الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique

Option : automatique des systèmes

THEME

ETUDE DE LA POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT) D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE BASE SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

Proposés et dirigés par :

Dr. OULD CHERCHALI. N

Dr. MORSLI. A

Préparés et présentés par :

Mr. OUDJOUADJ Sofiane

Mr. BENNINI Mohamed Amine


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu le DIEU qui nous a donné la volonté et le courage afin d'arriver à ce modeste travail.

Nous remercions nos promoteurs : Mr. N. OULD CHERCHALI et Dr. A. MORSLI qui nous ont orientés et aidé dans toute la durée de notre travail par leurs critiques et leurs suggestions nombreuses.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury pour avoir accepter de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie électrique de l'Université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participés à notre formation.

Dédicace

Avec l'aide de Dieu, tout puissant, j'ai pu achever ce modeste travail que je dédie:

A ceux qui m'ont tout donné sans rien me demander et à qui je dois énormément et qui je ne remercierais jamais assez :

- *A mon très cher père .*
- *A ma mère qui m'a éclairée mon chemin.*

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail Toute ma reconnaissance et tout mon Amour, toute au long de mes études.

- *A mes frères.*
- *A ma sœur .*
- *A mes amis spécialement H. ould cherchali .*

Sofiane Oudjouadj

Dédicace

Avec l'aide de Dieu, tout puissant, j'ai pu achever ce modeste travail que je dédie:

A ceux qui m'ont tout donné sans rien me demander et à qui je dois énormément et qui je ne remercierais jamais assez :

- *A mon très cher père (que Dieu ait son âme). .*
- *A ma mère qui m'a éclairée mon chemin.*

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour, toute au long de mes études.

- *A mes sœurs.*
- *à mon amie rafik qui m'a beaucoup aidé*
- *A tous mes amis spécialement H ould cherchali .*

Mohamed amine bennini

الملخص

في عصر التنمية المستدامة ظهرت تقية الكهروضوئي كمصدر للطاقة المتجددة حيث تركز هذه المذكرة على

تحسين اداء و كفاءة الأنظمة الضوئية و ذلك باستخدام الخوارزمية المناسبة للتحكم في الطاقة. الهدف الرئيسي هو العثور على خوارزمية او قانون التحكم الفعال الذي يسمح باستخراج الطاقة القصوى المتاحة المستخرجة من الالواح) المتطرق الطاقة الشمسية كهروضوئية (GPVاليها هي النقاط الرئيسية للنظام الكهروضوئي ودراسة بنية المحولات

الالكترونية بواسطة خوارزمية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) .ومحاكات هذه الخوارزمية باستخدام خوارزمية

الذكاء الاصطناعي ومقارنته بخوارزمية كلاسيكية متمثلة في خوارزمية التشويش و التحريض و خوارزمية تصرف الاضافة التي تسمح بإيجاد نقطة الطاقة القصوى .

الكلمات المفتاحية: الكهروضوئي . تتبع نقطة الطاقة القصوى . الذكاء الاصطناعي . تشويش والمراقبة .الشبكة العصبية الاصطناعية .المنطق الضبابي .

Résumé

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Cette mémoire est centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque à travers l'utilisation d'un algorithme approprié pour la commande de l'interface de puissance. L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV).). Les points essentiels traités dans cette étude sont : la modélisation d'un système photovoltaïque, l'étude topologique de l'interface de puissance, l'étude les algorithmes en utilisant, l'algorithme l'intelligence artificielle à base de la logique floue et réseau de neurone artificiel permettant la poursuite du point de puissance maximale.

Mots clés: Système PV - MPPT - l'intelligence artificielle - perturbation et observation - incrément de conductance -logique floue – réseau de neurone artificiel .

Abstract

In the era of sustainable development, photovoltaic (PV) technology has shown significant potential as a renewable energy source. This thesis focuses on improving performance and efficiency of a PV system through the use of an appropriate algorithm for controlling the power interface. The main objective is to find an effective and optima algorithm or control law for extracting the maximum available power from the PV generator. Add to this, , The main points addressed in this study are : the modelling of a PV system, the topological study of the power interface, the study of maximum power point tracking (MPPT) algorithms, the simulation of a MPPT converter, the PV voltage regulation and the design and implementation of a MPPT converter .In this investigation, the Perturb and Observe (P&O) MPPT algorithm is improved and the problem of local maxima in the power curve of the PV generator occurring during recessed.

Keywords : PV système, MPPT, Modélisation, Simulation, intelligence artificielle, perturbation & observation and conductance incrémente-fuzzy logique control –artificiel neural network

Sommaire

Sommaire

Liste des figures I
Liste des tableaux VII
Liste des acronymes VIII
Nomenclature VII
Introduction Générale 01

Chapitre I : Généralité sur les Générateurs photovoltaïque

I.1 .Introduction 03

I.2. Définition d'un système PV 03
I.3. L'effet photovoltaïque 04
I.4. La cellule photovoltaïque 04
I.4.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque 06
I.4.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque 09
1.5. Générateur photovoltaïque et ses performances 11
1.5.1. Caractéristique courant- tension 12
1.5.2. Influence de l'éclairement et de la température 13
1.5.3. Influence de l'association série des cellules PV 15
1.5.4. Influence de l'association parallèle des cellules PV 16
1.5.5. Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV 17
1.6. Conclusion 17

Chapitre II : Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT

II.1. Introduction 18

II.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) 18
II.2.1. ***Le hacheur survolteur (boost)*** 19
II.3. Hacheur dévolteur (Buck) 24
II.4. Le convertisseur Buck-Boost 26
II.5. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC 27
II.5.1. ***Algorithme d'incrémentation de l'inductance*** 28
II.5.2. ***Méthode de perturbation et d'observation (P&O)*** 31
II.6. Conclusion 33

Chapitre III : Commande MPPT par l'intelligence artificielle

III.1. Introduction 34
III.2 logique floue 34
III.2.1 la fuzzification 35
III.2.2 la lecture de la table des règles 35
III.2.3. Défuzzification 35
III.2.4 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue 36
III.3 Les réseaux neuronaux artificiels 38
III.3.1 Architecture de réseau de neurones artificiels 38
III.3.2. Formation de réseau neurones artificiels 39
III.3.3 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue 40
III.4 Conclusion 43

Chapitre IV : simulation du système

IV.1.Introduction 44
IV.2. L'outil Matlab/simulik 44
IV.2.1.Simpower 44
IV.3. Système photovoltaïque proposée 44

IV.4.Simulation du générateur photovoltaïque 45
IV.4.1. Modèle GPV 45
IV.4.2. Modèle du module photovoltaïque 46
IV.4.3. Schéma générateur photovoltaïque dans Matlab 46
IV.5 Modèle de Simulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT 50
IV.6. Simulation de la méthode MPPT 50
IV.6.1 perturbation et observent (P&O) 51
IV.6.2 .Incrément de la conductance, (INC) 51
IV.6.3 logique floue 52
IV.6.4 .réseaux de neurones artificiels (RNA) 53
IV.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) 53
IV.8. Résultats de simulation de PV 54
IV.8.1. Caractéristiques du générateur photovoltaïque 55
IV.10.Conclusion 58

Chapitre V : simulation des différents techniques MPPT

V.1. Introduction 59
V.2 simulation du système photovoltaïque adapté par les quatre commandes MPPT (P&O, logique floue, INC, RNA) 59
V.2.*1simulation de l'algorithme P&O* 61
V.2.2 *Simulation de l'algorithme (IncCond)* 64
V.2.3 *simulation de l'algorithme de logique floue* 67
V.2.4 *simulation de l'algorithme de RNA* 70
V.3. Etude comparative de la puissance entre les quatre contrôleurs 73
V.3.1. *Simulation de les quatre contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable)* 73
V.4. Etude comparative de l'énergie entre les contrôleurs MPPT 75
V.5 conclusion 76

Conclusion Générale 77

Annexe IX

Liste des Tableaux

Tableau III-1. Exemple d'une table de règle pour une commande logique floue.....37

Tableau IV.1 fiche technique de BP MSX120 de module de PV au STC 46

Tableau IV.2 paramètres du convertisseur booste.....53

Tableau V -1 .le changement d'énergie entre les technique MPPT.....75

Nomenclature

E : Eclairement (W/m²).

Iph : Le photo courant (A).

Isat: Courant de saturation (A).

Rp : Résistances parallèle shunt(Ω) .

RS : Résistance série (Ω).

S : la surface du module photovoltaïque(m_2)

D : le rapport de cyclique .

Tc : Température de jonction (°K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m²).

Tref : La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

Icc : Le courant de court-circuit (A).

Vco : La tension de circuit ouvert (V).

FF : Facteur de forme.

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

Np : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

Pmax : La puissance maximale produite PV (W).

Vmax : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

Imax: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

Vopt : Tension optimale (V).

Iopt : Courant optimum (A).

Vco : Tension à circuit ouvert (V).

Icc : Courant de court-circuit (A)

k : coefficient de Boltzmann (1.38.10-23 J / K)

Liste des ACRONYMES

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Curent).

AC: Courant Alternatif (Alternative Curent).

LFC : logique flux.

RNA : Réseau de Neurone Artificielle .

Bibliographique.....VI

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.....04

Figure I.2 : Représentation schématique d'une cellule solaire.....05

Figure I.3 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....06

Figure I.4 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque.....12

Figure I. 5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V).....13

Figure I. 6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).....13

Figure I.7 : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).....14

Figure I.8 : L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V).....14

Figure 1.9: Caractéristique résultante d'un groupement en série de Ns cellules identiques..15

Figure I.10 : Association de N modules solaires en série.....15

Figure 1. 11: Caractéristique I(V) pour l'association parallèle.....16

Figure I. 12 : Association de Np modules solaires en parallèle.....16

Figure I. 13 : Association mixte N_s x N_p modules solaires.....17

Figure II. 1 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur.....19

Figure II.2 : Allure des variables dynamiques.....21

Figure II. 3 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.....24

Figure II. 4 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.....24

Figure II. 5 : *Caractéristique de la tension et des courants*.....25

Figure II. 6 : Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck.....26

Figure II. 7 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.....26

Figure II. 8 : Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.....27

Figure II. 9 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.....28

Figure II. 10 : Signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement.....29

Liste des figures

Figure II. 11 : Organigramme de la méthode d'incrémentation de l'inductance 30

Figure II. 12 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation..... 32

Figure.III.1 : Structure générale d'un régulateur par logique floue 34

Figure. II1.2 : Structure de base de la commande floue..... 35

Figure. III.3 : Fonction d'appartenance des variables d'entrées E et CE 36

Figure. III.4: Fonction d'appartenance de la variable de sortie..... 37

Figure III.5 : L'architecture du réseau neuronal proposé..... 38

Figure III.6 : block Simulink de modèle de réseau de neurone 40

Figure III.7 :.schéma en 3D représenté la variation de rapport cyclique (D) en fonction (T) et (G)..... 41

Figure III.8 : performance plot model PV..... 41

Figure III.9 : training model PV..... 42

Figure III.10 : regression (plot) model PV..... 42

Figure IV.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC)contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)..... 45

Figure IV.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque 45

Figure IV.3 : simulation du module de PV..... 47

Figure IV.4: bloc de Simulink de générateur photovoltaïque 48

Figure IV.5 : Modèle de sous-système de Simulink de la rangée de photovoltaïque. 49

Figure IV.6 : Simulation de convertisseur boost 50

Figure IV.7 : Bloc de Simulink pour MPPT..... 50

FigureIV.8 : simulation de commande P&O 51

FigureIV.9 : simulation de commande INC..... 52

FigureIV.10 : simulation de commande par logique floue 52

FigureIV.11 : commande par RNA..... 53

Figure IV.12: Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) 54

FigureIV.13 : Caractéristique I= f(V) du panneau PV(T=25C°, G=1000W/m^2) 55

Figure IV.14 : Caractéristique P = f(V) du panneau PV (T = 25 C°, G = 1000W / m^2) 56

FigureIV.15: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m² 56

Liste des figures

Figure IV.16: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V) Pour différente températures et un éclairement G = 1000W/m² 57

Figure IV.17: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V) 57

Figure IV.18: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour déférente éclairement et une T=25C° 58

Figure V.1.variation d'irradiation et température 60

Figure V.2 : réponse de l'algorithme P&O dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m^2) 61

Figure V.3.Réponse du contrôle P&O pour une variation d'irradiation dans *(T=25C°)* 62

Figure V.4.Réponse du contrôle P&O pour une variation de température pour (G=1000W/m²) 63

Figure V.5 : Réponse du contrôle mode ***d'incrément de conductance*** dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m²) 64

Figure V.6 : Réponse du contrôle mode d'incrément de conductance pour une variation d'irradiation pour (T=25ºC) 65

Figure V.7.Réponse du contrôle mode d'incrément de conductance pour une variation de température pour (G=1000W/m²) 66

Figure V.8: réponse de l'algorithme logique floue dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m^2) 67

Figure V.9 .Réponse du contrôle de la logique floue pour une variation d'irradiation dans (T=25C°) 68

Figure V.10.Réponse du contrôle logique floue pour une variation de température pour (G=1000W/m²) 69

Figure V.11: réponse de l'algorithme de logique floue dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m^2) 70

Figure V.12 .Réponse du contrôle RNA pour une variation d'irradiation dans (T=25C°). 71

Figure V.13.Réponse du contrôle RNA pour une variation de température pour (G=1000W/m²) 72

Figure V.14.variation de la puissance des quatre contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable) 73

Figure V.15.variation de la puissance des quatre contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable) 74

Introduction Général

Introduction générale :

Dans les dernières années, la croissance du besoin en énergie, ainsi que la pollution provenant de l'utilisation des énergies fossiles poussent le grand public à utiliser les énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelable, qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie. De plus, cette énergie semble la plus prometteuse, non polluante et inépuisable. Néanmoins, la production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque, PV ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale. On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé 'maximal power point tracking', (MPPT afin que la puissance maximale soit générée en permanence [1].

Il à , plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie convertie par le panneau et alors qui permet un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [1]. On trouve dans la littérature des algorithmes basés sur les méthodes suivantes, telles que: Perturbation & Observation'P&O' et Incrément de la conductance 'IncCond'……etc. [2]. Ou par l'intelligence artificielle comme la logique floue et réseau de neurones artificiels .

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont était associées à la commande MPPT telle que la logique floue et le réseau de neurone artificielle. Ces technique présente est une approche intelligente pour l'amélioration l'optimisation des performances d'un système photovoltaïque.[20]

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT), 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 adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres comme suit:

Introduction générale :

✓ Le premier chapitre est réservé pour fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. est présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.

✓ Le deuxième chapitre est réservé pour étude quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrive des commandes MPPT classique des convertisseurs DC-DC basée sur contre réaction de puissance (P&O et IndCond).

✓ Dans le troisième chapitre ,on étudie quelques types de l'intelligence artificielle, (RNA et Logique floue) ,signifie que nous avons étudié les commandes MPPT basées sur le principe de l'intelligence artificielle (controleur logique floue , controleur RNA).

✓ Dans le quatrième chapitre, on fait une modélisation et une simulation par MATLAB SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque (MSX120), convertisseur survolteur (boost) et commande MPPT (P&O, IncCond, Logique floue, RNA).

✓ Dans le chapitre V on a étude les résultats de simulation pour les quatre techniques de MPPT et on a fait une comparaison .

✓ Finalement, on termine par une conclusion générale .

Chapitre I

Généralité sur les Générateurs photovoltaïque

I.1 .Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [2].

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 400 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [4].

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. Définition d'un système PV :

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.
Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [9]

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

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

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [6]:

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

I.3. L'effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque c'est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs. Le plus connu d'entre eux est le silicium utilisé pour les composants électroniques. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi conducteur qui génère un courant. En effet Lorsque les photons heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

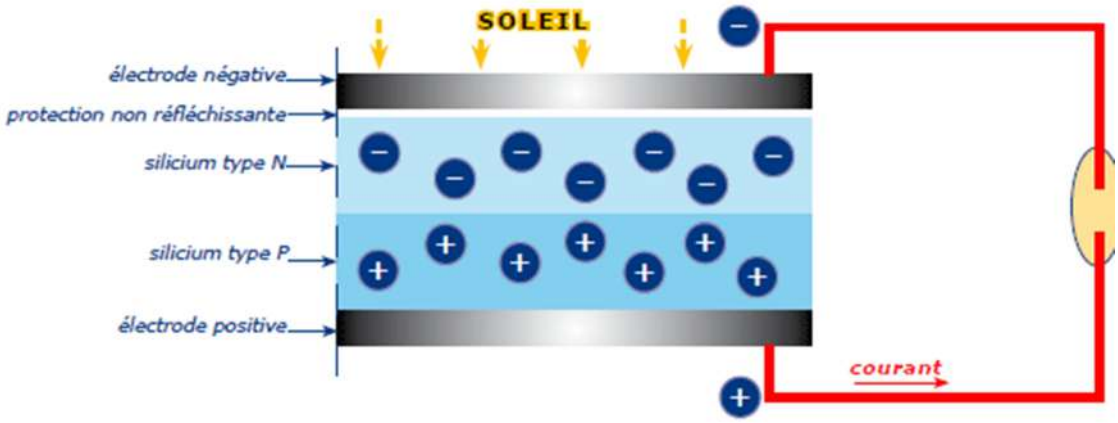


Figure I.1 : Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.

I.4. La cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière .

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore [3].

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés **figure (I.2**).

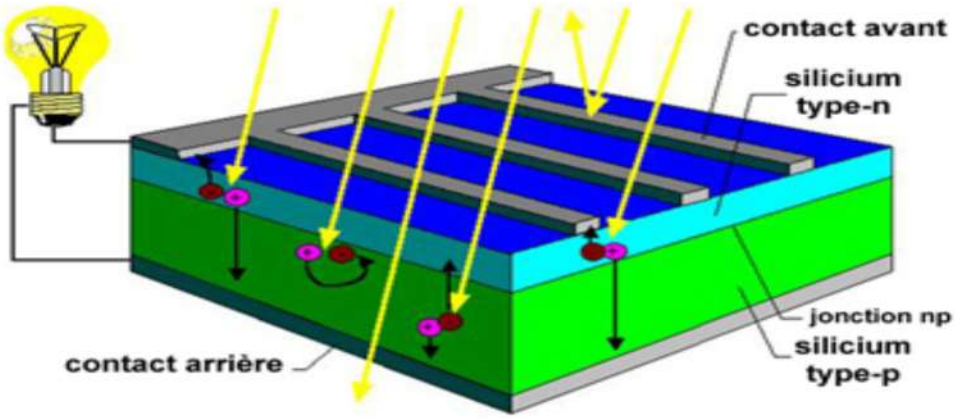


Figure I.2 – Représentation schématique d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : [3].

• 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

I.4.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

Ainsi la caractéristique « I−V » du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la **figure I.3[10]**. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série **Rs** et parallèle (shunt) **Rp** pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

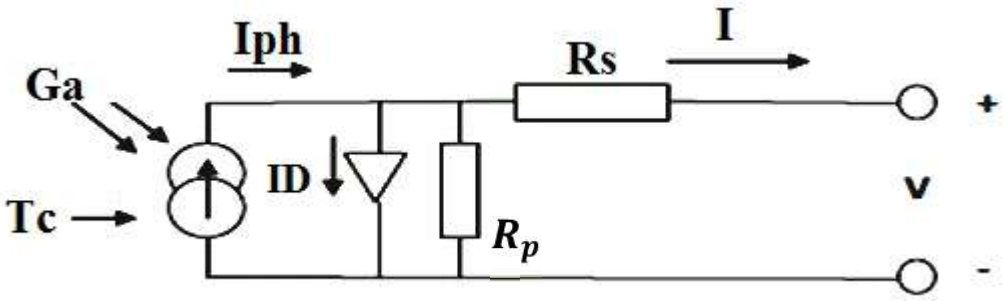


Figure I.3 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde). Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules **[11]**.

Dans la figure I.3 les différents paramètres caractéristiques des cellules photovoltaïques sont:

I_{ph} : Les courants générés par les cellules solaires (A) .

R_s : Série de résistance (Ω) .

R_P : Résistance parallèle (Ω) .

G_a : Éclairement de la lumière du soleil (W/m2) .

I_d : courant de diode (A) .

I : courant de sortie du PV (A) .

V : tension de sortie du PV (V) .

Le fabricant du module solaire donne d'autres paramètres requis pour modeler les piles solaires. La fiche technique qui donne les caractéristiques électriques est calculée sous le STC. De condition normale d'essais quand la température T est 25°C et l'irradiante G est 1000 W/m². Les paramètres qui peuvent être trouvés à l'intérieur de la fiche technique sont :

V_{oc} : tension de circuit ouvert (V) .

I_{sc} : courant de court-circuit (A) .

P_{mp} : puissance au point de puissance maximum .

V_{mp} : tension au point de puissance maximum .

I_{mp} : courant au point de puissance maximum.

A partir de la Figure I.3 le courant de sortie de la cellule de PV est :

$$I = Iph - Id \tag{I.1}$$

Où :

Par équation de Shockley, l'identification de courant de diode est donnée par :

$$I_d = I_0(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1) \tag{I.2}$$

Où :

I_0: Courant de saturation renversé de diode .

q : Charge élémentaire d'électron (1.602 x 10^{-19} Cb) .

Vd : Tension de diode .

k : C constant de Boltzmann (1.381 x 10^{-23}J/K) .

T : La température en Kelvin (°k).

La relation entre la tension et le résultat actuel en remplaçant le courant de diode :

$$I = I_{ph} - I_0(e^{qV_d/kT} - 1) \quad \textbf{(I .3)}$$

Où V_d est la tension de rendement de la cellule de PV.

La saturation renversée I_0 est trouvée en employant l'équation ci-dessus. En plaçant l'égale du courant I à zéro et le calcul à T_1 de la température [8].

$$I_0(T_1) = \frac{I_{ph}(T_1)}{(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1)} \quad \textbf{(I.4)}$$

Le courant produit par les piles solaires I_{pv} peut être rapproché avec l'I_{sc} courant de court-circuit. Le courant produit peut être calculé pour l'autre irradiance. Le courant, la température et l'irradiance standard de la fiche technique sont employés pour déterminer le courant à l'état différent.

$$\text{Isc} \approx \text{Iph}$$

$$I_{sc}(T_1) = (\frac{G}{G_{nom}})I_{sc}(T_{1,nom}) \quad \textbf{(I.5)}$$

Où :

$Isc\ (T1)$: Courant au T1 de la température ;

T_{1nom}, : La température de la cellule de la fiche technique au STC ;

G_{nom} : Irradiance de fiche technique au STC.

Après calcul, [7]. donne l'équation du PV.

$$I = I_{ph} - I_0\left[e^{q\left(\frac{V+I.R_S}{aKT}\right)}\right] - \left(\frac{V+I.R_S}{R_p}\right) \quad \textbf{(I.6)}$$

Où :

a : le facteur de qualité de diode entre 1 et 2 et doit être estimé. La valeur de « A» est égale à 1 pour la diode idéale.

V : est la tension de cellules. Pour un module de PV, la tension de cellules est multipliée par le montant total des cellules en série.

Le courant de saturation renversé I_0 dépend de la température T. il est calculé par l'équation suivante [4] :

$$I_0 = I_0(T_1)\left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} . e^{\frac{qV\ q(T_1)}{ak\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_1}\right)}} \quad \textbf{(I.7)}$$

La valeur de la résistance série Rs est mesurée de la pente *dV/dI* de la courbe I-V à la tension de circuit ouvert de point [2]. L'équation de R_s est donnée par :

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{akT/q}{I_0 . e^{\left(\frac{qV_{oc}}{akT}\right)}} \quad \textbf{(I.8)}$$

Le modèle est accompli en employant les équations récursives suivantes pour trouver les courants [8]. L'équation récursive est employée pour calculer le courant pour p cellules en paralelle. Il est plus commode de résoudre numériquement. L'équation présente une méthode simplifiée pour calculer la série de résistance et pour négliger le résistance parallèle [8].

