الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Electrotechnique

Option : Energie Solaire et Eolienne

THEME

Commande d'un Hacheur Solaire Photovoltaïque par des Techniques d'intelligence Artificielle

Proposé et dirigé par,

Mr : Morsli Abedelkader

Dr : Abbadi Amel

Préparé et présenté par,

Melle. LAREF Soumia

Melle. CHOURAR Nour el Houda

Dédicace

Dieu merci, pour cette occasion qui

m'a été offerte pour m'adresser à

Tous les gens que j'aime

Je dédie ce mémoire

A mon cher père

Et ma chère mère qui m'ont toujours soutenu,

A mes chères sœurs Amina , Hadjer, Ikram, et Ferdaous,

A ma petite nièce Nada

A toute la famille Chourar

Au Dr. Fekkak pour ces précieux conseils

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Et tous mes amies

Nour el houda

Dédicace

Dieu merci, pour cette occasion qui

m'a été offerte pour m'adresser à

Tous les gens que j'aime

Je dédie ce mémoire

A mon cher père

Et ma chère mère qui m'ont toujours soutenu,

A mon chèr frère Ayuob

A mes chères sœurs Asmaa, Hadjer, Roumaissa, Tayssir , Takwa et Oumaima,

A ma petite nièce Loudjine

A toute la famille Laref

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Et tous mes amies

Soumia

Remerciements

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

Aussi, nous tenons à adresser du fond du cœur nos remerciements les plus chaleureux à nos encadreur et Co-encadreur Mr .MORSLI Abdelkader et Dr. ABBADI Amel en nous soutenant et nous encourageant avec leurs précieux conseils,

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

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

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui vont évaluer notre travail.
Et un grand merci à tous ceux
qui nous ont aidés de près ou de loin.

ملخص

يهتم هذا العمل بتعقب نقطة الاستطاعة القصوى الخاصة بالألواح الكهروضوئية كما يهتم ببعض التقنيات الكلاسيكية والحديثة الموجودة في المؤلفات. و على سبيل المثال "التذبذب و الملاحظة" ، " تدريج الناقلية " و"المنطق الضبابي " المستعمل منها ضمن محتوى هذه المذكرة:

غير أن اهتمامنا منصب أكثر على الطريقة الحديثة في التحكم المنمذجة في إطار الذكاء الاصطناعي .المعروفة باسم التحكم با لمشابك العصبونية.التي تعتمد أساسا على محاكاة ميكانيزمات العصبون البيولوجي في مبدأ عمله في المحاكاة

وقد سمحت لنا بتجسيد فكرة ناجعة وفعالة في التحكم العصبوني على حساب باقي الطرق الكلاسيكية.

الكلمات المفتاحية: نظام متابعة نقطة الاستطاعة القصوى-.مولد كهروضوئي-التجريب والملاحظة-تدريج الناقلية-المنطق الضبابي-الذكاء الاصطناعي- المشابك العصبونية

Résumé :

Ce travail s'intéresse à la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des générateurs photovoltaïques et quelques commandes MPPT classiques et moderne existantes dans la littérature telles que : «Perturbation & observation», «Incrémentation de la conductance»et « Logique floue».

Notre intérêt s'est particulièrement dirigé sur une commande d'actualité qui fait partie de l'intelligence artificielle. C'est la commande par réseaux de neurones qui est basée essentiellement sur l'émulation des différents mécanismes du neurone biologique dans son principe de fonctionnement, où l'algorithme du gradient constitue le noyau des réseaux de neurones artificiels.

L'application s'est portée sur une étude suivie d'une simulation, qui nous a permis de conforter l'idée de la meilleure performance des contrôleurs neuronaux par rapport à leurs homologues moderne et classiques.

Mots clés : Contrôleur MPPT- générateurs photovoltaïque- Perturbation & observation- Incrémentation de la conductance- Logique floue- Intelligence artificielle- Réseau de neurones.

Abstract:

This workisconcernedwith the continuation of the maximum power point (MPPT) of the photovoltaic generators and someclassical and modern MPPT commandsexisting in the literaturesuch as: "Perturbation & observation", "Incrimination of conductance" and "Fuzzy logic"

Our interest has focused on a topical command thatis part of artificial intelligence. It is neural network control whichisbasedessentially on the emulation of the variousmechanisms of the

biologicalneuron in itsprinciple of operation, where the gradient algorithmconstitutes the nucleus of artificial neural networks.

The application wasbased on a studyfollowed by a simulation, whichallowed us to reinforce the idea of the best performance of neuronal controllerscompared to their modern and classiccounterparts.

Key word: MPPT controller-photovoltaic generators- Perturbation & observation-

Incrémentation of conductance- Fuzzy logical- artificiel intelligence- neural networks

Table des matières

Liste des Figures I
Liste des Tableaux II
Liste des Acronymes et Symboles II
Introduction générale 01

CHPITRE I : Généralité sur l'énergie solaire

I.1.Introduction 03
I.2.L'effet photovoltaïque 03
I.3.Technologies des cellules PV 04
I.4.La cellule photovoltaïque 05
I.5.Représentation des cellules PV 05
I.5.1.Modèle d'une cellule idéale (parfait) 06
I.5.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale (réelle 06
I.5.2.1.Avec une seule diode 06
I.5.2.2.Avec deux diodes 07
I.6.Les Paramètres d'une cellule PV 08
I.6.1.Tension de circuit ouvert Vco (pour Ico = 0) 08
I.6.2.Courant de court-circuit Icc (pour Vcc = 0) 08
I.6.3.La puissance maximale 08
I.6.4.Rendement énergétique n 08
I.6.5.Le facteur de forme 09
I.7.Association des cellules PV 09
I.7.1.Association série 09
I.7.2.Association parallèle 09
I.7.3.Association mixte (série parallèle) 10
I.8.Influence de l'éclairement sur la cellule PV 10
I.9.Influence de la température sur la cellule PV 11
I.10.Les générateurs PV 12
I.11.Installation des panneaux solaires 13
I.12.Le système de stockage 13
I.12.1.Les Batteries 14
I.12.2.Principe de fonctionnement 15
I.12.3.Caractéristique 15

I.12.1.3.1.Tension 15
I.12.1.3.2.Charge 16
I.12.1.3.3.Décharge 16
I.12.1.3.4.Résistance interne 16
I.12.1.3.5.Capacité 17
I.13.Les type d'énergie solaire 17
I.13.1.L'énergie solaire thermique 17
I.13.2.L'énergie solaire passive 17
I.13.3.L'énergie solaire photovoltaïque 18
I.14.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 18
I.14.1.Avantages 18
I.14.2.Inconvénients 19
I.15.Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) 19
I.15.1.Les types des hacheurs 19
I.15.1.1.Le Hacheur survolteur (Boost) 20
I.15.1.2.Le Hacheur dévolteur (Buck) 20
I.15.1.3.Le Hacheur Buck-Boost (Hacheur dévolteur-survolteur) 20
I.16.Conclusion 20

CHPITRE II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1.Introduction 21
II.2.Modélisation d'une cellule PV 21
II.2.1.Modèle d'une cellule PV idéale 21
II.2.2.Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle 22
II.2.2.1.Modèle d'une cellule PV avec une seule diode 22
II.2.2.2.Modèle d'une cellule PV avec deux diodes 23
II.3.Le module photovoltaïque 25
II.3.1.Modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque 26
II.4.Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) 26
II.4.1.Hacheur survolteur (Boost) 26
II.4.1.1.Modèle mathématique équivalent 27
II.4.1.2.Modèle approximé du convertisseur Boost) 27
II.4.2.Hacheur dévolteur (Buck) 29
II.4.2.1.Modèle du circuit équivalent 30
II.4.3.Hacheur dévolteur-survolteur (Convertisseur buck-Boost) 31

II.4.3.1 Modèle du circuit équivalent 31
II.5.Le système de stockage d'énergie électrique 32
II.5.1.Modélisation d'une batterie 33
II.6.Conclusion 35

Chapitre III : Méthodes de commande MPPT d'un Hacheur Boost

III.1.Introduction 36
III.2.La commande perturbation et observation 36
III.3.Algorithme d'incrémentation de l'inductance 37
III.4.La logique floue 38
III.4.1.Définition 38
III.4.2.Les fonctions d'appartenance 39
III.4.3.Structure générale d'un régulateur par logique floue 40
III.4.4.La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue: 41
III.4.5.Les avantages et les inconvénients 43
III.4.5.1.Les avantages 43
III.4.5.2.Les inconvénients 43
III.5.Réseau de neurone 44
III.5.1.Historique 44
III.5.2.Le neurone biologie 44
III.5.2.1.Le corps cellulaire 44
III.5.2.2.Les dendrites 44
III.5.2.2.L'axone 44
III.5.3.Le neurone artificiel 45
III.5.4.Les composants d'un réseau de neurone 46
III.5.5.Les différentes structures des réseaux de neurones 46
III.5.5.1.Réseau de neurones multicouches 46
III.5.5.2.Réseau à connexions locales 47
III.5.5.3. Réseau à connexions récurrentes 47
III.5.5.4. Réseau à connexions complètes 48
III.5.6.Les fonctions d'activations 48
III.5.7.Les techniques d'apprentissage 49
III.5.7.1.Apprentissage supervisé 49
III.5.7.1.Apprentissage non supervisé 49
III.5.8.Les avantages et les inconvénients 49

III.5.8.1.Les avantages 49
III.5.8.2.Les inconvénients 50
III.6.Conclusion 50

Chapitre IV : Résultat des quatre commandes et interprétation

IV.1.Introduction 51
IV. 2. Résultats de simulation des caractéristiques du panneau photovoltaïque sans MPPT 51
IV.3.Simulation du système photovoltaïque adapté par les quatre commandes MPPT (P&O, FL, IncCond, NNA) 53
IV.3.1.Conditions standards (T=25^{0}C & G=1000W/m^2) 53
IV.3.2.Comportement des quatre méthodes à un changement de température 57
IV.3.3.Comportement des quatre méthodes à un changement d'irradiation ..... .61
IV.3.4.Comportement des quatre méthodes à un Changement de température et Changement d'irradiation 64
IV.4. Discussion 68
IV.5.Conclusion 69
Conclusion générale 70
Annexe 72
Bibliographie 77

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1.Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque 04
Figure I.2.Modèle électrique d'une cellule PV idéale..... 06
Figure I.3.Schéma équivalent d'une cellule PV à une seule diode 07
Figure I.4.Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes 08
Figure I.5.Association en série 10
Figure I.6.Association parallèle..... 10
Figure I.7.L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V 11
Figure I.8.L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V 11
Figure I.9.L'influence de la température sur la caractéristique I-V 12
Figure I.10.L'influence de la température sur la caractéristique P-V 12
Figure I.11.Rassemblement de la cellule PV 13
Figure I.12.Intégration du photovoltaïque dans le bâtiment 14
Figure I.13.Composition interne d'une batterie plomb-acide 15
Figure I.14.Cellule électrochimique à plomb de base 16
Figure I.15.Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis 17
Figure I.16.Solaire thermique 18
Figure I.17.L'énergie passive 19
Figure I.18.L'énergie photovoltaïque 19
Figure I.19.Symbole d'un convertisseur DC-DC 20

CHAPITRE II

Figure II.1.Modèle électrique d'une cellule PV idéale 21
Figure II.2.Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire 23
Figure II.3.Modèle électrique d'une cellule solaire avec deux diodes 24
Figure II.4.Module photovoltaïque 26
Figure II.5.Circuit électrique de base du hacheur survolteur 27
Figure II.6.Circuit électrique de base du hacheur dévolteur 30
Figure II.7.Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur 31
Figure II.8.Batterie plomb-acide 33

CHAPITRE III

Figure III.1.Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation 37
Figure III.2.Organigramme de la méthode d'incrémentation de l'inductance 38
Figure III.3.Formes usuelles des fonctions d'appartenance 40
Figure III.4.Structure générale d'un régulateur par logique floue 41
Figure III.5.Fonction d'appartenance des variables d'entrées E et ΔE 42
Figure III.6.Fonction d'appartenance de la variable de sortie D 43
Figure III.7.Le modèle d'un neurone biologique 46
Figure III.8.Neurone Artificiel 46
Figure III.9.Réseau de neurones multicouches 47
Figure III.10.Réseau à connexions locales 48
Figure III.11.Réseau à connexions récurrentes 48
Figure III.12.Réseau à connexions complètes 49
Figure III.13.Quelque fonction d'activations 49

CHAPITRE IV

Figure IV.1.La courbe I-V 51
Figure IV.2.La courbe P-V 52
Figure IV.3.La courbe V-t 52
Figure IV.4.La courbe I-t 52
Figure IV.5.La courbe P-t 53
Figure IV.6.Température et Irradiation Constantes 54
Figure IV.7.La courbe I-V 54
Figure IV.8.La courbe P-V 54
Figure IV.9.Le courant du panneau 55
Figure IV.10.La tension du panneau 55
Figure IV.11.La Puissance du panneau 55
Figure IV.12.Le courant de la batterie 56
Figure IV.13.La tension de la batterie 56
Figure IV.14.La Puissance de la batterie 56
Figure IV.15.Le rapport cyclique D 57
Figure IV.16.Changement de Température et l'Irradiation Constant 58
Figure IV.17.La courbe I-V 58
Figure IV.18.La courbe P-V 58

Figure IV.20.La tension du panneau 59
Figure IV.21.La puissance du panneau 59
Figure IV.22.Le courant de la batterie 60
Figure IV.23.La tension de la batterie 60
Figure IV.24.La puissance de la batterie 60
Figure IV.25.Le rapport cyclique D 61
Figure IV.26.Changement de l'Irradiation et Température Constant 62
Figure IV.27.La courbe I-V 62
Figure IV.28.La courbe P-V 62
Figure IV.29.Le courant du panneau 63
Figure IV.30.La tension du panneau 63
Figure IV.31.La puissance du panneau 63
Figure IV.32.Le courant de la batterie 64
Figure IV.33.La tension de la batterie 64
Figure IV.34.La puissance de la batterie 64
Figure IV.35.Le rapport cyclique D 65
Figure IV.36.Changement de l'Irradiation et de Température 66
Figure IV.37.La courbe I-V 66
Figure IV.38.La courbe P-V 66
Figure IV.39.Le courant du panneau 67
Figure IV.40.La tension du panneau 67
Figure IV.41.La puissance du panneau 67
Figure IV.42.Le courant de la batterie 68
Figure IV.43.La tension de la batterie 68
Figure IV.44.La puissance de la batterie 68
Figure IV.45.Le rapport cyclique D 69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau .III.1 : Exemple d'une table des règles pour une commande logique floue 43

Tableau IV.1. Comparaison des techniques MPPT 57

Tableau IV.2. Comparaison des techniques MPPT 69

LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLES

ACRONYMES

DC/DC Conversion continu/continu

GPV Générateurs photovoltaïques

IncCond Incrémentation de conductance

PPM Point de puissance maximale

DC Direct current

MPPT Maximum Power Point Tracking

P&O Perturbation et observation

FL La logique floue

NNA Réseau de neurone

PV Photovoltaïque

FF Le facteur de forme

I-V Courant-tension

P-V Puissance-tension

PS Panneaux solaire

CST Condition standard

SYMBOLES

Iph : Le courant généré par la cellule solaire [A].

I_C: Le courant de sortie de la cellule PV [A].

V_C : La tension de sortie de la cellule PV [V].

I_D: Le courant de diode [A].

G : les rayonnements solaire

Tc : la température [C°]

R_S : Résistance Série [Ω].

Rp : Résistance parallèle [Ω].

Id1 : Le courant de diode 1 [A].

Id2 : Le courant de diode 2 [A].

I_{Rp} : Le courant de résistance parallèle [A].

Pmax : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV [W].

Vco : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV [V].

Icc : L'intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV [A].

Vcc : La tension de court-circuit [V].

Pinc : La puissance incidente [W].

En : L'ensoleillement [W/m^2].

S : La surface du module PV [m^2].

η : Le rendement énergétique [%].

V_{Pmax} : La tension au point de puissance maximale [V].

I_{Pmax} : Le courant au point de puissance maximale [A].

D : Le rapport cyclique

I_S: Courant de saturation de la cellule [A].

T_{ck} : Température de la cellule [K°].

S : Pourcentage d'insolation [%].

C_{bp} : Dérivée de l'expression générale de l'énergie dans un condensateur.

C: La capacité du condensateur [F].

V_c: La tension contrairement à un condensateur [V].

E : L'erreur

ΔE : Le changement d'erreur

Introduction Générale

Depuis le dernier siècle, la consommation en énergie a augmenté de manière considérable. Mais nos ressources en énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz, etc.) ne sont pas éternelles et il est en outre préférable de ne pas les brûler plus pour ne pas aggraver la pollution. La solution consiste en l'utilisation d'énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire biomasses, etc.) [1].

L'Algérie, recèle à cet effet d'importantes ressources énergétiques renouvelables qui peuvent pallier notamment dans le cadre de la production de l'énergie électrique, vecteur principal de tout développement économique et social. Le gisement solaire constitue la principale de ces ressources.

L'utilisation de cette énergie renouvelable de nature « aléatoire et diffuse » nécessite la combinaison de moyens de stockage et de contrôle de gestion de puissance où chaque générateur PV devrait fonctionner en un point optimal, appelé le point de puissance maximale (MPP), qui est subordonné à la variation de la température et de l'insolation.

Pour augmenter le rendement en puissance d'un module PV ou d'un champ de modules PV, un contrôleur électronique est incorporé entre le générateur PV et la charge, dont le rôle principal est la surveillance et poursuite en continu du point de puissance maximale du générateur PV appelé communément MPPT (Maximum Power Point Tracking) et cela en général par action sur un dispositif de conversion DC-DC.

Dans la littérature, on trouve des algorithmes basés sur les méthodes suivantes, telles que: Perturbation& Observation 'P&O', Incrément de la conductance 'IncCond' … etc. [2]. Ou par l'intelligence artificielle comme la logique floue 'FL' et réseau de neurones 'NNA' artificiels**.**

Ces techniques présentent des approches intelligentes pour l'amélioration et l'optimisation des performances de contrôle d'un système photovoltaïque.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit:

- Le premier chapitre est réservé pour fait une généralité sur l'énergie solaire. Et présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.
- Le deuxième est réservé pour la modélisation du système PV quelques types de convertisseurs DC-DC, ainsi le système de stockage d'énergie électrique.

- Dans le troisième chapitre, on étudie toutes les techniques de commandes MPPT proposées en ce mémoire classiques (P&O et IncCond) et intelligence artificielle (FL et NNA).

- Dans le quatrième chapitre, on fait une simulation par MATLAB/Simulink du système photovoltaïque (BPMSX60) sans et avec commandes MPPT (P&O, IncCond, FL et NNA). Enfin, nous avons fais une étude comparative entre ces méthodes suivant les résultats de simulation qu'on a trouvé.

Finalement, on termine par une conclusion générale

CHAPITRE I : Généralité sur l'énergie solaire

I.1. Introduction 03

I.2. L'effet photovoltaïque 03

I.3. Technologies des cellules PV 04

I.4. La cellule photovoltaïque 05

I.5. Représentation des cellules PV 05

I.6. Les Paramètres d'une cellule PV 08

I.7. Associations des cellules PV 09

I.8. Influence de l'éclairement sur la cellule PV 10

I.9. Influence de la température sur la cellule PV 11

I.10. Les générateurs PV 12

I.11. Installation des panneaux solaires 13

I.12. Le système de stockage 13

I.13. Les types d'énergie solaire 17

I.14. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 18

I.15. Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) 19

I.16. Conclusion 20

I.1. Introduction

Depuis la nuit des temps, l'être humain a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations sont directement liées à la vie de tous les jours comme dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles ou bien dans des phénomènes de réactions chimiques comme la photosynthèse. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface de la terre malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère.

Cette énergie est de l'ordre de 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et atteint 1400 W/m^2 dans les zones où l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou chargée d'eau. Sachant que le l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, la nature et de l'inclinaison de la surface terrestre.
- L'altitude, la latitude et du degré de pollution du lieu de collecte.
- La période de l'année, ainsi que de l'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Il existe donc des zones beaucoup plus ensoleillées dans le monde que d'autres. Celles-ci sont répertoriées sous forme d'atlas, mettant en évidence des «gisements solaires» [2].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

I.2. L'effet photovoltaïque

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé : effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi-conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire.

L'effet PV est un phénomène optoélectronique fut découvert par le physicien Français Edmond Becquerel en 1839.

Mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs américains des laboratoires *Bell*, *Chapin*, *Pearson* et *Prince*, développent la première cellule PV avec un rendement énergétique ne dépassant pas 4,5% au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites [3]

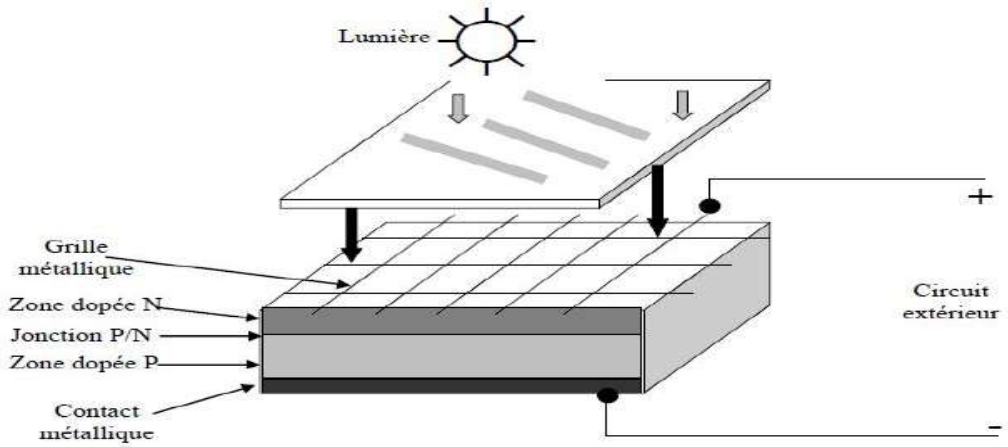


Figure I.1. Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque [4].

I.3. Technologies des cellules PV

Le matériau de base, utilisé dans la fabrication des cellules PV, est dans la plupart des cas le silicium. Cette technologie présente plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multi-cristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly cristalline, ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellurure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP), et Cu(InGa) Se2.

Le choix parmi ces différentes technologies dépend du prix et du rendement énergétique. Quelques rendements concernant les diverses photopiles existantes sont présentés ci-après [5, 6]. Les cellules monocristallines font partie de la première génération de photopiles. Elles ont un taux de rendement excellent de 24,7% en laboratoire.

Sun Power commercialise une cellule de même nature avec un bon rendement qui peut atteindre 24,2%. Cependant, leur méthode de production est laborieuse et difficile, et donc, très chère. Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. Les cellules poly cristallines ont un coût de production moins élevé, et utilisant un procédé moins gourmand en énergie, avec un rendement de 11 à 15% (19,8% en laboratoire). Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement avec un rendement plus bas 5 à 8% (13% en laboratoire).

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0,3 à 1,0 micromillimètres seulement (500 µ mm pour les deux autres types).

Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement. Cependant, ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffusée et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées.

Les cellules en composite monocristallin (AsGa) avec un rendement de 18 à 20% (27,5% en laboratoire).

Les cellules en composite poly cristallin (CdS, CdTe, CulnGaSe2, etc.) ont un rendement de 8% (16% en laboratoire) [4].

I.4. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [7] :

• Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif

• Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des pairs d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;

• Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [8].

I.5. Représentation des cellules PV

Les cellules PV sont représentées par deux différents modèles :

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

I.5.1. Modèle d'une cellule PV idéale (parfait)

Une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure I.2.Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [9].

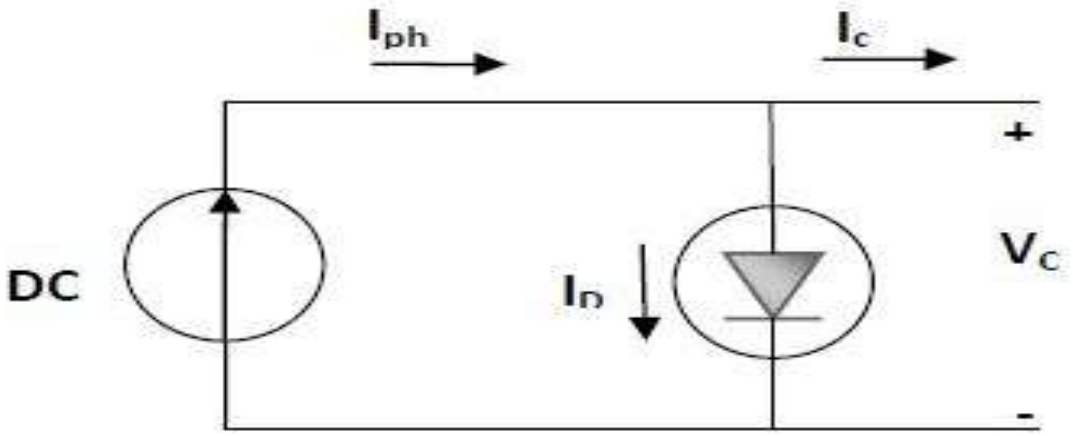


Figure I.2. Modèle électrique d'une cellule PV idéale.

Avec :

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

I.5.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale (réelle)

I.5.2.1. Avec une seule diode

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

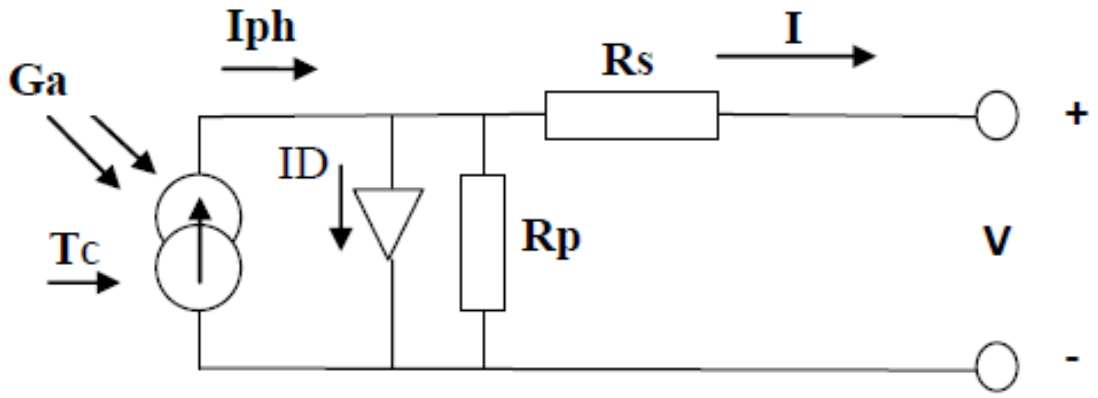


Figure 1.3. Schéma équivalent d'une cellule PV à une seule diode.

Avec :

- Ga : Les rayonnements solaire (W/M^2)
- Tc : la température (C°)
- Rs : Résistance Série (Ω).
- Rp: Résistance parallèle(Ω).

I.5.2.2. Avec deux diodes

Ce modèle a en plus une deuxième diode attachée en parallèle à la source de courant [10]. Cette diode est utilisée pour améliorer la précision des caractéristiques de cellule PV. En plus elle prend en considération la différence dans le flux de courant lorsque le courant est faible à cause de la recombinaison des charges dans la zone de déplétion du semi-conducteur.

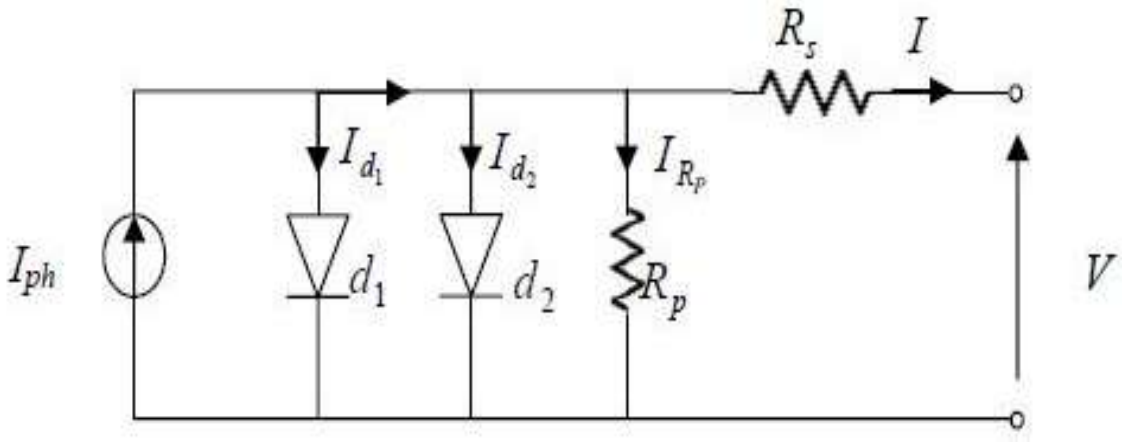


Figure 1.4. Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes.

Avec :

- I_{d1} : Le courant de diode 1 (A).
- I_{d2} : Le courant de diode 2 (A).
- I_{Rp} : le courant de résistance parallèle (A).

