الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

**Département de l'électrotechnique**

# Mémoire de Fin d'Études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme**
**de Master en** électrotechnique

*Option* : Réseaux et commandes électriques

## THEME

# Commande d'un système photovoltaïque connecté à un réseau de distribution par les techniques de l'intelligence artificiel.

**Proposé et dirigé par**

ABBADI Amel

HAMIDIA Fathia

**Préparé et présenté par,**

MOUZAOUI Faiza

YOUS Imene

# *Remerciement*

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir donné la force et le courage.*

*A la suite Nous tenons à remercier vivement* ***Mme. ABBADI AMEL*** *notre promotrice qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour*

*l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, pour nous avoir fait*

*l'honneur de présider le jury de cette mémoire.*

*Nos vifs remerciements aussi*

*Tous deux maîtres assistants à l'université*

*De Médéa, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.*

*Et tous les professeurs de département de Génie électrique*

***(Ms. MORSLI, Mme HAMIDIA et Ms KCHIDA)***

*A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de*

*ce travail.*

*Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et de loin*

*ont contribué à la réalisation de cette mémoire*

*Et à toute la promotion de l'éléctrothecnique*

***2018.***

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents, que nulle dédicace ne peut*

*exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience*

*Illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en*

*Témoignage de mon profond amour et respect*

*Pour leurs grands sacrifices.*

*Mon marié : Nabil et ma belle-mére,*

*Pour leur* grand *amour*

*Et leur soutien qu'ils trouvent ici*

*L'expression de ma haute gratitude.*

*Mes chers amies qui sans leur encouragement ce travail*

*N"aura jamais vu le jour.*

*Et à toutes les familles MOUZAOUI et ALLOUCHE*

*A l'étudiante de notre groupe de travail : Imene*

*et à tous ceux qui nous aimons.*

*Faiza*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pour voir le jour là et pour ces précieux conseils ainsi pour ses recommandation.*

*A mes très chérs frères : Hamza ,Youcef , Mustapha et Hichem*

*A toute ma famille YOUS, grand et petit sans exception.*

*A ma binome Faiza*

*A touts mes amis.*

*Merci pour les moments grandioses passés et a venir.*

*Imene*

**الملخص :** في عصر التنمية المستدامة ،أظهرت التكنولوجيا الكهروضوئية إمكاناتها الكبيرة كمصدر للطاقة المتجددة. تركز هذه المذكرة على تحسين أداء وكفاءة النظام الكهروضوئي من خلال استخدام خوارزمية مناسبة للتحكم في واجهة الطاقة.

الهدف الرئيسي هو العثور على خوارزمية أو قانون تحكم فعال لاستخراج الطاقة القصوى المتاحة من مولد كهروضوئي مع تقليل التشويش على الشبكة, باستخدام خوارزمية الكلاسيكية (زيادة التوصيل) وخوارزمية الذكاء الاصطناعي ( المنطق الضبابي ، والشبكة العصبية الاصطناعية والشبكة العصبية المركبة بالمنطق الضبابي) .

**الكلمات المفتاحية :**النظام الكهروضوئي-MPPT -الذكاء الاصطناعي -خوارزمية زيادة التوصيل- المنطقي الضبابي - الشبكة العصبية الاصطناعية -الشبكة العصبية المركبة بالمنطق الضبابي.

**Résumé :** À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Ce mémoire est centré sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque à travers l'utilisation d'un algorithme approprié pour la commande de l'interface de puissance.

L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV) avec une minimisation des harmoniques sur le réseau, en utilisant un algorithme classique (IncCond) et des algorithmes d'intelligence artificielle (la logique floue, réseau de neurone artificiel et réseau de neuro-floue).

**Mots clés:** Système PV - MPPT - l'intelligence artificielle - incrément de conductance - logique floue – réseau de neurone artificiel –réseau de neuro flou.

**Abstract:** In the era of sustainable development, photovoltaic technology has shown its significant potential as a source of renewable energy. This work focuses on improving the performance and efficiency of a photovoltaic system through the use of an appropriate algorithm for controlling the power interface.

The main objective is to find an efficient and optimal algorithm or control law allowing to extract the maximum available power from the photovoltaic generator (GPV) with a minimization of harmonics on the network, using a classical algorithm (IncCond) and artificial intelligence algorithm (fuzzy logic, artificial neural network and neuro-fuzzy network.

**Keywords** :PV system, MPPT, Modeling, Simulation, artificial intelligence, disturbance & observation and conductance increment-fuzzy logic control -artificial neural network.

# TABLES DES MATIERES

Introduction générale……..1

**Chapitre I: généralité sur l'énergie solaire**

I.1. Introduction .....3

I.2.Système photovoltaïque .....3

I.2.1. Définition .....3

I.2.2. Principe de fonctionnement.....3

I.3. Cellule photovoltaïque .....5

I.3.1. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) .....6

I.3.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....6

I.3.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque .....8

I.3.3.1.Courant de court-circuit (Icc).....8

I.3.3.2.Tension de circuit-ouvert (Vco) .....8

I.3.3.3. Rendement énergétique.....9

I.3.3.4. Facteur de forme .....9

I.4. Générateur photovoltaïque et ses performances .....9

I.4.1. Caractéristique Courant-Tension .....10

I.4.2. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V) .....11

I.4.3. Influence de l'association série des cellules PV .....12

I.4.4.Influence de l'association parallèle des cellules PV .....13

I .4.5. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV.....14

I.5. Panneau photovoltaïque .....14

I.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV ..... 15
I.6.1. Avantages ..... 15
I.6.2. Inconvénients ..... 15
I.7. Conclusion ..... 16

**Chapitre II : les convertisseurs DC-DC et DC-AC**

II.1. Introduction ..... 18
II.2 .Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) ..... 18
II.2.1. Modélisation du convertisseur survolteur ..... 18
II.2.1.1. Modèle mathématique équivalent ..... 19
II.2.1.2. Modèle approximé du convertisseur Boost ..... 20
II.2.1.3.Étude en régime continu ..... 23
II.2.2. Modélisation du convertisseur dévolteur (Buck) ..... 24
II.2.3. Modélisation du convertisseur Buck-Boost ..... 27
II.3.Les convertisseurs DC-AC (onduleurs) ..... 28
II.3.1.Introduction ..... 28
II.3.2.Modèle de l'onduleur a trois niveaux ..... 29
II.3.3.La commande de l'onduleur ..... 30
II.3.3.1.Principe de génération de la PWM ..... 30
II.3.3.2.Etude d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI ..... 30
II.4 Conclusion ..... 32

**Chapitre III: technique de commande de poursuite d'un système PV**

III.1.Introduction : ..... 33

III.2.Les techniques MPPT:.....34
III.2.1.Algorithme d'incrémentation de l'inductance :.....34
III.2.2.La logique floue :.....36
III.2.2.1. Définition :.....36
III.2.2.2. Les fonctions d'appartenance :.....36
III.2.2.3. Structure générale d'un régulateur par logique floue :.....38
III.2.2.4.Les avantages et les inconvénients :.....39
III.3. Réseau de neurone :.....39
III.3.1.Historique :.....39
III.3.2. Le neurone biologie :.....40
III.3.2.1. Le corps cellulaire :.....40
III.3.2.2. Les dendrites :.....40
III.3.2.3. L'axone :.....40
III.3.3. Le neurone artificiel :.....41
III.3.4. Les composants d'un réseau de neurone :.....42
III.3.5. Les différentes structures des réseaux de neurones :.....42
III.3.5.1. Réseau de neurones multicouches :.....42
III.3.5.2. Réseau à connexions locales :.....43
III.3.5.3. Réseau à connexions récurrentes :.....44
III.3.5.4. Réseau à connexions complètes :.....44
III.3.6. Les fonctions d'activations :.....44
III.3.7. Les techniques d'apprentissage :.....45
III.3.7.1. Apprentissage supervisé :.....45
III.3.7.2. Apprentissage non supervisé :.....45
III.3.8. Les avantages et les inconvénients :.....46
III.3.8.1. Les Avantage :.....46
III.3.8.2. Inconvénients :.....46

III.4.Les systèmes Neuro-flous: ..... 46
III.4.1.Méthodes des combinaisons Neuro-floues : ..... 47
III.4.2. Modèles Neuro-flous hybrides : ..... 48
III.4.2.1. Le système Neuro-flou hybride de type Mamdani : ..... 48
III.4.2.2. Le système Neuro-flou hybride de type Takagi-Sugeno : ..... 48
III.4.3. Les avantages des systèmes Neuro-flous : ..... 50
III.4.3.1. La rapidité de calcul : ..... 50
III.4.3.2. La flexibilité : ..... 50
III.4.3.3. Généralisation des connaissances : ..... 50
III.4.4. Les types d'implémentation des réseaux Neuro-flous : ..... 51
III.4.5. NEFCLASS (Neuro-fuzzy classification) : ..... 51
III.4.6. NEFCON (Neuro-Fuzzy Controller) : ..... 51
III.4.7. NEFPROX (Neuro Fuzzy function approximator) : ..... 52
III.4.8.ANFIS (adaptative-network-based fuzzy inference system): ..... 53
III.5.Conclusion : ..... 54

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

IV.1. Introduction : ..... 55
IV.2. Description de système : ..... 55
IV.2.1.Les régulateurs du VSC : ..... 56
IV.2.2.Régulateur MPPT : ..... 60
IV.3. Simulation : ..... 62
IV.3.1. Simulation de système avec IncCond : ..... 63
IV.3.2.Simulation de système avec la logique floue : ..... 67
IV.3.3.Simulation de système avec le réseau de neurone : ..... 70
IV.3.4.Simulation du système avec le réseau de neuro-floue : ..... 74

IV.4. Etude comparative de la puissance entre les quatre contrôleurs : ..... 78

IV.5.Conclusion :..... 83

Conclusion générale..... 84

# LISTE DES FIGURES

Chapitre I : système photovoltaïque

Figure(I.1) :Schéma électrique de principe de fonctionnement photovoltaïque. .....4
Figure (I.2) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire. .....4
Figure(I.3): Structure basique d'une cellule solaire. .....5
Figure (I.4) : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque. .....7
Figure (I.5) : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque.....10
Figure (I.6) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*.....11
Figure (I.7) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique *P=f(V)*.....11
Figure (I.8) : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).....12
Figure (I.9) : L'influence de la température sur la caractéristique *P=f(V)*.....12
Figure (1.10) : Association de N modules solaires en série. .....13
Figure (I.11) : Association de $N_p$ modules solaires en parallèle. .....13
Figure (I.12) : Association mixte $N_s$ x $N_p$ modules solaires.....14
Figure (I.13) : Panneau photovoltaïque. .....15

Chapitre II: les convertisseurs DC-DC et DC-AC

Figure(II.1) : Schéma électrique du convertisseur boost. .....19
Figure( II.2) : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert. .....19
Figure(II.2.1) : Schémas équivalents du hacheur survolteur, pour K est fermé. .....19
Figure(II.2.2) : Schémas équivalents du hacheur survolteur, pour K est ouvert. .....20
Figure (II.3) : Allure des variables dynamiques. .....21
Figure(II.4): Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur. .....24
Figure(II.5): Circuit électrique de base du hacheur dévolteur. .....25
Figure (II.6) : Caractéristique de la tension et des courants. .....26
Figure(II.7) : Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck . .....27
Figure(II.8) : Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur. .....27
Figure(II.9): Caractéristique de la tension et du courant du buck-boost. .....28

Figure(II.10) : la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à.....29
Figure(II.11):Diagramme vectoriel de l'onduleur. .....29
Figure(II.12) : Etapes de la MLI vectoriel.....31

Chapitre III: MPPT avec IncCond et les intelligences artificielles

Figure (III.1) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.....33
Figure (III.2) : Organigramme de la méthode d'incrémentation de l'inductance . .....35
Figure (III.3) : Formes usuelles des fonctions d'appartenance . .....37
Figure( III.4) : Structure générale d'un régulateur par logique floue.....38
Figure (III.5) : Le modèle d'un neurone biologique.....41
Figure (III.6) : Neurone Artificiel. .....41
Figure(III.7) : Réseau de neurones multicouches.....43
Figure (III.8):Réseau à connexions locales. .....43
Figure(III.9) : Réseau à connexions récurrentes.....44
Figure(III.10):Réseau à connexions complètes. .....44
Figure (III.11):Quelque fonction d'activations. .....45
Figure (III.12) : principe de Neuro flou.....47
Figure (III.13) : Le système Neuro-flou de Mamdani.....48
Figure( III.14) : Le système Neuro-flou de Takagi-Sugeno.....49
Figure (III.15): Architecture de NEFCLASS. .....51
Figure( III.16) : Architecture de NEFCON. .....52
Figure (III.17) : Architecture de NEFPROX.....53
Figure(III.18): Architecture de l'ANFIS. .....53

ChapitreIV: Résultats de simulation et discussions

Figure(IV.1) : La structure du modèle .....55
Figure(IV.2) : La structure du VSC.....56
Figure(IV.3) :la structure de regulateur VDC. .....57
Figure(IV.4) : Fonction d'appartenance des variables d'entrée. .....57
Figure(IV.5) : Fonction d'appartenance de la variable de sortie.....57
Figure(IV.6) :la structure de régulateur Id-Iq.....58
Figure(IV.7) : Fonction d'appartenance des variables d'entrée. .....58

Figure(IV.8) : Fonction d'appartenance de la variable de sortie. ..... 59
Figure(IV.9) :la structure de régulateur MPPT. ..... 60
Figure(IV.10) : Fonction d'appartenance des variables d'entrées. ..... 60
Figure(IV.11) : Fonction d'appartenance des variables de sortie ..... 61
Figure (IV.12) : La variation de l'irradiation et la température. ..... 63
Figure (IV.13) : La tension PV, le courant PV puissance PV. ..... 64
Figure(IV.14) : Le rapport cyclique D. ..... 64
Figure (IV.15) : Les Tensions Vabc. ..... 65
Figure(IV.16) : Les courants Iabc. ..... 65
Figure (IV.17): La tension Va et le courant Ia. ..... 66
Figure (IV.18) : La puissance Pa. ..... 66
Figure (IV.19) : Les harmoniques de courant Ia. ..... 66
Figure (IV.20) : La tension PV, le courant PV puissance PV. ..... 67
Figure (IV.21) : Le rapport cyclique D. ..... 68
Figure (IV.22) : Les tensions Vabc. ..... 68
Figure (IV.23) : Les courants Iabc. ..... 69
Figure (IV.24) : La tension Va et le courant Ia. ..... 69
Figure (IV.25) : La puissance Pa. ..... 70
Figure (IV.26) : Les harmoniques de courant Ia. ..... 70
Figure (IV.27) : La tension PV, le courant PV puissance PV. ..... 71
Figure (IV.28) : Le rapport cyclique ..... 72
Figure (IV.29) : Les tensions Vabc. ..... 72
Figure (IV.30) : Les courants Iabc. ..... 73
Figure (IV.31) : La tension Va et le courant Ia. ..... 73
Figure (IV.32) : La puissance Pa. ..... 74
Figure (IV.33) : Les harmoniques de courant Ia. ..... 74
Figure (IV.34) : La tension PV, le courant PV puissance PV. ..... 75
Figure (IV.35) : Le rapport cyclique ..... 76
Figure (IV.36) : Les tensions Vabc. ..... 76
Figure (IV.37) : Les courants Iabc. ..... 77
Figure (IV.38) : La tension Va et le courant Ia. ..... 77
Figure (IV.39) : La puissance Pa. ..... 78
Figure (IV.40) : Les harmoniques de courant Ia ..... 78
Figure (IV.41) : variation de la puissance des quatre régulateurs. ..... 79

Figure (IV.42): Zoom1.a……79
Figure (IV.43): Zoom1.b. ..... 79
Figure (IV.44): Zoom2……80
Figure (IV.45): Zoom3. ..... 80
Figure (IV.46): Zoom4.a. ..... 81
Figure (IV.47): Zoom4.b. ..... 81
Figure (IV.48): Zoom5. ..... 81

# LISTE DES TABLEAUX

**Chapitre IV: Résultats de simulation et discussions**

Tableau (IV.1) : la table des règles pour la commande logique floue. ..... 58
Tableau(IV.2) : la table des règles pour la commande logique floue. ..... 59
Tableau(IV.3) : la table des caractéristiques des régulateurs VDC et IdIq ..... 59
Tableau(IV.4) : la table des caractéristiques des régulateurs VDC et IdIq ..... 60
Tableau (IV.5) : la table des règles pour la commande logique floue. ..... 61
Tableau(IV.6) : la table des caractéristiques de régulateur MPPT ..... 61
Tableau(IV.7) : la table des caractéristiques du régulateur MPPT ..... 62
Tableau (IV.8) : les puissances de panneau dans certains intervalles. ..... 83

# LISTE DES SYMBOLES

**D:**variable de sortie.

**$E_{eq}$ :** Tension équivalent**.**

**E :** l'erreur.

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

**FF :** Facteur de forme.

**$I_{sat}$ :** 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).

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

**$N_s$ :** Nombre de modules dans le panneau en séri.

**$N_p$ :** Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

**n :** le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<2).

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

**$R_{shu}$ :** 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 .

**$R_{ch}$ :** resistance de charge **.**

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

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

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

**$V_{opt}$ :** Tension optimale (V).

**V :**tension de MPPT.

**η :** Rendement énergétique .

**ΔE :** changement d'erreur.

# ABREVIATION UTILISEE

**AC:** Courant Alternatif (Alternative Current).

**DC:** Courant Continu (Direct Current).

**GPV:** Générateur Photovoltaïque.

**MPPT:** Maximum Power Point Tracking.

**MOSFET :** transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

**VSC :**voltage source converter.

# *Introduction générale*

# Introduction générale

Dans plusieurs pays en développement avec une importante population rurale et des tarifs d´électrification importante , la plupart des installations communautaires dédiées à la santé et à l´éducation n´ont pas accès à l´électricité. Pour les installations localisées dans les régions éloignées en dehors du réseau national d´électricité, le système d´énergie solaire photovoltaïque (PV) peut offrir le moyen le plus pratique et le moins coûteux pour avoir accès à l'électricité.

Le système d´énergie solaire photovoltaïque utilise une ressource solaire prévisible et à des prix compétitifs de ceux des générateurs à diesel ou à toutes autres sources alternatives. Par exemple, dans les écoles et les centres de santé des communautés rurales à l´extérieur du réseau électrique national, le système d´énergie solaire photovoltaïque est souvent le moyen le plus approprié pour faire fonctionner les équipements et les appareils électriques .Le système d´énergie solaire photovoltaïque peut être la technologie la moins chère pour fournir le service de l´électricité.

Un système PV sera donc constitué du générateur photovoltaïque, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- un convertisseur DC/AC
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Le but de notre travail consiste la comparaison de la méthode classique et la méthode de l'intelligence artificiel.

Dans ce cadre, le présent travail décrit une étude détaillée du système d´énergie solaire photovoltaïque relié à un réseau de distribution.

Notre travail est structuré en quatre chapitres, dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

Dans le premier chapitre on a abordé une étude générale sur l'énergie solaire, Egalement on a donné un aperçu général sur la cellule photovoltaïque, le Générateur photovoltaïque et ses performances.

Le deuxième chapitre se penche sur :

- Les convertisseurs DC-DC
- Les convertisseurs DC-AC

Nous avons aborde dans le troisième chapitre les techniques de la MPPT avec IncCond et les intelligences artificielles.

Une application et une simulation de la technique de l'intelligence artificiel enrichie par des interprétations des résultats obtenus est entamée au chapitre quatre.

# *Chapitre I*

## *Généralité sur l'énergie solaire*

## I.1. Introduction :

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique .Il est constitue principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaire, un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, un ou plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif. Le but de ce chapitre est l'étude des différentes composantes photovoltaïques pour nous permettre la modélisation mathématique de ces composantes afin de pouvoir simuler le système photovoltaïque dans sont ensemble .

## I.2.Système photovoltaïque :

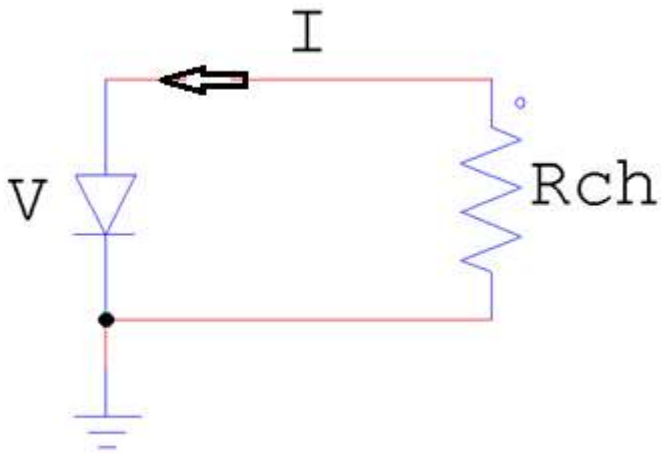
### I.2.1. Définition :

Le terme « photovoltaïque » vient du grec et qui signifie lumière, il est composé de deux parties : « photons » «lumière » et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituants la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [1].

### I.2.2. Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches .On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative N en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libre s positives P. De part et autre du cœur de la cellule ,on a une couche conductrice (k) autrement dit une grille métallique ,puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion .On a donc une couche

qui sert de cathode (pôle+) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle-) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule .Enfin on trouve une couche de verra qui protège la cellule .Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [2].




**Figure( I.1) :**Schéma électrique de principe de fonctionnement photovoltaïque.

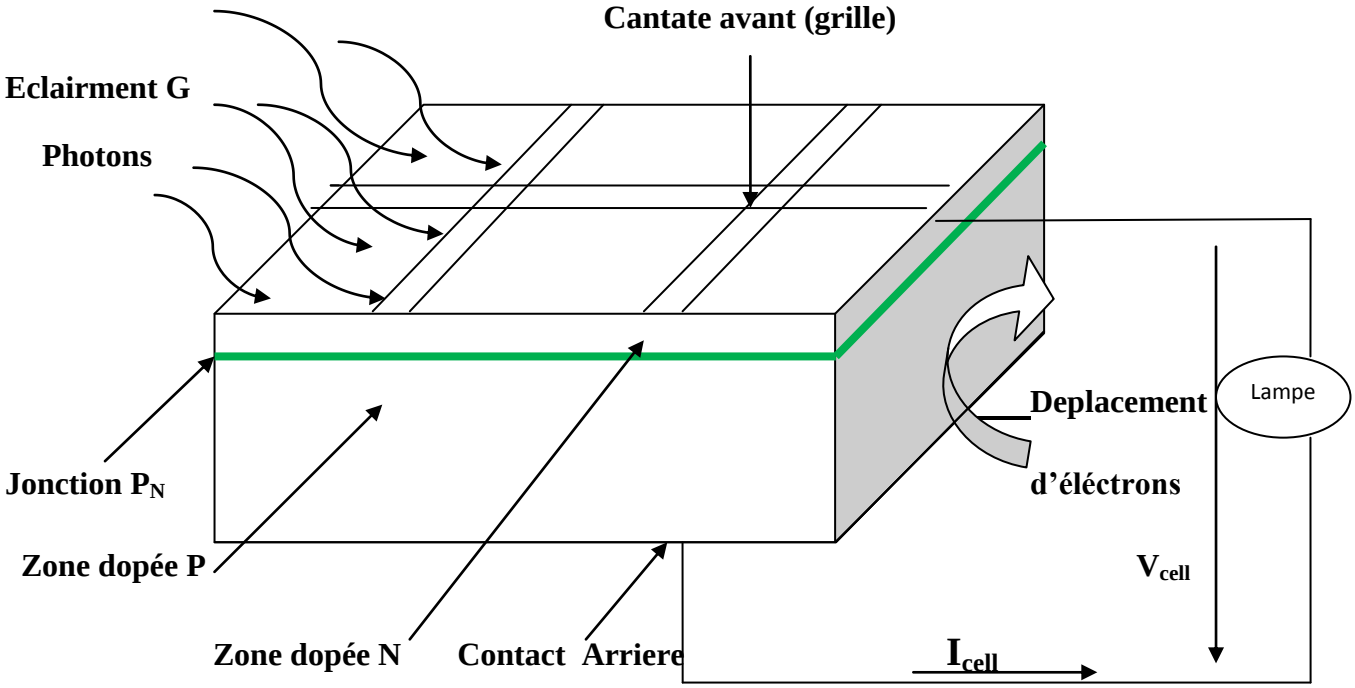
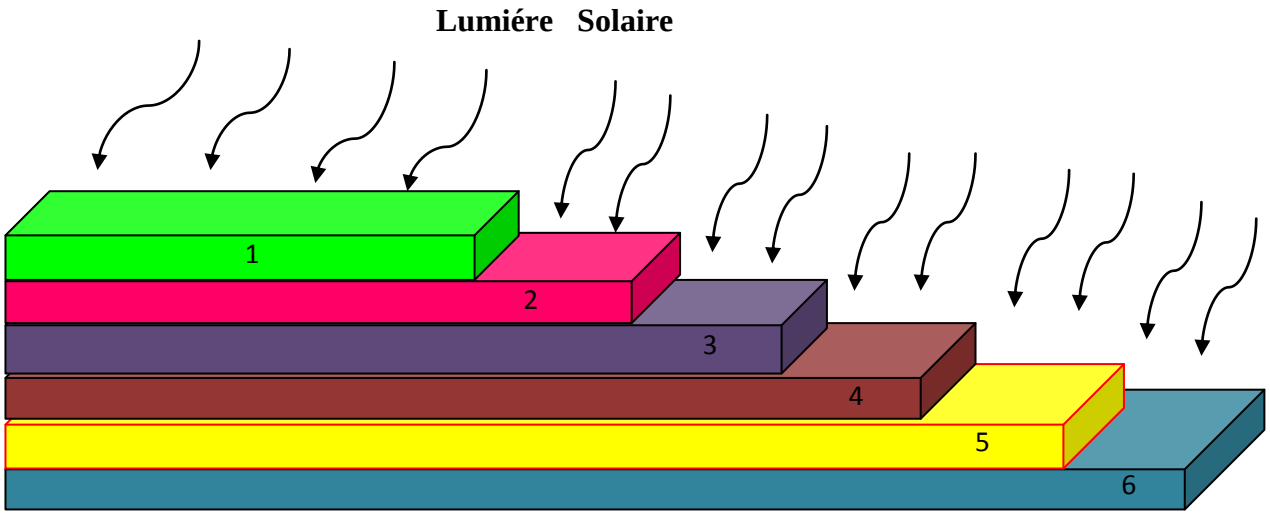



**Figure (I.2) :** Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

## I.3. Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.




1 **Verre**
2 **Revétement anti-reflrts**
3 **Grille conductrice**
4 **Semi-conducteur dopé N**
5 **Semi-conducteur dopé P**
6 **Conducteur**

**Figure(I.3):** Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [3].

### I.3.1. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque 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 [4].

**a. Les cellules monocristallines**

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

**b. Les cellules poly cristallines**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire).

**c. Les cellules amorphes**

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce demie type est le fonctionnent avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

### I.3.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

La figure (I.4) 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 [5]:

• 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

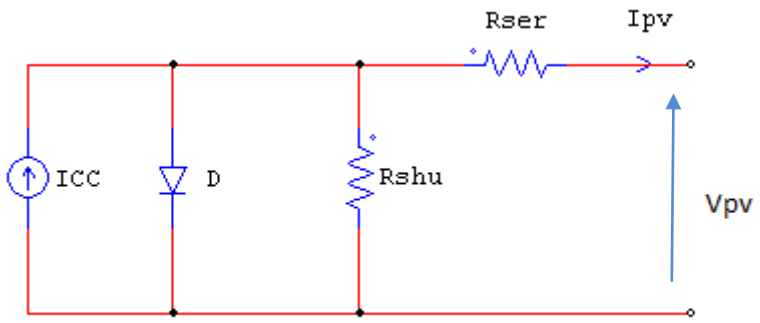



**Figure (I.4) :** Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par[5,6,7].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat}\left[\frac{\left[\exp(V_{pv} + (I_{pv} \times R_{ser}))\right]}{nKT}\right] - \frac{V_{pv} + (I_{PV} \times R_{ser})}{R_{shu}} \qquad \text{(I.1)}$$

$I_{sat}$ : 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<2).

$I_{pv}$ : 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 [7].

### I.3.3. 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:

#### I.3.3.1.Courant de court-circuit (Icc) :

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(I.1), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{nKT}-1\right)\right]-\frac{\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{R_{shu}} \qquad (I.2)$$

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:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1+\frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \qquad (I.3)$$

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

#### I.3.3.2.Tension de circuit-ouvert (Vco) :

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).

$$0 = I_{cc} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{eV_{PV}}{nKT}\right) - 1\right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (I.4)$$

### I.3.3.3. 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 :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.5)$$

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.3.3.4. 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 :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \quad (I.6)$$

## I.4. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil

du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement.

Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [3].

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit $I_{cc}$ ou la tension en circuit ouvert $V_{co}$. Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un $I_{cc}$ et un $V_{co}$ désirés [3].

### I.4.1. Caractéristique Courant-Tension :

La figure (I.5) représente la courbe ***I =f (V)*** d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m$^2$ et une température de 25$^0$C.