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0\left[e^{q\left(\frac{V+I_n.R_s}{akT}\right)} - 1\right]}{-1 - I_0\left(\frac{q.R_s}{akT}\right)e^{q\left(\frac{V+I_n.R_s}{akT}\right)}} \quad \textbf{(I.9)}$$

I.4.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc}, V_{co},*et* *ff*), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

I.4.2.1. Courant de court-circuit (Icc) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuit ant les bornes de la cellule (en prenant V= 0).

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* dans l'équation (I.1), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}\left[exp^{\left(\frac{e(I_{cc}*R_S)}{nKT}\right)} - 1\right] - \left(\frac{I_{cc}*R_S}{R_p}\right) \quad \textbf{(I.10)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_{sat} = \left[exp\left(\frac{e(I_{pV}*R_{ser})}{nkT} - 1\right)\right] \quad \textbf{(I.11)}$$

Devant I_{ph}, l'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1+\frac{R_S}{R_p}\right)} \quad \textbf{(I.12)}$$

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

$$I_{ph} \cong I_{cc} \quad \textbf{(I.13)}$$

I.4.2.2. Tension de circuit-ouvert (Vco) :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat}\left[exp^{\left(\frac{eV_{pV}}{nKT}\right)} - 1\right] - \left(\frac{V_{PV}}{R_p}\right) \quad \textbf{(I.14)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = V_T Ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad \textbf{(I.15)}$$

Le rendement, **η** (efficience) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente

Il est donné par :

$$n = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \quad \textbf{(I.16)}$$

I.4.2.3. Facteur de forme :

Un paramètre important est souvent utilisé a partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule noté P_{max} et la puissance formé par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$ (FigureI.4), plus la valeur de ce facteur sera grand, plus la puissance exploitable le sera également. les meilleure cellules auront donc fait l'objet de compromise technologique pour atteindre le plus possible les caractéristique idéales [12].

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \quad \textbf{(I.17)}$$

1.5. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [6].

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

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

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et /ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} et un V_{co} désirés [7].

1.5.1. Caractéristique courant- tension :

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). [13]

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure (I.3).

Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

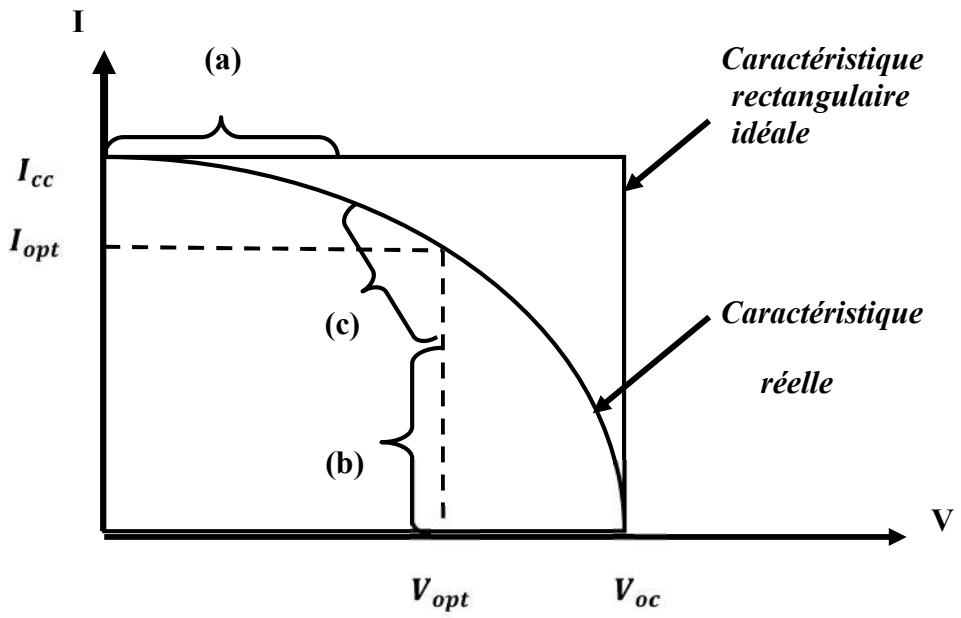


Figure I.4 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant Icc proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension Vco,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

1.5.2. Influence de l'éclairement et de la température :

La Figure(I.5) présente les caractéristiques d'une cellule solaire type, pour plusieurs intensités de rayonnement solaire. On remarque que le courant électrique, est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Par contre la tension est dégradée légèrement par rapport au courant, lorsque l'intensité de la lumière baisse.

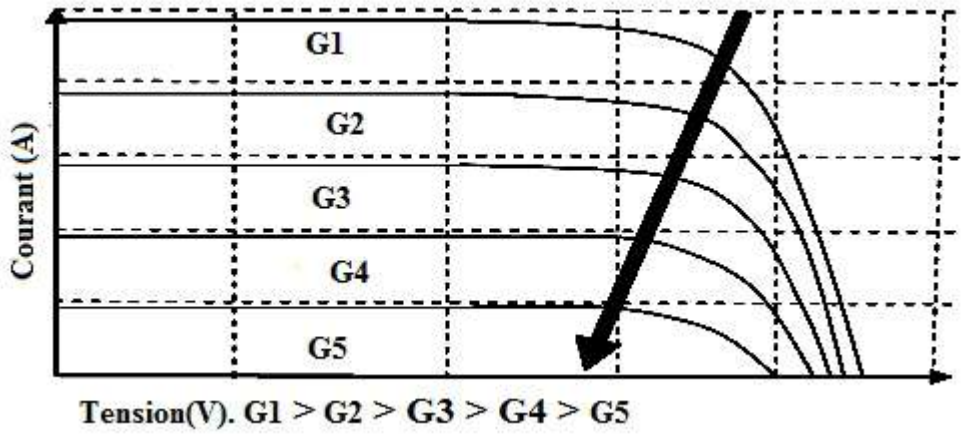


Figure I. 5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V).

La figure (I.6) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *P*(*V)* [8].

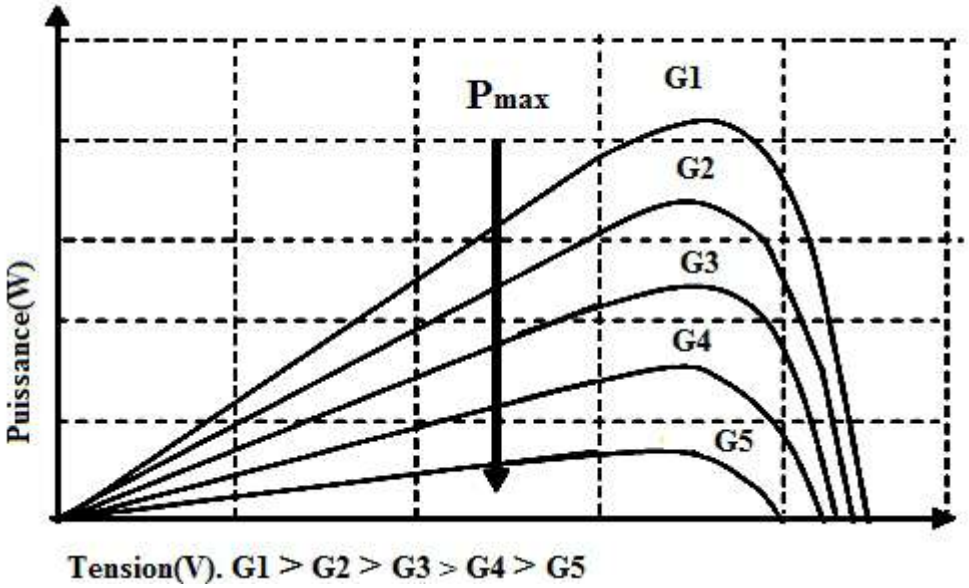


Figure I. 6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).

L'influence de la température est très significative, ce qui nous conduit à une considération soigneuse, lors de la mise en marche des systèmes photovoltaïques. Sur la Figure(1.7), on illustre l'effet de la température sur le comportement des photopiles. Elle montre une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température. Tandis que, le courant gagne quant à lui de l'intensité. Ceci peut être expliqué par la baisse du gap, ce qui provoque l'accroissement de la concentration des porteurs de charge, puisque la transition entre les niveaux devienne plus probable.

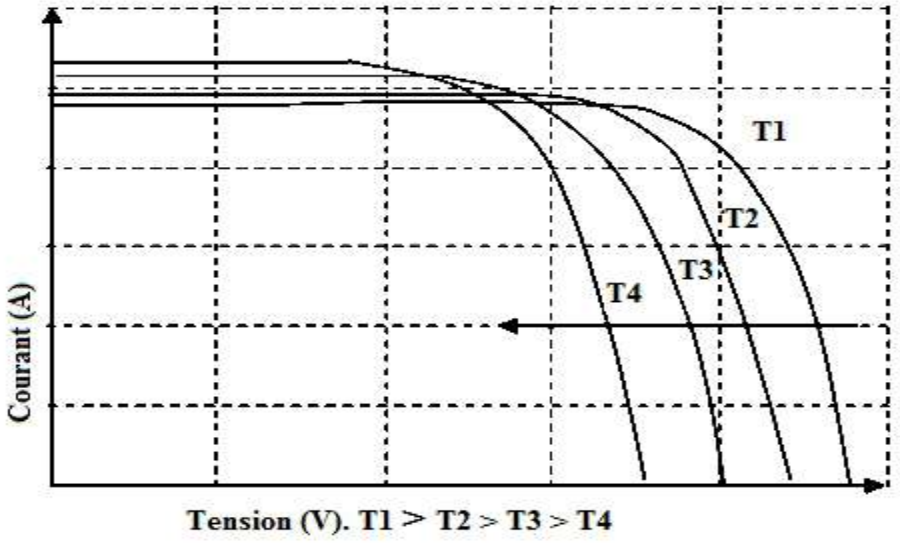


Figure I.7 : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).

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

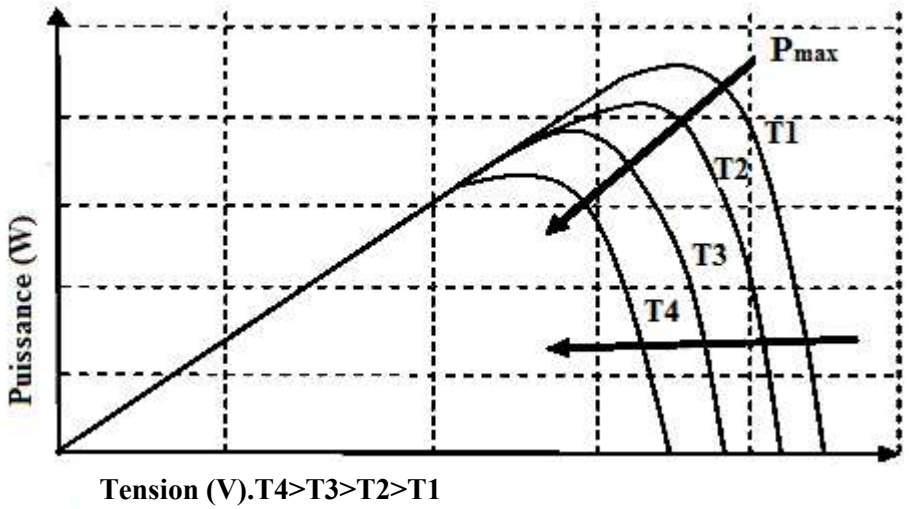


Figure I.8 : L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V).

1.5.3. Influence de l'association série des cellules PV :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [13]

La Figure (1.9) montre la caractéristique résultante (I_{scc},V_{sco}) obtenue en associant en série (indice s) n_s cellules identiques (I_{cc},V_{co}), ainsi:

$$I_{scc} = I_{cc}\ et\ V_{sco} = n_s V_{sco} \qquad (I.18)$$

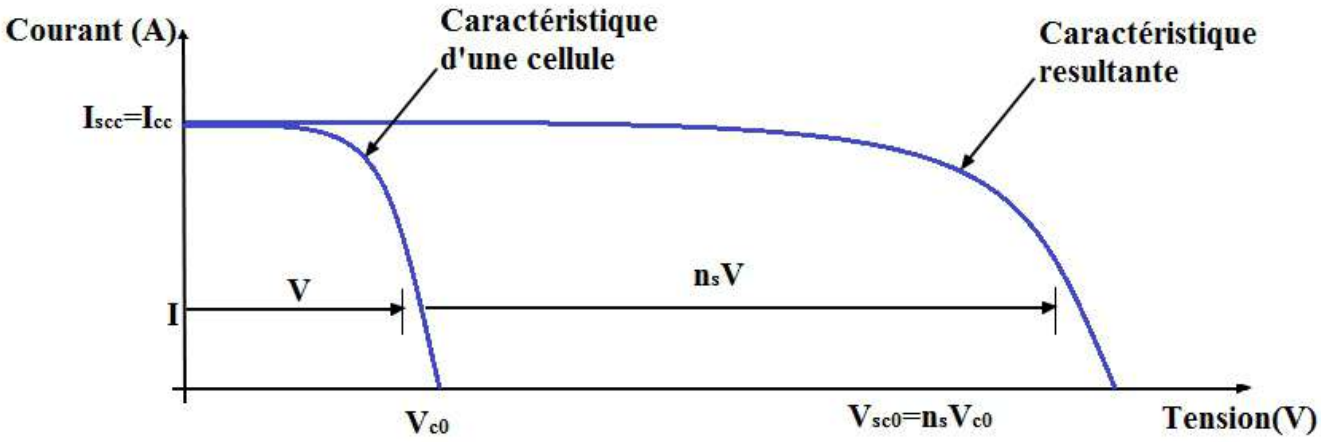


Figure 1.9: Caractéristique résultante d'un groupement en série de Ns cellules identiques.

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

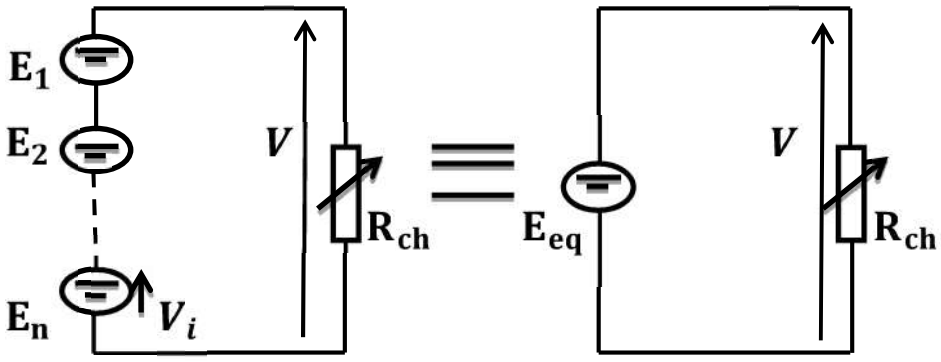


Figure I.10 : Association de N modules solaires en série.

1.5.4. Influence de l'association parallèle des cellules PV :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. . [13]

La figure I-11 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_s cellules identiques.

$$I_{pcc} = n_s\, I_{cc} et\, V_{pco} = V_{sco} \qquad (I.19)$$

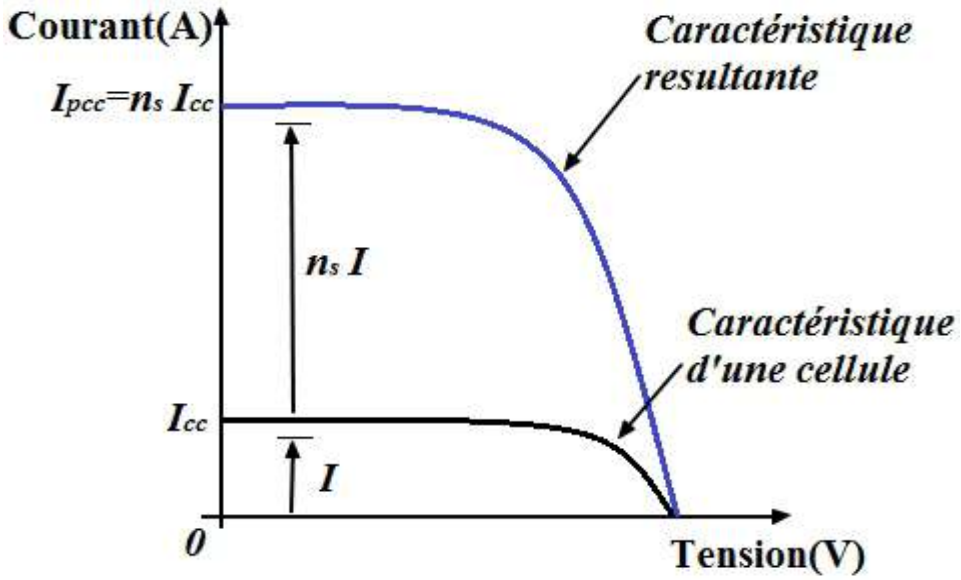


Figure 1. 11: Caractéristique I(V) pour l'association parallèle.

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

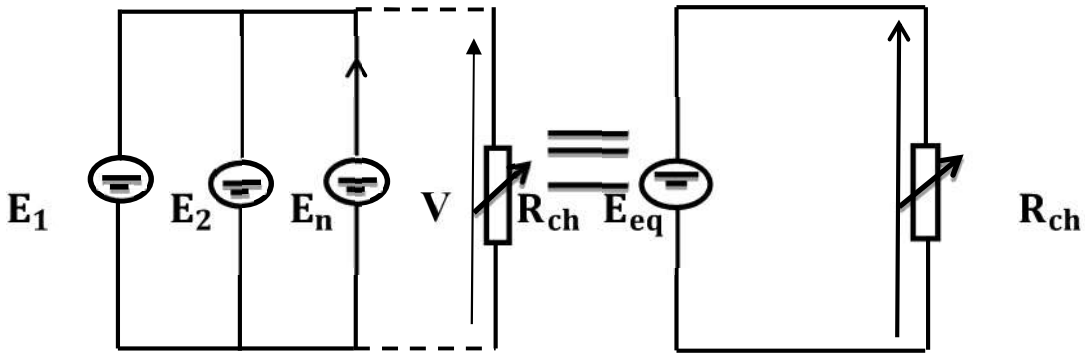


Figure I. 12 : Association de Np modules solaires en parallèle.

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

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [1].

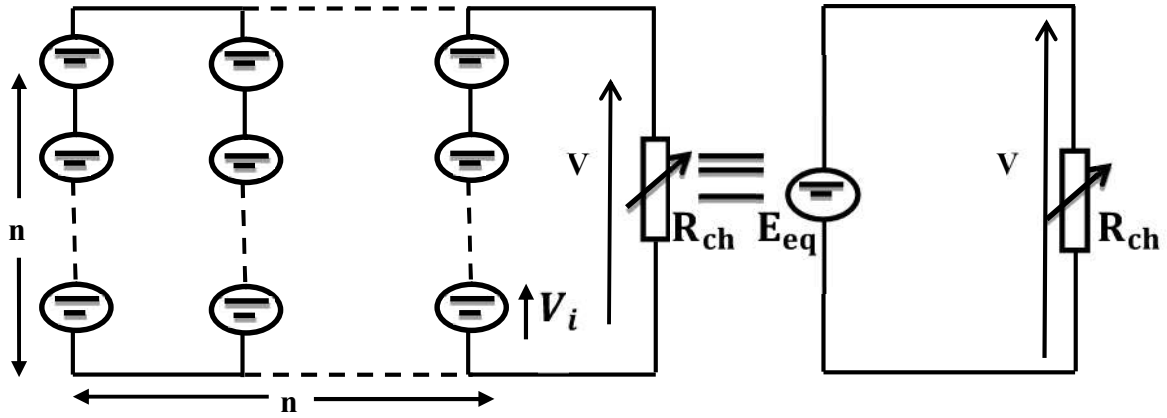


Figure I. 13 : *Association mixte N_s x N_p modules solaires.*

1.6. Conclusion :

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. On a fait ensuite un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Chapitre II

Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT

II.1.Introduction :

L'adaptation d'impédance entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge est un problème technologie qui signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur photovoltaïque à la charge. La littérature propose une grande quantité de solution sur l'algorithme de contrôle effectuant une recherche de point de puissance maximale (PPM) lorsque le GPV et la charge sont connectés à travers un convertisseur statique DC-DC (Hacheur).

Un GPV présente des caractéristiques courant-tension non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule.

De plus, selon les caractéristiques de la charge sur la quelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très grand écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. A fin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux borne du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche qu'elle que soit la plus proche possible de P_{max} disponible [14].

Le circuit de base d'un système de poursuite de point de puissance maximale est un convertisseur DC-DC piloté par un circuit de commande, afin d'extraire la totalité de la puissance produite par le GPV.

Dans ce qui suit, nous allons modéliser le fonctionnement électrique des trois types de hacheur: buck, boost et buck-boost.

II.2. Convertisseurs DC/DC (hacheur) :

Dans cette section, les principes de la conversion de la puissance de commutation sont introduits et les détails des différents circuits de convertisseurs DC-DC sont discutés. Les modèles mathématiques pour les convertisseurs buck, boost et buck/boost sont dérivés de représenter l'état stable du circuit et des comportements dynamiques.

Une commutation d'un convertisseur est constituée de condensateurs, des inductances et des interrupteurs. Tous ces dispositifs idéalement ne consomment pas d'énergie, qui est la raison de la haute efficacité de commutation des convertisseurs. L'interrupteur est réalisé avec un dispositif à semi-conducteurs en mode commuté, généralement un MOSFET (transistors à effet de champ d'oxyde de métal).

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul et donc la dissipation de puissance est égale à zéro. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à travers sera proche de zéro et donc la puissance dissipée sera très faible [14].

Dans cette section on va discuter les différents types de convertisseurs Continu-Continu (DC/DC) afin de les modéliser mathématiquement le convertisseur (boost) pour une utilisation facile de simulation.

II.2.1. Le hacheur survolteur (Boost) :

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, est donné par la figure. II.1**.** 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 [15].

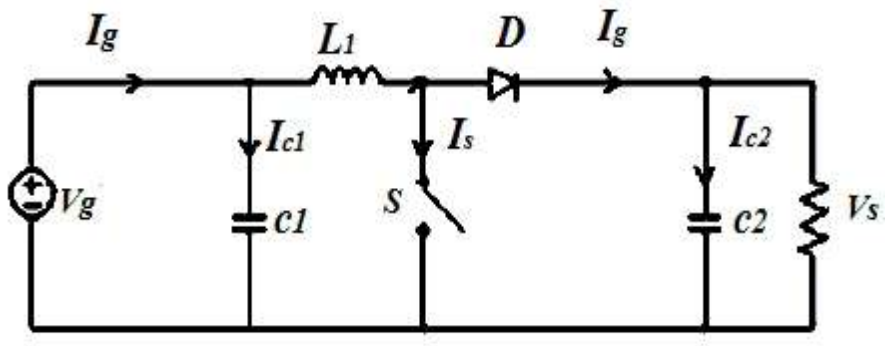


Figure II. 1 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

II.2.1.1. 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 :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \qquad (II.1)$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} - I_0 \qquad (II.2)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L \qquad (II.3)$$

Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \qquad (II.4)$$

$$I_{c2} = C_1 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \qquad (II.5)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - V_0 - R_L I_L \qquad (II.6)$$

II.2.1.2. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations de base (II.(4.5.6)) et (II.(1.2.3)) 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 C_I, V_L 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* :

$$< \frac{\mathrm{d_x}}{\mathrm{d_t}} > \mathrm{T_s} = \frac{\mathrm{d_x}}{\mathrm{dt}_{(\alpha \mathrm{T_s})}} + \alpha \mathrm{T_s} + \frac{\mathrm{d_x}}{\mathrm{dt}_{(1-\alpha)\mathrm{T_s}}} (1-\alpha)\mathrm{T_s} \qquad (\mathrm{II.7})$$

Où $< \frac{x}{t} >$ est la valeur moyenne de la dérivée de *x* sur une période *Ts*. Cette relation est valide si:

$\frac{dx}{dt_{(\propto T_S)}}$ et $\frac{dx}{dt_{(1-\propto)T_S}}$ sont constants sur les périodes$\propto T_s$ et $(1-\propto)T_s$respectivement end'autres termes cette approximation est valable si les périodes$\propto T_s$ et $(1-\propto)T_s$sont très faibles devant la constante de temps du circuit C_1R_G , C_2Z , L/R_L. [16].

