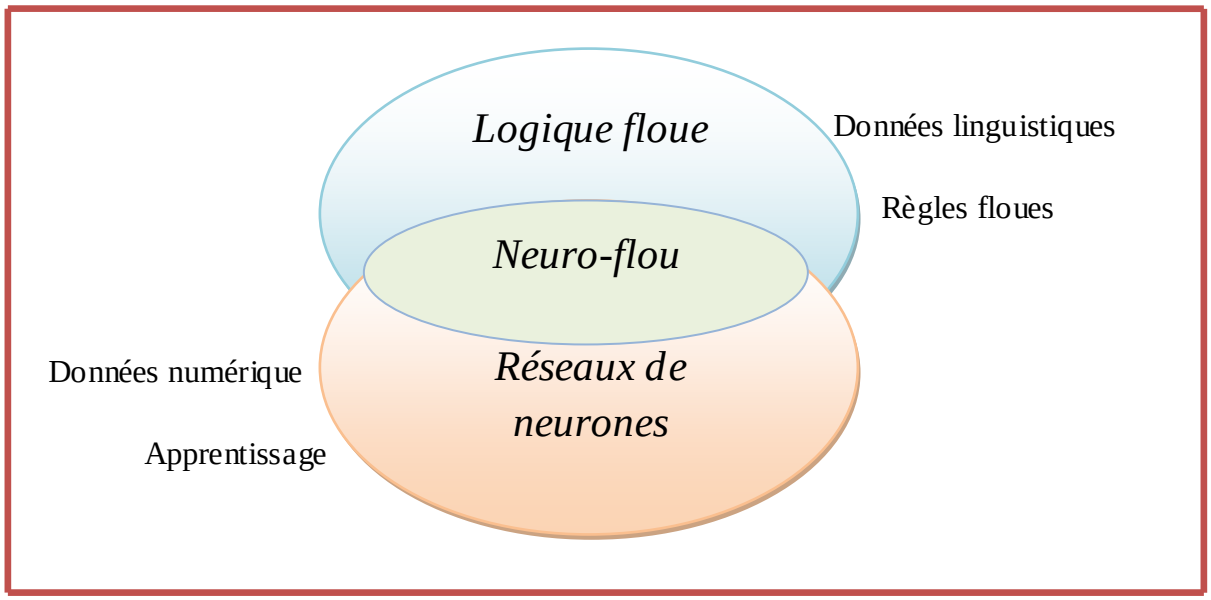


Figure III.10 : principe de Neuro flou. [45]

III.4.1 Méthodes des combinaisons Neuro-floues

Il existe quatre catégories de combinaisons des réseaux de neurones avec la logique floue.

- **Réseaux flou neuronal**

Dans ces réseaux, les techniques floues sont employées pour augmenter les possibilités du processus d'apprentissage et d'exécution des réseaux de neurones.

- **Systèmes neuronal/flou simultanément**

Le réseau neurone et le système flou fonctionnent ensemble sur la même tâche, mais sans s'influencer, c'est-à-dire ni l'un ni l'autre n'est employé pour déterminer les paramètres de l'autre. [45]

- **Modèles Neuro-flous coopératifs**

Le réseau de neurones est employé pour déterminer les paramètres (les règles et les ensembles flous) d'un système flou. Après la phase d'apprentissage, le système flou fonctionne sans réseau de neurone. C'est une forme simple des systèmes Neuro-flous. [45]

III.4.2 Modèles Neuro-flous hybrides

Les approches Neuro-floues modernes sont de cette forme. Un réseau neuronal et un système flou sont combinés dans une architecture homogène. Le système peut être interprété comme un réseau neuronal spécial avec des paramètres flous ou comme un système flou mis en application sous une forme distribuée parallèle. [45]

III.4.2.1 Le système Neuro-flou hybride de type Mamdani

Le système Neuro-flou hybride de Mamdani utilise la technique d'apprentissage supervise (retro-propagation) pour faire un apprentissage des paramètres de fonctions d'appartenance. L'architecture du système Neuro-flou hybride de Mamdani est illustrée sur la figure (III.11) qui détermine chaque couche comme suit: [45]

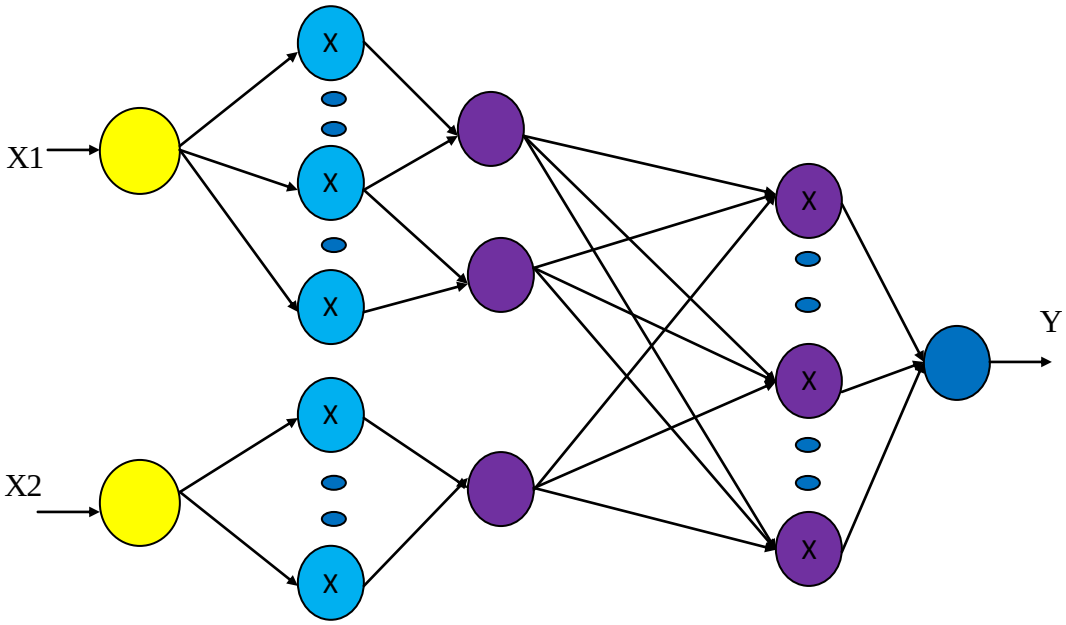


Figure III.11 : Le système Neuro-flou de Mamdani. [45]

III.4.2.2 Le système Neuro-flou hybride de type Takagi-Sugeno

Les systèmes Neuro-flous de type Takagi-Sugeno font usage d'un mélange d'algorithme de retro propagation pour faire un apprentissage des fonctions d'appartenance et la méthode de moindre carré pour déterminer les coefficients des combinaisons linéaires dans les conclusions des règles,dans un pas de la procédure d'apprentissage, on peut obtenir deux parties:

- Dans la première partie, les modèles de l'entrée sont propagées, et les paramètres de la sortie optimaux sont estimés par la procédure de moindre carré, pendant que les paramètres antérieurs sont supposés être fixes pour le cycle courant à travers l'ensemble de l'apprentissage.

Dans la deuxième partie, les modèles sont encore propagés, et dans cette tâche, la retro propagation est utilisée pour modifier les paramètres antérieurs, pendant que les paramètres de la conclusion « conséquence » restent fixes. Cette procédure sera alors répétée. [45]

L'architecture du système Neuro-flou hybride de TS est illustrée sur la figure (III.12).comme suit:

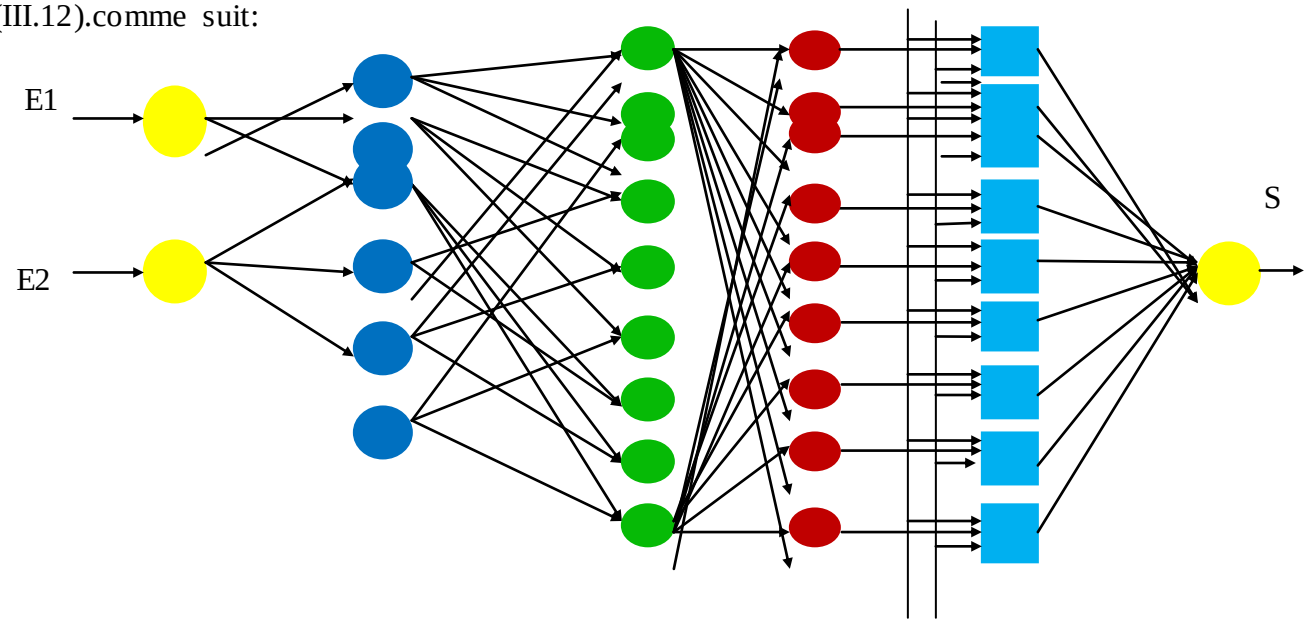


Figure III.12 : Le système Neuro-flou de Takagi-Sugeno. [45]

- Les couches 1,2 et 3: sont les même que celle du modèle de Mamdani.
- La couche 4 : (normalisation des poids de la règle)

Chaque nœud dans cette couche calcule le coefficient de la $i^{ème}$ règle à la somme de toutes les règles.

$$\overline{W_i} = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad , i=1,2\ldots \tag{III.13}$$

- La couche 5 : chaque nœud i de cette couche est un nœud fonctionnel

$$\overline{W_i} f_i = W_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \tag{III.14}$$

Tel que $\overline{Wi}$ est une sortie de la couche quatre et {*pi, qi, ri*} sont des paramètres des ensembles. Un chemin bien établi est de déterminer les paramètres conséquents qui utilisent l'algorithme des moindres carrés.

- La couche 6 (la couche d'inférence des règles) : le seul nœud de cette couche calcule la somme total des sorties de touts les signaux est égale à :

$$\sum_i \overline{W_i} f_i = \frac{\Sigma W_i f_i}{\Sigma_i W_i} \tag{III.15}$$

III.4.3 Les avantages des systèmes Neuro-flous

III.4.3.1 La rapidité de calcul

Les systèmes Neuro-flous sont très rapides parce que l'évaluation d'un système compétent implique typiquement des opérations de la comparaison simples et un nombre limite de calculs. [45]

III.4.3.2 La flexibilité

Un système Neuro-flou peut traiter des problèmes complexes avec beaucoup de variables a l'entrée. Au lieu d'adapter une architecture interne fixe, l'architecture d'un système neuro-flou peut grandir dynamiquement et efficacement en réponse à la complexité des données d'apprentissage.

La structure d'un système Neuro-floue représente efficacement le rapport entre les entrées de votre problème et les sorties. [45]

III.4.3.3 Généralisation des connaissances

Les systèmes d'apprentissage ont souvent des difficultés quand il y a un manque de données historiques pour former , ou bien les données contiennent trop de bruit. Les systèmes de Neuro-flous peuvent compenser ces problèmes pendant la phase de l'apprentissage en

changent (adapter) leur structure interne. Souvent les règles sont de la forme: plus des entrées, plus des résultats satisfaisants. [45]

III.4.4 Les types d'implémentation des réseaux Neuro-flous

Dans la littérature, il y a une panoplie de systèmes Neuro-flou comme : les systèmes Neuro-flou, concurrents, les systèmes dit hybrides ou Neuro-flou adaptatif, le modèle NEFCLASS, ANFIS, FALCON et GARIC.etc [45]

III.4.5 NEFCLASS (Neuro-fuzzy classification)

Ce modèle est utilisé généralement en classification. il est constitue de 3 couches : une couche d'entrée avec les fonctions d'appartenance, une couche cachée représentée par des règles et une couche de sortie (Figure III.13), ce modèle est facile à mettre en application, tout en étant précis dans le résultat final, avec une rapidité bien supérieure aux autres architectures.

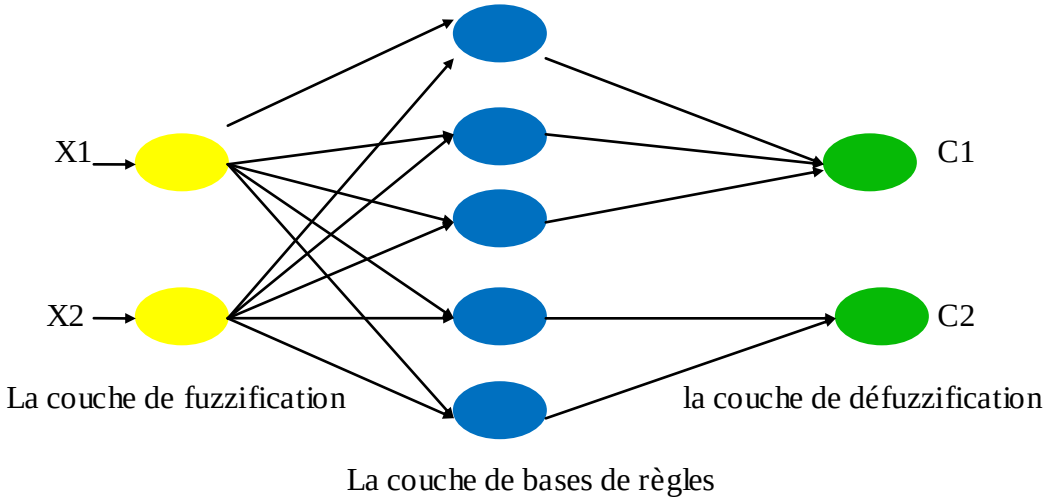


Figure III.13 : Architecture de NEFCLASS. [45]

III.4.6 NEFCON (Neuro-Fuzzy Controller)

Ce Modèle formé de 3 couches : une couche cachée formée par des règles, une couche d'entrée incluant les nœuds d'entrées avec les sous-ensembles flous d'antécédences et une couche de sortie avec un nœud de sortie et les sous-ensembles des conséquences.

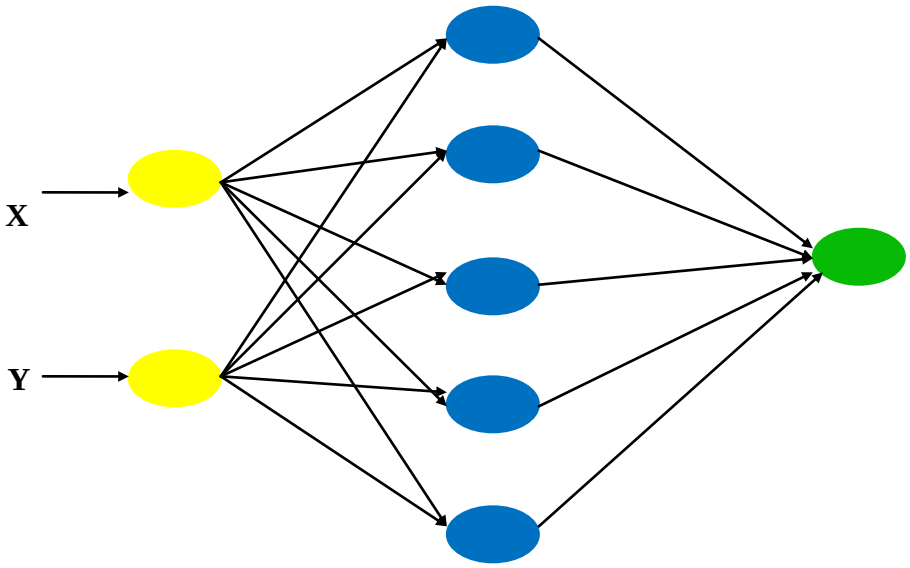


Figure III.14 : Architecture de NEFCON. [45]

L'élaboration des règles est similaire à l'architecture NEFCLASS, avec une différence en sortie. Cette architecture est généralement utilisée en approximation de fonctions et en contrôle flou Figure(III.14).

Le processus d'apprentissage du NEFCON peut être divisé en deux phases. la première phase consiste à trouver les règles de base initiale. Si les connaissances antérieures ne sont pas disponibles, les règles de base seront apprises avec difficulté. Cette règle est définie par un algorithme qui la complète. Dans la seconde phase, les règles de base sont optimisées par modification des sous-ensembles flous des règles. Les deux phases utilisent l'erreur floue, cette erreur peut être trouvée avec la différence entre la sortie désirée et celle obtenue. [45]

III.4.7 NEFPROX (Neuro Fuzzy function approximator)

Ce Modèle est obtenu par l'association des deux architectures : NEFCLASS et NEFCON, il est utilisé dans différentes applications comme la classification et l'approximation de fonctions. Le NEFCLASS utilise un algorithme supervisé pour définir les règles floues, le NEFCON utilise un algorithme d'apprentissage non supervisé avec le calcul de l'erreur de sortie. Les deux modèles emploient la retro-propagation afin de définir les sous-ensembles flous. Comparé au modèle ANFIS, NEFPROX figure (III.15) est beaucoup plus rapide, mais ANFIS donne de meilleurs résultats en approximation. Le NEFPROX est le premier système interprétable et lisible, dédié à l'approximation de fonction. Néanmoins, ses résultats en classification reste moins bons que ceux donnés par le NEFCLASS. [45]

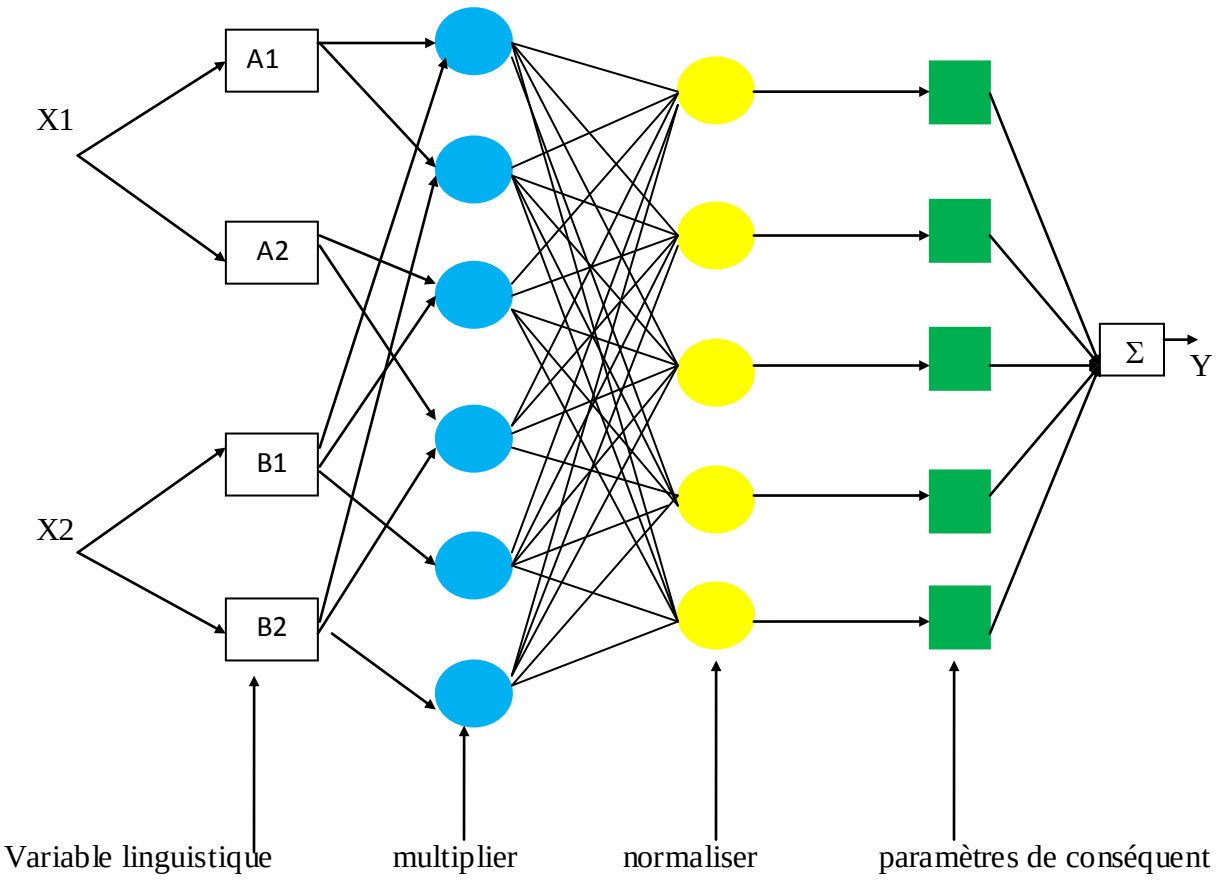


Figure III.15 : Architecture de NEFPROX. [45]

III.4.8 ANFIS (adaptative -network-based fuzzy inference system)

ANFIS représente un système à inférence flou mis en application dans le cadre des réseaux adaptatifs, cette architecture (Figure III.16) affine les règles floues obtenues par des experts humains pour décrire le comportement d'entrées-sortie d'un système complexe, ou est implémenté dans la boite à outils « Neuro-Fuzzy » de MATLAB. Ce modèle donne de très bons résultats en poursuite de trajectoire, approximation non linéaire, commande dynamique et traitement du signal. [45]

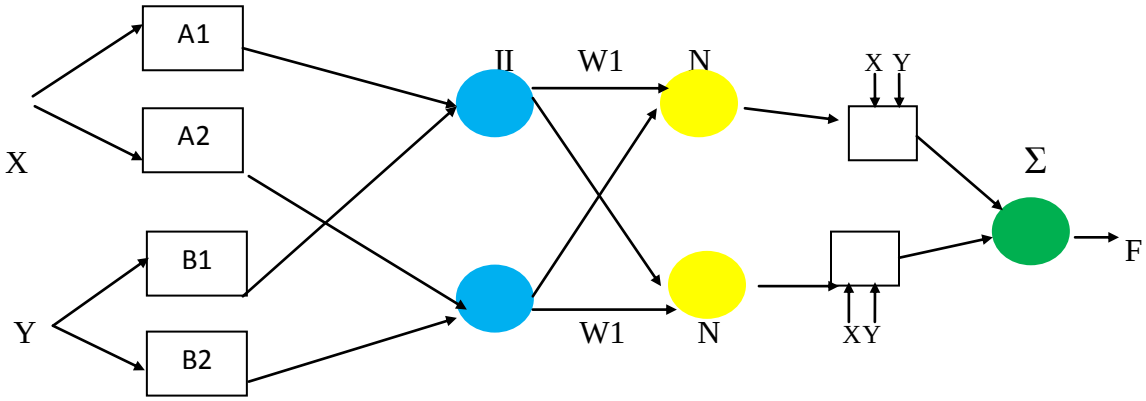


Figure III.16 : Architecture de l'ANFIS. [45]

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'intelligence artificielle comme un outil pour la modélisation des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, et comme une méthode de poursuite de point de puissance maximale. Pour cela, nous avons présenté les principes des techniques de l'intelligence artificielle (logique floue, Réseau de neurone, Neuro-flous), Dans le prochain chapitre, nous allons voir la résultat du simulation du Système (PV, Eolien) , en utilisant Matlab/Simulink.