I.6. Les Paramètres d'une cellule PV

Les paramètres des cellules photovoltaïques (Vco, Icc, *Pmax, ff*), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

I.6.1. Tension de circuit ouvert Vco (pour Icc = 0)

Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. Pour une cellule donnée, elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, au moins pour des éclairements supérieurs à 100 W/m2 (ce qui correspond au rayonnement solaire sur terre d'une journée très couverte). On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule [11].

I.6.2. Courant de court-circuit Icc (pour Vco = 0)

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V [12].

I.6.3. La puissance maximale

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale idéale Pmax, correspondrait donc à la tension de circuit ouvert Vco multipliée par le courant de court-circuit Icc :

$$P_{\max} = V_{co} * I_{cc} \qquad \text{(I .1)}$$

Avec :

- Pmax : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.
- Vco : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
- Icc : L'intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

Pour la tension au point de puissance maximale Vp max est inférieure à la tension de circuit ouvert Vco, de même que le courant fourni Ip max est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit Icc [11]. L'expression de la puissance en ce point est donnée par la relation suivante :

$$P_{\max} = V_{P\max} * I_{P\max} \qquad \text{(I .2)}$$

I.6.4. Rendement énergétique η

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule Pmax et la puissance solaire incidente [13]. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{V_{P\max} * I_{P\max}}{E * S} \quad \text{(I.3)}$$

Avec :

- P_{inc} : La puissance incidente.
- E : L'ensellement.
- S : La surface du module PV.

I.6.5. Le facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule Pmax et le produit du courant de court-circuit Icc par la tension de circuit-ouvert Vco. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule [12]. Il donne par :

$$FF = \frac{V_{P\max} * I_{P\max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad \text{(I.4)}$$

I.7. Association des cellules PV

I.7.1. Association série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante est obtenue par l'addition des tensions à courant donné [14].

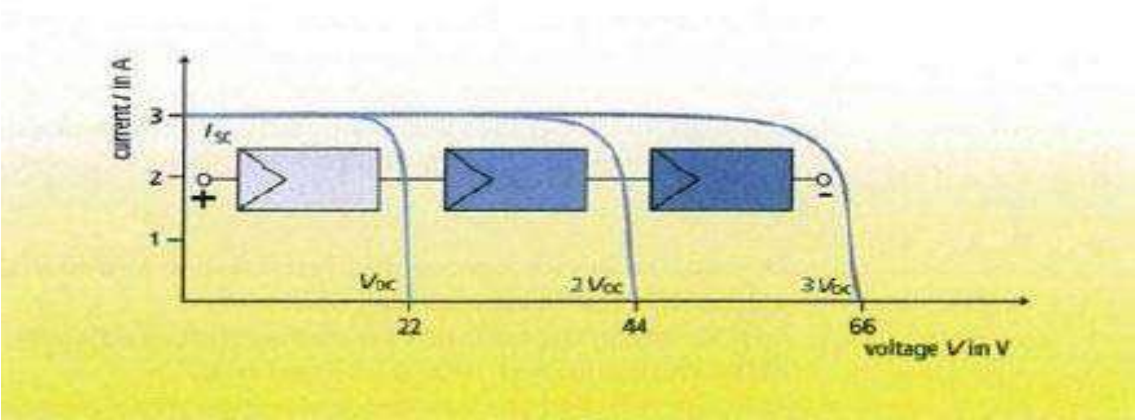


Figure I. 5. Association en série.

I.7. 2.Association parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent: la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée [14].

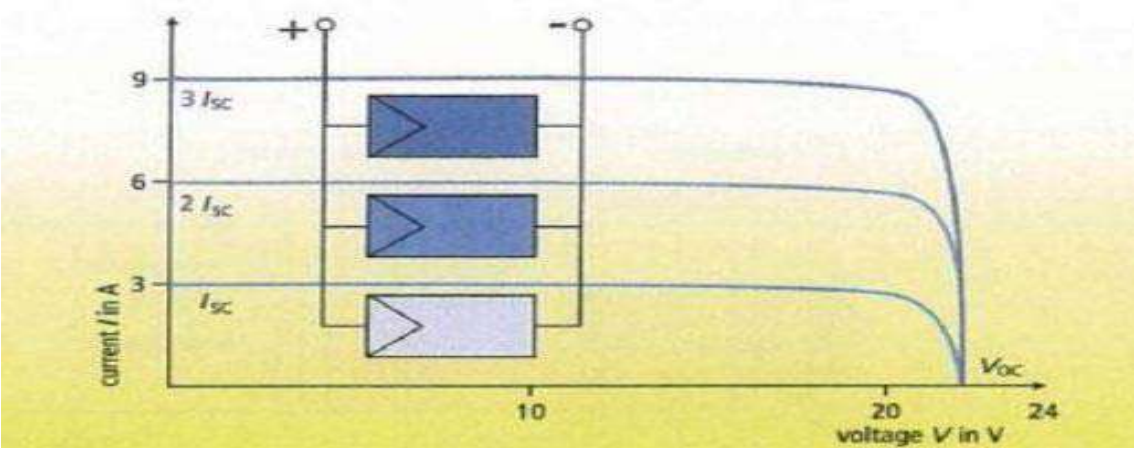


Figure I. 6. Association parallèle.

I.7.3.Association mixte (série parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

I.8. Influence de l'éclairement sur la cellule PV

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. A une température constante le courant subit une variation importante 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 [15].

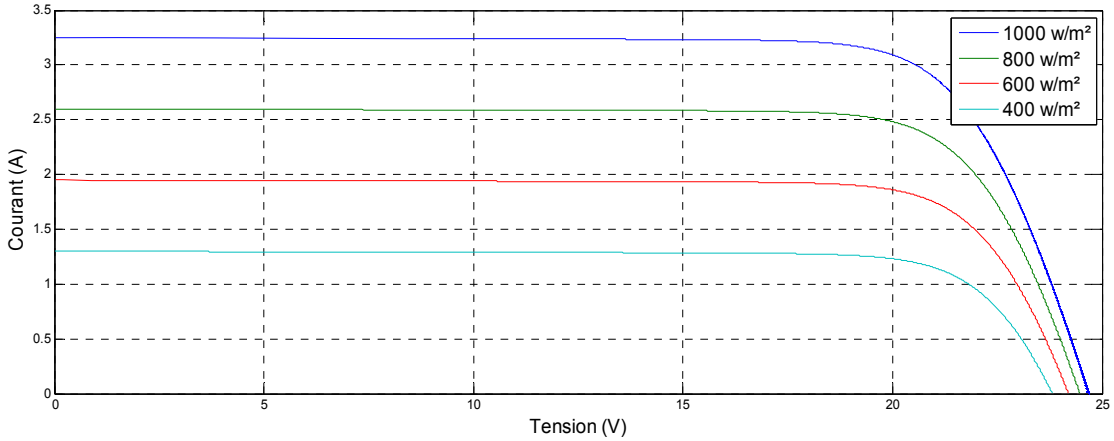


Figure I.7. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V.

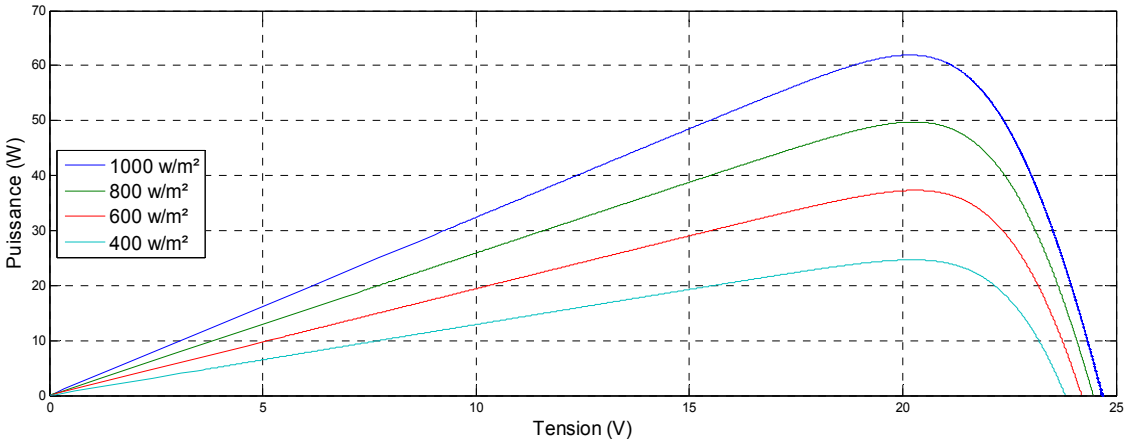


Figure I. 8. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

I.9. Influence de la température sur la cellule PV

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. Les figures (I.7 et I.8) illustrent respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de 1000 W/m^2 et différentes températures. Nous remarquons que le courant du court-circuit reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile [16].

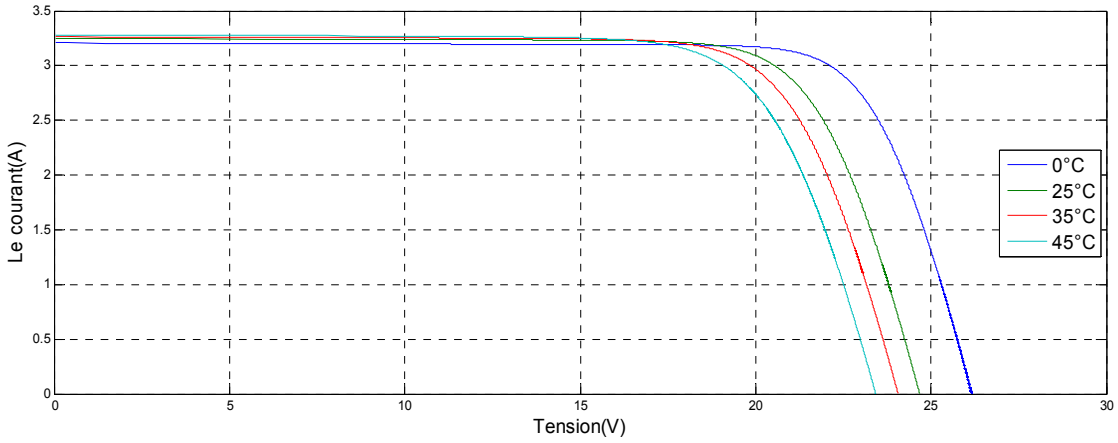


Figure I.9. L'influence de la température sur la caractéristique I-V.

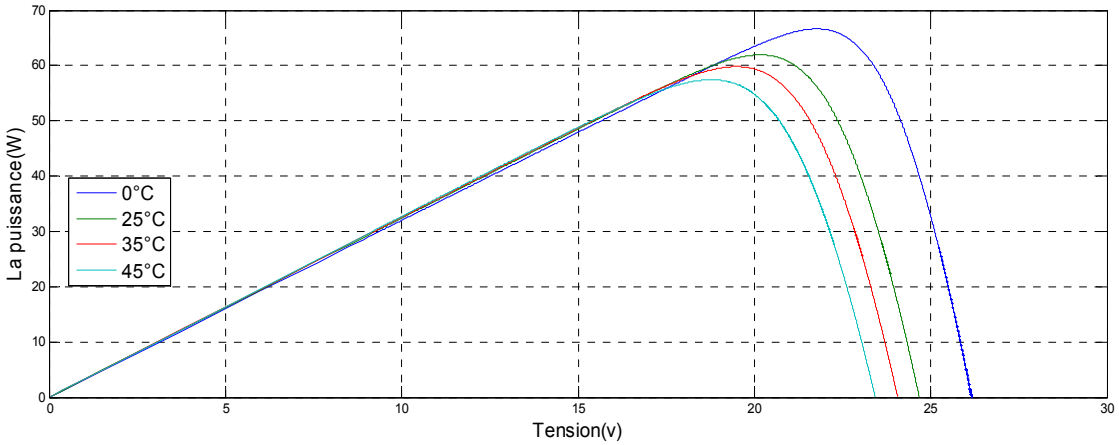


Figure I. 10. L'influence de la température sur la caractéristique P-V.

I.10. Les générateurs PV

La cellule PV est l'unité de base d'un panneau solaire, mais elle est destinée à produire une petite puissance de quelques watts. Le besoin de grandes puissances provoque la nécessité du rassemblement de cellules identiques pour former un module ou un panneau solaire, afin d'accroitre la puissance générée. La figure présente un rassemblement typique de cellule PV. La mise en série de plusieurs cellules solaires permet d'augmenter facilement la tension, tandis que la mise en parallèle conduit à une sommation des courants en conservant la tension. Donc une combinaison série-parallèle est utilisée pour obtenir un PS aux caractéristiques désirées c'est-à-dire à une tension et un courant désirés.



Figure I. 11. Rassemblement de la cellule PV.

La plupart des modules solaires PV destinés à un usage sont composés de 36 cellules rassemblées en série. Ces modules sont décomposés en sous-réseaux qui correspondent à un compromis économique entre protection et perte d'une partie importante du PS en cas de défaut partiel d'ombrage [17].

I.11 .Installation des panneaux solaires

L'installation des panneaux solaires PV peut être sur des supports fixes au sol ou sur des systèmes mobiles de poursuite du soleil appelés : *Trackers*. Dans ce dernier cas, la production électrique augmente d'environ 30 % par rapport à une installation fixe. En dehors de centrales solaires, les installations fixes se font actuellement plutôt sur les toits des logements ou des bâtiments, soit en intégration de toiture, soit en surimposition. L'endroit de la pose doit être bien dégagé, aéré et protégé. Il est conseillé de laisser environs 10 cm sous les modules et de les poser avec une inclinaison d'au-moins de 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies. Pour plus de performance, une inclinaison de 30° à 60° est recommandée. Dans certains cas, on pose des panneaux verticaux en façade d'immeuble. Cette inclinaison n'est pas optimale pour la production d'électricité, mais comme ces panneaux remplacent le revêtement de façade, l'économie réalisée sur le revêtement compense au moins partiellement une production plus faible. Il faut également éviter que des éléments fassent de l'ombre aux panneaux [18].



(a) sur le toit (b) sur la façade

Figure 1.12. Intégration du photovoltaïque dans le bâtiment [18].

I.12. Le système de stockage

L'un des inconvénients majeurs des systèmes photovoltaïques réside dans les pénuries permanentes de l'énergie solaire, qui sont dues aux diverses raisons. Parmi lesquelles on dénote; l'apport périodique de l'énergie solaire (alternances jour/nuit, été/hiver) et l'effet météorologique aléatoire, la durée d'ensoleillement qui est subordonnée aux différentes saisons (position du soleil par rapport au zénith), …etc.

En conséquence, chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport solaire, le stockage de l'électricité se révèle alors très important [11].

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie PV. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. La technologie

des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût par rapport à d'autres technologies, et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce [19].

I.12.1. Les Batteries

Pour cela le système tampon le plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques bien connue dans le domaine automobile. Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs "réversibles" c'est à dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie.

De nombreux types d'accumulateurs électrochimiques existent (Pb, CdNi, NiZn,…), toute fois un des plus anciens et des plus couramment utilisés dans l'automobile est l'accumulateur au plomb. Celui-ci subit des perfectionnements constants pour améliorer ses performances en vue de l'utilisation la mieux adaptée au photovoltaïque.

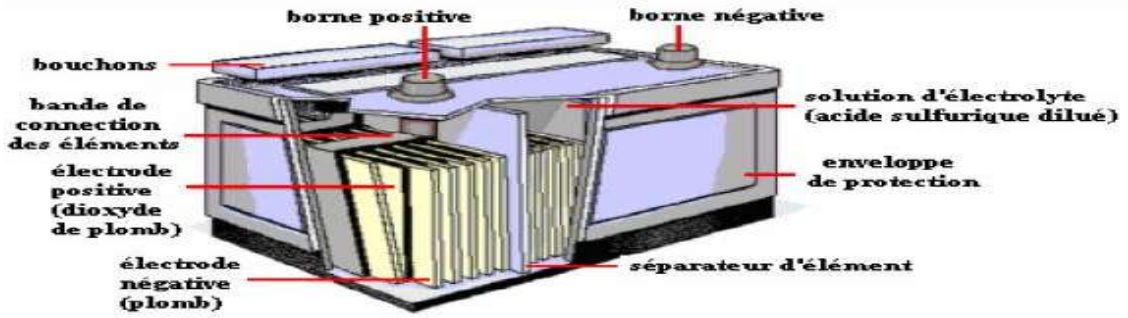


Figure 1.13. Composition interne d'une batterie plomb-acide.

Une batterie plomb-acide est généralement composée de :

- L'électrode positive est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des lamelles ou des tubes constitués par des oxydes de plomb.
- L'électrode négative est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnis de plomb spongieux.
- L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.
- Organisation : L'énergie qu'on peut emmagasiner dans un accumulateur étant proportionnelle à la surface des électrodes, on a intérêt à augmenter leurs dimensions.

- Pour éviter un trop grand encombrement, on constitue deux faisceaux de plaques parallèles positives et négatives intercalées.
- L'ensemble des plaques est immergé dans l'électrolyte contenu dans un bac en matière isolante (verre ou matière plastique) [11].

I.12.2. Principe de fonctionnement

Pendant la décharge, la concentration de l'acide sulfurique décroît. Inversement, l'acide sulfurique se reforme pendant la charge.

Le moyen le plus sûr de vérifier l'état de charge est de mesurer la densité de l'électrolyte, ce qui permet de connaître la concentration en acide.

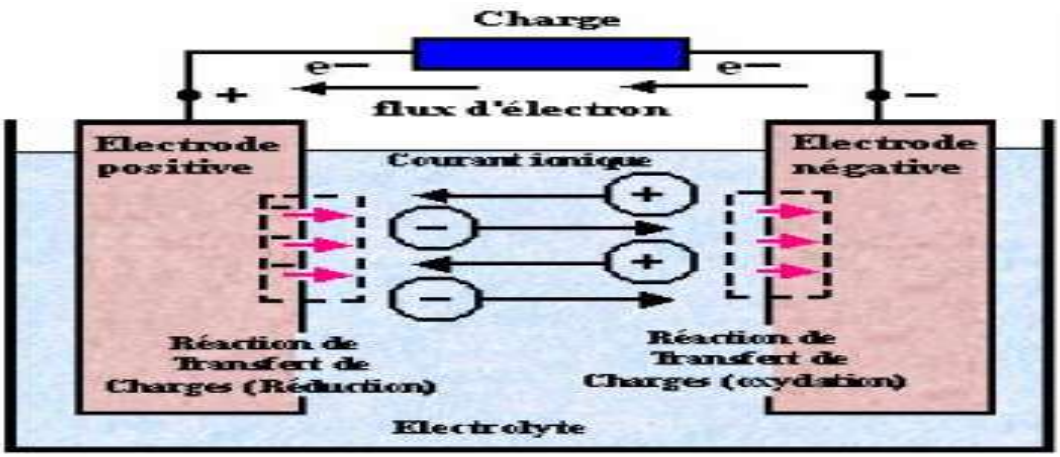


Figure 1.14. Cellule électrochimique à plomb de base.

En fin de charge, si on prolonge le passage du courant, l'hydrogène et l'oxygène résultant de la décomposition de l'eau finissent par se dégager à l'état gazeux sur les électrodes (Electrolyse). Si la décharge se produit trop longtemps, ou si on ne surveille pas la concentration d'acide sulfurique, celui-ci peut attaquer les plaques en donnant du sulfate de plomb qui n'est plus détruit par la suite. L'accumulateur se sulfate, il finit par devenir inutilisable [11].

I.12.3. Caractéristiques

I.12.3.1. Tension

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

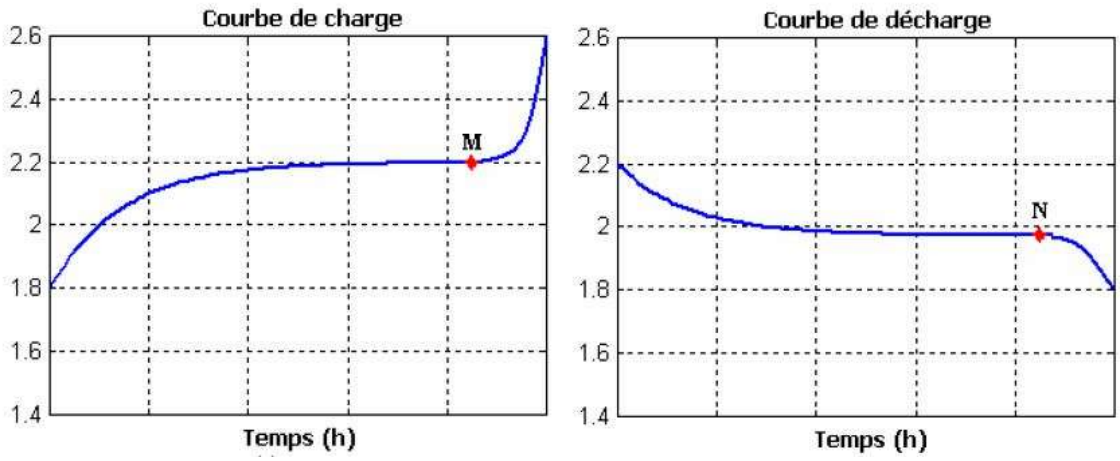


Figure I.15. Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis.

I.12.3.2. Charge

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V. En fin de charge (point **M**) figure I.15, on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus 1'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V en charge cyclique. En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

I.12.3.3. Décharge

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps. Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. À partir du point **N**, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20 % de la capacité batterie. Si non, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.

I.12.3.4. Résistance interne

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible et négligeable en général, dans les applications numériques. Cette faible résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient : quand les deux bornes sont accidentellement réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible, l'intensité du courant débité est considérable, l'accumulateur, mis ainsi en court-circuit, est rapidement rendu hors usage.

I.12.3.5. Capacité

On appelle capacité la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères heures (Ah), qu'un accumulateur chargé peut faire circuler pendant la période de décharge. La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge, la capacité nominale (*Cn*) d'une batterie étant donnée, généralement, pour un régime de décharge en 10 h (C/10).Pour un régime de décharge plus élevé (I> C/10) la capacité diminue. Pour un régime de décharge plus faible (I< C/10) la capacité augmente. Le courant de décharge est évalué en fractions de la capacité exprimée en Ah (ex : C/100) [11].

I.13. Les type d'énergie solaire

L'énergie solaire se divise en trois types :

I.13.1. L'énergie solaire thermique

Elle consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

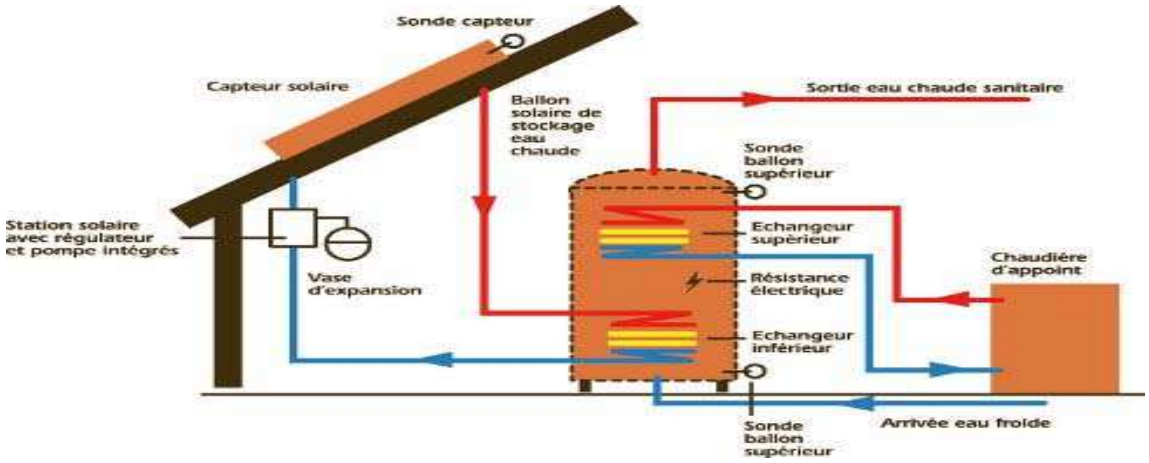


Figure:I.16. Solaire thermique.

I.13.2. L'énergie solaire passive

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

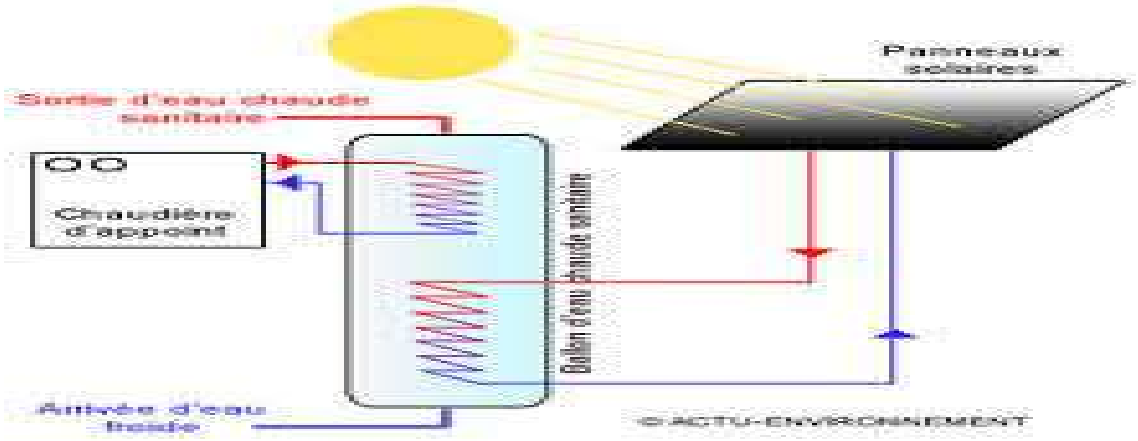


Figure. I. 17. L'énergie passive.

I.13.3. L'énergie solaire photovoltaïque

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [15].

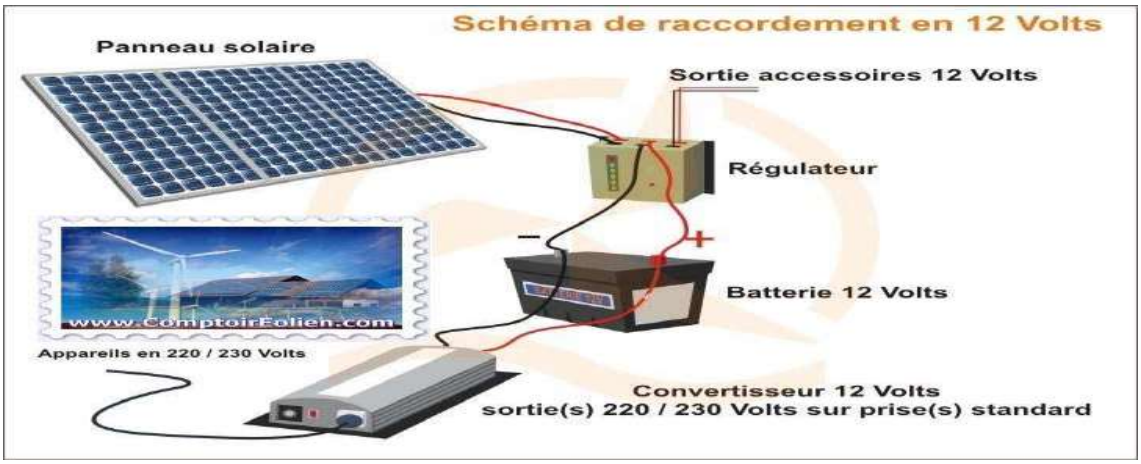


Figure I. 18. L'énergie photovoltaïque.

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

I.14.1.Avantages

- Gratuit.
- Peu de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).

- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.

I.4.2.Inconvénients

- Le coût d'installation est très élevé.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome [9].

I.15. Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant.

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant).

Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs.

Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [20].

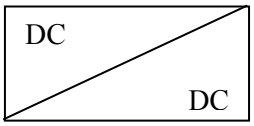


Figure I. 19: Symbole d'un convertisseur DC-DC.

I.15.1. Les types des hacheurs

Les hacheurs composent on trois types :

- Hacheur survolteur (Boost) Vs > Ve ;
- Hacheur dévolteur(Buck) Vs < Ve ;
- Hacheur mixte (Buck-Boost).

I.15.1.1. Le Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de Boost [11].Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie Vs est supérieure à celle de l'entrée Ve. Pour un rapport cyclique D, et en régime de conduction continu.

I.15.1.2. Le Hacheur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck (abaisseur) ou hacheur série. Ce dernier qui est un interrupteur ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse. L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversions photovoltaïques est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie, a la nature d'une source de tension. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion M =Vo /Vi change avec le rapport cyclique D du commutateur [11].

I.15.2.3. Convertisseur Buck-Boost (Hacheur dévolteur-survolteur)

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des configurations de buck et de boost. Il peut être utilisé pour transformer idéalement n'importe quelle tension d'entrée continue en n'importe quelle tension de sortie continue désirée. En pratique, l'usage de l'idéalité est naturellement limité par les pertes des composants [21].