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la **figure (II.2).**

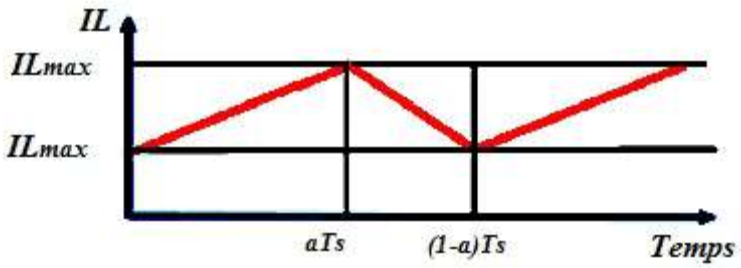


Figure II.2 : Allure des variables dynamiques

En appliquant la relation (II.7) sur les systèmes d'équations (II. (1,2,3)) et (II. (4, 5,6)) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} \alpha T_s = (I_g - I_L)\alpha T_s + (1-\alpha)T_s(I_g - I_L) \quad \text{(II.8)}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 + (1-\alpha)T_s(I_L - I_0) \quad \text{(II.9)}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_g - R_L I_L)\alpha T_s + (1-\alpha)T_s(V_g - V_0 - R_L I_L) \quad \text{(II.10)}$$

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.

$$I_L = I_g - C_1 \frac{dV_g}{dt} \quad \text{(II.11)}$$

$$I_0 = (1-\alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad \text{(II.12)}$$

$$V_g = (1-\alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L + I_L \quad \text{(II.13)}$$

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.

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 :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_s - R_L I_L}{L} \quad \text{(II.14)}$$

A partir de la relation (3.14), la valeur crête à crête du courant $I_L$est :

$$I_{icc} = 2\Delta I_L = \frac{V_s - R_L I_L}{L} \alpha T_s \quad \text{(II.15)}$$

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

$$L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L} \quad \text{(II.16)}$$

Pour le calcul des capacités C_1et C_2 on a :

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{c1}}{C_1} = \frac{I_0 - I_L}{C_1} \quad \text{(II.17)}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{c2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2} \quad \text{(II.18)}$$

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

$$V_{c1cc} = 2\Delta V_{c1} = \frac{I_g - I_L}{C_1}\alpha T_s \quad \text{(II.19)}$$

$$V_{c2cc} = 2\Delta V_{c2} = \frac{-I_0}{C_2}\alpha T_s \quad \text{(II.20)}$$

Les valeurs des capacités C_1 et C_2 sont respectivement données par :

$$C_1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{c1}}\alpha T_s \quad \text{(II.21)}$$

$$C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{c2}}\alpha T_s \quad \text{(II.22)}$$

II.2.1.3. Étude en régime continu :

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

Le système d'équations (II. (11, 12,13)) donne :

$$I_L = I_g \quad \text{(II.23)}$$

$$I_0 = (1-\alpha)I_L \quad \text{(II.24)}$$

$$V_g = (1-\alpha)V_0 \quad \text{(II.25)}$$

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

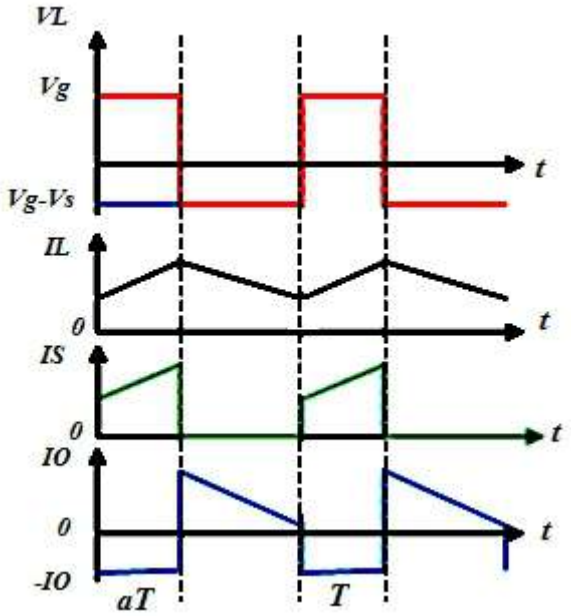


Figure II. 3 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.

II.3.Hacheur dévolteur (Buck) :

La **figure II.4** présente le convertisseur buck ou convertisseur dévolteur (abaisseur de tension) ou hacheur série. Son rôle principal est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

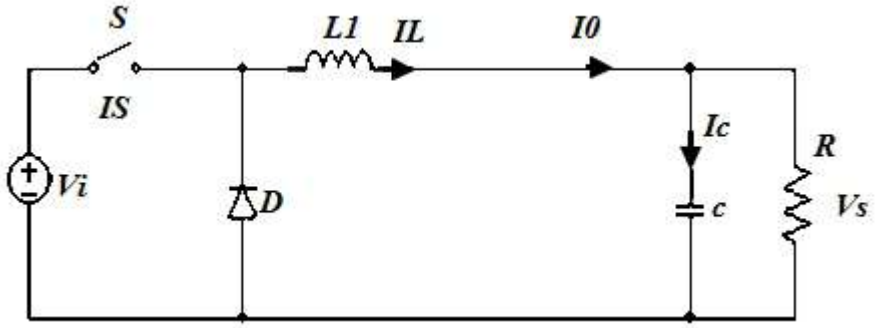


Figure II. 4 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Les composantes clés sont l'inductance *L*, le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur *C*. Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension

aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante.

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i - V_s}{L} \qquad \text{(II.26)}$$

I_L : Le courant dans l'inductance.

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

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i}{L} \qquad \text{(II.27)}$$

Lorsque le courant de l'inductance ne se décroit pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure (II.4), et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique $\alpha = T_{on}/T$, la tension aux bornes de la charge :

$V_s = \alpha V_i$. Dans le mode de conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor (S) et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge, la figure (II.4) montre comment la tension de charge varie avec le courant de charge. Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la **figure (II.5)** :

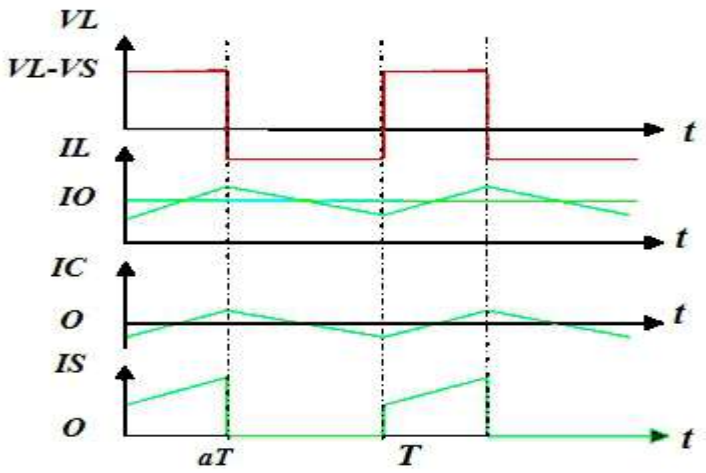


Figure II. 5 : *Caractéristique de la tension et des courants*.

Dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.

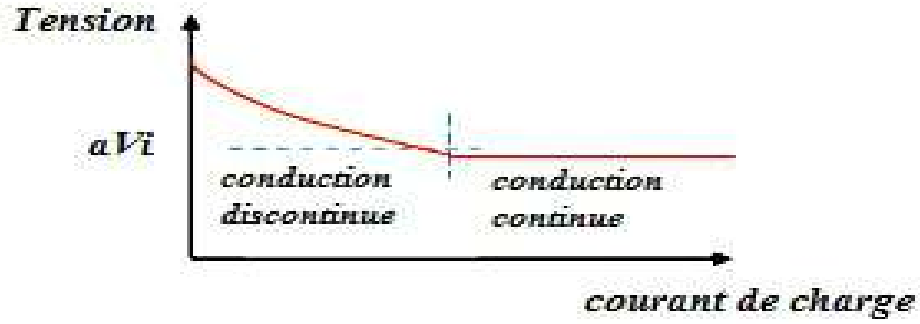


Figure II. 6 : Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck [6].

.

II.4. Le convertisseur Buck-Boost :

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

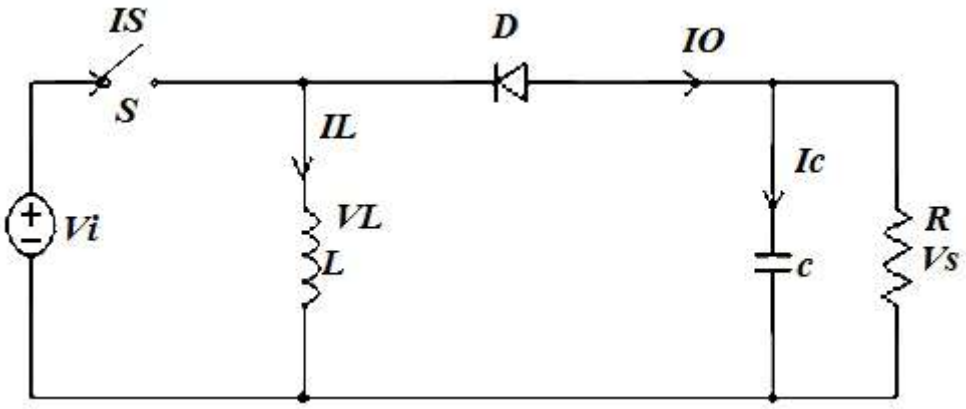


Figure II. 7 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

La figure II.7 montre le schéma de Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge.

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \qquad (II.28)$$

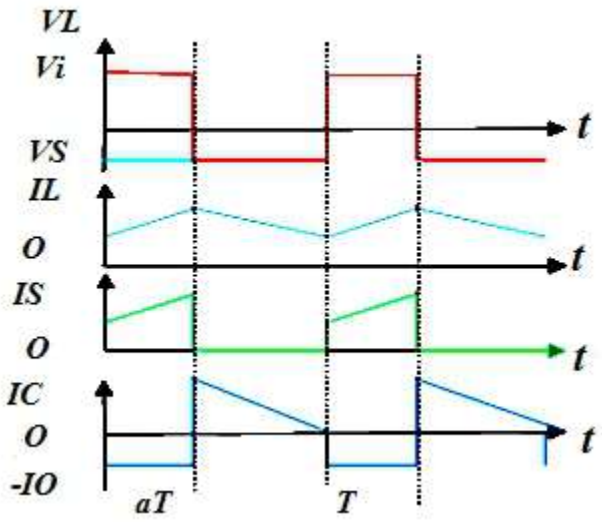


Figure II. 8 : Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

II.5. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [17] [18].

La figure (II.9) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module [6]. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

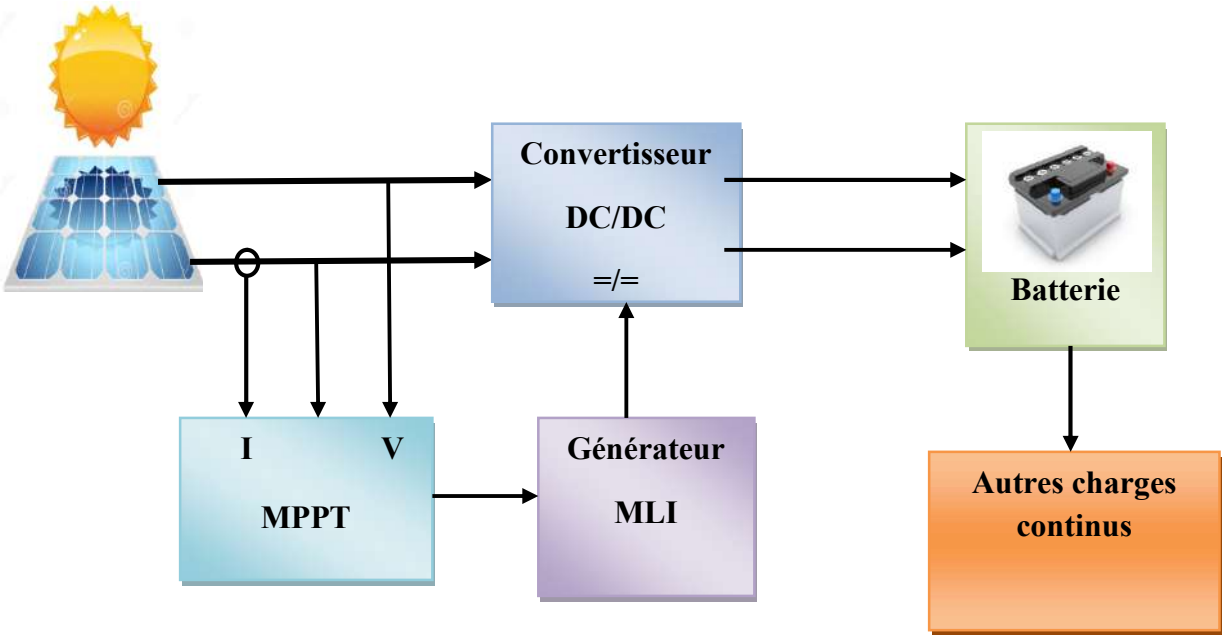


Figure II. 9 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

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

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{PV} = I_{PV} * V_{PV}$.

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée. [17][18].

II.5.1. Algorithme d'incrémentation de l'inductance :

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI.

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite. [8].

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = I^{*}V \qquad \text{(II.27)}$$

La dérivé partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \tag{II.28}$$

$$\frac{I}{V}\frac{dP}{dV} = \frac{I}{V}\frac{dI}{dV} \tag{II.29}$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{I}{V}$ et l'incrémentale conductance $\Delta g = \frac{dI}{dV}$.

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations (II.15) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance ΔG est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG et vice-versa, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \; si \; \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dv} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \; si \; \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dv} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \; si \; \frac{I}{V} < \frac{dI}{dv} \end{cases} \tag{II.30}$$

La figure (II.10) présent le signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement.

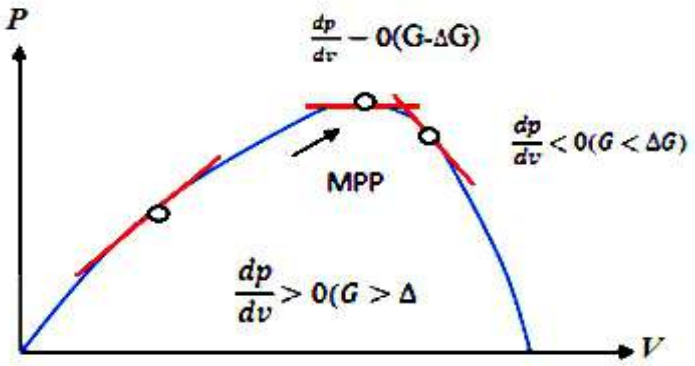


Figure II. 10 : Signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement.

Les tensions et courants du panneau sont monitoires, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement.

Cet algorithme implique un nombre important de calculs de dérivées [17] [6].

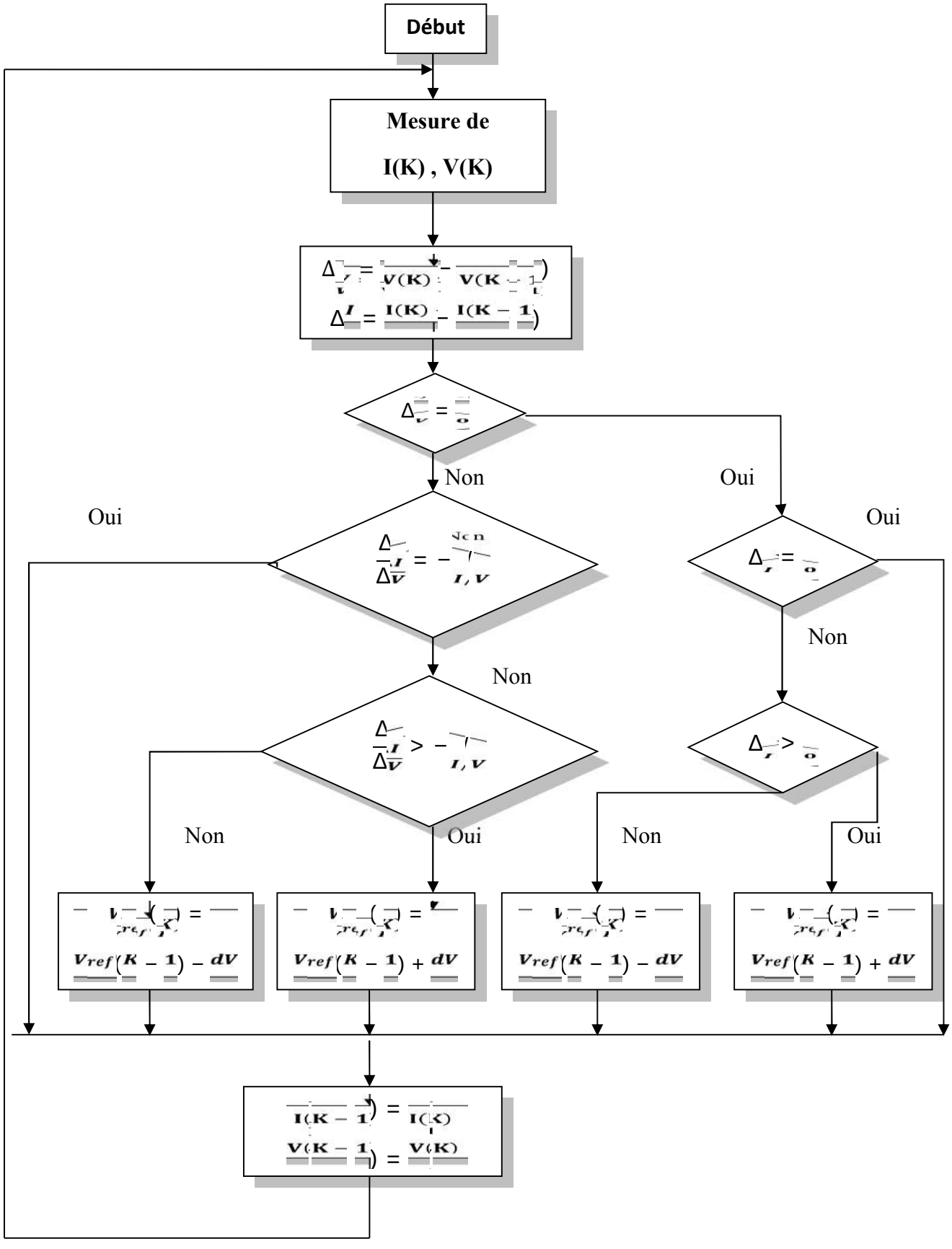


Figure II. 11 Organigramme de la méthode d'incrémentation de l'inductance [8]

II.5.2. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Elle est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPVet IPVrespectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. [2].

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure (II.11) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle V_{pv} et $I\ pv$sont mesurés pour calculer $Ppv(k)$.Cette valeur de $Ppv(k)$ est comparée à la valeur $(k$-1) calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{PV} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminuéV_{PV} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent V_{PV} et ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, oscille autour de la valeur optimale. *C*eci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas V_{OP} d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins[6]..

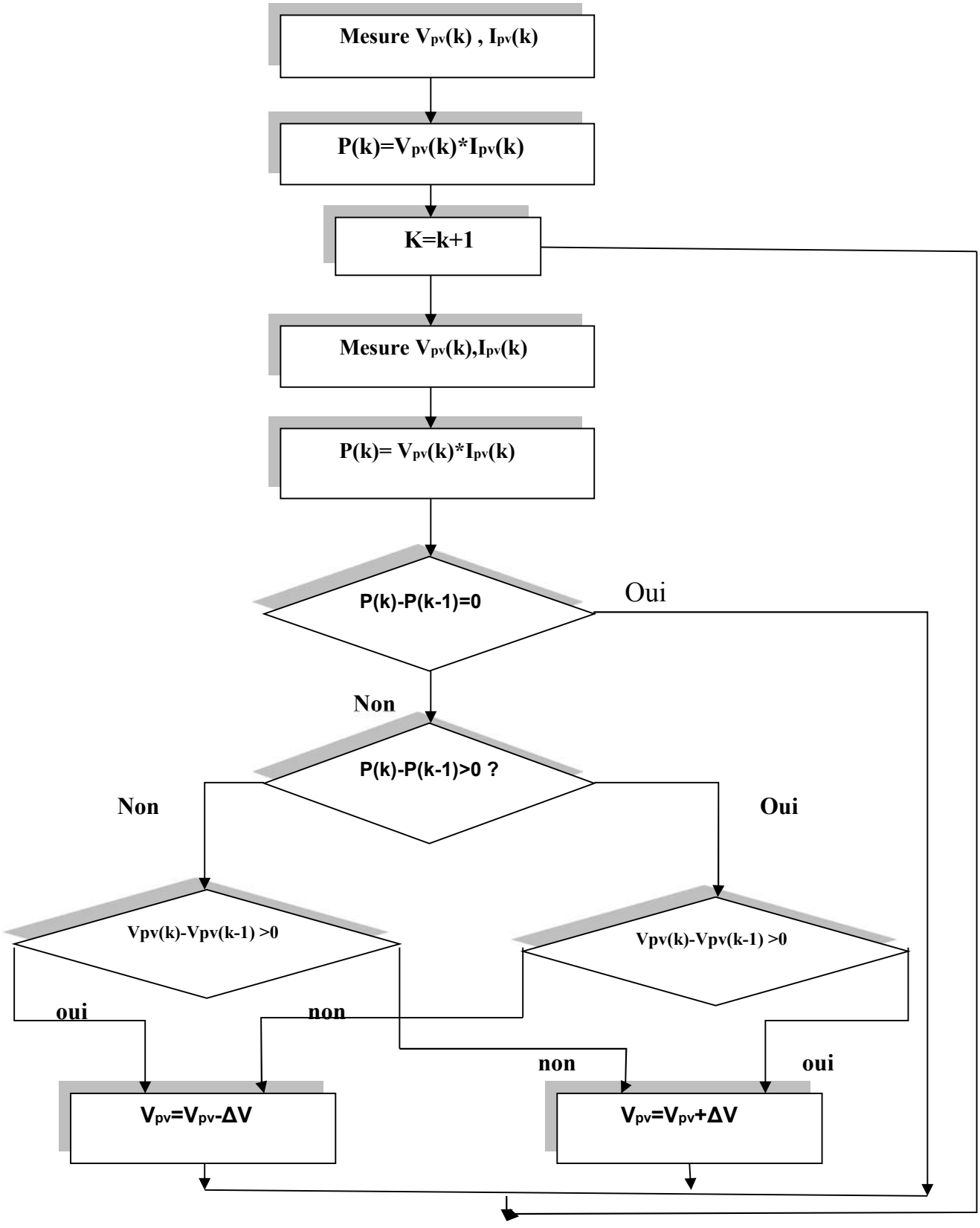


Figure II. 12 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation [1].

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau.

L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continu dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance.

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée [8].

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu quelques topologies de base des convertisseurs continus-continus (DC-DC), convertisseurs (buck, boost et buck/boost) et on a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation et incrémentation de l'inductance. Ces deux commandes MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Il existe d'autre méthodes MPPT basés sur la logique floue et le réseau de neurone artificielle qui serons traiter dans le chapitre suivant .

Chapitre III

Commande MPPT par l'intelligence artificielle

III.1. Introduction

Comme nous avons vu dans le deuxième chapitre que il y a un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant [19], aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du MLI comme les deux technique que nous avons vu dans le deuxiéme chapitre (P&O et IncCond).