Chapitre IV

Description du système et résultat de simulation

IV.1 Introduction

Le modèle du système hybride (PV_éolien) sous des différentes irradiations est simulé et testé. Le point de fonctionnement du champ est dynamiquement modifié par le contrôleur afin que la MPPT obtienne le point de puissance maximale sous les conditions de la lumière du soleil et maintient la puissance du system aux alentours de ce point pour produire de l'énergie avec un rendement plus élevé.

IV.2 Description du système

La simulation d'un système hybride de 200KW contrôlé par l'un des trois méthodes connecté à un réseau de 25kw en utilisant dans le premier cas la commande logique floue, dans le deuxième cas la réseau de neurone , le troisième cas le réseau neuro-floue.

Le modèle contient :

- un champ PV délivrant un puissance crête de 100 kW à 1000 W / m^2 des irradiations solaire.
-Un générateur éolien de 100KW.
- un convertisseur boost augmente la tension de PV (273.5 VDC à la puissance maximale) à 500 VDC. Le rapport cyclique D est optimisé par le contrôleur MPPT
- un onduleur de 3 niveaux triphasés. Il convertit la tension 500 VCC en tension 260 VCA et maintient l'unité du facteur de puissance (cosα=1).
- un bloc de commande VSC qui contrôle la tension VDC et les courants Id Iq.
- un bloc de commande MPPT
- 10 KVAR d'harmoniques produites par l'onduleur (filtrage par condensateurs).
- 100 kvas, 260V/25kV de transformateur triphasé de couplage.
- Un réseau de distribution de 25KV+ système de transmission équivalent de 120 kV).

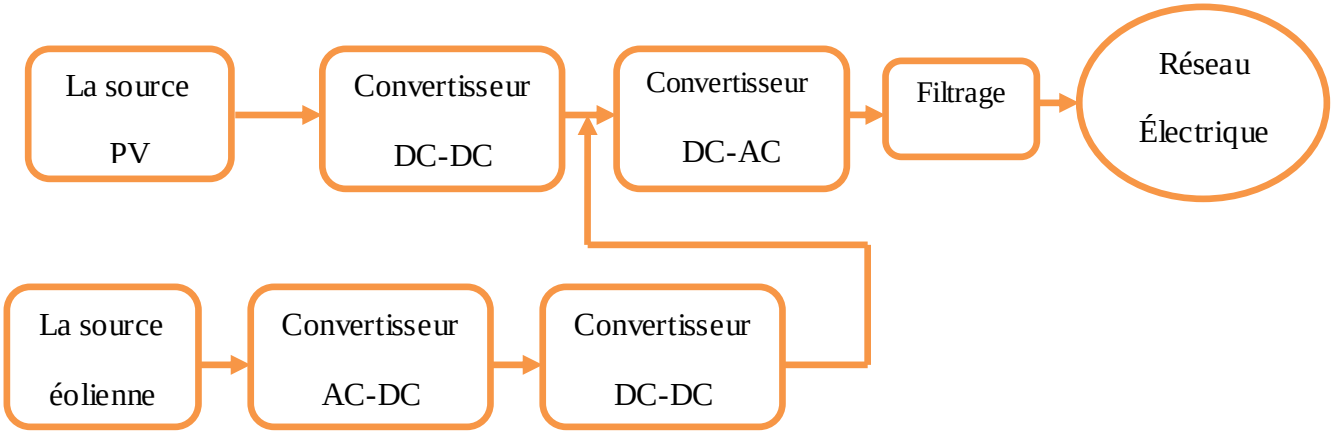
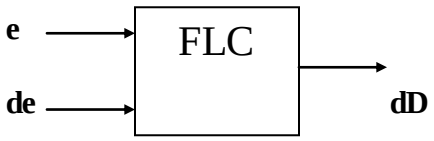


Figure IV.1 : La structure du modèle.

IV.2.1 Régulateur MPPT

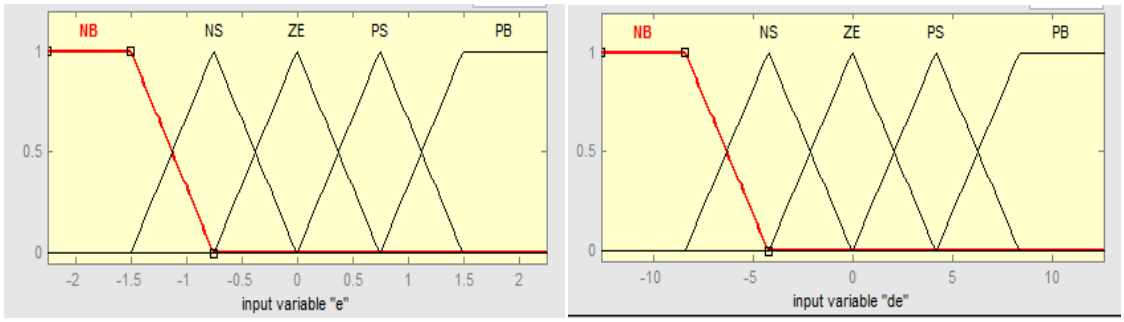
a. La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue



Figure(IV.2) : la structure de régulateur MPPT.

$$e = \frac{dp}{dv}$$
$$de = e(k) - e(k-1) \qquad \text{(IV.1)}$$

on utilise5 fonction d'appartenance triangulaire.



Figure(IV.3) : Fonction d'appartenance des variables d'entrées.

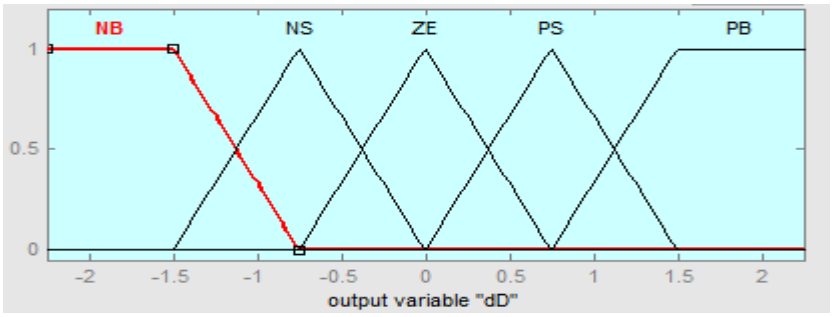


Figure IV.4 : Fonction d'appartenance des variables de sortie

Tableau IV.1 : la table des règles pour la commande logique floue.

DP / DV	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PS	PB	NB	NB	NS
NS	PS	PS	NS	NS	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NS	NS	PS	PS	PS
PB	NS	NB	PB	PB	PS

b. La commande MPPT basée sur le principe de réseau de neurone

On a résumé les caractéristiques de l'apprentissage dans le tableau suivant

Tableau IV.2 : la table des caractéristiques de régulateur MPPT

Caractéristiques	Régulateur MPPT
Entrées Sorties	2-1
Algorithme d'apprentissage	Feed-forward backprop
La fonction utilisée	TRAINLM
Nombre de couche	2
Nombre de neurone	10-2

c. La commande MPPT basée sur le principe de réseau de neuro-floue

On a résumé les caractéristiques du régulateur MPPT dans le tableau suivant

Tableau IV.3 : la table des caractéristiques du régulateur MPPT

Caractéristiques	Régulateur MPPT
Entrées –sorties	2-1
Nombre de neurone	1-7-1
Performance	0.0000535
Algorithme d'apprentissage	Hybride
Nombre de fonctions d'appartenances	3
Forme de fonctions d'appartenances	Triangulaire
Structure d'estimateur flou	Sugeno
Nombre de règles	3

IV.3 Simulation

- **La variation de l'irradiation et la température**

L'irradiation et la température stabilisent à les valeurs 1000W/m² et 25°C pendant 0.7 secondes comme il est présenté dans la figure (IV.1) puis elles diminuent lentement jusqu'à les valeur 250W/m² et se stabilisent dans l'intervalle [1.2s-1.5s] et après, elles augmentent lentement jusqu'à la valeur 1000W/m² et se stabilisent encore dans l'intervalle [2s-2.3s] et [2s-2.2s] respectivement et après elles diminuent rapidement dans l'intervalle [2.3s-2.35s] et [2.2s-2.25s] jusqu'à les valeurs 250W/m² puis se stabilisent à dans l'intervalle [2.35s-2.65s] et [2.25s-2.4s] ,après elles augmentent rapidement dans l'intervalle [2.65s-2.7s] et [2.4s-2.45s] jusqu'à 1000W/m² et se stabilisent jusqu'à 3secondes.

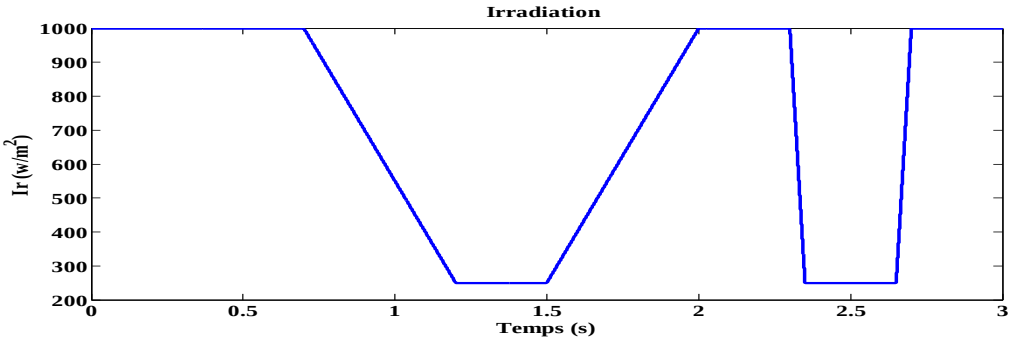


Figure IV.5 : La variation de l'irradiation.

IV.3.1 Simulation avec la logique floue

IV.3.1.1 Simulation de système PV

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système PV par la logique floue.

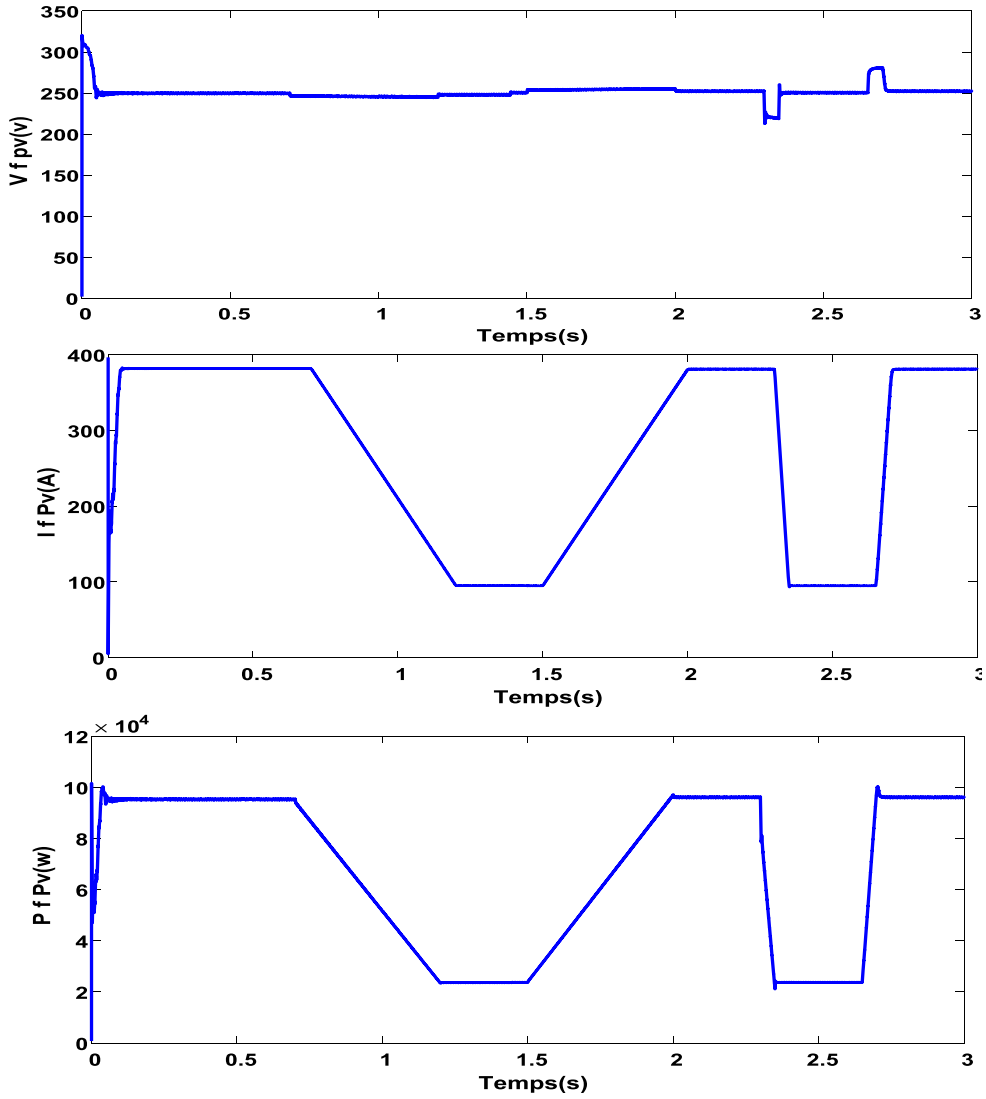


Figure IV.6 : La tension PV, le courant PV puissance PV.

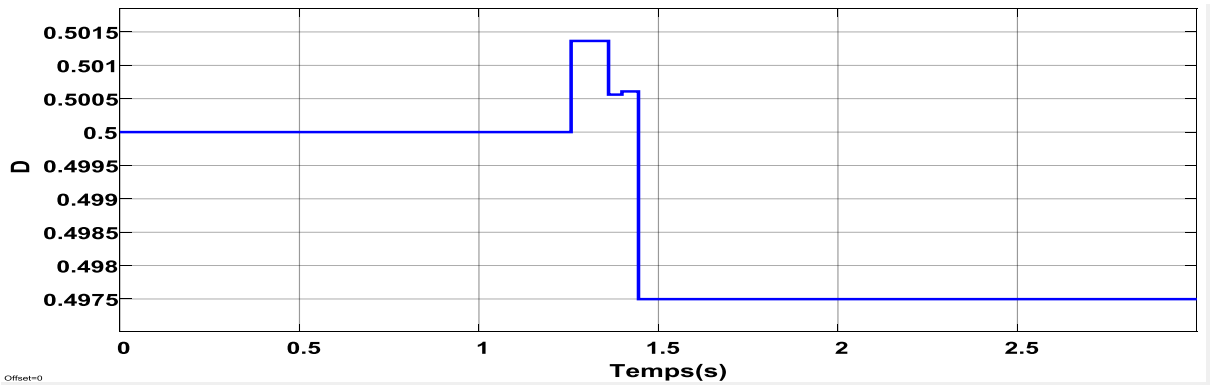


Figure IV.7 : Le rapport cyclique D.

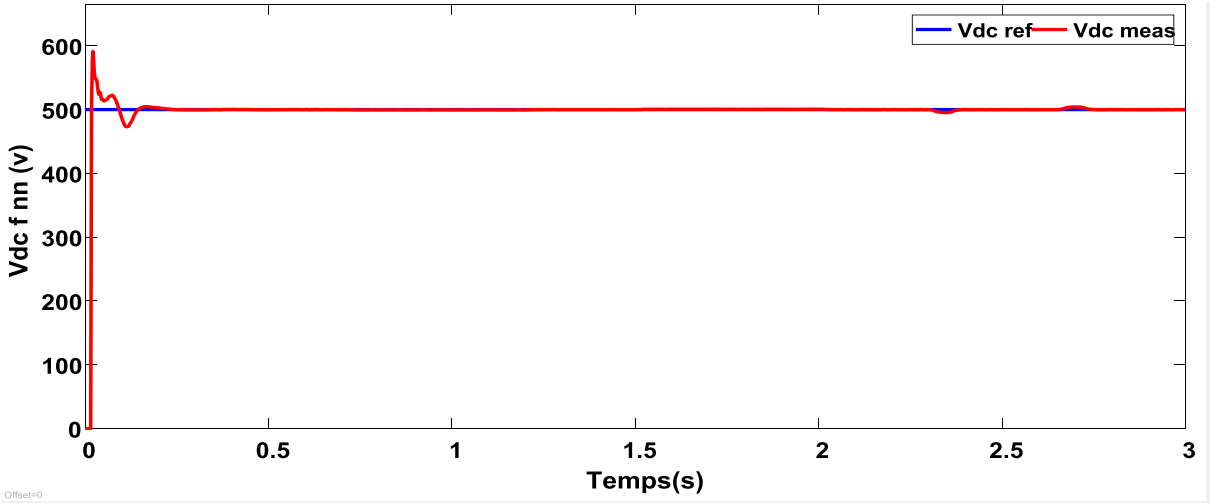


Figure IV.8 : La tension Vdc Pv.

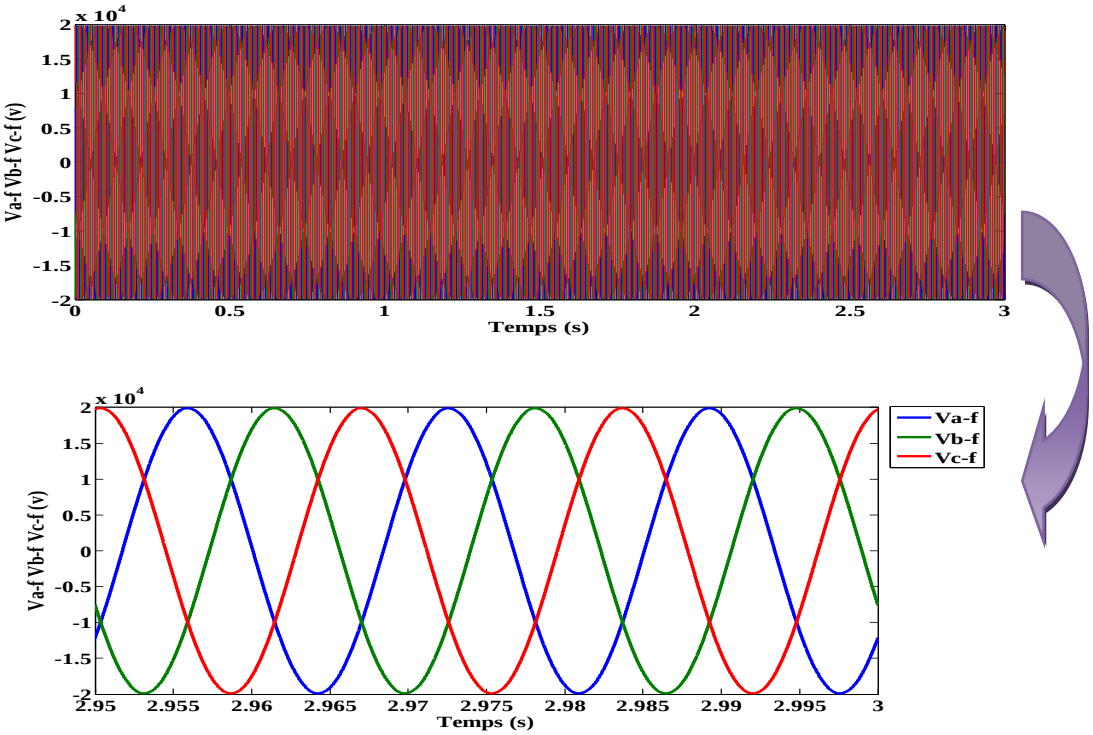


Figure IV.9 : Les tensions Vabc.

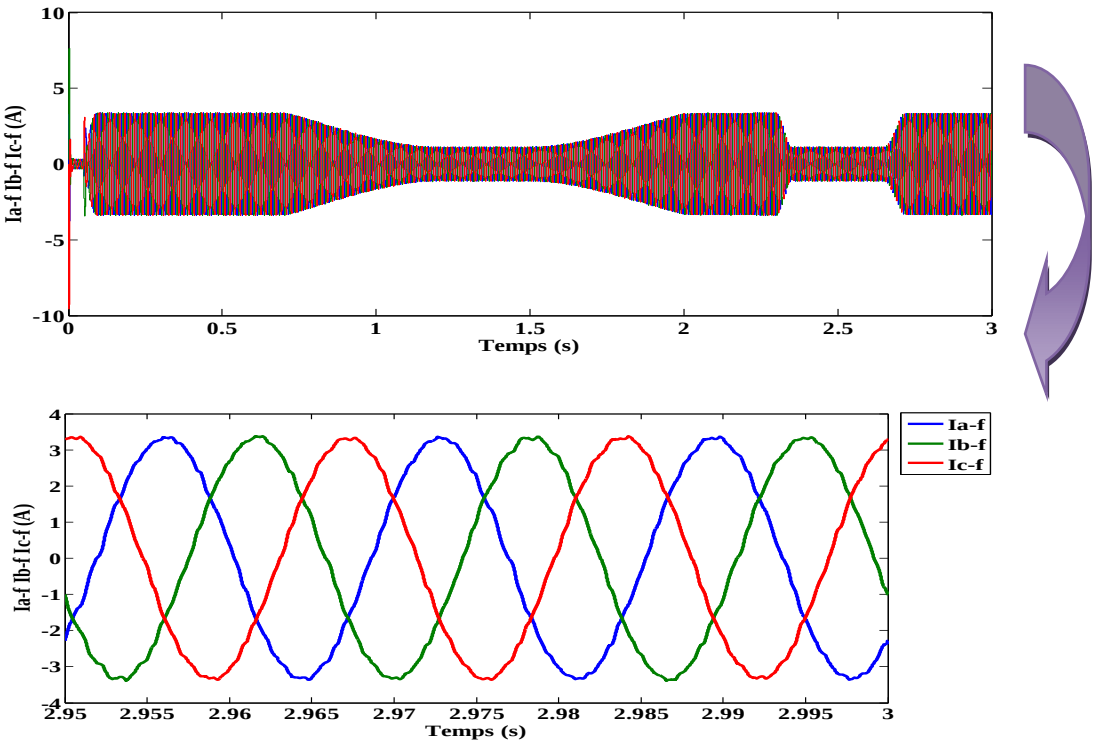


Figure IV.10 : Les courants Iabc.

On observe de la figure (IV.11) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

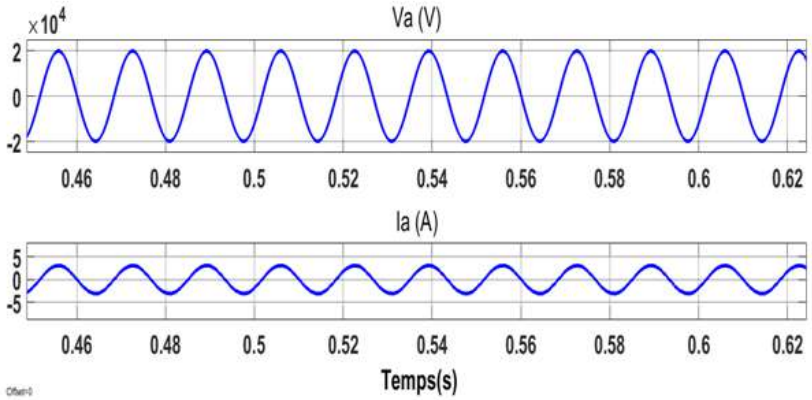


Figure IV.11 : La tension Va et le courant Ia.