I.16. Conclusion

Ce chapitre est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque et les convertisseurs statique (DC/DC), ainsi comment installé les panneaux solaire. Nous avons expliqué les trois types d'énergies solaire ainsi les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

CHAPITRE II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1. Introduction 21
II.2. Modélisation d'une cellule PV 21
II.2.1 Modèle d'une cellule PV idéale 21
II.2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle 22
II.3 Le module photovoltaïque 25
II.3.1 Modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque 26
II.4 Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) 26
II.4.1 Hacheur survolteur (Boost) 26
II.4.2 Hacheur dévolteur (Buck) 29
II.4.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Convertisseur buck-Boost) 31
II.5 Le système de stockage d'énergie électrique 32
II.5.1. Modélisation d'une batterie 33
II.6.Conclusion 35

II.1 .Introduction

L'électricité « solaire » est obtenue par conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ou transformation du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de modules photovoltaïques ainsi la quantité d'énergie produite par le module dépend de la quantité du rayonnement qu'il reçoit.

Nous présentons dans ce chapitre, les modèles sélectionnés pour notre outil de simulation. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système. Les résultats obtenus seront en partie réutilisés pour la modélisation de notre système [13].

Les composants modélisés sont :

- le système champ photovoltaïque : modélisation des modules PV et du module MPPT.
- le système de stockage d'énergie électrique concernant le pack batteries (plomb-acide).
- les convertisseurs électriques : DC/DC (les hacheurs).

II.2. Modélisation d'une cellule PV

II.2.1 Modèle d'une cellule PV idéale

Une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure (II.1). Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [22].

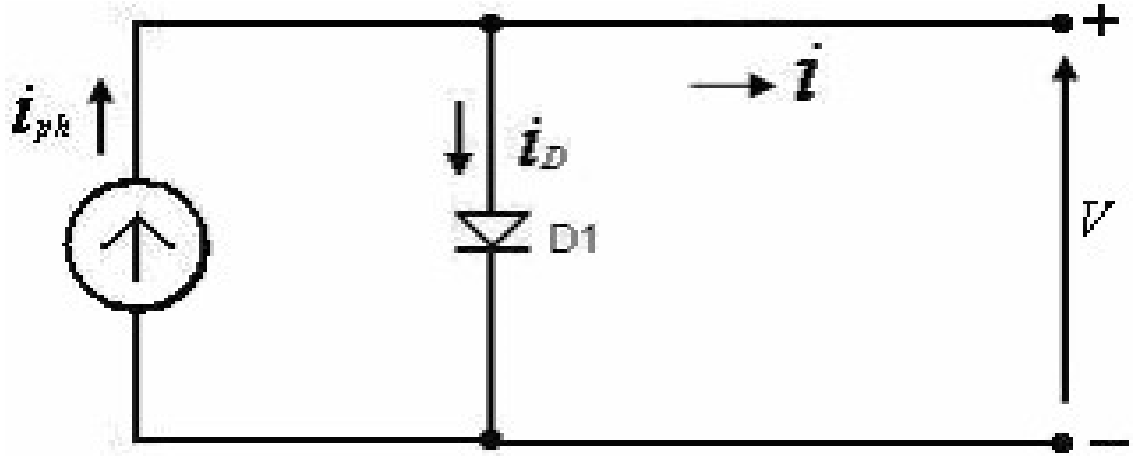


Figure II.1.Modèle électrique d'une cellule PV idéale.

L'équation de la cellule peut être écrite comme indiqué en équation (II-1) :

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_c q}{kTck}} - 1 \right) \quad \text{II-1}$$

Avec :

- I_D : courant d'obscurité (A) ;
- I_S : courant de saturation de la diode (A) ;
- V_C : tension de la cellule (V) ;
- q =1.6 * 10-19 (Cb) ;
- k= 1.38 * 10-23 (j/K) ;
- T_{CK} = température de la cellule (°K).

Le courant dans la cellule produit par l'irradiation solaire est appelée « photo courant » I_{Ph}. Sa valeur reste la même quelle que soit la tension externe et par conséquent, il peut être mesuré par le courant de court-circuit ($I_{CC} = I_{Ph}$). Ce courant varie de façon linéaire avec l'intensité du rayonnement solaire. Le courant est alors décrit comme la différence entre le courant d'obscurité et la photo courant. Si la convention de signes de courant est inversée pour décrire le courant qui est produit par une cellule éclairée (I_c), alors l'équation de la cellule peut être écrite comme indiqué en équation (II-2) [13] :

$$I_C = I_{PH} - I_S \left(e^{\frac{V_C q}{kT_{CK}}} - 1 \right) \quad \text{II-2}$$

- C : courant de la cellule (A).
- I_{Ph} : photo courant (A).

II.2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle

II.2.2.1Modèle d'une cellule PV avec une seule diode

La figure (II.2) 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 et deux résistances [22].

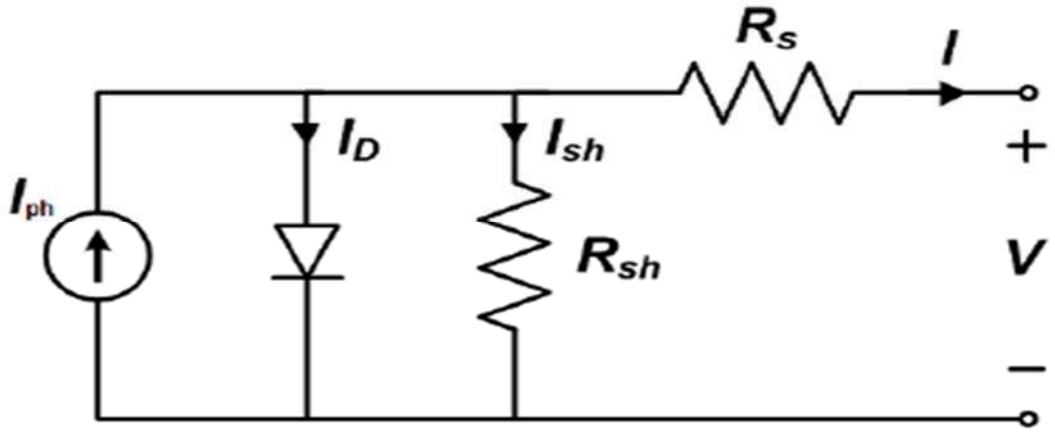


Figure II. 2. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique [23].L'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque est donnée par l'équation (II.3) décrit les caractéristiques I-V de cette cellule.

$$I_c = I_{ph} - I_s\left(e^{\frac{V_c q}{nkT_{ck}}} - 1\right) - \frac{V_c + I_c R_s}{R_{sh}} \qquad \text{(II-3)}$$

- I_C : courant de la cellule (A).
- I_{CC} : courant de court-circuit de la cellule (A).
- I_{Ph} : photo courant de la cellule (A).
- I_S : courant de saturation de la cellule (A).
- V_C : tension de la cellule (V).
- R_S : résistance série (Ω).
- R_{Sh} : résistance shunte (Ω).
- q = 1.6 x 10-19 (Cb).
- k = 1.38 x 10-23 (j/K) ;
- n : constante non-idéalité de la diode.

II.2.2.2 Modèle d'une cellule PV avec deux diodes

Mesures réelles sur des cellules dans diverses conditions de fonctionnement, cependant, montrent la nécessité d'un modèle plus sophistiqué. En particulier, la résistance interne de

dispositif doit être prise en considération. Ceci mène à largement utilisé « modèle de deux diode » comme le montre la figure (II.4) [13].

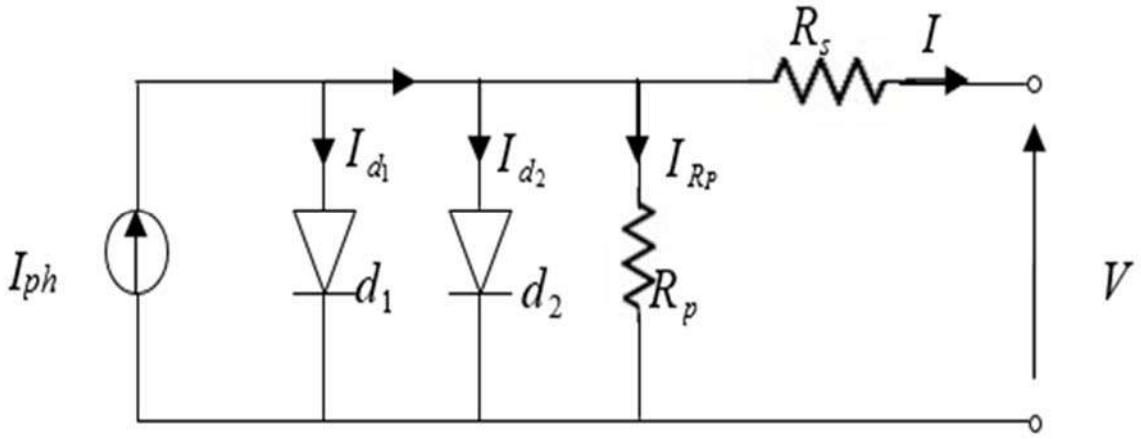


Figure II.3. Modèle électrique d'une cellule solaire avec deux diodes.

La figure (II.3) est une représentation du modèle mathématique de la caractéristique courant tension, qui est donné par [24,1] :

$$I_c = I_{ph} - I_{d_1}\left[e^{\frac{q(v_c+I_cR_s)}{n_1kT_{ck}}} - 1\right] - I_{d_2}\left[e^{\frac{q(v_c+I_cR_s)}{n_2kT_{ck}}} - 1\right] - \frac{V_c + I_cR_s}{R_{sh}} \qquad \text{(II-4)}$$

Où :

- I et V sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque.
- I_{ph1} : le photo-courant produit.
- I_{d1} et I_{d2} sont les courants de saturation des diodes.
- n_1 et n_2 les facteurs de pureté de la diode.
- R_s et R_P respectivement la résistance série et la résistance parallèle.
- T : la température absolue en Kelvin.
- q (1,602. 10^{-19}C) : la charge élémentaire constante.
- k (1,380 10^{-23} J/K) : La constante de Boltzmann.
- $I_{ph.max}$: Le photo-courant est atteint à une insolation maximum, souvent on a (I_{ph}=S.$I_{ph.max}$).
- S : pourcentage d'insolation.

Il est évident à partir de l'équation (II-4), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'ensoleillement et de la température. La dépendance de la température est

encore amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph}et des courants de saturation inverse de la diode [25].

$$I_{ph}\left(T_{ck}\right)=I_{ph}\Big|_{(T_{CK}=298K)}\left[1+\left(T_{CK}-298K\right)\left(5.10^{-4}\right)\right] \quad \text{(II-5)}$$

$$I_{s_1}=k_1.T_{ck}^3.e^{\frac{-Eg}{kTck}} \quad \text{(II-6)}$$

$$I_{s_2}=k_2.T_{ck}^{\frac{5}{2}}e^{\frac{-Eg}{kTck}} \quad \text{(II-7)}$$

Où :

- E_g : est la bande d'énergie du semi-conducteur et
- k_1=1, 2 A /cm^2 k^3
- K_2=2, 3*10^5 A/cm^{2}k$^{5/2}$

II.3. Le module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [25].

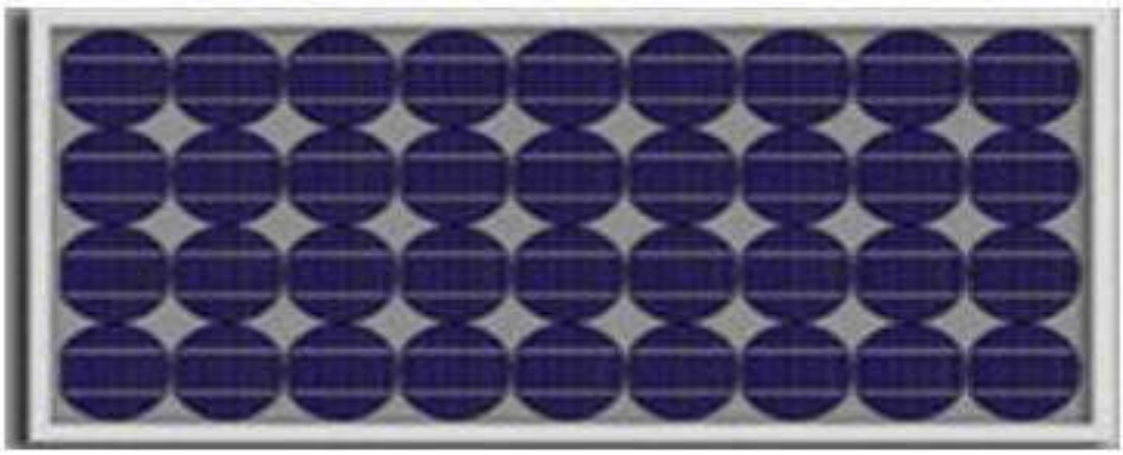


Figure II.4. Module photovoltaïque.

II.3.1 Modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque

La considération du modèle de circuit équivalent (figure II.3) mène à l'équation (II-8) pour une rangée photovoltaïque de cellules (généralement considérée comme un panneau solaire) avec z cellules photovoltaïques raccordées en série.

$$I = I_{ph} - I_{d_1}\left[e^{\frac{q(v+I_zR_s)}{zn_1kT}} - 1\right] - I_{d_2}\left[e^{\frac{q(v+I_zR_s)}{zn_2kT}} - 1\right] - \frac{v+I_zR_s}{zR_p} \qquad \text{(II-8)}$$

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV [25].

II.4. Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

On trouve trois types de convertisseur :

- hacheur survolteur (Boost)
- hacheur dévolteur (Buck)
- hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

II.4.1. Le hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, est donné par la figure. II.5**.** 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_L)ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode [26].

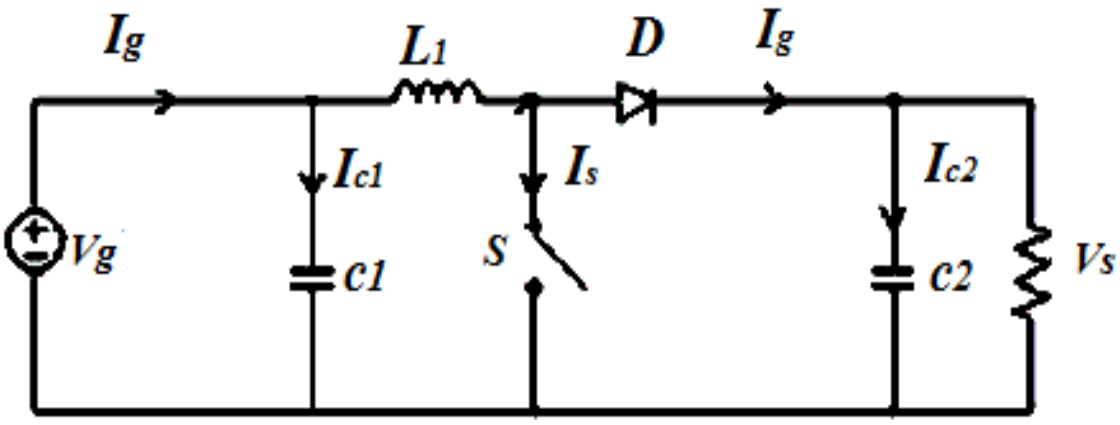


Figure II.5. Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

II.4.1.1. Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour la première période α Ts :

$$I_{C1} = c_1 \frac{dv_g}{dt} = I_g - I_L \qquad (II\text{-}9)$$

$$I_{C_2} = c_2 \frac{dv_0}{dt} - I_g \qquad (II\text{-}10)$$

$$v_L = L \frac{dI_L}{dt} = v_g - R_L I_L \qquad (II\text{-}11)$$

Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \qquad (II\text{-}12)$$

$$I_{C2} = C_1 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \qquad (II\text{-}13)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - V_0 - R_L I_L \qquad (II\text{-}14)$$

II.4.1.2. Modèle approximé du convertisseur Boost

Les systèmes d'équations de base (II. (12.13.14)) et (II. (15.16.17)) représentent le convertisseur Boost pour une période *αTs*et *(1-α)Ts* respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états 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 CI, VL est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'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* :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} + \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} (1-\alpha) T_s \qquad (II\text{-}15)$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de *x* sur une période *Ts*. Cette relation est valide.

Si :

$\frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}}$ Et $\frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}}$ sont constants sur les périodes αT_s et $(1-\alpha)T_s$ respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αT_s et $(1-\alpha)T_s$ sont très faibles devant la constante de temps du circuit $C_1 R_G, C_2 Z, L/R_L$ [18].

En appliquant la relation (II.15) sur les systèmes d'équations (II. (9, 10,11)) Et (II. (12, 13,14)) .On obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$I_{C1} = C1\frac{dV_g}{dt}\alpha T_S = \left(I_g - I_L\right)\alpha T_S + \left(1-\alpha\right)T_S\left(I_g - I_L\right) \quad \text{(II-16)}$$

$$I_{C2} = C2\frac{dV_0}{dt}\alpha T_S = -\alpha T_S I_g + \left(1-\alpha\right)T_S\left(I_L - I_g\right) \quad \text{II-17)}$$

$$V_L = L\frac{dI_L}{dt}\alpha T_S = \left(V_g - R_L I_L\right)\alpha T_S + \left(1-\alpha\right)T_S\left(V_g - V_0 - R_L I_L\right) \quad \text{(II-18)}$$

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.

$$I_L = I_g - C_1\frac{dV_g}{dt} \quad \text{(II-19)}$$

$$I_0 = (1-\alpha)I_L - C_2\frac{dV_0}{dt} \quad \text{(II-20)}$$

$$V_g = (1-\alpha)V_0 + L\frac{dI_L}{dt} + R_L + I_L \quad \text{(II-21)}$$

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement 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 [27].

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

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_g - R_L I_L}{L} \tag{II-22}$$

A partir de la relation (II-22), la valeur crête à crête du courant $I_L$est :

$$I_{LCC} = 2\Delta I_L \approx \frac{V_g - R_L I_L}{L} \tag{II-23}$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L}\alpha T_S \tag{II-24}$$

Pour le calcul des capacités $C1$et $C2$ on a :

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{C1}}{C_1} = \frac{I_g - I_L}{C_1} \tag{II-25}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{C2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2} \tag{II-26}$$

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

$$V_{C1CC} = 2\Delta V_{C1} = \frac{I_g - I_L}{C_1}\alpha T_S \tag{II-27}$$

$$V_{C2CC} = 2\Delta V_{C2} = \frac{-I_0}{C_2}\alpha T_S \tag{II-28}$$

Les valeurs des capacités *C1* et *C2* sont respectivement données par :

$$C_1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{C1}}\alpha T_S \tag{II-29}$$

$$C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{C2}}\alpha T_S \tag{II-30}$$

II.4.2 Hacheur dévolteur (Buck)

La figure II.6 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 .Le rapport de conversion $M = V_0/V_i$ est varié avec le rapport cyclique *D* du commutateur.

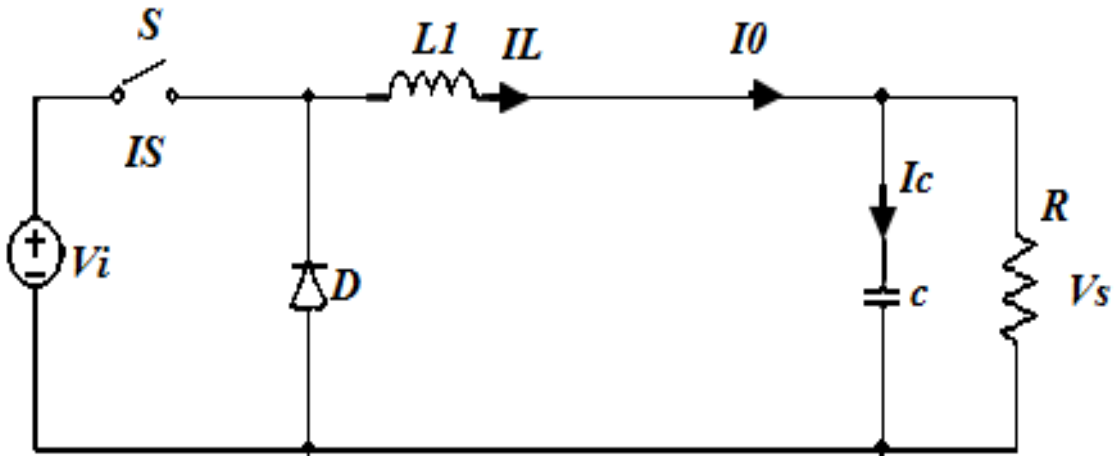


Figure II.6. Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Lorsque le commutateur de la figure (II.7) est fermé ($T\epsilon$ [*0, DTs*]), la diode sera bloquée et Le courant circulera dans la charge à travers l'inductance. Dès que le commutateur est ouvert ($T\epsilon$ [*DTs, Ts*]), l'inductance maintiendra la circulation Du courant dans la charge, mais maintenant la boucle se referme à travers de la diode placée en avant [11]

II.4.2.1 Modèle du circuit équivalent

Pour avoir le modèle mathématique du convertisseur buck, on l'analyse pour des deux états (interrupteur ouvert et fermé) doivent être analysés. Le circuit équivalent d'un convertisseur buck avec le commutateur fermé. Le convertisseur buck avec le commutateur ouvert pendant l'intervalle de temps $D'T_s$, où *D'* désigne le complément du rapport cyclique *D*, défini comme suit :

$$D' = 1 - D \tag{II-31}$$

L'application de la loi de Kirchhoff pour le circuit (interrupteur fermé) conduit à la série suivante d'équations :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \tag{II-32}$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \tag{II-33}$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \tag{II-34}$$

Un hacheur Buck quand le commutateur est ouvert T ϵ[DTs, Ts].

Utilisation de la loi de Kirchhoff (interrupteur ouvert), une deuxième série d'équations est obtenue.

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \tag{II-35}$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \tag{II-36}$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = -v_0(t) \tag{II-37}$$

II.4.3 Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur)

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des configurations de buck et de boost. Il peut être utilisé pour transformer idéalement n'importe quelle tension d'entrée continue en n'importe quelle tension de sortie continue désirée. En pratique, l'usage de l'idéalité est naturellement limité par les pertes des composants [26].

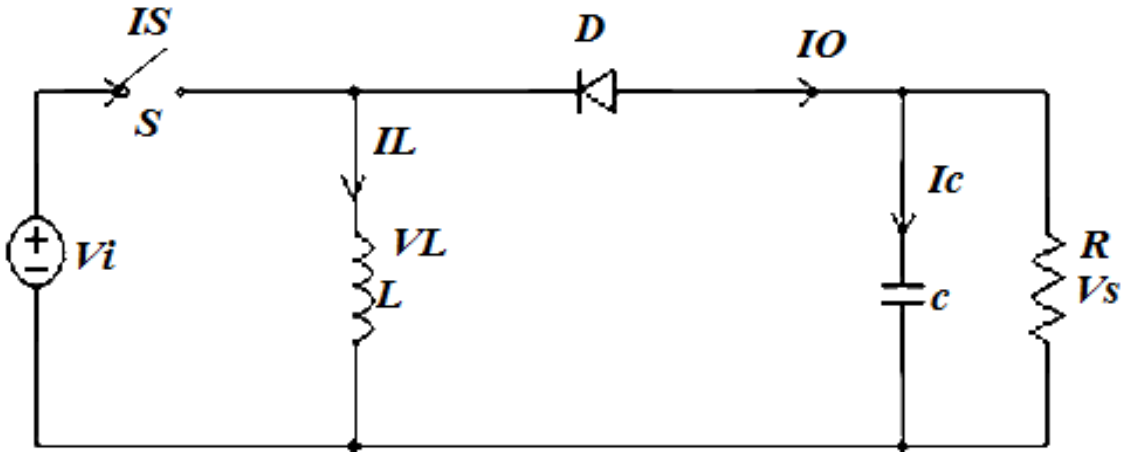


Figure II. 7. Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

II.4.3.1 Modèle du circuit équivalent

Convertisseur buck-boost. Si l'interrupteur est fermé pendant le premier intervalle de temps *DTs* de la période de commutation *Ts*, un courant commence à circuler de la source d'entrée à la masse à travers l'inductance. Après que le commutateur s'ouvre au début du deuxième intervalle de temps *D'Ts*, ce courant est maintenu par la nature de l'inductance. La boucle de courant se ferme à travers la charge et la diode. Puisque le courant est forcé de circuler « en arrière- backwards-« à travers la charge, la tension de sortie *Vo* du convertisseur

Buck-Boost est négative. La variation du rapport cyclique *D* variera le rapport de conversion entre la tension de sortie et la tension d'entrée V_0/V_1.

L'application de la loi de Kirchhoff et les équations de nœuds du circuit dans le premier état de commutation donne la première partie des équations du système pour la période de temps *DTs* :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad \text{(II-38)}$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \quad \text{(II-39)}$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \quad \text{(II-40)}$$

Un hacheur buck- boost quand le commutateur est ouvert T∈ [DTs, Ts] .Et pour la deuxième période de temps D'Ts :

$$i_{C1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \quad \text{(II-41)}$$

$$i_{C2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_l(t) - i_0(t) \quad \text{(II-42)}$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_0(t) \quad \text{(II-43)}$$

II.5 .Le système de stockage d'énergie électrique

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principale [22] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

II.5.1. Modélisation d'une batterie

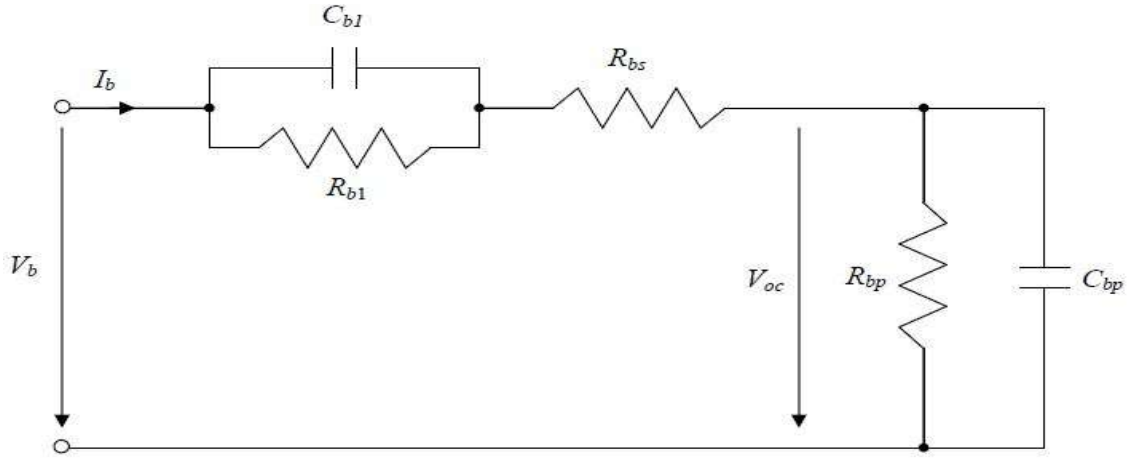


Figure II. 8. Batterie plomb-acide.

Ce nouveau modèle de batterie comprend des éléments équivalents pour toutes les grandes caractéristiques de fonctionnement d'une batterie plomb-acide : La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur dont la charge C_{bp} dont le résultat d'un flux d'électrons au cours du temps et linéaire pour les conditions d'un courant constant dans une région de 10 à 90 pour cent du niveau de charge maximum. La valeur du C_{bp} est dérivée de l'expression générale de l'énergie dans un condensateur [13] :

$$E_c = \frac{1}{2} c v_c^2 \qquad \text{(II-44)}$$

Avec :

- C : la capacité du condensateur ;
- V_c : la tension Contrairement à un condensateur.

Une tension de batterie ne sera pas égale à zéro à son état le plus bas de charge. Ceci est équivalent à un condensateur dont le niveau minimum de charge égale à l'énergie *Ec, min*. La capacité de la batterie entièrement chargée est représentée par un niveau maximum de charge de l'énergie $E_{c,\ max}$. Ceci est indiqué par l'équation suivante pour l'ensemble de l'énergie stockable dans une batterie.

$$E_b = E_{c,\max} - E_{c,\min} = \frac{1}{2} C V_{\max}^2 - \frac{1}{2} C V_{\min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} \left(V_{\max}^2 - V_{\min}^2 \right) \qquad \text{(II-45)}$$

L'énergie E_b est soit donnée par le fabricant de la batterie directement en kilowattheures (*kWh*), soit il est spécifié en ampères-heures (*Ah* – qui doit être transformé dans les unités

utilisées pour la production d'énergie (*kWh*) par multiplication de la tension spécifié de fonctionnement). Les tensions *Vmax* et *Vmin* sont la charge maximale et la charge minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après l'équation (II-46) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2} \tag{II-46}$$

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances série R_{bs}et R_{b1}. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs}, alors que la résistance R_{b1} représente la diffusion de l'électrolyte. Les modèles également R_{b1} (avec le petit condensateur C_{b1}) l'effet de surtension ou de polarisation de la batterie. Ce que représente le phénomène de chutes de tension en circuit ouvert de la batterie dès que la charge est connectée. De même, un saut brusque de tension peut être observer avec l'application d'un courant de charge. Utilisation de la notation indiquée sur la figure (II.12) la surtension peut être exprimé comme la différence entre la tension de la batterie en circuit ouvert V_{co} et la tension terminale de la batterie V_b. R_{b1} et C_{b1} forment un réseau RC parallèle avec une constante de temps τ =R C de sorte que :

$$V_b = V_{co} + R_{b1}\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) i_b + R_{bs} - i_b \tag{II-47}$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est d'autodécharge, représentée par la résistance R_{bp} en parallèle avec le condensateur principal C_{bp}. Elle est causée par l'électrolyse de l'eau à haute tension et par des fuites lentes à travers les bornes de la batterie à basses tensions. Le circuit de la figure (II.12) décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée. L'impédance équivalente d'une d'entrée d'une batterie plomb-acide est représentée par :

$$Z(s) = R_{bs} + \left(R_{b1} \| C_{b1}\right) + \left(R_{bp} \| C_{bp}\right) = R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1}C_{b1}s + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp}C_{bp}s + 1} \tag{II-48}$$

Pour l'utilisation dans le système du modèle mathématique, il est nécessaire de transformer (II-11) en un seul terme de la forme suivante :

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \tag{II-49}$$

Où les coefficients a_i et b_j sont employés pour représenter les différents composants :

$$\begin{aligned} a_2 &= R_{bs}R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp} \\ a_1 &= R_{bs}R_{b1}C_{b1} + R_{bs}R_{bp}C_{bp} + R_{b1}R_{bp}C_{bp} + R_{bp}R_{b1}C_{b1} \\ a_0 &= R_{bs} + R_{b1} + R_{bp} \\ b_2 &= R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp} \\ b_1 &= R_{b1}C_{b1} + R_{bp}C_{bp} \end{aligned} \quad \text{(II-50)}$$

II.6. Conclusion

En ce chapitre, nous avons présenté les différents composants d'un système photovoltaïque tels que, le module photovoltaïque, les convertisseurs DC-DC et la batterie, en les dimensionnant relativement à un cahier de charge donné.