Ces dernières années d'autres techniques de commande plus robuste ont était associées à la commande MPPT telle que l'intelligence artificielle (logique floue, réseau de neurones artificiels) afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires[22]. Dans ce chapitre, nous allons présenter l'étude des commandes MPPT utilisant un contrôleur flou et RNA.

III.2 logique floue:

Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [14]. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. Deplus, elles peuvent traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur $\mathbf{E_R}$ et le changement d'erreur $\mathbf{\Delta E_R}$ et une variable de sortie $\mathbf{\Delta D}$

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- la fuzzification.

- la lecture de la table des régles

- la defuzzification.

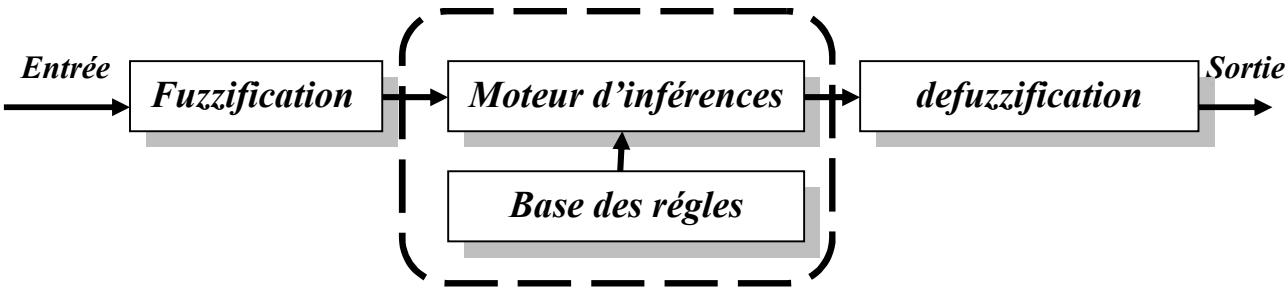


Figure.III.1 : Structure générale d'un régulateur par logique floue.

III.2.1 la fuzzification :

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- **NG**: Negative grand,
- **NP**: Negative pettit,
- **ZE**: Zero,
- **PG**: Positive grand,
- **PP** : Positive pettit.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en figure III.2

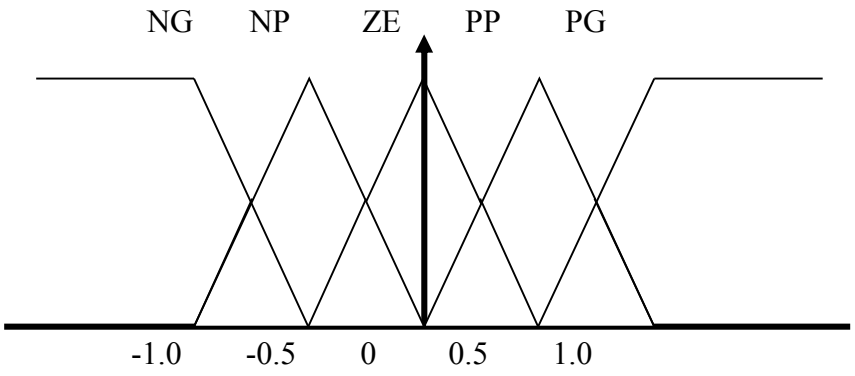


Figure. III. 2 - Structure de base de la commande floue.

III.2.2 la lecture de la table des régles :

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 [16].

III.2.3. 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 [16].

III.2.4 La commandes MPPT basée sur le principe de la logique floue:

Le régulateur MPPT élaboré possède deux entrées définies par [14]:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \qquad (III.1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \qquad (III.2)$$

Où $E(k)$et $CE(k)$ désignent, respectivement, l'erreur et le changement d'erreur. $P(k)$ Et $V(k)$ étant respectivement la puissance du GPV et sa tension de sortie à l'instant d'échantillonnage k.

La sortie du régulateur flou est la variation du rapport cyclique dD du convertisseur statique [21]. La commande floue consistera à imposer une valeur forte 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 [22].

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. Elle consiste à définir les fonctions d'appartenances pour l'ensemble des variables du système [8]

Les fonctions d'appartenance que nous avons utilisées sont schématisées sur les figures (III.3.4).

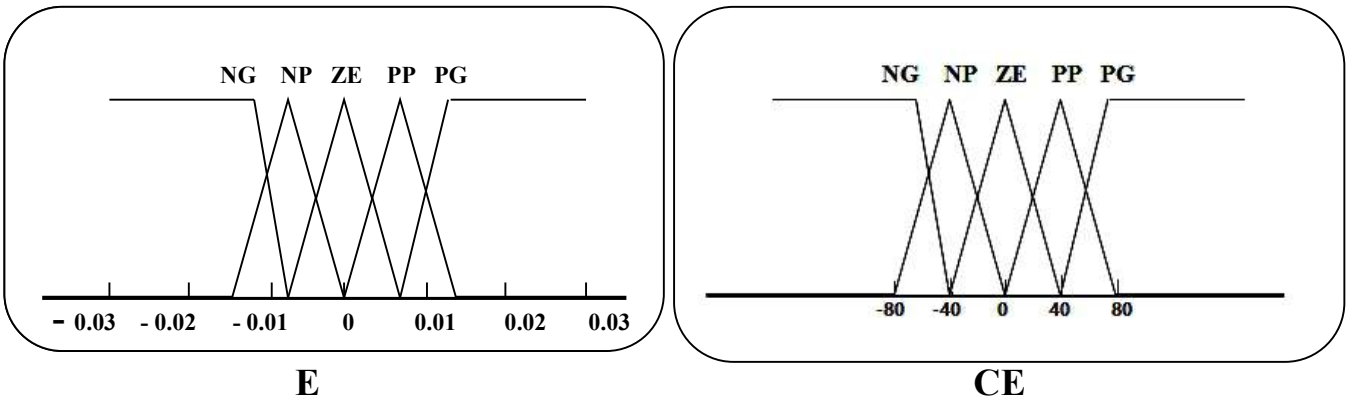


Figure. III.3 : Fonction d'appartenance des variables d'entrées E et CE

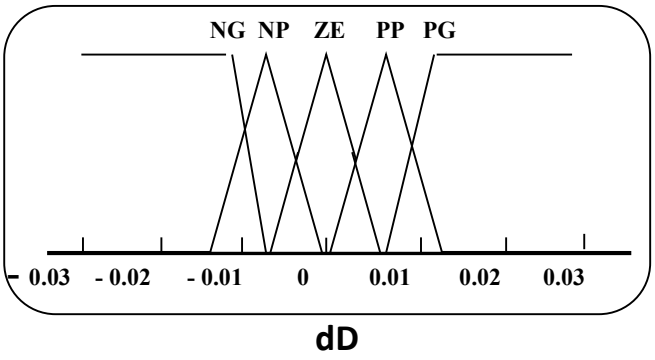


Figure. III.4 : Fonction d'appartenance de la variable de sortie

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 CE est positif, alors le point de fonctionnement converge vers le point de puissance maximale. Si CE est négatif c'est l'inverse qui se produit.

Deuxième cas : E est négatif, on se trouve, donc, à droite du point de puissance maximale. Dans ce cas si CE est positif, le point de fonctionnement s'éloigne du point de puissance maximale et inversement si CE est négatif.

Le tableau représente la matrice d'inférence adopté pour la poursuite du PPM [16].

CE / E	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

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

III.3 Les réseaux neuronaux artificiels :

Les Réseaux de neurones (RNA) la technologie artificielle a été appliquée avec succès pour résoudre des problèmes très complexes. Récemment, son application dans divers domaines augmente rapidement [24]. La science du réseau neuronal artificiel est basé sur le neurone. Afin de mieux comprendre la structure de réseau artificiel, l'élément de base du neurone doit être entendu. Un système avec intelligence informatique embarquée est considéré comme un système intelligent qui a l'apprentissage, l'auto-organisation et la capacité de généralisation. En effet réseau neuronal est plus de nature génétique qui tend à imiter le RN biologique directement. Ces deux dernière décennie, la technologie RN captive l'attention d'un grand nombre de communautés scientifiques, depuis lors, la technologie a été progressée rapidement et ses applications sont en expansion dans différents domaines [24].

Le fonctionnement des neurones artificiels est inspiré par leurs homologues naturels. Chaque neurone artificiel a plusieurs entrées et une seule sortie, l'axone. Chaque entrée est caractérisée par un poids indiquant l'influence du signal correspondant sur le neurone de sortie. Le neurone calcule un signal d'entrée totale équivalente à la somme pondérée des signaux d'entrée individuels. La quantité obtenue est ensuite comparée à une valeur constante nommés au niveau de seuil et le signal de sortie est calculé en fonction de leur différence, cette fonction est appelée la fonction d'activation. Les coefficients de pondération d'entrée, le niveau de seuil et la fonction d'activation sont les paramètres qui décrivent complètement un neurone artificiel.

Au cours des quelques dernières années, les types plus sophistiqués de neurones et de fonctions d'activation assemblés dans les algorithmes ont été introduites afin de résoudre différents types de problèmes pratiques. En particulier, quasi-Newton méthode de Levenberg Marquardt a utile pour de nombreux systèmes de contrôle et les applications d'identification du système [24].

III.3.1 Architecture de réseau de neurones artificiels :

En général, un réseau de neurones se compose de trois types de couches :

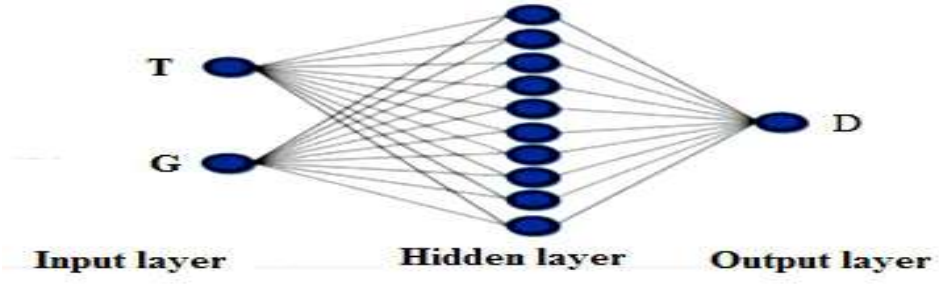


Figure III.5 L'architecture du réseau neuronal proposé.

• La couche d'entrée

La première couche est appelée couche d'entrée. Elle recevra les données sources que nous voulons utiliser pour l'analyse. Sa taille est directement déterminée par le nombre de variables d'entrées.

• La couche cachée

La couche cachée est la couche suivante après la couche d'entrée, dans un réseau nous pouvons avoir une couche cachée ou plusieurs. Nous notons que si les fonctions de transfert sont linéaires alors, toutes les couches cachées, nous considérons, comme une seule couche.

Or les fonctions d'activations sont en général non linéaires sur cette couche, mais il n'y a pas de règle à respecter. Le choix de sa taille n'est pas implicite et doit être ajusté. En général, nous pouvons commencer par une taille moyenne des couches d'entrée et de sortie, mais ce n'est pas toujours le meilleur choix. Il sera souvent préférable pour obtenir de bons résultats, d'essayer le plus de tailles possible.

• La couche de sortie

La troisième couche est appelée couche de sortie. Elle donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrée dans la première couche. Sa taille est directement déterminée par le nombre de variables que nous voulons en sortie.

III.3.2. Formation de réseau neurones artificiels :

Réseau de neurones artificiels ont la mémoire, ce qui correspond à des poids dans les neurones. Les poids et les préjugés du réseau sont ajustés par le taux d'apprentissage afin de déplacer la sortie du réseau au plus près des cibles. La fonction 'newff' permet à un utilisateur de spécifier le nombre de couches, le nombre de neurones dans la couche cachée et la fonction d'activation utilisé de la manière décrite ci-dessous. Après la formation, les poids de réseau sont définis par la règle d'apprentissage back-propagation. Le nombre d'époques de cet exemple est de 1000 et le taux d'apprentissage est de 0,02. Pendant la formation, le vecteur d'entrée sera passé à travers le réseau de neurones et les poids seront ajusté 1000 fois. Le taux d'apprentissage du réseau est également mis [24].

Le code Matlab suivant crée un réseau d'anticipation:

```
net = newff(pr,tr,[10.1],{'tansig','purelin'},'trainlm','learngdm','msereg');
```

```
net.trainparam.epoch=1000;
net.trainparam.Ir=0.02;
net= train(net,pr,tr);
gensim(net);
```

III.3.3 La commande MPPT basée sur le principe de réseau neurones artificiels:

Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être la température T et l'irradiation G. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique(CS) pour fonctionner le plus souvent possible au PPM (**figure III.6**) . La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, l'importance entre deux noeuds de la valeur du poids choisi *Wij* est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM éventuels, les poids *Wij* doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage pénibles et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance. [20]

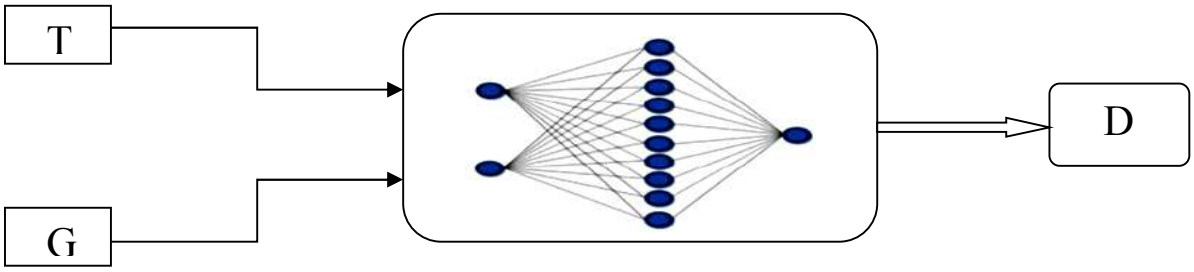


Figure III.6 : block Simulink de modèle de réseau de neurone

Le schema dans la Figure III.7 represante les deffirentes position de rapport cyclique (D) par rapport les valeur de temperature T et l'irradiation G.

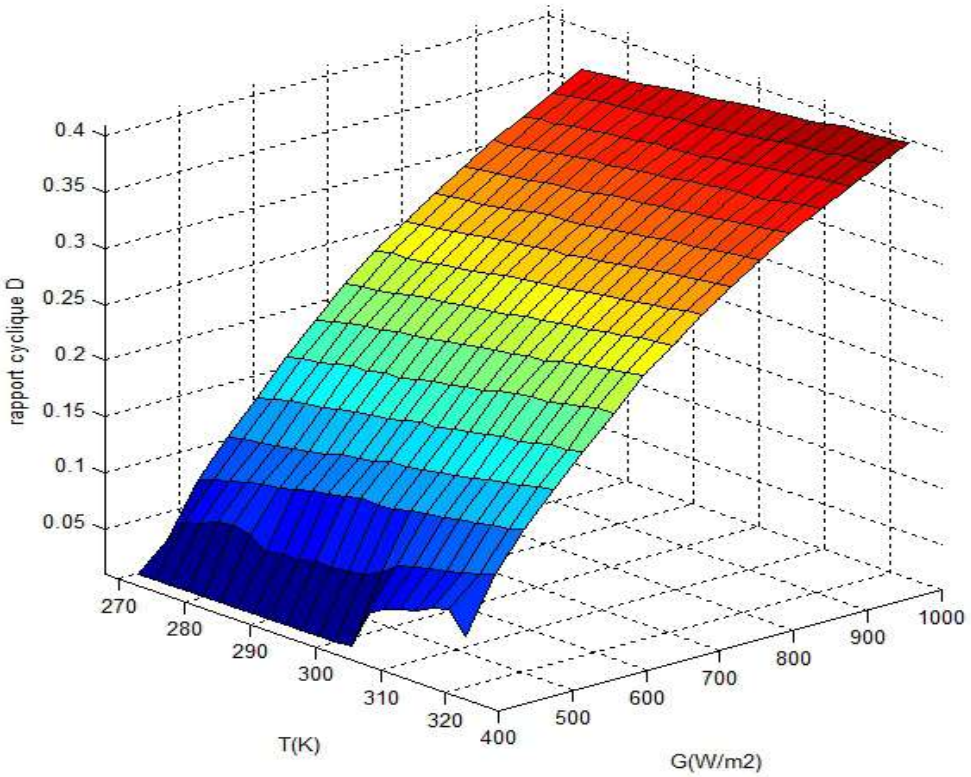


Figure III.7 :.schéma en 3D représenté la variation de rapport cyclique (D) en fonction (T) et (G).

l'apprentissage a été effectuées pour vérifier la méthode proposée de réseau neuronal artificiel.

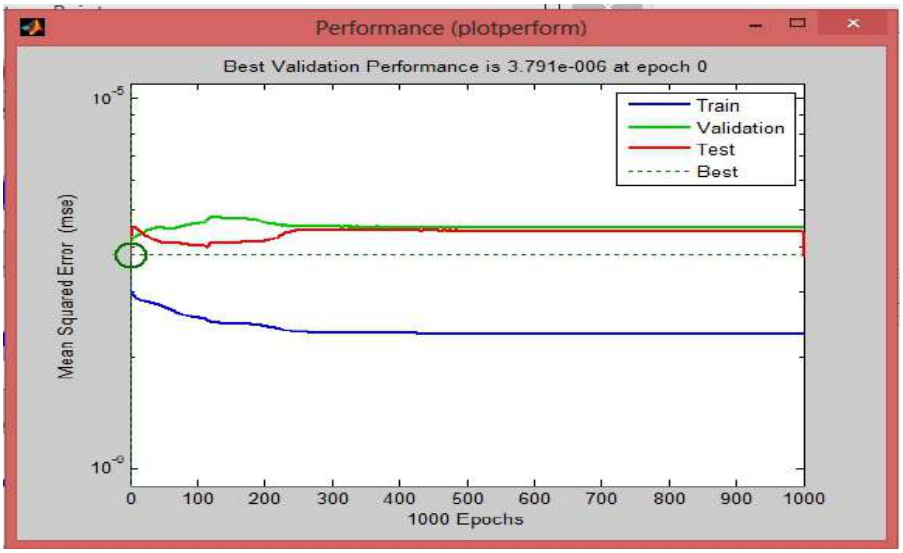


Figure III.8 : performance plot

L'intrigue de la performance est mappé entre l'erreur quadratique moyenne et du nombre d'époques (epochs) qui mène les données de train, à la meilleure performance. La figure III.9 présente l'état de la formation qui détermine la position du gradient, mu et la vérification de validation à l'époque 1000 dans lequel le réseau est complètement formé.

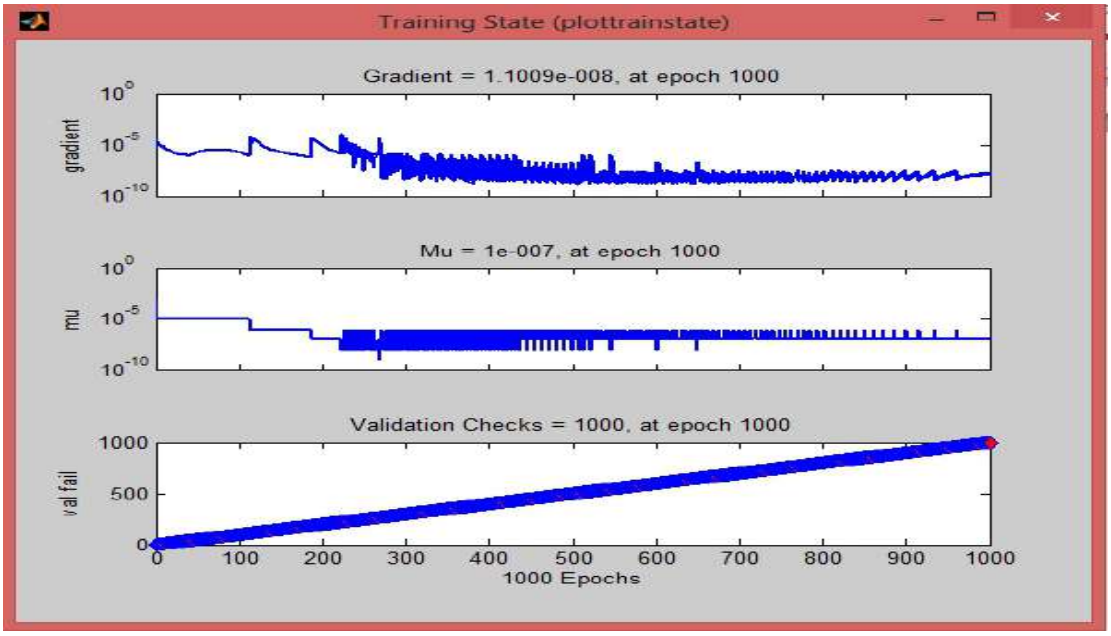


Figure III.9 : training model PV

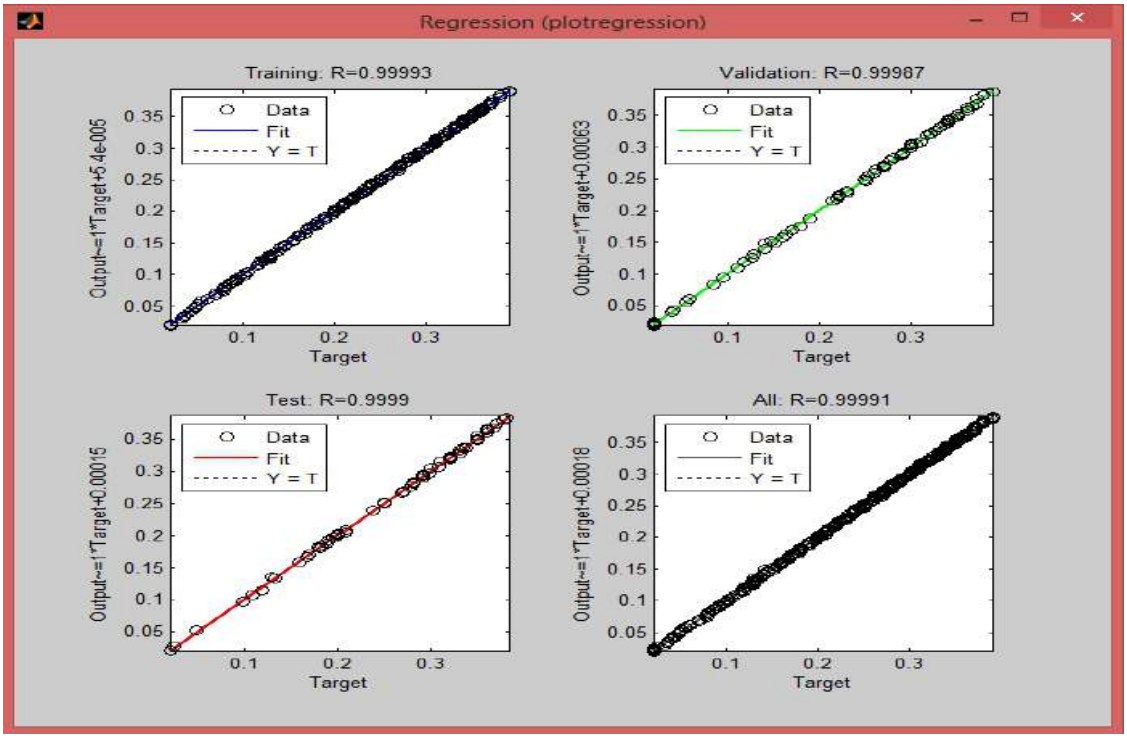


Figure III.10 : régression (plot) de model PV

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'intelligence artificielle comme un outil pour la modélisation de cellules photovoltaïques , et comme une méthode de poursuite de point de puissance maximale.

Pour cela, nous avons présenté les principes des techniques de l'intelligence artificielle (RNA et logique floue).