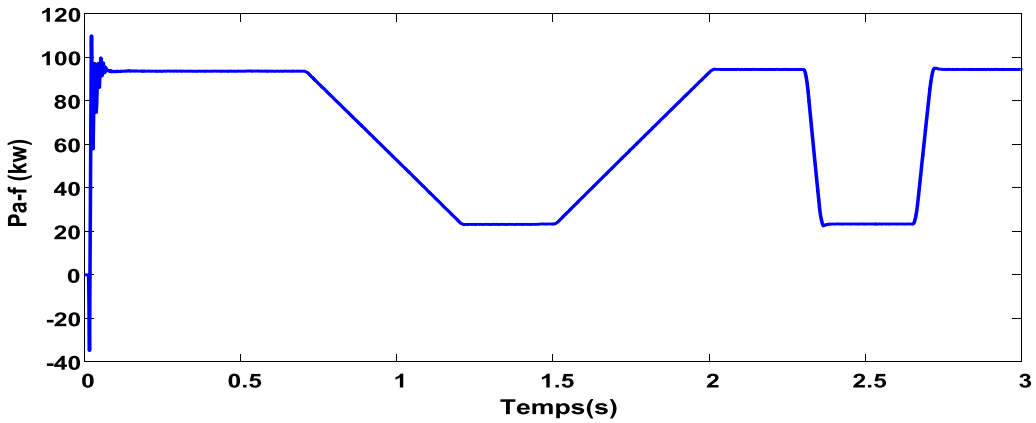


Figure IV.12 : La puissance Pa.

IV.3.1.2 Simulation de système éolien

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système éolien par la logique floue

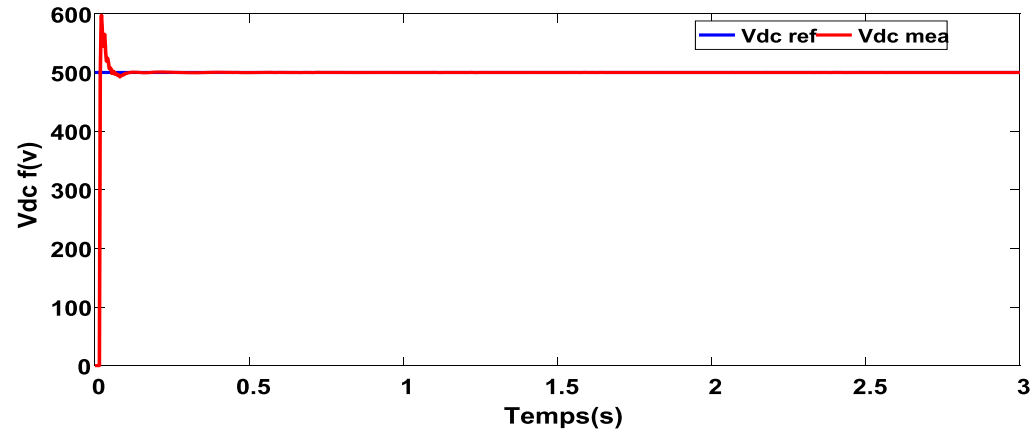


Figure (I.13) : La tension Vdc.

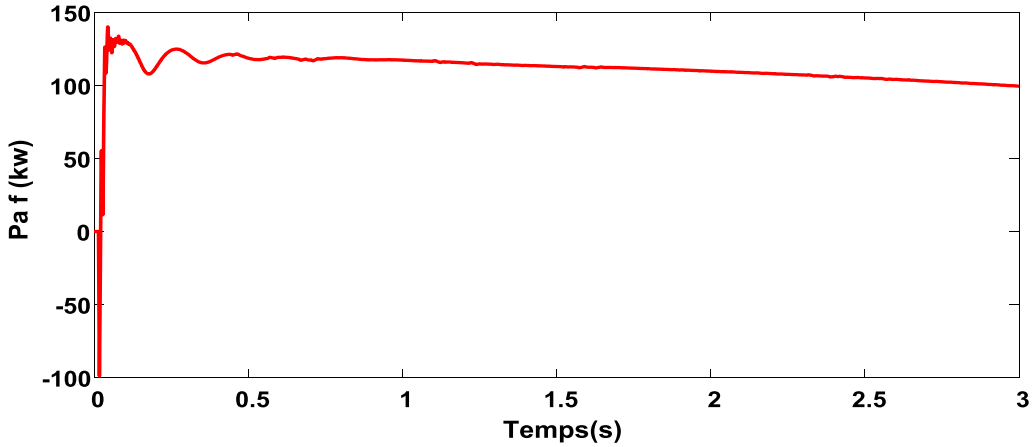


Figure IV.14 : La puissance Pa.

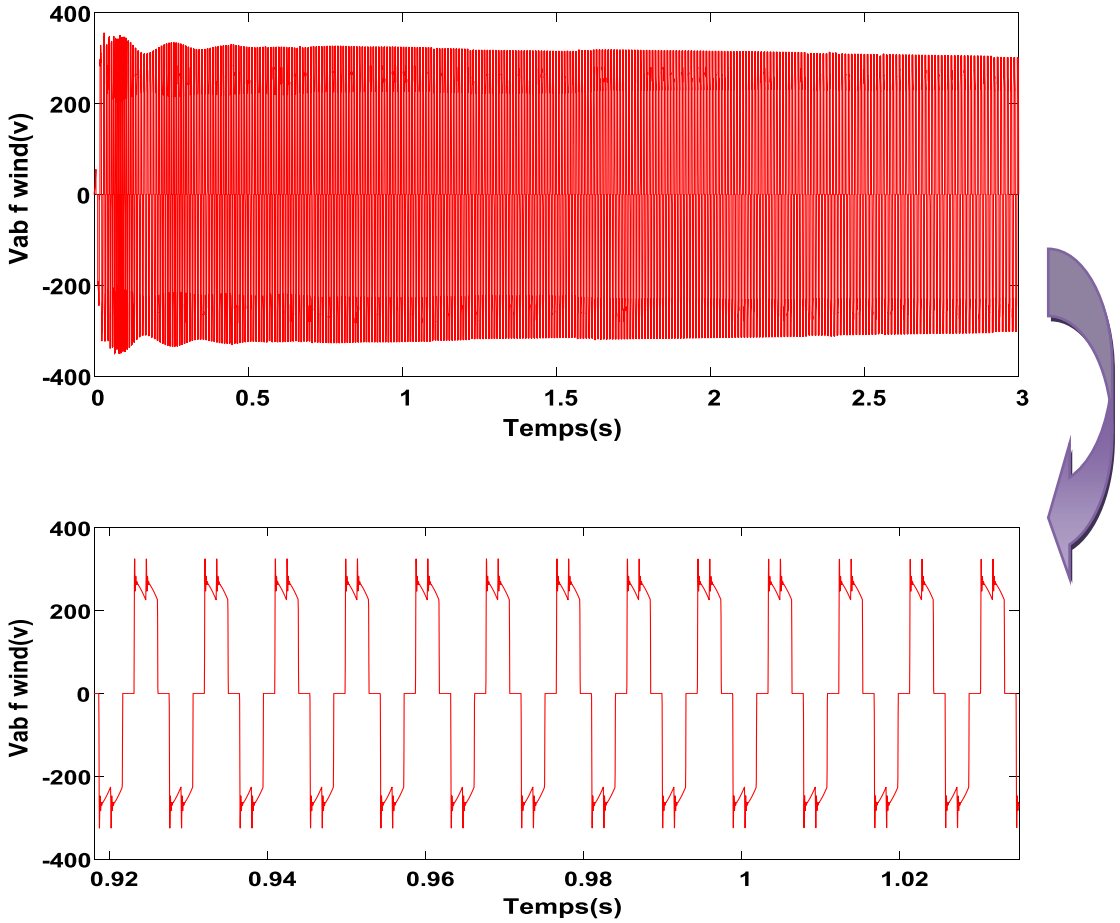


Figure (IV.15) : Les tensions Vab.

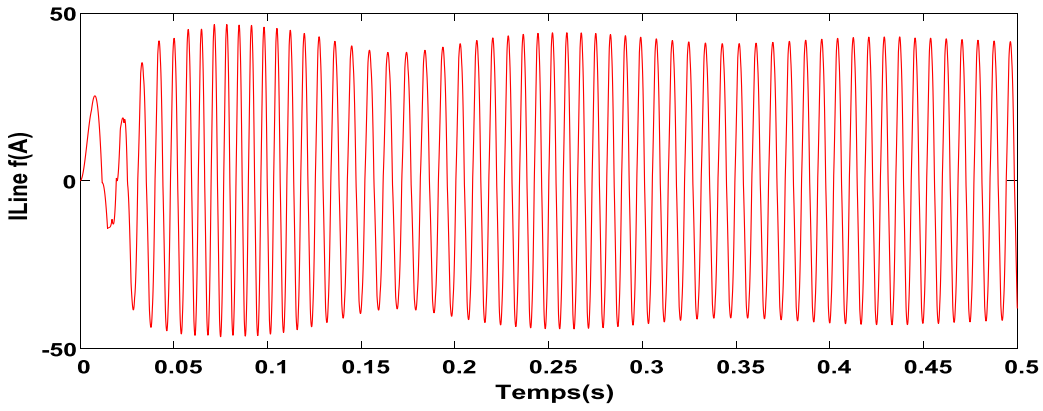


Figure IV.16 : Le courant I Line .

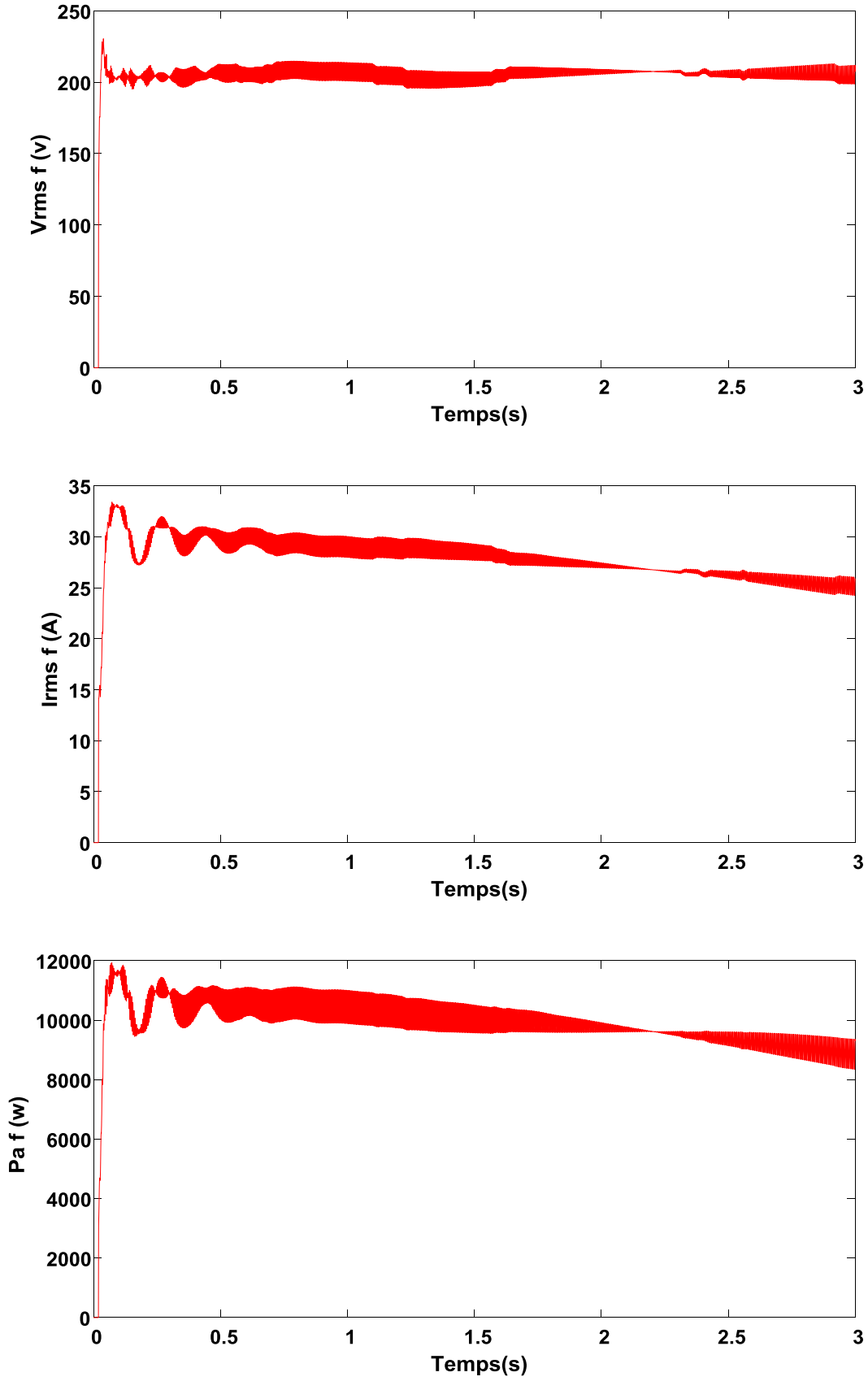


Figure IV.17: Vrms,Irms,Pa

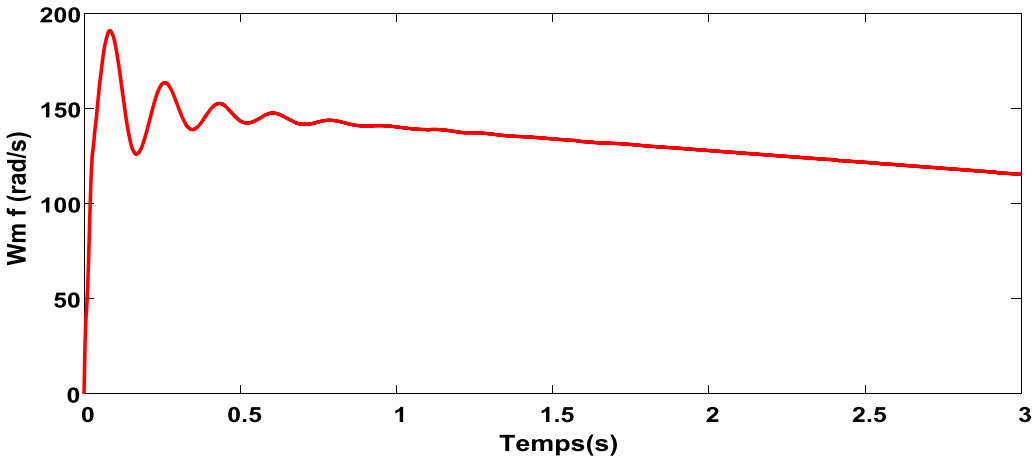


Figure IV.18: La vitèsse rotorique

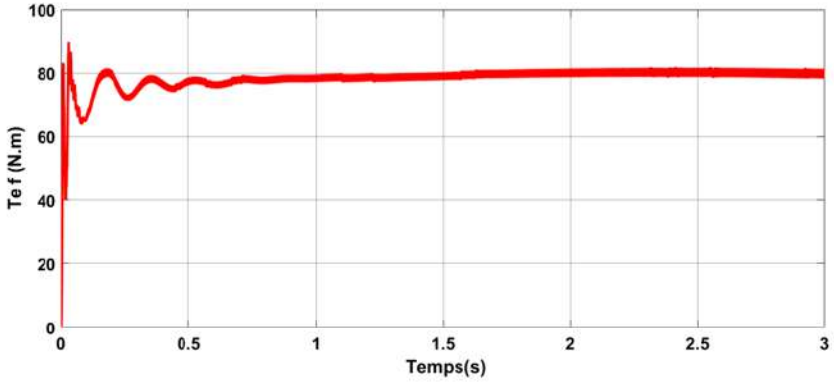


Figure (IV.19): Le couple éléctromagnetique.

IV.3.1.3 Simulation de système hybride

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système hybride par la logique floue.

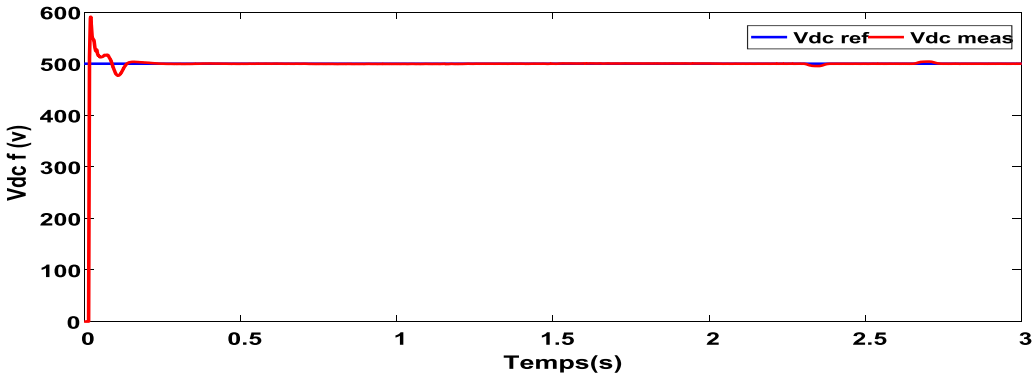


Figure (IV.20) : La tension Vdc.

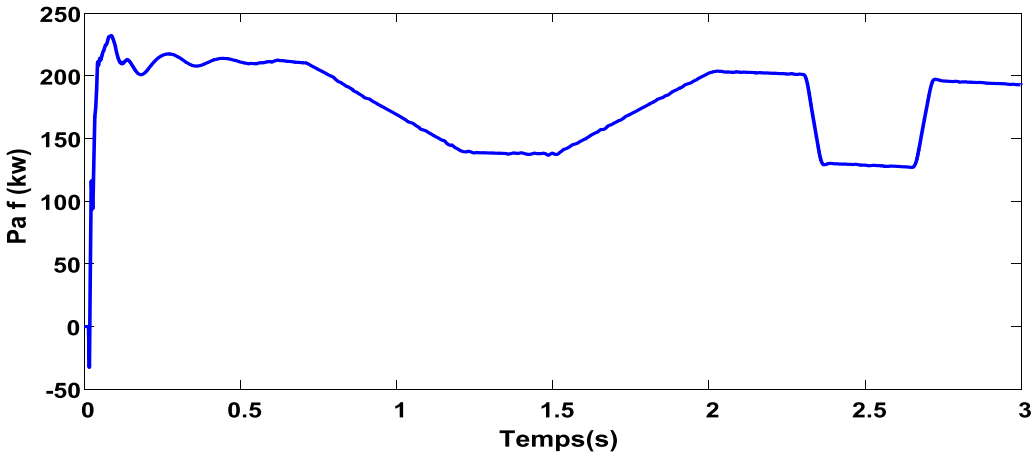


Figure (IV.21) : La puissance Pa .

On observe de la figure (IV.22) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

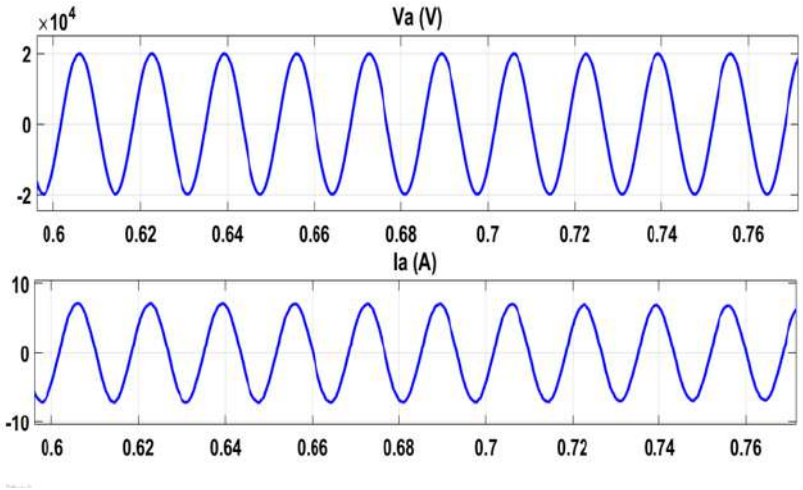


Figure (IV.22) : La tension Va et le courant Ia.

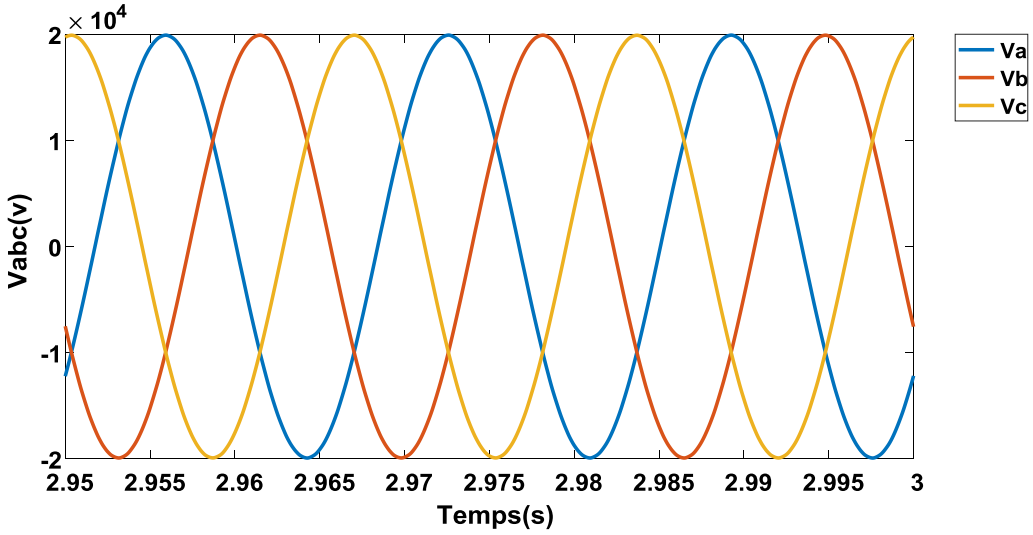


Figure (IV.23) : Les tensions Vabc

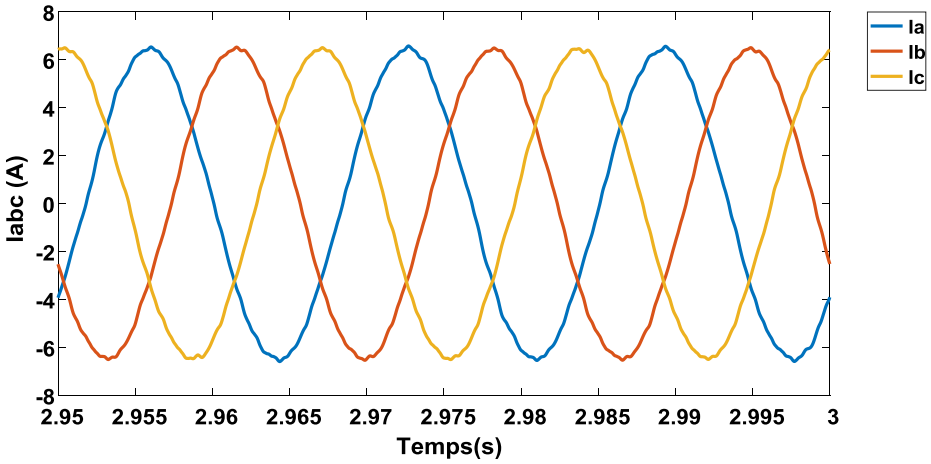


Figure (IV.24) : Les courants Iabc

IV.3.2 Simulation de système avec le réseau de neurone

IV.3.2.1 Simulation de système PV

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système PV par le réseau de neurone