CHAPITRE III : Méthodes de commande MPPT d'un Hacheur Boost

III.1. Introduction **36**

III.2. La commande perturbation et observation **36**

III.3. Algorithme d'incrémentation de l'inductance **37**

III.4. La logique floue **38**

III.4.1. Définition **38**

III.4.2. Les fonctions d'appartenance **39**

III.4.3. Structure générale d'un régulateur par logique floue **40**

III.4.4. La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue **41**

III.4.5. Les avantages et les inconvénients **43**

III.5. Réseau de neurone **44**

III.5.1.Historique **44**

III.5.2. Le neurone biologie **44**

III.5.3. Le neurone artificiel **45**

III.5.4. Les composants d'un réseau de neurone **46**

III.5 .5. Les différentes structures des réseaux de neurones **46**

III.5.6. Les fonctions d'activations **48**

III.5.7. Les techniques d'apprentissage **49**

III.5.8. Les avantages et les inconvénients **49**

III.6.Conclusion **50**

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.

Actuellement, des commandes MPPT, analogiques et numériques, 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 Perturbation et Observation «P and O» traditionnelle, laméthode de la Conductance Incrémentale « IncCond », la méthode de la logique floue (FuzzyLogic Control), celle à base des réseaux de neurones (Neural Network) et la méthode de mode glissant [29].

III.2. La commande perturbation et observation

La commande MPPT, Maximum Power Point Tracking est une commande traditionnelle essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [29].Elle utilise un microprocesseur qui traite les valeurs de la tension V et du courant I du panneau et qui à partir de ces valeurs calcule la puissance. Ceci permet au microprocesseur de commander directement le rapport cyclique variable "D" qui génère le signal de modulation de largeur d'impulsion pour la commande du convertisseur DC/DC.

La méthode de perturbation et d'observation (P&O), génère la perturbation continuelle du système en augmentant ou en diminuant la tension d'opération du panneau et observe son impact sur le rendement de ce même panneau. Le diagramme suivant explicite l'algorithme de cette méthode de perturbation et d'observation (P&O) qui est implémenté dans le microprocesseur [13].

La tension V et le courant I sont mesurés pour le calcule de la puissance de sortie P(k). Cette valeur de P(k) est comparée à la valeur obtenue à partir de la dernière mesure P (k-1). Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie se poursuivra dans le même sens que dans le dernier cycle.

Si la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera inversée dans la direction opposée du dernier cycle. Avec cet algorithme la tension Vest perturbée avec chaque cycle MPPT.

Dès que le MPP est atteint, V va osciller autour de la tension de fonctionnement idéal Vmp. Cela entraîne une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une seule perturbation. Si la largeur du pas est importante, l'algorithme MPPT va reprendre rapidement à des changements soudains des conditions de fonctionnement mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables. Si la largeur du pas est très faible, les pertes dans lesétats stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse très lente aux changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur de la largeur idéale du pas est dépendante du système et doit être déterminée expérimentalement ou par simulation grâce à un logiciel technique (comme par exemple MATHLAB/Simulink) et ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et les pertes de puissance dans les états stables [24,30].

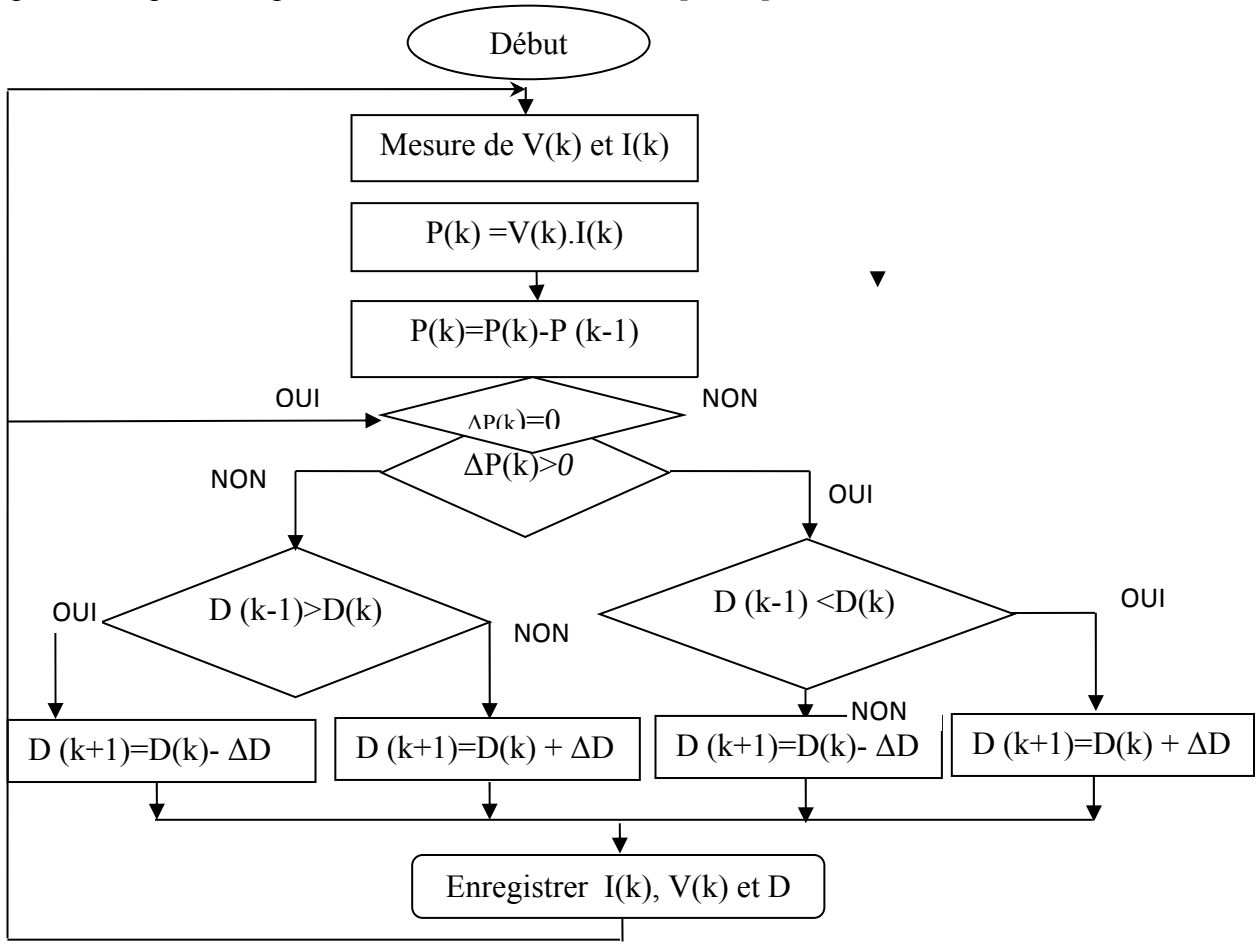


Figure III.1. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation [28].

III.3. Algorithme d'incrémentation de l'inductance

Le principe de la méthode de conductivité incrémentale (IncCond) est basé sur la propriété deMPP: 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.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \, Avec P = V * I \tag{III.1}$$

$$\frac{dP}{dV} = V\frac{dI}{dV} + I\frac{dV}{dV} = 0 donc : \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0 \rightarrow dG + G = 0 \tag{III.2}$$

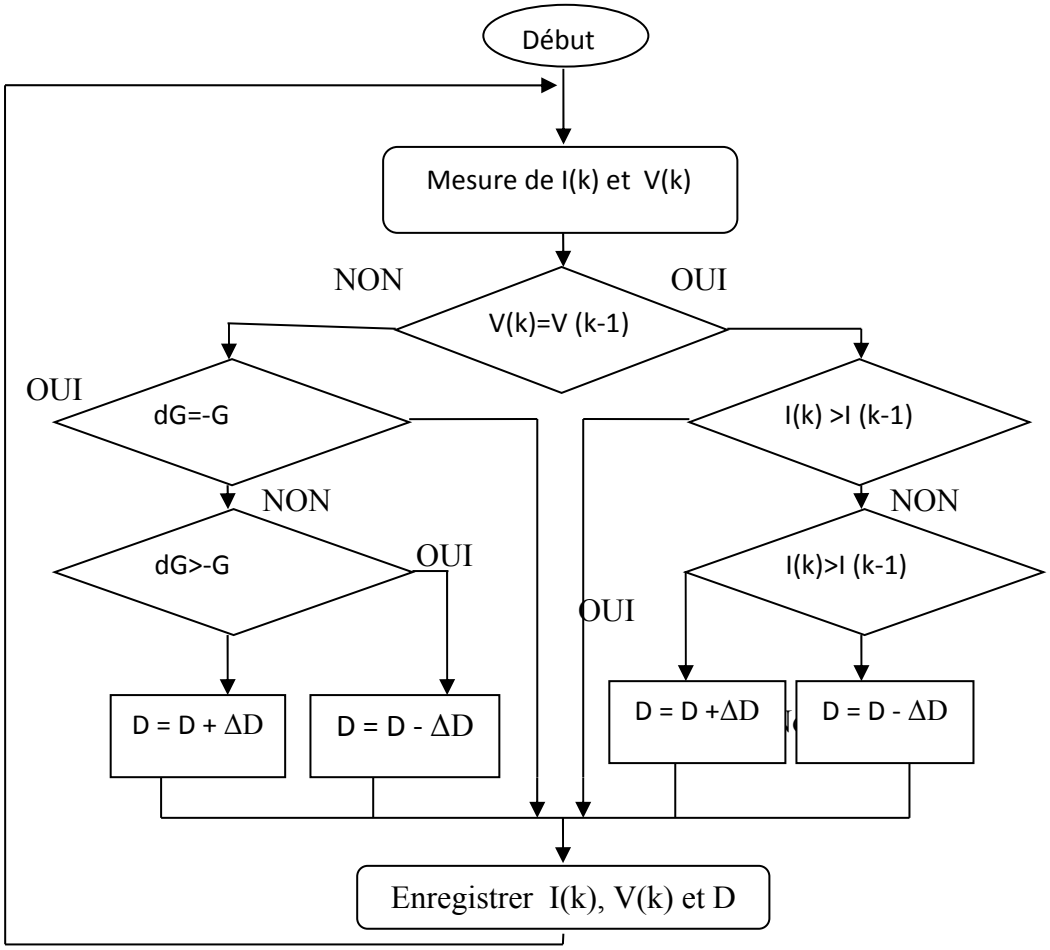


Figure III.2 . Organigramme de la méthode d'incrémentation de l'inductance [31].

III.4. La logique floue

III.4.1. 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 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 sont touchés.Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance et le diagnostic médical [17].

II1.4.2. Les fonctions d'appartenance

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

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

$$\mu(X) = \max\left(\min\left(\frac{X-a}{b-a'}\frac{c-X}{c-b}\right),0\right) \tag{III.3}$$

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

$$\mu(X) = \max\left(\min\left(\frac{X-a}{b-a'},1,\frac{d-X}{d-c}\right),0\right) \tag{III.4}$$

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

$$\mu(X) = \exp\left(-\left(\frac{(x-m)^2}{2\sigma}\right)\right. \tag{III.5}$$

- **Fonction en forme de cloche :** elle est définie par 2 paramètres {x_0, a}.

$$\mu(X) = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{X - X_0}{a} \right)^2} \right) \tag{III.6}$$

- **Fonction trigonométrique :** elle est définie par 2 paramètres {x_0, a}.

$$\mu(X) = \frac{1}{2}\left(1 + \cos\frac{\pi(x - x_0)a}{2a}, x_0 - a \le x \le x_0 + 2a\right) \tag{III.7}$$

- **Fonction sigmoïdale :** elle est définie par 2paramètres {x_0, c}.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a(X - c))} \tag{III.8}$$

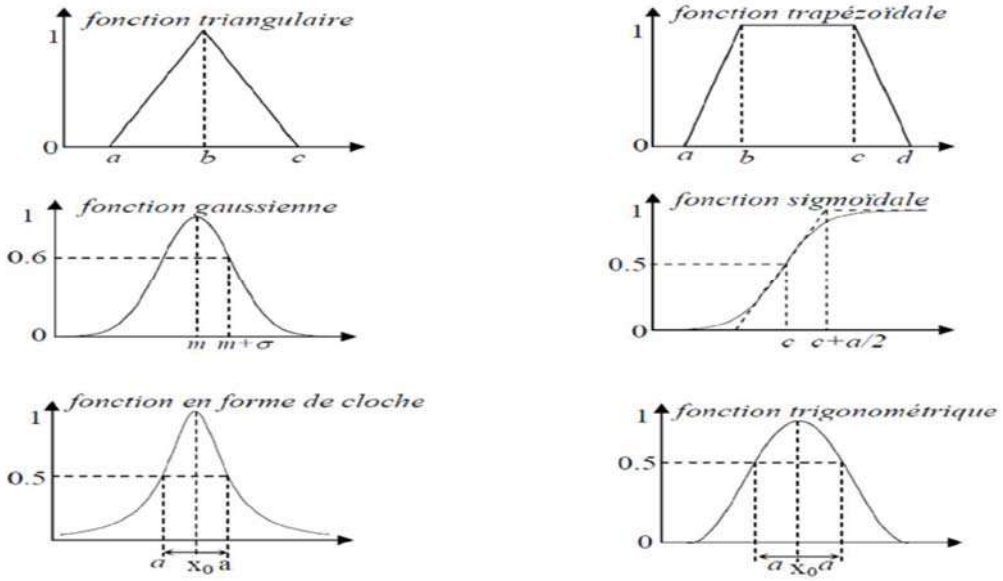


Figure III.3. Formes usuelles des fonctions d'appartenance [32].

III.4.3. 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 Eet le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie D. 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.

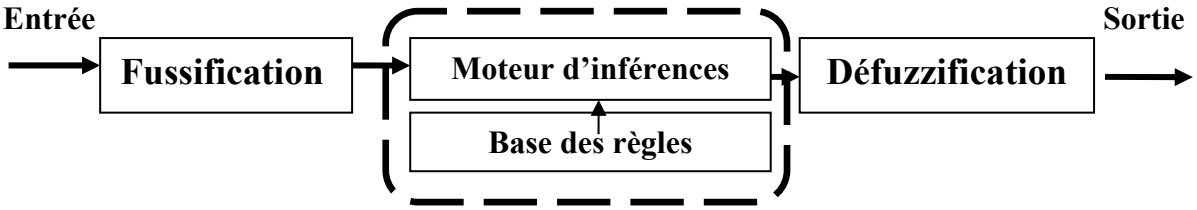


Figure III.4 . Structure générale d'un régulateur par logique floue.

- **La fuzzification**

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

- **La lecture de la table desrègles**

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 [11].

III.4.4. La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue

La commande floue consistera à imposer une grande valeur pour le rapport cyclique lorsque l'erreur est importante puis diminuer ce rapport cyclique lorsque l'erreur devient faible, de sorte à éviter les oscillations. La commande floue permet, ainsi, d'assurer une transition harmonieuse entre les différents modes de fonctionnement du système [33].

Le régulateur MPPT élaboré possède deux entrées définies par [34]:

$$E2 = \Delta P = P(k) - P(k-1) \quad \text{(III.9)}$$

$$E1 = \Delta I = I(k) - I(k-1) \quad \text{(III.10)}$$

Où $E1$ et$E2$ désignent, respectivement, l'erreur et le changement d'erreur. $P(k)$ et $I(k)$étant respectivement la puissance du GPV et son courant de sortie à l'instant d'échantillonnage k.

La fuzzification permet de transformer les grandeurs physiques d'entrée en sous-ensembles flous en fonction de la valeur réelle de la variable d'entrée. Nous pouvant prendre les valeurs suivantes pour la fuzzification :

GN: Grand Négative

PN: Petit Négative

PP: Petit Positive

GP : Grand Positive

Elle consiste à définir les fonctions d'appartenances pour l'ensemble des variables du système [12].Les fonctions d'appartenance que nous avons utilisées sont schématisées sur les figures (III.5, et III.6).

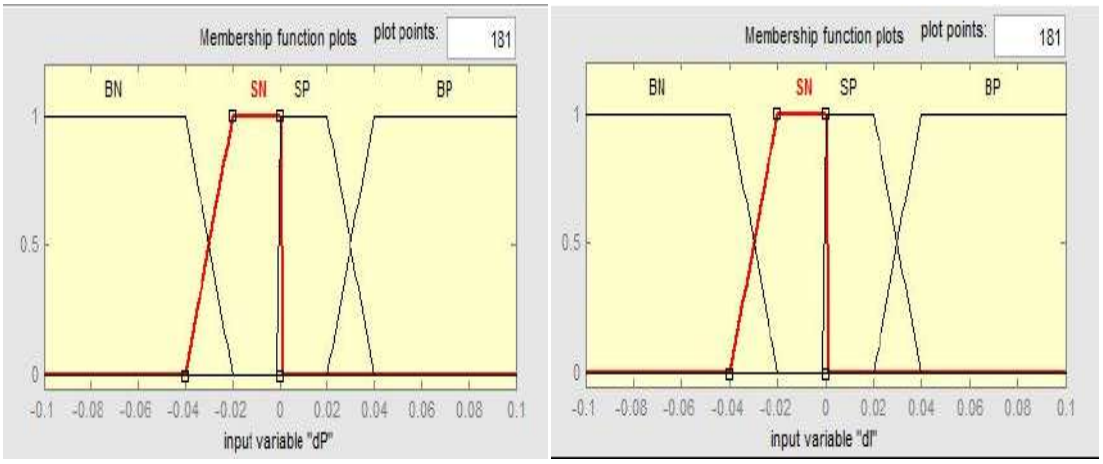


Figure III.5 Fonction d'appartenance des variables d'entrées E et ΔE

La sortie du régulateur flou est le rapport cyclique D du convertisseur statique [33].

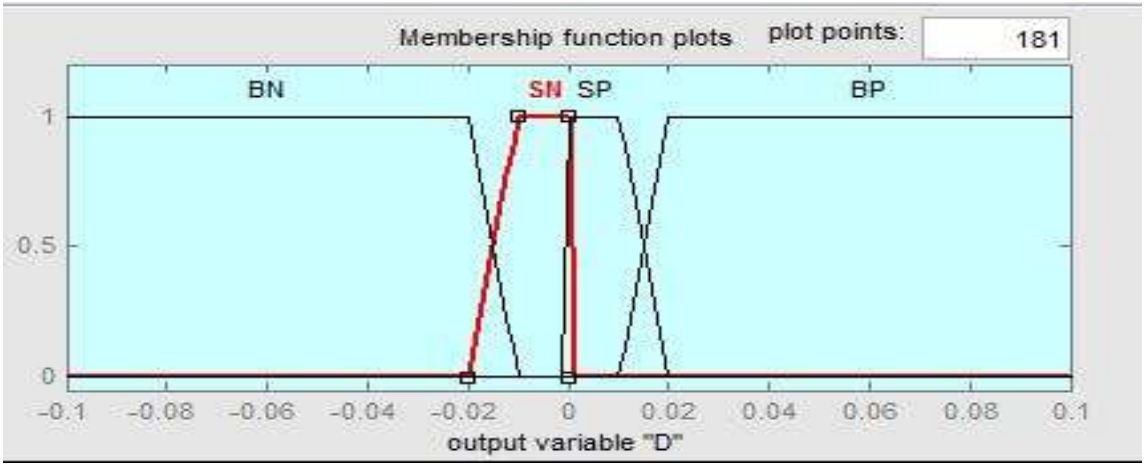


Figure III.6 Fonction d'appartenance de la variable de sortie D

La stratégie de réglage consiste à modifier le rapport cyclique du convertisseur statique de telle sorte à annuler l'erreur$E$ .Deux cas sont à envisager **:**

Premier cas : E est positif, c'est-à-dire, on se trouve à gauche du point de puissance maximale. Si le changement d'erreur dE est positif, alors le point de fonctionnement converge vers le point de puissance maximale. SidE est négatif c'est l'inverse qui se produit.

Deuxième cas : Eest négatif, on se trouve, donc, à droite du point de puissance maximale. Dans ce cas sidE est positif, le point de fonctionnement s'éloigne du point de puissance maximale et inversement sidE est négative.Le tableau représente la matrice d'inférence adopté pour la poursuite du MPPT [11].

Tableau III.1 Exemple d'une table des règles pour une commande logique floue.

E / **DE**	**BN**	**SN**	**SP**	**BP**
BN	SP	SP	SN	SP
SN	BP	SP	SN	BN
SP	BN	SN	SP	BP
BP	BN	SN	SP	SP

III.4.5. Les avantages et les inconvénients

III.4.5. 1.Avantage

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

III.4.5. 2.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 [32].

III.5. Réseau de neurone

Le cerveau se compose d'environ 1012 neurones interconnectes 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.5.1.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 utilise dépendent du type et de la complexité de l'application en question.

III.5.2. 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 [37].

III.5.2. 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 autresmolécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns diamètre.

III.5.2.2. 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.5.2. 3. L'axone

L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signauxpartent du neurone grâce a l'arborescence terminale que possède l'axone ; contrairement auxdendrites 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 entrequelques 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 nepeut pas se propager.Les transmissions se font alors par l'intermédiaire des substances chimiques (Les neurotransmetteurs). Quand un signal arrive de la synapse, il provoquel'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 [37].

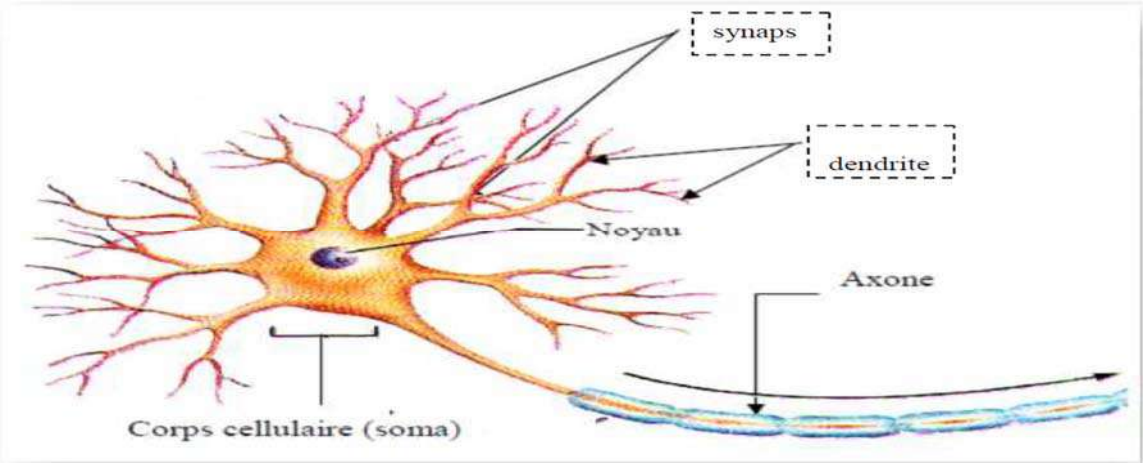


Figure III.7 Le modèle d'un neurone biologique

III.5.3. 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[12].

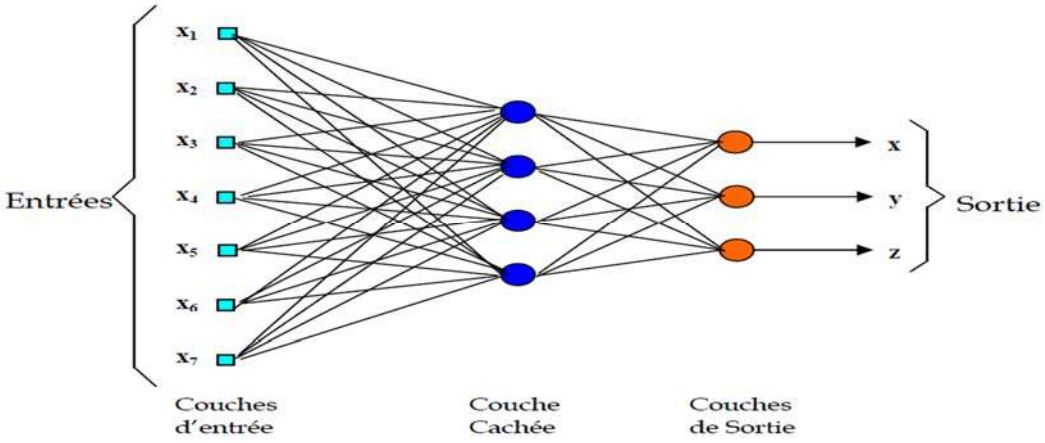


Figure III.8 Neurone Artificiel

III.5.4. 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) [37].

III.5 .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.5.5. 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.Lescouches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées cachées.

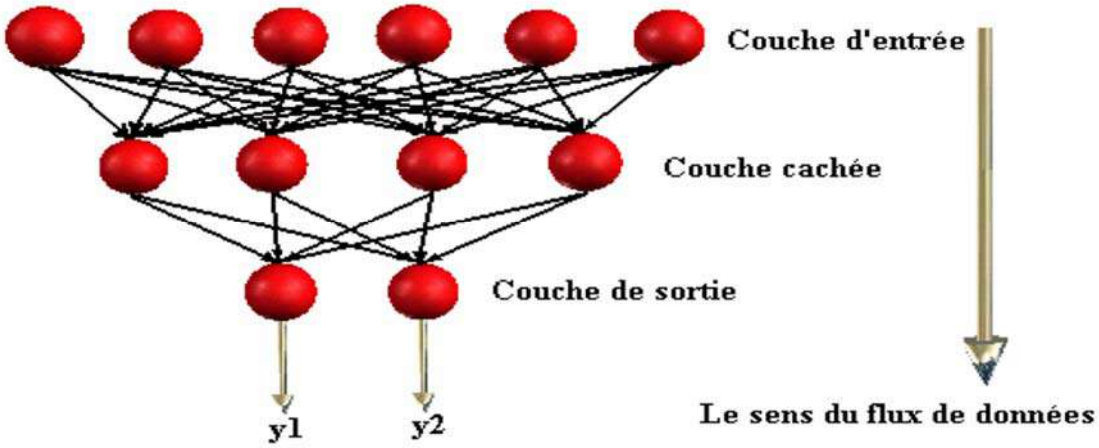


Figure III.9 Réseau de neurones multicouches

III.5.5. 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.

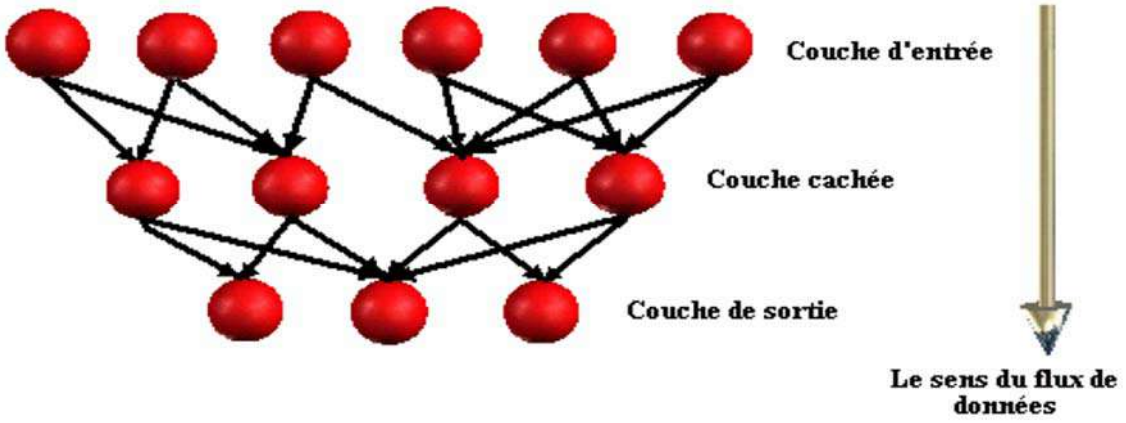


Figure III.10.Réseau à connexions locales

III.5.5. 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.