Chapitre IV

Simulation du système

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter sous simulik/matlab un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique et les résultats de simulation de PV sons commande. Ce système est constitué d'un un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « P&O » ,« INC », «Logique floue» ou «RNA» ainsi qu'une charge.

La modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simpower.

IV.2. L'outil Matlab/simulik :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble

IV.2.1.Simpower

Est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [15].

IV.3. Système photovoltaïque proposée

La figure (IV.1) représente le schéma synoptique d'un système PV alimente une charge résistive (*Rs*) :

- Le générateur PV (MSX120) [voir l'annexe2] est en silicium monocristallin est constitué de 72 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 120 W, un courant de 3.56A sous une tension optimale de 33.7V.
- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur (boost) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 33.7V.
- La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque.

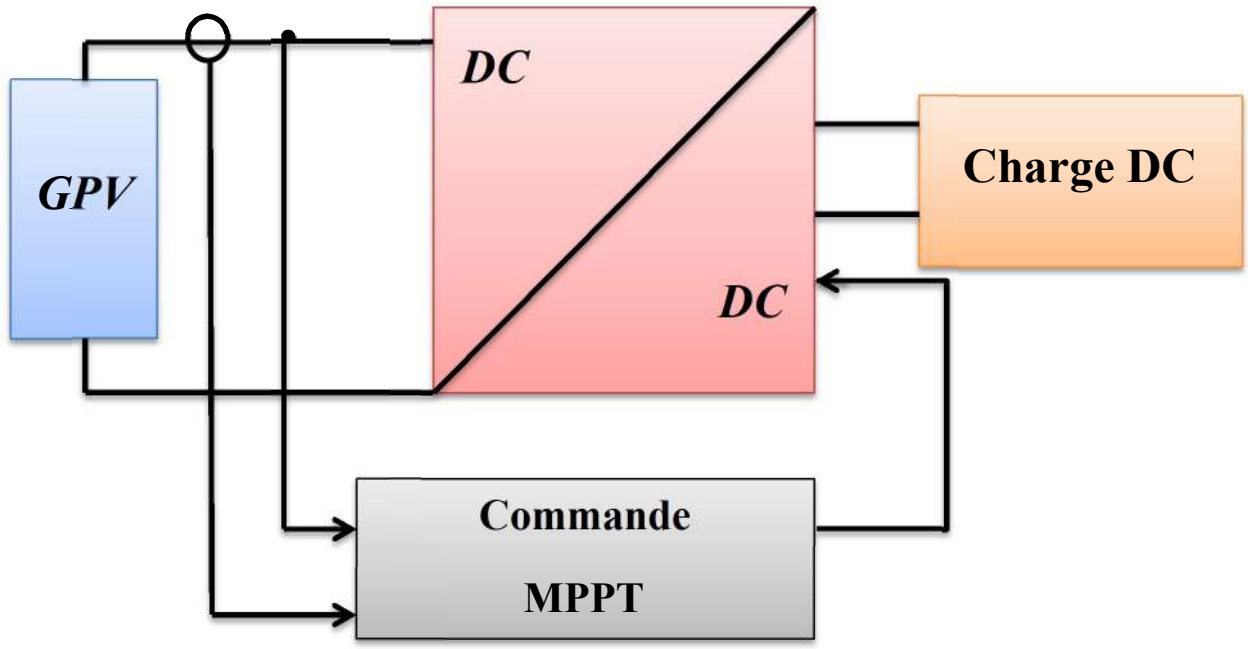


Figure IV.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC) [8] [6].

IV.4.Simulation du générateur photovoltaïque

IV.4.1. Modèle GPV

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source.[23]. On présente le schéma du circuit électrique par la figure (IV.2) :

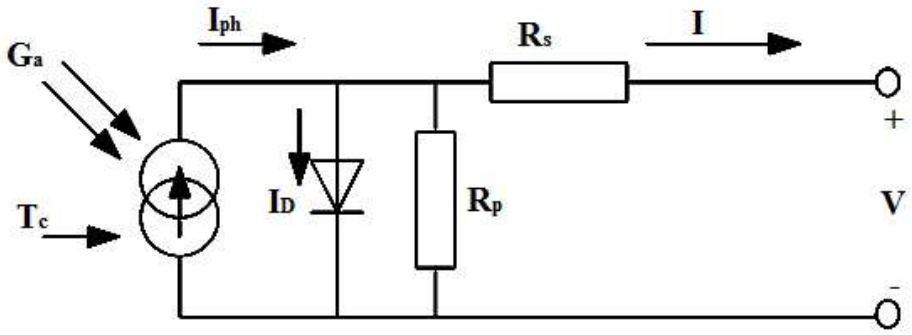


Figure IV.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

IV.4.2. Modèle du module photovoltaïque

Le modèle suivant utilise des méthode différentes pour calculer la résistance série et la résistance parallèle. Par exemple, BP MSX 120 est fait de 72 cellules solaires en série et fournit P_{mpp}=120W de puissance maximum nominale. La tension maximum de point de puissance est V_{mpp}=33.7 V et le courant fourni au point de puissance maximum est I_{mpp}=3.56 A. Les paramètres de BP MSX120 sont donnés dans le tableau IV. qui est essentiel pour modeler le pneaau photovoltaïque PV. [Annexe.2]

Tableau IV.1 fiche technique de BP MSX120 de module de PV au STC. [Annexe]

Courant de court-circuit	***3.87 A***
Tension de circuit ouvert	***42.1 V***
Courant au point de puissance maximum	***3.56 A***
Tension au point de puissance maximum	***33.7 V***
Nombre des cellules en série	***72***
Coefficient de température d'I_{sc}	***(0.065±0.015)% °C***
Coefficient de température de v_{oc}	***-(80±10) mV/°C***
P_{max}	***120 W***
Courant de saturation renversé de diode I_0	***0.323µ M***
Facteur de qualité de diode A	***1.3977***
Résistance série R_s	***0.473 Ω***
Résistance paralléle R_p	***1367 Ω***

IV.4.3. Schéma générateur photovoltaïque dans Matlab

La simulation de la générateur photovoltaïque est réalisée avec le bloc de Simulink. Le modèle de matlab de générateur photovoltaïque est basé sur la référance [5]. Certaines variables sont modifiées pour l'application avec la pourssuit de point de puissance maximale. Les paramètres d'entrée exigées pour le modèle sont :

I_{mp} : courant à la puissance maximale au STC.

N_s : nombre de cellules en série

N_{pp} : modules de nombre en parallèle

N_{ss} : nombre de modules en série

A : 1.3977, constante de diode

k : 1.38e-23, constante de Boltzmann

I_{scn} : tension nominale de court-circuit

K_p : Coefficient de la température de tension

K_i : coefficient de température courant

V_{mp} : puissance maximum de tension au STC.

La fiche technique des caractéristiques de PV de est employée pour calculer les valeurs nécessaire pour Rs, Rp.et d'autres paramètres pour le point de puissance maximale. Le montage initial est employé pour obtenir les caractéristiques de la courbe I-V de paneau PV et pour prouver le point de puissance maximale du PV. Le modèle du PV est employé avec le convertisseur DC-DC(Boost) pour déterminer l'exécution du traqueur le point de puissance maximale.

Le modèle du générateur photovoltaïque a été mis en application dans Simulink suivant les indications de la figure (IV.3). La température et l'irradiante sont spécifiées. La simulation laisse avoir les caractéristiques I-V et P-V. Le modèle de Simulink emploie une source courante, et une source de tension et la valeur de résistance en série et en parallèle du PV.

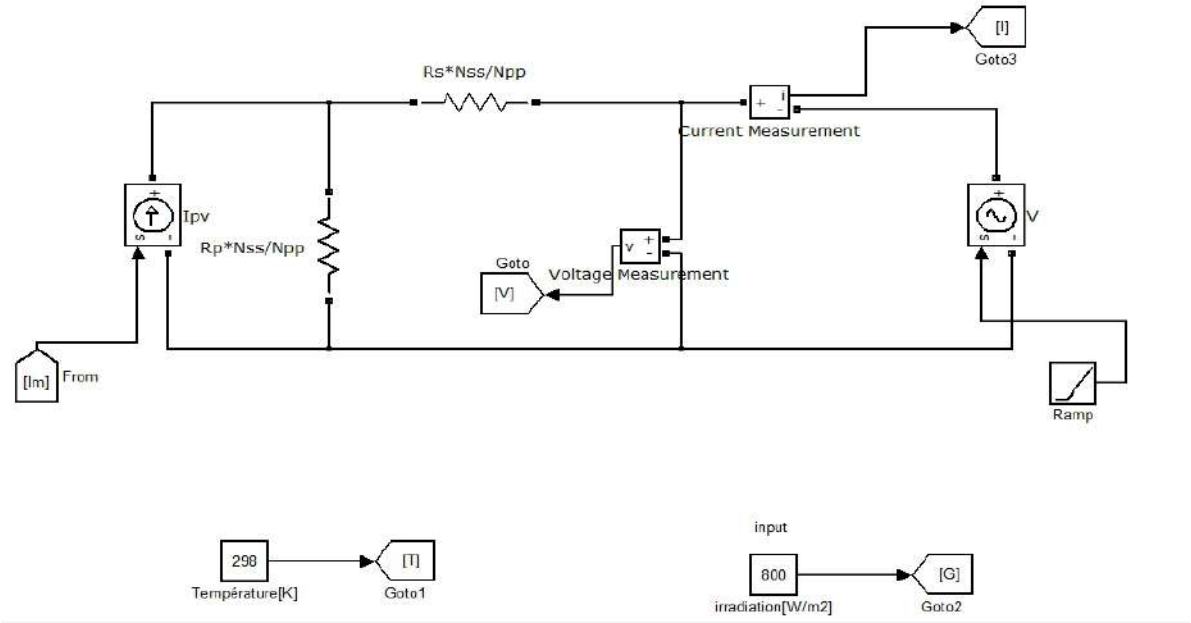


Figure IV.3 : simulation du module de PV [5]

Le nombre de modules en série et le parallèle sont données avec le Nss et la Npp. Le résultat du courent I_m est employé pour le bloc de Simulink comme source de courante pour obtenir la tension et le courant I_{pv} fournis du PV.

La figure (IV.4) est le bloc qui représente le paneau photovoltaique et qui peut être employé avec différents circuits de puissance dans Simulink. On peut noter que les entrées du PV sont l'irradiation et la température, les sorties sont la tension V_{pv} et le courant I_{pv} [23].

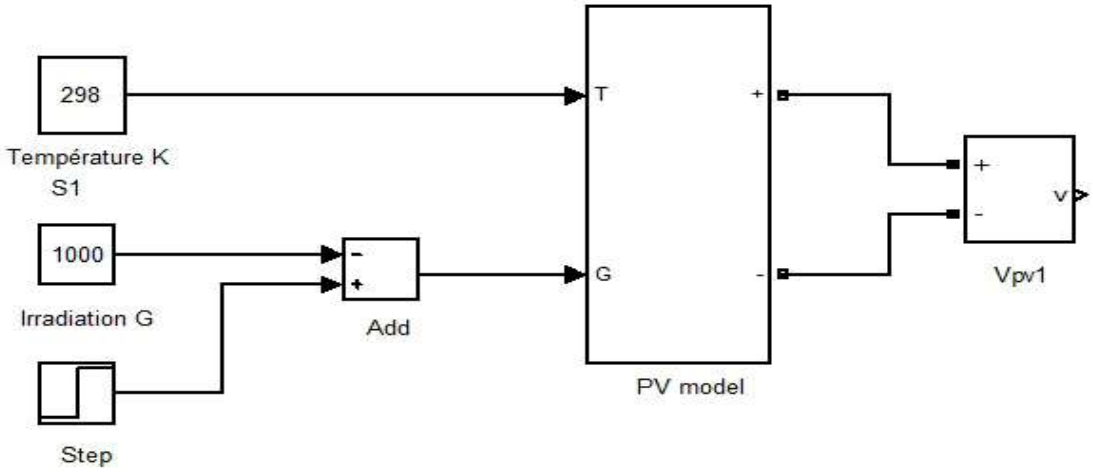


Figure IV.4: bloc de Simulink de générateur photovoltaïque

La figure(IV.5) montre l'interface de masque de ce modèle de PV. Le paramètre d'entrée pour ce modèle est le courant photovoltaïque I_m. La variation du courant du photovoltaïque varie la tension photovoltaïque de sortie. Le modèle de Simulink est dérivé du modèle décrit dans la partie de Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque (Capitre I) [7][23]. Et les citer les l'équation :

- $I_m = I_{ph} - I_0\left(e^{qV_d/KT} - 1\right)$ (IV.1)
- $I_{ph} \cong I_{sc}(T1) = \left(\frac{G}{G_{nom}}\right) I_{sc}\left(T_{1,nom}\right)$ (IV.2)
- $I_0(T_1) = \frac{I_{ph}(T_1)}{\left(e^{\frac{qV_{oc}}{KT-1}}\right)}$ (IV.3)

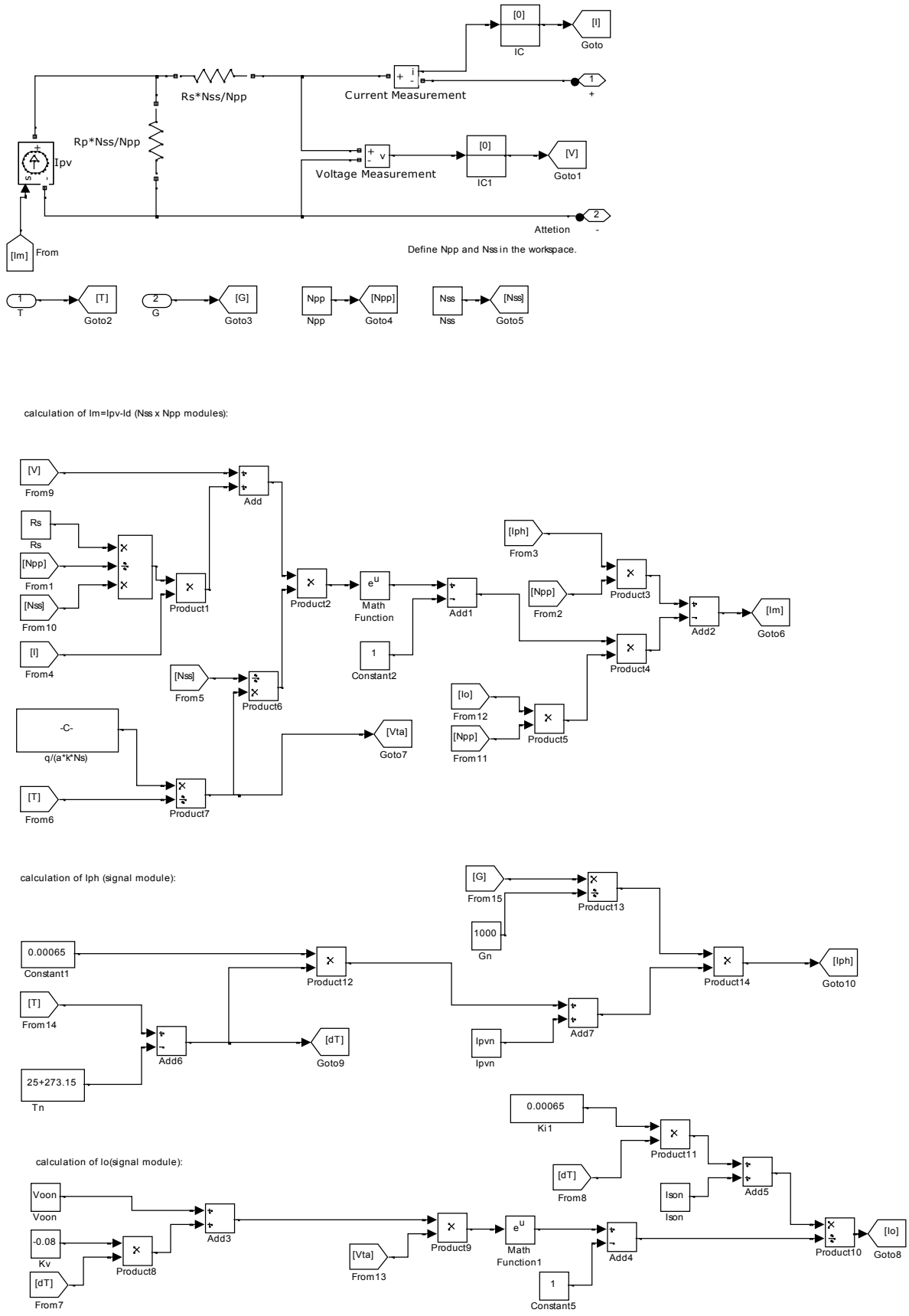


Figure IV.5 : Modèle de sous-système de Simulink de la rangée de photovoltaïque [8]

IV.5 Modèle de Simulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT

La figure (IV.6) montre shéma de convertisseur boost. L'entrée de convertisseur est la tension de sortie de paneau photovoltaïque. L'inductance et le condensateur ont besoin d'être spécifiés. La commande de commutation du transistor est obtenue à partir du contrôleur MPPT.

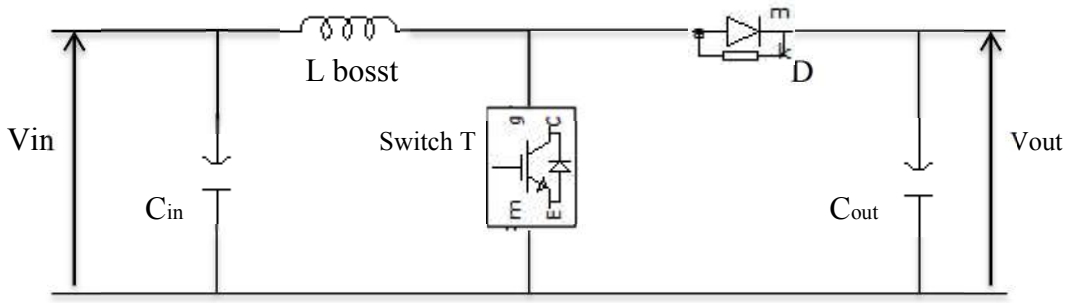


Figure IV.6 : Simulation de convertisseur boost

IV.6. Simulation de la méthode MPPT

Le bloc de contrôleur du point de puissance maximale est montré sur la figure (IV.7) La tension et le courant de la paneau photovoltaïque sont les entrées, et le rapport cyclique (D) est la sortie. Le rapport cyclique est comparé à un signal triangulaire pour produire la MLI. La fréquence de signal triangulaire est la fréquence des impulsions du convertisseur boost.

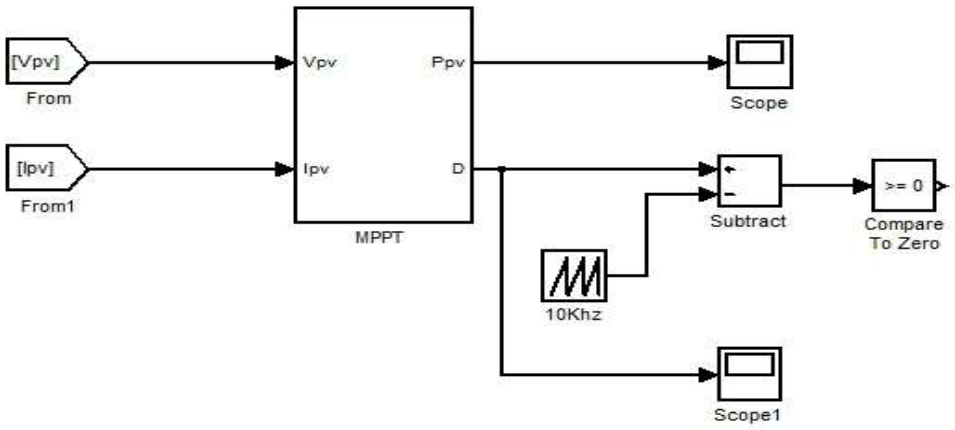


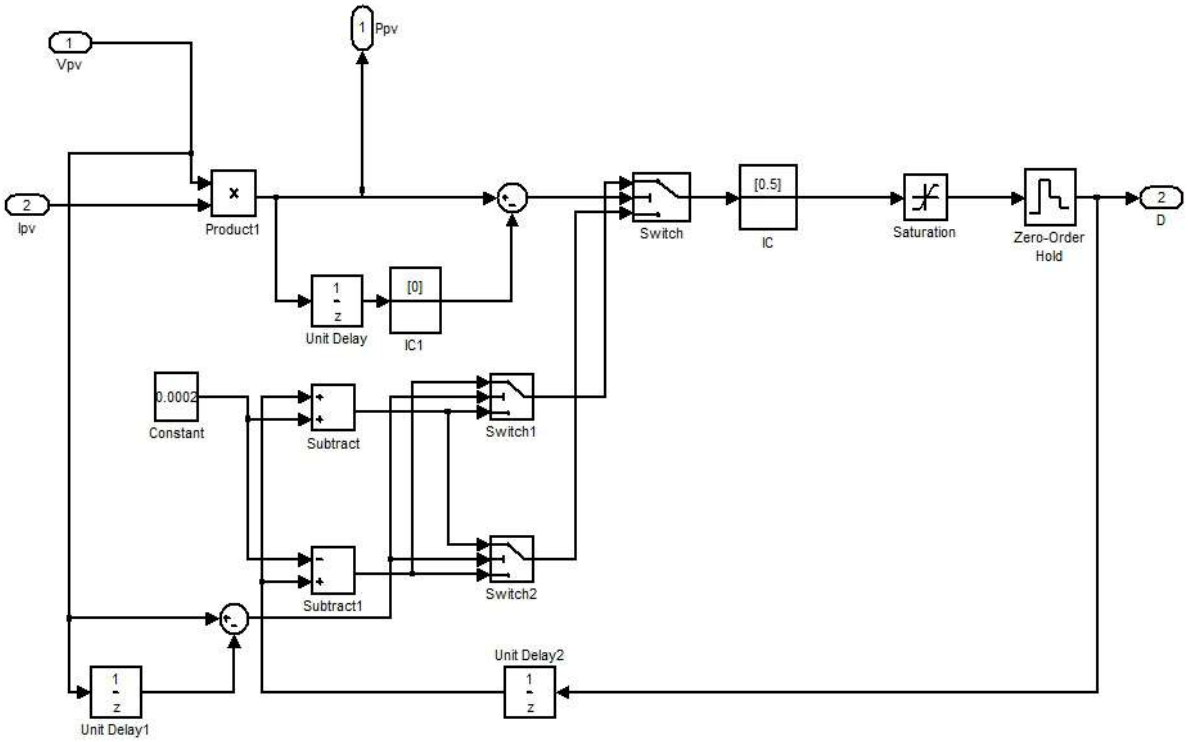
Figure IV.7 : Bloc de Simulink pour MPPT

IV.6.1 perturbation et observent (P&O)

l'algorithme de perturbation et observent(P&O) est mis en application et montré sur la figure (IV.8). à partie de la figure (II.12).

Le rapport cyclique est augmenté ou diminué jusqu'au que le point de puissance maximale du photovoltaïque est atteint. Le pas du rapport cyclique est constant, et il détermine l'efficacité et l'exactitude du contrôleur MPPT.

Dans cette méthode on a utilisé un l'imitateur entre (0.01 0.9) pour limiter le rapport de cyclique.