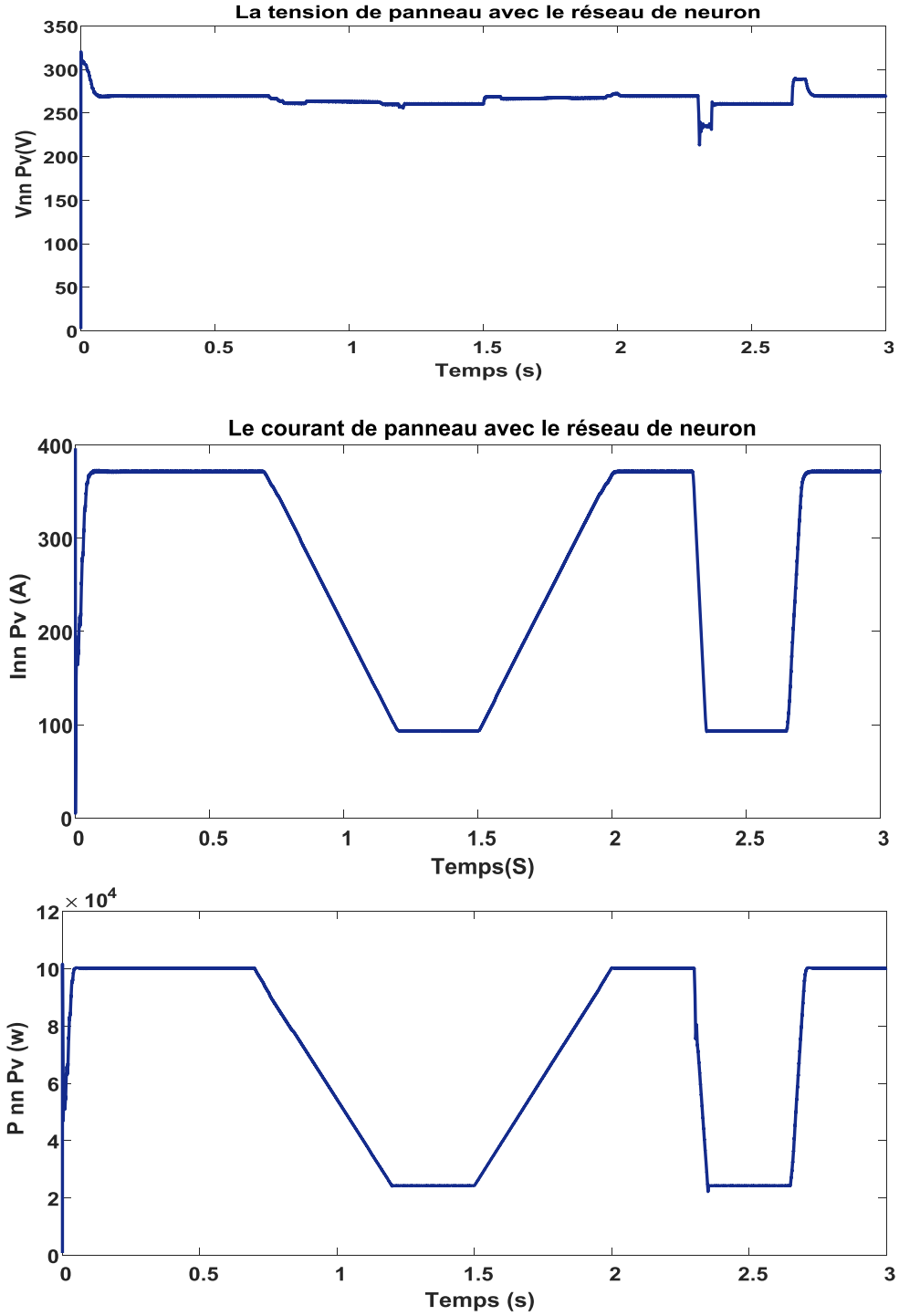


Figure (IV.25) : La tension PV, le courant PV puissance PV.

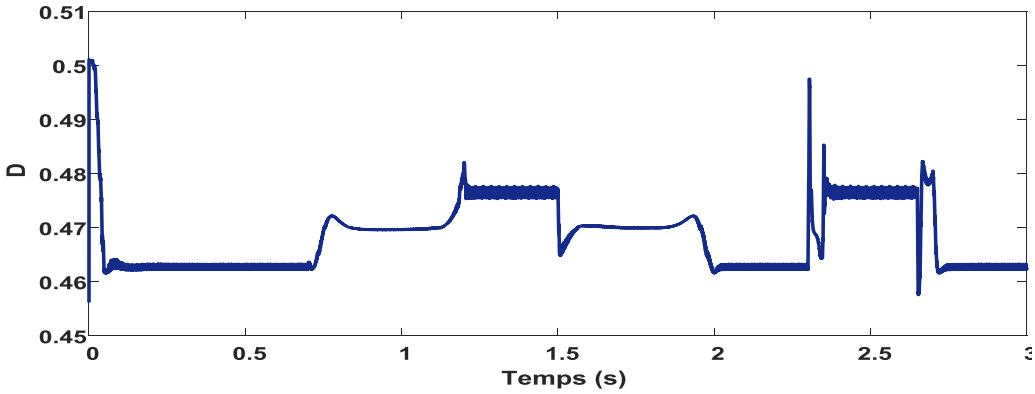


Figure (IV.26) : Le Raport cyclique

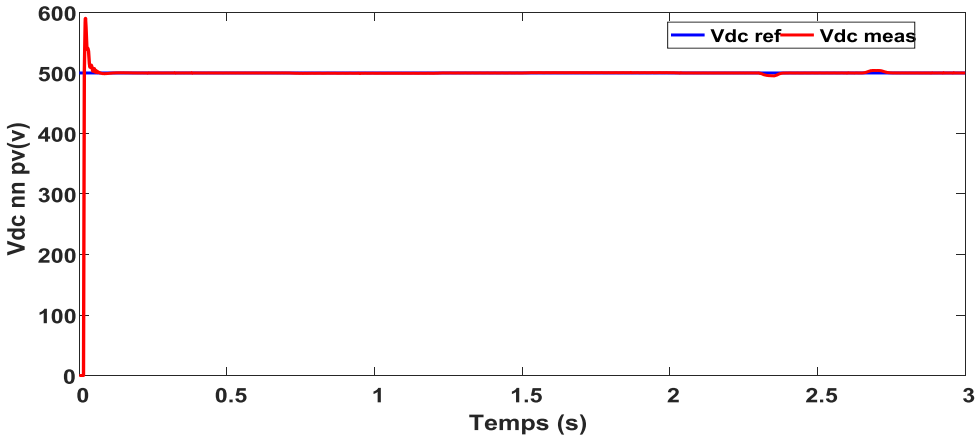


Figure (I.27) : La tension Vdc.

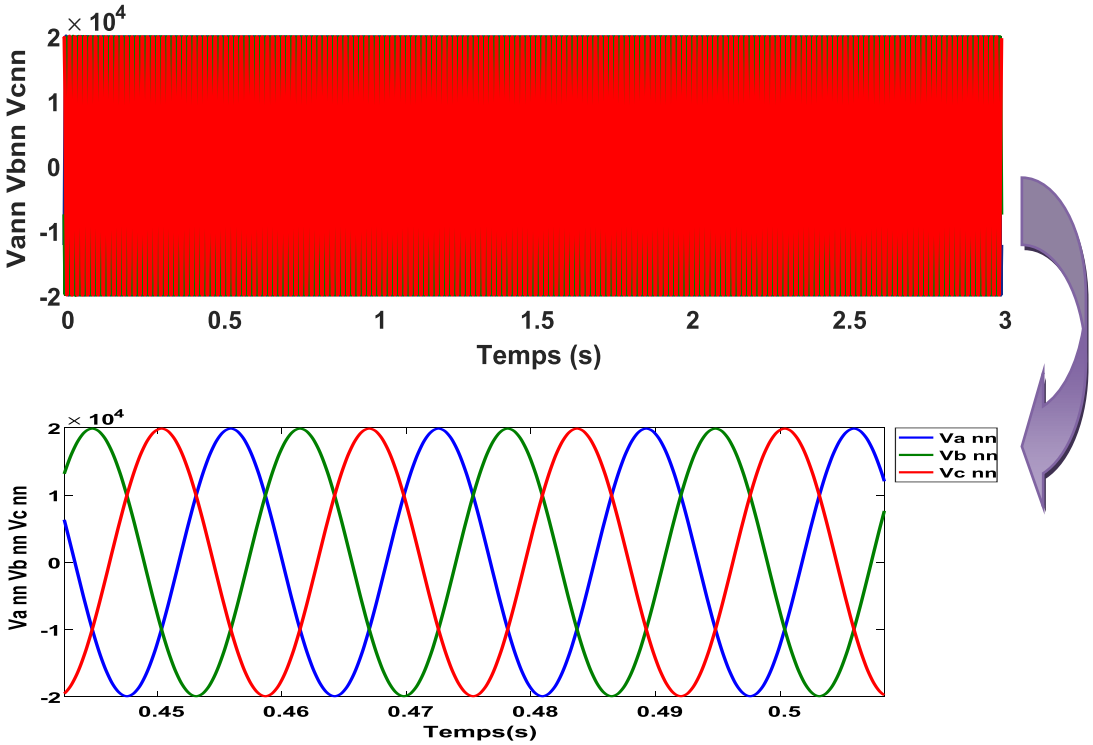


Figure (IV.28) : Les tensions Vabc.

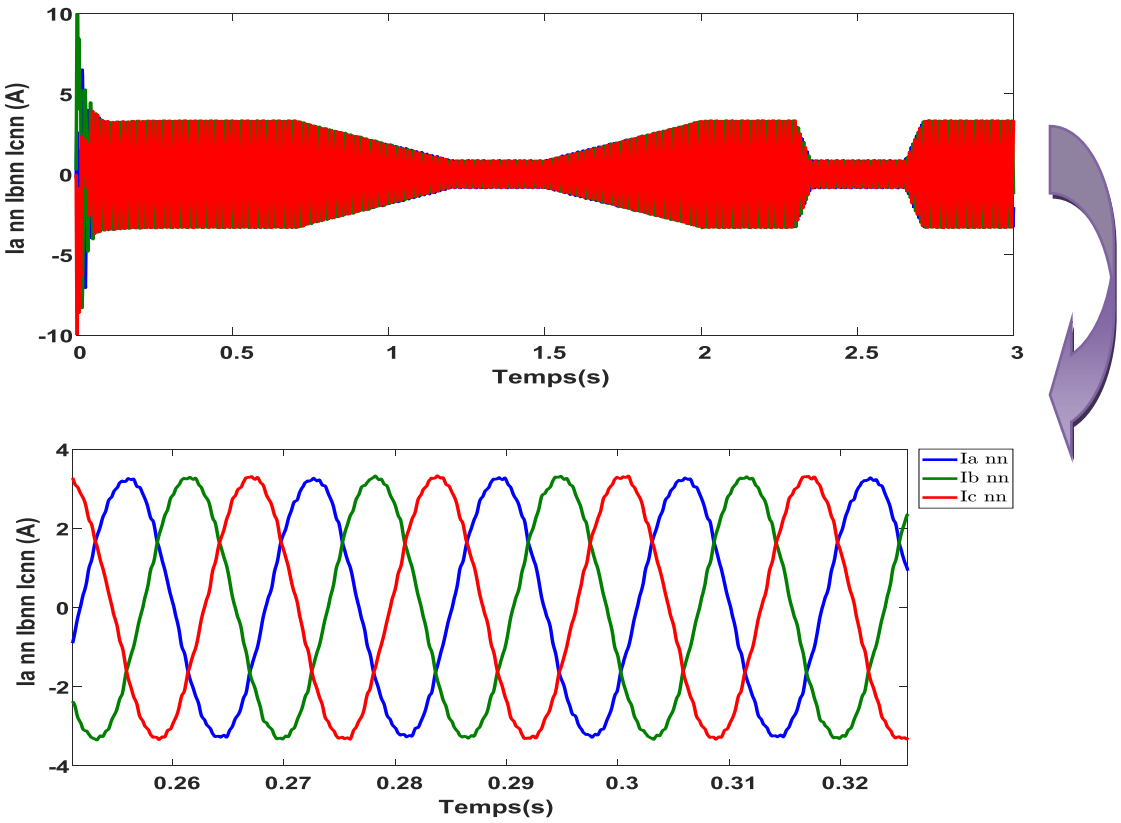


Figure (IV.29) : Les courants Iabc.

On observe de la figure (IV.28) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

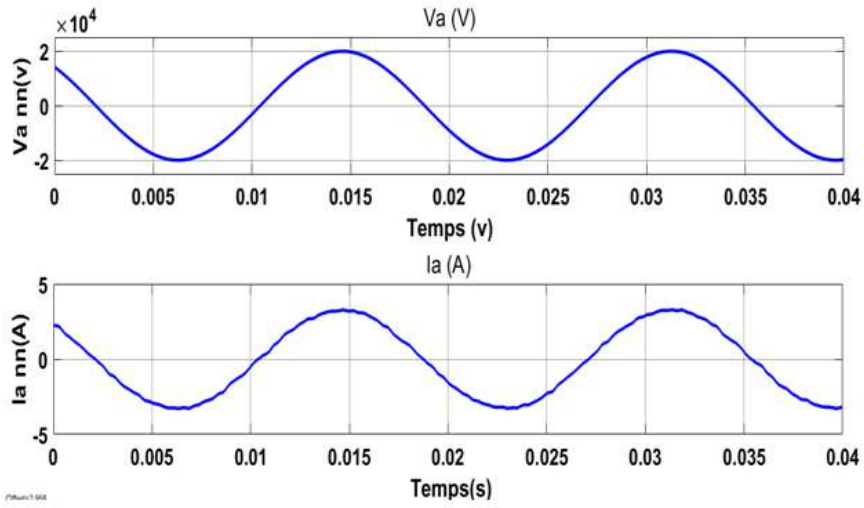


Figure (IV.30) : La tension Va et le courant Ia.

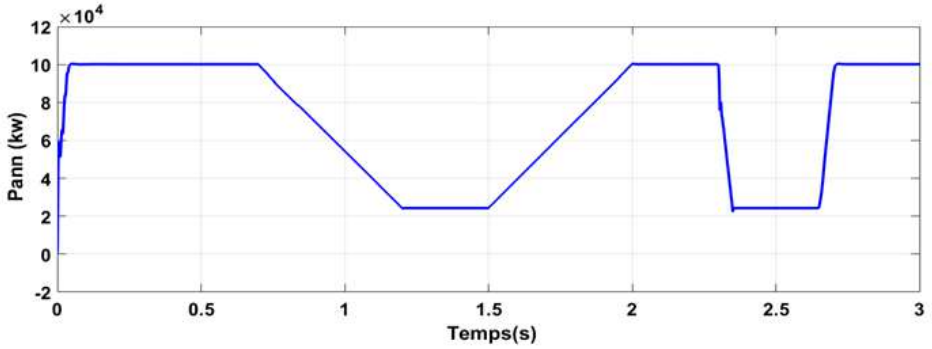


Figure (IV.31) : La puissance Pa.

IV.3.2.2 Simulation de système éolien

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système éolien par le réseau de neurone

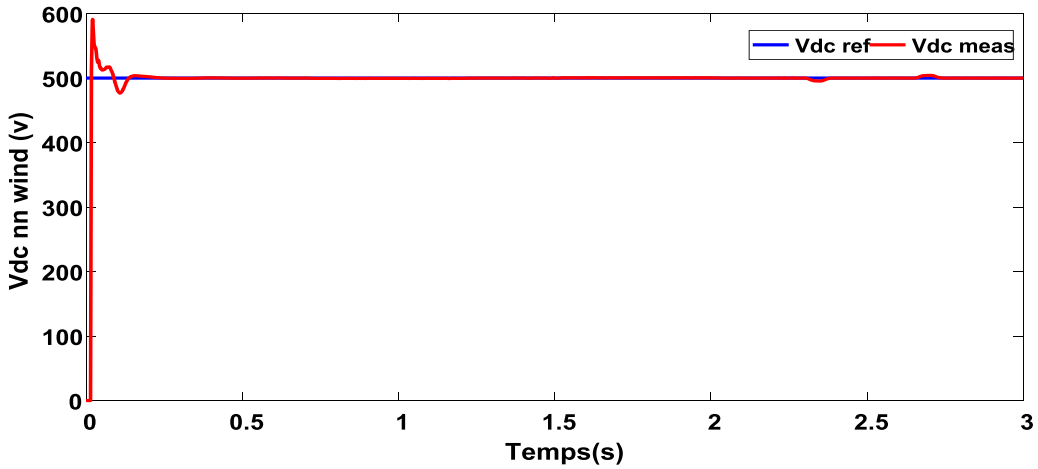


Figure (IV.32) : La tension Vdc .

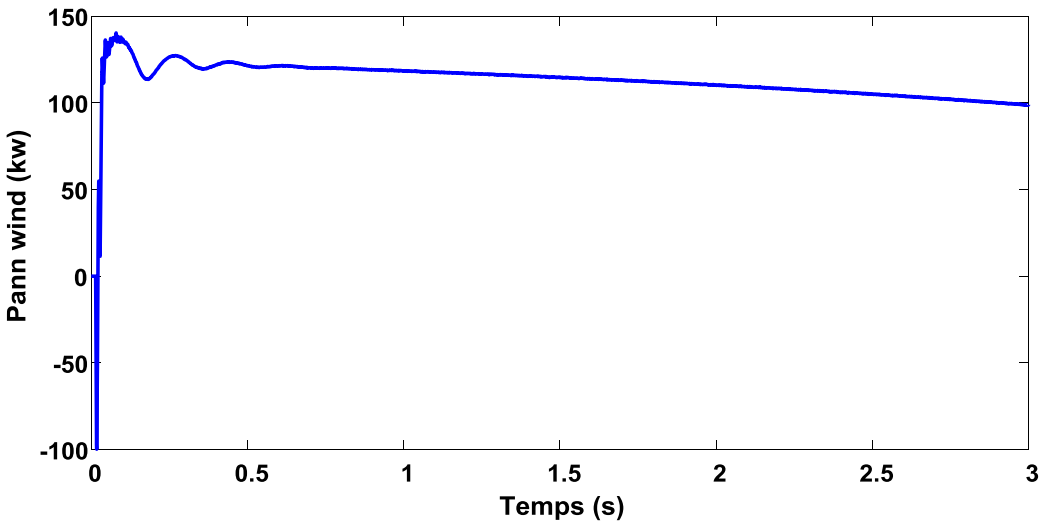


Figure (IV.33) : La puissance Pa.

On observe de la figure (IV.32) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

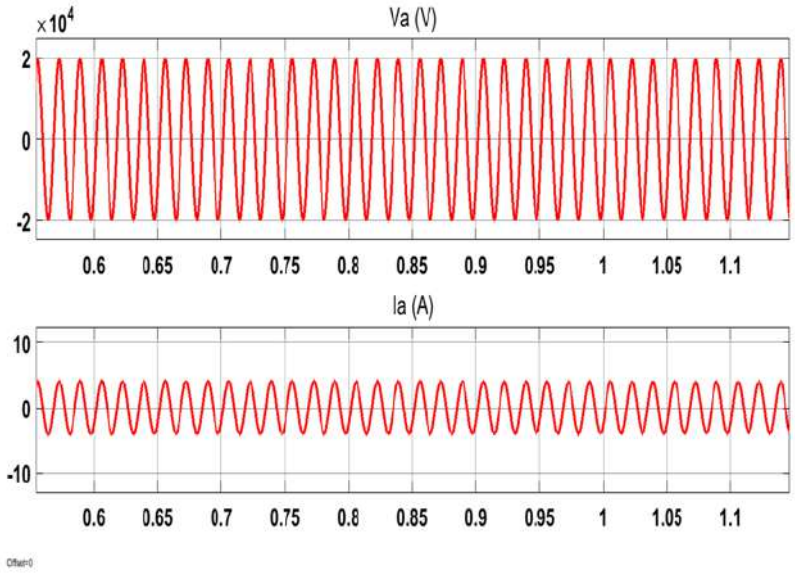


Figure (IV.34) : La tension Va et le courant Ia.

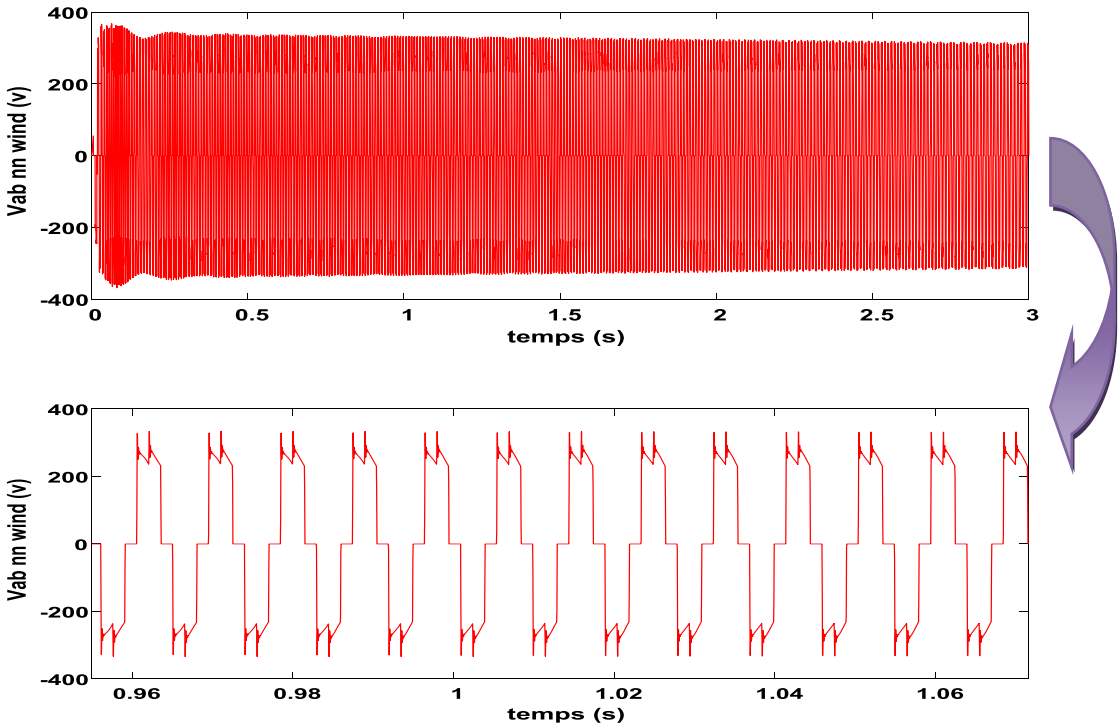


Figure (IV.35) : Les tensions Vab .