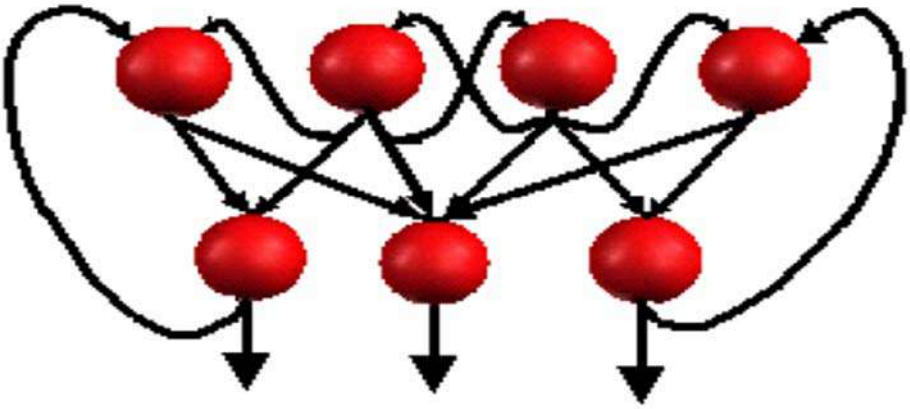


Figure III.11.Réseau à connexions récurrentes.

III.5.5. 4. Réseau à connexions complètes

C'est la structure d'interconnexions la plus générale III.12.figure. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau et à lui-même.

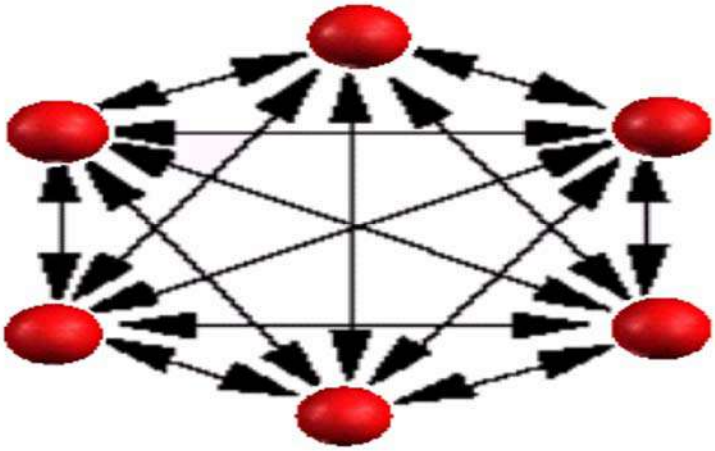
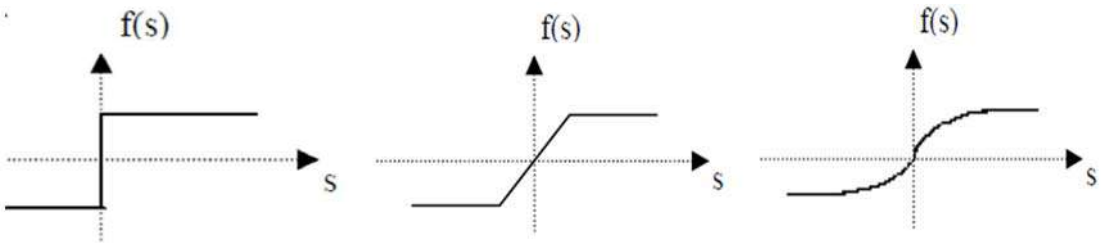


Figure. III.12.Réseau à connexions complètes.

III.5.6. 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 [38].



Fonction à seuil Fonction à saturation Fonction sigmoïde

Figure III.13. Quelque fonction d'activations.

III.5.7. Les techniques d'apprentissage

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

III.5.7. 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 [12].

III.5.7.2. Apprentissage non supervisé

L'hypothèse d'existence d'un maître qui supervise l'apprentissage n'est pas toujourspossible. 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 implicitementdans un ensemble de données, représentées par des vecteurs de grande dimension, et l'oncherche à les regrouper, selon des critères de ressemblance qui sont inconnus a priori [38].

III.5.8. Les avantages et les inconvénients

III.5.8.1. Les Avantage

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

- Plusieurs algorithmes d'apprentissages sont disponibles.

III.5.8.2. Inconvénients

- Boite noir (manque de traçabilité).
- L'adaptation aux environnements différents est difficile el le réapprentissage est souvent obligatoire[12].

III.6.Conclusion

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmesPV, différentsalgorithmes de commandes intelligentes ont été étudiée pour la poursuite du point maximum de la puissance.Dans ce travail nous avons commencé par la présentation des techniques populaires telles que la perturbation et l'observation et puis la commande à incrémentation de la conductance. Ainsi que deux techniques de l'intelligence artificielle à savoir la logique floue et les réseaux de neurones.

CHAPITRE IV : Simulations et évaluations des résultats

IV.1.Introduction 51

IV.2. Résultats de simulation des caractéristiques du panneau photovoltaïque sans MPPT 51

IV.3.Simulationdu système photovoltaïque adapté par les quatre commandes MPPT (P&O, FL, IncCond, NNA) 53

IV.3.1.Conditions standards (T=25^{0}C & G=1000W/m^2) 53

IV.3.2.Comportement des quatre méthodes à un changement de température 57

IV.3.3.Comportement des quatre méthodes à un changement d'irradiation ..... .61

IV.3.4.Comportement des quatre méthodes à un Changement de température etChangement d'irradiation ..... .64

IV.4.Discussion 68

IV.5.Conclusion 69

IV.1. Introduction

L'adaptation d'impédance entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge est un problème technologique qui signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur photovoltaïque à la charge. Ce dernier est piloté par différentes techniques MPPT permettant une meilleure adaptation source/charge.

Dans ce chapitre nous élaborons 4 techniques de MPPT à savoir :

- Algorithme de contrôle de MPPT Perturbation et Observation (P&O) ;
- Algorithme de contrôle de MPPTIncrément de conductance (IncCond) ;
- Algorithme de contrôle de la logique floue(FL) ;
- Algorithme de contrôle de réseau de neurone (NNA).

Les résultats figurant dans ce chapitre nous permettent de valider les concepts théoriquesde diverses techniques de MPPT.

IV.2. Résultats de simulation des caractéristiques du panneau photovoltaïque sans MPPT

Les figures (IV.1 à 5) montrent les caractéristiques du panneau utilisé BPMSX60. Nous observons que tous les graphes simulés par le logiciel MATLAB/Simulink sont assimilés à ceux donnés par le constructeur suivant le DATASHEET du panneau.

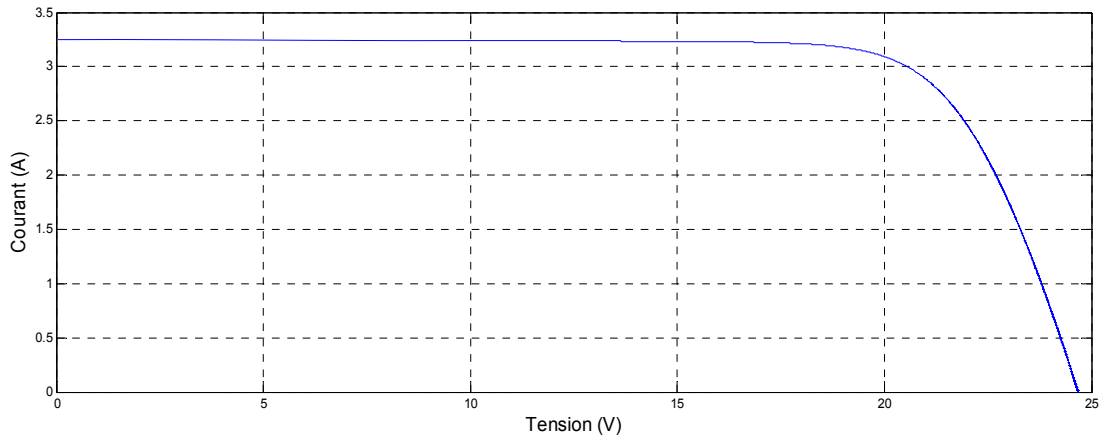


Figure IV.1. La courbe I-V.

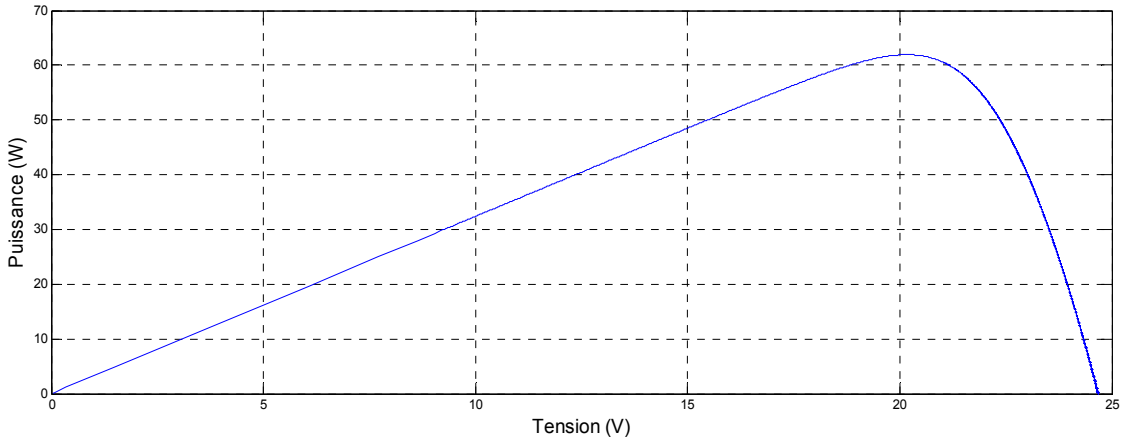


Figure IV.2. La courbe P-V.

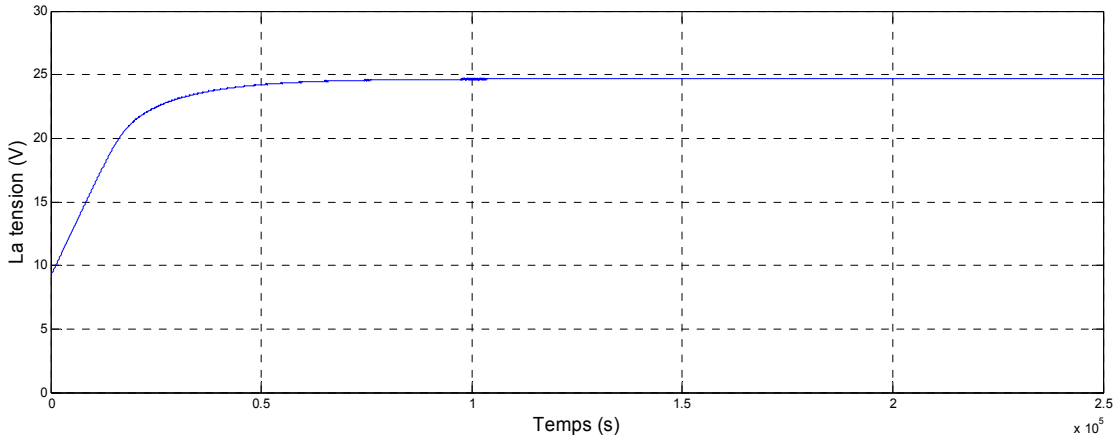


Figure IV.3. La courbe V-t.

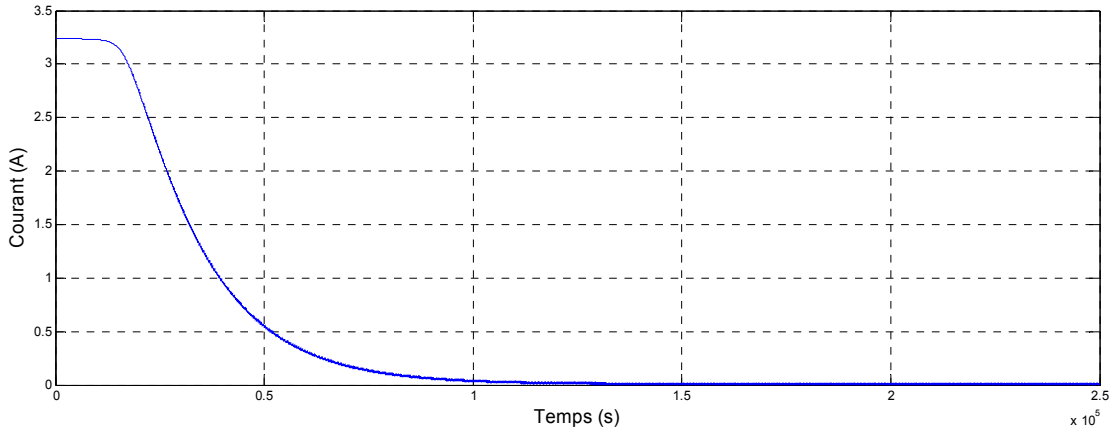


Figure IV.4. La courbe I-t.

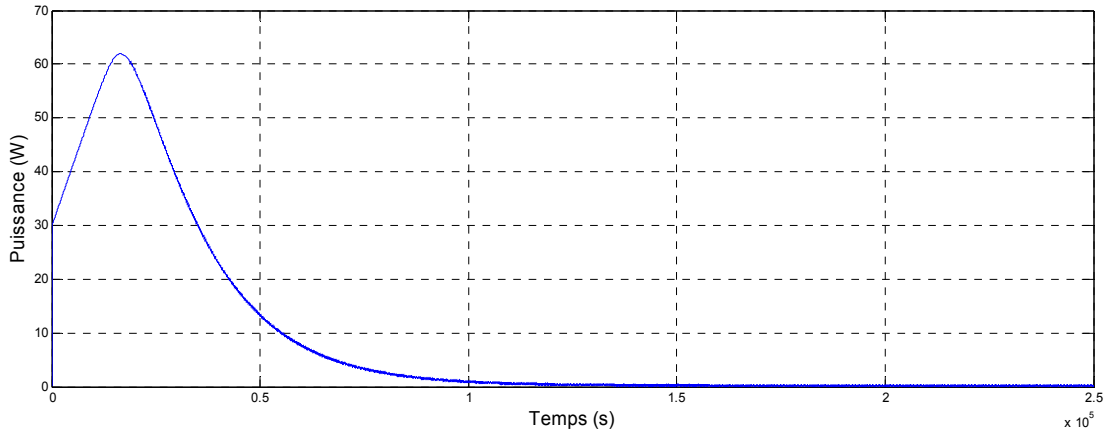


Figure IV.5. La courbe P-t.

IV.3. Simulationdu système photovoltaïque adapté par les quatre commandes MPPT (P&O, FL, IncCond, NNA)

Dans cette simulation, nous proposons quatre tests différents (sous conditions standards, avec un changement d'irradiation, et un changement de température, on plus un changement de température et d'irradiation à la fois).

IV.3.1.Conditions standards (T=25^{0}C & G=1000W/m^2)

Les figures suivantes représentent la simulation sous logiciel (MATLAB/Simulink) des quatre commandes de fonctionnement du générateur photovoltaïque (P(V),I(V),P(t), I(t) V(t) D(t)) sous les conditions standards.

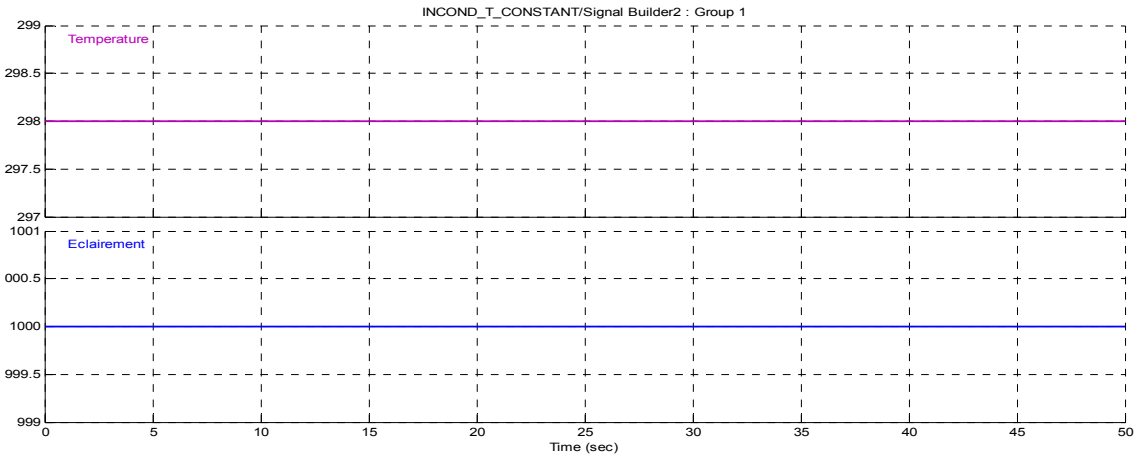


Figure IV.6. Température et Irradiation Constantes.

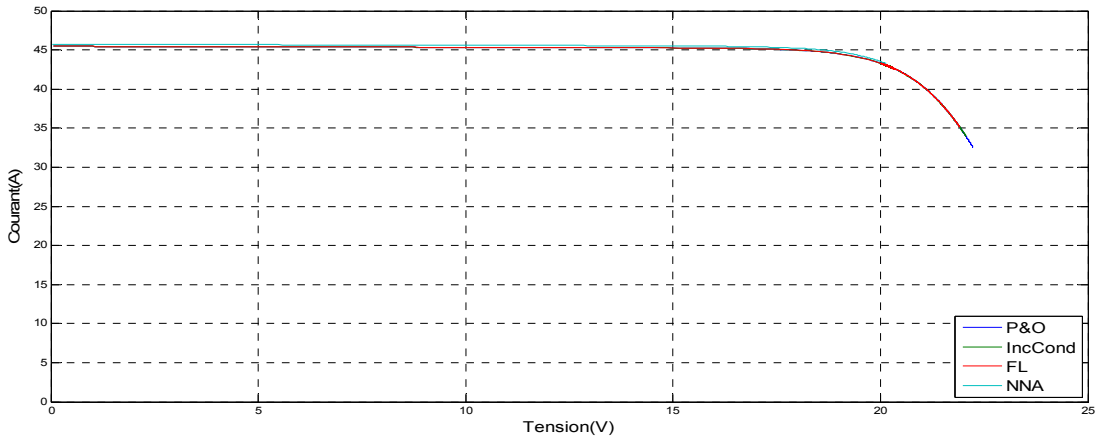


Figure IV.7. La courbe I-V.

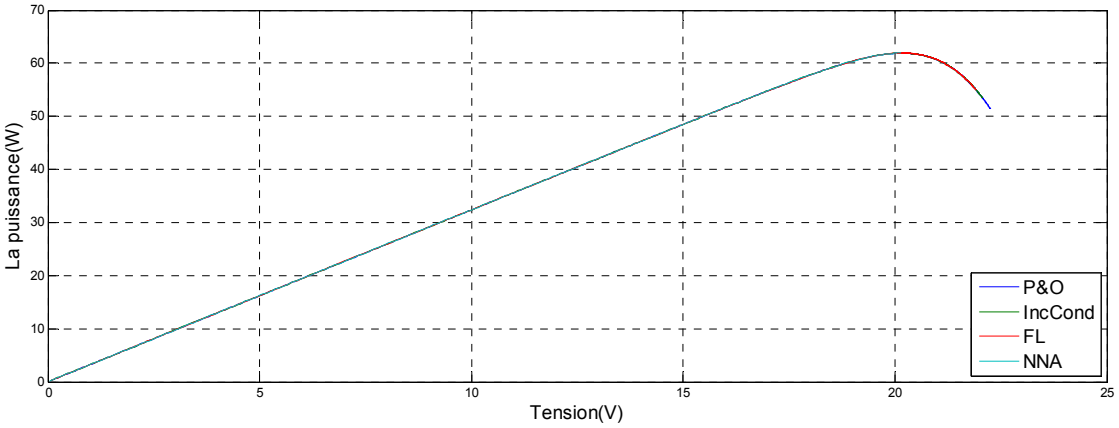


Figure IV.8. La courbe P-V.

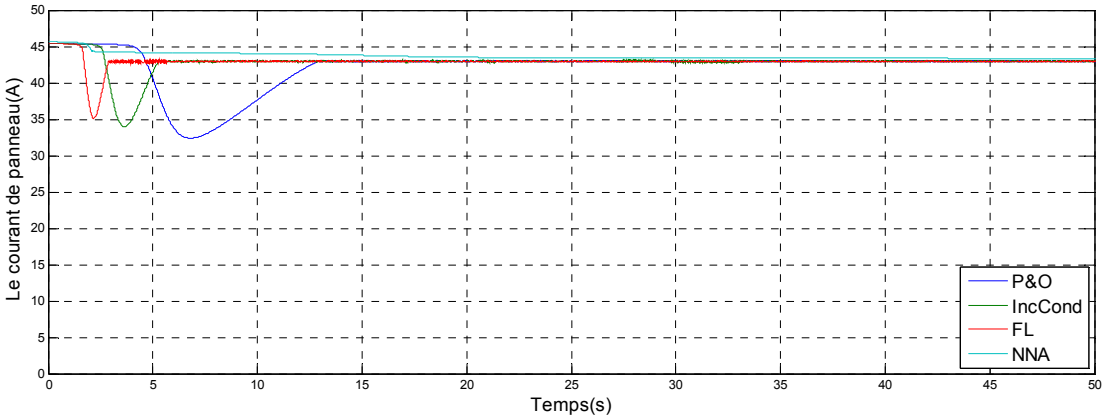


Figure IV.9. Le courant du panneau.

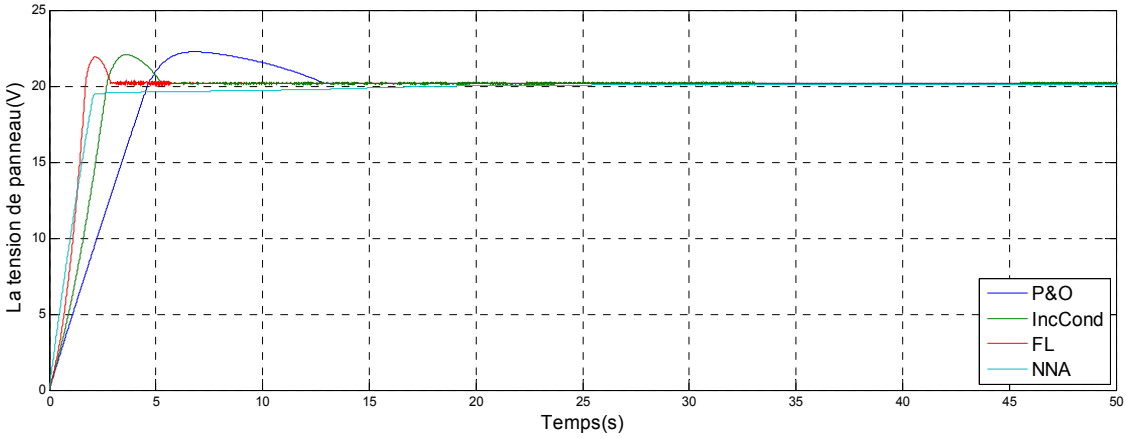


Figure IV.10. La tension du panneau.

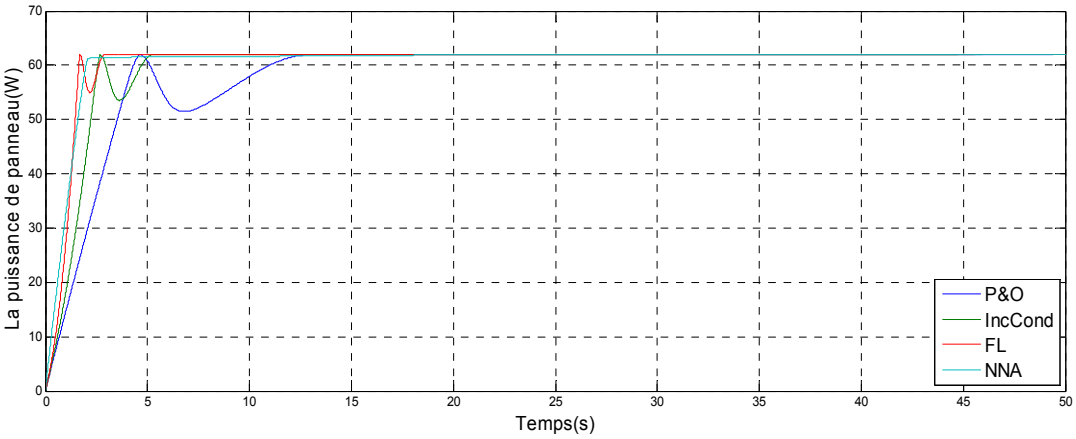


Figure IV.11. La Puissance du panneau.

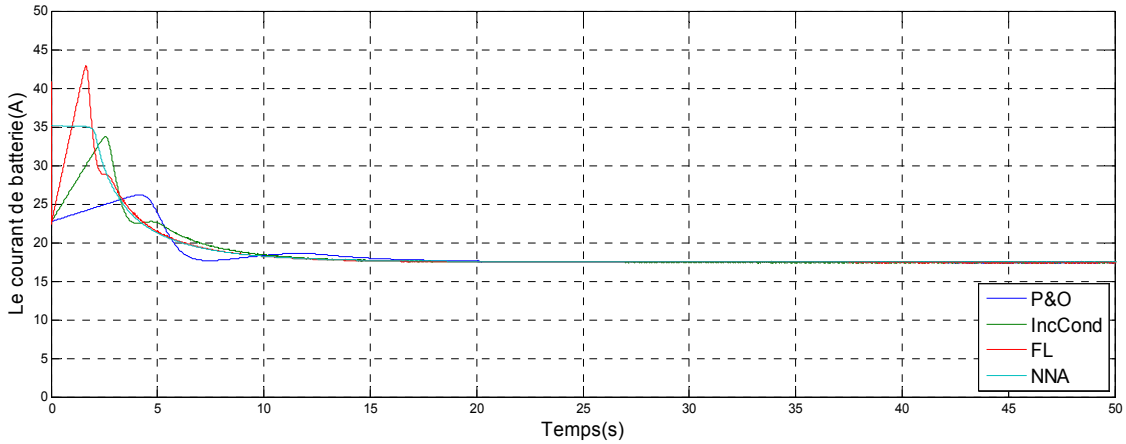


Figure IV.12. Le courant de la batterie.

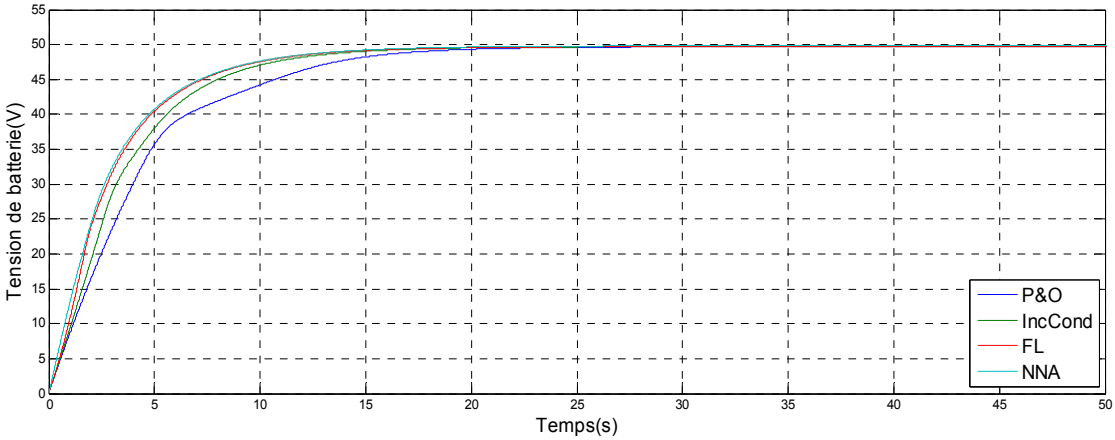


Figure IV.13. La tension de la batterie.

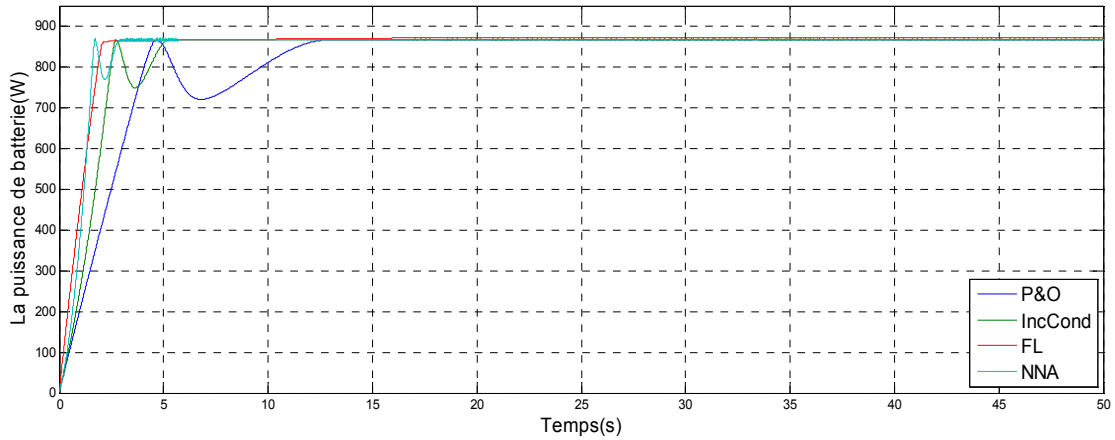


Figure IV.14. LaPuissance de la batterie.