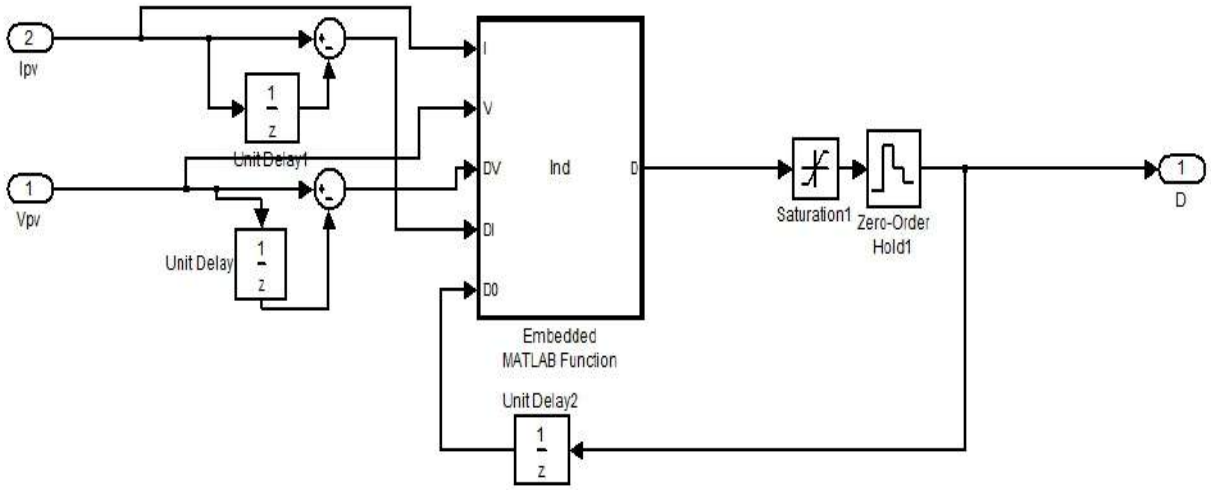


FigureIV.8 : simulation de commande p&o

IV.6.2 .Incrément de la conductance, (IncCond) :

La figure (IV.9). montré l'algorithme de Incrément de la conductance (IncCond) qui mis en application .

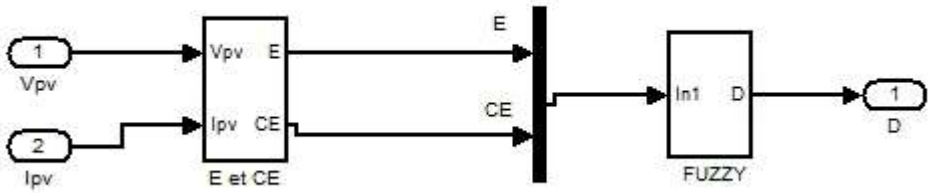
L'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale.



FigureIV.9 : simulation de commande INC

IV.6.3 logique floue

La Figure (**IV.10**) illustre le contrôleur flou remplaçant le contrôleur à base de la méthode (P&O et IncCond) dans le but de réaliser des comparaisons entre Plusieurs méthodes de contrôle.

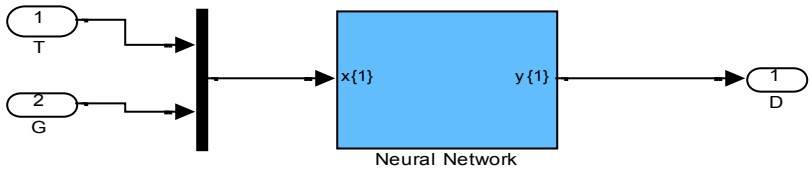


FigureIV.10 : simulation de commande par logique floue

IV.6.4 .réseaux de neurones artificiels (RNA)

Pour la command MPPT à base de RNA ,les entree sont l'irradiation G et la température T.

La conception du RNA sous Simulink est représentée sur la figure (Figure IV.11)



FigureIV.11 : commande par RNA

IV.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

La figure (IV.12) est le montage du convertisseur **boost**, de panneau photovoltaïque et du contrôleur de point de puissance maximale (ppm) dans Simulink. Le système a une charge résistive pour tester la simulation.

Le Tableau IV.2 présentes les paramètres du convertisseur boost calculer dans l'annexe 1

Tableau IV.2 paramètres du convertisseur boost[Voir Annexe.1]

R_{ch}	$= 24.3$ ohm
L	$L \geq 444\ \mu H$
C_{in}	$\geq 78.6\ \mu F$
C_{out}	$\geq 154.69\ \mu F$

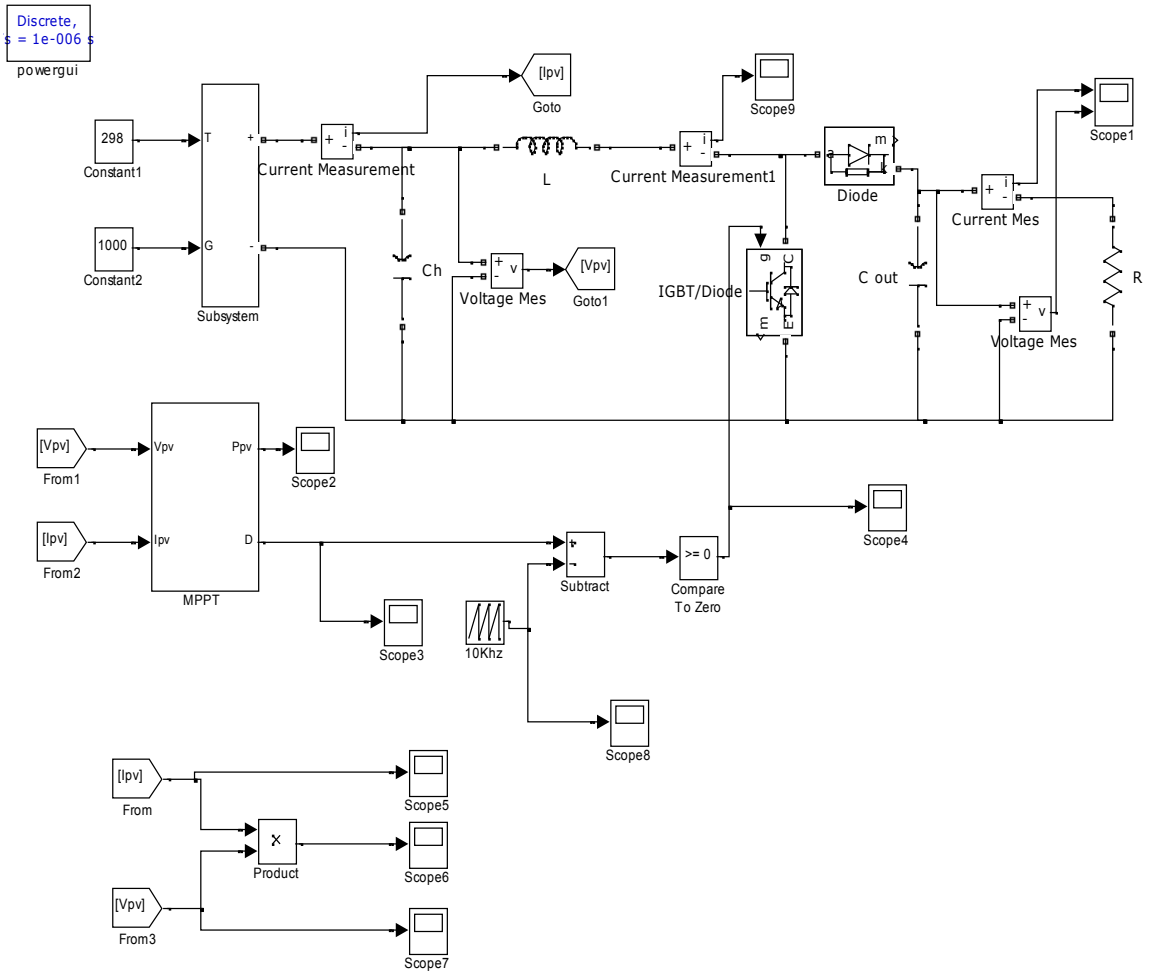


Figure IV.12: Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

IV.8. Résultats de simulation de PV

Le modèle du système photovoltaïque dans le chapitre II est employé pour déterminer l'exécution du contrôleur de MPPT avec le convertisseur boost. Cette simulation présente une analyse du panneau photovoltaïque avec le convertisseur boost et la charge résistive. La température, l'irradiance et la charge, sont variés pour déterminer l'exécution du MPPT et pour tracker la puissance maximale du PV.

IV.8.1. Caractéristiques du générateur photovoltaïque

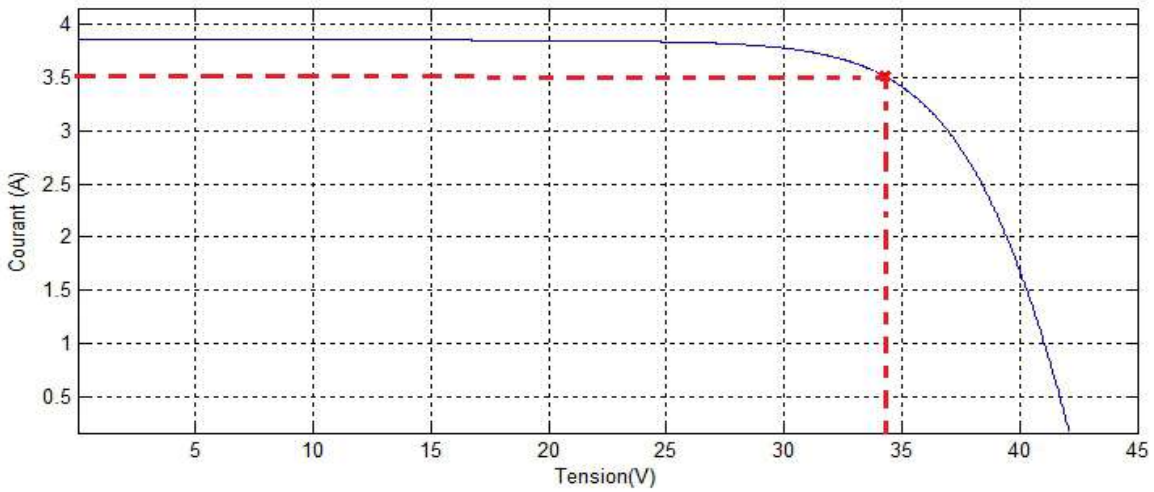
IV.8.1.1. Les caractéristiques d'I-V et de P-V :

Le modèle photovoltaïque utilisé est BP MSX 120. Il a une puissance maximale 120 W. La fiche technique du PV est donnée dans l'annexe 2.

Sur la figure (IV.13), les caractéristiques courant-tension du module BP MSX 120 de PV est montrées. Il peut noter que le rendement courant maximale est I_{mpp}= 3.56 A et la tension maximale est V_{mpp}= 33.7 V. la $V_{mpp} et\ I_{mpp}$ sont identiques avec les valeurs données par le fabricant dans le tableau IV.2.

La figure (IV.13) est la courbe de courant en fonction de la tension de BP MSX 120.

Il peut noter que la puissance maximale du module simple est 120 W.



FigureIV.13 : Caractéristique I= f(V) du panneau PV(T=25C°, G=1000W/m^2)

La figure IV.14 est la courbe de puissance en fonction de la tension de paneau BP MSX 120. Il Peut noter que la puissance maximale du module simple est 120 W.

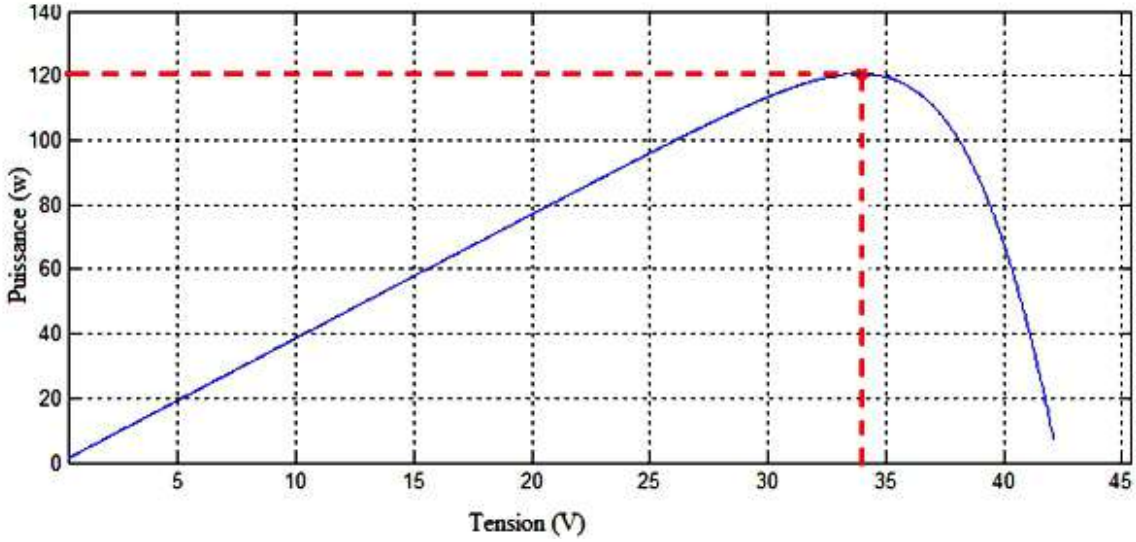
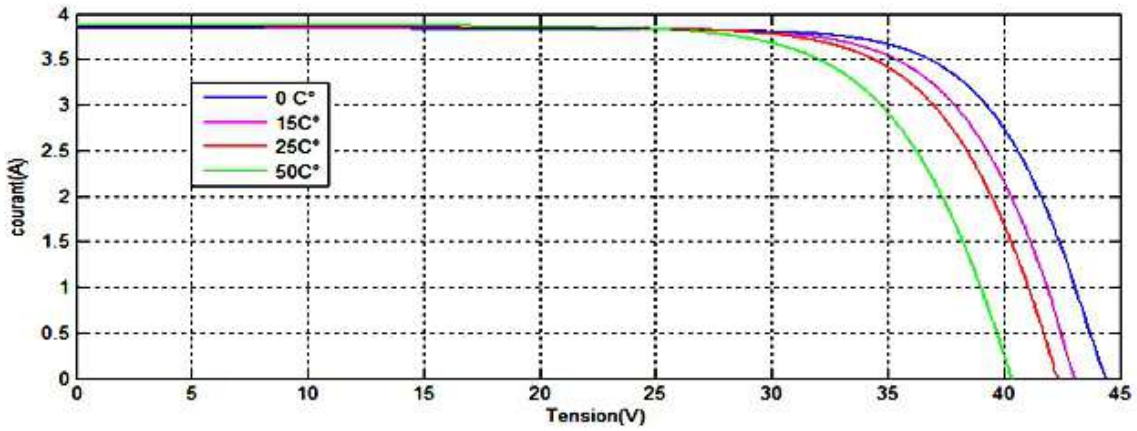


Figure IV.14 : Caractéristique P = f(V) du panneau PV (T = 25 C°, G = 1000W / m^2)

IV.8.1.2 Simulation PV avec variation de la température :

Sur les figures (IV.15) (VI.16), la température varie de 0Cº, de 15C° de 25Cº, et de 50Cº. La variation de la température a un impact à la tension de sortie du PV. La variation de la température affecte moins le courant de sortie.



FigureIV.15: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m2.

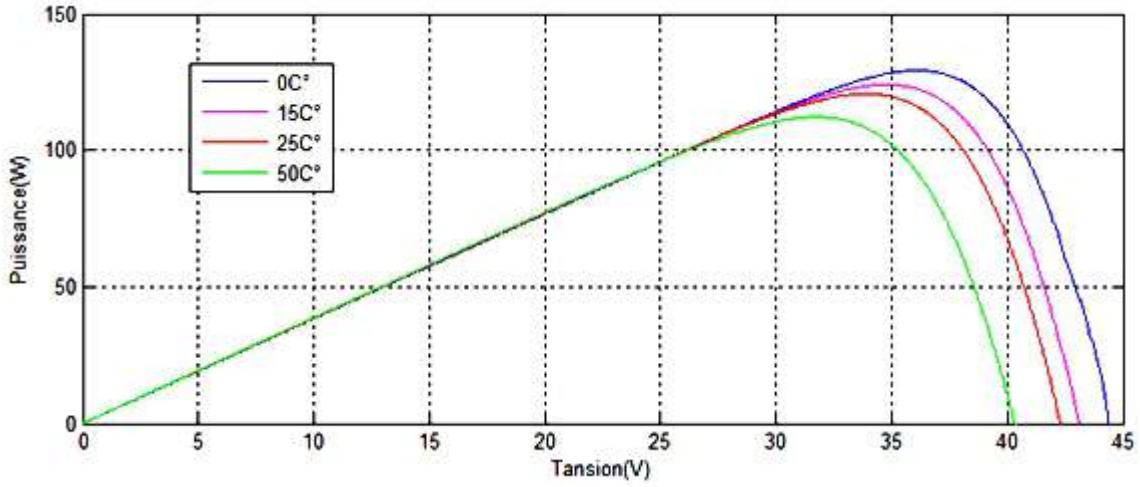


Figure IV.16: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); Pour différente températures et un éclairement G = 1000W/m2

IV.8.1.3 Simulation du PV avec variation de l'irradiation :

Dans ce cas-ci, l'irradiance varie de 400, 600, 800 et 1000 et la température est constante. Le modèle de Simulink sur la figure (IV.3) a été employé. Le résultat sur le Figure (IV.17) est courbe de puissance-tension qui prouve que la puissance maximale de PV diminue lorsque la diminution d'irradiance G. La figure (IV.18) est la courbe courant- tension, qui prouve que le courant diminue de manière significative quand l'irradiance diminue.

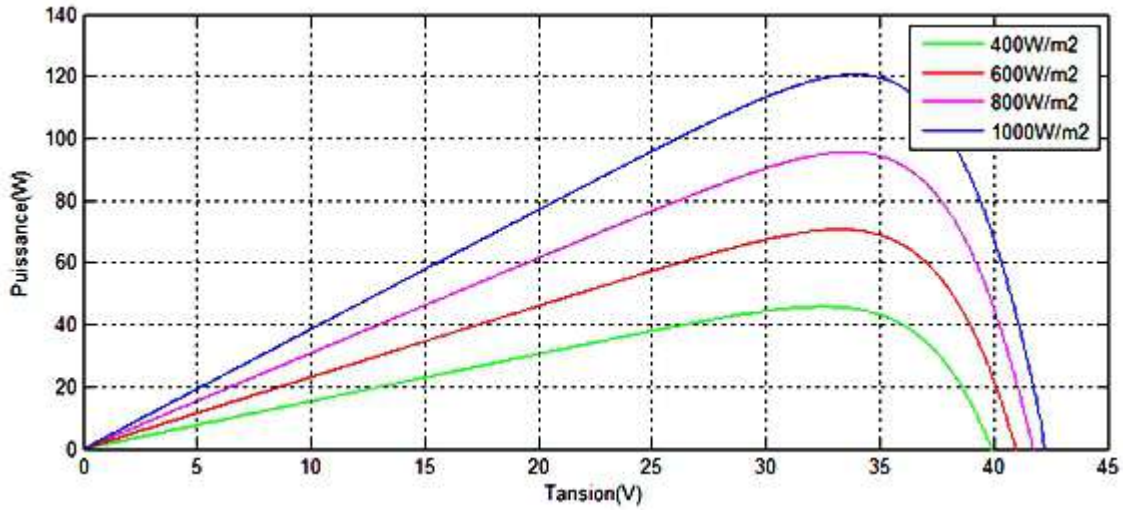


Figure IV.17: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); Pour différents éclairement et une température T=25C°.

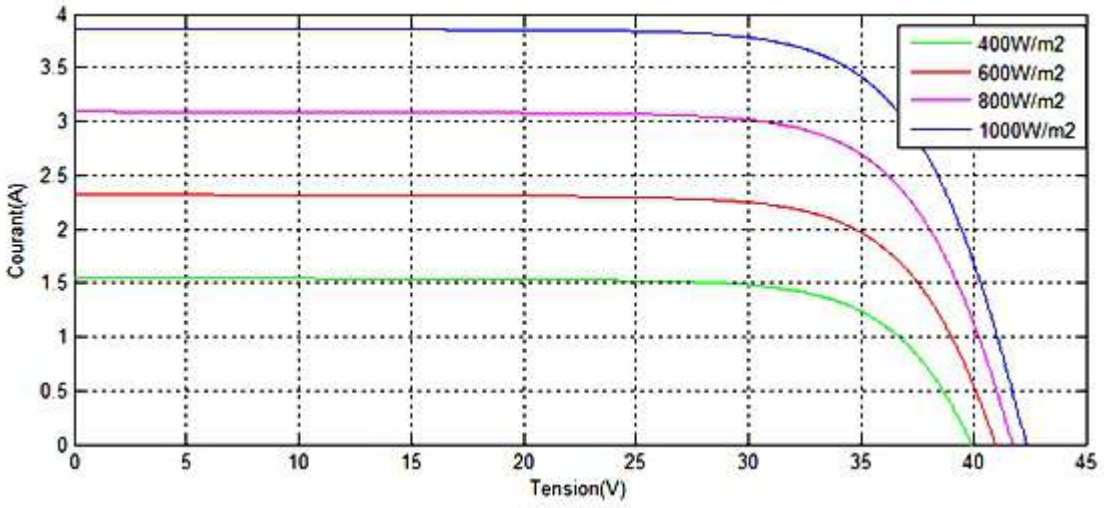


Figure IV.18: Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour déférente éclairement et une T=25C°.

IV.10.Conclusion :

Dans ce chapitre la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m2 température 25°C.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV [8] [6].
- Les entrés utiliser dans les commandes MPPT (P&O, INC et logique floue) c'est le courant Ipv et la tension Vpv , mais les entrés de la commande MPPT basées sur le principe de réseau neurone artificiel c'est l'irradiation G et la temperature T et la sortie c'est toujours le rapport cyclique D

Chapitre V

Simulation des différents techniques MPPT

V.1. Introduction

L'adaptation d'impédance entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge est un problème technologie qui signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur photovoltaïque a la charge .la littérature propose une grande quantité de solution sur l'algorithme de contrôle effectuant une recherche de point de puissance maximale (PPM) lorsque le GPV et la charge sont connectes à travers un convertisseur statique DC-DC (hacheur)[12].

Il y a Plusieurs solutions ont été proposées pour l'algorithme de recherche du PPM Commandant le convertisseur statique ; dans ce chapitre nous élaborons 4 techniques à savoir :

- Algorithme de contrôle de PPM Perturbation et Observation (P&O)
- Algorithme de contrôle de PPM Incrément de conductance (IncCond).
- Algorithme de contrôle de la logique floue (FLC).
- Algorithme de contrôle de réseau de neurone (RNA).

La phase terminale de notre travail a été de passer à la simulation de MPPT.

On a fait à la fin une comparaison entre les quatre commande MPPT (P&O) et (IncCond) et (FLC) et (RNA).

V.2 simulation du système photovoltaïque adapté par les quatre commandes MPPT (P&O, logique floue, INC, RNA) :

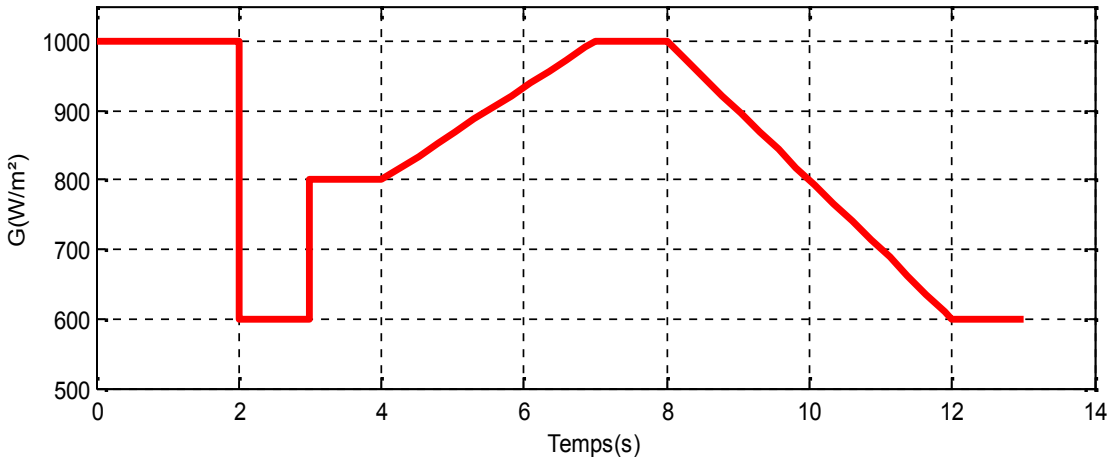
Dans cette simulation, nous nous proposons trois tests différents (à conditions standards, avec un changement d'irradiation, et un changement de température).