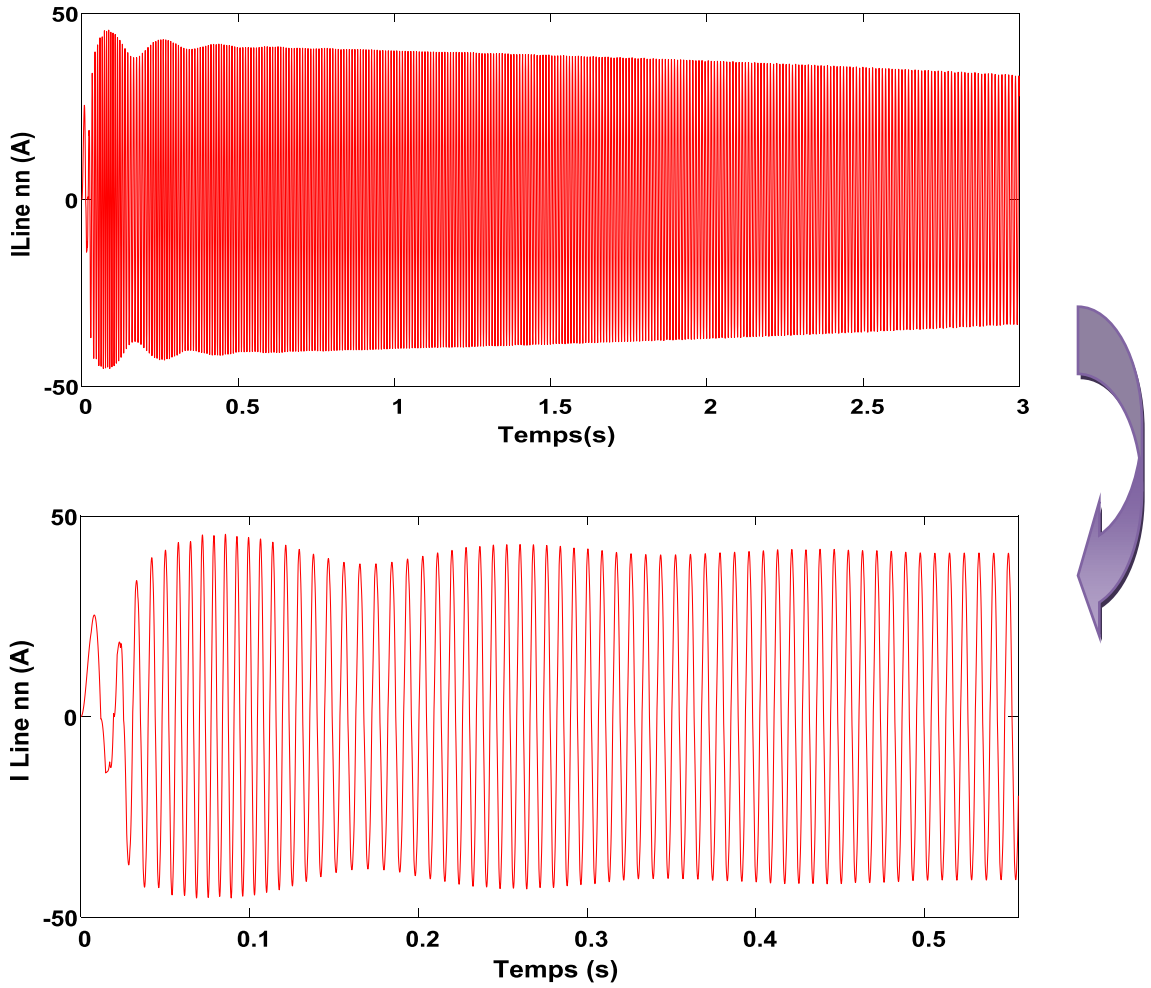


Figure (IV.36): Le courant I_{Line} .

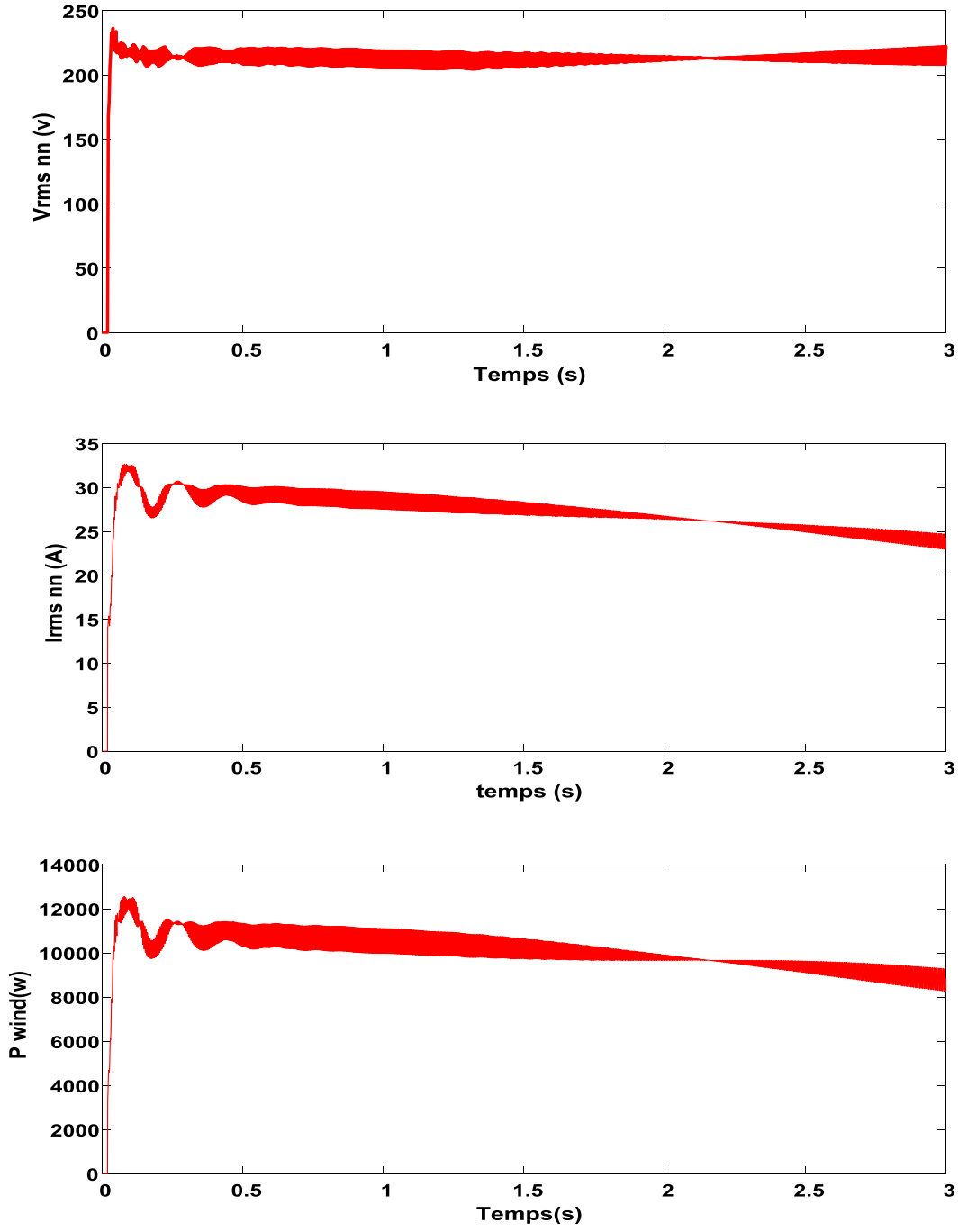


Figure (IV.37) : Vrms,Irms,Pa.

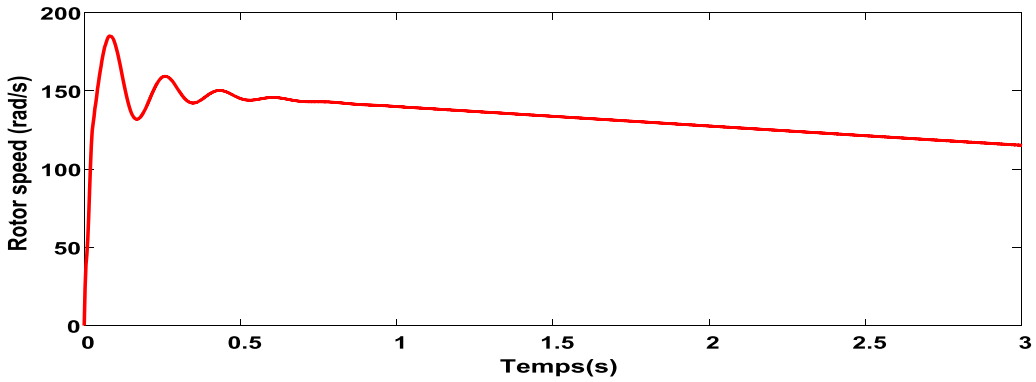


Figure (IV.38): La vitesse rotorique

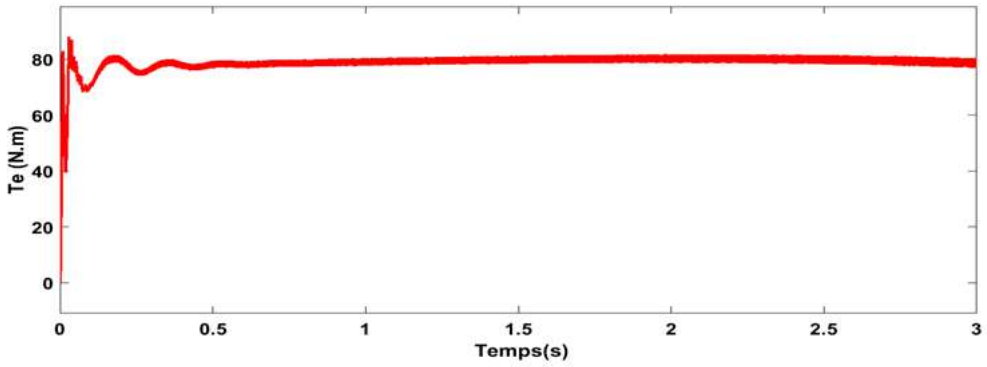


Figure (IV.39): Le couple éléctromagnétique

IV.3.2.3 Simulation de système hybride

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système hybride par le réseau de neurone

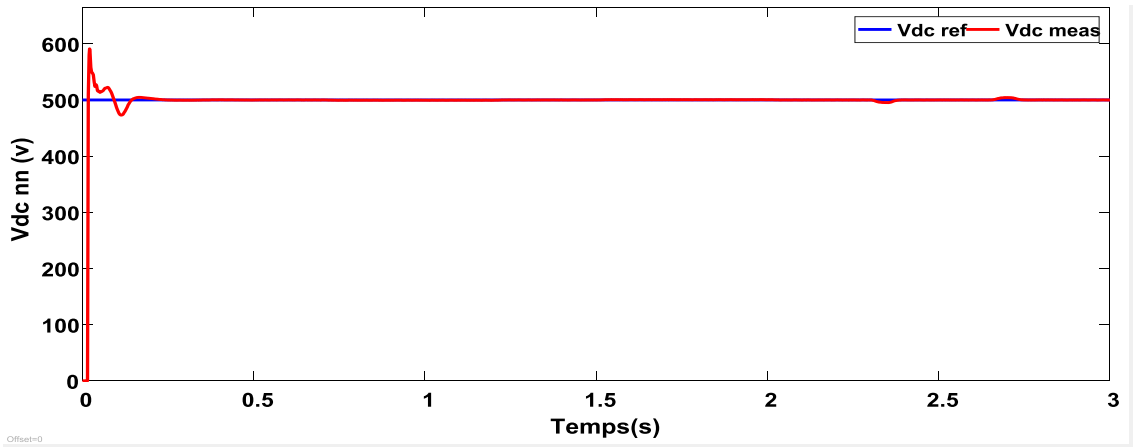


Figure (IV.40) : La tension Vdc .

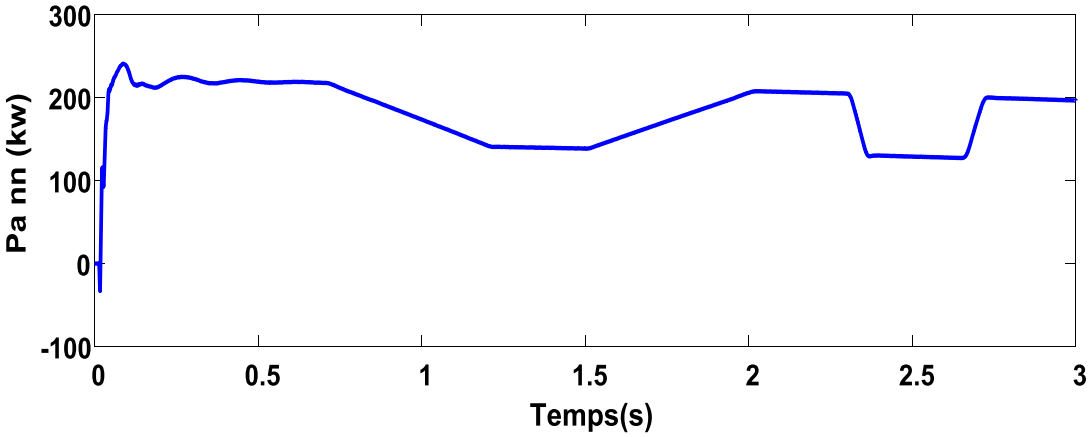


Figure (IV.41) : La puissance Pa.

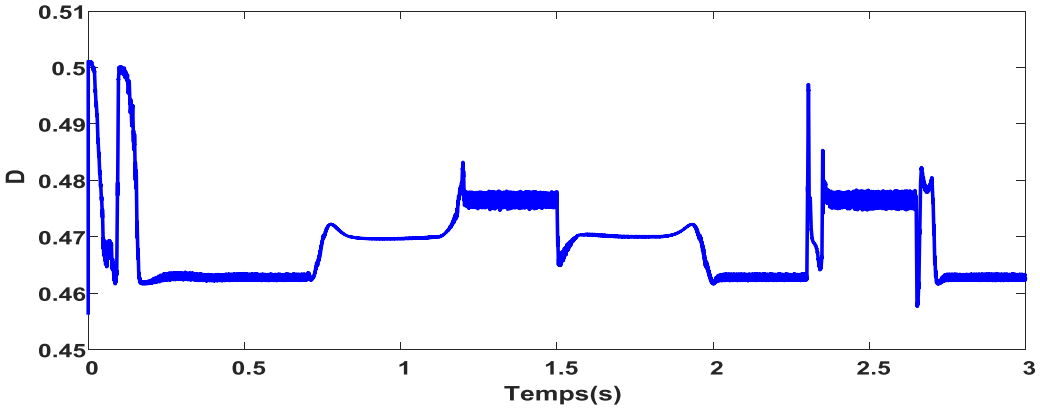


Figure (IV. 42) : Le rapport cyclique.

On observe de la figure (IV.21) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

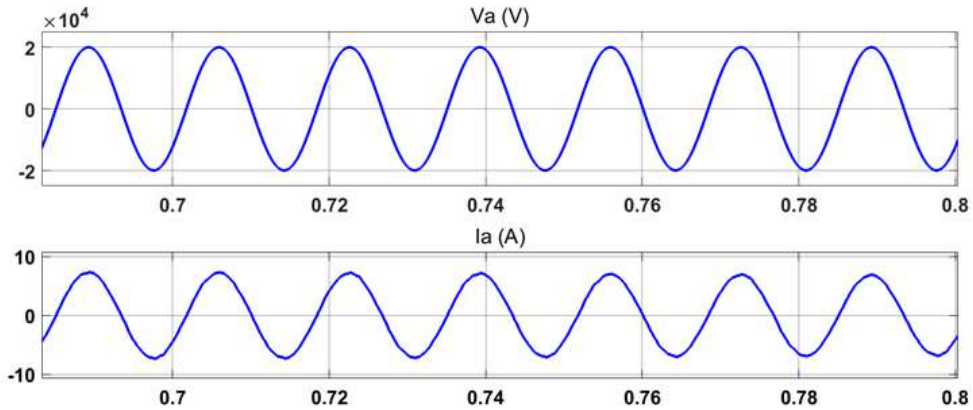


Figure (IV.43) : La tension Va et le courant Ia.

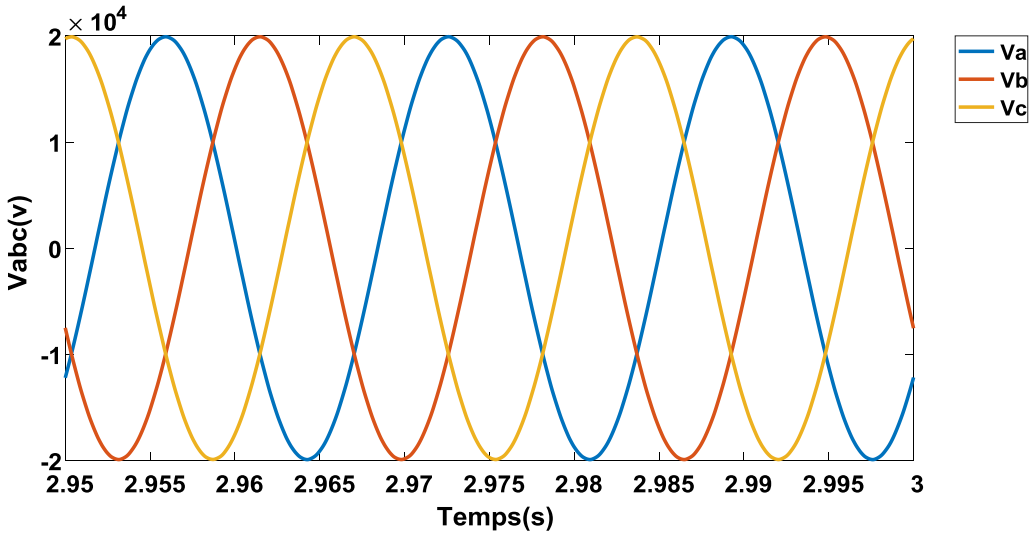


Figure (IV.44) : Les tensions Vabc

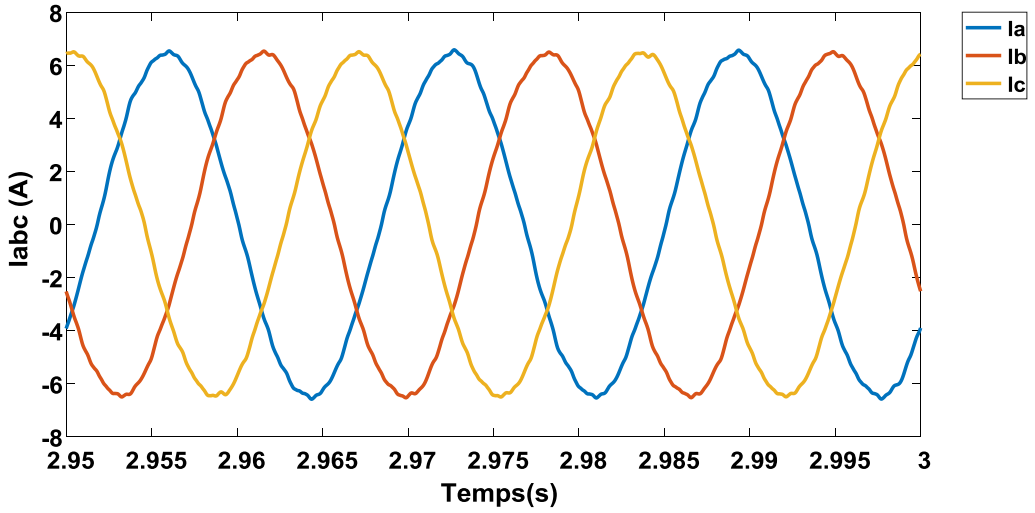


Figure (IV.45) : Les courants Iabc

IV.3.3 Simulation de système avec le réseau de neuro-floue

IV.3.3.1 Simulation de système PV

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système PV avec la commande neuro-floue.

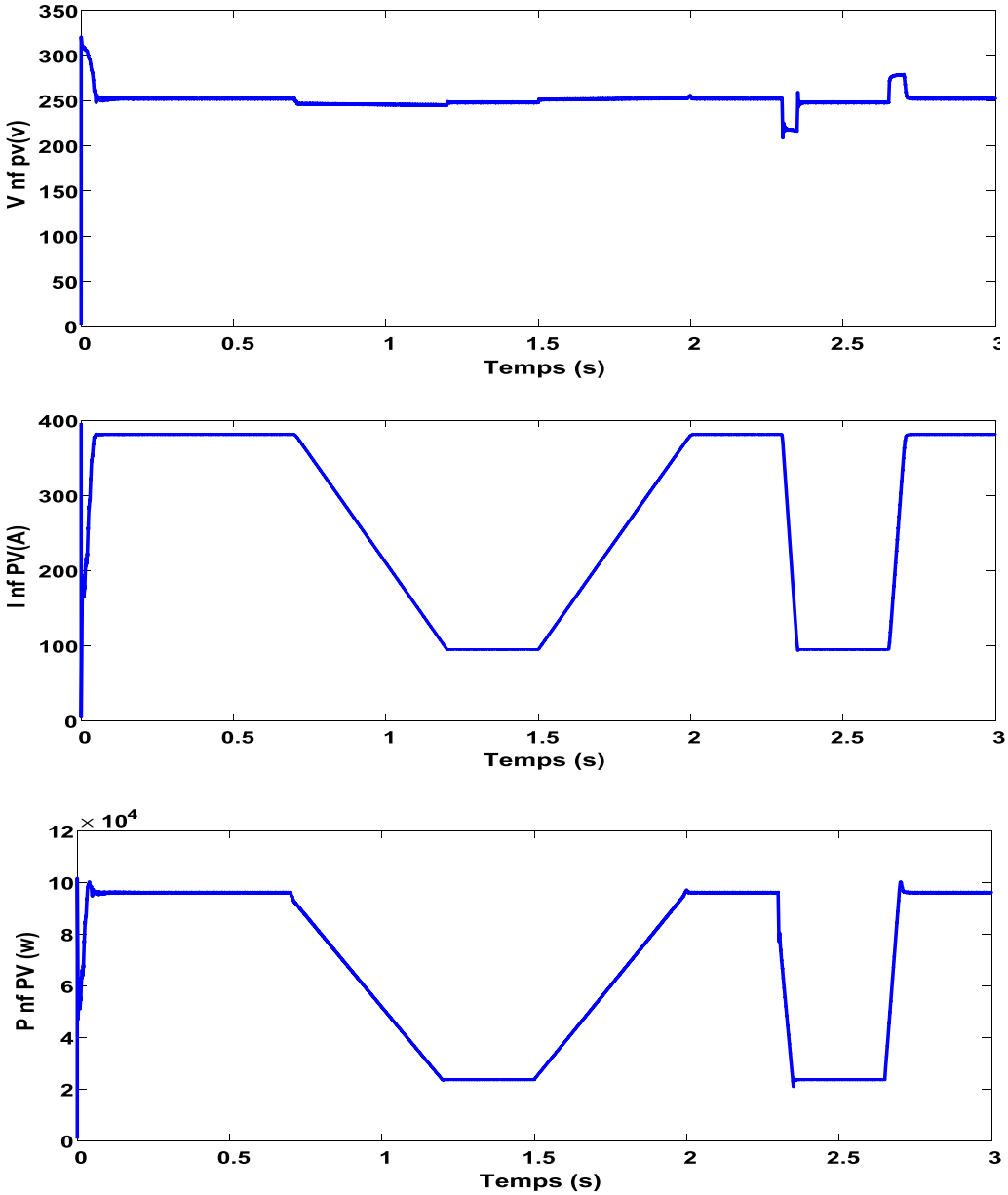
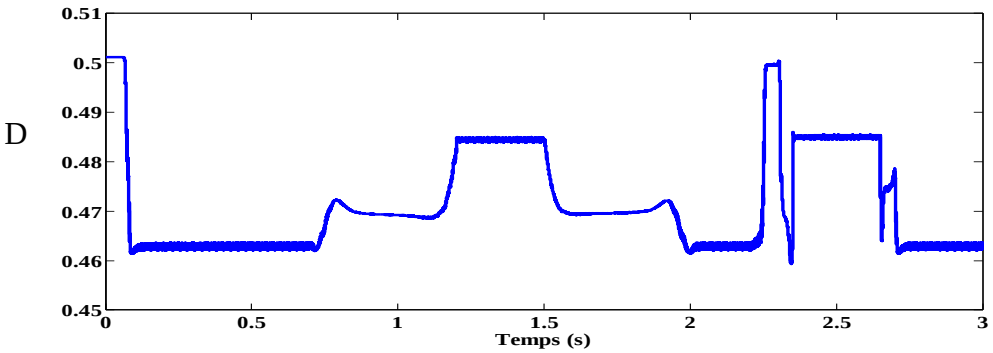


Figure (IV.46) : La tension PV, le courant PV puissance PV.