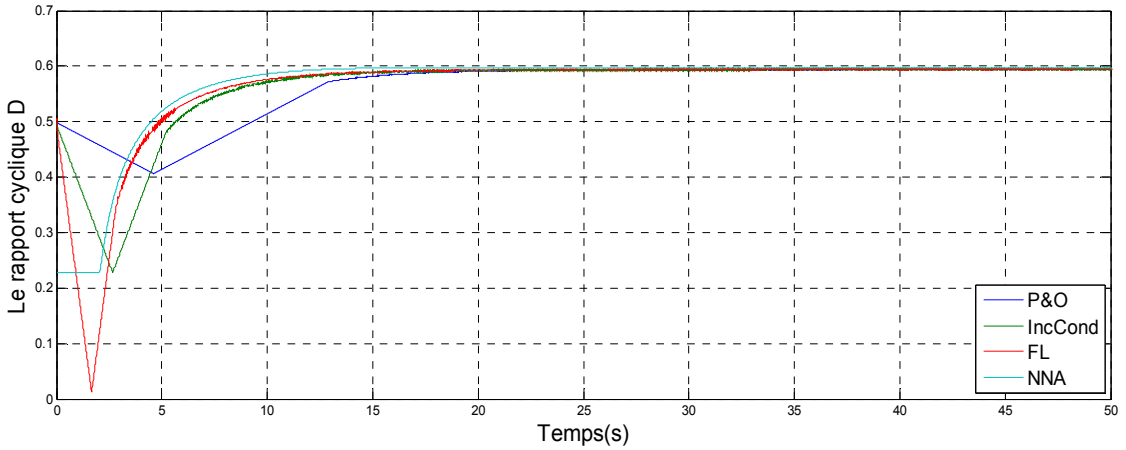


Figure IV.15. Le rapport cyclique D.

Les figures de simulation précédentes montrent que le système photovoltaïque converge vers les valeurs optimales.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de la rapidité de réaction (régime transitoire) et la précision de la stabilité (régime permanent).

Tableau IV.1. Comparaison des techniques MPPT

Commandes / Etats de commandes	P&O	IncCond	FL	NNA
Temps de réponses (s)	12.85	5.2	2.87	2.4
Stabilités	Très oscillant	Oscillant	Très bon	Très bon

IV.3.2.Comportement des quatre méthodes à un changement de température

A un changement de température, l'irradiation étant constant G=1000W/m² .La température stabilise à la valeur 350°K pendant 15 secondes, puis elle diminue lentement jusqu'à la valeur 298°K et se stabilise dans l'intervalle [22s, 27s] et après, elle augmente lentement jusqu'à la valeur 350°K et se stabilise encore dans l'intervalle [34s, 39s] puis diminue rapidement dans l'intervalle [39s, 41s] jusqu'à la valeur 298°K et puis se stabilise dans cette valeur dans l'intervalle [41s, 46s] ,après elle augmente rapidement dans l'intervalle [46s-48s]. A la fin, elle est stable dans l'intervalle [48s, 50s] à la valeur 350°K,comme il est présenté dans la figure(IV.16).

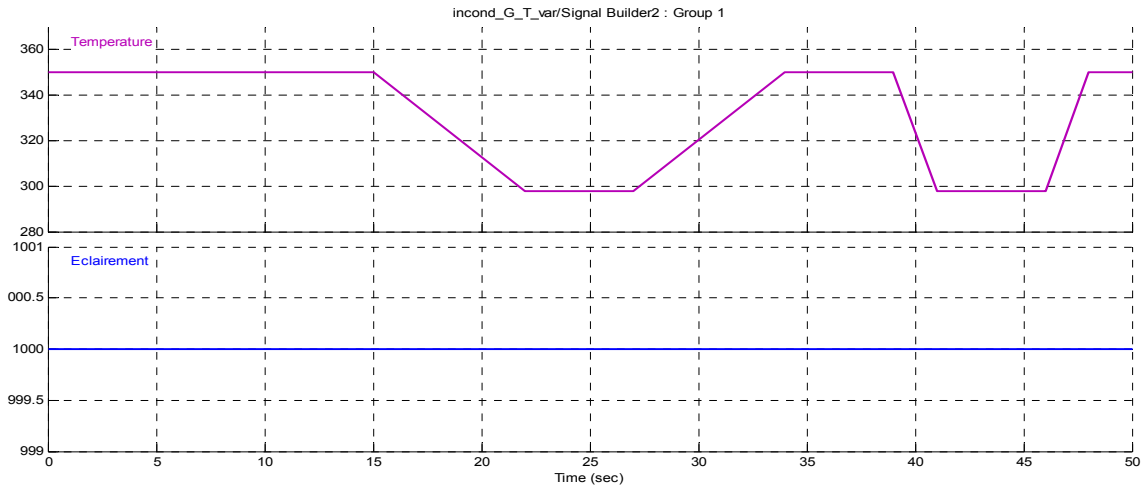


Figure IV.16. Changement de Température et l'Irradiation Constant.

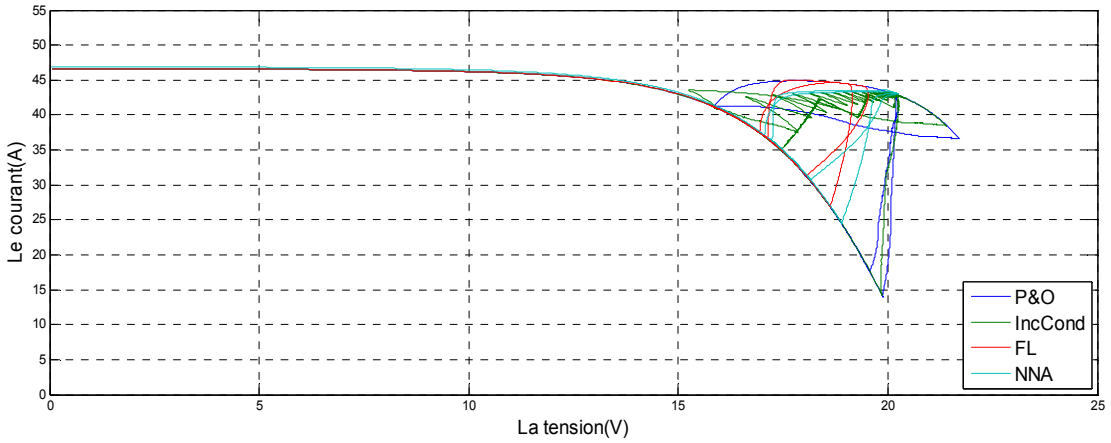


Figure IV.17. La courbe I-V.

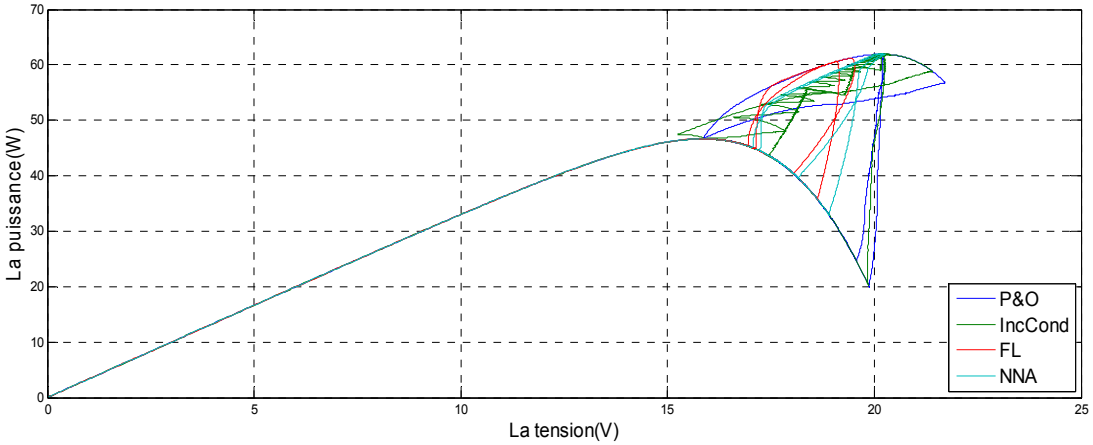


Figure IV.18. La courbe P-V.

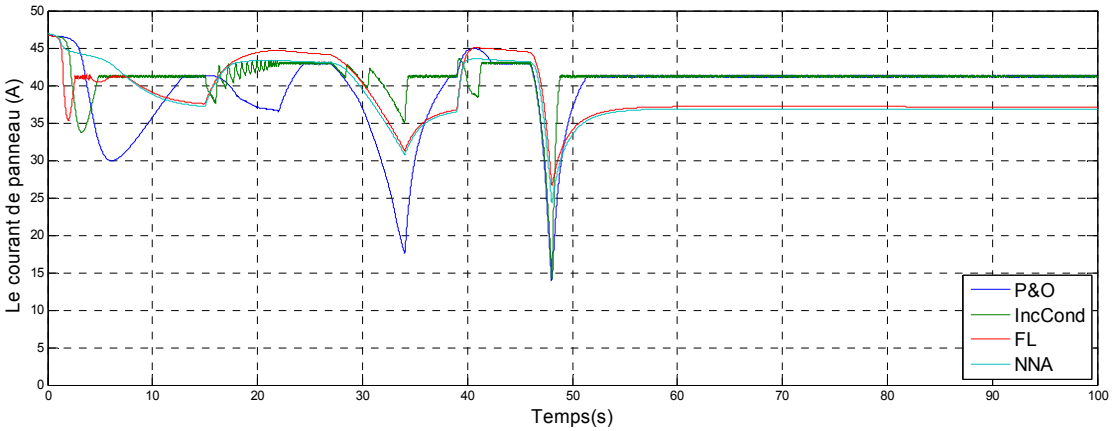


Figure IV.19. Le courant du panneau.

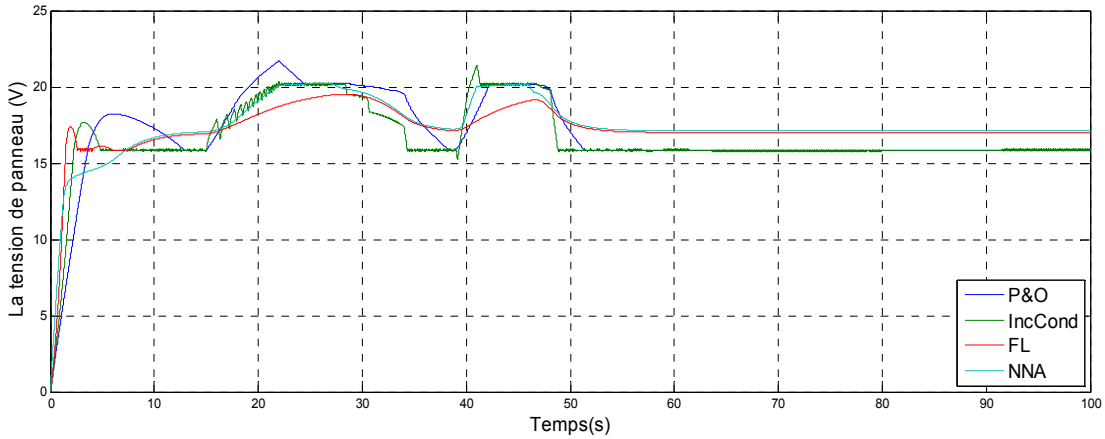


Figure IV.20. La tension du panneau.

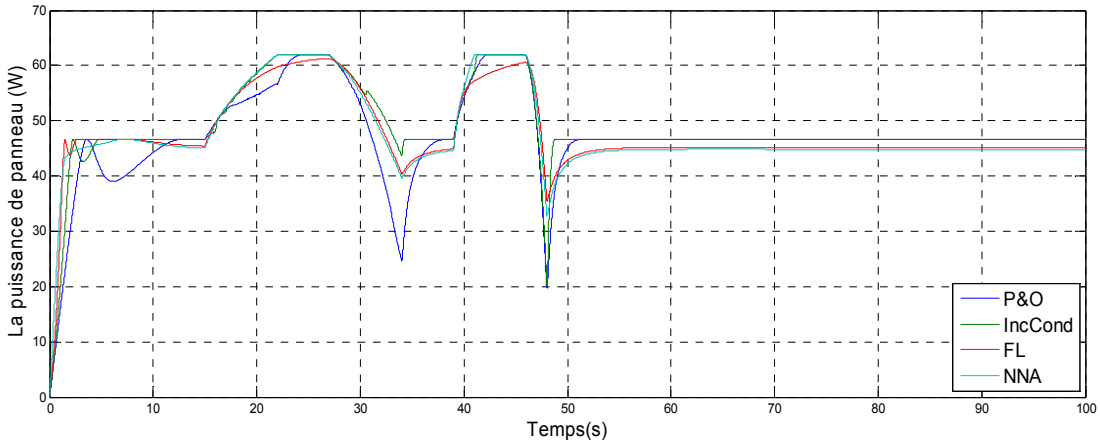


Figure IV.21. La puissance du panneau.

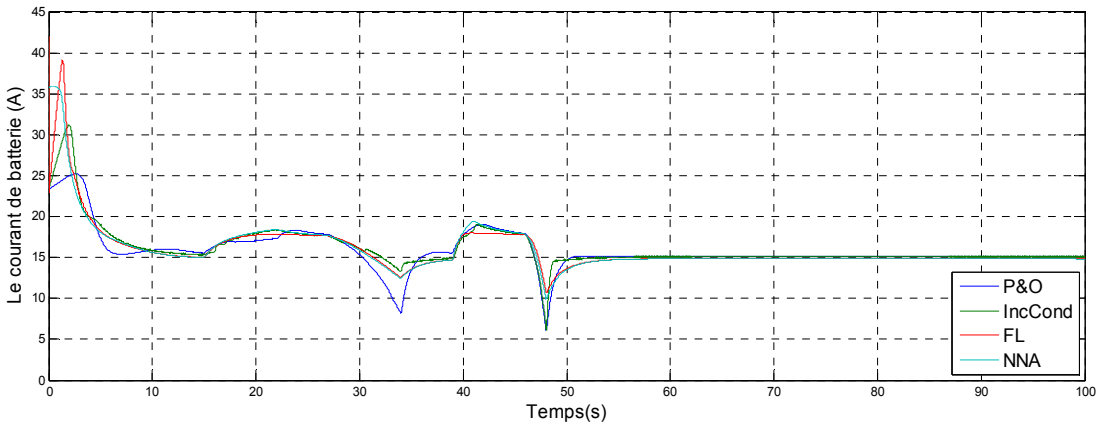


Figure IV.22. Le courant de la batterie.

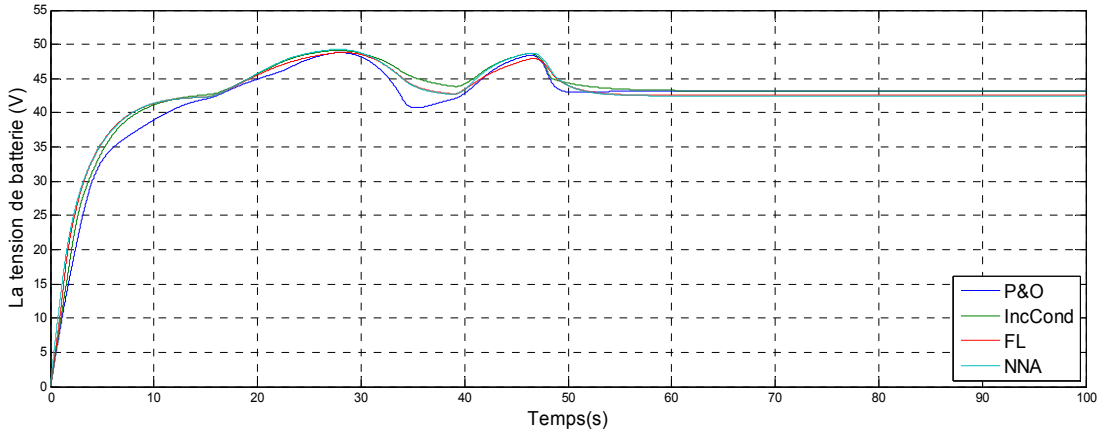


Figure IV.23. La tension de labatterie.

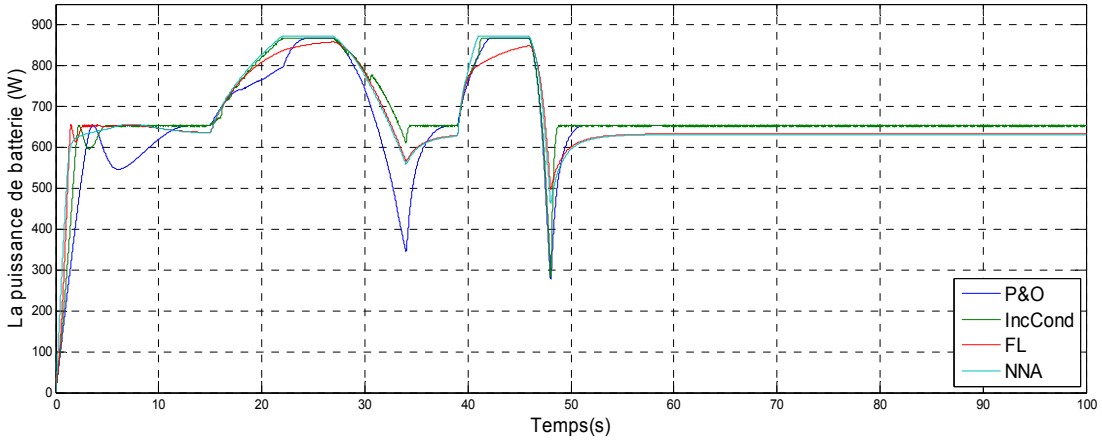


Figure IV.24. La puissance de la batterie.

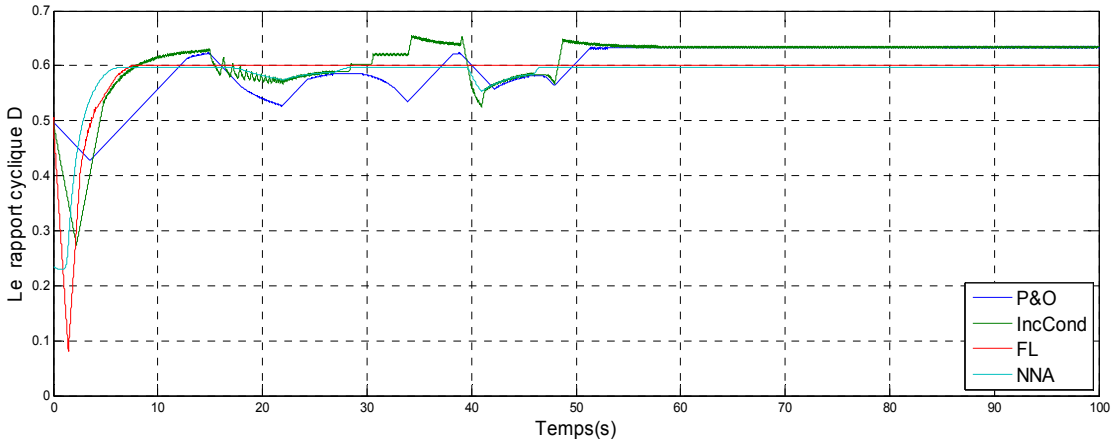


Figure IV.25. Le rapport cyclique D.

Pour l'algorithme IncCond. Nous remarquons l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV causé par une diminution de la température *T* si l'éclairement est fixe avec des oscillations moins que P&O autour du PPM.

Pour les deux algorithmes la logique floue et le réseau de neurone, nous remarquons toujours que l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV causé par une diminution de la température *T* si l'éclairement est fixe avec une très bonne performance et bonne stabilité (pas d'oscillations).

IV.3.3.Comportement des quatre méthodes à un changement d'irradiation

Le troisième test : A un changement d'irradiation : dans ce cas la température étant fixée a T=298°K (25°C) .L'irradiation stabilise à la valeur à la valeur 1000W/m². Pendant 15 secondes, puis elle diminue lentement jusqu'à la valeur 400W/m².et se stabilise dans l'intervalle [22s, 27s] et après, elle augmente lentement jusqu'à la valeur 1000W/m² et se stabilise encore dans l'intervalle [34s, 39s] puis diminue rapidement dans l'intervalle [39s, 41s] jusqu'à la valeur 400W/m² et puis se stabilise dans cette valeur dans l'intervalle [41s, 46s],après elle augmente rapidement dans l'intervalle [46s, 48s]. A la fin, elle est stable dans l'intervalle [48s, 50s] à la valeur 1000W/m², comme il est présenté dans la figure(IV.26).

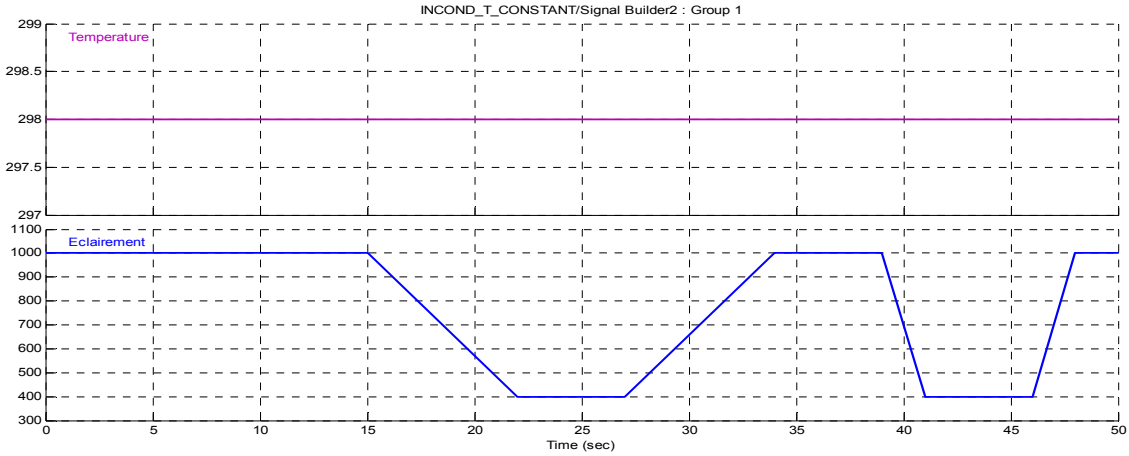


Figure IV.26. Changement del'Irradiation et Température Constant.

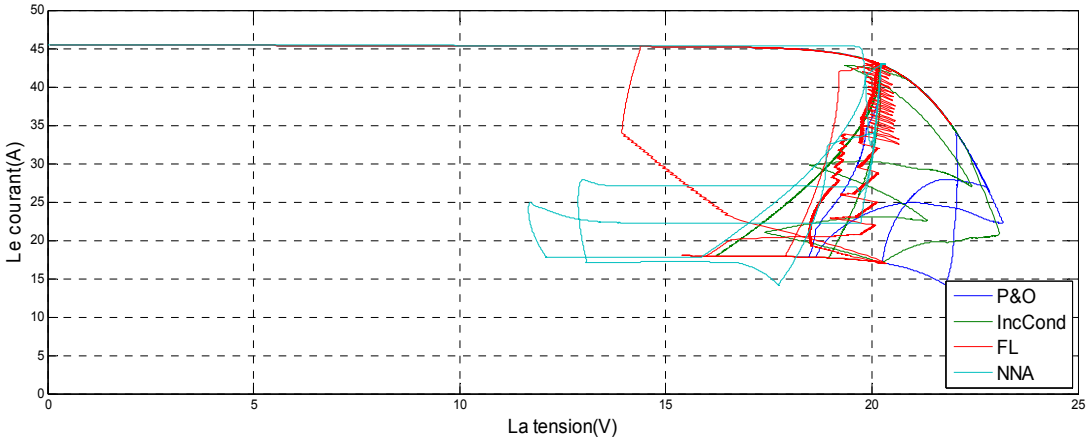


Figure IV.27. La courbe I-V.

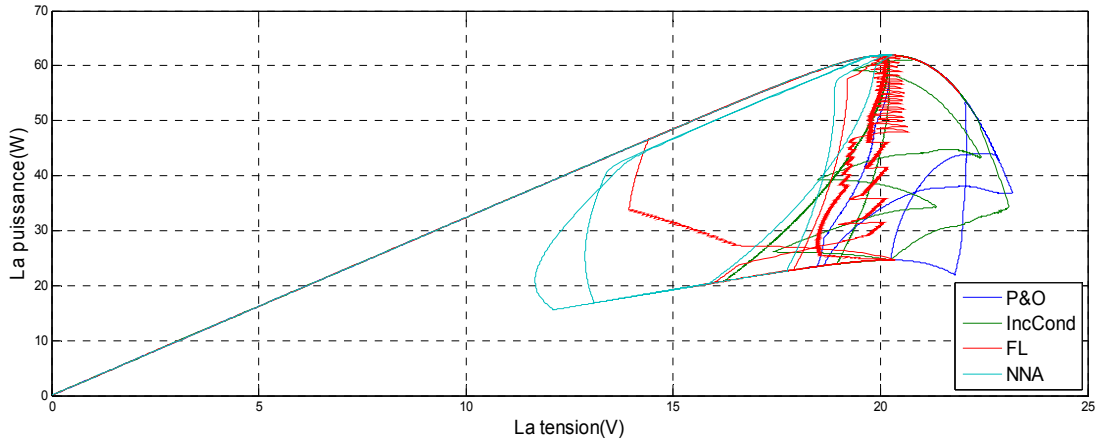


Figure IV.28. Lacourbe P-V.

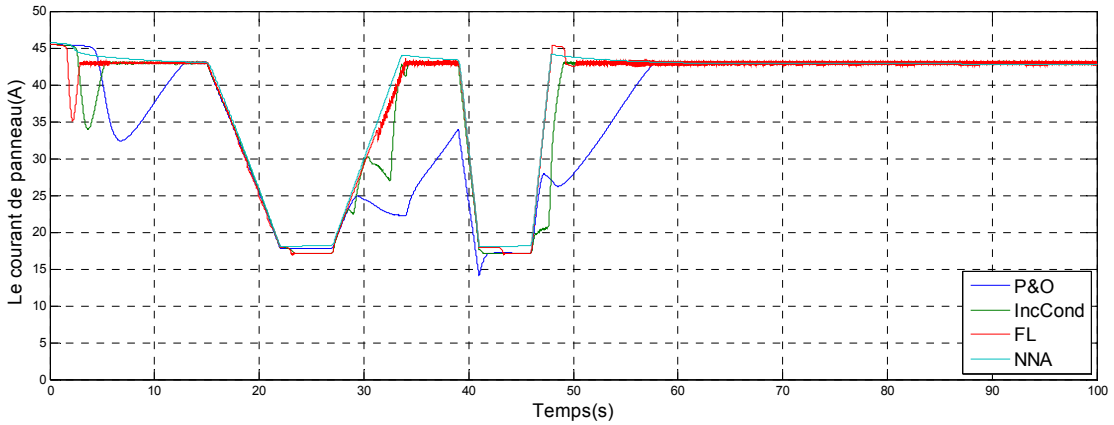


Figure IV.29. Le courant du panneau.

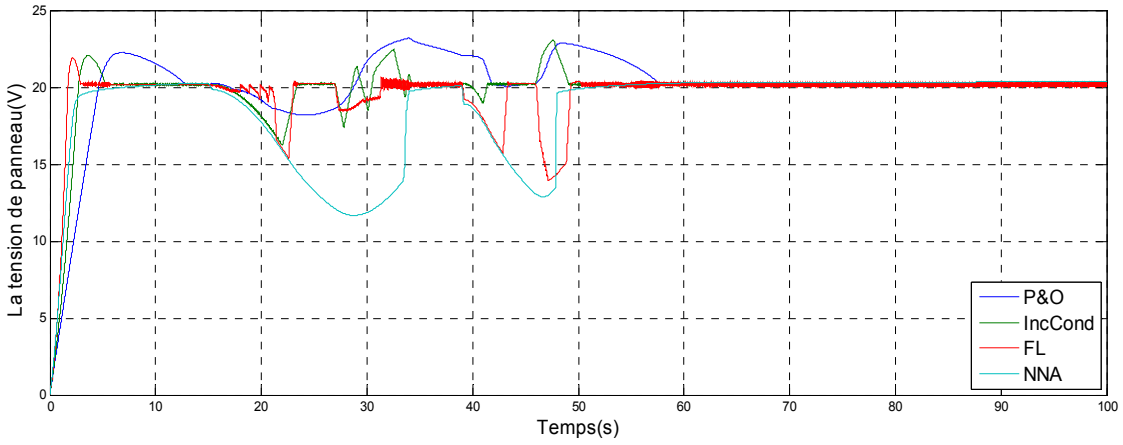


Figure IV.30. La tension du panneau.