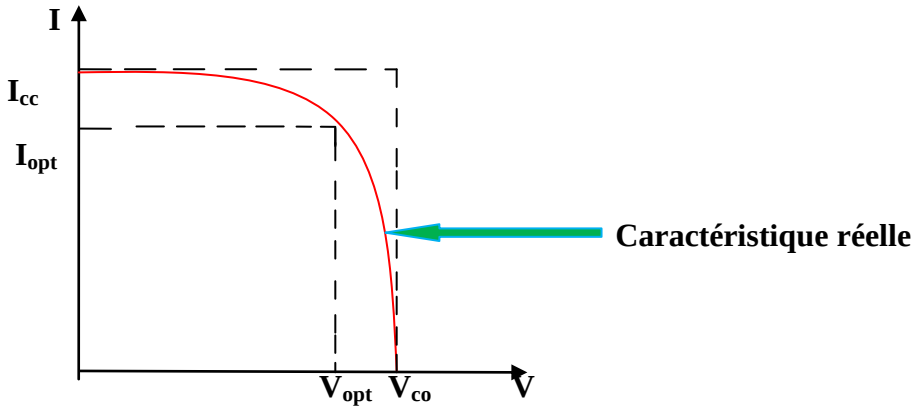



**Figure (I.5) :** Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. par conséquent, le

module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point $P_m$ où la puissance se trouve être maximale. il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point $P_m$ [3].

### I.4.2. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V) :

La figure (I.6) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [4,6,7,8].

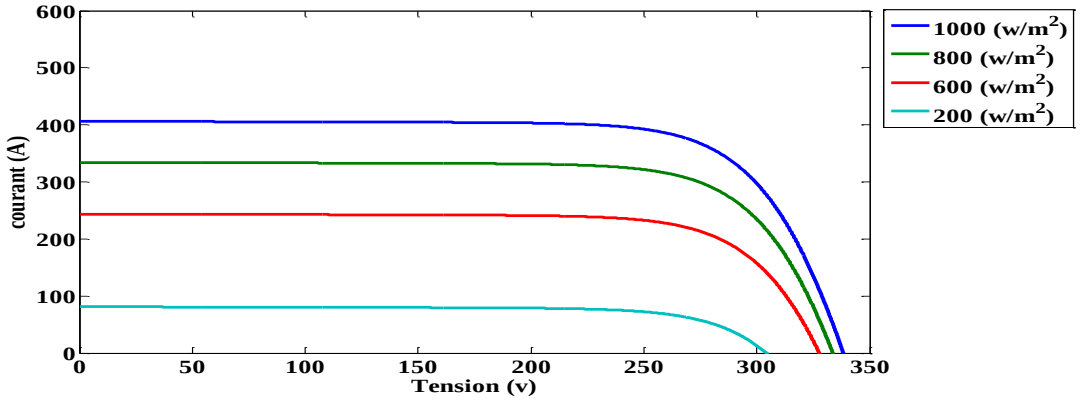



**Figure (I.6) :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*.

La figure (I.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence del'éclairement sur la caractéristique *P(V)* [8].

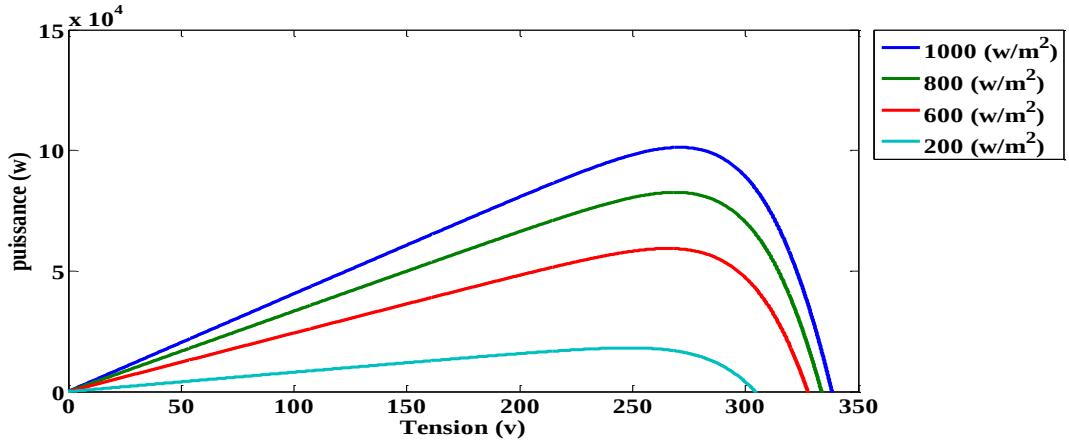



**Figure (I.7) :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique *P=f(V)*.

La figure (I.8) montre l'influence de la température sur la caractéristique *I=f(V)*. il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique *I=f(V)*.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [7].

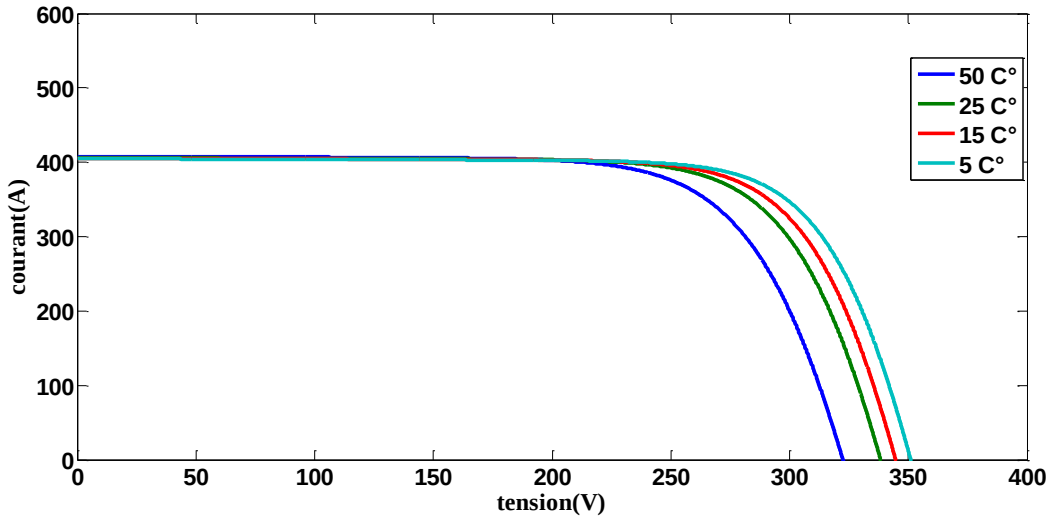



**Figure (I.8) :** L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).

La figure (I.9) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique *P=f(V)* [7].

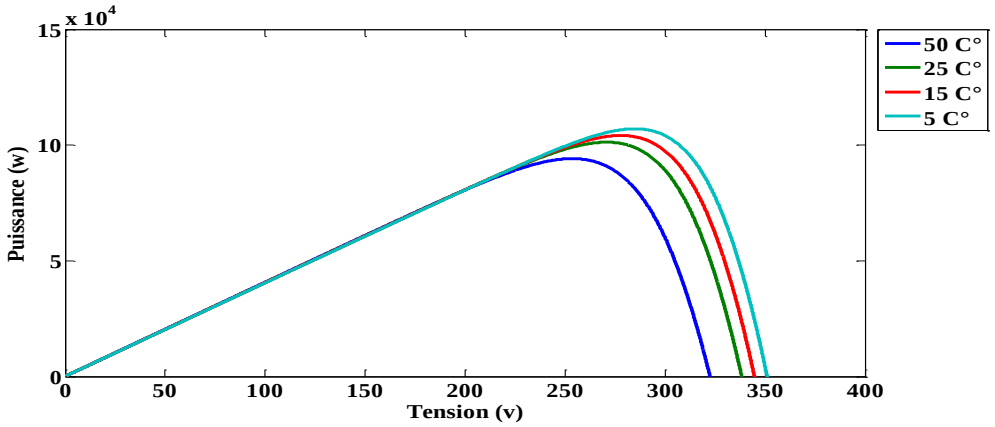



**Figure (I.9) :** L'influence de la température sur la caractéristique *P=f(V)*.

### I.4.3. Influence de l'association série des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt [4].

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 8 cellules en série (type BP MSX 120) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. pour avoir plus de tension, il faut assembler $N_s$ modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre $N_p$ de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [4].

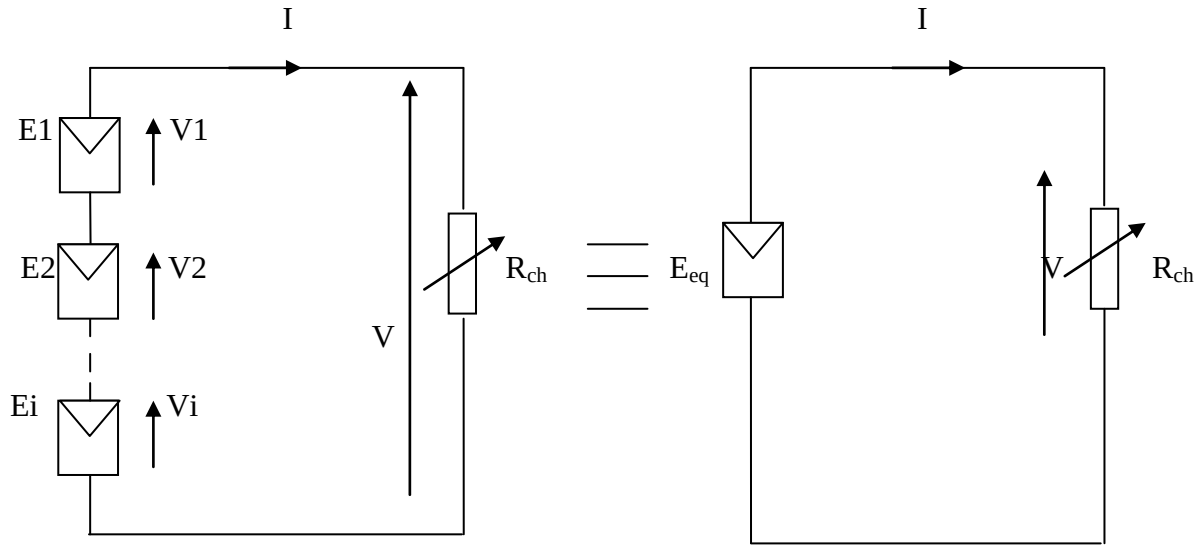



**Figure (1.10) :** Association de N modules solaires en série.

### I.4.4.Influence de l'association parallèle des cellules PV :

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule.

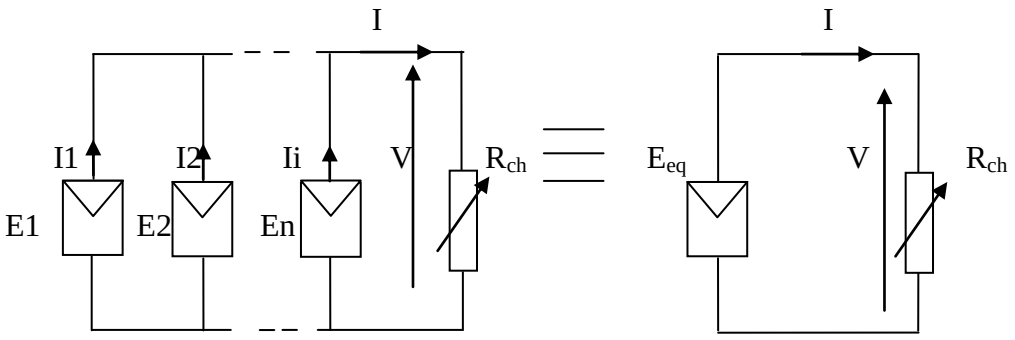



**Figure (I.11) :** Association de $N_p$ modules solaires en parallèle.

### I .4.5. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [9].

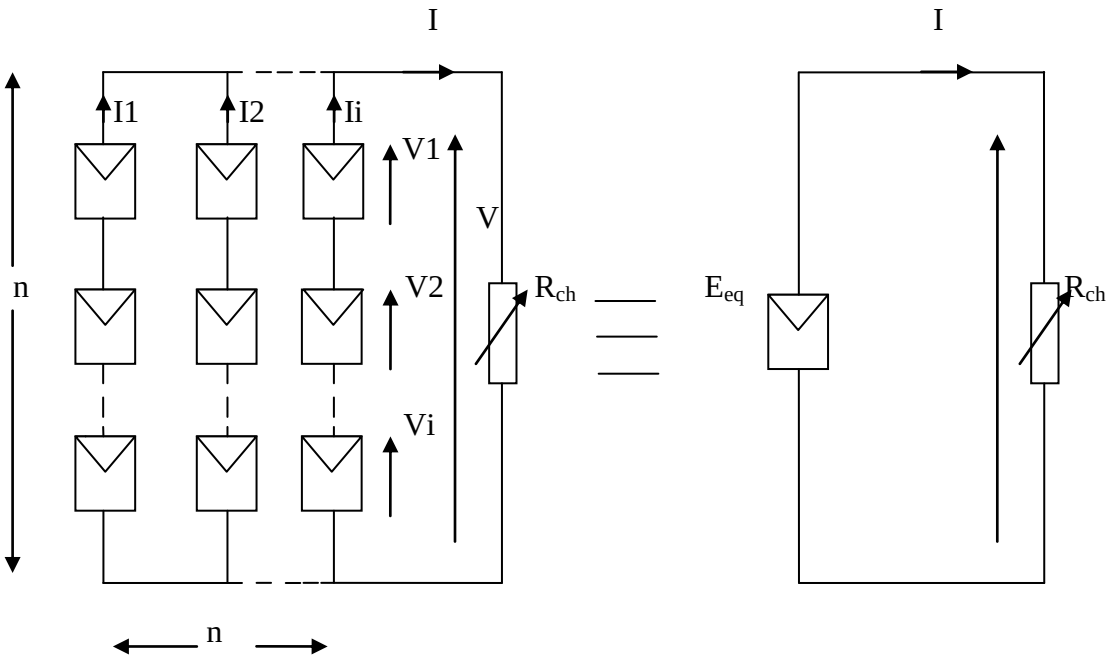



**Figure (I.12) :** Association mixte $N_s$ x $N_p$ modules solaires.

### I.5. Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui perm et de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [10].



**Figure (I.13) :** Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau, on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui les regroupe, alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [10].

## I.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

### I.6.1. Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [11].

**I.6.2. Inconvénients :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %( soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. de même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieur à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [11].

## I.7. Conclusion :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

# *Chapitre II*

Les convertisseurs DC-DC et DC-AC

## II.1. Introduction :

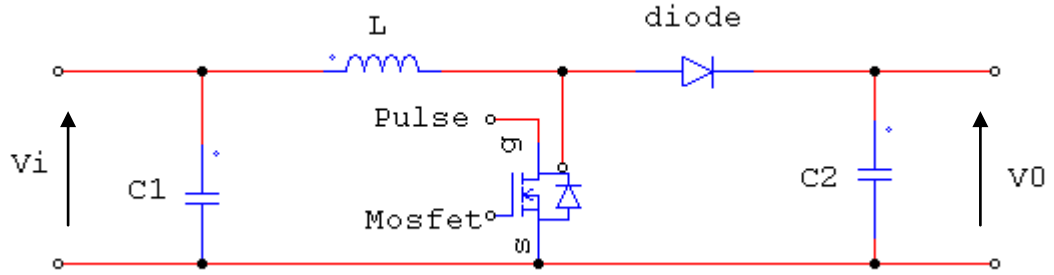
Dans ce chapitre leurs on va discuter les différents types respectives de convertisseurs continu-continu (DC/DC) avec les modèles mathématiques pour les convertisseurs(buck, boost etbuck/boost). Et les convertisseurs DC-AC pour une utilisation facile de la simulation [12][13].

## II.2 .Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

L'énergie solaire est une source d'énergie dont la disponibilité varie considérablement dans la journée. Son utilisation de façon optimale nécessite la prise en compte des types de charges (batteries, lampes, etc.). Dans cette optique, quelques auteurs [14-19] utilisent un convertisseur boost afin de maximiser la production et l'utiliser de façon optimale. L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure conception d'un convertisseur boost capable de rechercher la puissance maximale quelles que soient les variations de l'ensoleillement.

### II.2.1. Modélisation du convertisseur survolteur :

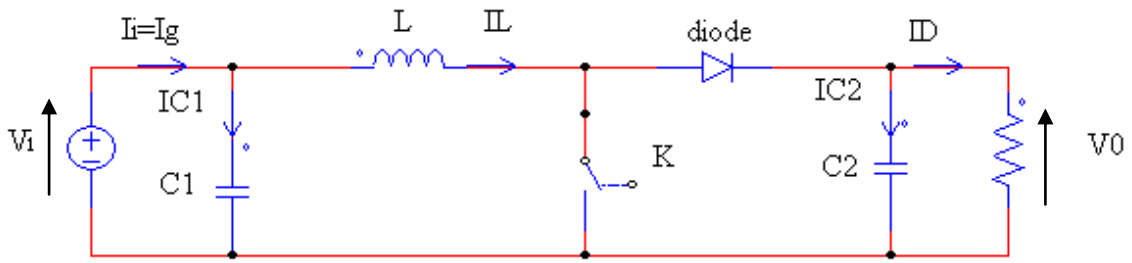
Le hacheur survolteur (Boost), le convertisseur boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension (step-up), est donné par la figure (II.1), il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute, il se compose d'une source de tension d'entrée continue $V_i$, d'une inductance L, d'un interrupteur S, d'une diode, et deux condensateurs Cin et Cout. En premier temps [0, αT] le transistor est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période, le transistor s'ouvre et l'inductance l s'oppose à la diminution du courant I ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode [13].



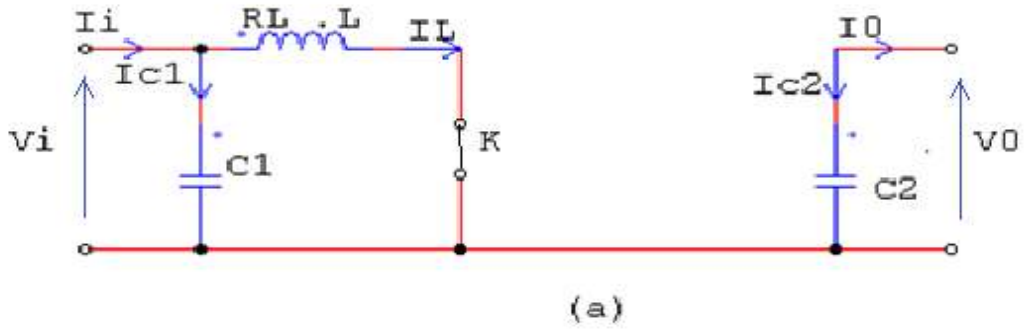

**Figure(II.1) :** Schéma électrique du convertisseur boost.

### II.2.1.1. Modèle mathématique équivalent :

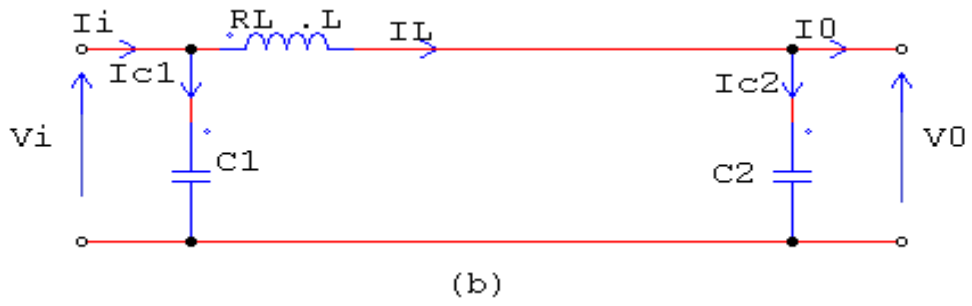
L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur figure(II.2) des deux phases de fonctionnement donne :




**Figure( II.2) :** Schéma équivalent du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert.




**Figure(II.2.1) :** Schéma équivalent du hacheur survolteur, pour K est fermé.




**Figure(II.2.2) :** Schéma équivalent du hacheur survolteur, pour K est ouvert.

Pour la première période αTs :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = -I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = V_i - R_L I_L \end{cases} \qquad \text{(II.1)}$$

Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = V_i - V_0 - R_L I_L \end{cases} \qquad \text{(II.2)}$$

### II.2.1.2. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Le convertisseur oscillant entre αTS et (1-α) TS avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques $C_1$, $V_L$ est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche de exponentielle par un segment ($e^{\varepsilon} \approx 1+\varepsilon$ *si* $\varepsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux laps de temps αTs et (1-α) Ts:

$$< \frac{dx}{dt} > Ts = \frac{dx}{dt_{(\alpha Ts)}} + \alpha Ts + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha)Ts}} (1-\alpha) Ts \qquad \text{(II.3)}$$

Où $<\frac{dx}{dt}>$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période Ts. Cette relation est valide si: $\frac{dx}{dt(\alpha Ts)}$ $et$ $\frac{dx}{dt(1-\alpha)Ts}$ sont constants sur les périodes αTs et (1−α) Ts respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αTs et (1−α) Ts sont très faibles devant la constante de temps du circuit $C_{1RG}$, $C_{2Z}$, $L/RL$ dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure (II.3).

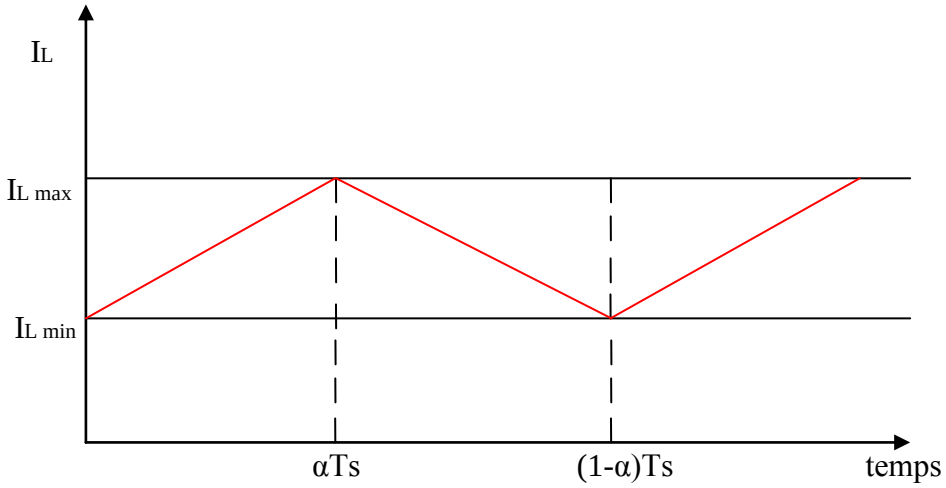



**Figure (II.3) :** Allure des variables dynamiques.

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 :

$$I_{C1} = C1\frac{dV_g}{dt}\alpha T_s = (I_g - I_L)\alpha T_s + (1-\alpha)T_s(I_g - I_L) \quad \text{(II.4)}$$

$$I_{C2} = C_2\frac{dV_0}{dt}\alpha T_s = -\alpha T_s I_0 + (1-\alpha)T_S(I_L - I_0) \quad \text{(II.5)}$$

$$V_L = L\frac{dI_L}{dt}\alpha T_S = (V_g - R_L I_L)\alpha T_S + (1-\alpha)T_s(V_g - V_0 - R_L I_L) \quad \text{(II.6)}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes,(pour qu'on puisse interconnecter le boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur boost.

$$I_L = I_g - C_1\frac{dV_g}{dt} \quad \text{(II.7)}$$

$$I_0 = (1-\alpha)I_L - C_2\frac{dV_0}{dt} \quad \text{(II.8)}$$

$$V_g = (1-\alpha)V_0 + L\frac{dI_L}{dt} + R_L + I_L \quad \text{(II.9)}$$

pour le dimensionnement des différents composants du circuit afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un sur dimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par le transistor MOSFET S, où dans le cas pratique les ondulations du courant $I_L$ sont plus importantes par rapport aux autres ondulations.

En appliquant la relation $V_0+L\frac{dIL}{dt}$ et par l'approximation des segments d'exponentielles par des droites, la pente du courant pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\frac{d_{I_L}}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_S - R_L I_L}{L} \quad \text{(II.10)}$$

a partir de la relation (II.9), la valeur crête à crête du courant $I_L$ est :

$$I_{icc} = 2\Delta I_L = \frac{V_S - R_L I_L}{L}\alpha T_S \quad \text{(II.11)}$$

la valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation $\Delta I_L$ est :

$$L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L} \quad \text{(II.12)}$$

pour le calcul des capacités $C_1$et $C_2$ on a :

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{C1}}{C_1} = \frac{I_0 - I_L}{C_1} \quad \text{(II.13)}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{C2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2} \quad \text{(II.14)}$$

les valeurs des ondulations crête à crête des tensions d'entrées et de sorties sont :

$$V_{C1CC} = 2\Delta V_{C1} = \frac{I_g - I_L}{C_1}\alpha T_s \quad \text{(II.15)}$$

$$V_{C2CC} + 2\Delta V_{C2} = \frac{-I_0}{C_2}\alpha T_s \quad \text{(II.16)}$$

les valeurs des capacités $C_1$ et $C_2$ sont respectivement données par :

$$C_1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{C1}}\alpha T_S \quad \text{(II.17)}$$

$$C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{C2}}\alpha T_S \quad \text{(II.18)}$$

**II.2.1.3.Étude en régime continu :**

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

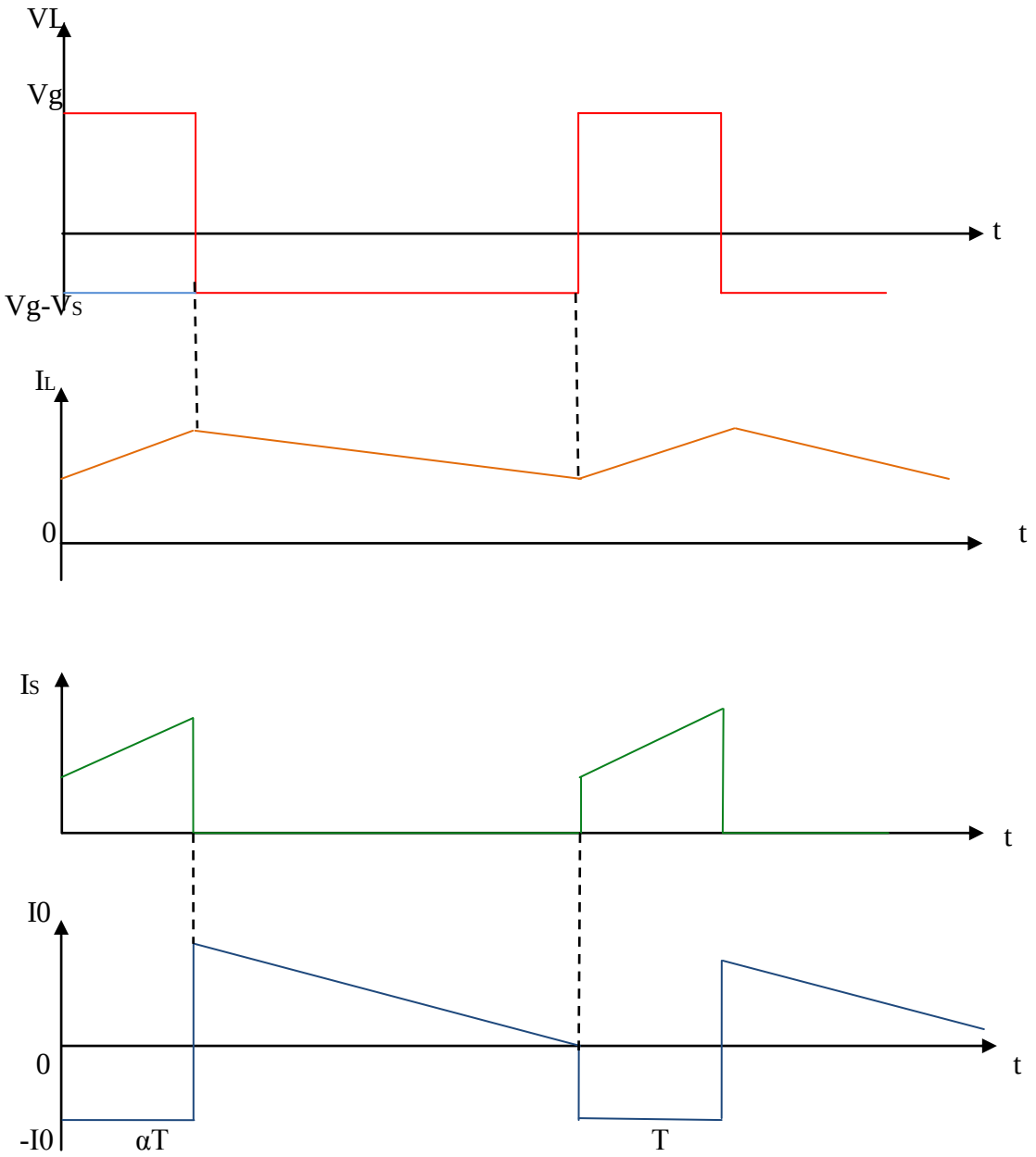
le système d'équations (II.6) (II.7) (II.8) donne :

$$I_L = I_g \quad \text{(II.19)}$$

$$I_0 = (1-\alpha)I_L \quad \text{(II.20)}$$

$$V_g = (1-\alpha)V_0 \quad \text{(II.21)}$$

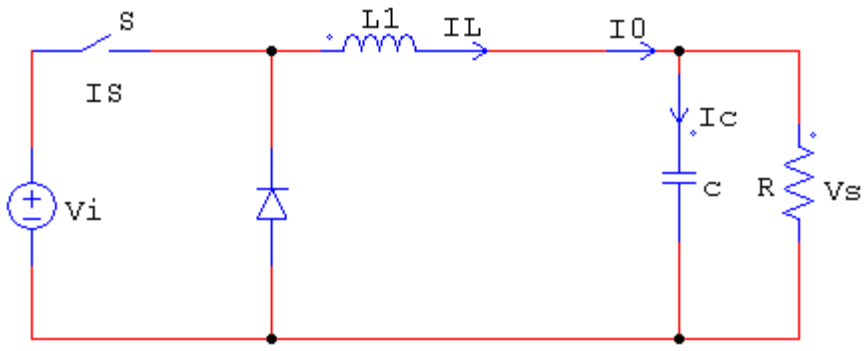
comme le présente la figure (II.3), lorsque l'interrupteur du transistor S est sur la position on, le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode D est bloquée off et lorsque S tourne sur la position off, l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit RC bien que la diode D est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (II.4), comme suit :