Figure(IV.47) : Le rapport cyclique.

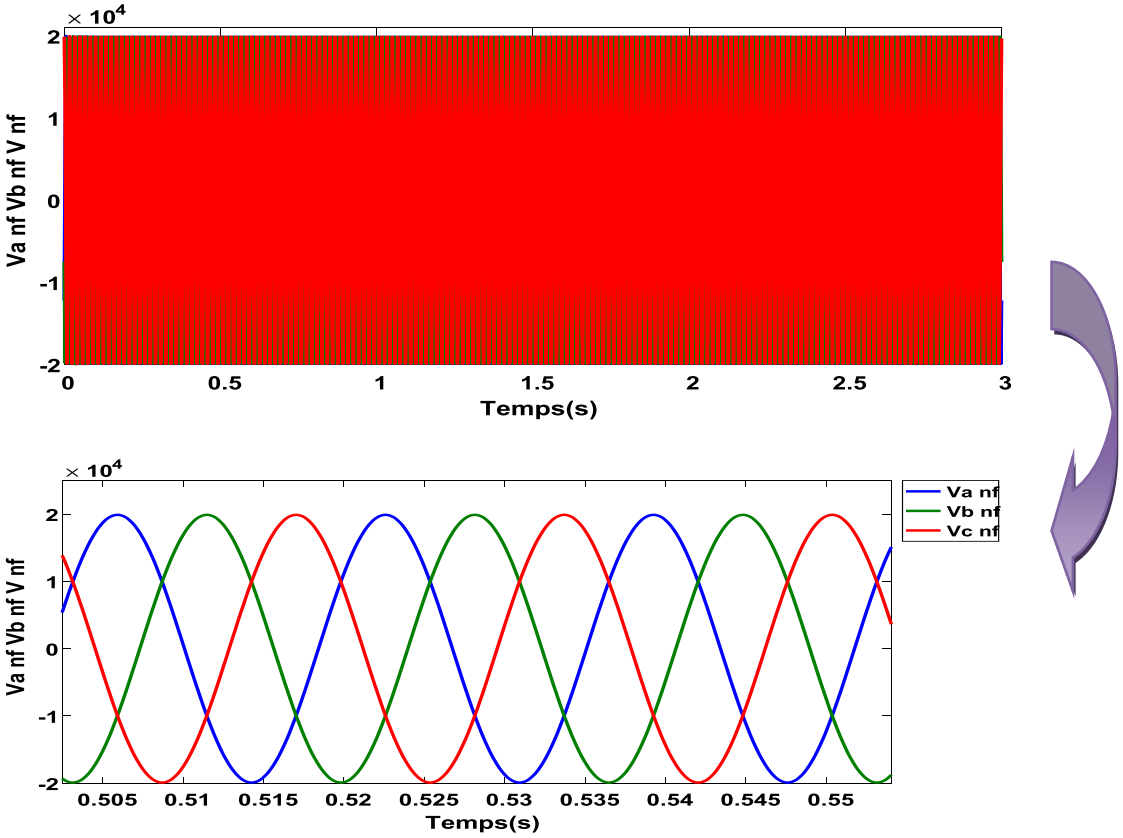


Figure (IV.48) : Les tensions Vabc.

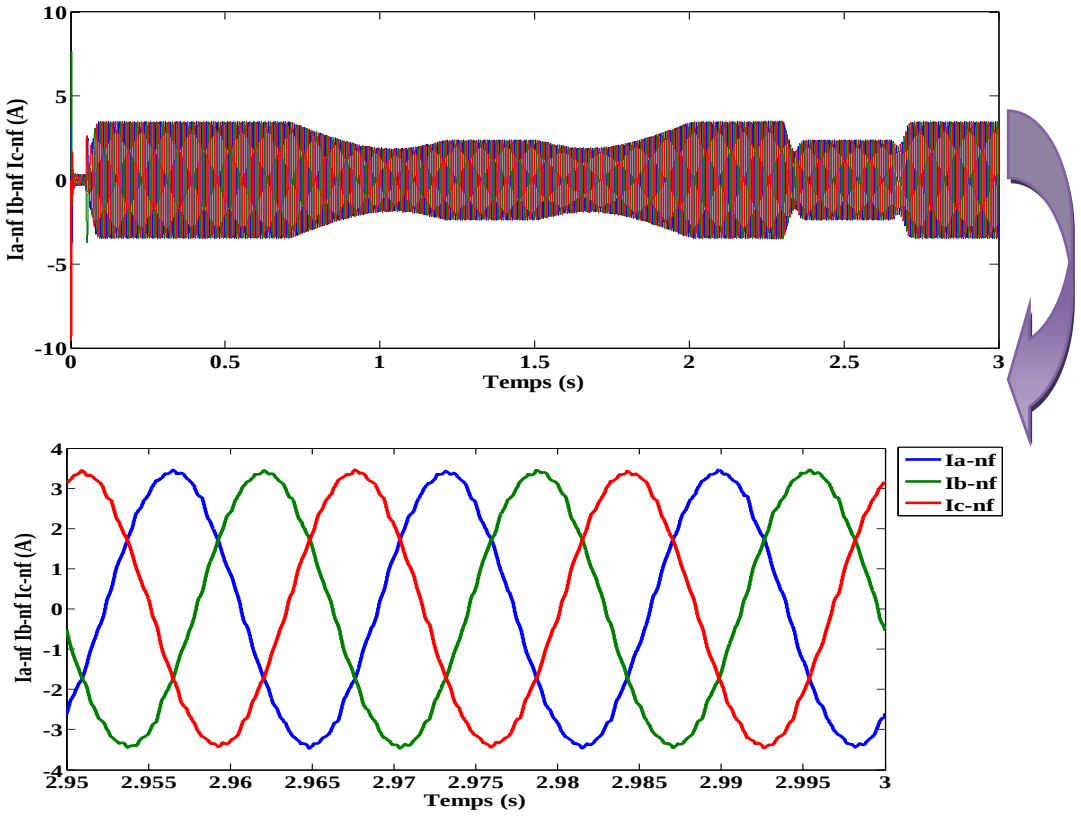


Figure (IV.49) : Les courants Iabc

On observe de la figure (IV.50) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

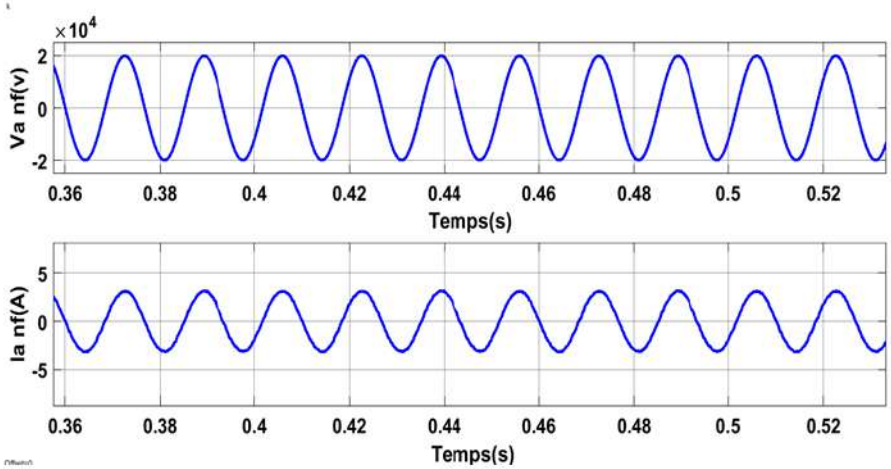


Figure (IV.50) : La tension Va et le courant Ia.

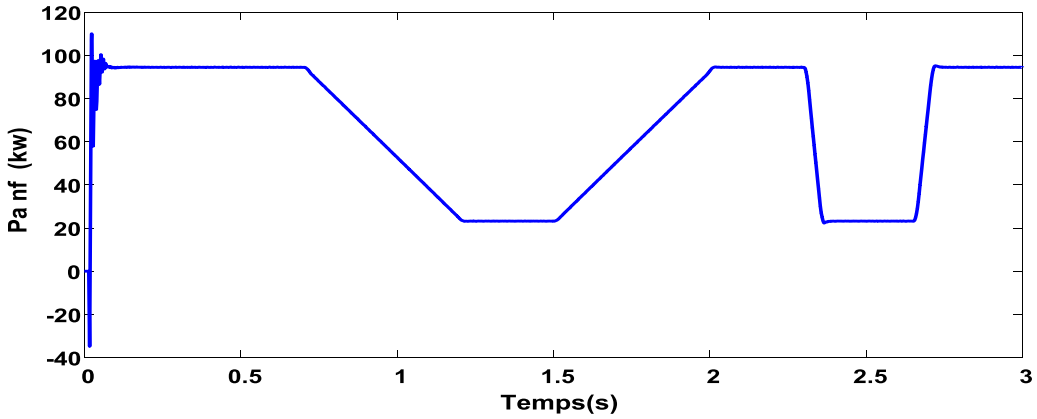


Figure (IV.51) : La puissance Pa.

IV.3.3.2 Simulation de système éolien

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de système éolien avec la commande neuro-floue.

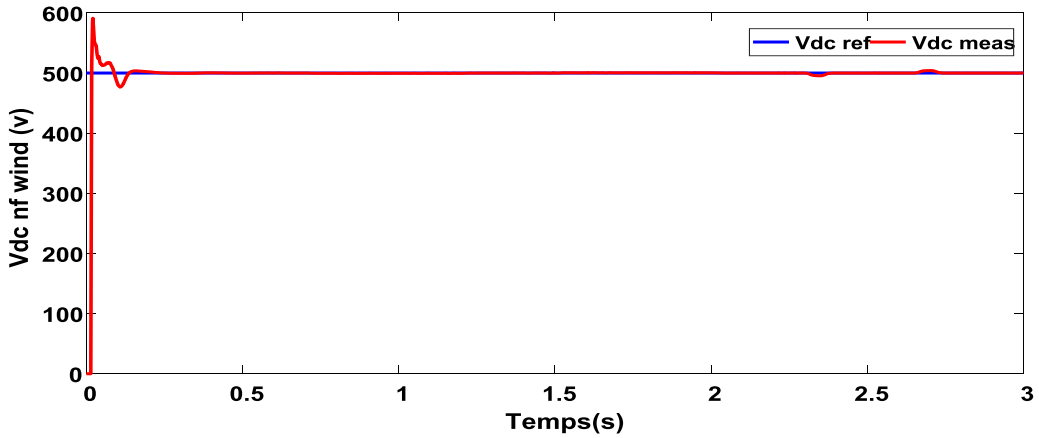


Figure (IV.52) : La tension Vdc.

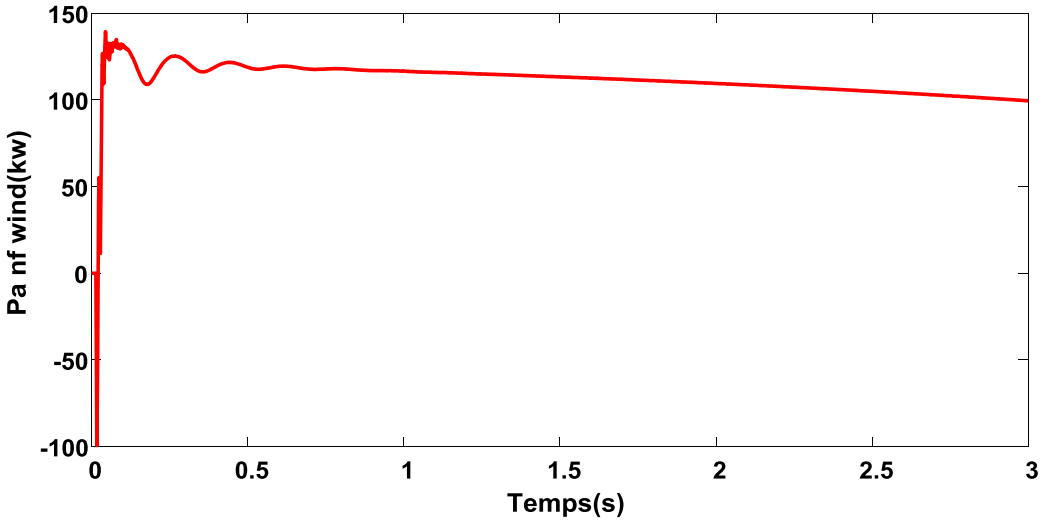


Figure (IV.53) : La puissance Pa.

On observe de la figure (IV.54) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

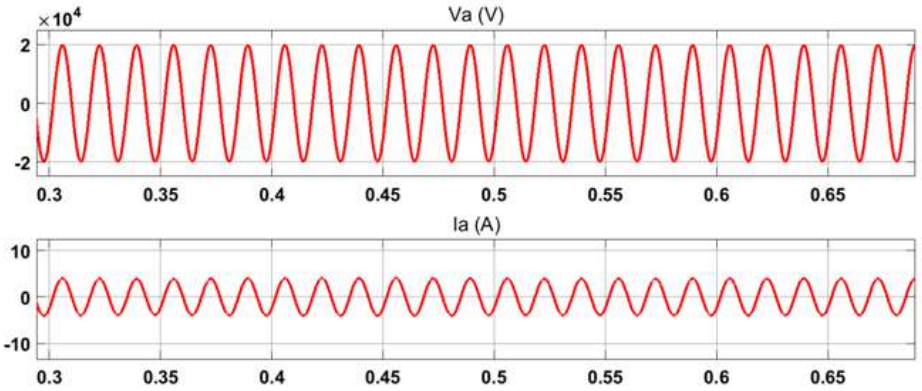


Figure (IV.54) : La tension Va et le courant Ia

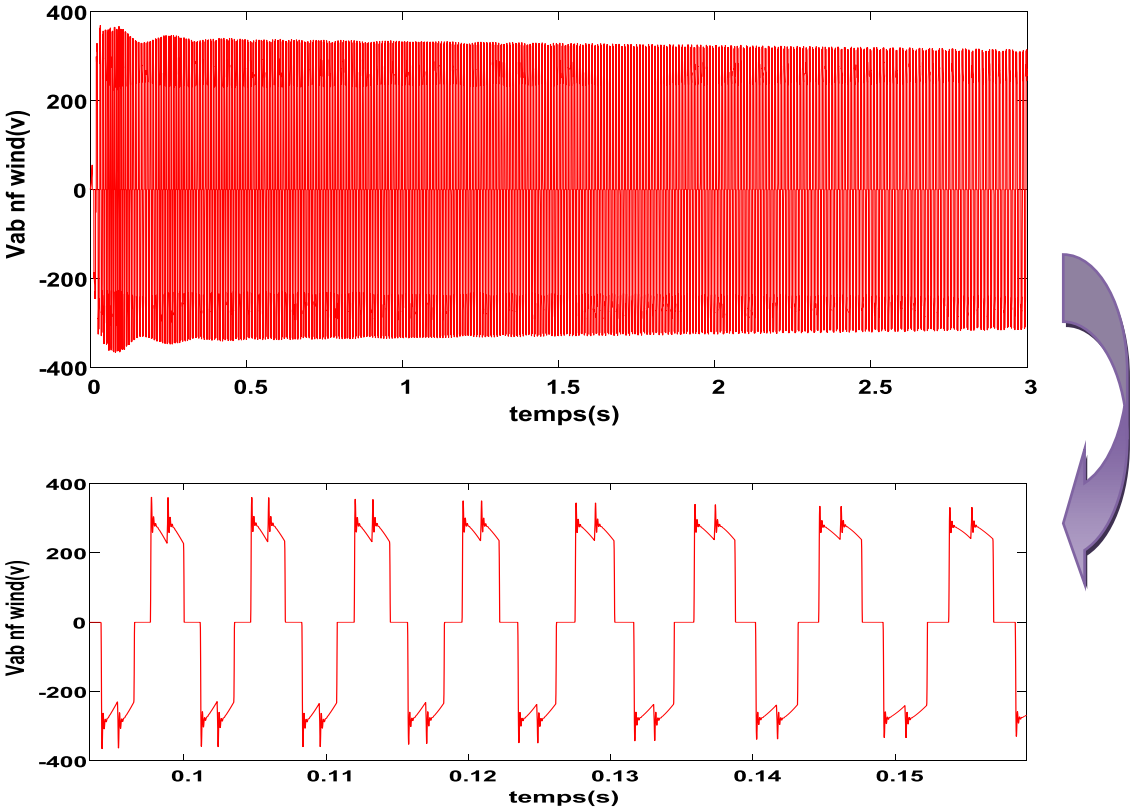
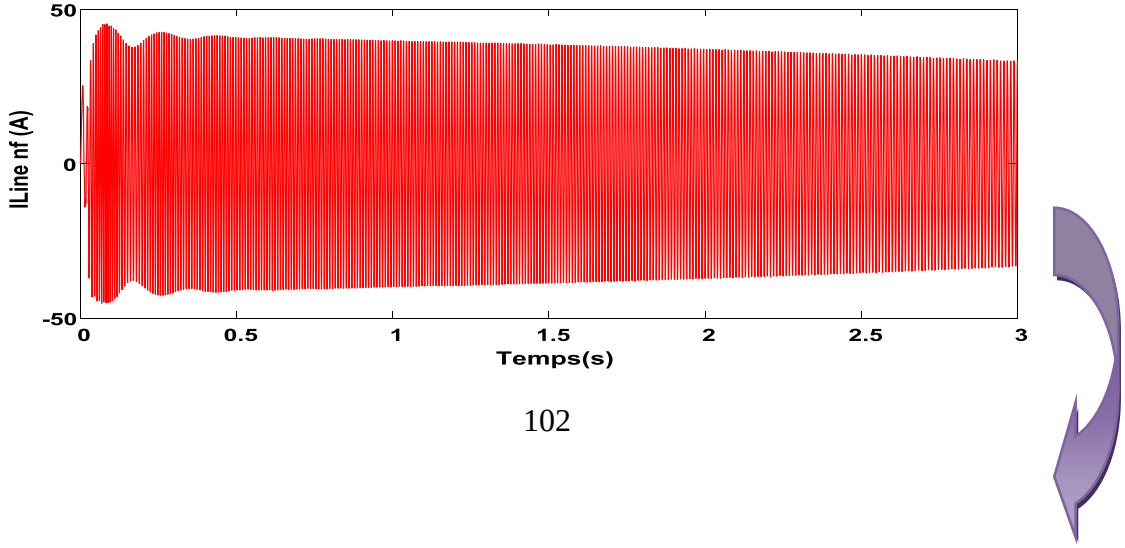


Figure (IV.55) : Les tensions Vab.



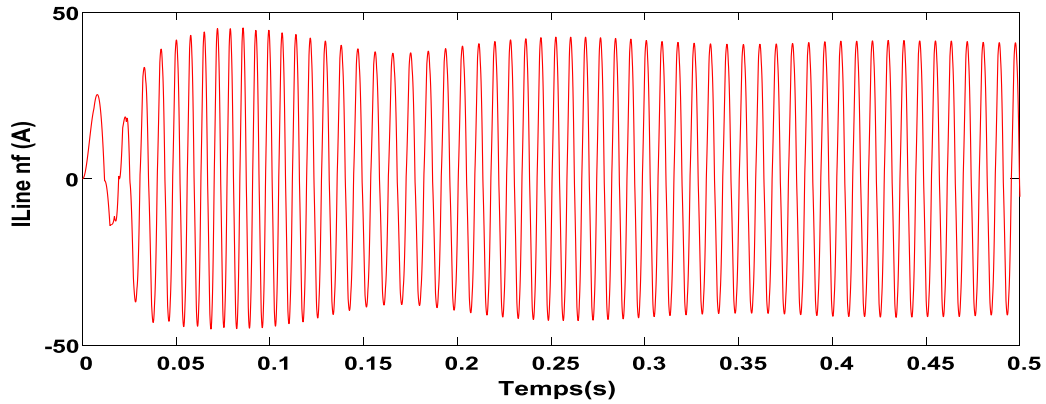
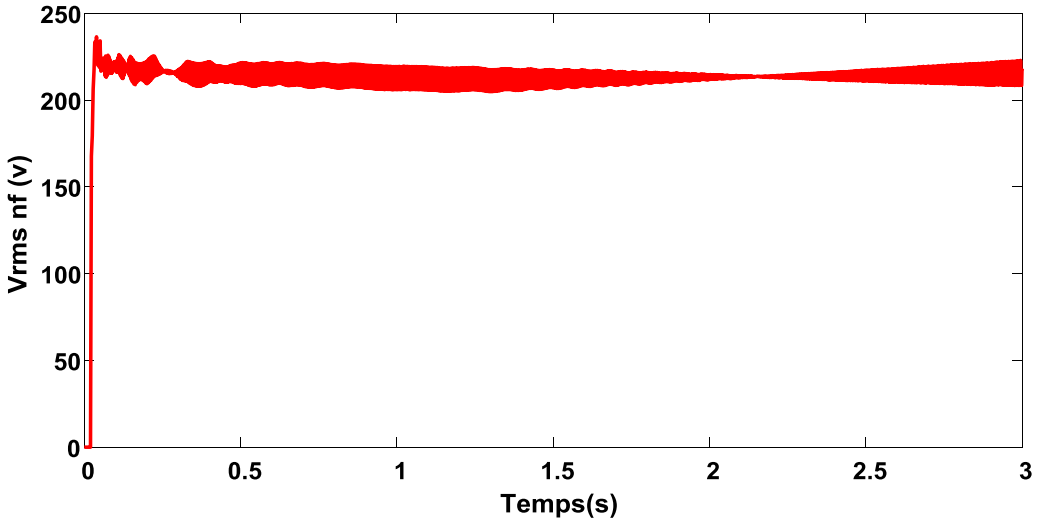
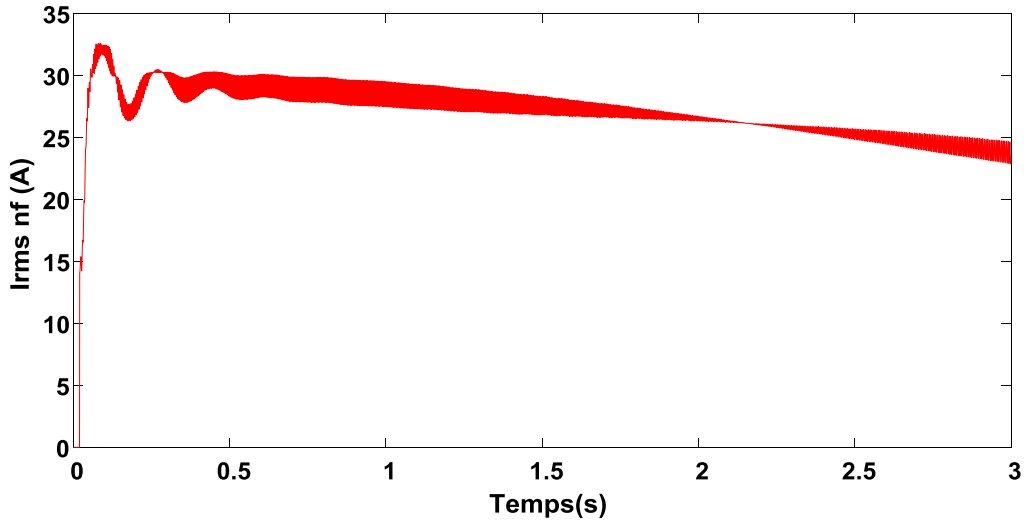


Figure (IV.56) : Le courant I line.