- Test1 : A Conditions standards : les Valeurs d'irradiation et la température sont fixées à : G=1000W/m² et T=298°K (25°C).
- Test 2 : A un changement d'irradiation : Dans ce cas la température étant considérée constante (T=298°K (25°C).

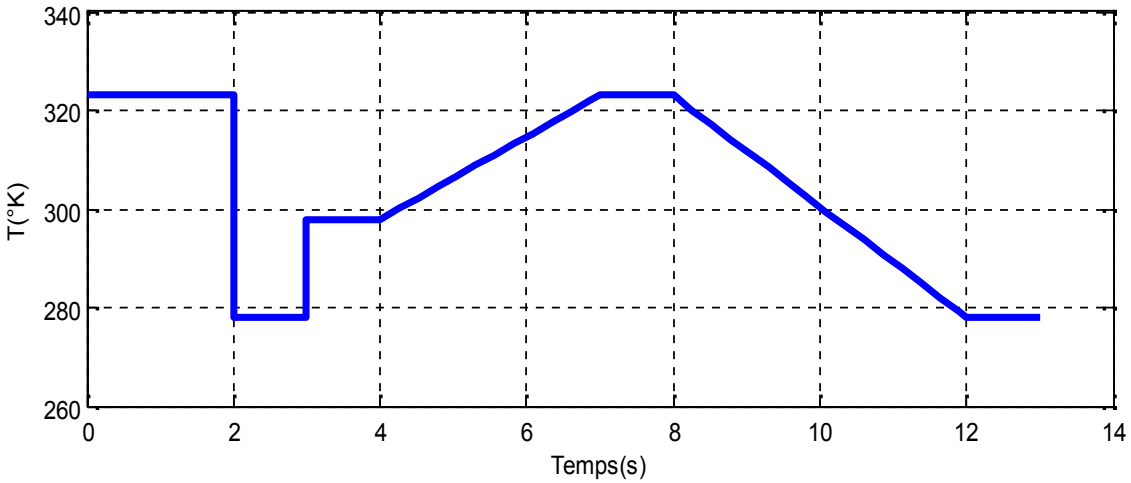
  L'irradiation stabilise à la valeur 1000W/m² pendant 2 secondes comme il est présenté dans la figure V.1.a. puis elle diminue rapidement jusqu'à la valeur 600W/m² et se stabilise dans l'intervalle [2s-3s] et après, elle augmente rapidement jusqu'à la valeur 800W/m² et se stabilise encore dans l'intervalle [3s-4s] puis augmente lentement dans l'intervalle [4s-7s] jusqu'à la valeur 1000W/m² et puis se stabilise à cette valeur dans l'intervalle [7s-8s]

,après elle diminué lentement dans l'intervalle [8s-12s] jusqu'à 600W/m² . A la fin, elle est stable dans l'intervalle [12s-13s] à la valeur 600W/m².

- Test 3 : A un changement de température : Dans cette comportement éclairement standard est G=1000 W/m².
- La température stabilise à la valeur 323°K (50°C) pendant 2 secondes comme il est présenté dans la figure V.1.b. puis elle diminue rapidement jusqu'à la valeur 278°K (5°C) et se stabilise dans l'intervalle [2s-3s] et après, elle augmente rapidement jusqu'à la valeur 298°K (25°C) et se stabilise encore dans l'intervalle [3s-4s] puis augmente lentement dans l'intervalle [4s-7s] jusqu'à la valeur 323°K (50°C) et puis se stabilise dans cette valeur dans l'intervalle [7s-8s] ,après elle diminué lentement dans l'intervalle [8s-12s] jusqu'à 278°K (5°C) . A la fin, elle est stable dans l'intervalle [12s-13s] à la valeur 278°K.



-a- l'irradiation G



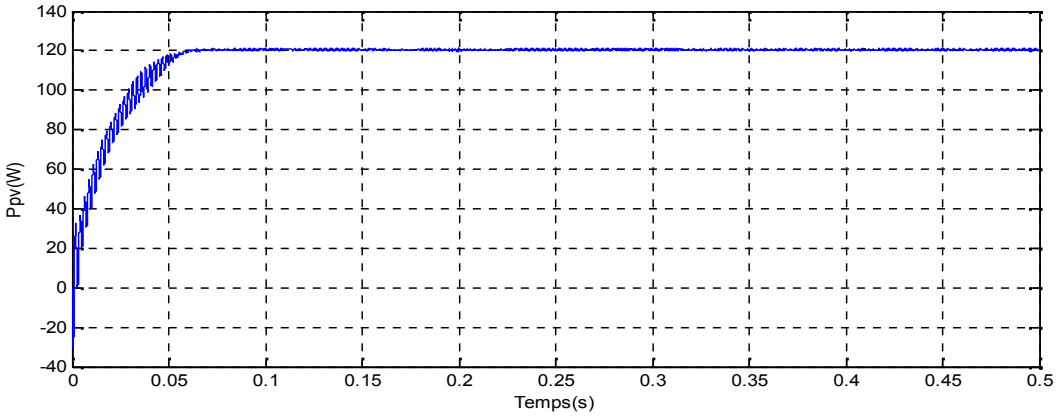
-b- température T

Figure V.1.variation d'irradiation et température

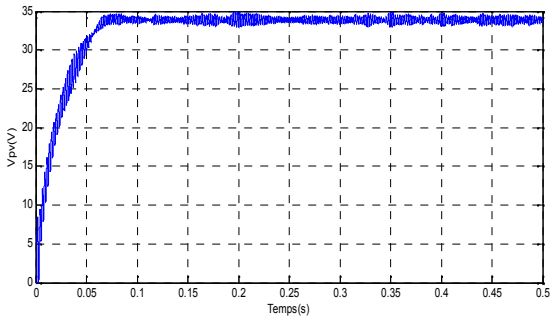
V.2.1 simulation de l'algorithme P&O :

V.2.1.1 conditions standards ($T=25^0$ C & $G=1000W/m^2$) :

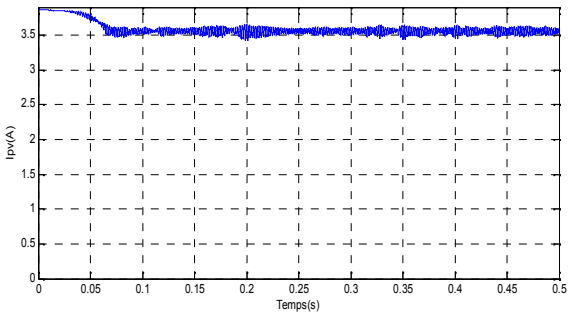
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « Perturbation et observation » représentent par les figures suivant:



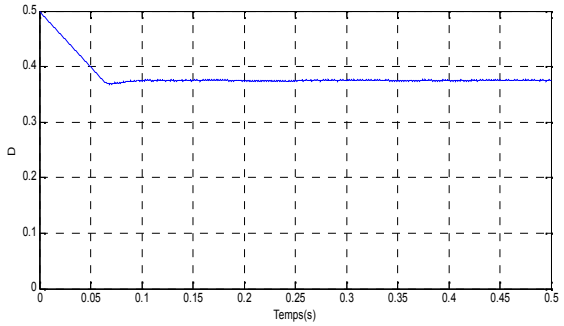
a-Puissance (PV)



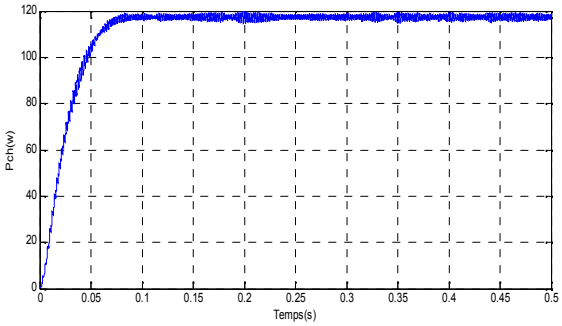
b-Tension (PV)



c- Courant (PV)



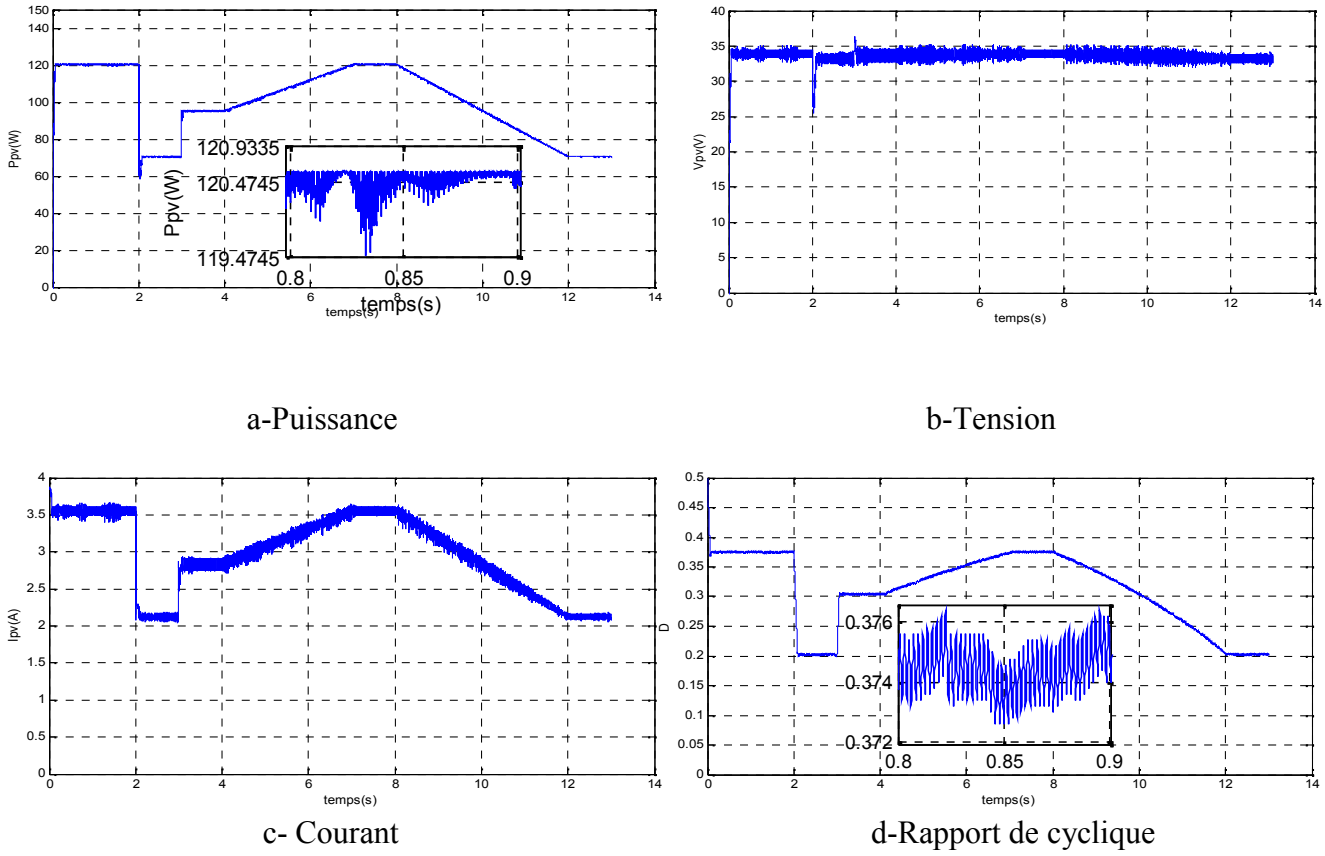
d-Rapport de cyclique.



e- P charges (W).

Figure V.2 : réponse de l'algorithme P&O dans les conditions standards (T=25°C & G=1000W/m^2)

V.2.1.2. Comportement de la méthode à un changement d'irradiation :



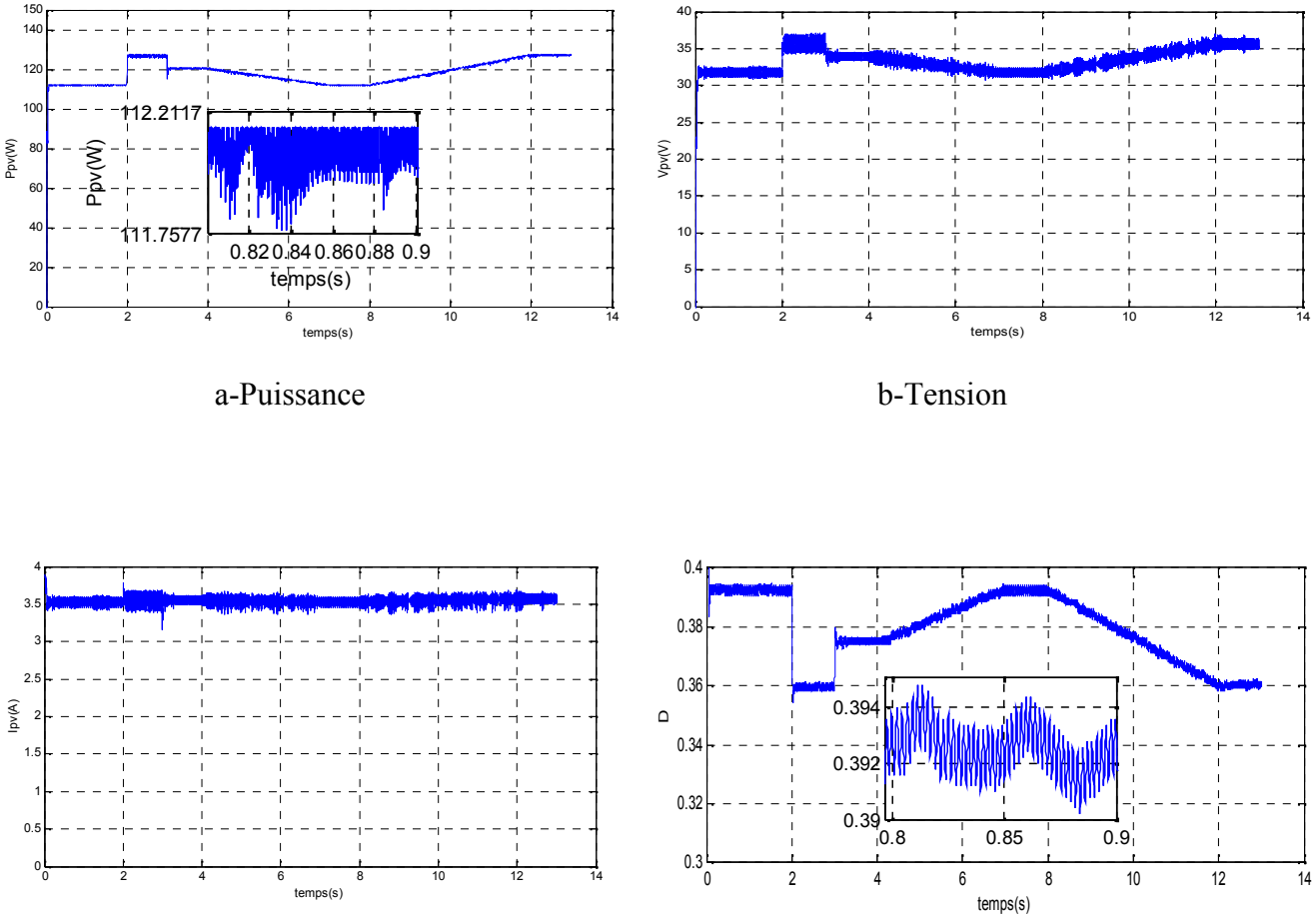
a-Puissance b-Tension

c- Courant d-Rapport de cyclique

Figure V.3.Réponse du contrôle P&O pour une variation d'irradiation dans *(T=25C°).*

Pour l'algorithme P&O, nous remarquons 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.

V.2.1.3 Comportement de la méthode à un changement de température :



a-Puissance b-Tension

c- Courant d-Rapport cyclique

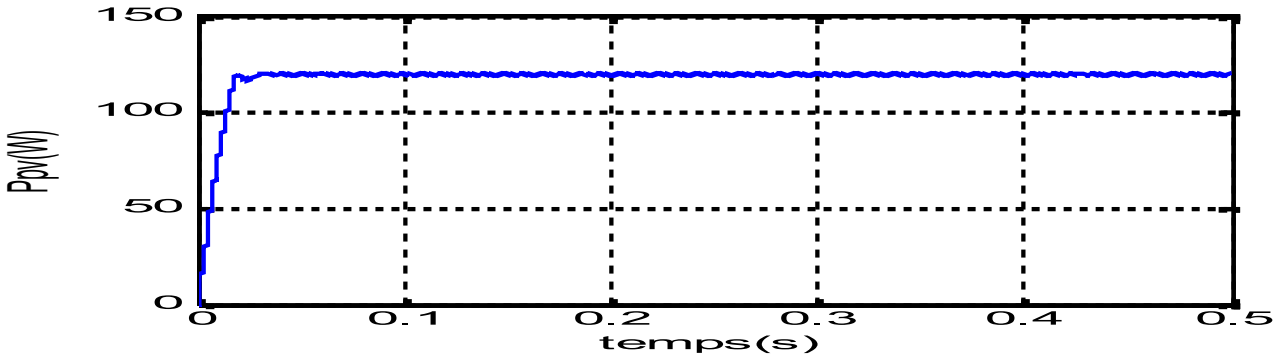
Figure V.4.Réponse du contrôle P&O pour une variation de température pour (G=1000W/m²)

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 autour du PPM.

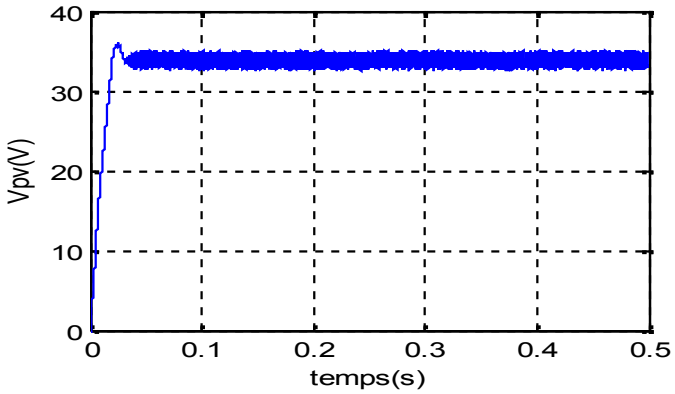
V.2.2 Simulation de l'algorithme (IncCond)

V.2.2.1 conditions standards (T=25^0 C & G=1000W/m^2) :

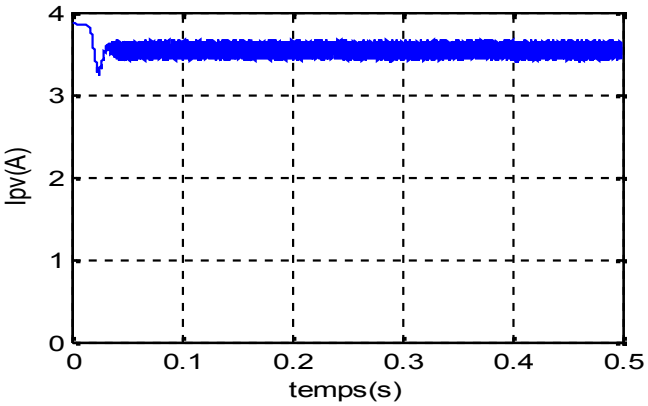
Les figures suivantes représentent l'algorithme ***d'incrément de conductance*** lors du fonctionnement du générateur photovoltaïque sous les conditions standards :



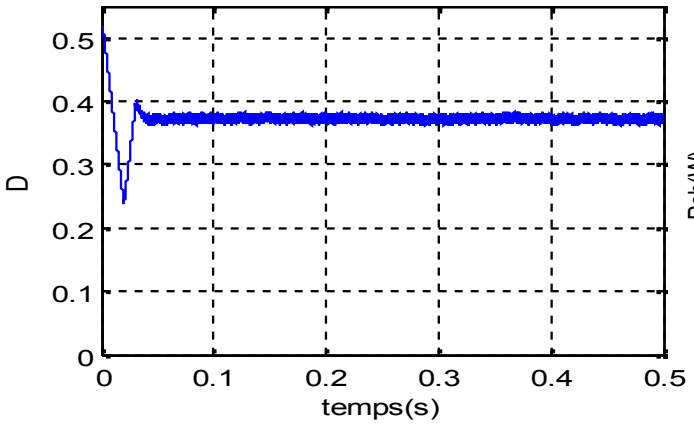
a-Puissance



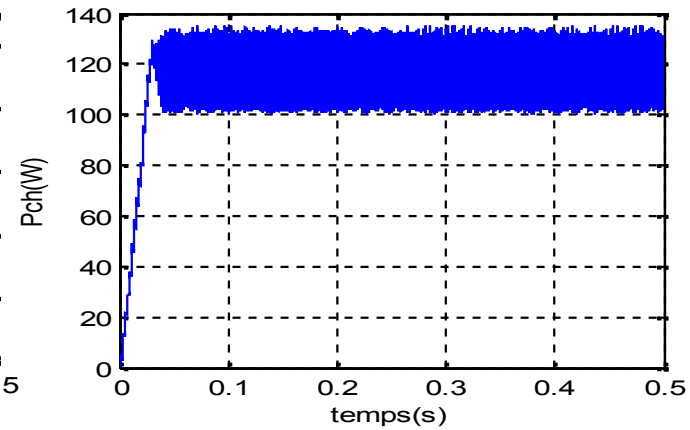
b-Tension



c- Courant



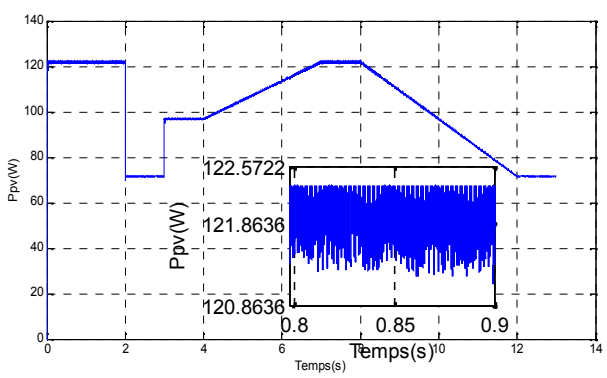
d-Rapport de cyclique



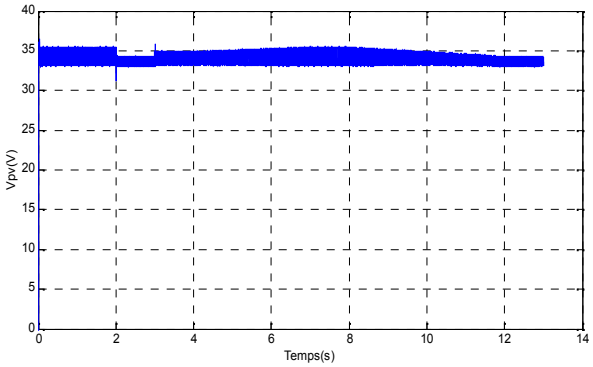
e- P charge (W)

Figure V.5 : Réponse du contrôle mode ***d'incrément de conductance*** dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m²)

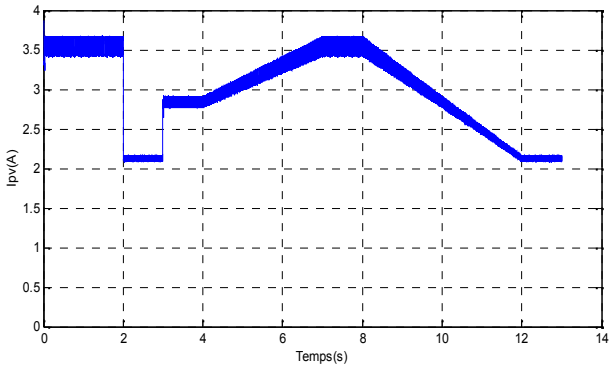
V.2.2.2 Comportement de la méthode à un changement d'irradiation :



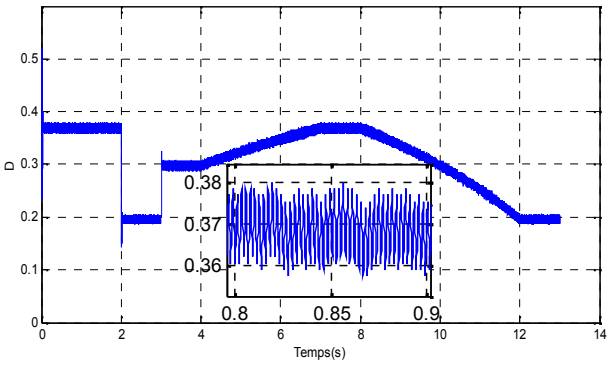
a-Puissance



b-Tension



c – Courant

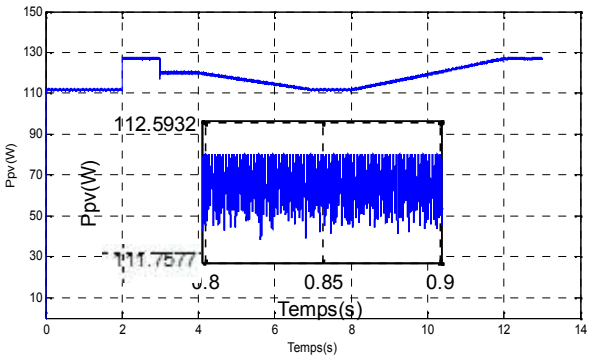


d-Rapport cyclique

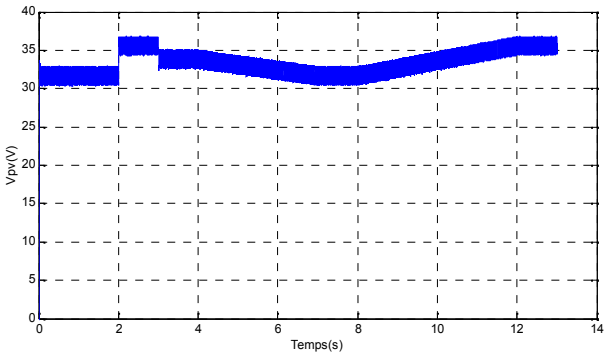
Figure V.6 : Réponse du contrôle mode d'incrément de conductance pour une variation d'irradiation pour (T=25°C)

Pour l'algorithme (IncCond), nous remarquons 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, et il y 'a aussi des oscillations autour du PPM.