**Figure(II.4):** Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.

### II.2.2. Modélisation du convertisseur dévolteur (Buck) :

La figure (II.5) 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.5):** Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Les composantes clés sont l'inductance L, le commutateur transistor S, la diode D et le condensateur C. Celui-ci se charge par le commutateur S et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement. Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i - V_s}{L} \qquad \text{(II.22)}$$

IL: le courant dans l'inductance. Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur S. Dans le premier laps de temps αT le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance L se charge d'énergie avec augmentation du courant. Dans le deuxième laps de temps (α-1) T, l'inductance L libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant. En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i}{L} \qquad \text{(II.23)}$$

lorsque le courant de l'inductance ne se décroit pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure (II.5), et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique α = Ton/T la tension aux bornes de la charge Vs= αVi. Dans le mode de conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre

le transistor S et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge, la figure (II.6) montre comment la tension de charge que varie avec le courant de charge. Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la figure (II.6):

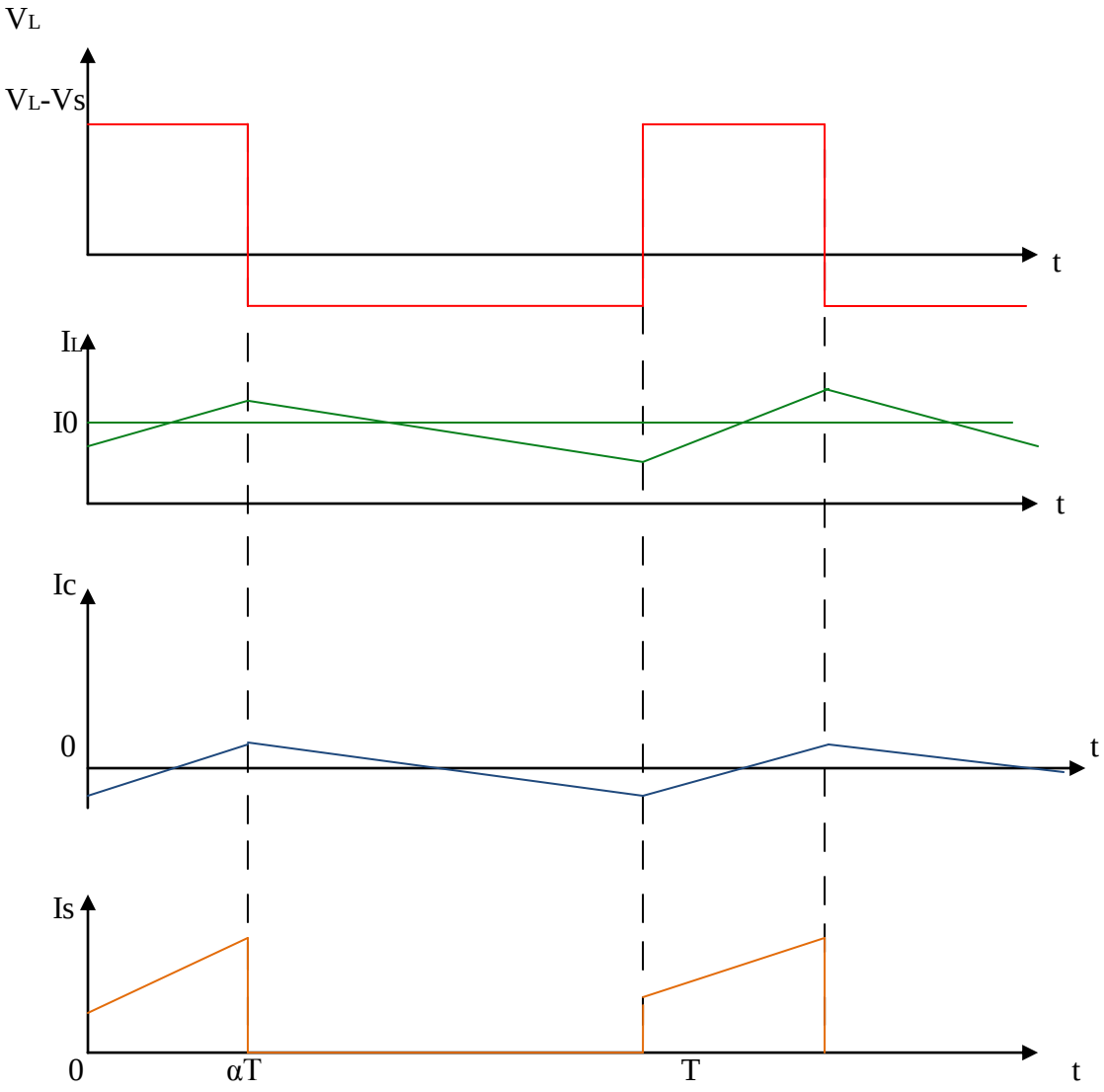
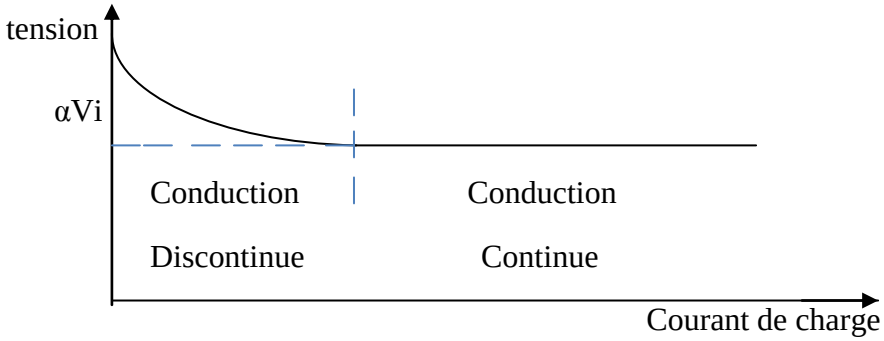


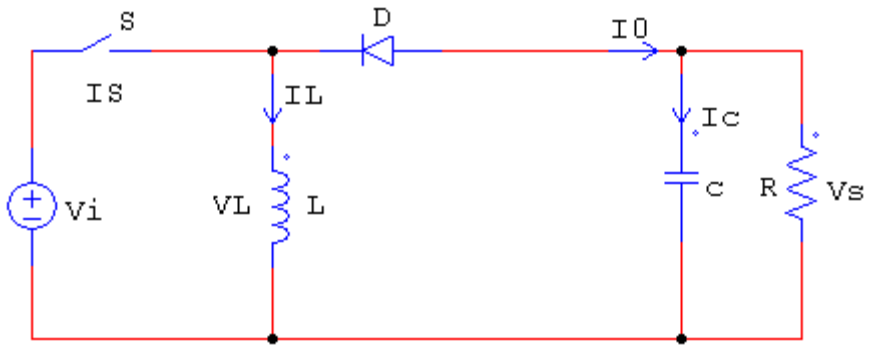

**Figure (II.6) :** Caractéristique de la tension et des courants.




**Figure(II.7) :** Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck [16].

### II.2.3. Modélisation du convertisseur Buck-Boost :

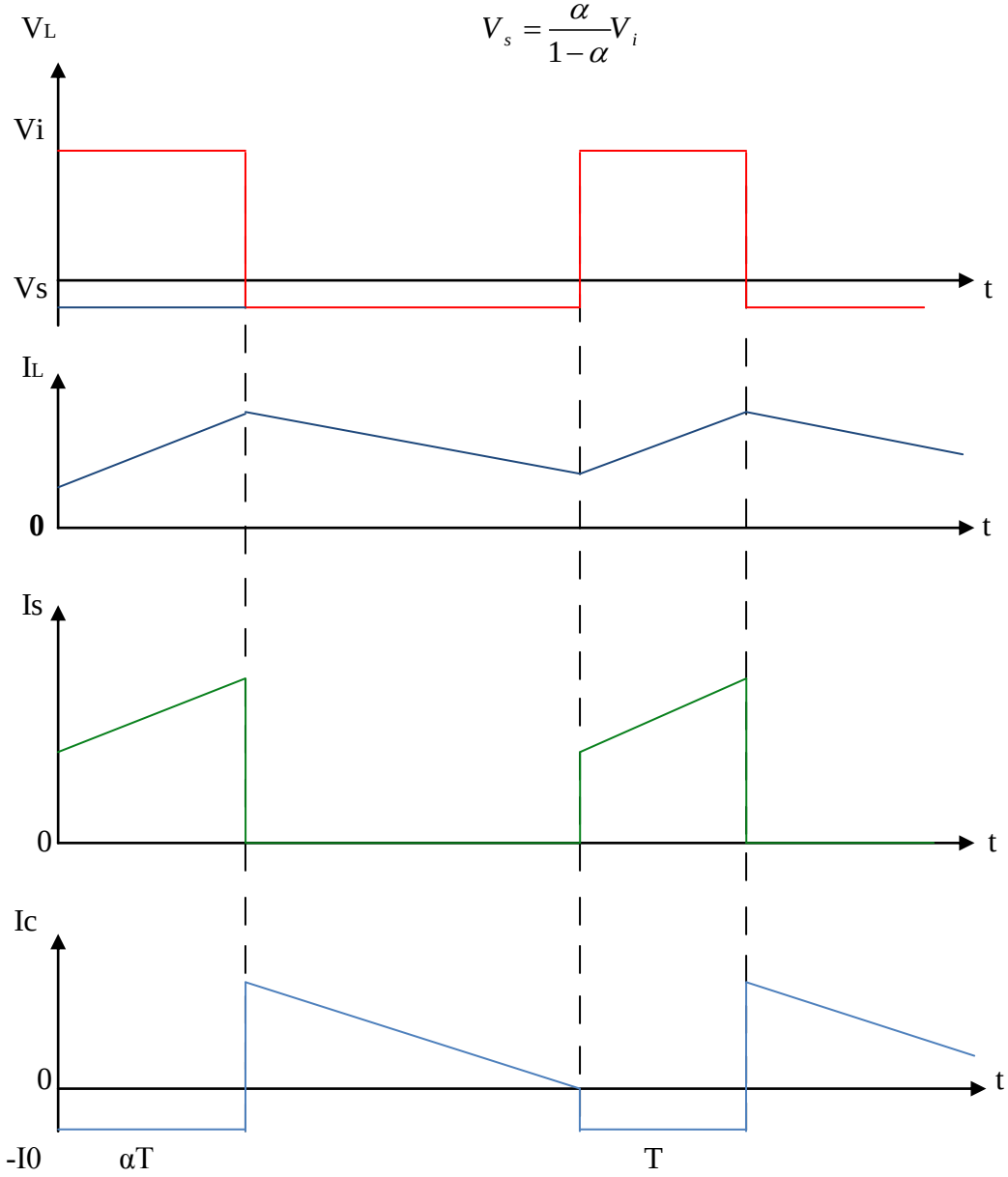
Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.




**Figure(II.8) :** Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

La figure (II.8) montre le schéma de le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge dans ce dispositif. La tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position on le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position off, la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \quad \text{(II.24)}$$




**Figure(II.9):** Caractéristique de la tension et du courant du buck-boost.

## II.3.Les convertisseurs DC-AC (onduleurs) :

### II.3.1.Introduction :

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement command ables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part,

sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions.

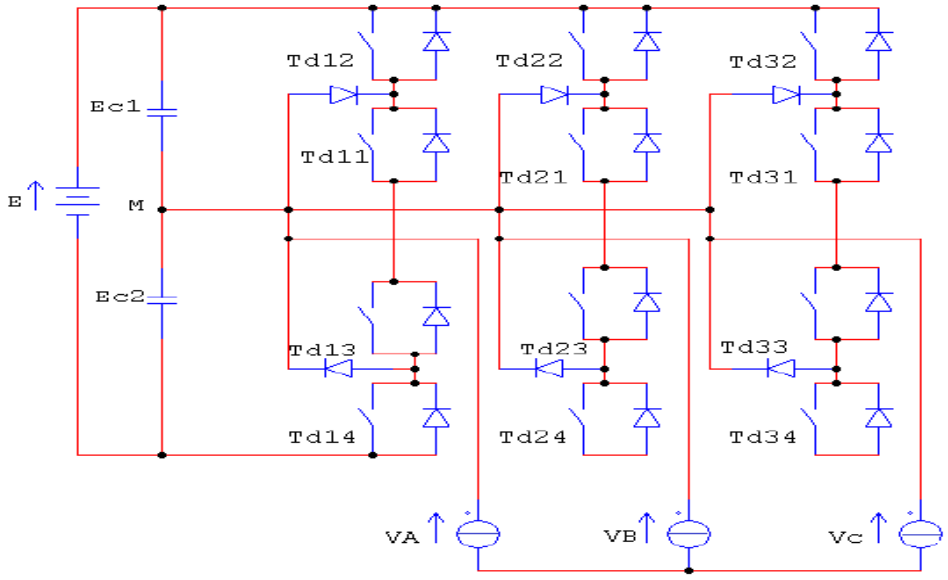
Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est plus adaptée, par rapport à la structure classique, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement inférieur. La tension aux bornes de chaque interrupteur est divisée par deux et la fréquence de hachage est plus basse [20-23].

**II.3.2.Modèle de l'onduleur a trois niveaux :**

La figure (II.10) 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. en mode command able, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \qquad \text{(II.25)}$$

avec K=1,2ou3 représente le numéro de bras.




**Figure(II.10) :** La structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC.

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

$$\begin{cases} F_{K1}^{b} = F_{K1} \times F_{K2} \\ F_{K0}^{b} = F_{K3} \times F_{K4} \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

On désigne par: m1 = le demi-bras du haut et m0 = 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:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^{b} \times U_{c1} - F_{10}^{b} \times U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^{b} \times U_{c1} - F_{20}^{b} \times U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^{b} \times U_{c1} - F_{30}^{b} \times U_{c2} \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

### II.3.3.La commande de l'onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la production d'une tension ou un courant alternatif, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance

#### II.3.3.1.Principe de génération de la PWM :

L'onduleur délivre plusieurs créneaux positifs et négatifs, ce qui permet de diminuer l'importance du filtre et d'avoir un régulateur de tension plus rapide, en modulant les temps relatifs de conduction et de blocage, il est possible de répartir la tension au cours de la période de façon à ce que pratiquement le temps de conduction d'un interrupteur soit proportionnel à la valeur instantanée du fondamental. C'est ce principe qui est appelé modulation de largeur d'impulsion et qui est noté MLI (PWM en anglais).

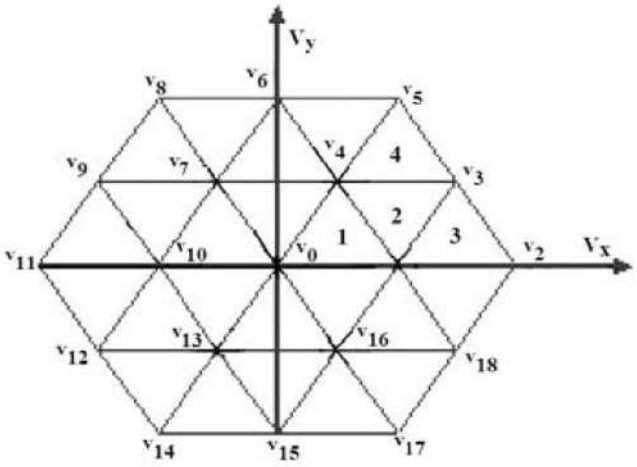
#### II.3.3.2.Etude d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI :

Les tensions simples de sortie s'écrivent:

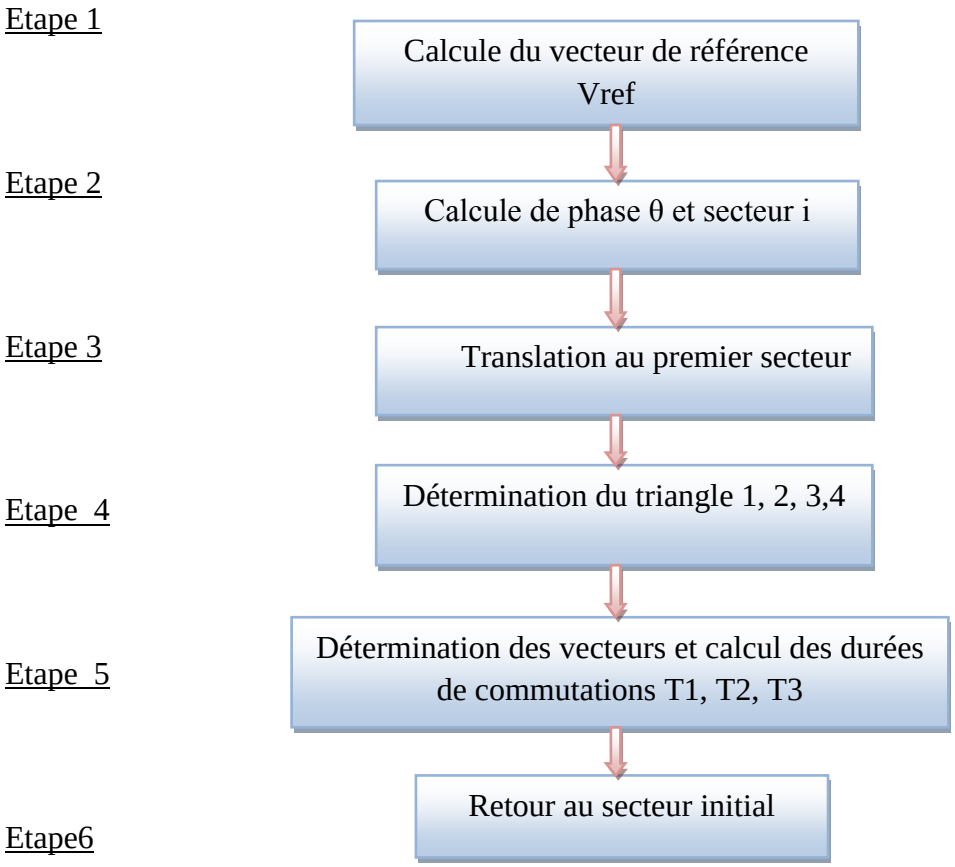
$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{30}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad \text{(II.28)}$$

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.11). 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 1 [24,25].




**Figure(II.11):**Diagramme vectoriel de l'onduleur.




**Figure(II.12) :** Etapes de la MLI vectoriel.

## II.4.Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu quelques topologies de base des convertisseurs continus-continus (DC-DC), (convertisseurs buck, boost et buck/boost), et nous avons présenté le modèle de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC, avec l'organigramme qui résume les six étapes de MLI vectorielle proposée.

# *Chapitre III*

## Technique de commande de poursuite d'un système PV

## III.1.Introduction :

La cellule photovoltaïque a un point de puissance maximale (PPM) qui varie en fonction de l'ensoleillement et de la température. Ceci est obtenu par le biais des commandes MPPT, «Maximum Power Point Tracking » analogiques ou numériques. un nombre important de systèmes de contrôle MPPT ont été élaborées depuis des années, en commençant par des techniques simples comme la tension ou le courant [26].

Actuellement, des commandes MPPT, sont proposées. Dans le cas des commandes MPPT analogiques, se pose le problème de la divergence de l'encombrement des composants électronique utilisés. Dans le cas des commandes MPPT numériques, plusieurs algorithmes ont été utilisés dans la littérature à savoir: la méthode de la conductance incrémentale « IncCond »,les méthodes de l'intelligence artificielles(floue,neuronal,neuro-flou).

La figure (III.1) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module [27].

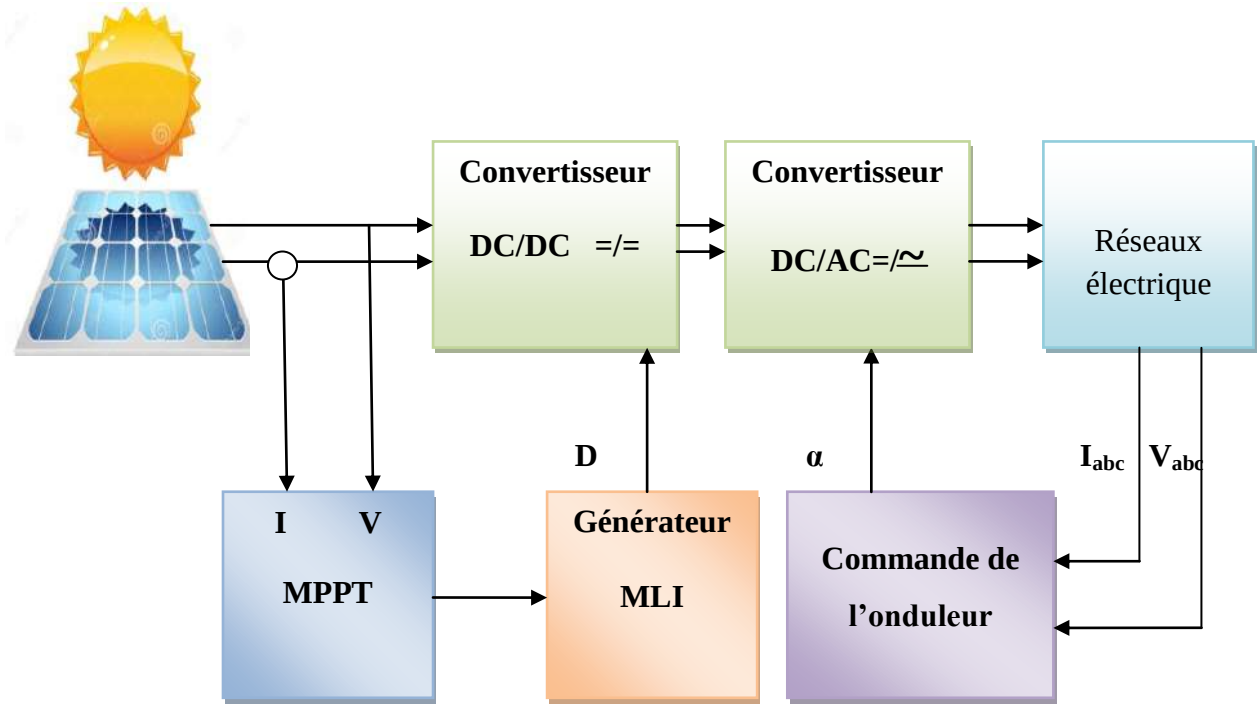



**Figure (III.1) :** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque *PV*.

la puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant *I* et de tension *V* du module et la multiplication de ces deux grandeurs

$$P_{PV} = I_{PV} \times V_{PV} \qquad \text{(III.1)}$$

**III.2.Les techniques MPPT:**

**III.2.1.Algorithme d'incrémentation de l'inductance :**

Le principe de la méthode de conductivité incrémentale (IncCond) est basé sur la propriété de MPP: la dérivée de la puissance est nulle. donc, la méthode InCond utilise une méthode itérative où l'algorithme est basé sur l'évolution de la dérivée de la conductance G. où la conductance est le rapport *I / V*.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{avec} \quad P = V \times I \qquad \text{(III.2)}$$

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \frac{dV}{dV} = 0 \qquad \text{(III.3)}$$

Don $$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0 \longrightarrow dG + G = 0 \qquad \text{(III.4)}$$

P :puissance de MPPT.

V :tension de MPPT.

I :courant de MPPT.

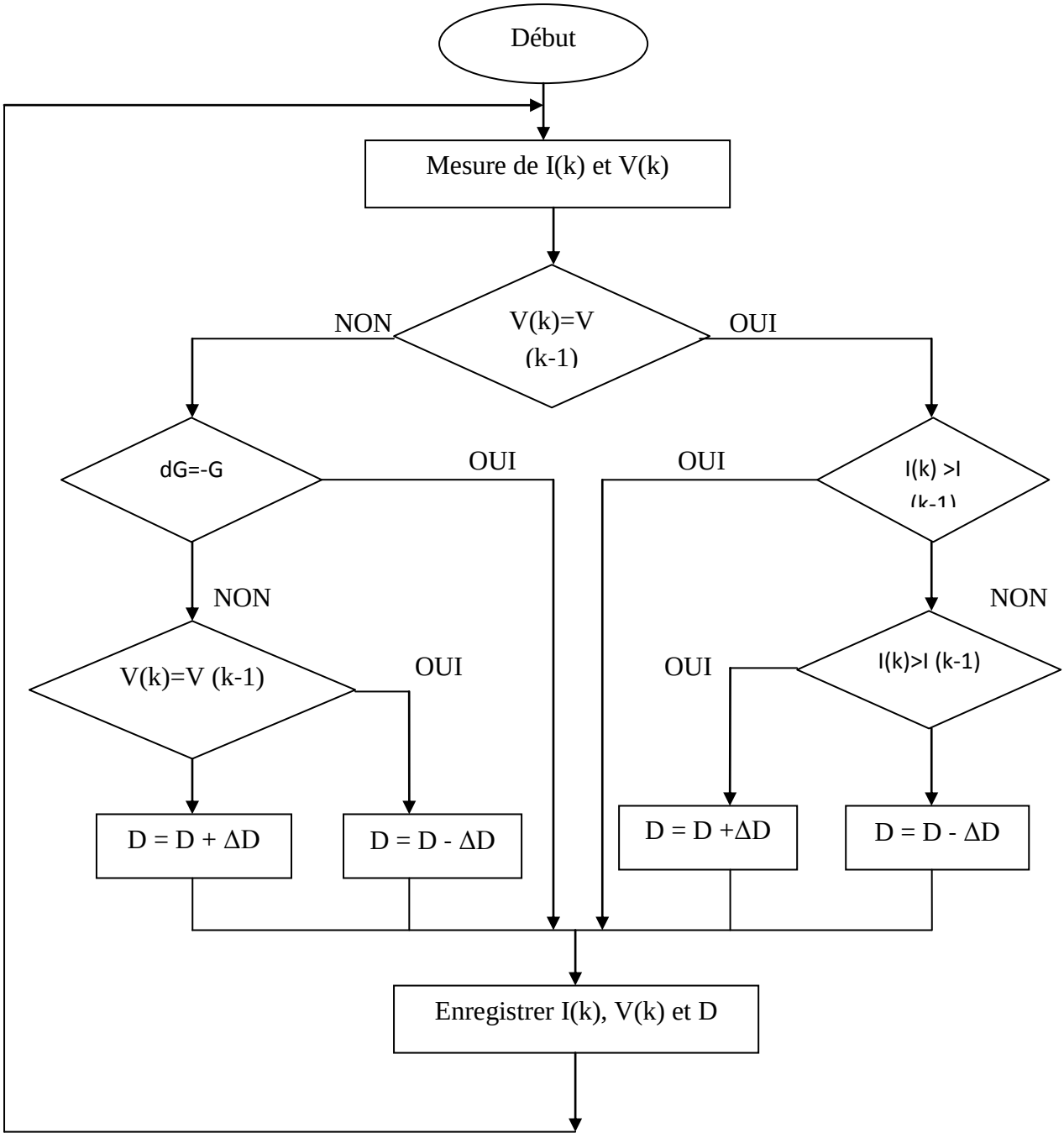



**Figure (III.2) :** Organigramme de la méthode d'incrémentation de l'inductance [28].

### III.2.2.La logique floue :

#### III.2.2.1. 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 [29].

#### III.2.2.2. 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}.

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

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

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

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

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

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

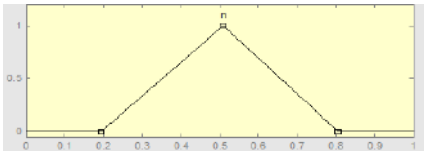
$$\mu(x) = \left(\frac{1}{1+\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2}\right) \quad \text{(III.8)}$$

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

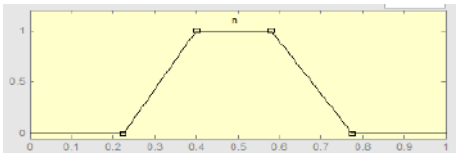
$$\mu(x) = \frac{1}{2}\left(1+\cos\frac{\pi(x-x_0)a}{2a}, x_0 - a \le x \le x_0 + 2a\right) \quad \text{(III.9)}$$

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

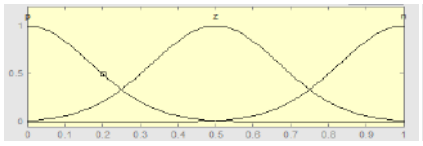
$$\mu(x) = \frac{1}{1+\exp\left(a\left(x-c\right)\right)} \quad \text{(III.10)}$$



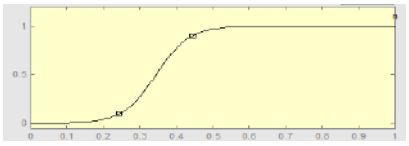
-Fonction triangulaire



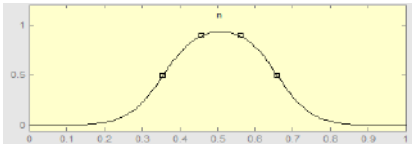
-Fonction trapézoïdale



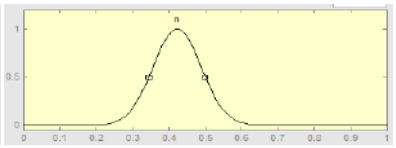
-Fonction gaussienne



- Fonction sigmoïdale



-Fonction trigonométrique



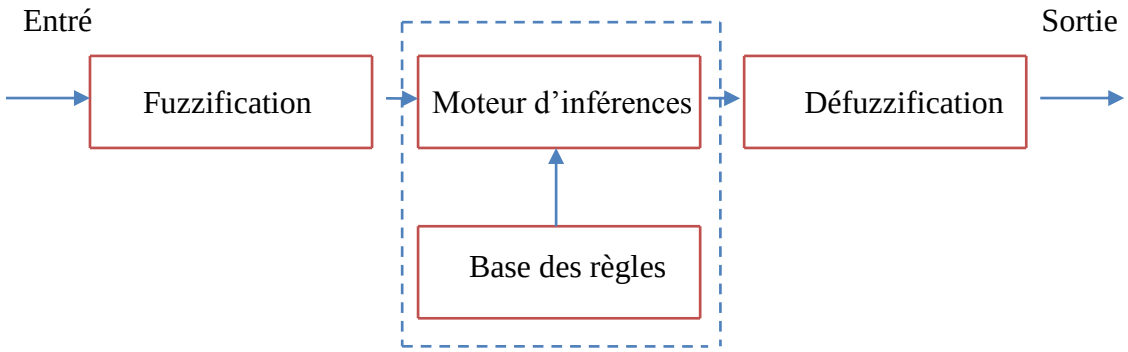
-Fonction en forme de cloche

**Figure (III.3) :** Formes usuelles des fonctions d'appartenance [30].

### III.2.2.3. 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.4) :** Structure générale d'un régulateur par logique floue.