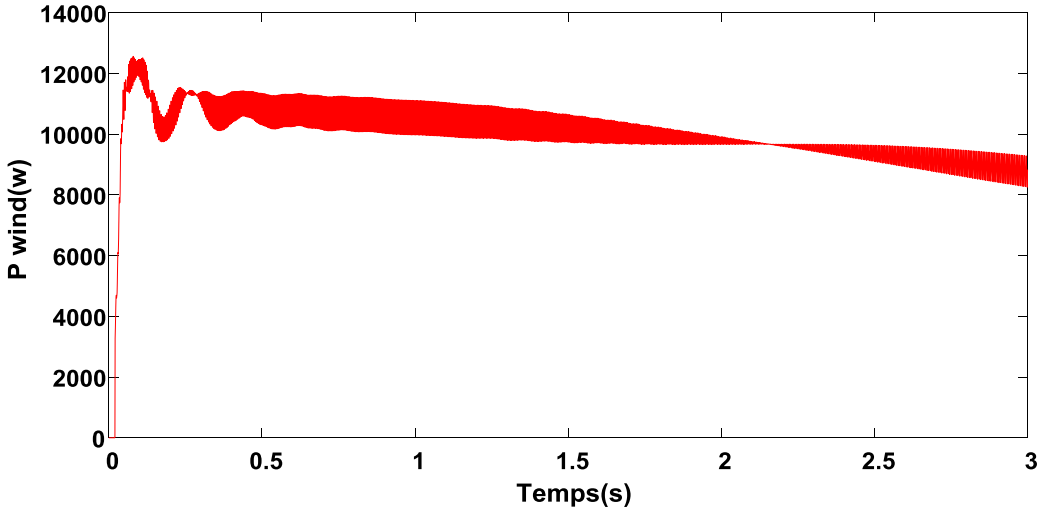


Figure (IV.57) : Vrms,Irms,Pa.

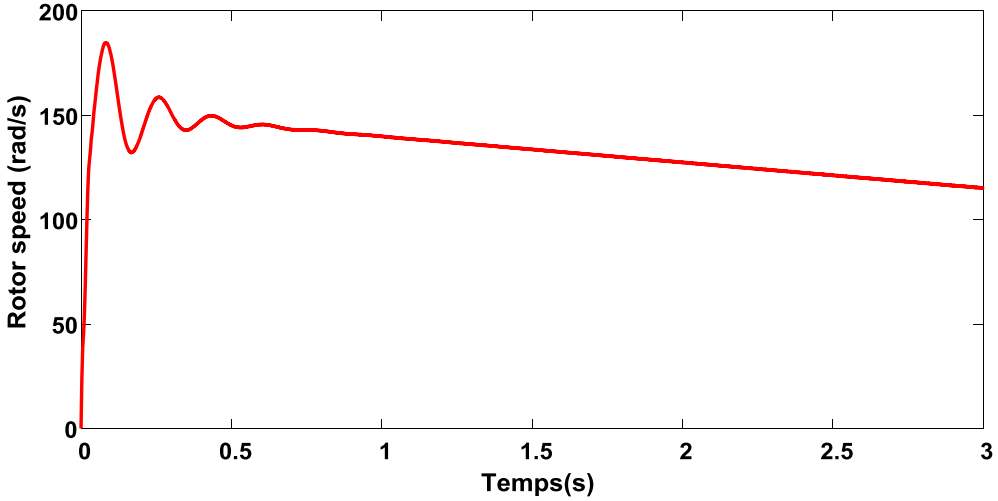


Figure (IV.58) : La vitesse rotorique.

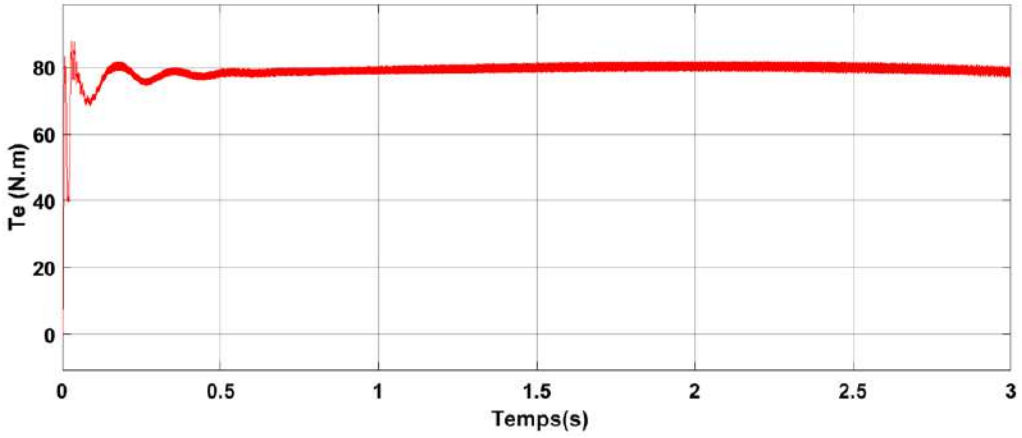


Figure (IV.59) : le couple electromagnetique.

IV.3.3.3 Simulation du système hybride

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de réseau de système hybride avec la commande neuro-floue.

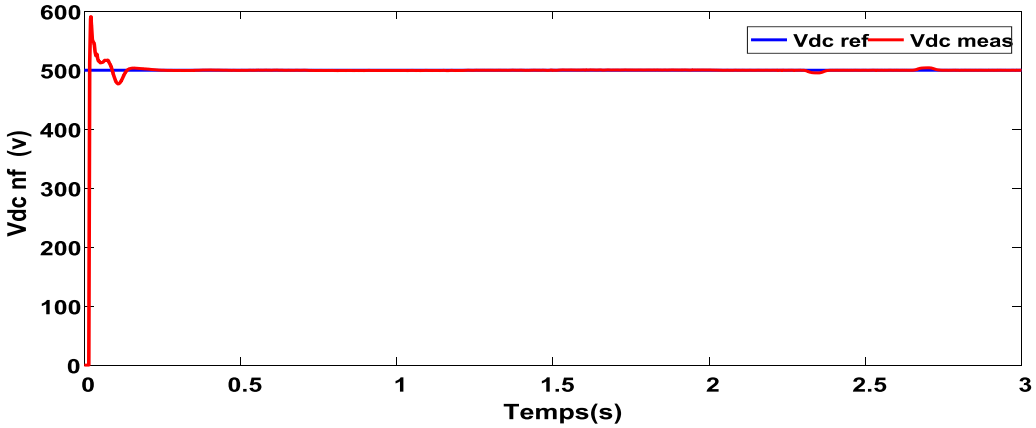


Figure (IV.60) : La tension Vdc .

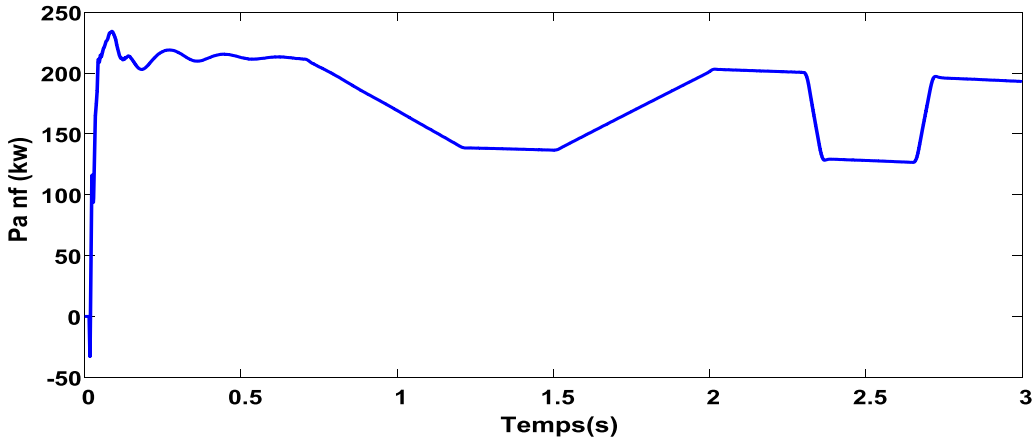


Figure (IV.61) : La puissance Pa.

On observe de la figure (IV.62) que la tension et le courant de réseau de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance de l'unité cosα=1).

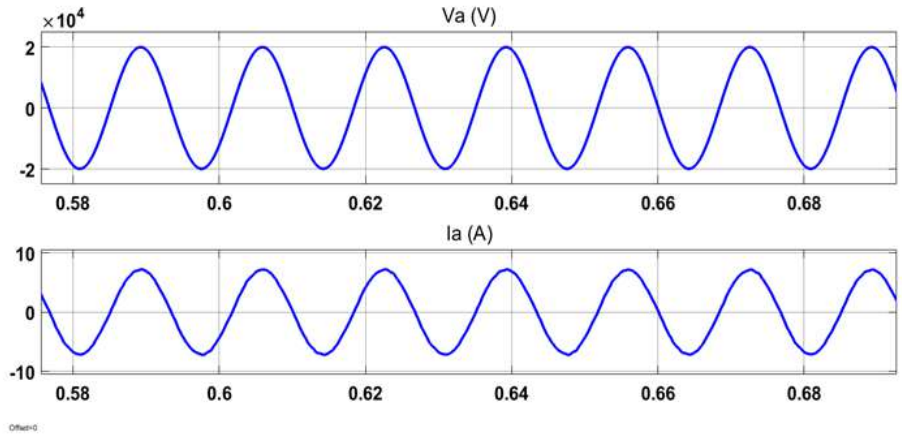


Figure (IV.62) : La tension Va et le courant Ia.

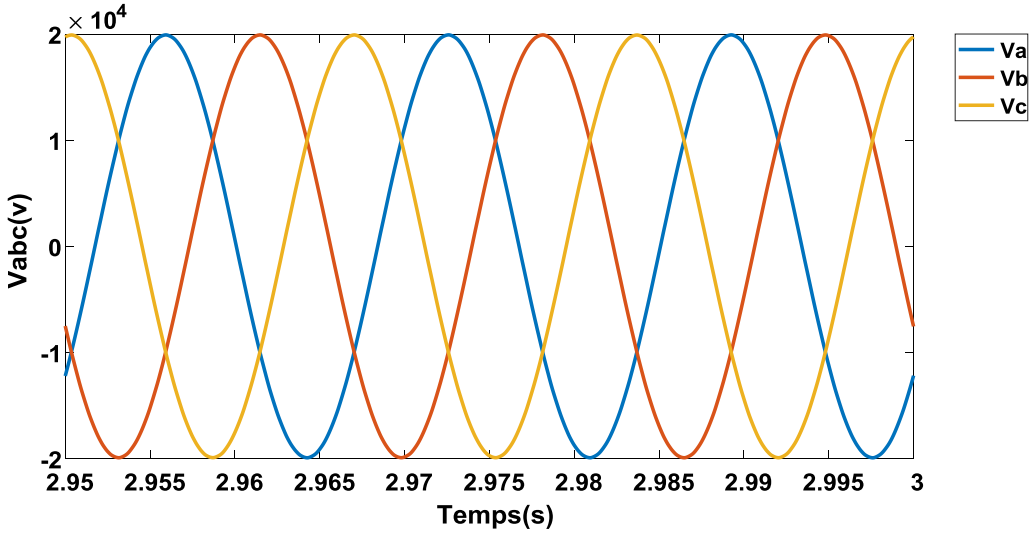


Figure (IV.63) : Les tensions Vabc

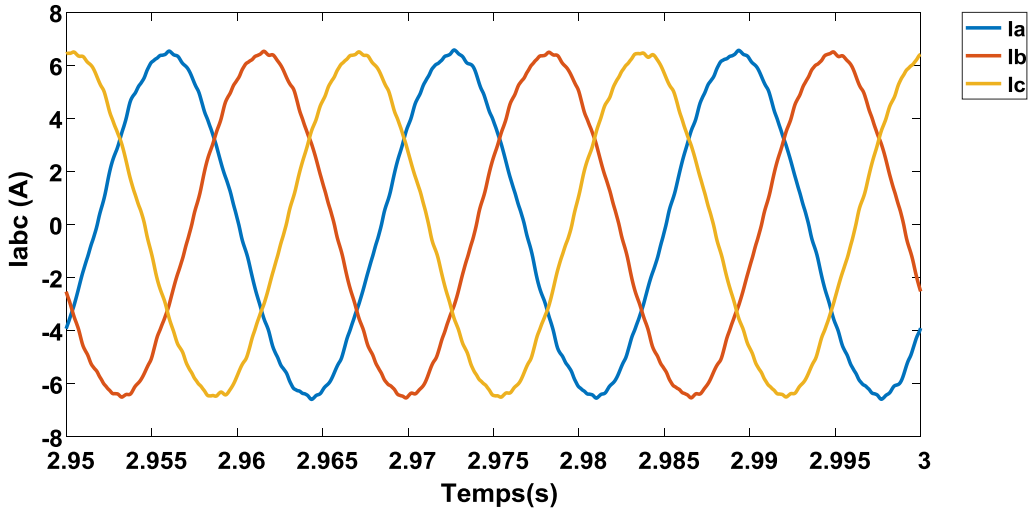


Figure (IV.64) : Les courants Iabc

IV.4 Etude comparative de la puissance entre les Trois contrôleurs

Les trois modèles doivent être simulés dans des conditions quasiment similaires pour pouvoir faire des comparaisons de performances des étages d'adaptation et en déduire s'il y a amélioration des performances avec les déférentes techniques de commandes.

On fait la comparaison entre les trois régulateurs au niveau de la puissance produite par le système hybride avec un changement d'irradiation G et de température T (stable).

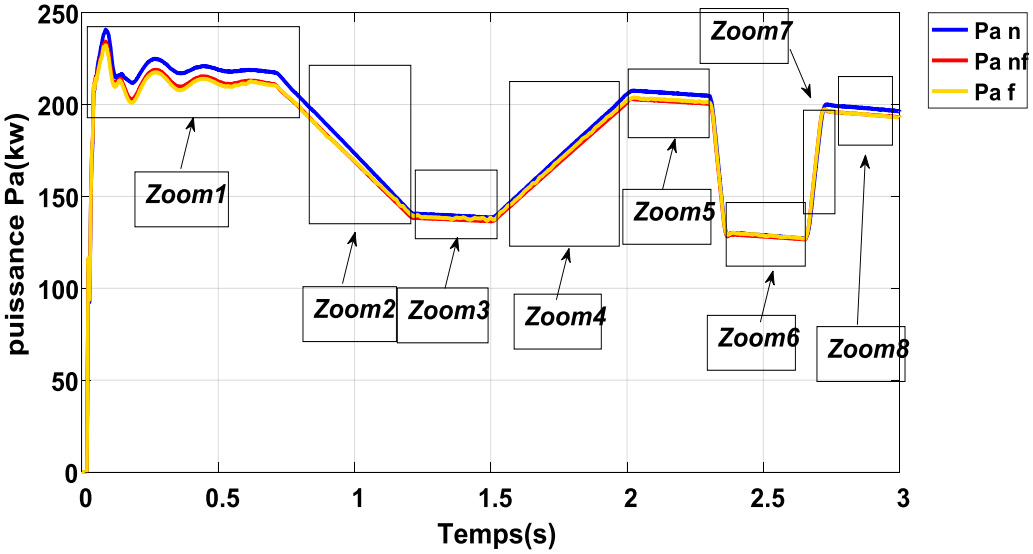


Figure (IV.65) : variation de la puissance des trois régulateurs.

Pour ces trois régulateurs, nous remarquons l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV, causée par une augmentation de l'éclairement *G*.

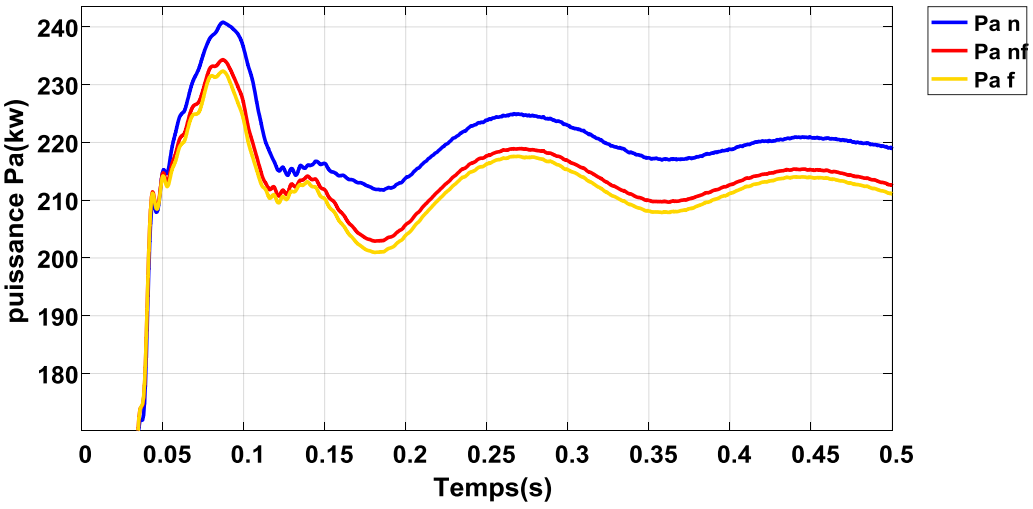


Figure (IV.66): Zoom1.a

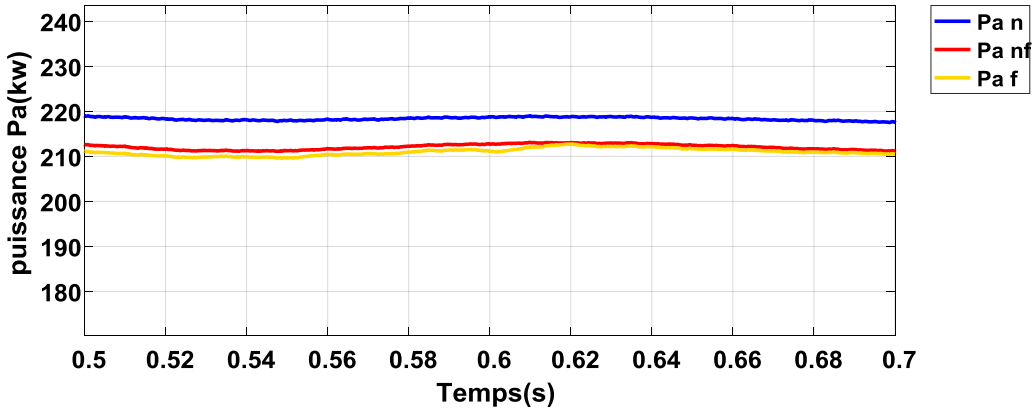


Figure (IV.67): Zoom1.b

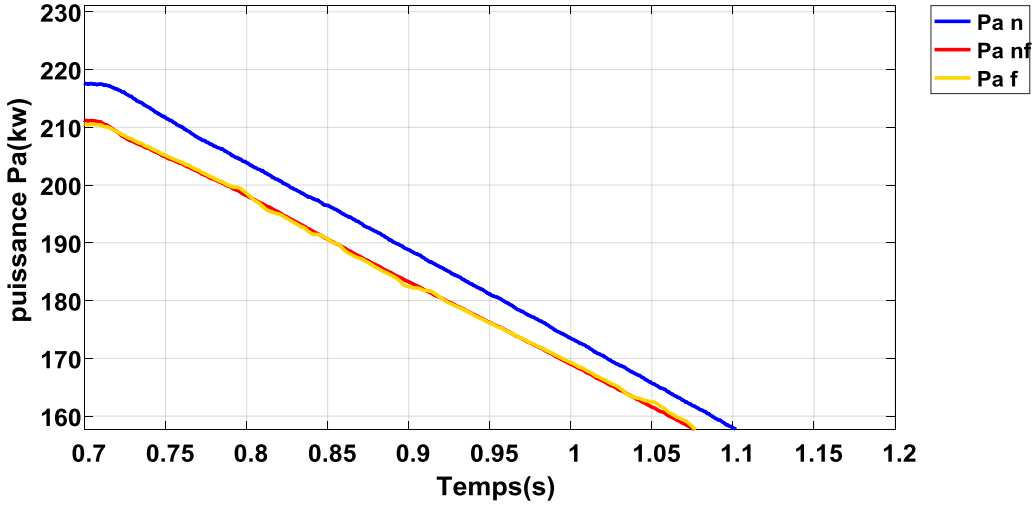


Figure (IV.68): Zoom2.

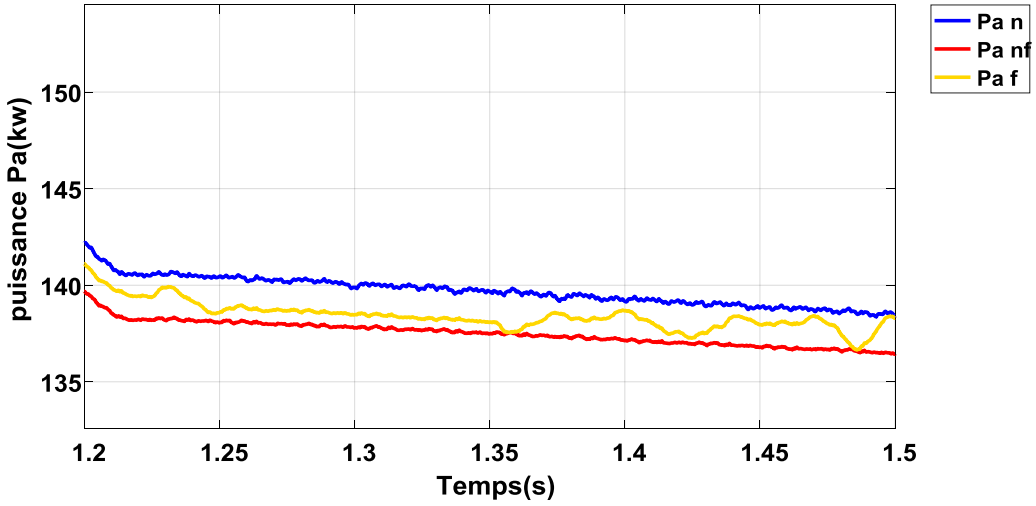


Figure (IV.69): Zoom3.

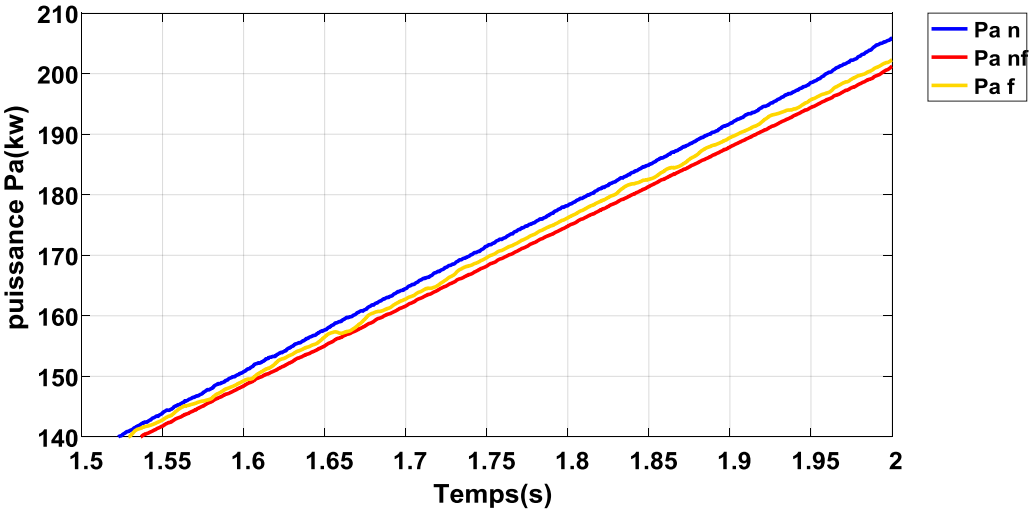


Figure (IV.70): Zoom4

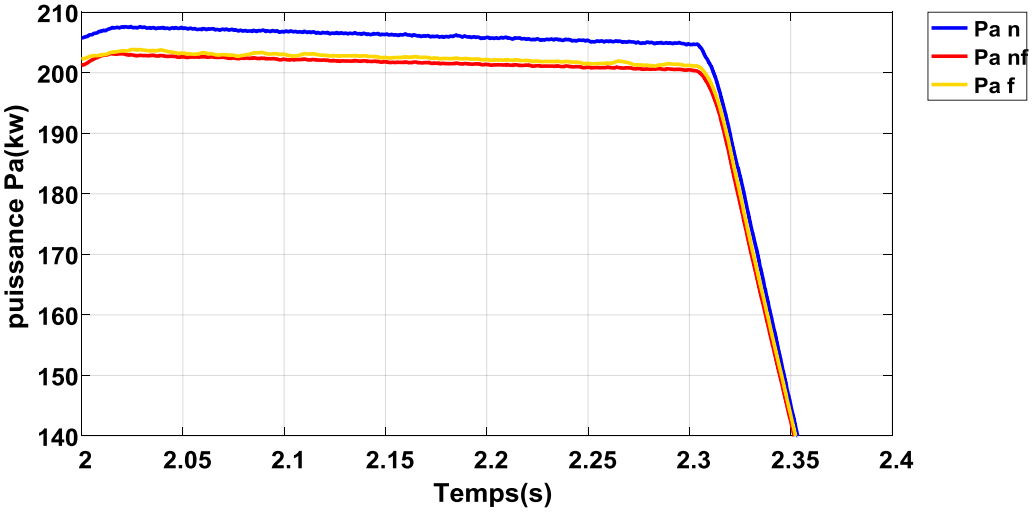


Figure (IV.71): Zoom5.a.