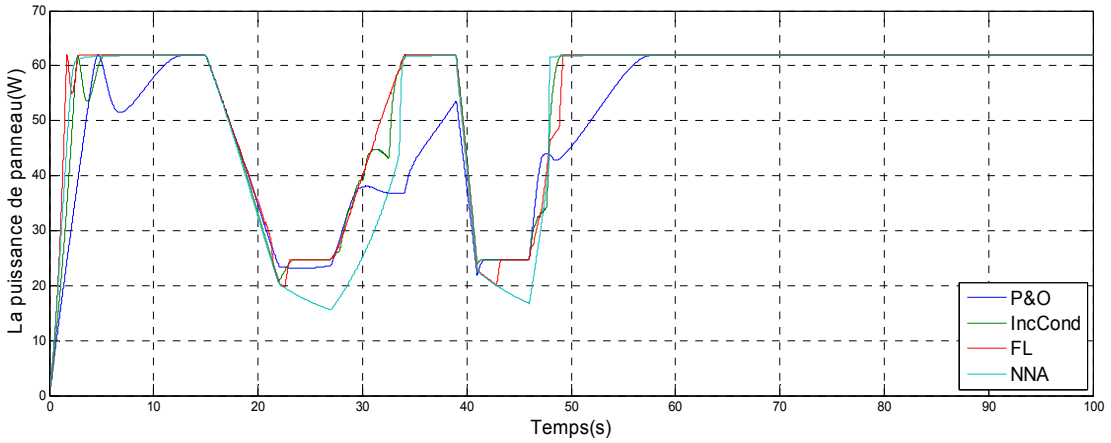


Figure IV.31. La puissance du panneau.

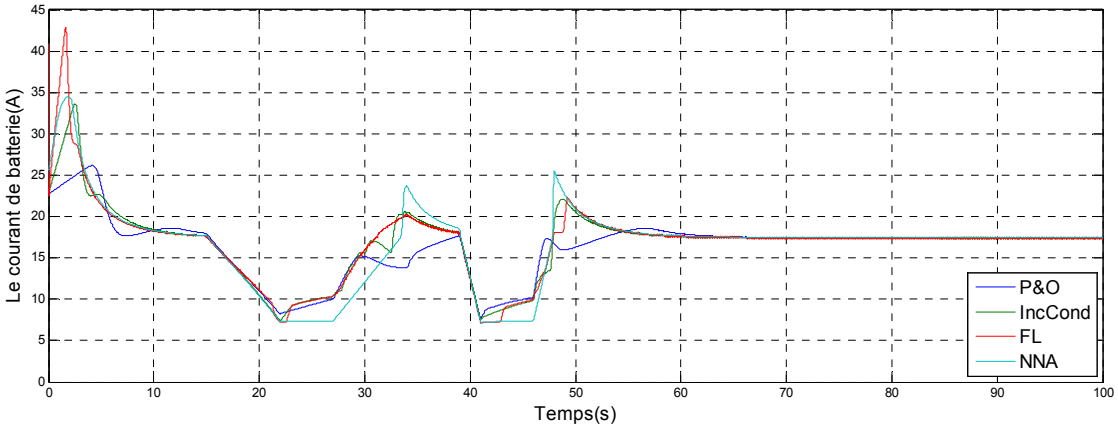


Figure IV.32. Le courant de la batterie.

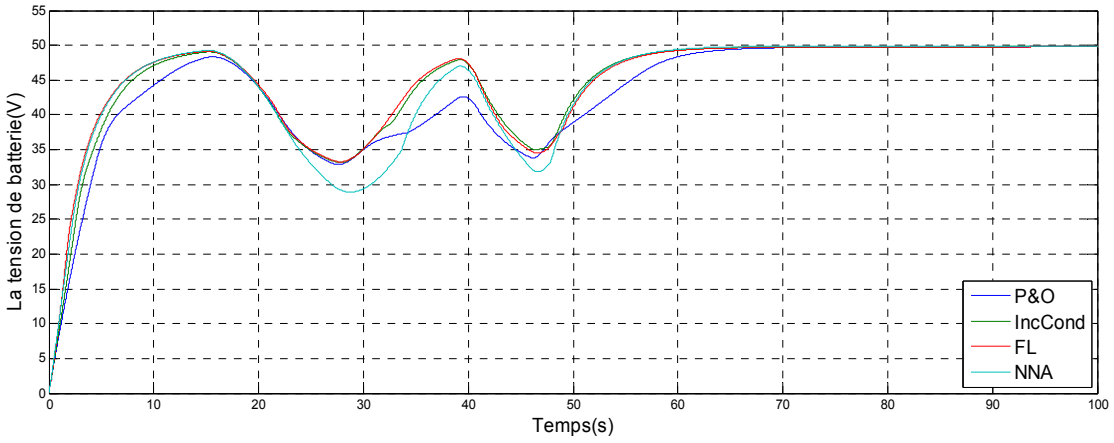


Figure IV.33. La tension de la batterie.

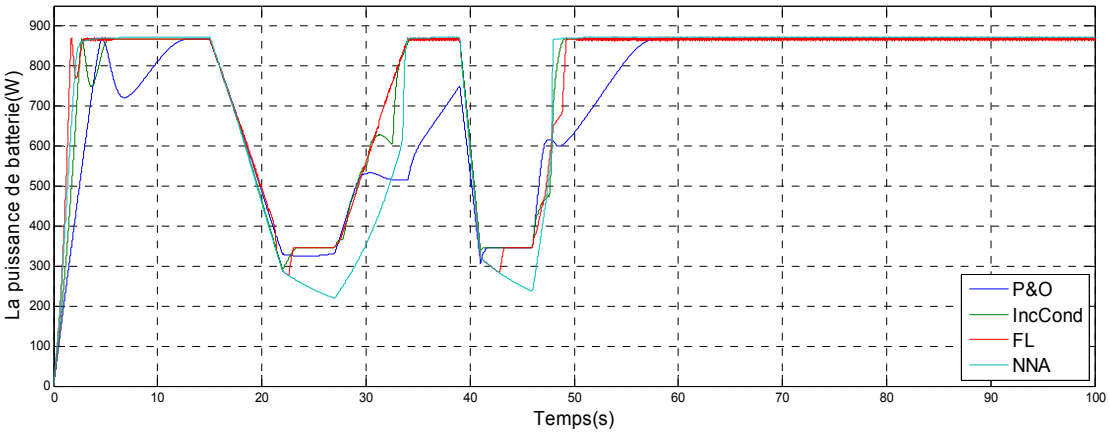


Figure IV.34. La puissance de la batterie.

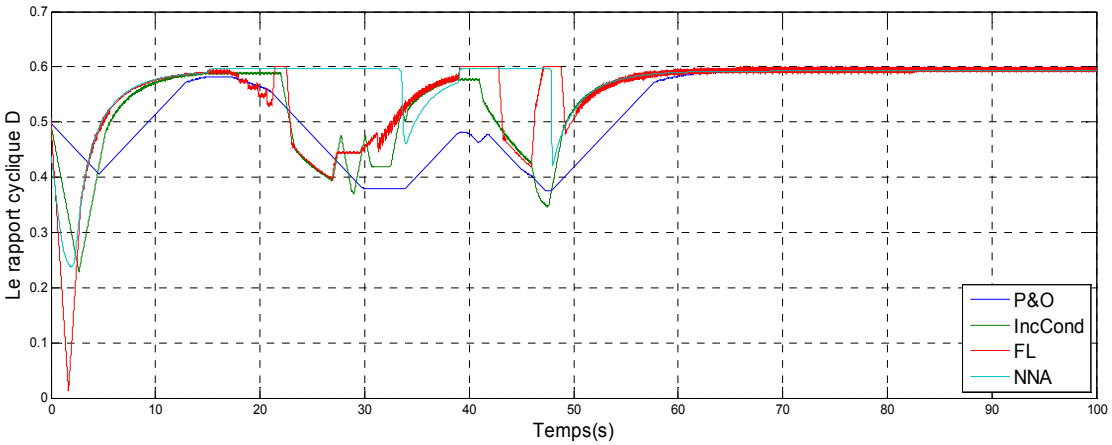


Figure IV.35. Le rapport cyclique D.

On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance etl'éclairement.

Pour l'algorithme P&O etIncCond, nous remarquons que l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV, causée par une augmentation de l'éclairement *G* si la température est fixe. Mais il a des oscillations autour du PPM.

On remarque que l'algorithme de logique floue suivi le point de puissance maximale. Le résultat montre que le contrôleur flou a une très bonne performance, il est stable dans des conditions d'irradiation changeantes.

L'algorithme NNA aussi suivi le point de puissance maximale. Et il donne un bon résultat et stable dans des conditions d'irradiation changeantes.

IV.3.4. Comportement des quatre méthodes à un Changement de température etChangement d'irradiation

A un changement d'irradiation et encore changement de température, comme il est présenté dans la figure (IV.36).

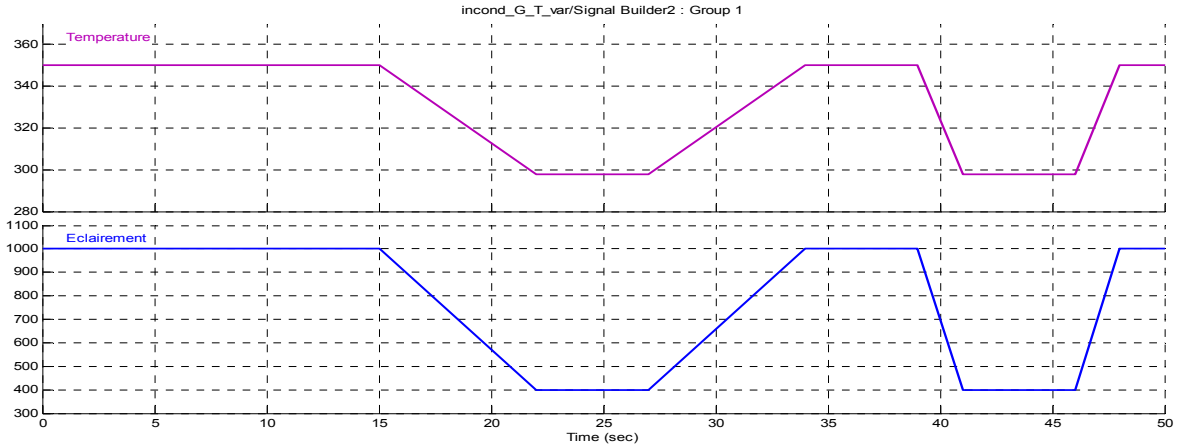


Figure IV.36. Changement del'Irradiation etde Température.

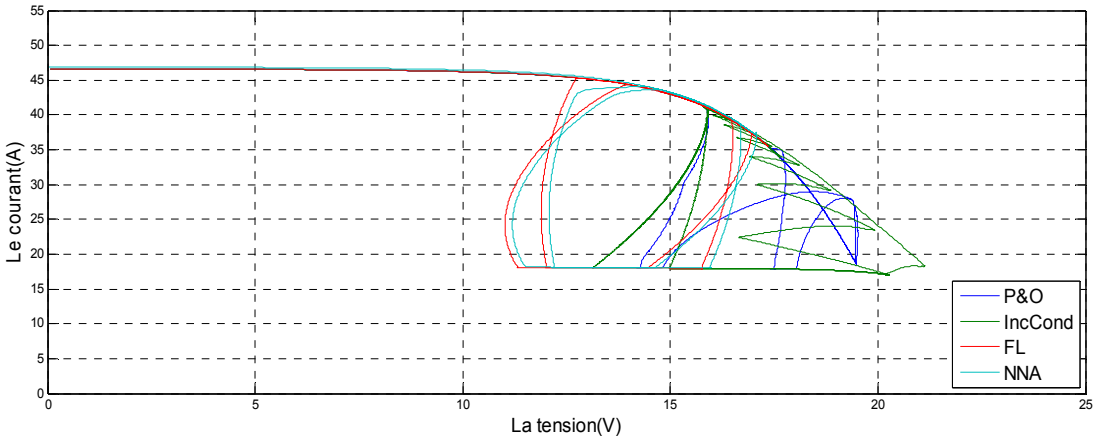


Figure IV.37. La courbe I-V.

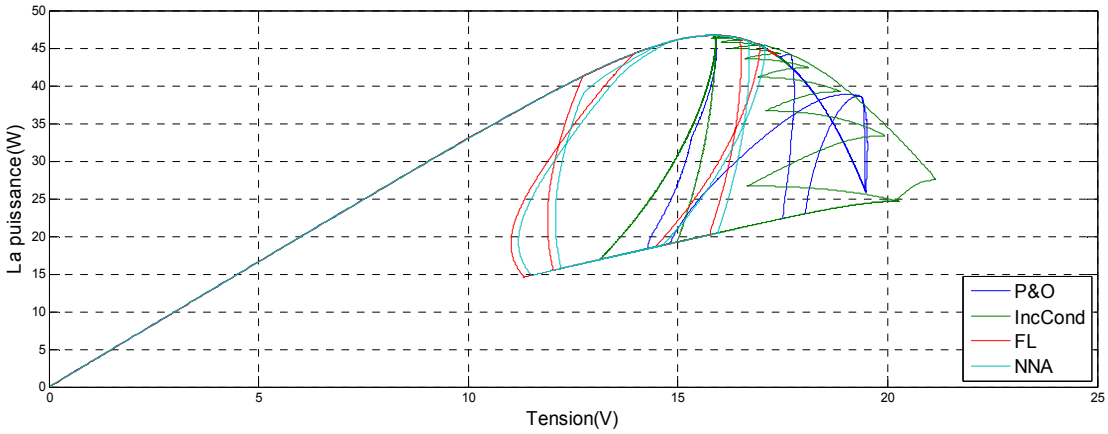


Figure IV.38. Lacourbe P-V.

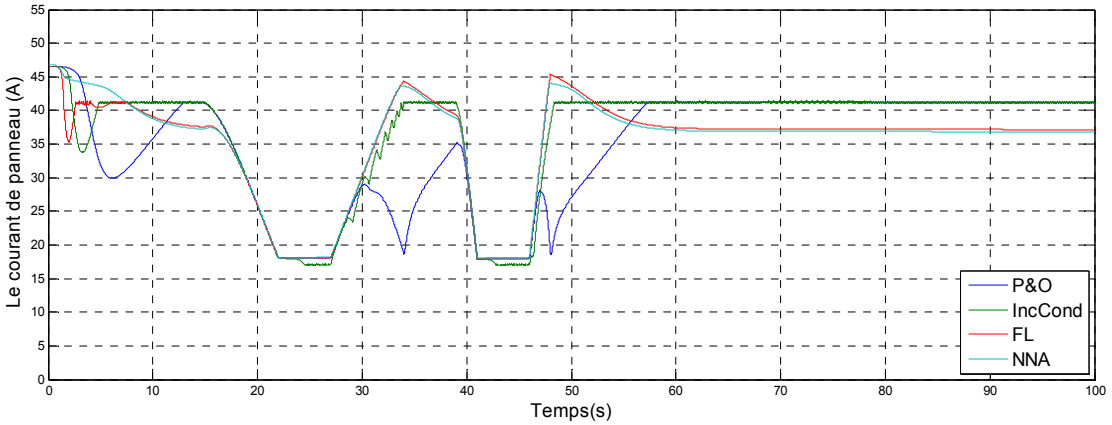


Figure IV.39. Le courant du panneau

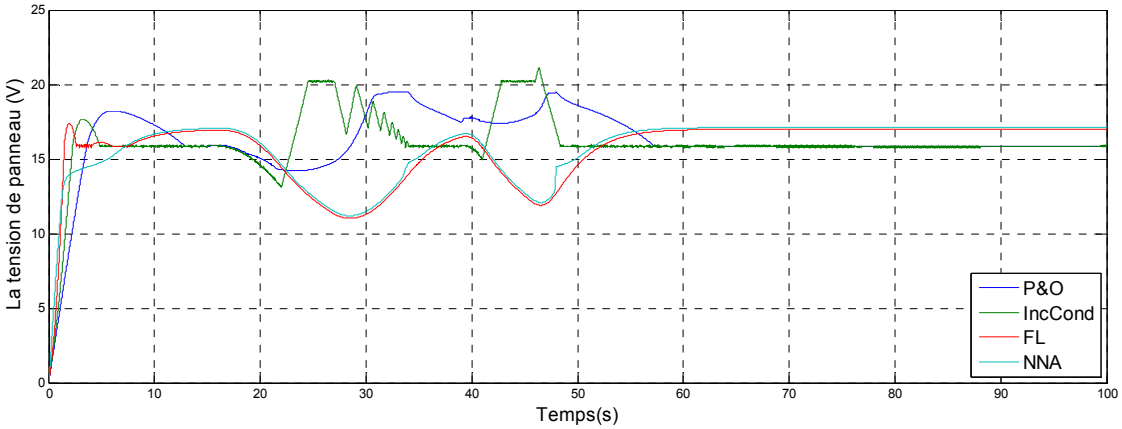


Figure IV.40. La tension du panneau.

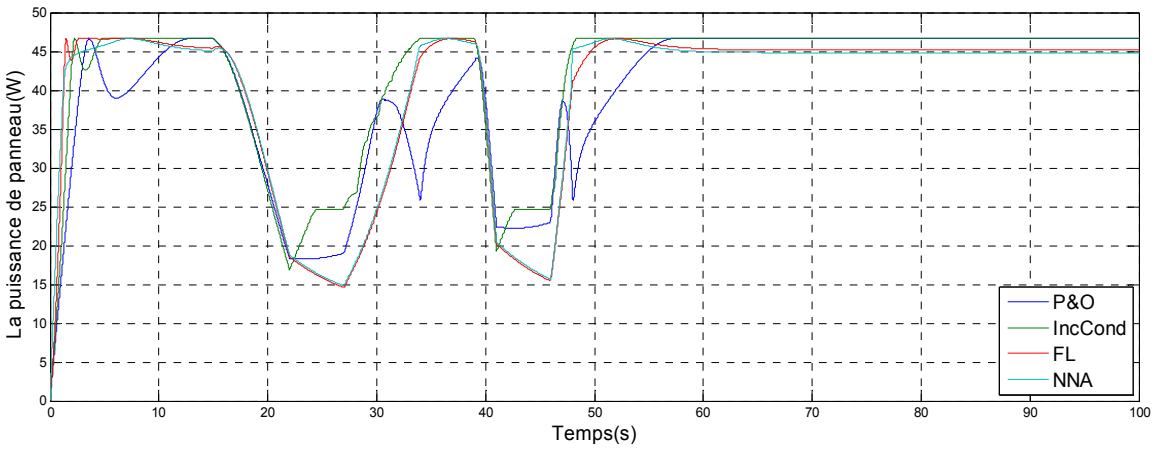


Figure IV.41. Lapuissance du panneau.

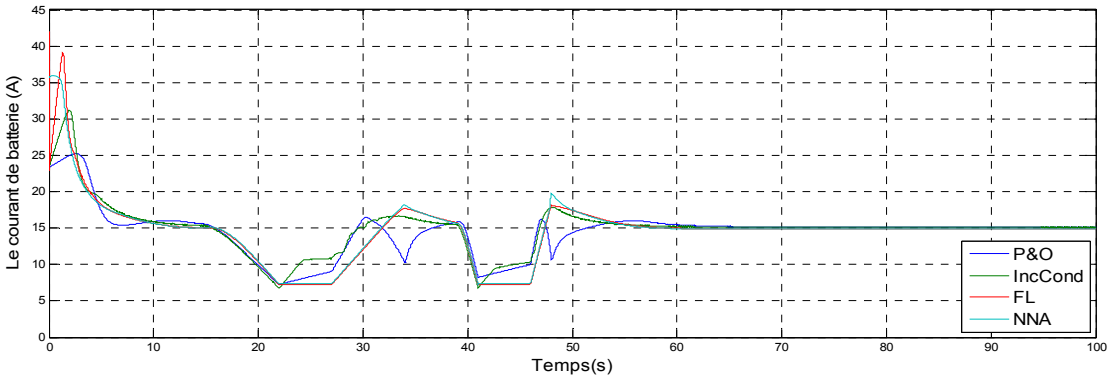


Figure IV.42. Le courant de la batterie

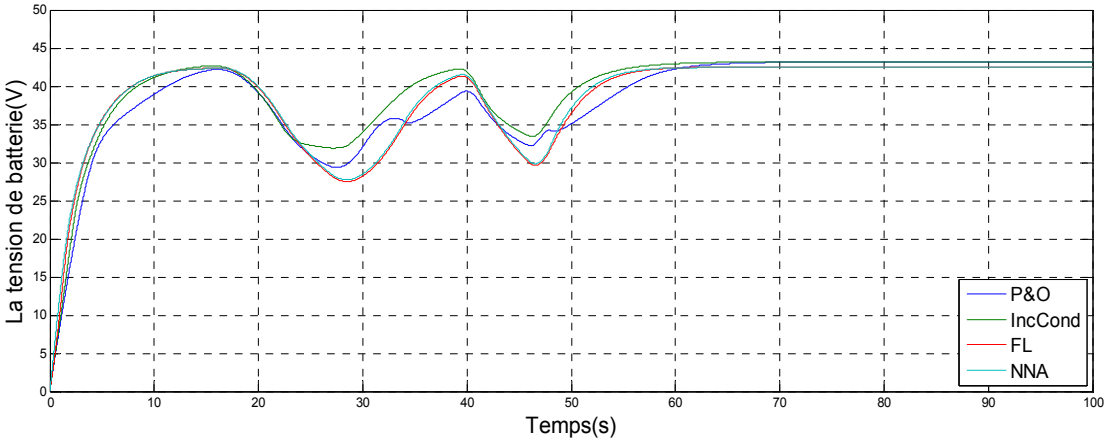


Figure IV.43. La tension de la batterie.

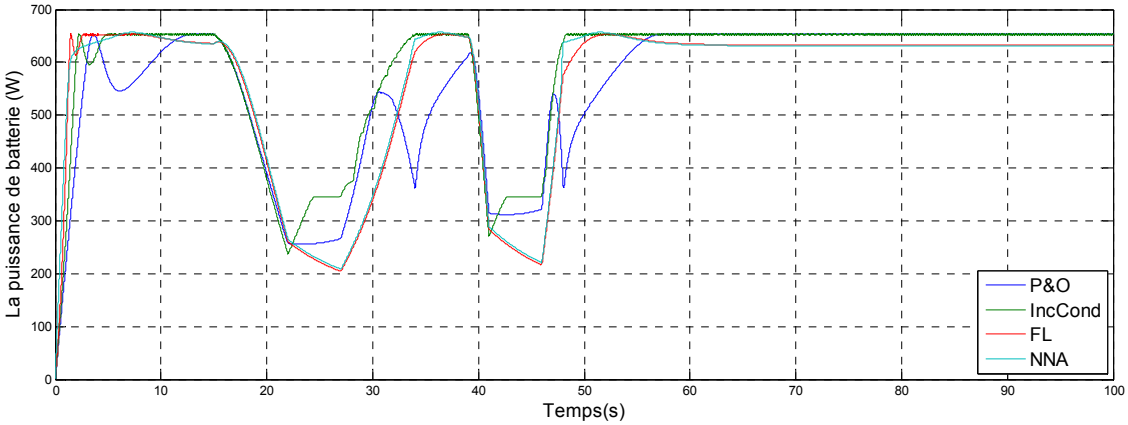


Figure IV.44. La puissance de la batterie.

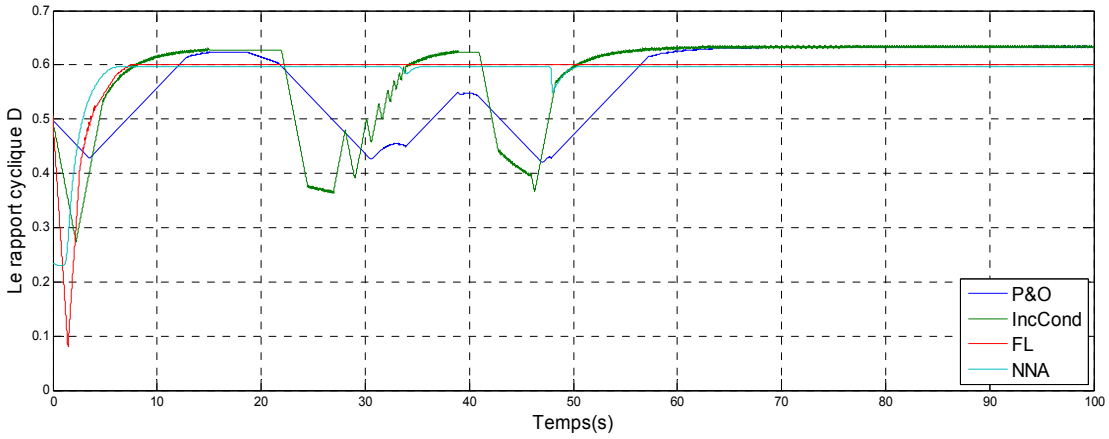


Figure IV.45. Le rapport cyclique D.

IV.4.Discussion

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (nuages par exemple).

L'algorithme IncCond semble une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant, c'est un algorithme un plus complexe que le précédent.

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations en régime permanant. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

Et enfin,l'algorithme basé sur le contrôleur neuronal à divers algorithmes de commande et nous avons aussi observé que ce dernier présentait de bien meilleur résultats, particulièrement lors de variations des conditions atmosphérique.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

Tableau IV.2. Comparaison des techniques MPPT

Algorithmes MPPT	P&O	IncCond	FL	NNA
Types de capteurs utilisés	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Haute	Très haute
Vit. Convergence	Moyenne	Moyenne	Très rapide	Très rapide
Précision	95%	98%	99%	99.5%

IV.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé les quatre algorithmes MPPT (P&O, IncCond, FL et NNA).

Les résultats de simulation montrent que l'algorithme 'IncCond' donne des résultats meilleurs que le 'P&O' au niveau des contrôleurs classique. mais la commande basée sur la logique floue et le réseau de neurone artificielle montrent un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.

Conclusion Générale

Ce travail a comme objectif primordial l'amélioration du rendement d'un système d'alimentation photovoltaïque. Grâce à la présence d'un processus de poursuite du point de puissance maximale, connu sous le nom de contrôleur MPPT, ce dernier est indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant de produire le maximum de puissance.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV.

Deuxièment, nous avons modélisé le système photovoltaïque (panneau PV, hacheurs et batterie).

Dans la troisième étape, on a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de Perturbation et Observation et Incrémentation de Conductance. Elles sont étudiées à cause de leur simplicité, et elles exigent seulement les mesures de la tension et du courant du panneau PV. Ensuite, nous avons rappelé le principe des deux autres algorithmes MPPT, la Logique floue et les réseaux de neurone, qui sont basées sur le principe de l'intelligence artificielle.

La dernière étape était basée sur la simulation sous MATLAB/Simulink des quatre méthodes modélisées sur le chapitre précédent.

On peut dire d'après les résultats de la simulation obtenus que :

- Les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température.
- Parmi tous ces algorithmes, le 'P&O' et 'IncCond' sont largement utilisés, mais la commande basée sur la logique floue et NNA montre un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.
- La commande MPPT soit classique (P&O, IncCond), soit intelligente (FL ou NNA) permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge. Elle force de le faire fonctionner toujours au point de puissance maximum, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue et MPPT NNA conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et pas d'ondulation dans la puissance générée par le panneau photovoltaïque).

Perspectives de développements futurs

Nous souhaitons que ce mémoire sert les intérêts des autres étudiants qui sont intéressés par l'électronique de puissance pour les applications photovoltaïques et les encourage à plus haut projet avancé de maîtrise ou de recherche.

Pour cela, nous proposons comme perspective autres commandes MPPT comme ‘Mode glissant’, ‘Hill Climping’ et ‘Neuro-floue’. Sans oublier une validation expérimentale prouvé les résultats qu’on a trouvé par l’outil MATLAB/Simulink.