- **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 de la variable floue de sortie [31].

### III.2.2.4.Les avantages et les inconvénients :

#### A. 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.

#### B.Les 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 [30].

### III.3. Réseau de neurone :

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

### 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.

### 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 [32].

**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.

**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.

**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 [32].

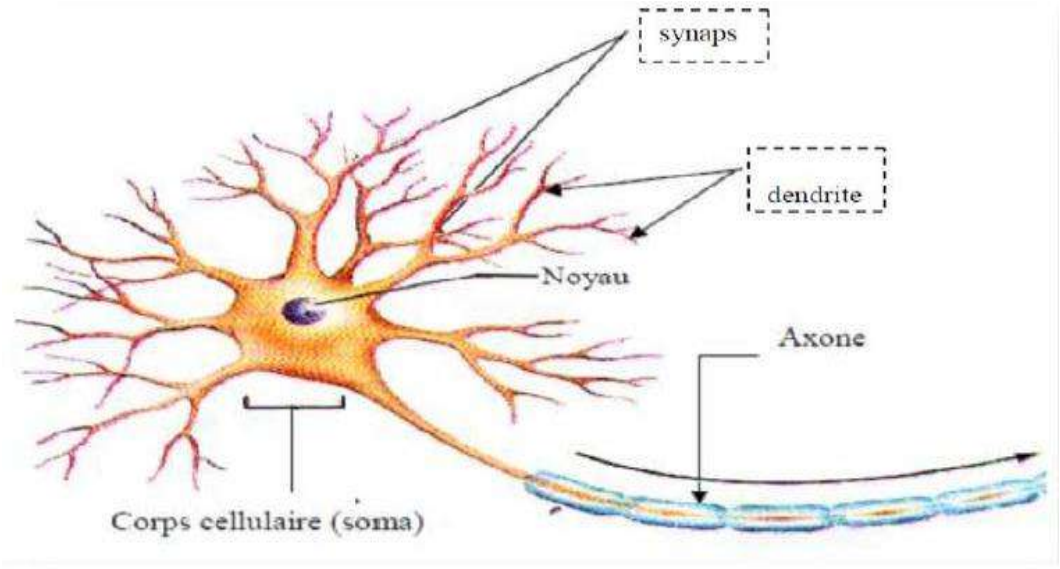



**Figure (III.5) :** Le modèle d'un neurone biologique.

### 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 [33].

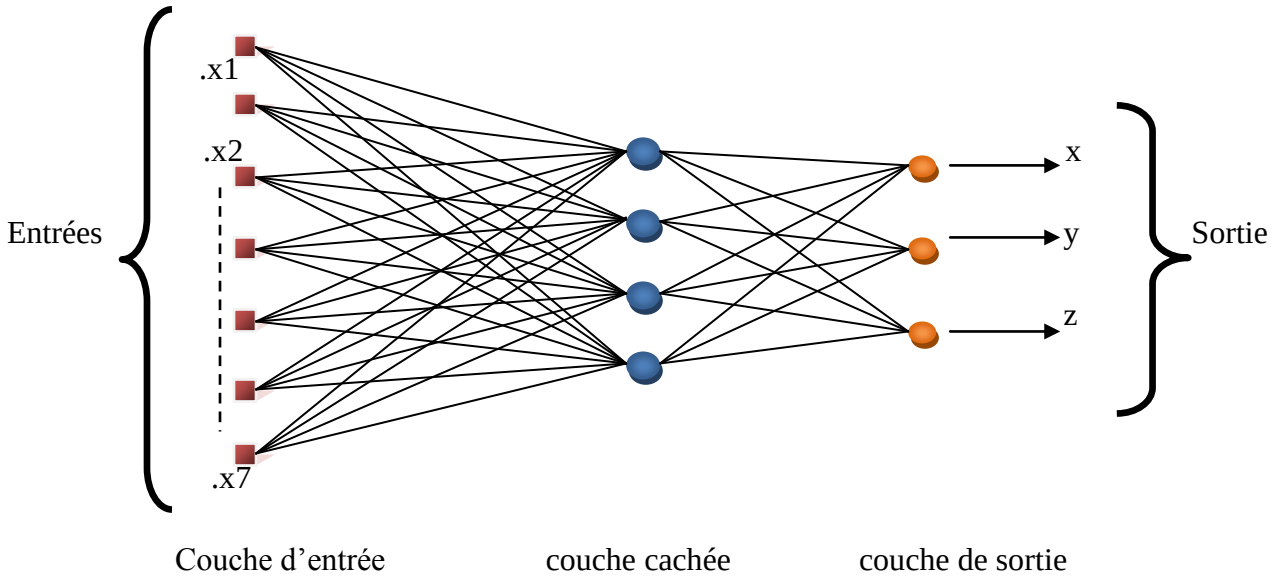



**Figure (III.6) :** Neurone Artificiel.

### III.3.4. Les composants d'un réseau de neurone :

Le réseau de neurone se compose en huit éléments sont :

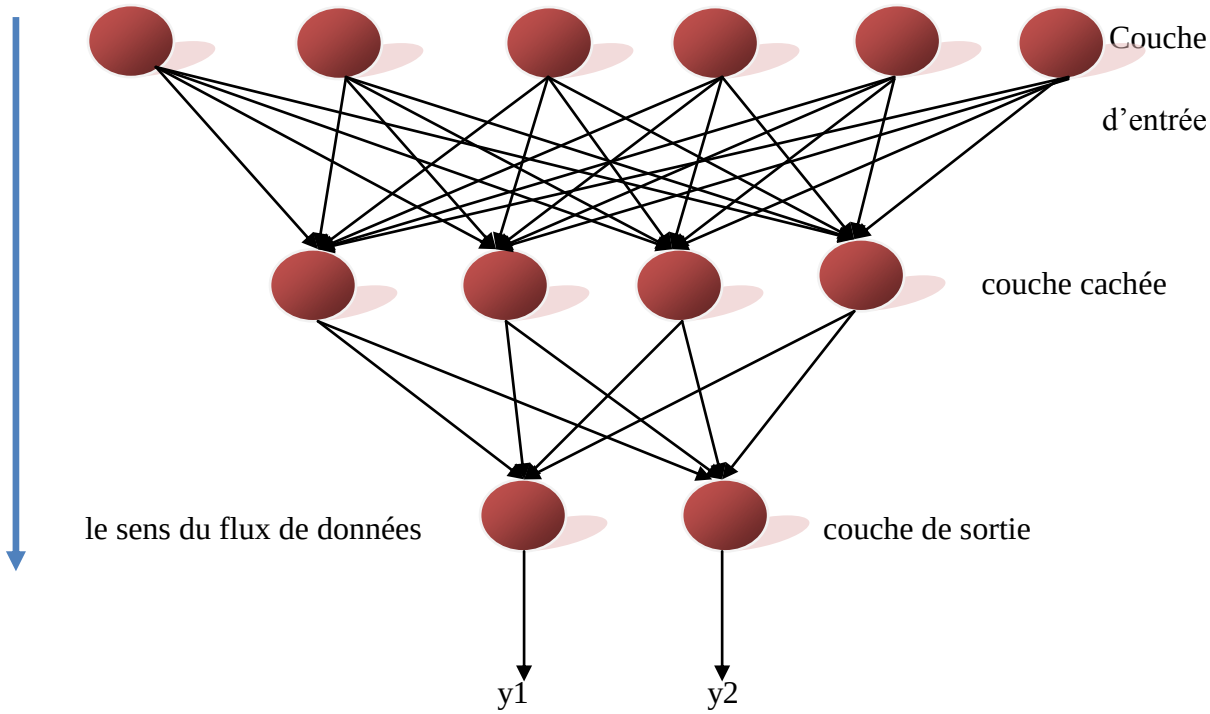
- Un ensemble de neurone.
- Un état d'activation pour chaque neurone (actif, inactif).
- Une fonction de sortie pour chaque neurone [f(s)].
- Un modèle de connectivité entre les neurones (chaque neurone est connecté à tous les autres).
- Une règle de propagation pour propager les valeurs d'entrée à travers 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) [32].

### 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.




**Figure(III.7) :** Réseau de neurones multicouches.

### 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.

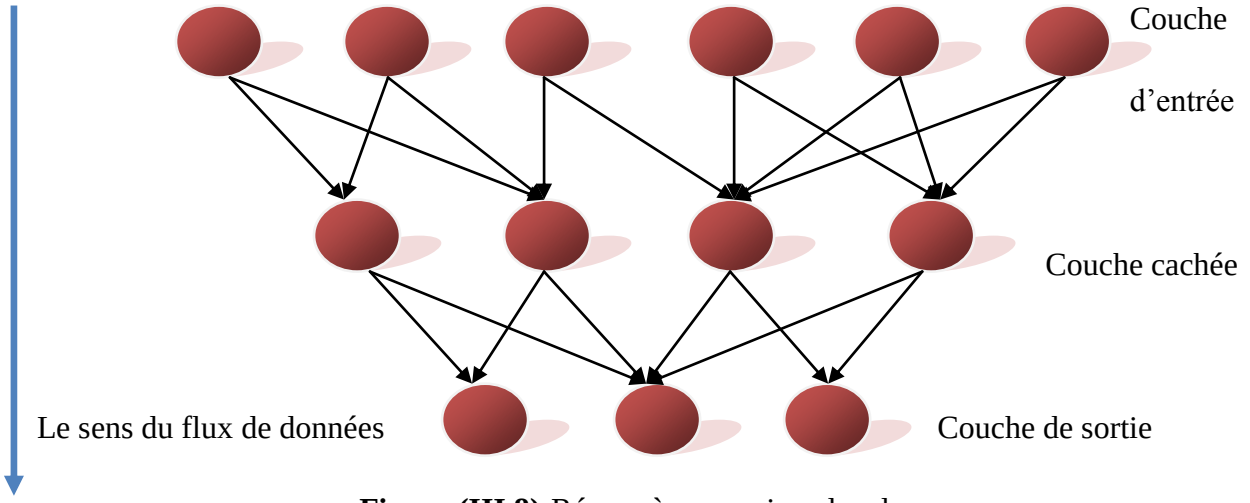
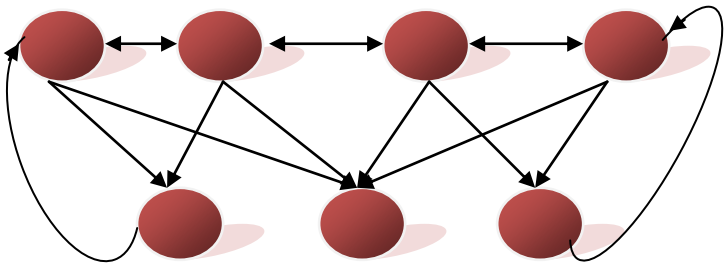



**Figure (III.8):**Réseau à connexions locales.

### III.3.5.3. Réseau à connexions récurrentes :

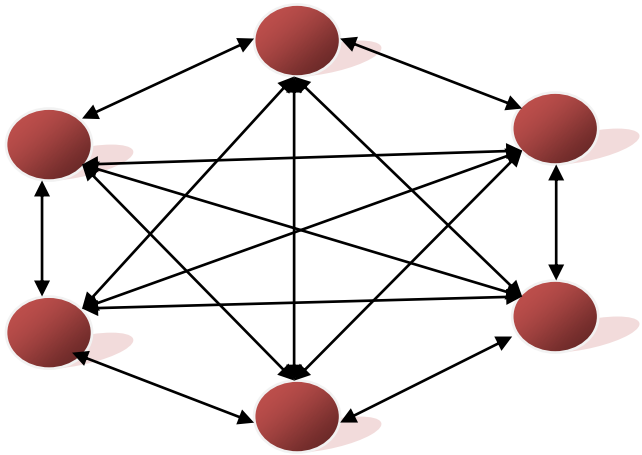
Les connexions récurrentes ramènent en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.



**Figure(III.9) :** Réseau à connexions récurrentes.

### III.3.5.4. Réseau à connexions complètes :

C'est la structure d'interconnexions la plus générale figure(III.10) Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau et à lui-même.



**Figure(III.10):**Réseau à connexions complètes.

### 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 [34].

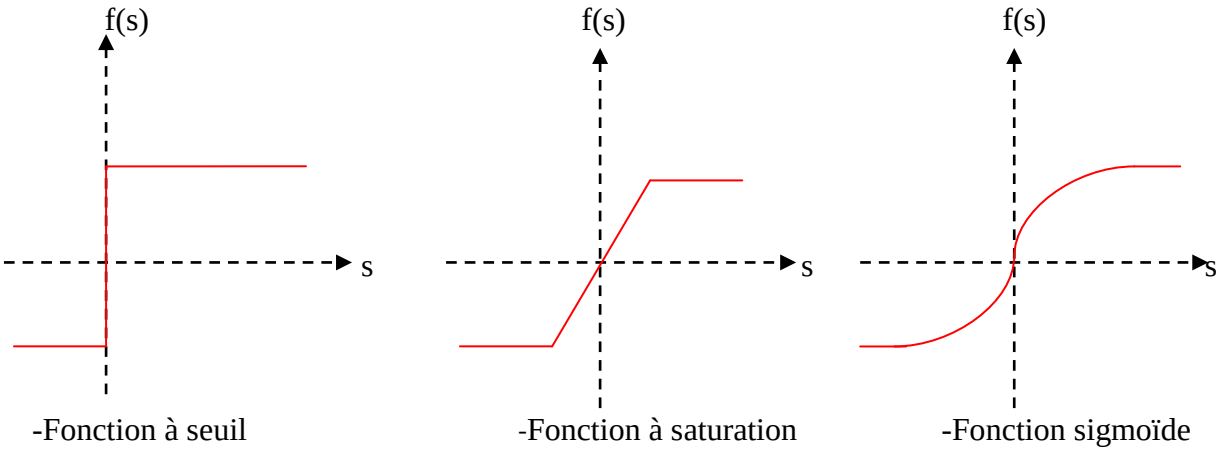



**Figure (III.11):**Quelque fonction d'activations.

### 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 [33].

#### 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 [34].

### 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.

#### III.3.8.2. Inconvénients :

- Boite noir (manque de traçabilité).
- L'adaptation aux environnements différents est difficile el le réapprentissage est souvent obligatoire [33].

### III.4.Les systèmes Neuro-flous[35] :

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 [36].

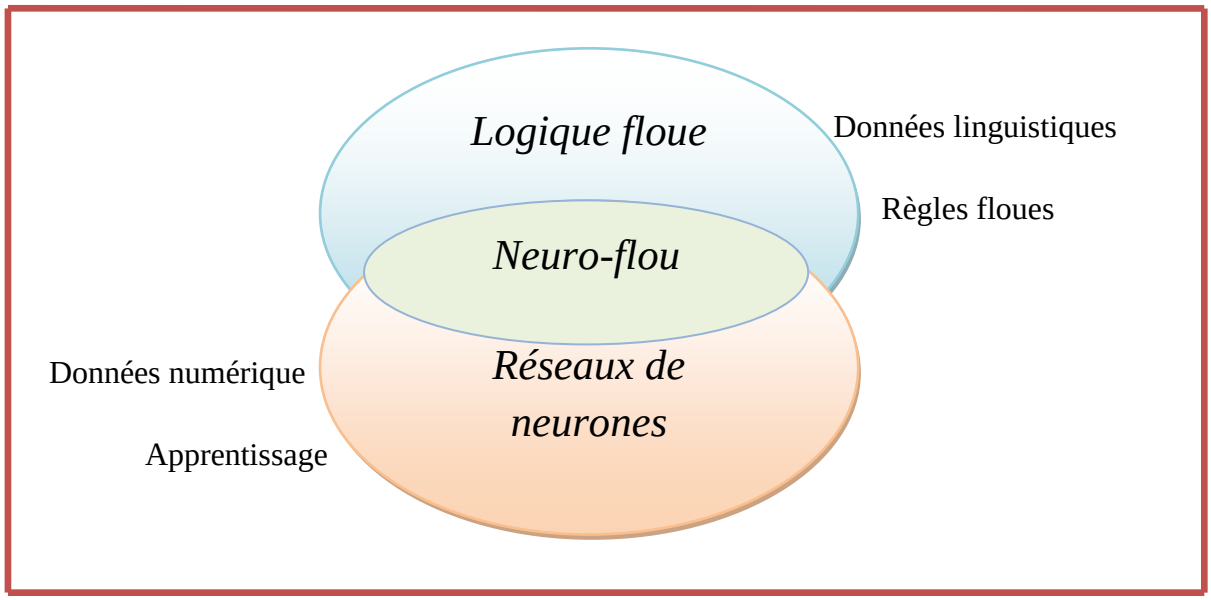



**Figure (III.12) :** principe de Neuro flou.

### 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.

- **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.

### 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.

### 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.13) qui détermine chaque couche comme suit:

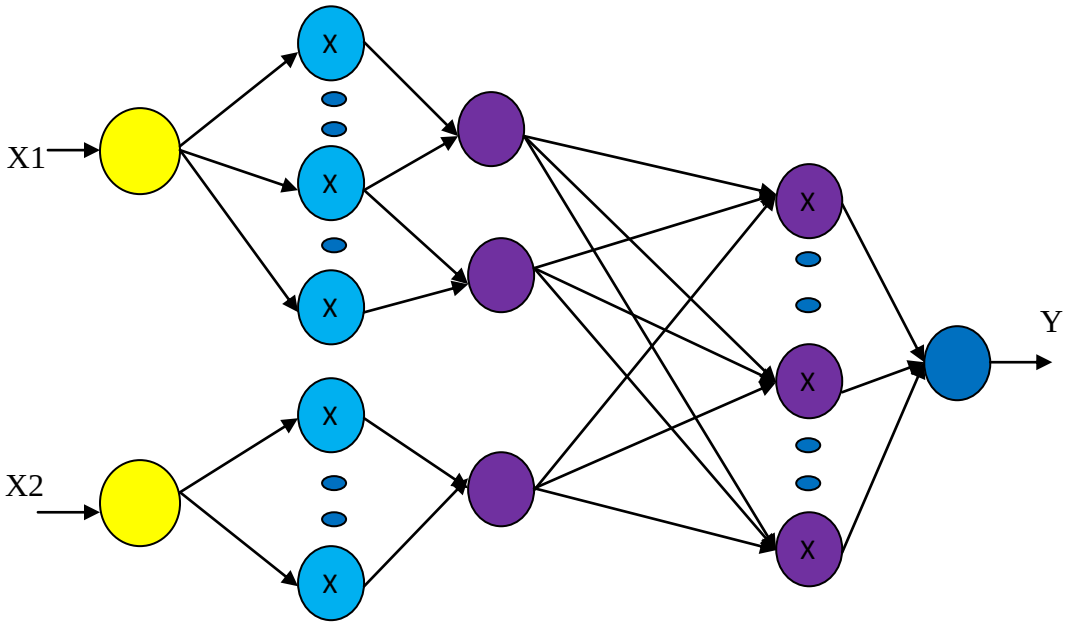



**Figure (III.13) :** Le système Neuro-flou de Mamdani.

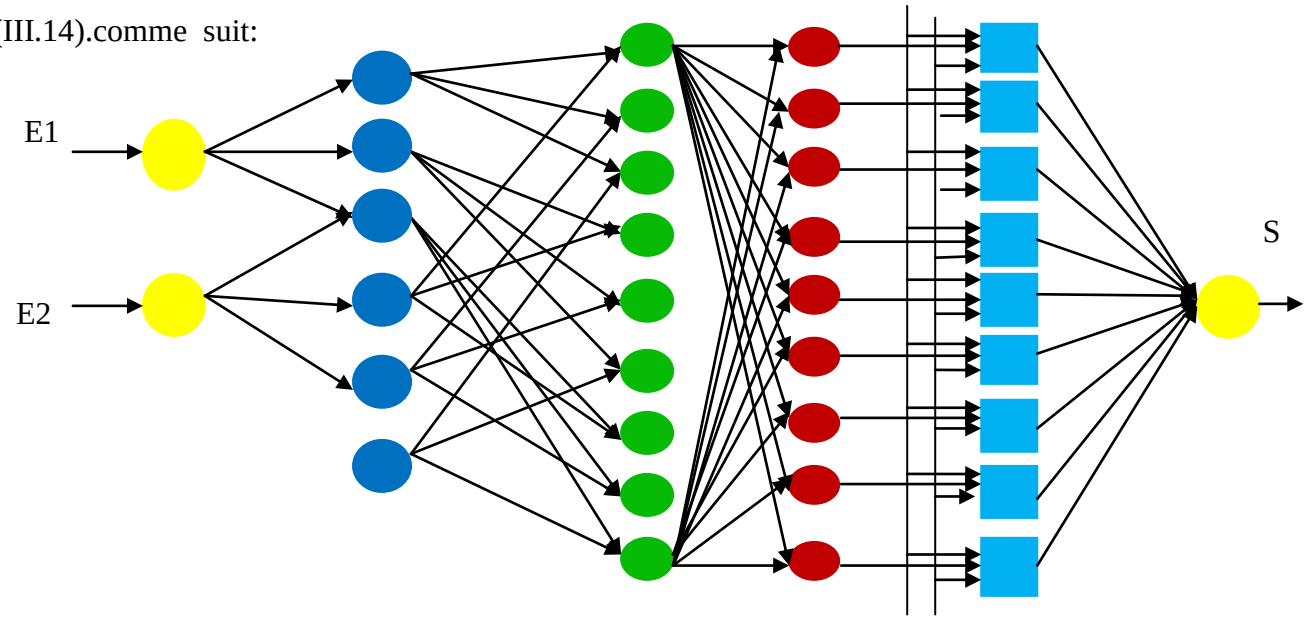
### III.4.2.2. Le système Neuro-flou hybride de type Takagi-Sugeno :

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.

L'architecture du système Neuro-flou hybride de TS est illustrée sur la figure (III.14).comme suit:




**Figure( III.14) :** Le système Neuro-flou de Takagi-Sugeno.

- 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.

$$\overline{W_i} = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \ , \ i=1,2... \qquad \text{(III.13)}$$

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

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

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 :

$$\sum_i \overline{W_i} f_i = \frac{\Sigma W_i f_i}{\Sigma_i W_i} \quad \text{(III.15)}$$

### 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.

#### III.4.3.2. La flexibilité :

Un système Neuro-flou peut traiter des problèmes complexes avec beaucoup de variables

àl'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.

#### 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.

### 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

### 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.15), ce modèle est facile à mettre en application, tout en étant précis dans le résultat final, avec une rapidité bien supérieure aux autres architectures.

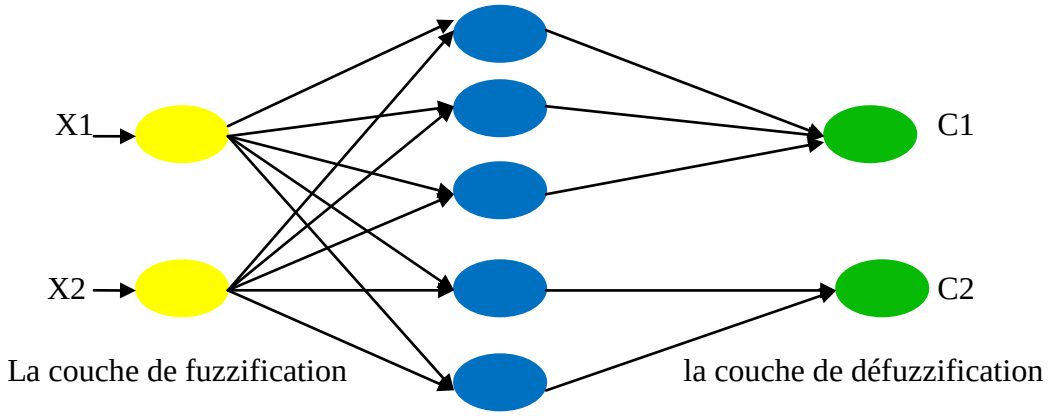
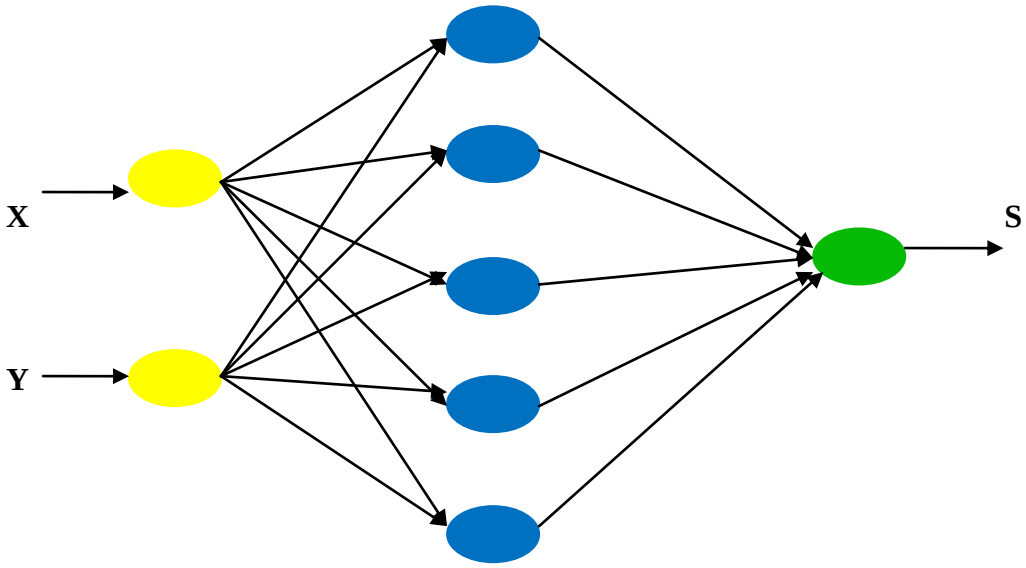



**Figure (III.15):** Architecture de NEFCLASS.

### 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.16) :** Architecture de NEFCON.

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.16).

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.