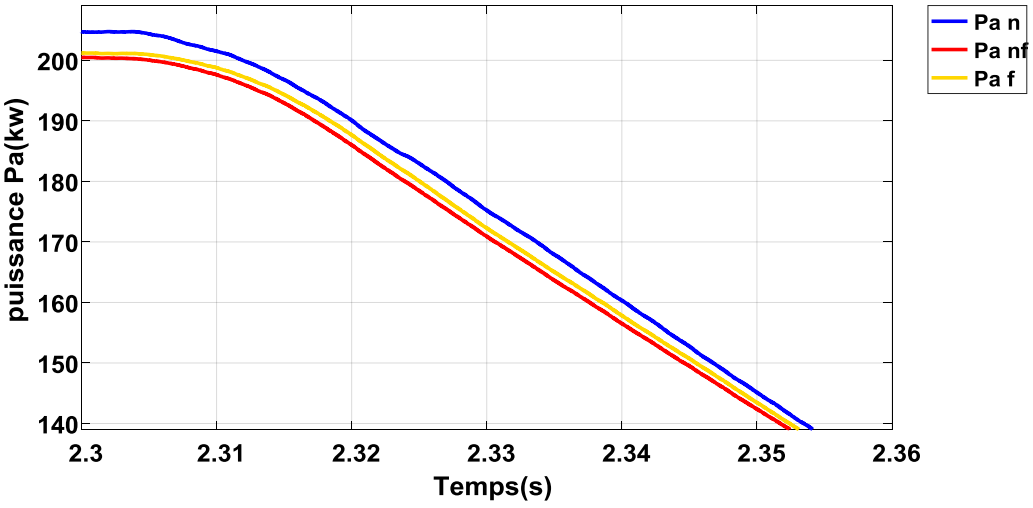


Figure (IV.72): Zoom5.b.

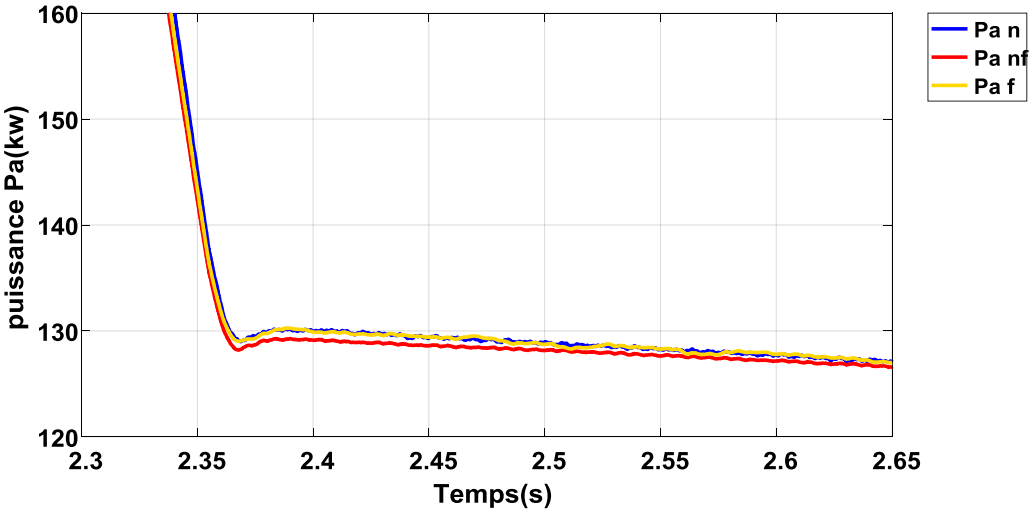


Figure (IV.73): Zoom6.

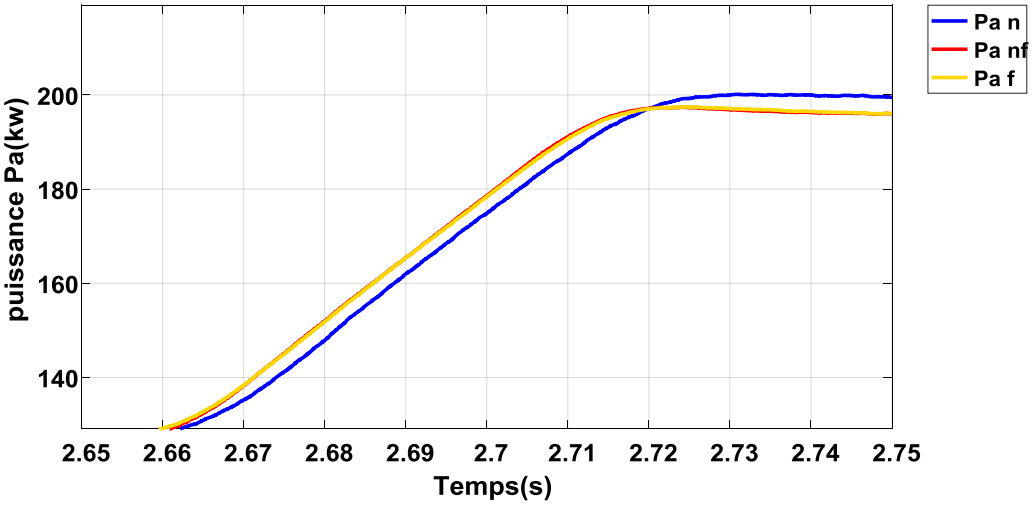


Figure (IV.74): Zoom7.

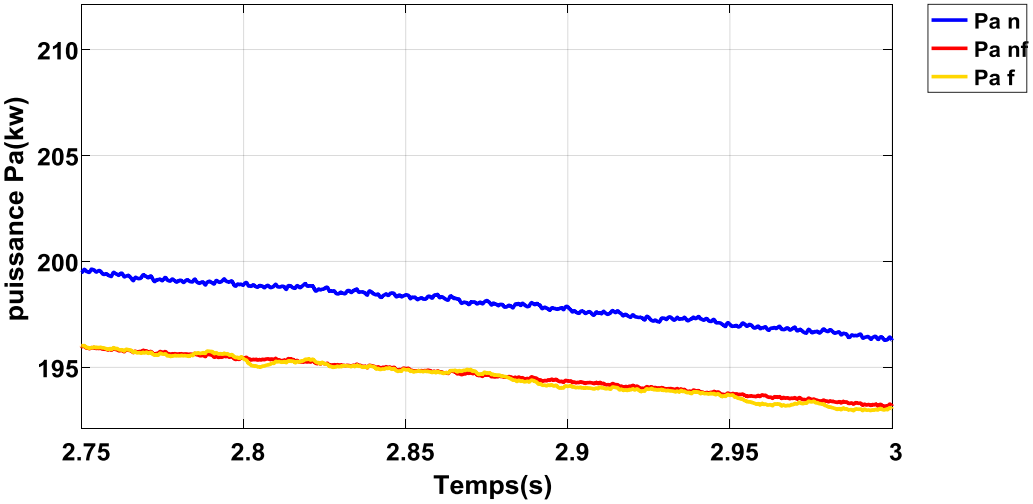


Figure (IV.75): Zoom8.7

- D'après la figure (IV.66), il est claire que tous les régulateurs suivi le PPM au même temps (avec un temps de répense 0.5s)
- D'après la figure (IV.67),la meilleurs valeur d'erreur statique présenté par le régulateur neuronal suivi par le réseau de neuro-floue et la logique floue.
- A partir de la figure (IV.68), lorsque la diminution lente de l'irradiation G (de G=1000 jusqu'à 250W/m^2) entre [0.7s-1.1s] Nous remarquons que la commande MPPT neuronale suit rapidement le PPM suivie par Neuro-floue et la logique floue.
- Dans la figure(IV.69) on a vu que la commande neuronale suit le PPM avec de meilleures performances, suivi par la logique floue et le réseau de neuro-floue.
- Dans la figure (IV.72) et lors de la diminution rapide de l'irradiation de 1000w/m^2 jusqu'à 250 w/m^2 [2.3s-2.35s] on a vu que la commande floue et neurone suit bien le PPM, suivi par la commande floue puis le réseau de neuro-floue.
- Et pour la stabilité finale de l'irradiation figure(IV.75) nous remarquons que tous les contrôleurs suivent le PPM avec des différents puissances.
  - ✓ Nous allons résumer la puissance maximale produite par le système hybride dans des intervalles ou l'irradiation est stable, en appliquant les trois contrôleurs MPPT, à partir de la figure(IV.65) l'étude sera divisée en cinq intervalles.

Tableau (IV.4) : les puissances de panneau dans certains intervalles.

Temps / MPPT	[0.5-0.7]	[1.2-1.5]	[2- 2.3]	[2.4-2.65]	[2.75- 3]
Logique floue	212.43kW	138.3kW	203.1kW	125.4kW	193.3kW
Réseau de neurone	219.8kW	139.9kW	207.6kW	127.6kW	196.4kW
Réseau de Neuro-floue	213.1 kW	137.6kW	202.9kW	125.7kW	193.08kW

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé les trois régulateurs MPPT (logique floue, réseau de neurone et neuro-floue),

Comme résultats nous pouvons dire que la technique neuronale est nettement meilleure par rapport à la commande floue et neuro-floue du point de vue puissance (erreur de poursuite, erreur statique).

CONCLUSION GÉNÉRAL

Les ressources énergétiques renouvelables telles que l'énergie éolienne et photovoltaïque sont des ressources non polluantes, gratuites et propres. Ce qui fait que ces énergies sont très appréciées lors de leurs utilisations pour fournir de l'énergie électrique.

Les travaux présentés dans ce mémoire contribuent a l'insertion de ces énergies renouvelables pour la production de l'énergie électrique à partir d'un système hybride (Eolien-photovoltaïque) raccordé au réseau électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïque et éolien.

Au chapitre deux, nous avons brièvement exposé les différentes configurations des convertisseurs statiques comme nous avons abordé la modélisation du système photovoltaïque, éolien ainsi qu'une description du système hybride.

Les différentes techniques de commande intelligentes (Floue, neuronal et neuro-floue) sont abordé au chapitre trois.

Le chapitre quatre est consacre a la simulation des différentes techniques de commande, nous retrouvons une étude comparative des performances des techniques de commande proposées.

Comme résultats nous pouvons dire que la technique neuronale est nettement meilleure par rapport à la commande floue et neuro-floue du point de vue puissance (erreur de poursuite, erreur statique).

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporter une contribution à l'application des contrôleurs à base de l'intelligence artificielle sur les systèmes photovoltaïque et éolienne. Et nous espèrerons comme perspectives, l'implémentation de ces techniques de commande MPPT sur une carte électronique pour valider les résultats.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **ZIGHA ALI,** « ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN » Master en Electrotechnique UNIVERSITE CONSTANTINE I , 2014.

[2] **O.DERUELLE**, « Mise au point d'un système de spectroscopie pour mesurer des sections efficaces neutroniques applicables à un possible développement du nucléaire comme source d'énergie », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI ; pp.9-12, 2002.

[3] **EurObservER,** « Seventh inventory of world wide electricity production from renewable energy sources » 2005.

[4] **Olivier GERGAUD** « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur», Obtenir le grade de Docteur de l'Université de Cachan, France 2002.

[5] **B. DENDIB** « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des application photovoltaïque : étude comparative », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbes, Sétif, 2007.

[6] **Vincent BENAMARA** « ÉTUDE ET SIMULATION D'UN PANNEAU SOLAIRE RACCORDÉ AU RÉSEAU AVEC PÉRIPHÉRIQUE DE STOCKAGE », Mémoire d'Ingénieur, Ecole De Technologie Supérieure Université Du Québec, Septembre 2012

[7] **S. NAOUAL** « Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.

[8] **W.BENSACI** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master en génie électrique, université KASDI MERBAH, 2011.

[9] **S. OUDJOUADJ** « Etude de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque base sur l'intelligence artificielle », mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2015.

[10] **F.Z.ZERHOUNI,**« Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.

[11] **B. FLECHE, D. DELAGNES**, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.

[12] **Mr. FEKROUN** « POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT) D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE PAR UN CONTROLEUR FLOU TYPE 2 T2FLC». Mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2017

[13] https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques

[14] **LAREF Soumia** , Commande d'un Hacheur Solaire Photovoltaïque par des Techniques d'intelligence Artificielle, mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2017.

[15] **Dr. BELAID LALOUNI Sofia** « Cours Energie Solaire Photovoltaïque » Université A.MIRA de BEJAIA Faculté de Technologie Année universitaire 2014/2015.

[16] http://www.techniques-ingenieur.fr. « la production d'énergie électrique par sources renouvelables », [Page consultée le 15 Avril 2012].

[17**]. M. Cosan, H. Mao**, D. Boroyevich, and F. C. Lee, "Space vector modulation of three-level voltage source inverter", VPEC Seminar, pp. 123–128, September 1996.

[18] **Mr. Abderrahmene ACHOURI**« Modélisation et Simulation d'un système (PV - éolien) hybride à L'aide des techniques de L'intelligence artificielle » Commande Électrique et Électronique Industrielle, Université Yahia Fares Médéa année universitaire 2014-2015.

[19] **F.Z.ZERHOUNI**, « Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.

[20] http://www.okwind.fr/index.php/produits/eoliennes

[21] **G.CUNTY,** « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.

[22] **A. I. BRATCU,** « Modélisation À Evènements Discrets D'Un Système Éolien À Vitesse Variable En Vue De La Commande Supervisée » 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, 3 au 5 Avril 2006, Rabat, Maroc, 2006.

[23] **T.BURTON**, "Wind energy handbook», Copyright 2001 by John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.

[24] **Mr. FELLAH Boumediene**, Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID de TLEMCEN FACULTE DE SCIENCES**,** Octobre 2012.

[25] **J .L. Gary,** « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov. 2001.

[26] **L.LECLERCO,** « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Lille, n° d'ordre : 3563, UFRR IEEEA, Décembre 2004.

[27] **N. KASBADJI MERZOUK,** « Evaluation Du Gisement Energétique Eolien Contribution à La Détermination Du Profil Vertical De La Vitesse Du Vent En Algérie », Thèse de Doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 2006.

[28] **H. 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 des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

[29] **C. NAÏM** « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » magister, université mentouri – constantine, 07/ 06 / 2010.

[30] **H.Aissaoui** « Etude et simulation de l'écoulement de puissance optimal en présence des générateurs éoliens » université yahia fares medéa, juin 2018.

[31] **BOUNACEUR**. « Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie ».université kasdi-merbah ouargla 2015

[32] **A. KAABECHE**, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R. BENHADDADI, « Optimisation d"un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.

[33] **B. BOURGESM**, « Improuvement in Solar Declinaison Computation », Solar Energy, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985.

[34] **Le Gallou F**, B. Bouchon-Meunier (Coordonnateurs) : "Systémique - Théorie et Applications". Éditions Tec & Doc, Paris, 1994, 341pages.)

[35] **MESKINE Ilyes Chouaib**. Optimisation d'un système hybride PV/éolien/micro hydraulique/diésel par Homer Université Dr. Yahia Farés De MEDEA 2016 .

[36] **BRIHMAT Fouzia**« L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV /Eolien » Magister En Electrotechnique l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012.

[37] **N. Abouchabana,** « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[38] **M. Moulay-Amar et M. Loghouini,** «Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[39] **S. M. Ait-Cheikh,** «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[40] **S. Issaadi,** « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[41] **M.ADOUANE** étude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électriques, mémoire de magistère, école national polytechnique.alger,algerie.2008.

[42] **Michel Pinard,** "Convertisseurs et électronique de puissance commande, description, mise en oeuvre", Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p.118. 2002.

[43] **Muhammad H.Rachid** "Power Electronics, circuits, devices, and applications", Prentice Hall, Englewood CM s , New Jersey 1993.

[44] **K-Taniguchiand Klrie** "Trapezoidd modulatingsignai for tree-phase ML1 inverter D". IEEE Transistors on industrial Electronics, Vol. IE3, N"2, pp 193-200. 1986.

[45] **F.MOUZAOUI** « Commande d'un système photovoltaïque connecté à un réseau de distribution par les techniques de l'intelligence artificiel » Master en Réseaux et commandes électriques, UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA, JUIN 2018.

[46] **M. Saeedifard and A.R. Bakhshai,** 'Vector Classification and Voltage Control in PWM Threelevel Inverters', Power Electronics Specialists Conference'04, N°35, Aachen, Germany, pp. 4411 – 4417, 20-25 June, 2004.

[47] **Lei Hu, Hongyan Wang, Yan Deng and Xiangning He**, 'A Simple SVPWM Algorithm for Multilevel Inverters', Power Electronics Specialists Conference'04, N°35, Aachen, Germany, pp. 3476 – 3480, 20-25 June, 2004.

[48] **Minh Huynh Quang** « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé » THESE Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne Spécialité automatique.

[49] **C. Canudas,** Commande des moteurs asynchrones : Modélisation Contrôle vectoriel et DTC . Vol. 1, Hermès Science publications, Paris, 2000. J.

[50] **Z. Lubosny,** Wind turbine operation in electric power systems» Berlin, Germany: Springer, 2003.

[51] International journal of control and electrical engineering (CCEE) conférence international des energies renouvelable Sousse Tunisia 2013 ISSN 2356-5608

[52] **F.Hamidia** « Contribution à la Neuro-flou de machine électrique » Thèse doctorat de L'ENP.2013

[53] **F.hamidia** « cour technique intelligence artificielle» université yahia fares médéa département génie électrique.

[54] **S.ISSADI** «Commande d'une poursuite du point de puissance maximum MPPT par réseaux de neurones » Magister en Electricité solaire, université Bejaia.2006.

[55] **C.Touzet**, «les réseaux de neurones artificiel introduction et connexionnisme » ,livre PDF 1992.

[56] **A.Betache, Y. Achour**,« application de la technique du mode glissant pour la poursuite du point maximale MPPT d'un générateur photovoltaïque », master en automatique des systèmes, université Médéa.2014.

[57] **T. Kohonen**, « self organization and associative memory», springer series in information sciences, Vol.8, springer-verlag, 1984; and second edition, 1987.

[58] **I. Bendaas**, « contribution à la commande hybride par mode glissant floue appliquée à un moteur à induction. apport des techniques de l'intelligence artificielle », thèse doctorat en sciences ,2016.

L'annexe A : Datasheet Sun power SPR-305-WHT-U (305W) Solar Panel

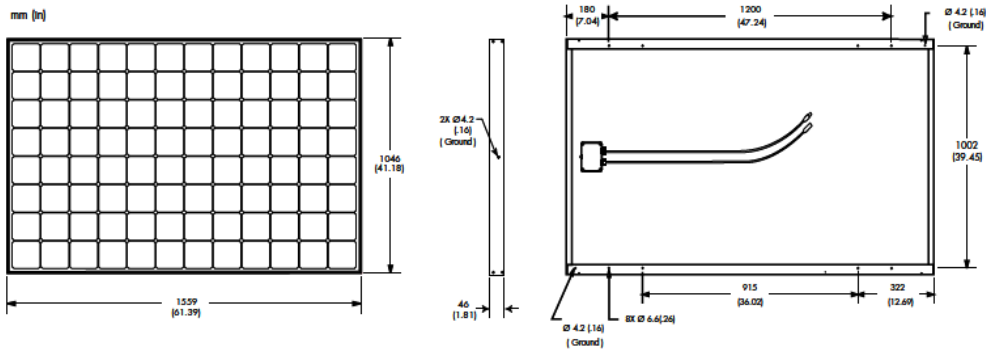
Electrical Data		
Measured at Standard Test Conditions (STC): irradiance of 1000/m², air mass 1.5 g, and cell temperature 25° C		
Peak Power (+/-5%)	Pmax	305 W
Rated Voltage	Vmp	54.7 V
Rated Current	Imp	5.58 A
Open Circuit Voltage	Voc	64.2 V
Short Circuit Current	Isc	5.96 A
Maximum System Voltage	IEC, UL	1000 V, 600 V
Temperature Coefficients		
	Power	–0.38% / °C
	Voltage (Voc)	–176.6 mV/°C
	Current (Isc)	3.5 mA/°C
Series Fuse Rating		15 A
Peak Power per Unit Area		187 W/m², 17.4 W/ft²
CEC PTC Rating		282.1 W

Mechanical Data	
Solar Cells	96 SunPower all-back contact monocrystalline
Front Glass	4.0 mm (5/32 in) tempered
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes
Output Cables	900 mm length cables / Multi-Contact connectors
Frame	Clear anodized aluminum alloy type 6063
Weight	24 kg, 53 lbs

Tested Operating Conditions	
Temperature	–40° C to +85° C (–40° F to +185° F)
Max load	50 psf (2400 Pascals) front and back
Impact Resistance	Hail – 25mm (1 in) at 23 m/s (52 mph)

Warranty and Certifications	
Warranty	25 year limited power warranty
	10 year limited product warranty
Certifications	IEC 61215 , Safety tested IEC 61730; UL listed (UL 1703), Class C Fire Rating

Dimensions


mm (in)
1046
(41.18)
1559
(61.39)
2X Ø4.2
(.16)
(Ground)
46
(1.81)
180
(7.04)
1200
(47.24)
Ø 4.2 (.16)
(Ground)
1002
(39.45)
915
(36.02)
322
(12.69)
Ø 4.2 (.16)
(Ground)
8X Ø 6.6(.26)

L'annexe B: Les paramétres du éolien

Parameter of Wind Turbine

Nominal Mechanical Output Power	8.5kW
Base Wind Speed	12m/s
Radius of wind Turbine	1.001m
Air Density, ρ	1.225kg/m^3
Pitch Angle, β	0°

Paramètres du GSAP utilisé

Paramètres	***Valeurs***
Résistance de phase du stator	*0.085* Ω
Inductances	*0.00095 H*
Flux créé par aimants	*0.192 V.s*
Constante de tension	*139.2998* $V_{peak-ligne}/krpm$
Constante de couple	*1.152* $N.m/A_{peak}$
Inertie	*0.008* $J\ kg.m^2$
Coefficient de frottement	*0.001147 F(N.m.s)*
Nombre de paire de pôles	*4*

L'annexe C : Simulation du système hybride (pv-éolien)