Annexe

L'annexe 1 : paramètres du convertisseur boost :

Les paramètres du convertisseur boost est :

- Vpv : 20.1595 V
- V ch : 49.8266V
- Puissance maximale PV : 60 W

L'équation de calcul de l'inducteur L

$$L \geq \frac{V\ ch.Dm.(1-Dm)}{fs\ |\Delta IL\ ripple|}$$

$$L = 3.5\ e\text{-}3\ \mu H$$

L'équation de calcul de rapport cyclique

$$\frac{V_0}{v_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

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

$$D = 0.596$$

L'équation de calcul de courant de sortie de l'hacheur

$$I_{ch} = \frac{p_{ch}}{V_{ch}}$$

Le courant de sortie de l'hacheur

$$I_{ch} = \frac{60}{54} = 1.20A$$

La capacité d'entrée C_{in} utilisée la relation

$$C_{in} \geq \frac{Iom.Dm^2}{0.02(1-Dm)fsVmp}$$

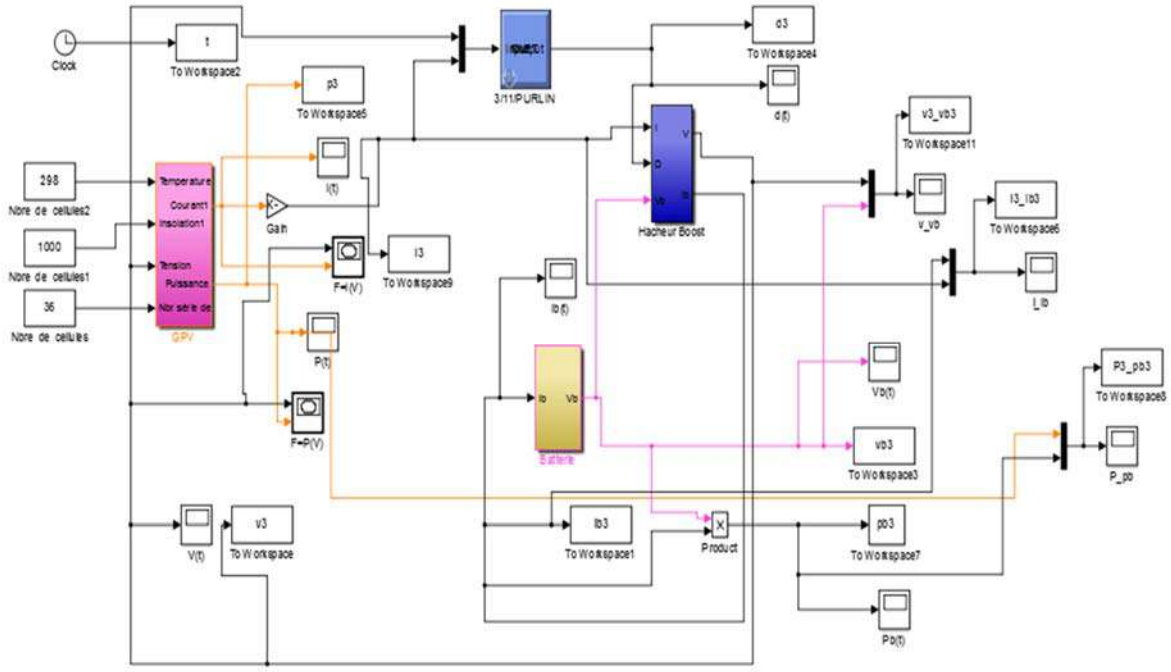
C_{in} = 5.6 e-3 µF

La capacité de sortie C_{out} utilisée la relation

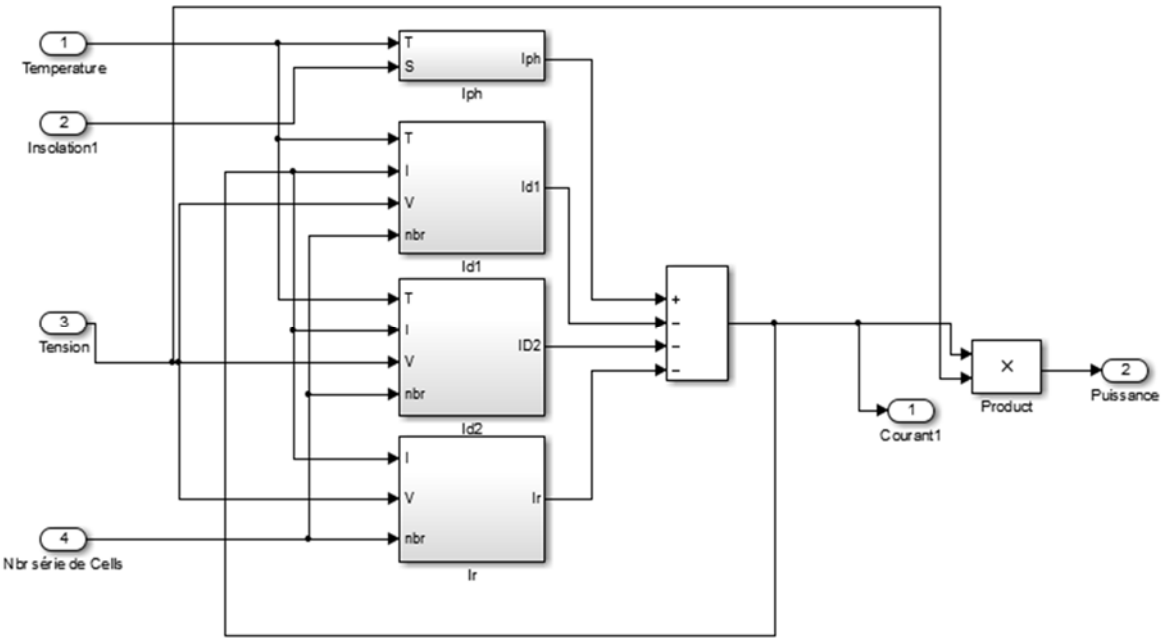
$$C_{out} \geq \frac{Vch.D}{\text{fs } \Delta\text{Vch Rch}}$$

C_{out} = 5.6 e-3Mf

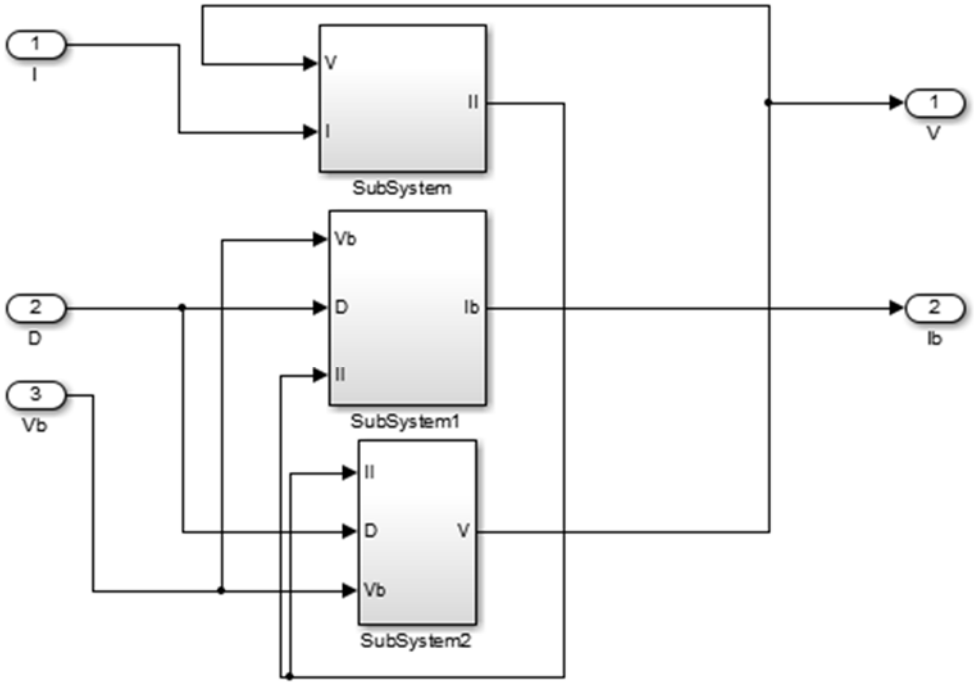
A .Block diagramme des modèles de simulation



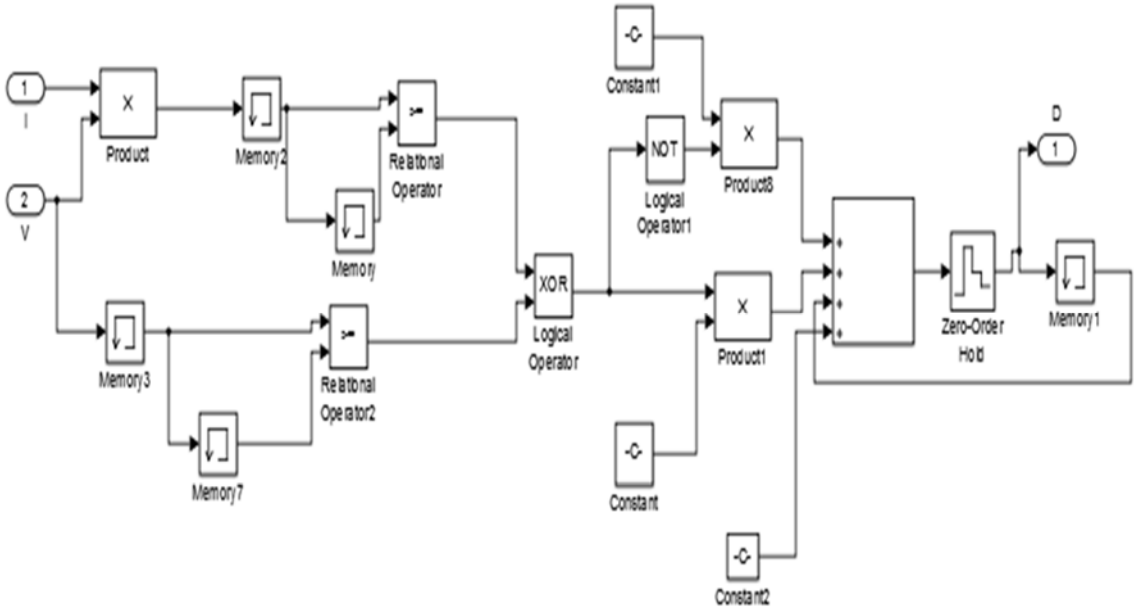
A .1 Block diagramme du module PV



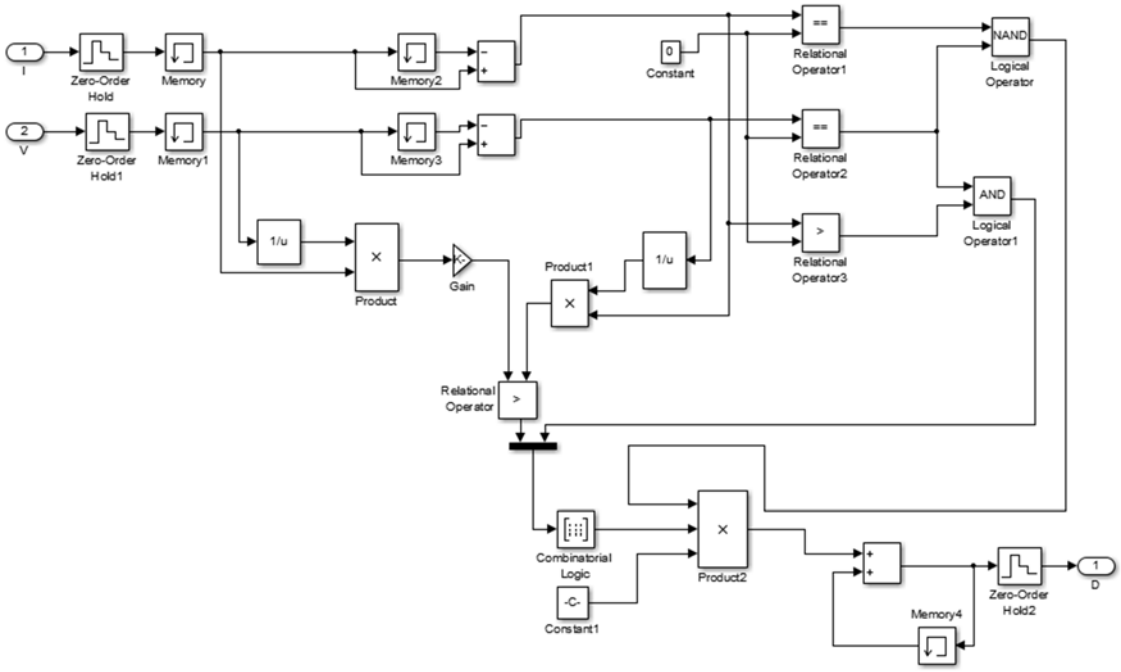
A .2 Block diagramme du hacheur boost



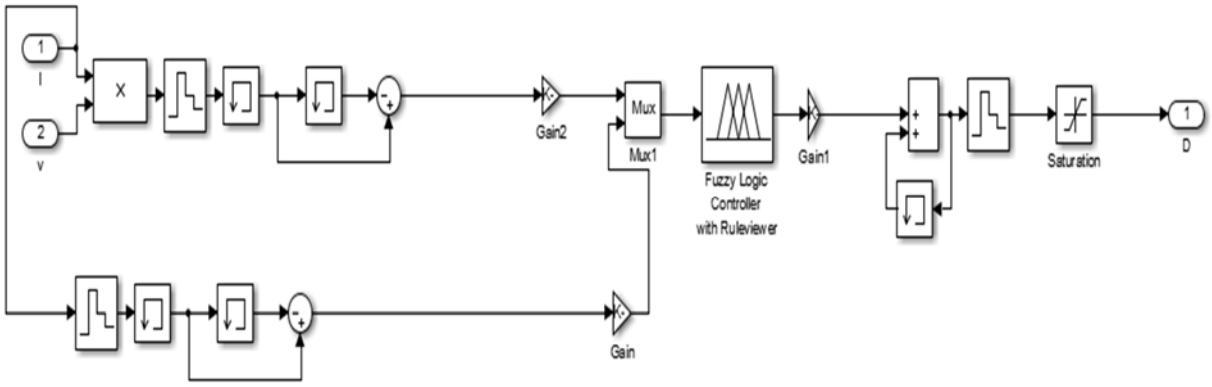
A .3 Block diagramme de la méthode "P&O"



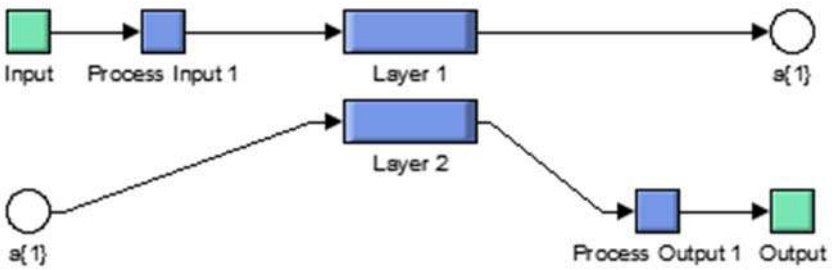
A .4 Block diagramme de la méthode "InCcond"



A .5 Block diagramme de la méthode de la "FL"

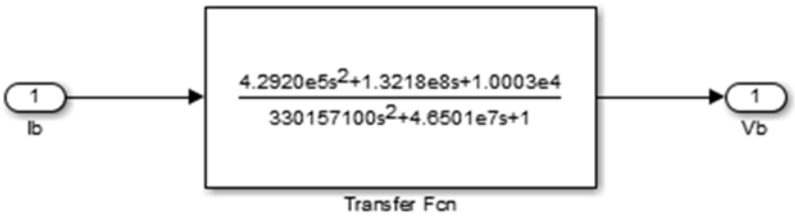


A .6 Block diagramme de la méthode de "NNA "



A .7 Block diagramme de la batterie





BP MSX 60

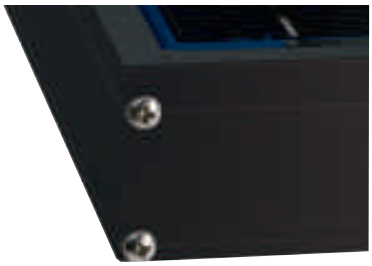
60-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

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. The MSX 60 provides 60 watts of nominal maximum power, and is well-suited to traditional applications of photovoltaics such as telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

Proven Materials and Construction

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

- 36 multicrystalline silicon solar cells configured as two 18-cell series strings;
- 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.



Bronze Anodized Universal Frame

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction box is raintight (IP54 rated) and accepts PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Its volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal connection block enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the junction box. Options include:

- blocking and bypass diodes;
- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm^2 (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm^2 (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration by moving leads in the junction box. Six-volt modules are intended to support 6V loads, and are not recommended as series elements in higher voltage arrays.

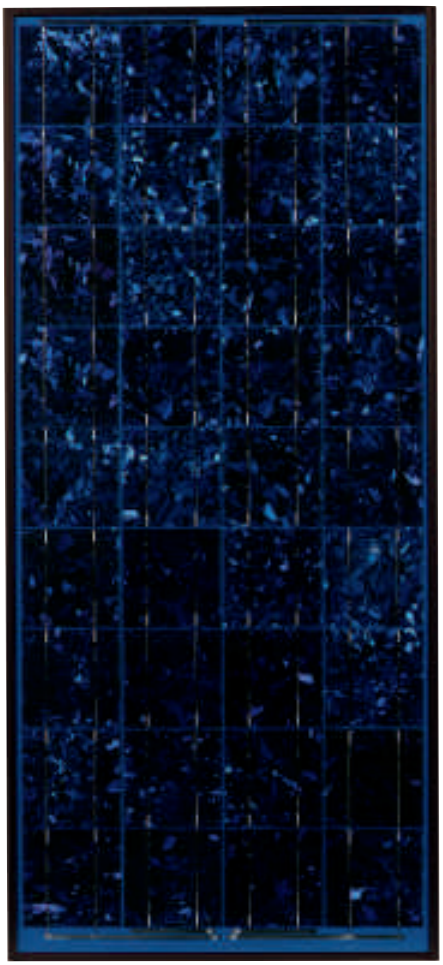
Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Certified by PowerMark Corporation;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TÜV Rheinland as Class II equipment;
- Approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations;
- Compliant 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).

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.



BP MSX 60

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.

©2002 BP Solar Global Marketing

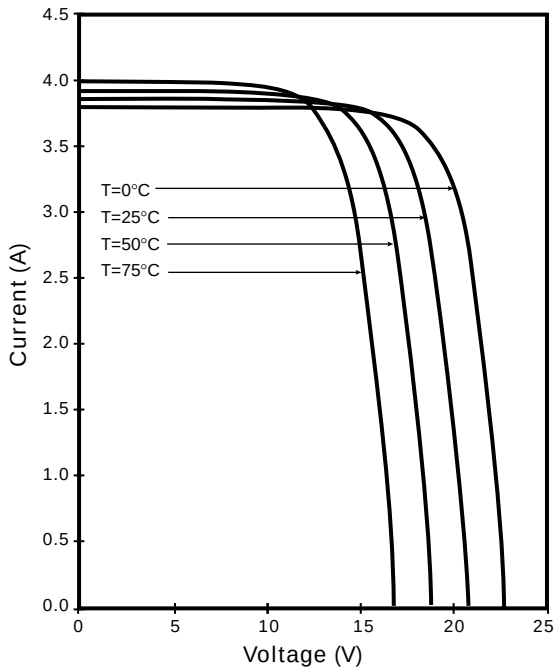
Electrical Characteristics[1]

	BP MSX 60	BP MSX 64[4]
Maximum power (P_{max})[2]	60W	64W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	17.1V	17.5V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.5A	3.66A
Minimum P_{max}	58W	62W
Short-circuit current (I_{sc})	3.8A	4.0A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.1V	21.3V
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) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

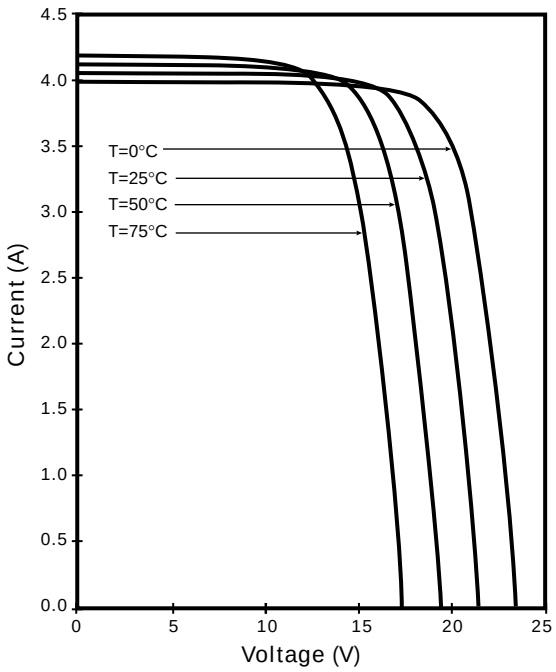
Notes

1. These data represent the performance of typical MSX 60 and MSX 64 modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. 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 64 is assembled in limited quantities using cells of slightly higher power than the MSX 60.

MSX 60 I-V Curves



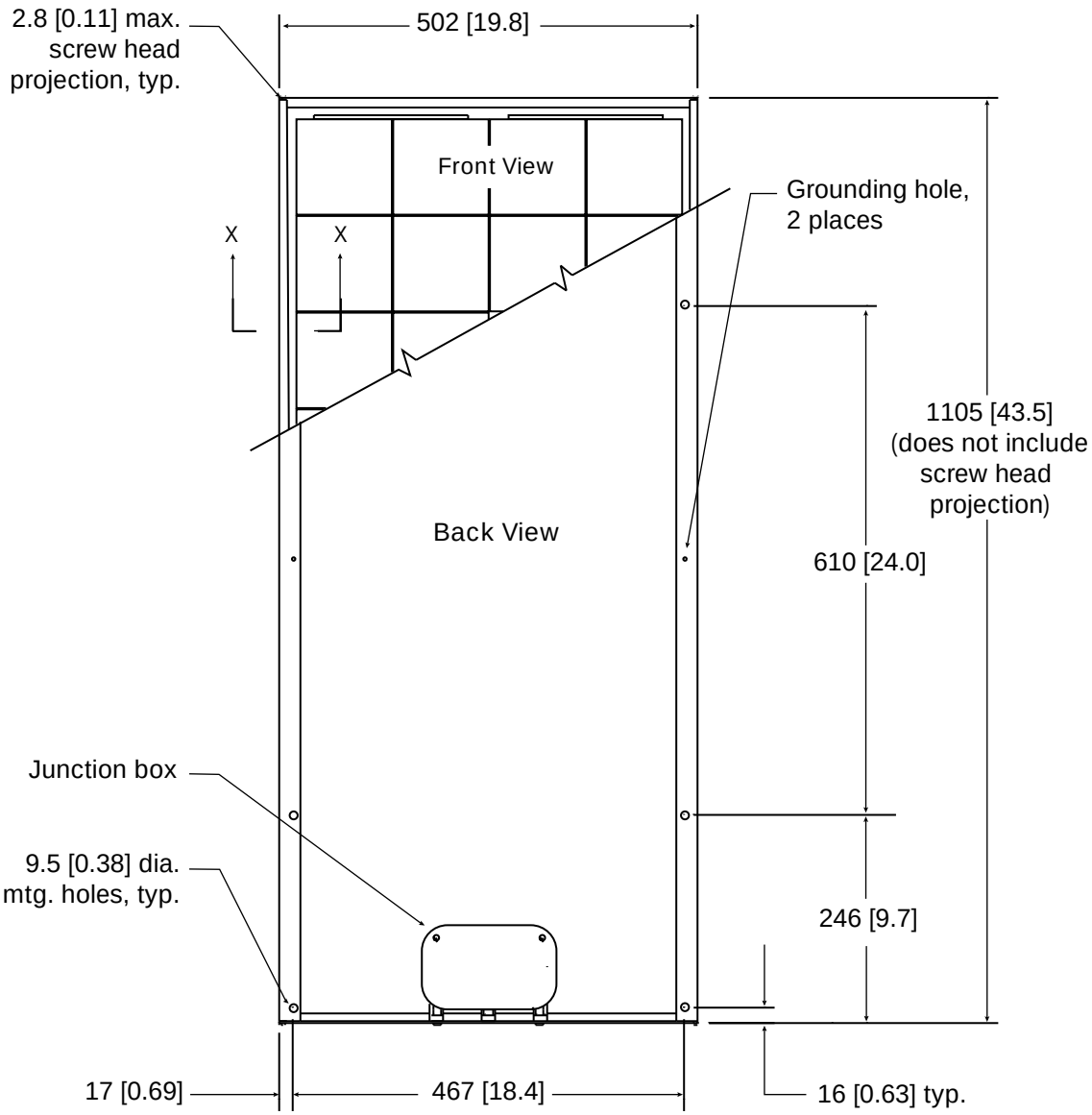
MSX 64 I-V Curves



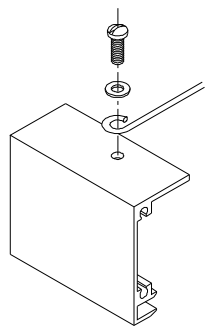
Mechanical Characteristics

Weight
MSX 60 7.2 kg (15.9 pounds)

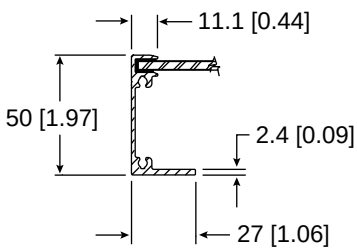
Dimensions
Unbracketed dimensions are in millimeters.
Dimensions in brackets are in inches.
Overall tolerances ±3mm (1/8")



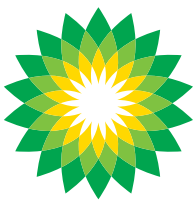
MSX 60



Grounding Detail



Section X-X



bp solar

This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject to change without notice and should not be used as the definitive source of information for final system design. Additional warranty and technical information may be found on our website www.bpsolar.com or may be obtained from your local representative.



Printed on recycled paper with vegetable based inks.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] Chihchiang Hua and Chihming Shen «Comparative study of peak power tracking techniques for solarstorage system. In IEEE Applied Power Electronics» Conference and Exposition,volume 2 of APEC Pro- ceedings of the 1998 13th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'98, pages 679{685, Anaheim, CA, USA, February1998.IEEE, Piscataway, NJ, USA.

[2] P.CLAUX .Atlas solaire Français .PYC édition ,1982.

[3] M.S. Imamura and J.I. Portscheller, An Evaluation of the Methods of Determining Solar CellSeries Resistance**,** Proc. 8th Photovoltaic Specialists' Conf., Seattle, WA, pp 102-107, 1970.

[4] A.BELKAID « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome » Doctorat en Electronique .université Sétif .2015.

[5] O.GERGAND « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un system de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse de Doctorat de L'ENS de Cachan .France .09 décembre 2002.

[6] A.B.AROSTEGI « New optimized electrical architect of photovoltaic generator with high conversion efficiency» Thèse de Doctorat de l'université Toulouse 3 Paul Sabatier .France. 2013.

[7] N.F.BENHADOUCHE «La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite »

Magister, université Tlemcen .2014.

[8] S.OUDJOUADJ, M. BENNINI « Etude de la poursuite du point de puissance maximale

MPPT d'un générateur photovoltaïque basé sur l'intelligence artificielle» Magister en Automatique des systèmes, université Médéa .2015.

[9] O.BOUKLI-HACEN «Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique » Magister en Automatique, université Tlemcen.2011

[10] J.A. GOW, C.D MANNING « Development of a photovoltaic Array Model for use in Power electronic simulation studies IEE proceding of electric power application»vol.146.no.2.

Pp193-200, March 1999.

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

[12] 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.

[13] A.MORSLI « Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des super condensateurs » Magister en Electricité Solaire Université Médéa.2010

[14] Y.AZZOUG « Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque ». Mémoire présenté à l'université du Québec Trois-Rivières. Février 2008

[15] S. BELLAKEHAL «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées Aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.

[16] T. TAFTICHT, K. AGBOSSOU, L. DOUMBIA, A. CHERITI « An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems », Renewable Energy 33 (2008) 1508–1516.

[17] B.KANJI «Technique intelligentes pou poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque » Magister en Informatique industrielle, université Libanaise 2012.

[18] http://www.eden-equipements.fr/Integration-photovoltaique-au-batiment_a170.html.

[19] I. CRUZ, F. ARIAS, F. AVIA, L. M. ARRIBAS, R. P. FIFFE «Assessment of different energy storage systems for wind energy integration», European Wind Energy Conference 2001.

[20] H. FATIHA, R. AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque»

Master en Electrotechnique, université Ouargla .2014.

[21] I.BENDJAMAA « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » Magister. Université de Tlemcen 2011.

[22] S. Golder. Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies. Thesis Master of Science in Electrical Engineering. October 2006

[23] N.OULD CHERCHALI, A. MORSLI, S. BOUCHERIT, L. BARAZANE, A. TLEMÇANI «Analyse et Commande d'une Cascade Source Photovoltaïque Onduleur à Cinq

Niveaux» The international conférence on elecrtonics and oilfrom theory to applications Ouargla Algérie.05-06-2013.

[24] Hannes Knopf. « Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle» Master of Science in Electrical and Computer Engineering. Portland State University 1999.

[25] R. Sastrawan, J. Renza, C. Prahl, J. Beier, A. Hinsch, R. Kerna «Interconnecting dye solarcells in modules—I–V characteristic sunder reverse bias» Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry 178 (2006) 33–40

[26] M.OBEIDI «Commande des hacheurs MPPT par logique floue» Magister Ecole Nationale Polytechnique, 2006

[27] S.AIT-CHEIKH «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques» Ecole Nationale Polytechnique

[28] F.SLAMA, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique» Magister en Electrotechnique Université Sétif 2011.

[29] F. YADEN, M. El OUARIACHI, T. MRABTI, K. KASSMI, B. TIDHAF, E. CHADLI et K. KASSMI « Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'une commande MPPT numérique » Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 171 – 186. Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LEPAS, Oujda, Maroc 2011.

[30] L.SIHAMIDI. « Etude et réalisation d'un contrôleur MPPT par la méthode incrémentation de la conductance avec un pic ». PFE en électronique. Ecole Nationale Polytechnique. 2003.

[31] 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.

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

[33] M.HATTI**,** « Contrôleur Flou pour la poursuite des points de puissance maximum d'un système photovoltaïque», JCGE'08, Lyon, France, 2008.

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

[35] L.REZNIK**,** «Fuzzy controllers », Newnes, pp.59-103, 1997.

[36] R.TAHAR «Application de l'intelligence artificiel au problème de la stabilité transitoire des réseaux électrique» Thèse Magister

[37] C.TOUZET «Les réseaux de neurones artificiel introduction et connexionnisme » Livre PDF 1992

[38] «T. Kohonen. Self organization and associative memory. Springer Series in information sciences, Vol.8, Springer-Verlag, 1984; and second edition, 1987.»