### 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.17) 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.

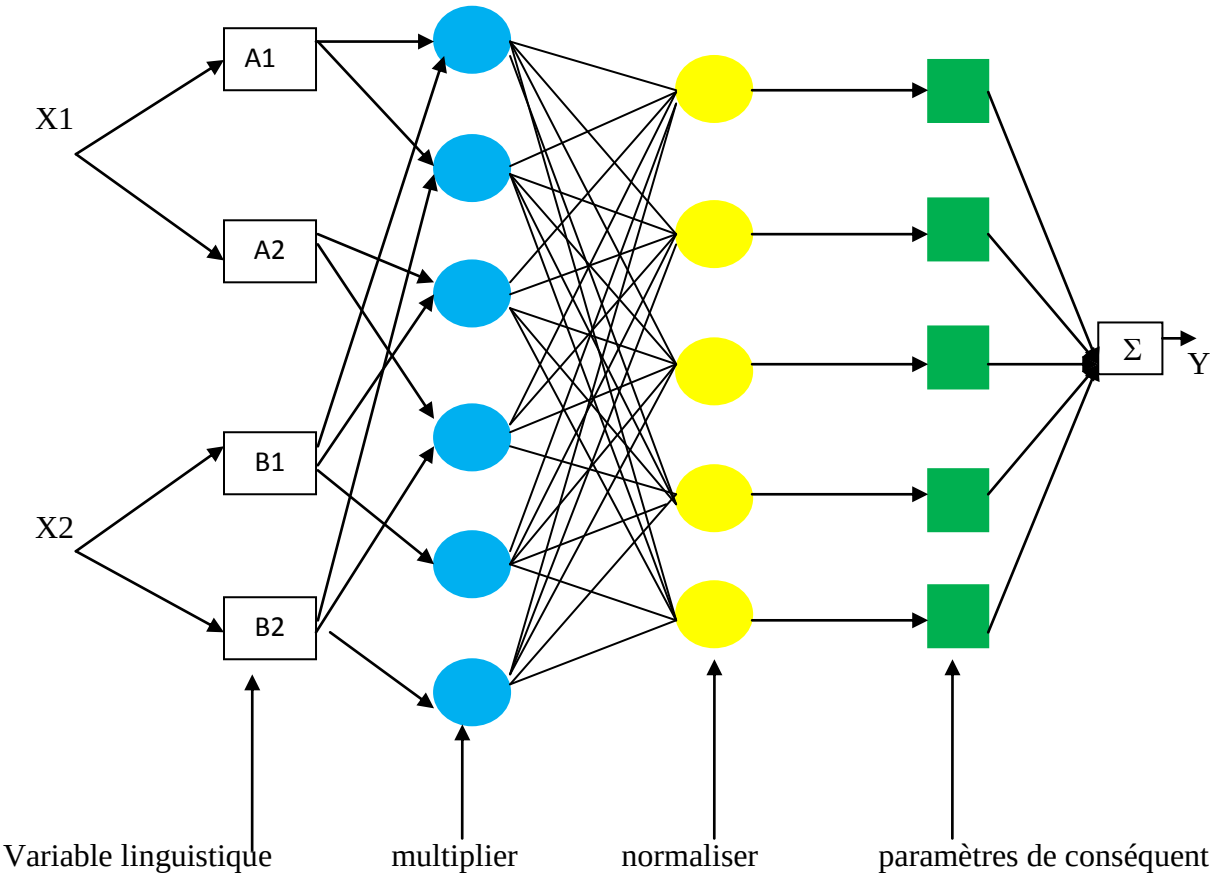
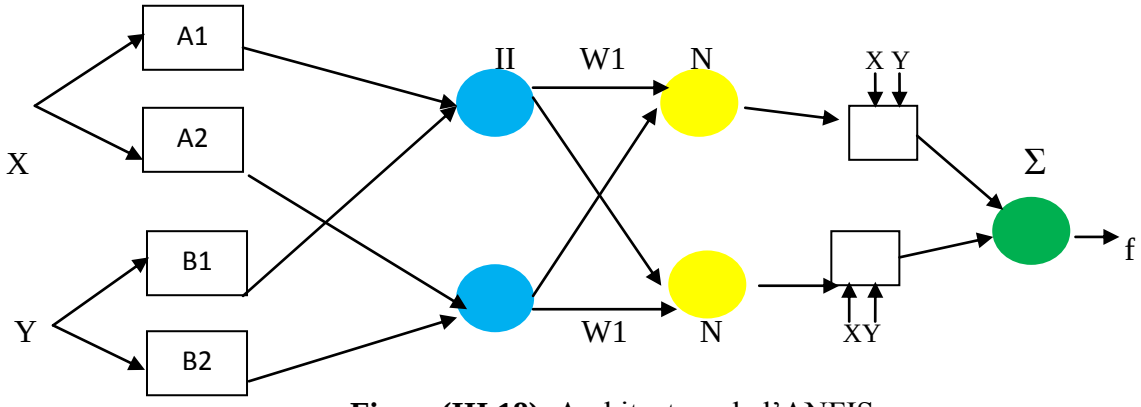



**Figure (III.17) :** Architecture de NEFPROX.

### 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.18) 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.




**Figure(III.18)**: Architecture de l'ANFIS.

## III.5.Conclusion :

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes PV, différents algorithmes de commandes intelligentes ont été étudiée pour la poursuite du point maximum de la puissance .Dans ce chapitre nous avons commencé par la présentation des techniques populaires telles que la commande à incrémentation de la conductance. Ainsi que trois techniques de l'intelligence artificielle à savoir la logique floue et les réseaux de neurones et Neuro-floue.

# *Chapitre IV*

## Description de système et simulation

## IV.1. Introduction :

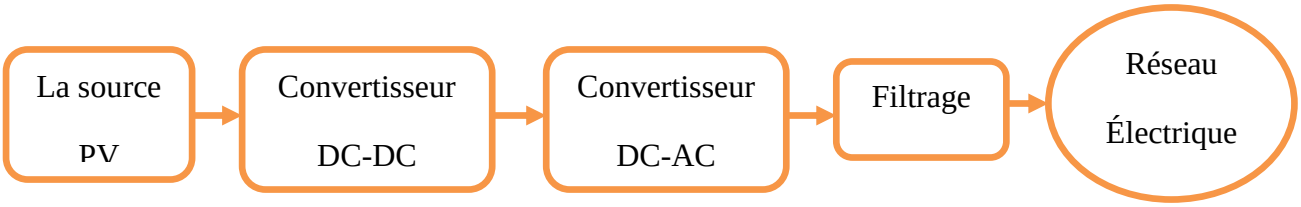
Le modèle du système PV sous des différentes irradiations et températures est simulé et testé. Le point de fonctionnement du champ sur la courbe I-V est dynamiquement modifié par le contrôleur afin que la MPPT obtienne le point de puissance maximale sous les conditions de la lumière du soleil et maintient la puissance du PV aux alentours de ce point pour produire de l'énergie avec un rendement plus élevé.

## IV.2. Description de système :

La simulation d'un générateur PV contrôlé par l'un des quatre méthodes est un modèle d'un champ de 100 kW connecté à un réseau de 25 kV par l'intermédiaire d' un convertisseur élévateur continu-continu et un convertisseur de tension triphasé à trois niveaux (onduleur).maximum power point tracking ( MPPT ) est mis en œuvre dans le convertisseur élévateur au moyen d'un modèle simulink, en utilisant dans le premier cas la technique incrémental conductance, dans le deuxième cas la logique floue , le troisième cas le réseau de neurone, le quatrième cas le réseau neuro-floue.

Le modèle contient :

- un champ PV délivrant un maximum de puissance de 100 kW à 1000 W / $m^2$ des irradiations solaire.
- 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).



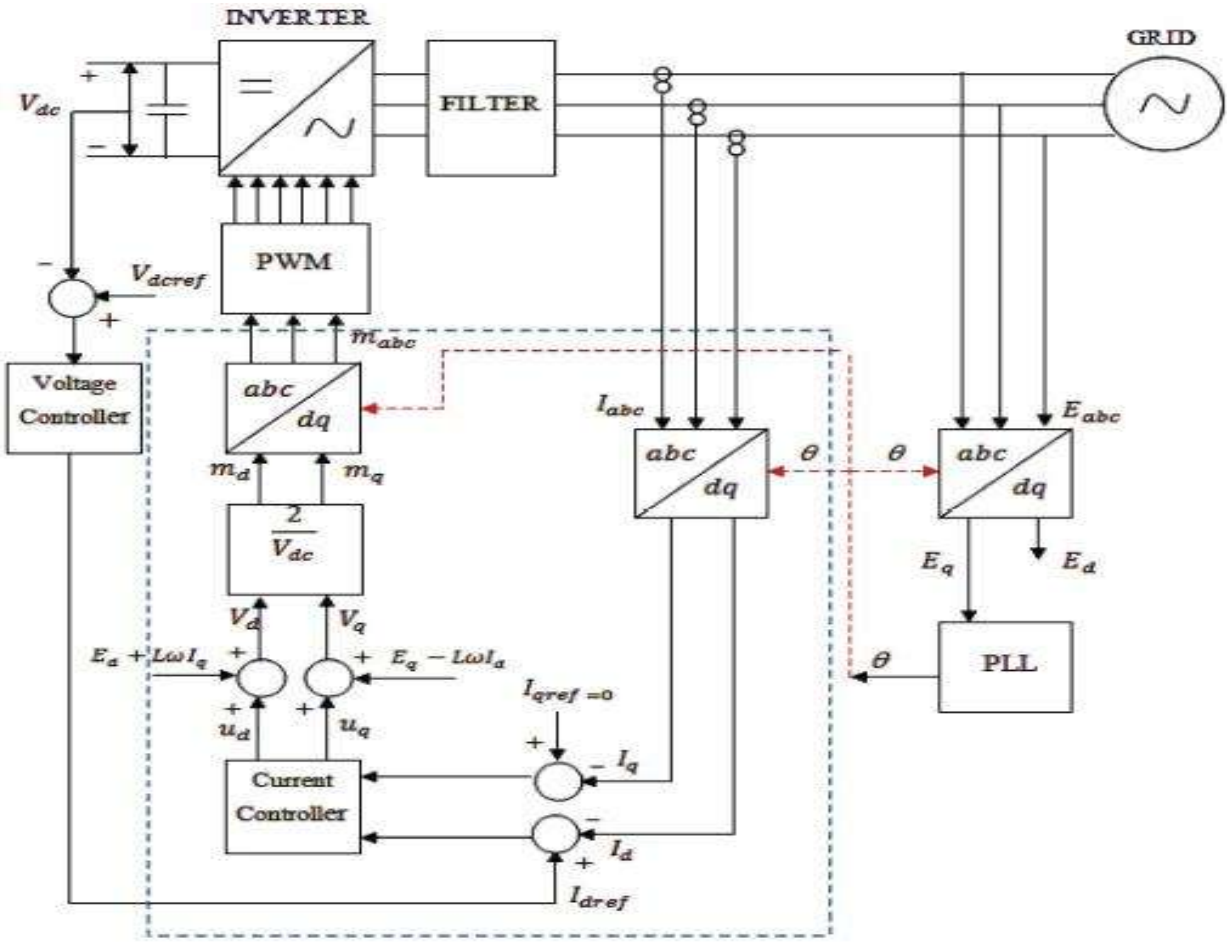

**Figure(IV.1) :** La structure du modèle .

### IV.2.1.Les régulateurs du VSC :

Le système de contrôle utilise deux boucles de régulation :
une boucle de commande externe qui régule la tension continue à +/- 250 V, et une boucle de contrôle interne qui régule les courants Id et Iq du réseau (les composantes active et réactive du courant).

La référence du courant Id est la sortie du régulateur externe.la référence du courant Iq est fixée à zéro, afin de maintenir le facteur de puissance à1. Les sorties de tension Vd et Vq du régulateur de courant sont converties en 3 signaux de modulation Uref_abc utilisés par le générateur d'impulsions MLI (PWM) à trois niveaux.

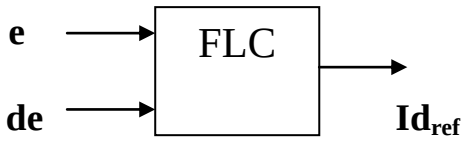
Les générateurs d'impulsions des convertisseurs Boost et l'onduleur utilisent un temps d'échantillonnage rapide de 1µs, afin d'obtenir une résolution appropriée de formes d'onde PWM.




**Figure(IV.2) :** La structure du VSC.

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

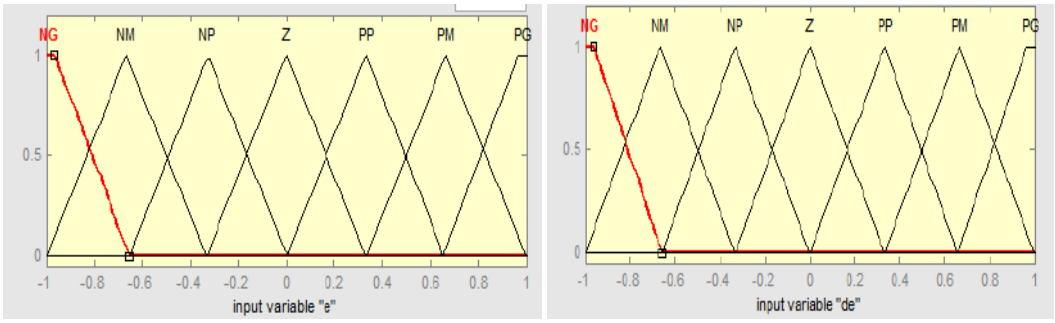
- **Régulateur VDC :**



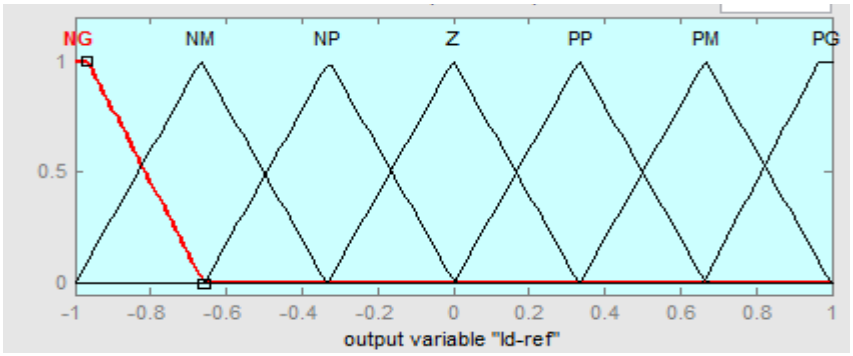

**Figure(IV.3) :**la structure de regulateur VDC.

$$\begin{cases} e=Vdc_{ref}-Vdc_{mes} \\ de=e(k)-e(k-1) \end{cases}$$

on utilise7 fonction d'appartenance triangulaire.




**Figure(IV.4) :** Fonction d'appartenance des variables d'entrée.




**Figure(IV.5) :** Fonction d'appartenance de la variable de sortie.

**NG :** négative grande.

**NM :** négative moyen

**NP :** négative petite

**Z :** zéro

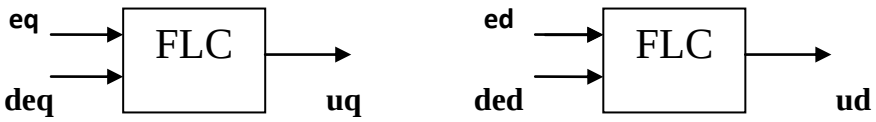
**PP :**positive petite

**PM :** positive moyen **PG:** positve grande .

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

| E / d e | NG | NM | NP | Z | PP | PM | PG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NG | PG | PG | PG | PM | PM | PP | Z |
| NM | PG | PM | PM | PM | PP | Z | NP |
| NP | PG | PM | PP | PP | Z | NP | NM |
| Z | PM | PM | PP | Z | NP | NM | NM |
| PP | PM | PP | Z | NP | NP | NM | NG |
| PM | PP | Z | NP | NM | NM | NM | NG |
| PG | Z | NP | NM | NM | NG | NG | NG |

- **Régulateur de courant Id et Iq :**

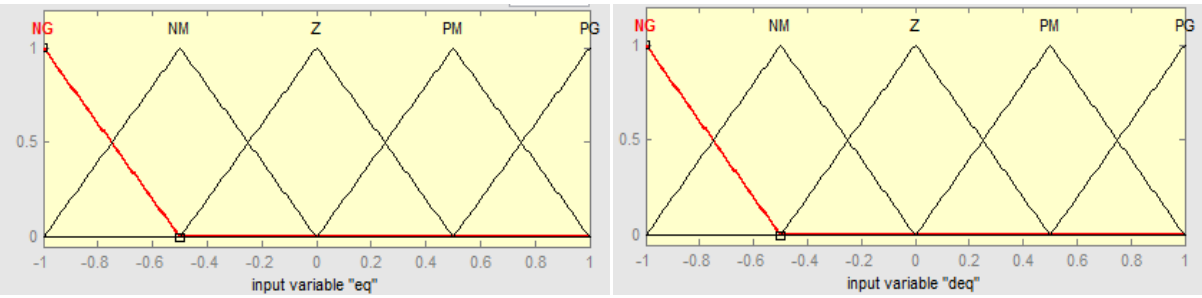



**Figure(IV.6) :**la structure de régulateur Id-Iq.

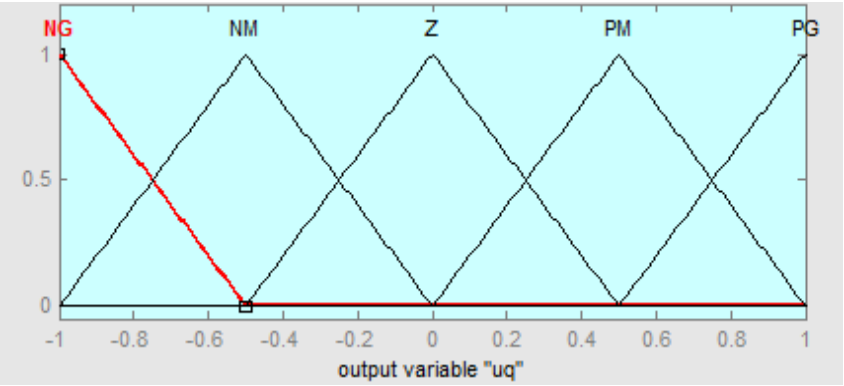
$$\begin{cases} ed=id_{ref}-id_{mes} \\ ded=e(K)-e(K-1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} eq=iq_{ref}-iq_{mes} \\ deq=e(K)-e(K-1) \end{cases}$$

on utilise5fonction d'appartenance triangulaire




**Figure(IV.7) :** Fonction d'appartenance des variables d'entrée.




**Figure(IV.8) :** Fonction d'appartenance de la variable de sortie.

**Tableau(IV.2) :** la table des règles pour la commande logique floue.

| ed-eq / ded-deq | NG | NM | Z | PM | PG |
|---|---|---|---|---|---|
| NG | NG | PG | NM | NM | Z |
| NM | NG | NM | NM | Z | PM |
| Z | NM | NM | Z | PM | PM |
| PM | NM | Z | PM | PM | PG |
| PG | Z | PM | PM | PG | PG |

**b. La commande basée sur le principe de réseau de neurone :**

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

**Tableau(IV.3) :** la table des caractéristiques des régulateurs VDC et IdIq

| Caractéristiques | Régulateur VDC | Régulateur Id Iq |
|---|---|---|
| Entrées Sorties | 1-1 | 2-1 |
| Algorithme d'apprentissage | Feed-forward backprop | Feed-forward backprop |
| La fonction utilisée | TRAINLM | TRAINLM |
| Nombre de couche | 2 | 2 |
| Nombre de neurone | 10-1 | 10-5 |

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

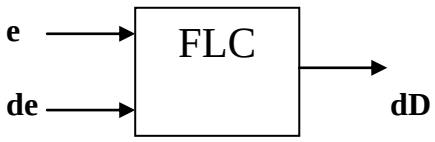
On a résumé les caractéristiques des régulateurs dans le tableau suivant

**Tableau(IV.4) :** la table des caractéristiques des régulateurs VDC et IdIq

| caractéristiques | Régulateur VDC | Régulateur Id Iq |
|---|---|---|
| Entrées –sorties | 2-1 | 2-1 |
| Nombre de neurone | 1-7-1 | 1-7-1 |
| Performance | 7.36*10^-3 | 0.00083 |
| Algorithme d'apprentissage | Hybride | Hybride |
| Nombre de fonctions d'appartenances | 3 | 3 |
| Forme de fonctions d'appartenances | Triangulaire | triangulaire |
| Structure d'estimateur flou | Sugeno | Sugeno |
| Nombre de règles | 3 | 9 |

### IV.2.2.Régulateur MPPT :

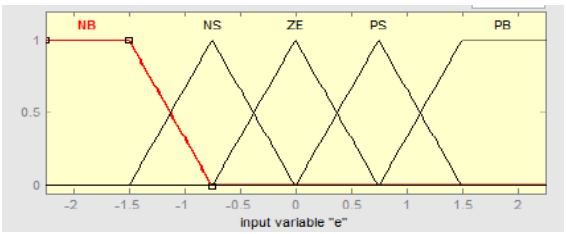
**a. La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue :**

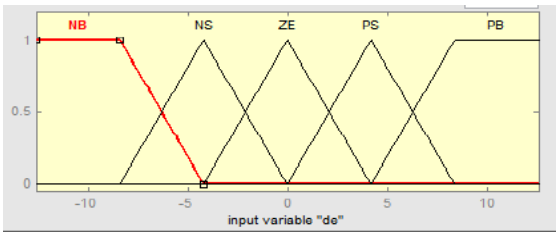



**Figure(IV.9) :**la structure de régulateur MPPT.

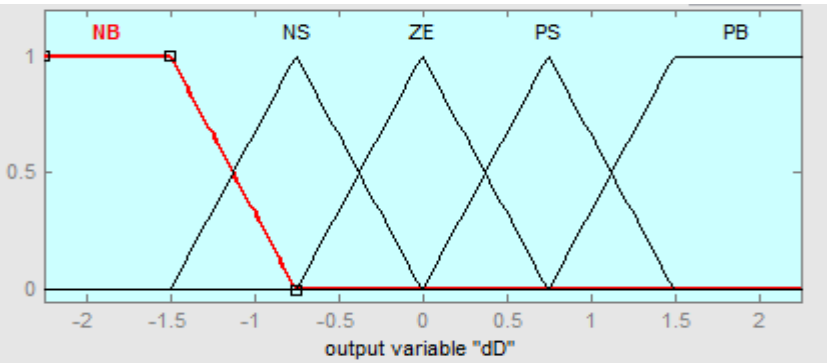
$$\begin{cases} e=dp/dv \\ de=e(k)-e(k-1) \end{cases}$$

on utilise5 fonction d'appartenance triangulaire.



**Figure(IV.10) :** Fonction d'appartenance des variables d'entrées.




**Figure(IV.11) :** Fonction d'appartenance des variables de sortie

**Tableau (IV.5) :** 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.6) :** la table des caractéristiques de régulateur MPPT

| Caractéristiques | Régulateur MPPT |
|---|---|
| Entrées Sorties | 2-1 |
| | 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.7) :** 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 15°C et se stabilisent dans l'intervalle [1.2s-1.5s] et après, elles augmentent lentement jusqu'à la valeur 1000W/m² et25°C 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 et 20°C 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 25°C et se stabilisent jusqu'à 3secondes.

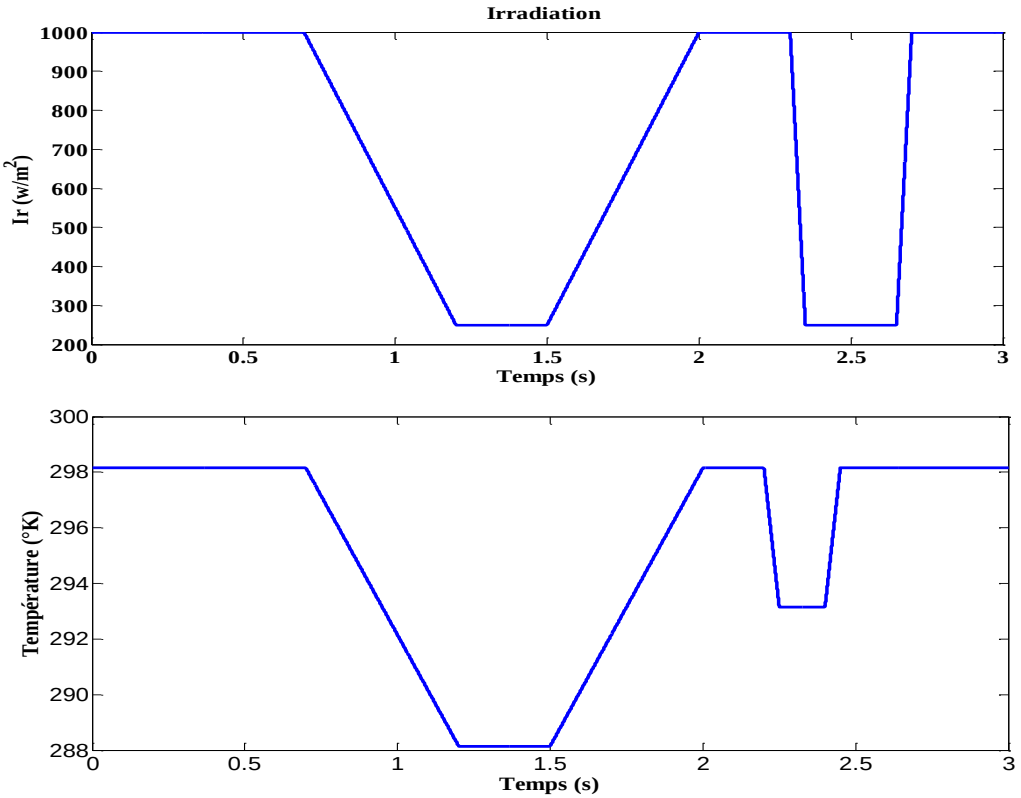



**Figure (IV.12) :** La variation de l'irradiation et la température.

### IV.3.1. Simulation de système avec IncCond :

Après exécution du modèle IncCond et cela pour une durée de 3 secondes on observe les séquences suivantes des événements sur les oscilloscopes.

- ✓ De t = 0 s à t = 0.05 s, les convertisseurs Boost et l'onduleur sont bloqués. La tension PV correspond à la tension du circuit ouvert Nser * Vco = 8*42.1 = 336 V, Le pont à trois niveaux fonctionne comme un redresseur à diodes et les condensateurs sont chargés de 500 V.
- ✓ A t = 0.05 s, les convertisseurs boost et l'onduleur sont débloqués. la tension du court-circuit est régulée à Vcc = 500V.

- Le rapport cyclique du convertisseur élévateur boost est fixé (D = 0.5), et les irradiations du soleil sont réglées à 1000 W / $m^2$. L'état d'équilibre est atteint à t = 0.25s.
- La tension résultante du PV est donc V_PV = (1 - D) * Vcc = (1-0.5) * 500 = 250 V.

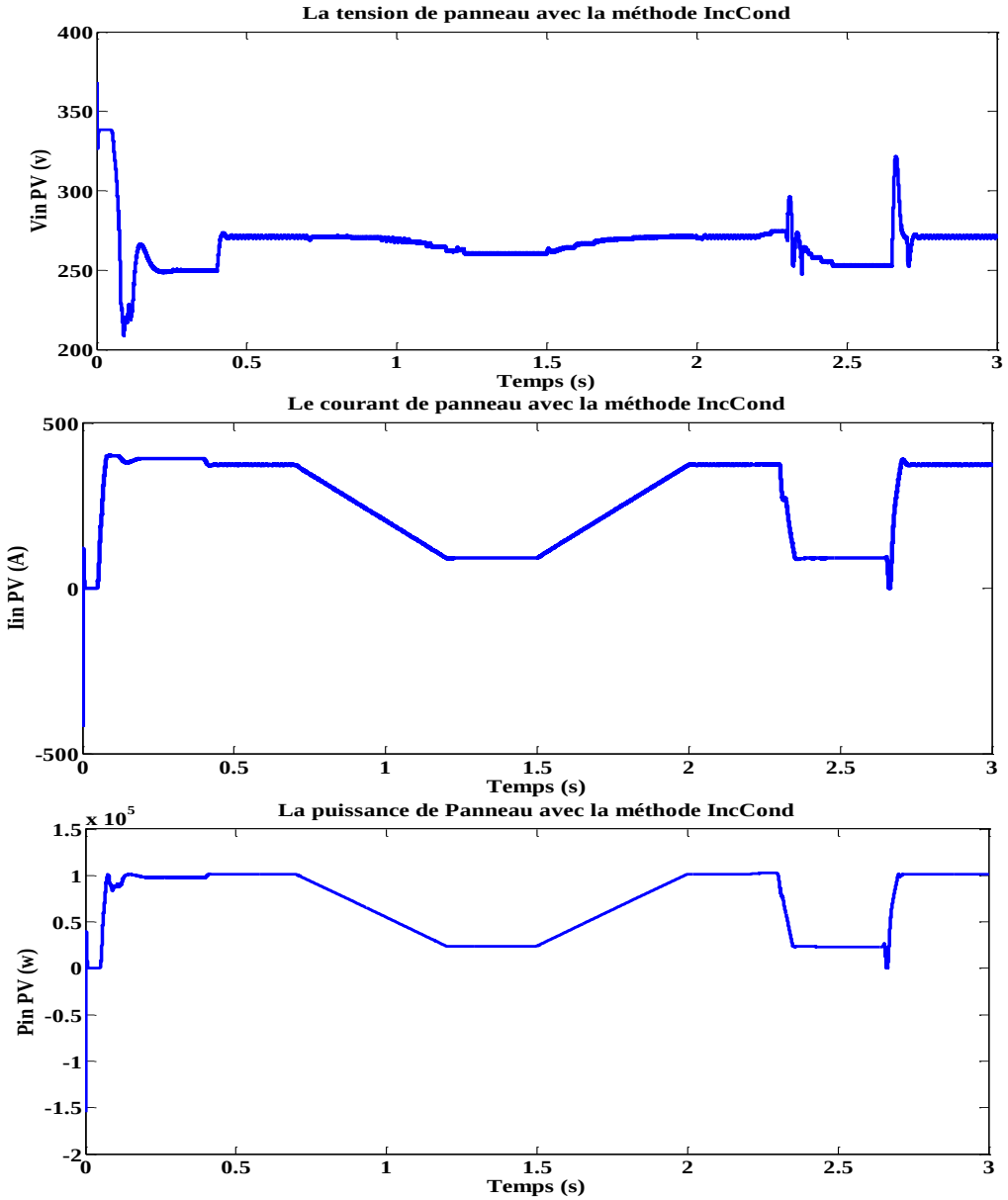
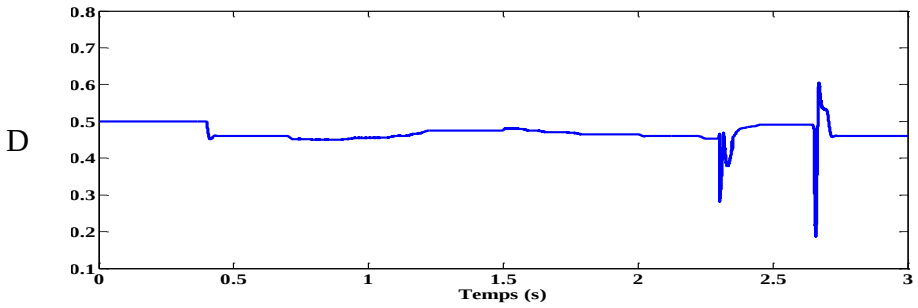



**Figure (IV.13) :** La tension PV, le courant PV puissance PV.




**Figure(IV.14) :** Le rapport cyclique D.

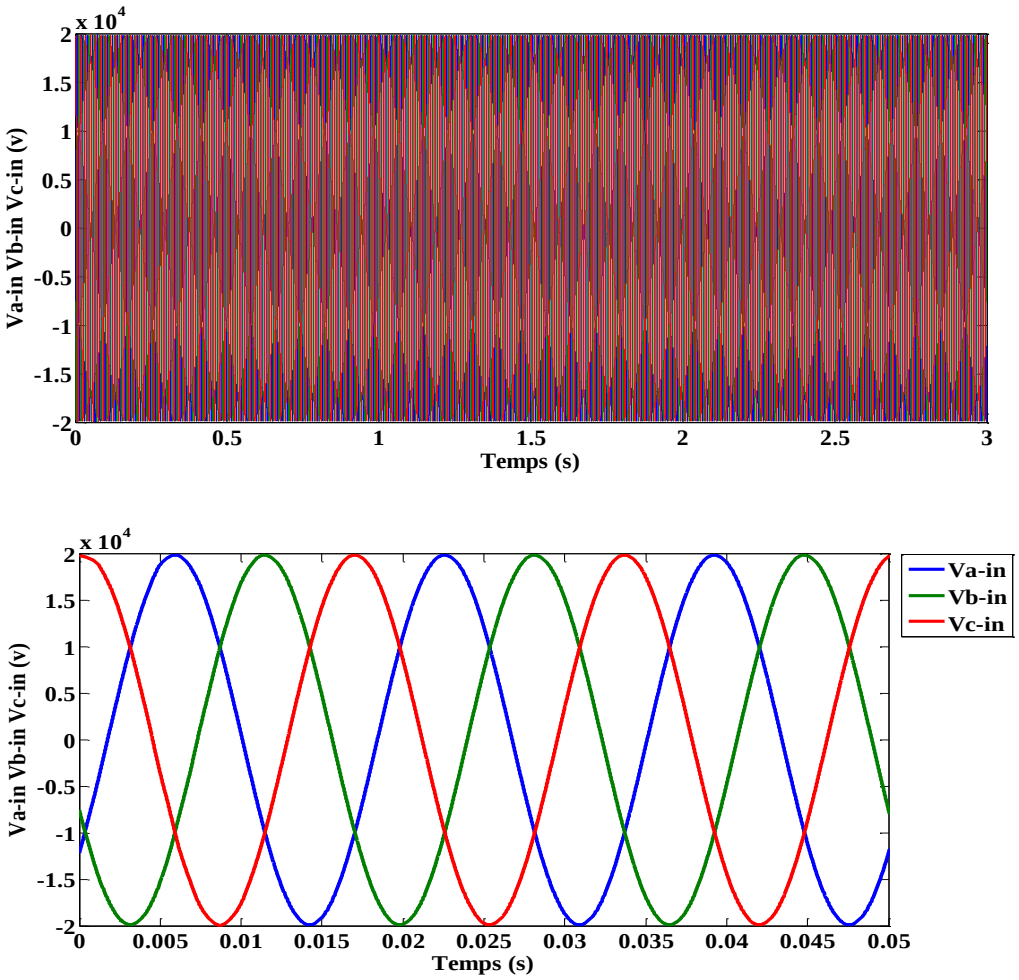
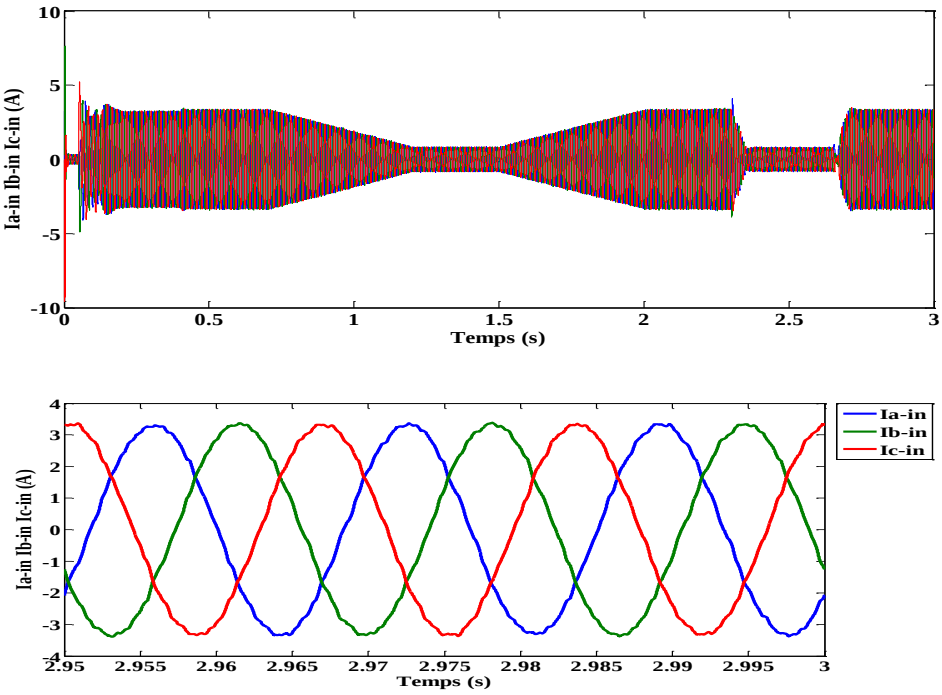



**Figure (IV.15) :** Les Tensions Vabc.




**Figure(IV.16) :** Les courants Iabc.

On observe de la figure (IV.17) 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).

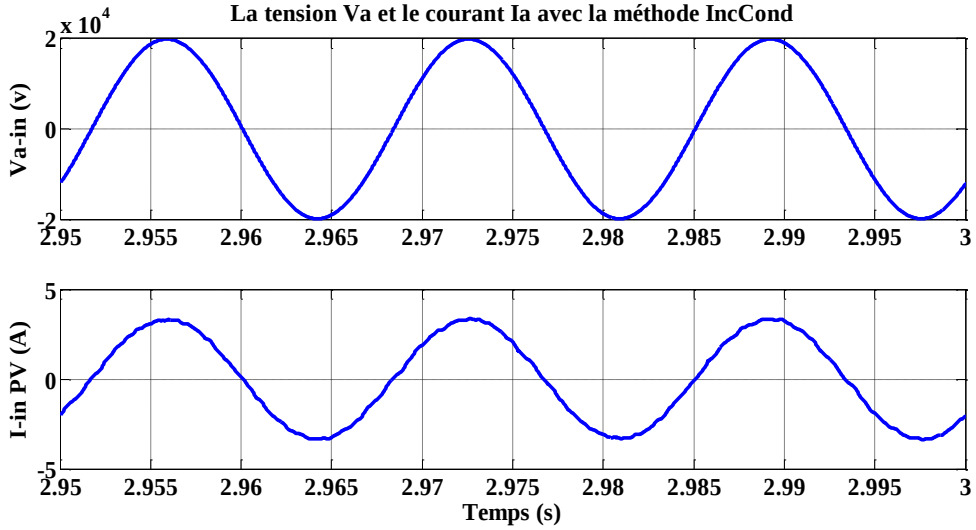



**Figure (IV.17):** La tension Va et le courant Ia.

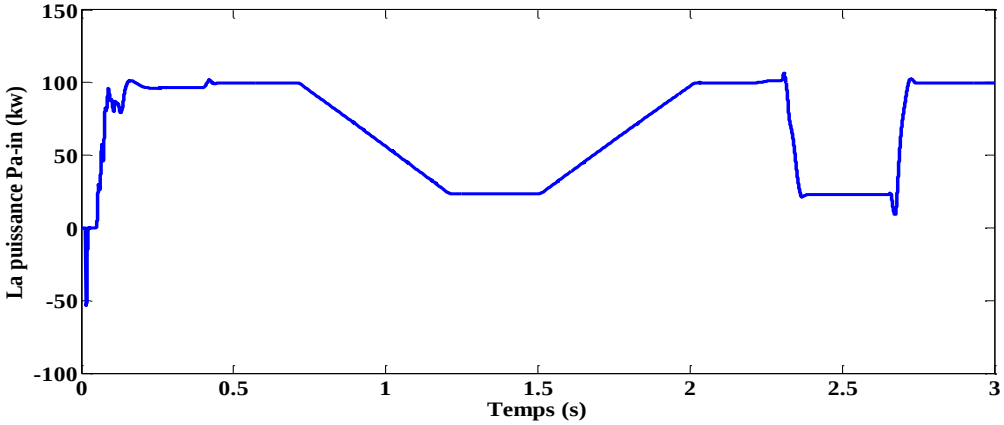



**Figure (IV.18) :** La puissance Pa.

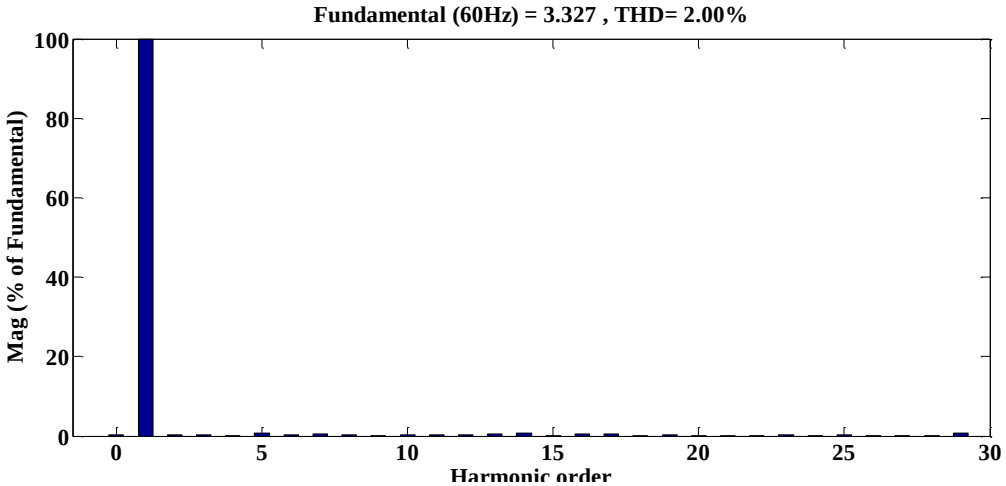



**Figure (IV.19) :** Les harmoniques de courant Ia.

### IV.3.2.Simulation de système avec la logique floue :

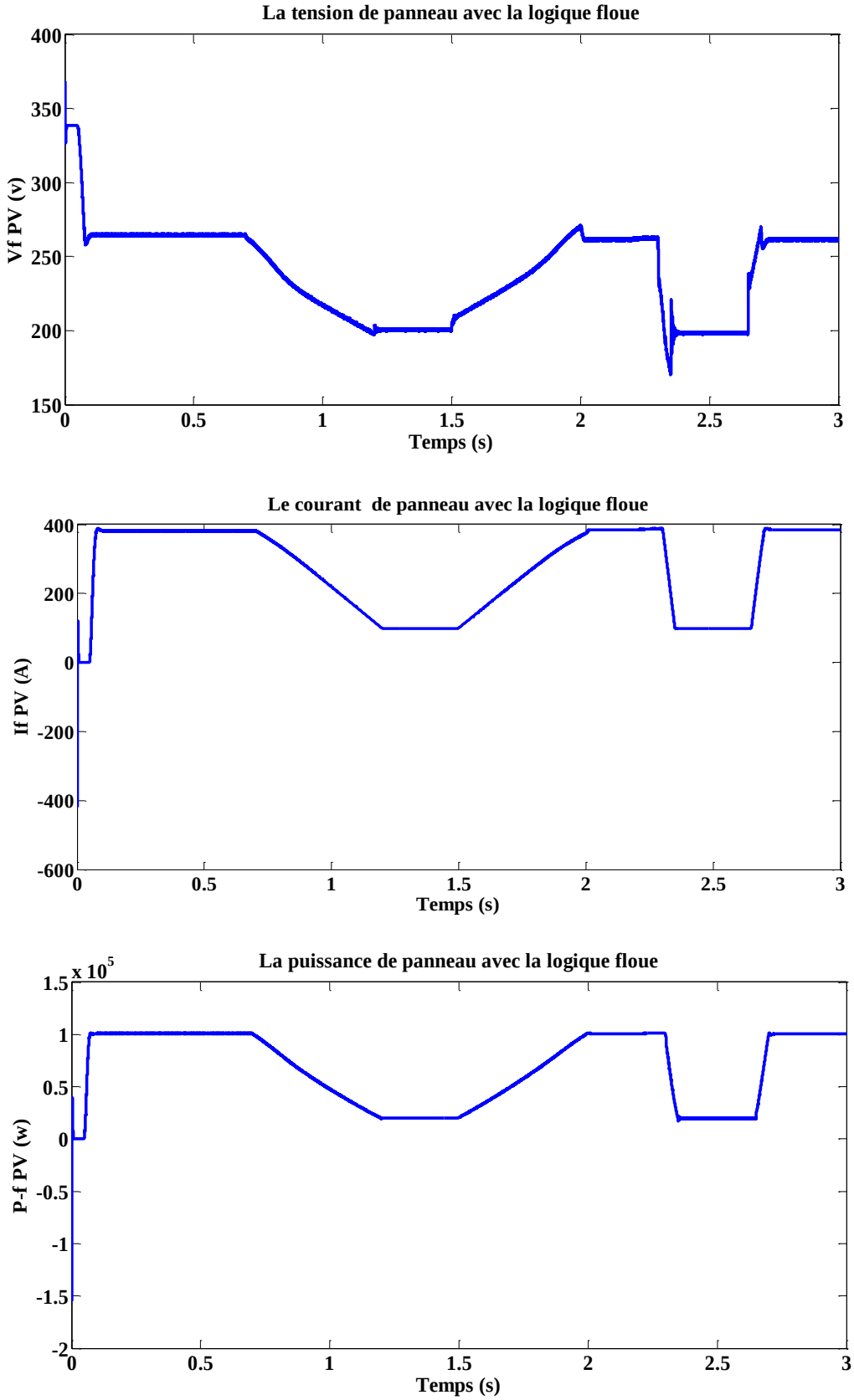



**Figure (IV.20) :** La tension PV, le courant PV puissance PV.

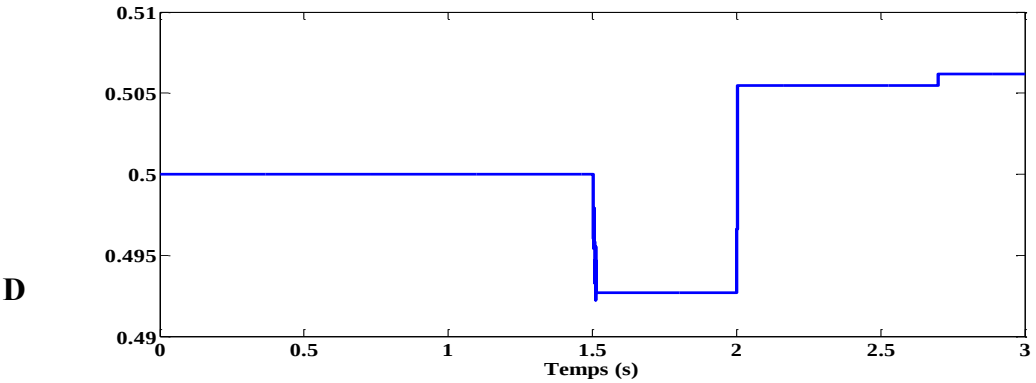



**Figure (IV.21) :** Le rapport cyclique D.

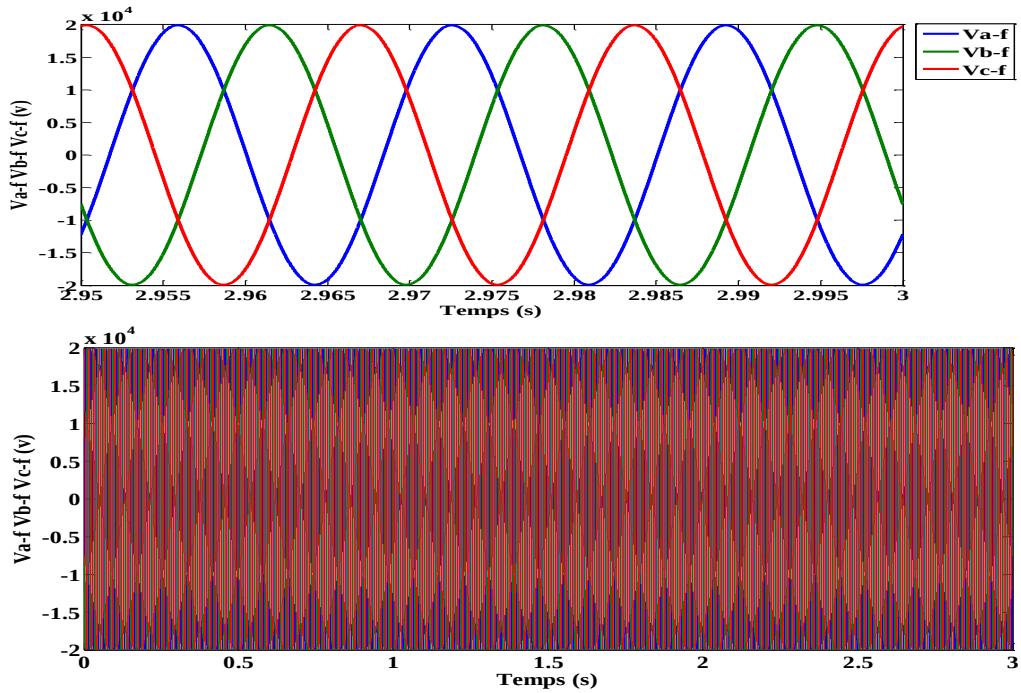



**Figure (IV.22) :** Les tensions Vabc.

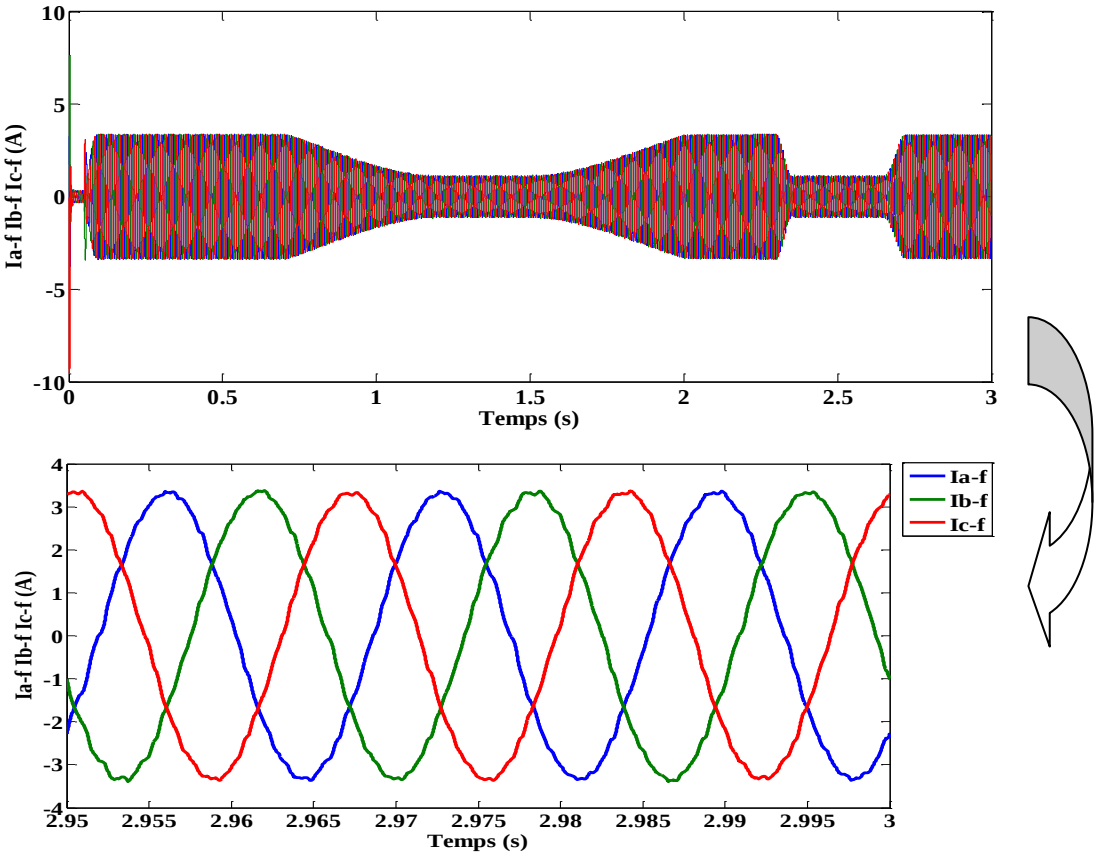



**Figure (IV.23) :** Les courants Iabc.

On observe de la figure (IV.24) 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).

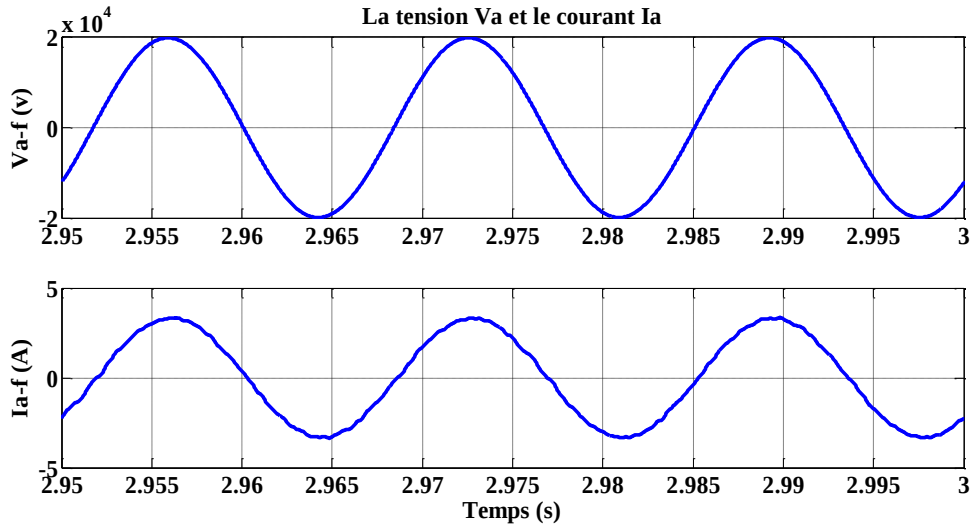



**Figure (IV.24) :** La tension Va et le courant Ia.

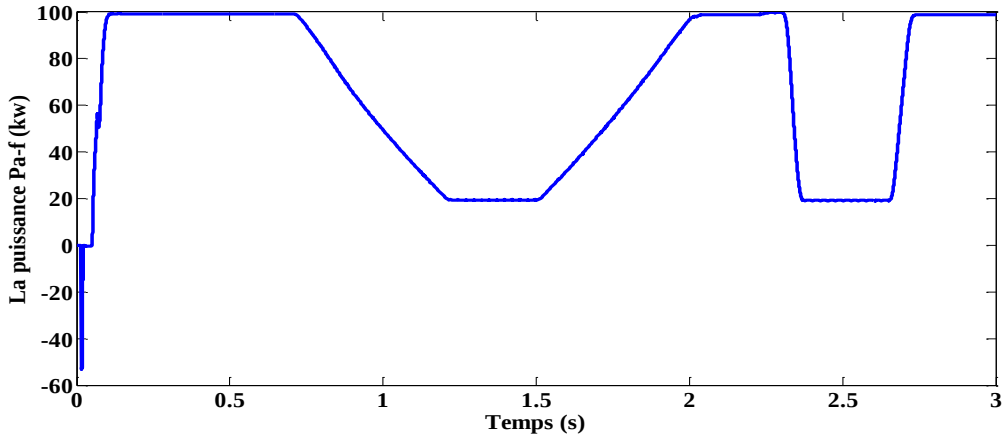



**Figure (IV.25) :** La puissance Pa.

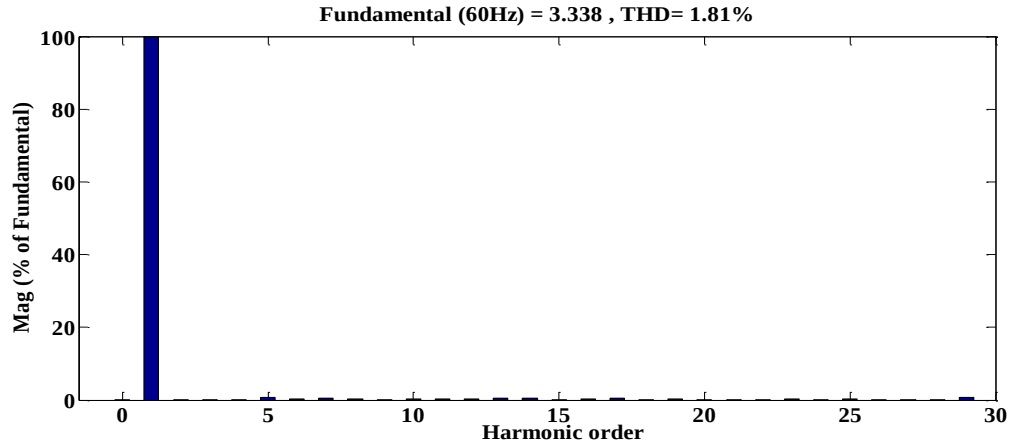



**Figure (IV.26) :** Les harmoniques de courant Ia.

### IV.3.3.Simulation de système avec le réseau de neurone :

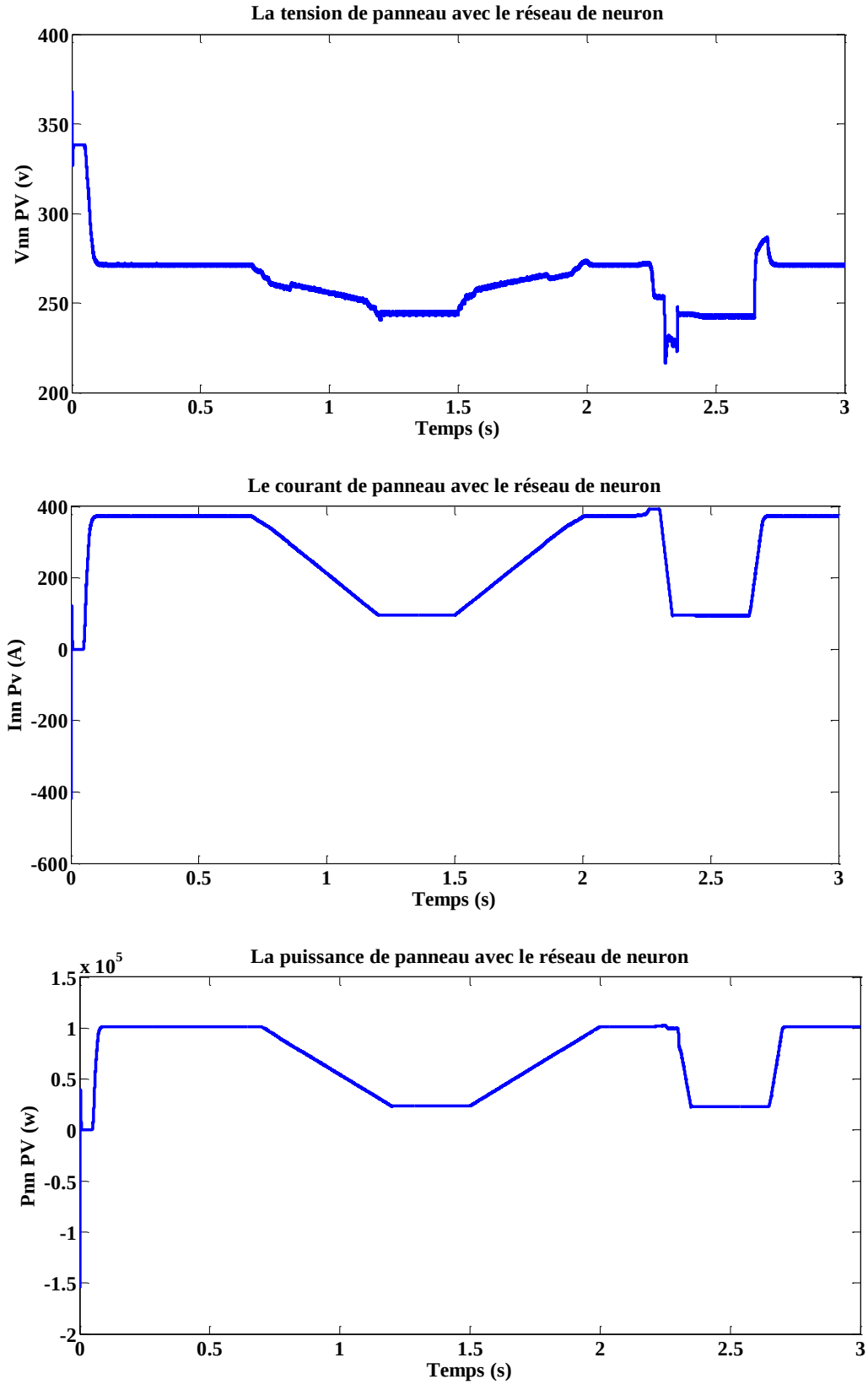



**Figure (IV.27) :** La tension PV, le courant PV puissance PV.

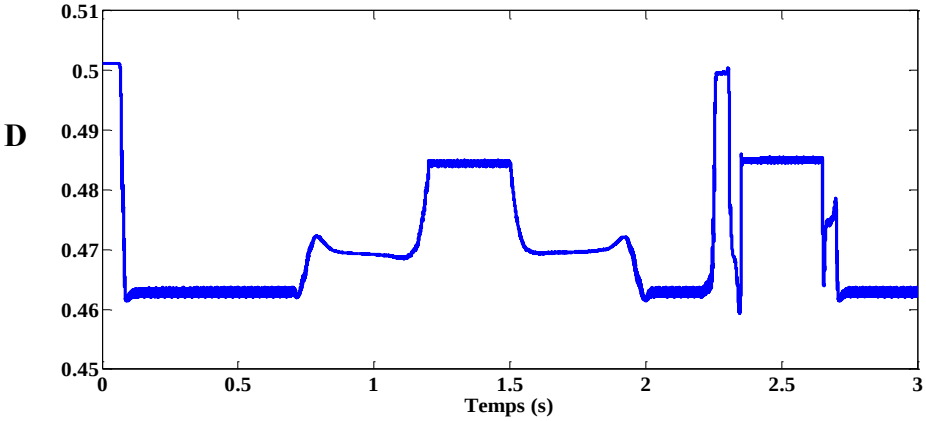



**Figure (IV.28) :** Le rapport cyclique

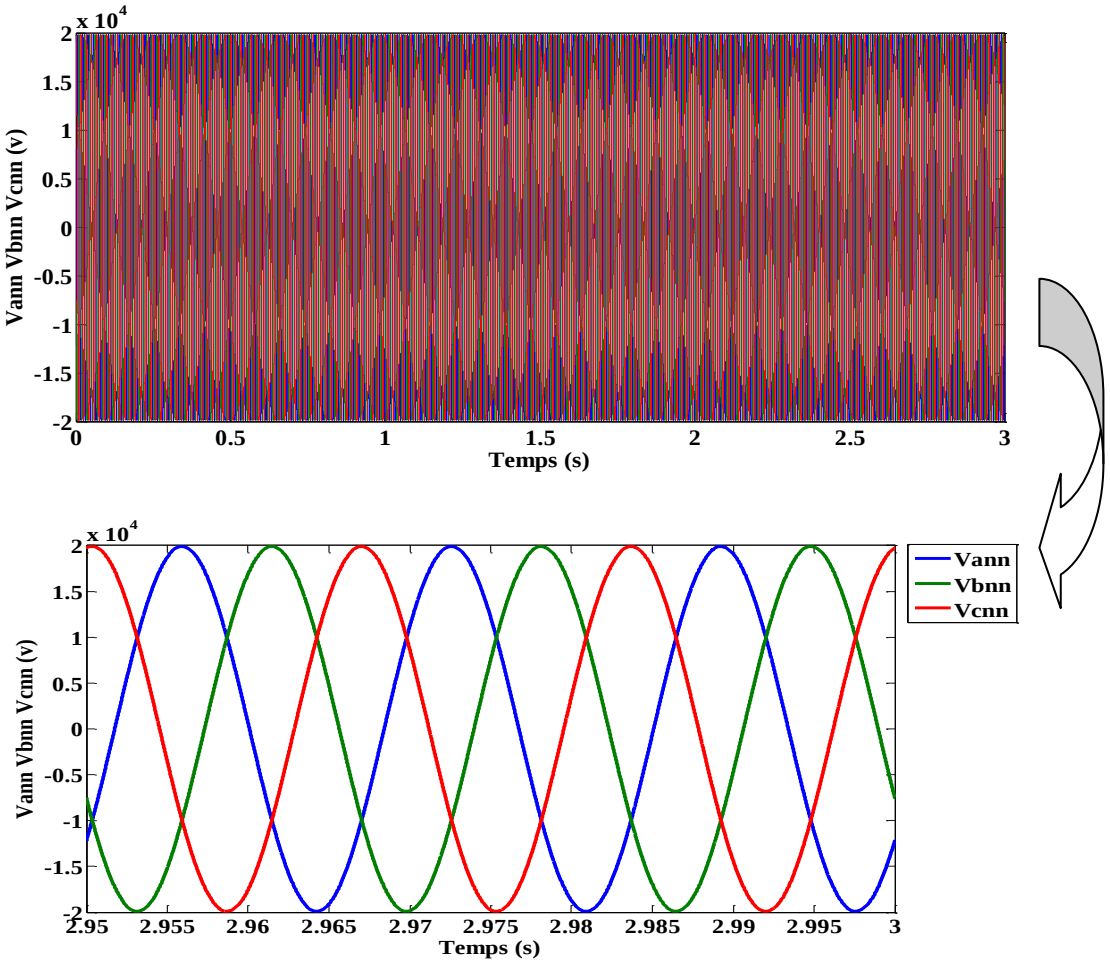



**Figure (IV.29) :** Les tensions Vabc.

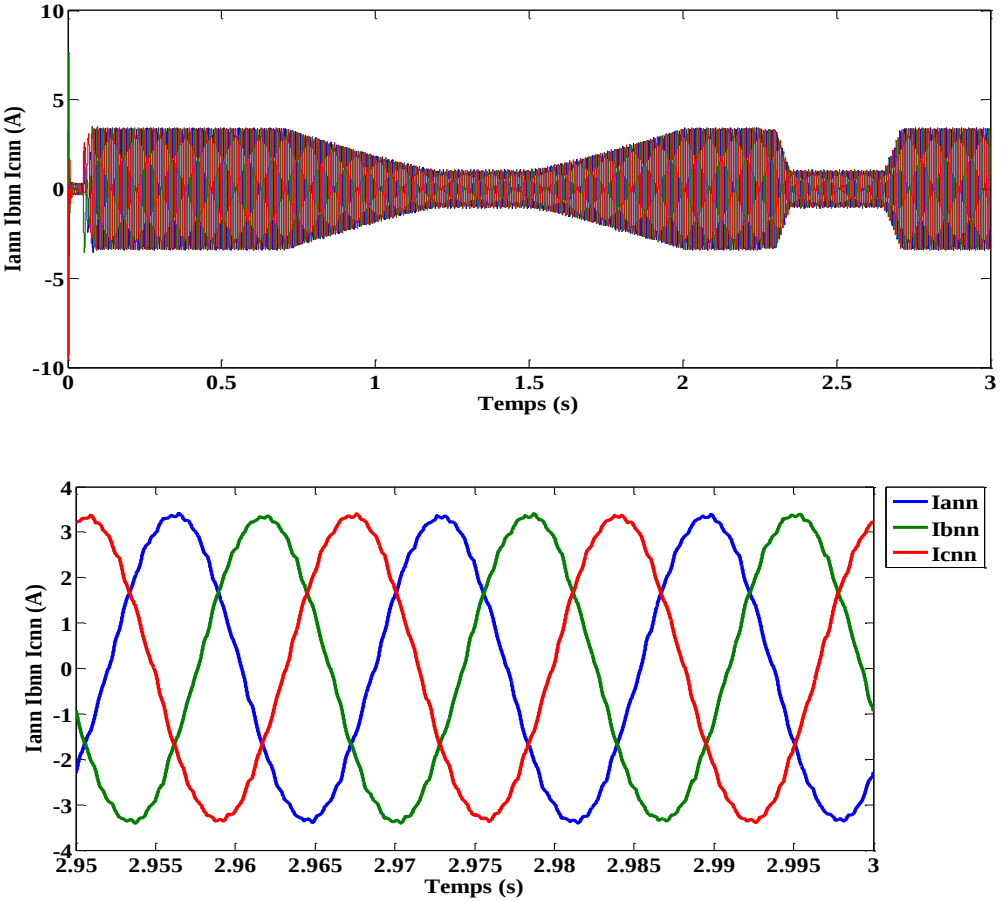



**Figure (IV.30) :** Les courants Iabc.

On observe de la figure (IV.31) 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).

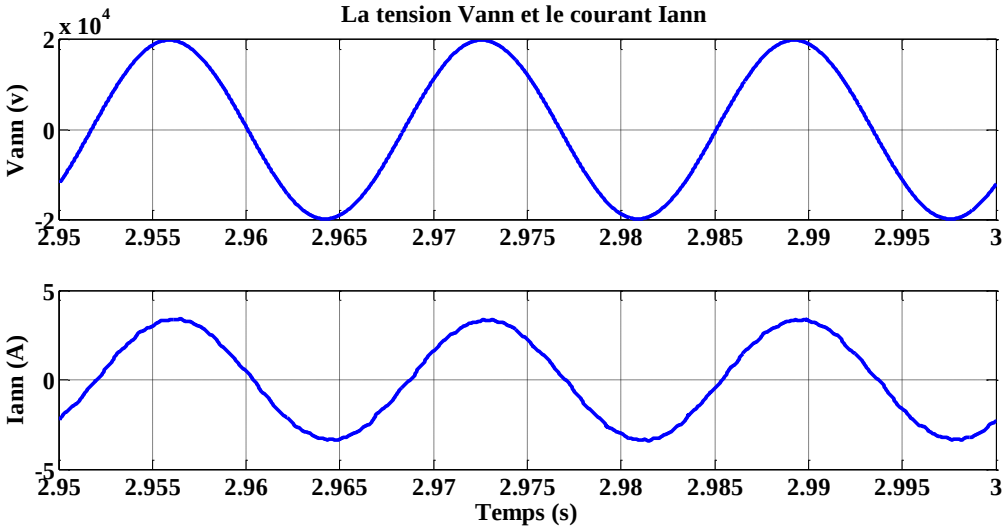



**Figure (IV.31) :** La tension Va et le courant Ia.

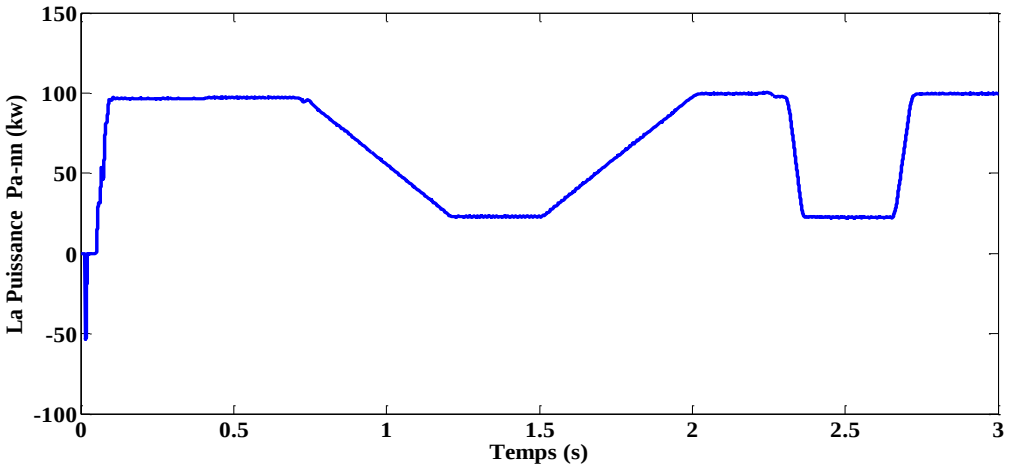



**Figure (IV.32) :** La puissance Pa.

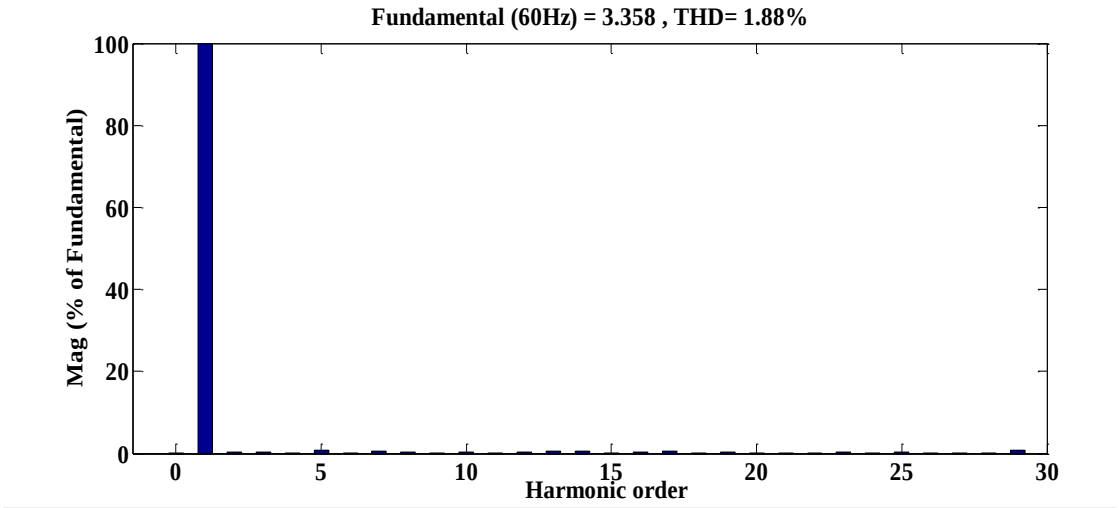



**Figure (IV.33) :** Les harmoniques de courant Ia.

### IV.3.4.Simulation du système avec le réseau de neuro-floue :

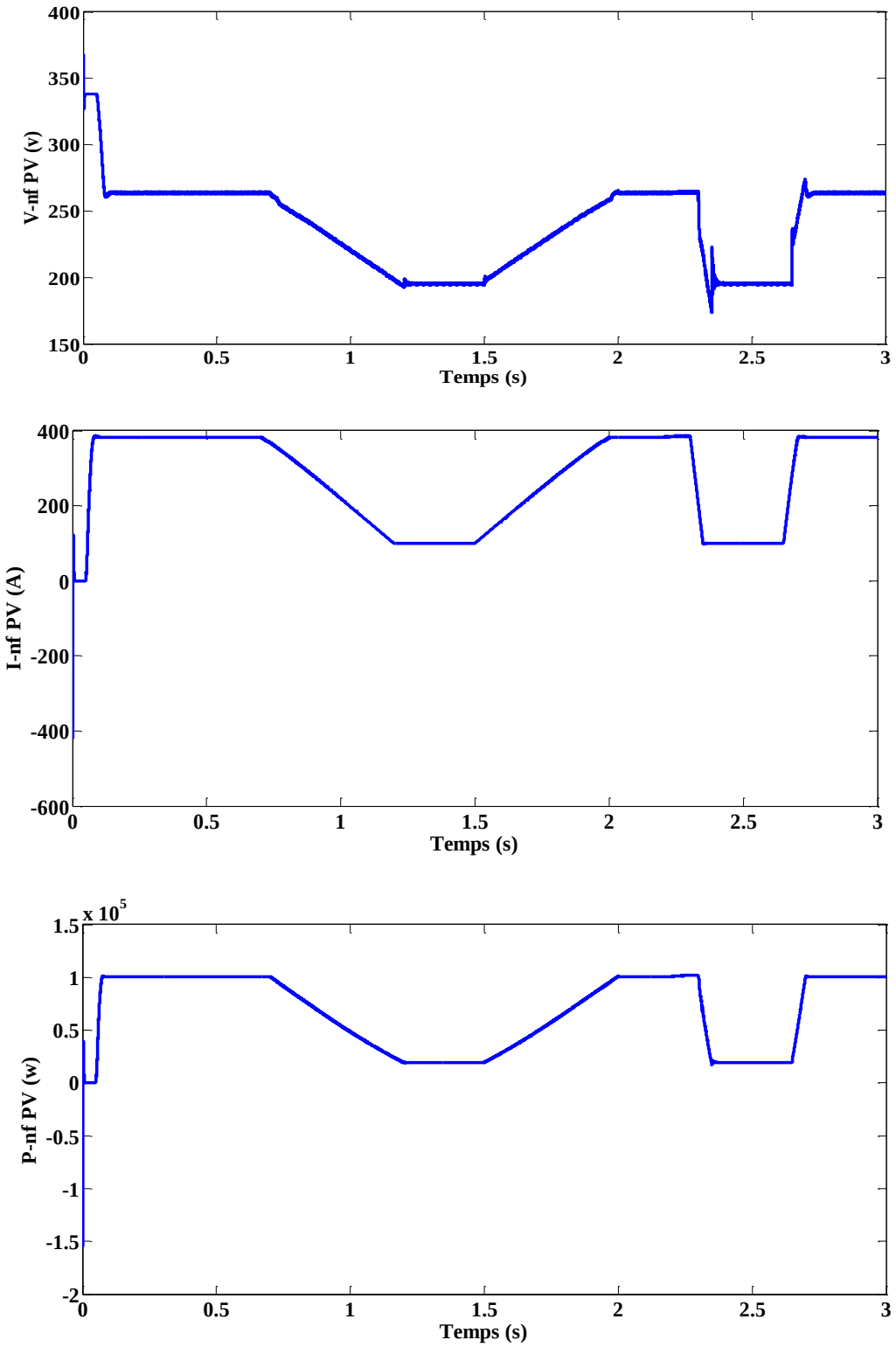



**Figure (IV.34) :** La tension PV, le courant PV puissance PV.

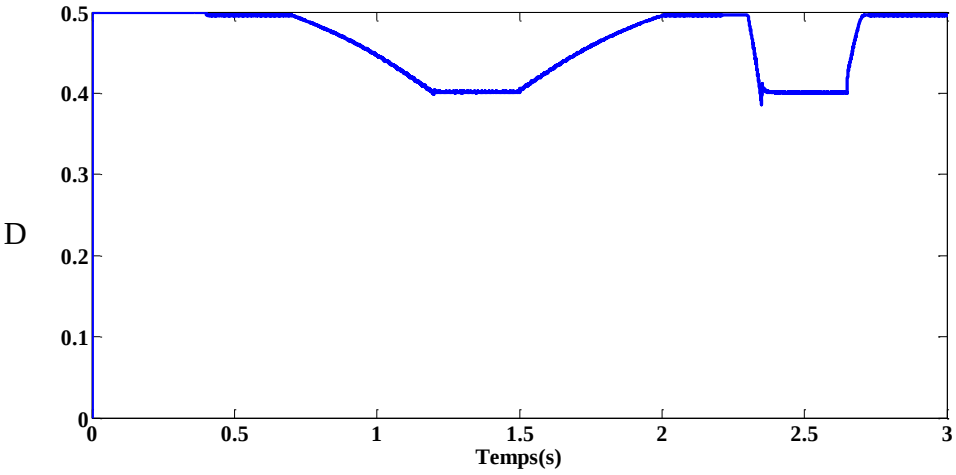



**Figure (IV.35) :** Le rapport cyclique

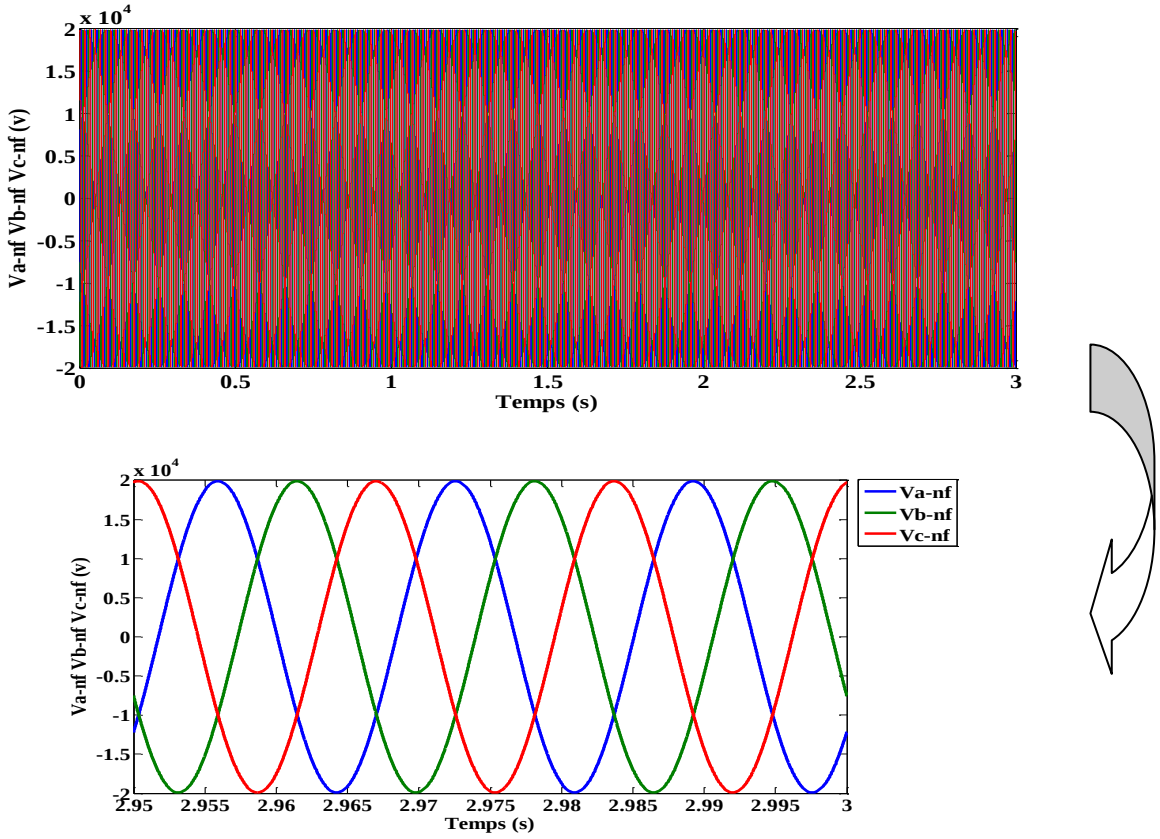



**Figure (IV.36) :** Les tensions Vabc.

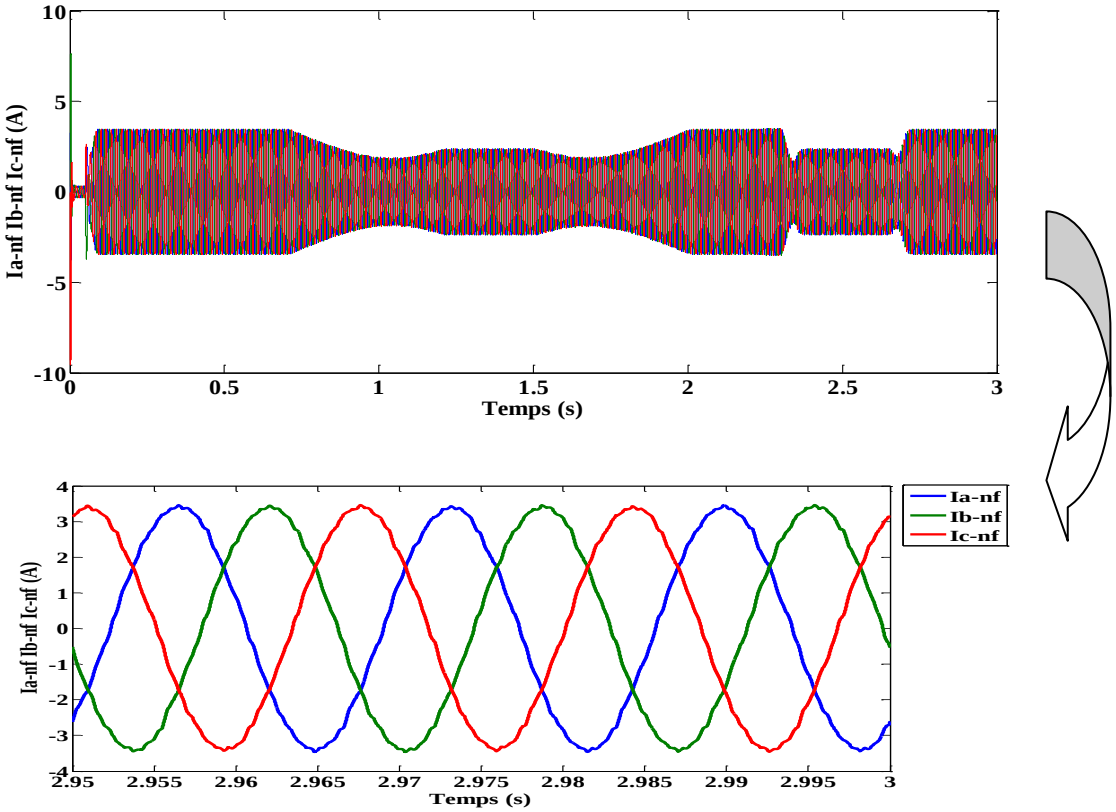



**Figure (IV.37) :** Les courants Iabc.

On observe de la figure (IV.38) 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).

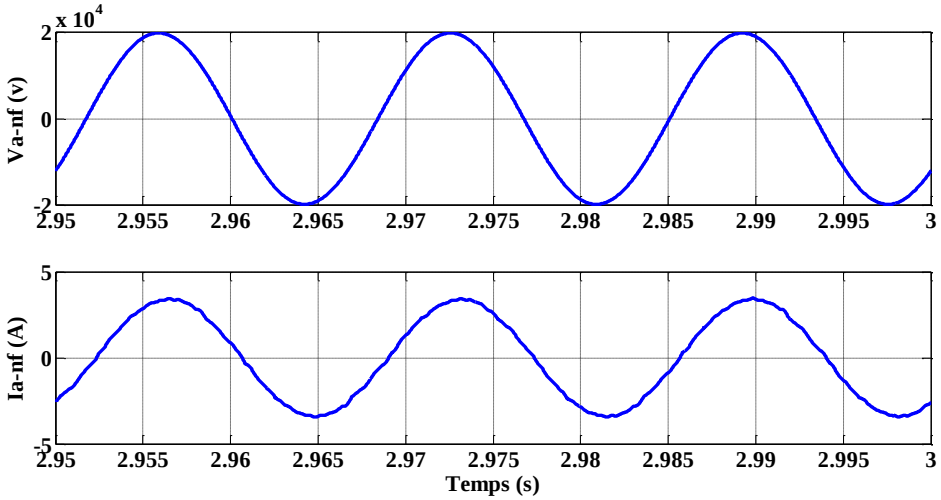



**Figure (IV.38) :** La tension Va et le courant Ia.

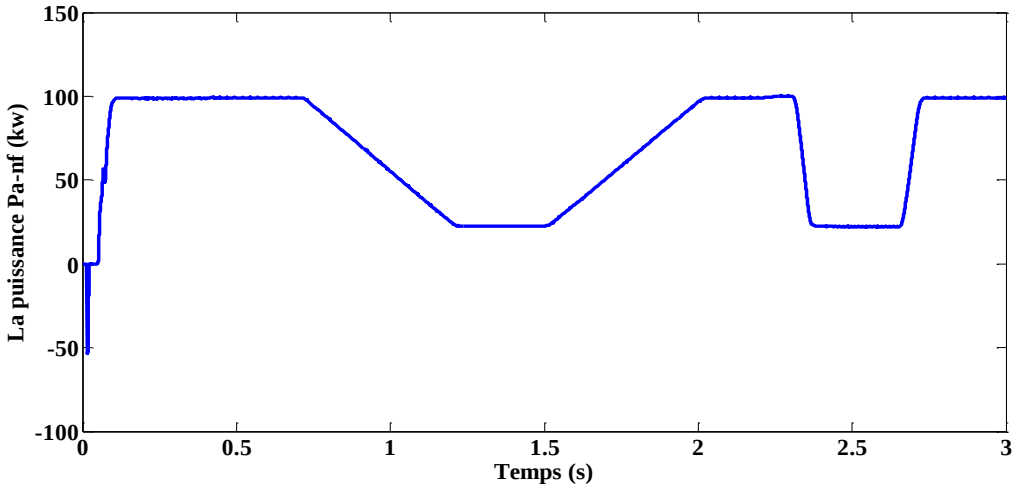



**Figure (IV.39) :** La puissance Pa.

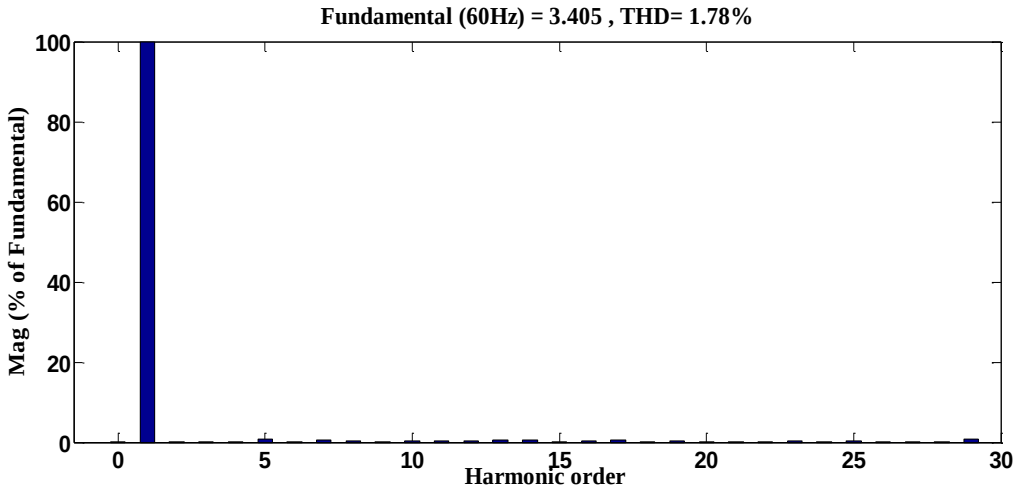



**Figure (IV.40) :** Les harmoniques de courant Ia

## IV.4. Etude comparative de la puissance entre les quatre contrôleurs :

Les quatre 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 quatre régulateurs au niveau de la puissance produite par le système PV avec un changement d'irradiation G et de température T (stable, rapide et lent).

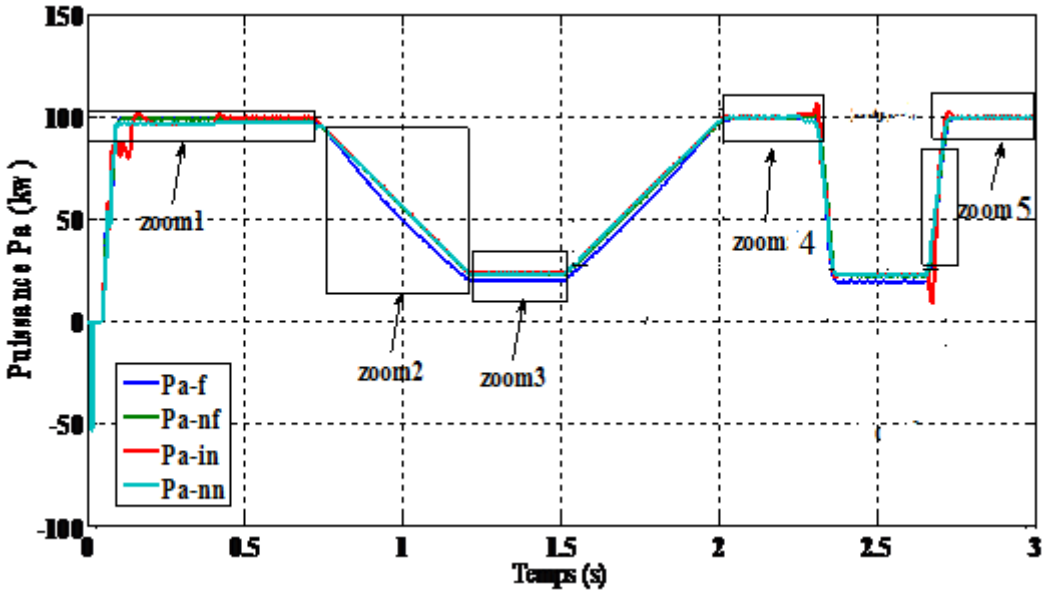



**Figure (IV.41) :** variation de la puissance des quatre régulateurs.

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

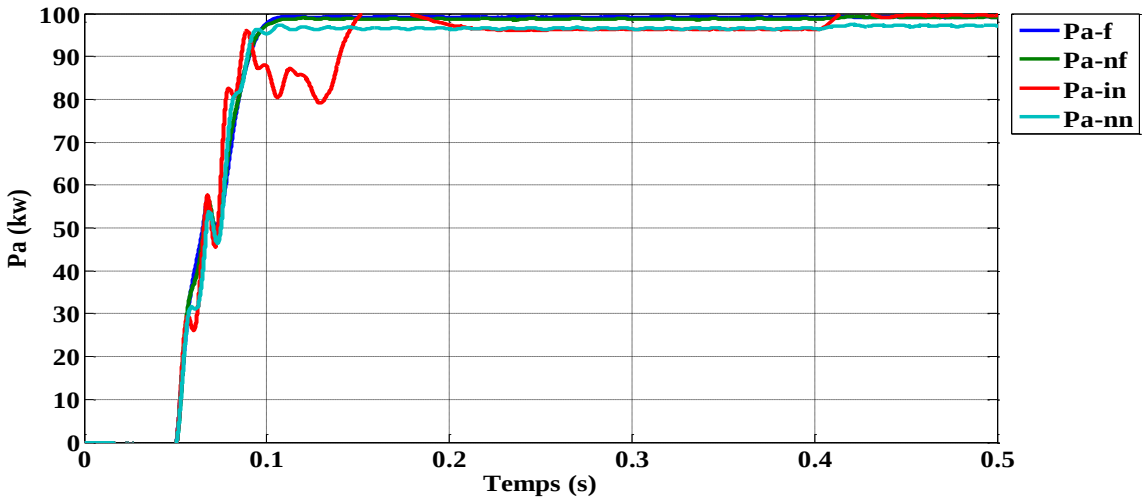



**Figure (IV.42):** Zoom1.a.

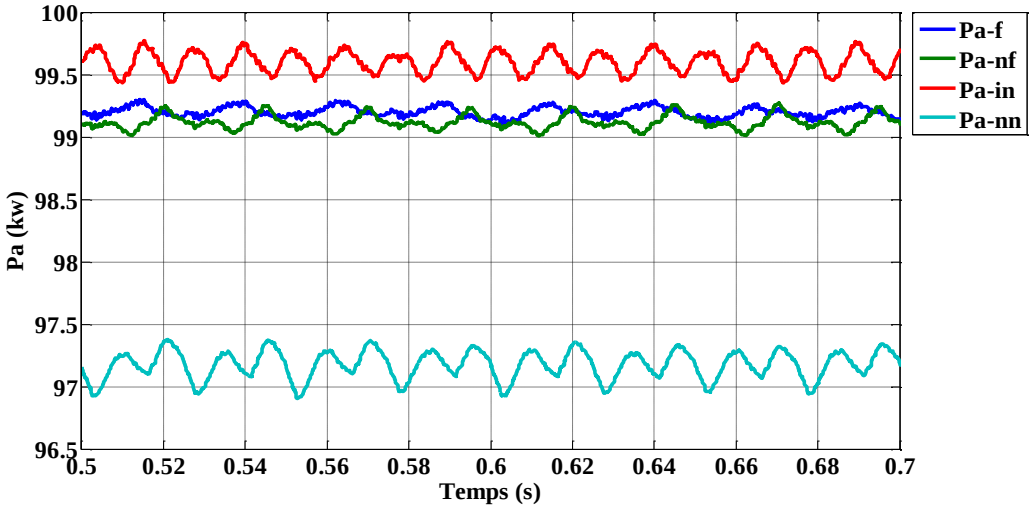



**Figure (IV.43):** Zoom1.b.

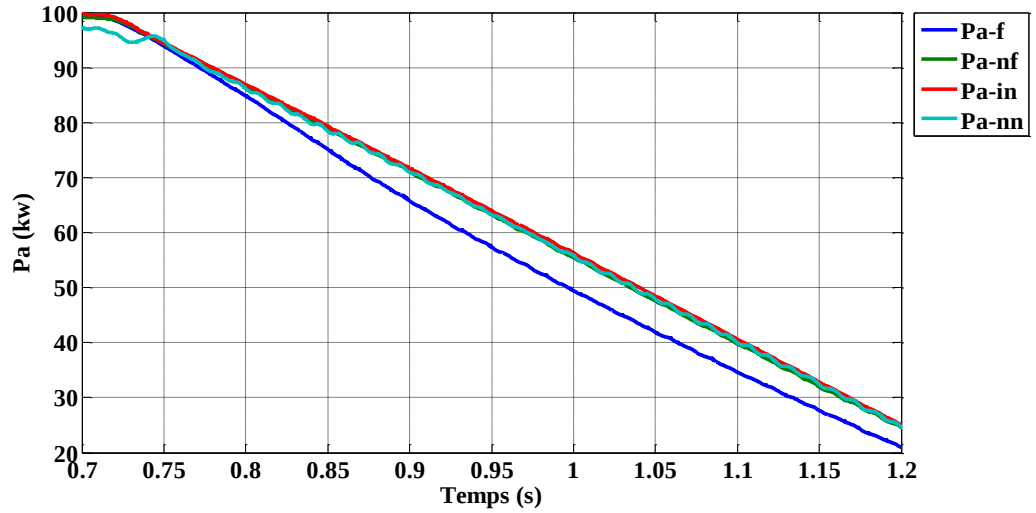



**Figure (IV.44):** Zoom2.

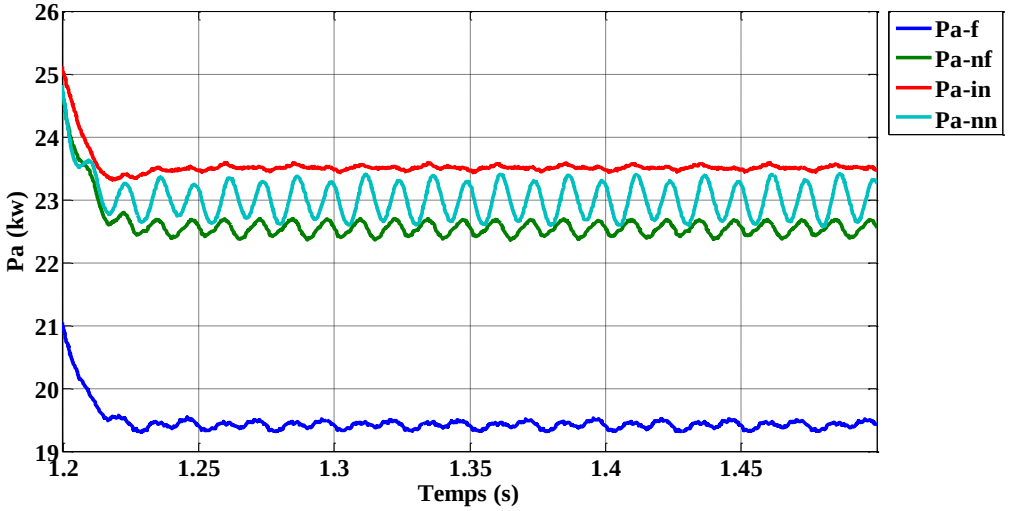



**Figure (IV.45):** Zoom3.

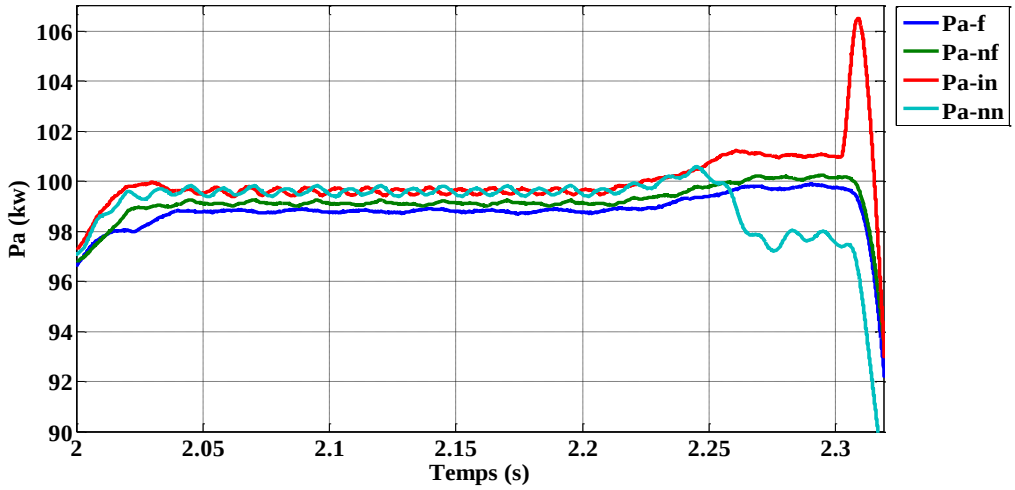



**Figure (IV.46):** Zoom4.a.

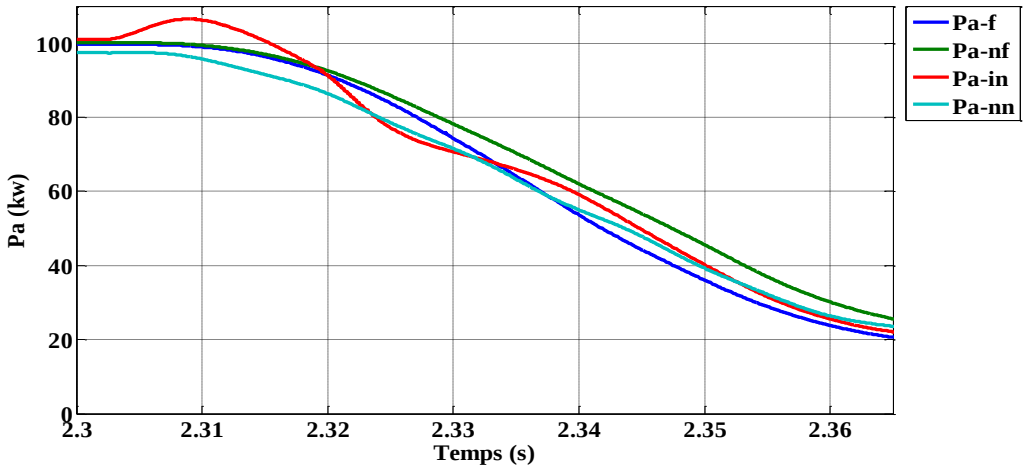



**Figure (IV.47):** Zoom4.b.

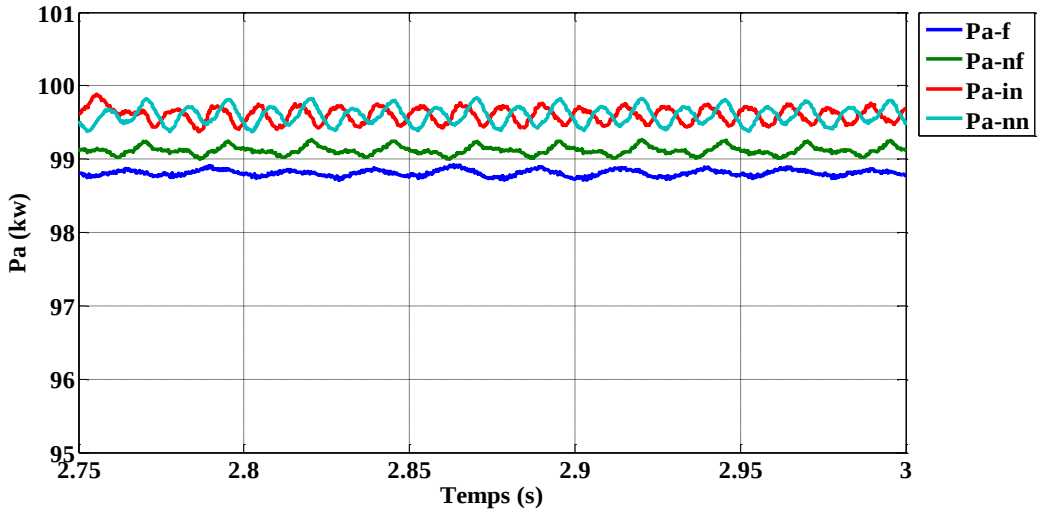



**Figure (IV.48):** Zoom5.

- D'après la figure (IV.42), il est claire que le régulateur par la logique flou est le plus rapide (avec un temps de réponse égale à 0.12s), suivie par le réseau de neurone (avec un temps de réponse égale à 0.41s), ensuite le neuro-floue (avec un temps de réponse égale à 0.46s), puis la technique IncCond (avec 0.46s)
- D'après la figure (IV.43), L'erreur statique qui présenté par le régulateur neuronal et « INC », est important mais la logique floue et le neuro-floue il est presque nulle.
- A partir de la figure (IV.44), lorsque la diminution lente de l'irradiation G (de G=1000 jusqu'à 250W/$m^2$ )et la température T (à T=25°C jusqu'à15°C) entre[0.7s-1.2s] Nous remarquons que la commande MPPT floue suit rapidement le PPM suivie par Neuro-floue et (INC). Puis le réseau de neurone avec une réponse lente.

- Dans la figure(IV.45) on a vu que la technique « INC » suit le PPM avec de meilleures performances, suivi par « le réseau de neurone» et « le réseau de Neuro-floue » mais avec des oscillations puis « la logique floue » avec des oscillations autour de PPM et une dégradation de puissance .

- Dans la figure (IV.46) et la figure(IV.47) et lors de la diminution rapide de l'irradiation de 1000w/$m^2$ jusqu'à 250 w/$m^2$ et la température de 25°C jusqu'à 20°C[2.25s-2.3s] on a vu que la commande floue et Neuro-floue suit bien le PPM, suivi par la technique INC qui fait une erreur de poursuite importante et après le réseau de neurone.

- Et pour la stabilité finale de l'irradiation et la température figure(IV.48) nous remarquons que tous les contrôleurs suivent le PPM avec des différents puissances.

  - ✓ Nous allons résumer la puissance maximale produite par le panneau photovoltaïque dans des intervalles ou l'irradiation et la température sont stables, en appliquant les quatre contrôleurs MPPT, à partir de la figure(IV.38) l'étude sera divisée en cinq intervalles.

**Tableau (IV.8) :** les puissances de panneau dans certains intervalles.

| Temps / MPPT | [0.05,0.7] | [1.2, 1.5] | [2, 2.3] | [2.35, 2.65] | [2.7, 3] |
|---|---|---|---|---|---|
| IncCond | 99.65 kW | 23.5kW | 99.4kW | 22.86kW | 99.45kW |
| Logique floue | 99.2kW | 19.5kW | 98.88kW | 19.2kW | 98.8kW |
| Réseau de neurone | 97.3kW | 23.2kW | 99.5kW | 22.87kW | 99.7kW |
| Réseau de Neuro-floue | 99.1kW | 22.5kW | 99.25kW | 22.38kW | 99.15kW |

D'prée les figure (IV.19),(IV.26),(IV.33),(IV.40), on a vu que la meilleure valeur de THD est donné par le régulateur Neuro-floue, suivi par la logique floue suivi par le réseau de neurone et IncCond avec une valeur maximale, grâce a les méthodes de l'intelligence artificiel .

## IV.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé les quatre régulateurs MPPT (IncCond, logique floue, réseau de neurone et Neuro-floue), avec des régulateurs de commande de l'onduleur (PI, et les autres intelligences artificielles).

Les résultats des simulations montrent que l'algorithme 'INC' donne des bonne résultats au niveau de la puissance délivrée mais avec une erreur de poursuite importante et une valeur max de THD. Par contre les commandes basées sur l'intelligence artificielles montre un bon comportement et des meilleures performances par rapport à la méthode classique.

Et parmi les techniques d'intelligence artificielle la méthode de réseau de neurone montre des meilleures performances au niveau de la puissance délivrée , suivi par le réseau de neuro-floue et la logique floue.

La commande neuro-floue donne une minimisation d'harmonique suivi par la logique floue, réseau de neurone et l'algorithme IncCond.

# *Conclusion générale*

# *Conclusion générale*

Le travail qu'on a présenté porte sur la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque (PV) relie à un réseau de distribution commandé par un régulateur MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV et deux régulateurs de tension et de courant qui commandé l'onduleur.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). décrié le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT basées sur l'algorithme IncCond et trois commandes d'intelligence artificielle (la logique floue, le réseau de neurone et le réseau de neuro-floue).puis on a fait une commande VSC qui contrôlé l'onduleur avec la méthode PI et les commandes d'intelligence artificielle présidentes

La simulation a été réalisée sous logiciel Matlab-Simulink 2013b avec SimPowerSystème d'une version de 8.1.0.604.

D'après les résultats obtenus, on a relevé les points suivants :

- ✓ L'algorithme 'INC' donne des bons résultats au niveau de la puissance délivrée avec un temps de réponse lent, une erreur de poursuite importante, des oscillations et une valeur max de THD
- ✓ Les commandes basées sur l'intelligence artificielle montrent un bon comportement et des meilleures performances par rapport à la méthode classique.
- ✓ La commande réseau de neurone montre des meilleures performances suivies par le réseau de neuro-floue et la logique floue au niveau de la puissance délivrée.
- ✓ La commande neuro-floue une minimisation d'harmonique suivi par la logique floue, réseau de neurone et l'algorithme IncCond.

# BIBLIOGRAPHIE


[1] F. **Chekired**, « etude et implémentation d'une commande mppt neuro-floue sur *FPGA*», mémoire de magister, ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[2]http://tepeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/principe-de-la-cellule-photovoltaique.html, en ligne 24/01/2018.

[3] **M.Blhadj**,«modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome»,mémoire de magister centre universitaire de Bechar ,2007-2008.

[4] **M.L.Louazane** ,«etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla»,mémoire de magister université El Hadj Lakhdar-Batna, 16/06/2008.

[5] **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.

[6] **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.

[7] **M. Adouane**, «etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», mémoire de magistère, ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[8] **S. Bellakehal**, «conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux energies renouvelables», thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie, 2010.

[9] **W.Bensaci**, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master,université Kasdi Merbah,Ouargla, 2011/2012.

[10] **M.N.Mchalikh et CH.Hmada**, « modélisation et simulation d'un système photovoltaïqueen fonctionnement autonome et connecté au réseau », mémoire de master ,université Kasdi Merbah,Ouargla ,2013.

[11] **I.Bendjamaa**,«modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque», mémoire de magister, université Abou-Baker Blkaid,Tlemcen, 2011/2012.

[12] **DRIDI Toufik ,BENBOUABDELLAH Oumsaad**, «commande par intelligence artificiel d'un générateur solaire photovoltaique», mémoirede master en electrotechnique ,2016.

[13] **T.T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, D. Bonkoungou,** «modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel matlab/simulink », journal international de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'energie et de l'environnement, vol. 2, n°1, 1, 2016.

[14] **P. Sahebrao N, R. C. Prasad** , «design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using simulink model», international journal of research in engineering and applied sciences (IJREAS), ISSN : 2249-9210, Vol.02, Issue.01, pp.37-40.

[15] **K. Kassmi, M. Hamdaoui,** « conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique», revue des energies renouvelables, Vol.10, No.4, pp.451-462,Olivié ,2007.

[16] **C. Jena, A. Das, C. K. Panigraphi, M. Basu** , « modelling and simulation of photovoltaic module with buck-boost converter», international journal of advanced engineering and nano technology (IJAENT), ISSN: 2347-6389, Vol.01, Issue.3, pp.18-21,2014.

[17] **S. Sumath, L. A. Kumar, P. Surekha** , «solar pv and wind energy conversion systems an introduction to theory», modeling with matlab/simulink, and the role of soft computing techniques, ISSN: 978-3-319-14940-0, pp.677,2015.

[18] **S. Sholapur, K. R. Mohan, T. R. Narsimhegowda** , «boost converter topology for pv system with perturb and observ MPPT algorithm», IOSR journal of electrical and electronics engineering, IOSR-JEEE, e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, Vol.9, Issue.4, Doi : 10.9790/1676-09425056, pp.50-56,2014.

[19] **N. Agarwal**, « design and simulink of intelligent solar energy improvement with pv module», international journal of information and computation technology, ISSN : 0974-2239, Vol.4, No.6, pp.619-628,2014.

[20] **G. Seguier and F. Labrique**, «les convertisseurs de l'electronique de puissance», Tome 4: la conversion continu-alternatif", edition lavoisier, technologie & documentation, 1989.

[21] **A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi**, «a new neutral-point-clamped PWM inverter», IEEE transactions on industry applications, Vol.1A-17, N°5, pp. 518 – 523, 1981.

[22] **J. Sheng Lai and F.Z. Peng**, «multivel converters- a new breed of power converters», IEEE transactions on industry applications, Vol. 32, N°3, pp. 509 – 517, 1996.

[23] **E.M. Berkouk**, « contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées alimentées par des convertisseurs directs et indirects. application aux gradateurs et onduleurs multiniveaux», thèse de doctorat, C.N.A.M, Paris 1995.

[24**] M. Saeedifard and A.R. Bakhshai,** « vector classification and voltage control in pwm three- level inverters», power electronics specialists conference'04, N°35, Aachen, Germany, pp. 4411 – 4417, 20-25 June, 2004.

[25] **Lei Hu, Hongyan Wang, Yan Deng and Xiangning He**, « a simple svpwm algorithm for multilevel inverters», power electronics specialists conference04, N°35, aachen, Germany, pp. 3476 – 3480, 20-25 June, 2004.

[26] **LAREF Soumia ,CHOURAR Nour el Houda,** «commande d'un hacheur solaire photovoltaïque par des techniques d'intelligence artificielle», mémoire de master en electrotechnique ,2017.

[27] **OUDJOUADJ Sofiane Mr.BENNINI MohamedAmine,** «etude de lapoursuite dupoint depuissancemaximale MPPT d'un generateur photovoltaïque base sur l'intelligence artificielle», mémoire de master en génie électrique,2015.

[28] **G.remy, O.bethoux, C.marchand, H.dogan**,« laboratoire de génie electrique de Paris (LGEP) / SPEE-Labs, CNRS UMR 8507» , supelec; université pierre et marie curie P6, université Paris-Sud 11, 11 rue Joliot Curie, plateau de moulon F91192 gif sur Yvette CEDEX, France.

[29] **B.Kanji**, «technique intelligentes pou poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque » ,magister en informatique industrielle, université Libanaise, 2012.

[30] **F.Hamidia**, « contribution à la neuro-flou de machine électrique » ,thèse doctorat de L'ENP,2013.

[31] **S.Issadi**, «commande d'une poursuite du point de puissance maximum MPPT par réseaux de neurones » ,magister en electricité solaire, université Bejaia,2006.

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

[33] **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.

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

[35] **F.Hamidia,** «les systèmes neuro-flous»,cours, universitié de médéa,2017.

[36] **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'annexe1**:Datasheet BP MSX120

bp solar

# BP MSX 120

120-Watt Multicrystalline Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. Providing 120 watts of nominal maximum power, the MSX 120 is used primarily in large battery-equipped PV systems or—through an inverter—to provide AC power directly to a load. Typical applications include grid-supplemental residential and commercial systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based navigation aids. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

This product is available as a framed module or an unframed laminate, in 12V or 24V nominal configurations, with either:

- Dual high-volume junction boxes which allow on-site 12V/24V selection by rewiring (MSX 120);
- Installation-speeding DC-rated polarized connectors (MSX 120MC).

## Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells configured as one series string or two 36-cell series strings (bypass diodes are included);
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



## Weatherproof Connectors

MSX 120MC output is via heavy-duty (4mm²/AWG #12) output cables with polarized weatherproof DC-rated connectors which provide reliable low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation. Asymmetrical cables enable side-by-side or end-to-end module placement in arrays.

## High-Capacity Versatile Junction Box

The junction boxes of the MSX 120 are raintight (IP54 rated) and accept PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Their volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal



## Bronze Anodized Universal Frame

connection blocks enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the boxes. Options include:

- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Products with junction boxes may be rewired to provide 12V or 24V output.

## Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

## Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point ($P_{max}$)—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.



BP MSX 120

MSX 120 laminates also qualify for the above listings and certifications; MSX 120MC laminates are UL-recognized. MSX 120 modules and laminates with junction boxes are also certified by PowerMark Corporation and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

©2002 BP Solar Global Marketing

## Quality and Safety

MSX 120 and MSX 120MC modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories, listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and comply with the requirements of IEC 61215 including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

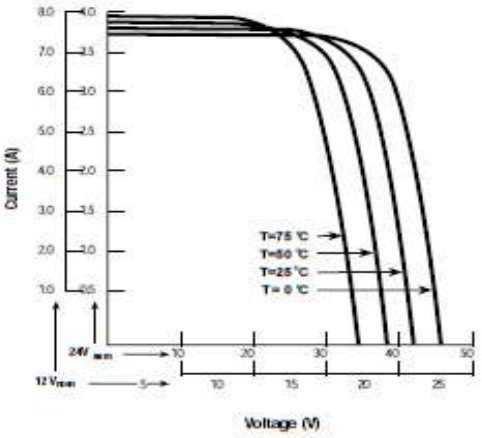
## Electrical Characteristics[1]

| | MSX 120 | MSX 110 |
|---|---|---|
| Maximum power ($P_{max}$)[2] | 120W | 110W |
| Voltage at $P_{max}$ ($V_{mp}$) | 33.7V | 33.6V |
| Current at $P_{max}$ ($I_{mp}$) | 3.56A | 3.3A |
| Minimum $P_{max}$ | 114W | 105W |
| Short-circuit current ($I_{sc}$) | 3.87A | 3.6A |
| Open-circuit voltage ($V_{oc}$) | 42.1V | 41.6V |
| Temperature coefficient of $I_{sc}$ | (0.065±0.015)%/°C | |
| Temperature coefficient of $V_{oc}$ | -(80±10)mV/°C | |
| Temperature coefficient of power | -(0.5±0.05)%/°C | |
| NOCT[3] | 47±2°C | |
| Maximum system voltage | 600V (U.S. NEC rating)<br>1000V (TÜV Rheinland rating) | |
| Maximum series fuse rating | 20A | |

## Notes

1. These data represent the performance of typical MSX 110 and MSX 120 products in 24V configuration. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
   - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
   - cell temperature of 25°C.
2. During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical $P_{max}$.
3. The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.
4. The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 110 is assembled using cells of slightly lower power than the MSX 120.

## MSX 120 I-V Curves



## Mechanical Characteristics

Weight
MSX 120, MSX 120MC 13.0 kg (28.6 pounds)

Dimensions
Framed modules: See drawing
MSX 120 laminate: 1097 [43.2] x 981 [38.6] x 48 [1.9]
MSX 120MC laminate: 1097 [43.2] x 981 [38.6] x 18 [0.7]
Unbracketed dimensions are in millimeters.
Dimensions in brackets are in inches.
Overall tolerances ±3mm (1/8")