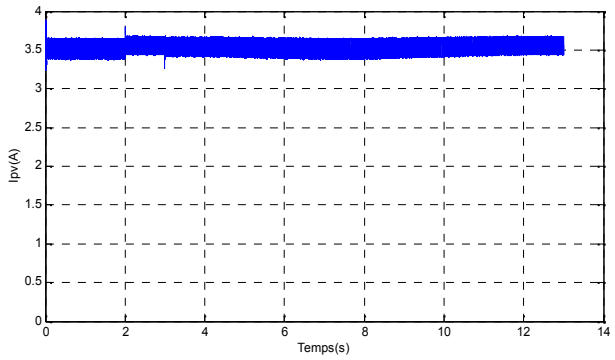
V.2.2.3 Comportement de la méthode a un changement de température :



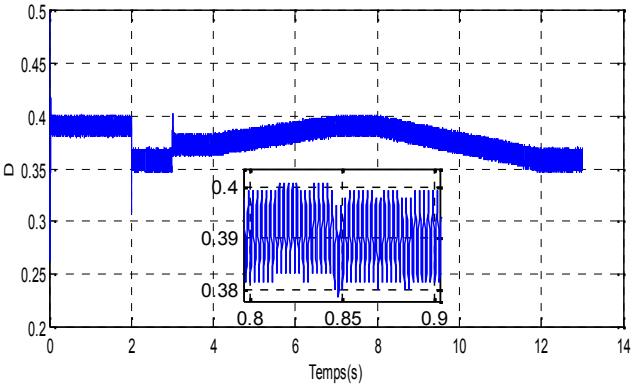
a-Puissance



b-Tension



c- Courant



d-Rapport cyclique

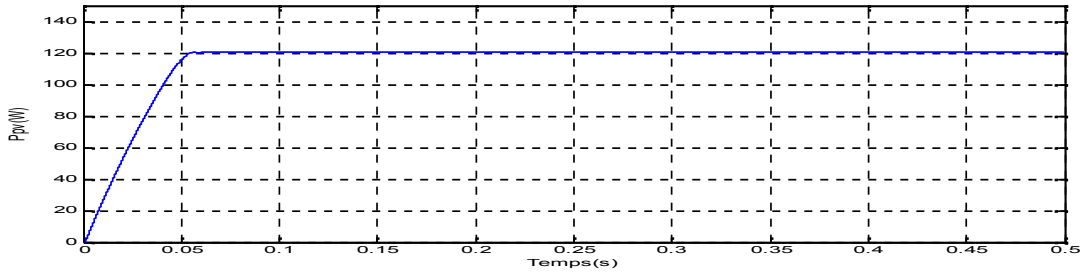
Figure V.7.Réponse du contrôle mode d'incrément de conductance pour une variation de température pour (G=1000W/m²)

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

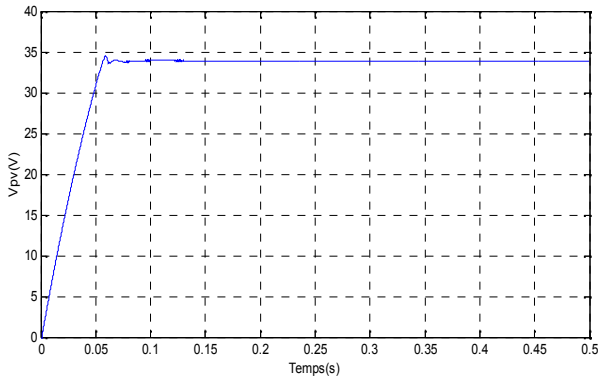
V.2.3 simulation de l'algorithme de logique floue

V.2.3.1 conditions standards (T=25^0 C & G=1000W/m^2) :

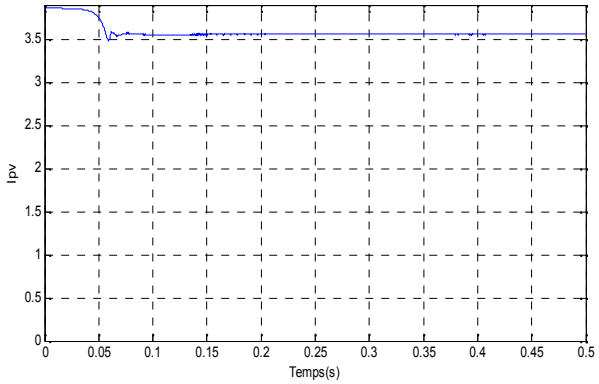
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «logique floue» représentent par les figures suivant:



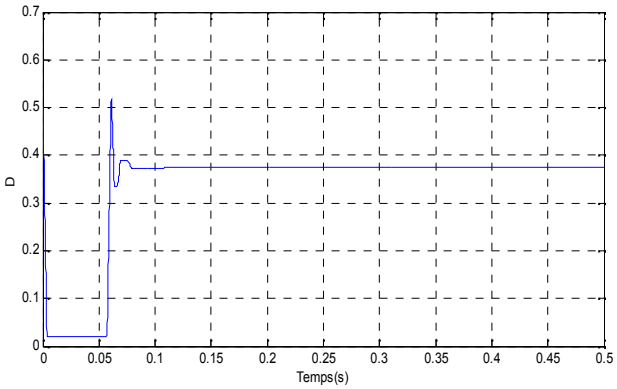
a-Puissance



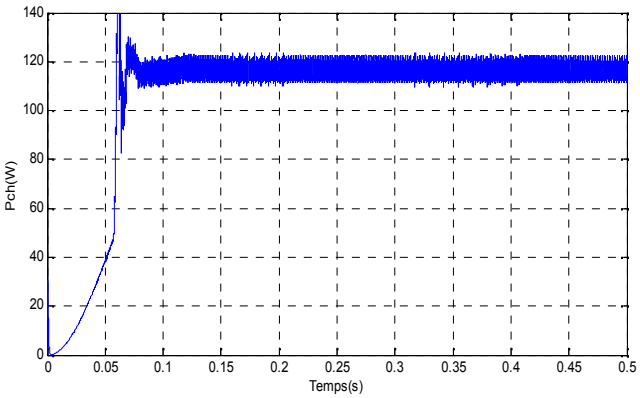
b-Tension



c- Courant



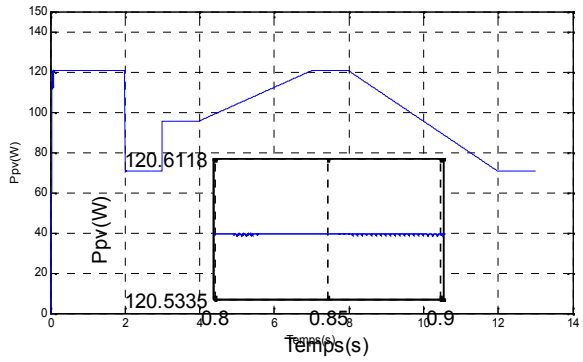
d-Rapport de cyclique



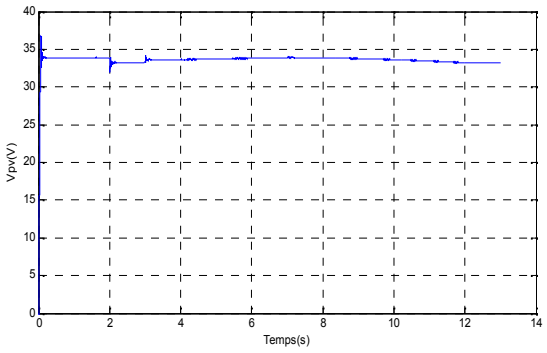
e- P charge (W)

Figure V.8: réponse de l'algorithme logique floue dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m^2)

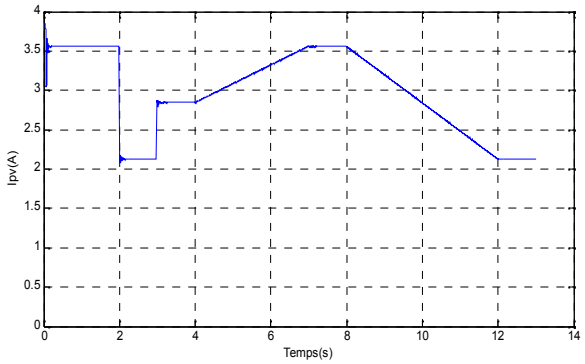
V.2.3.2 Comportement de la méthode à un changement d'irradiation



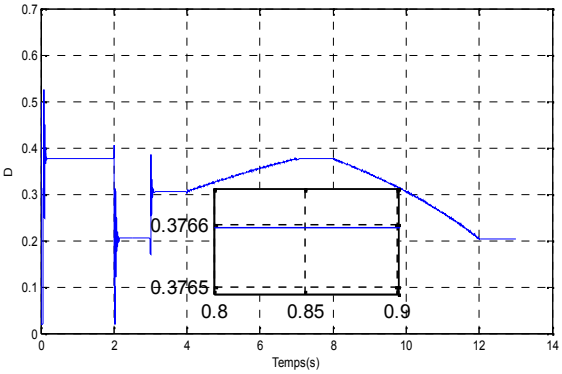
a-Puissance



b-Tension



c- Courant

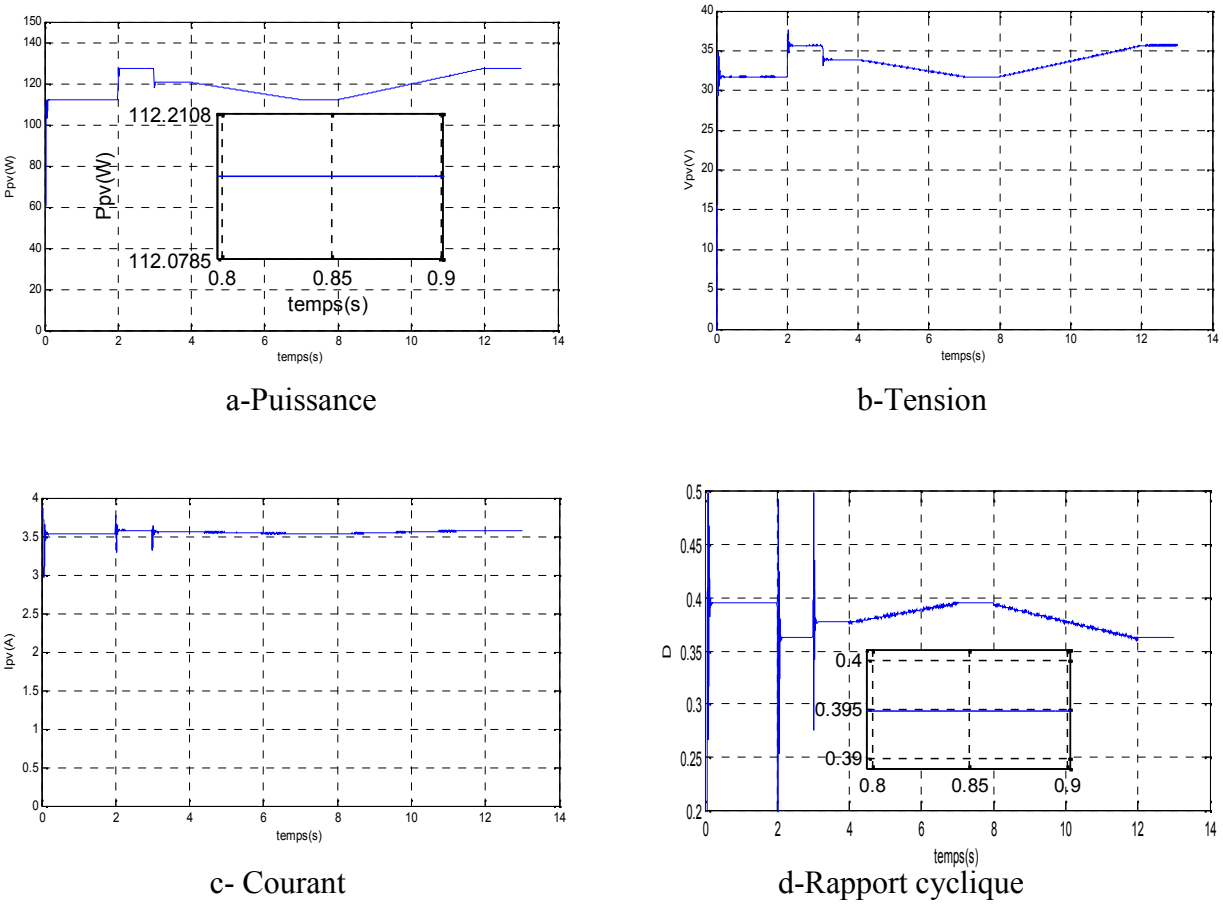


d-Rapport cyclique

Figure V.9 .Réponse du contrôle de la logique floue pour une variation d'irradiation dans (T=25C°).

On remarque que l'algorithme de la logique floue suit 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.

V.2.3.3 Comportement de la méthode à un changement de température



a-Puissance b-Tension

c- Courant d-Rapport cyclique

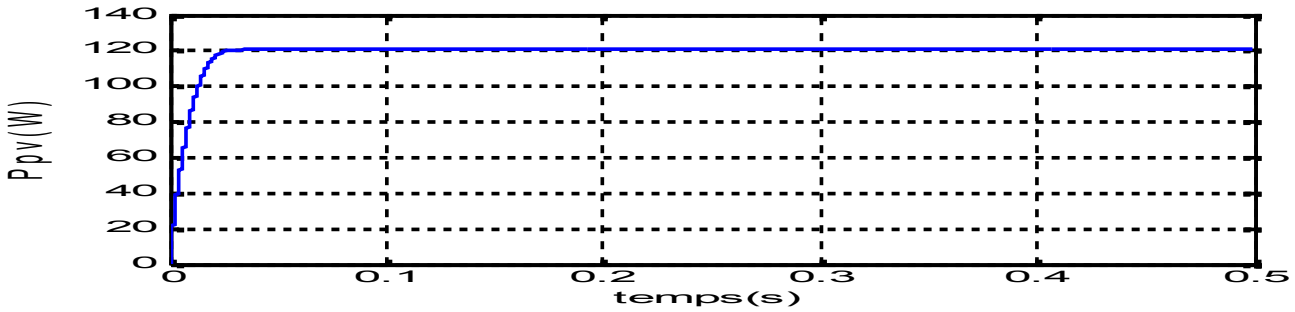
Figure V.10.Réponse du contrôle logique floue pour une variation de température pour (G=1000W/m²)

On remarque 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).

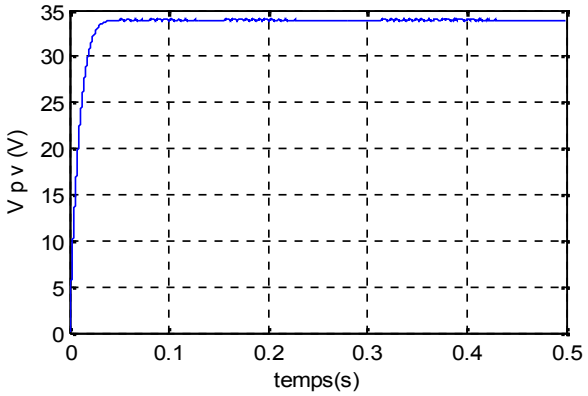
V.2.4 simulation de l'algorithme de RNA :

V.2.4 .1 conditions standards (T=25^0 C & G=1000W/m^2) :

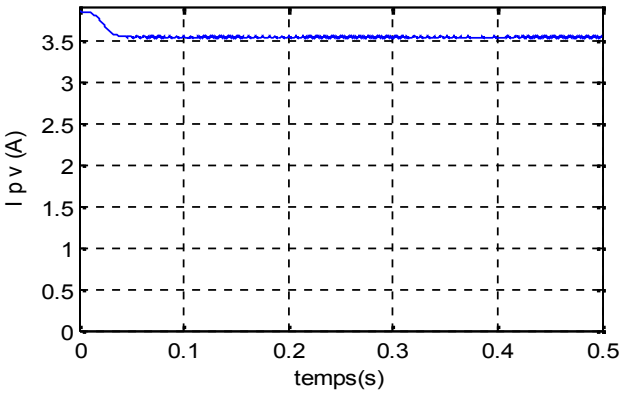
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « RNA » représentent par les figures suivant:



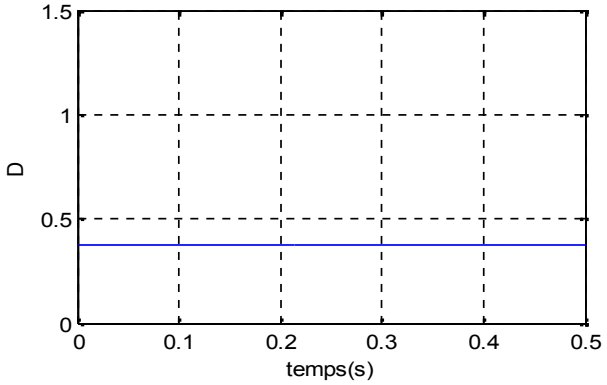
a-Puissance



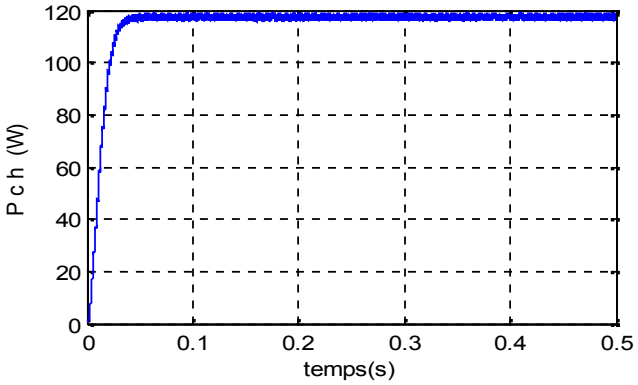
b-Tension



c- Courant



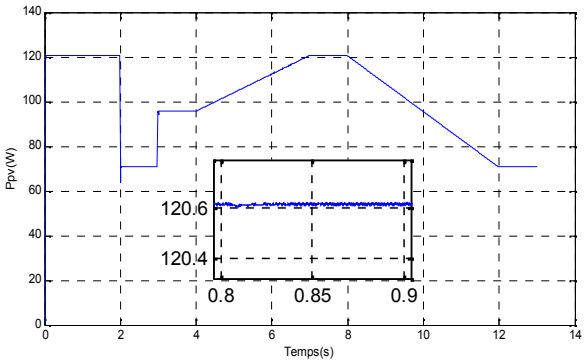
d-Rapport de cyclique



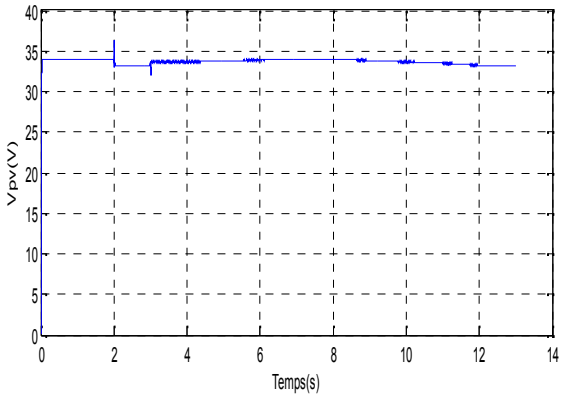
e- P charges (W)

Figure V.11: réponse de l'algorithme de logique floue dans les conditions standards (T=25ºC & G=1000W/m^2).

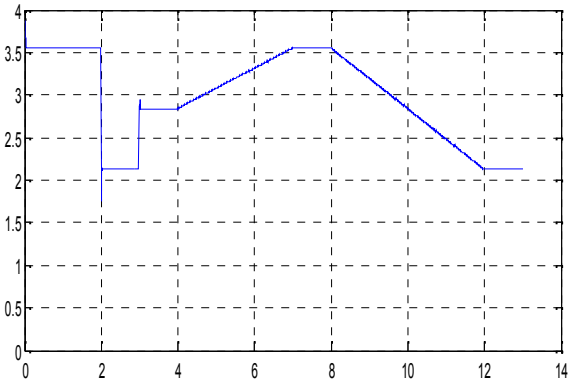
V.2.4.2 Comportement de la méthode à un changement d'irradiation :



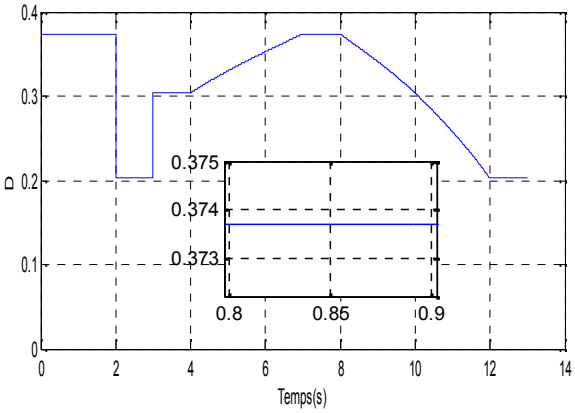
a-Puissance



b-Tension



c- Courant

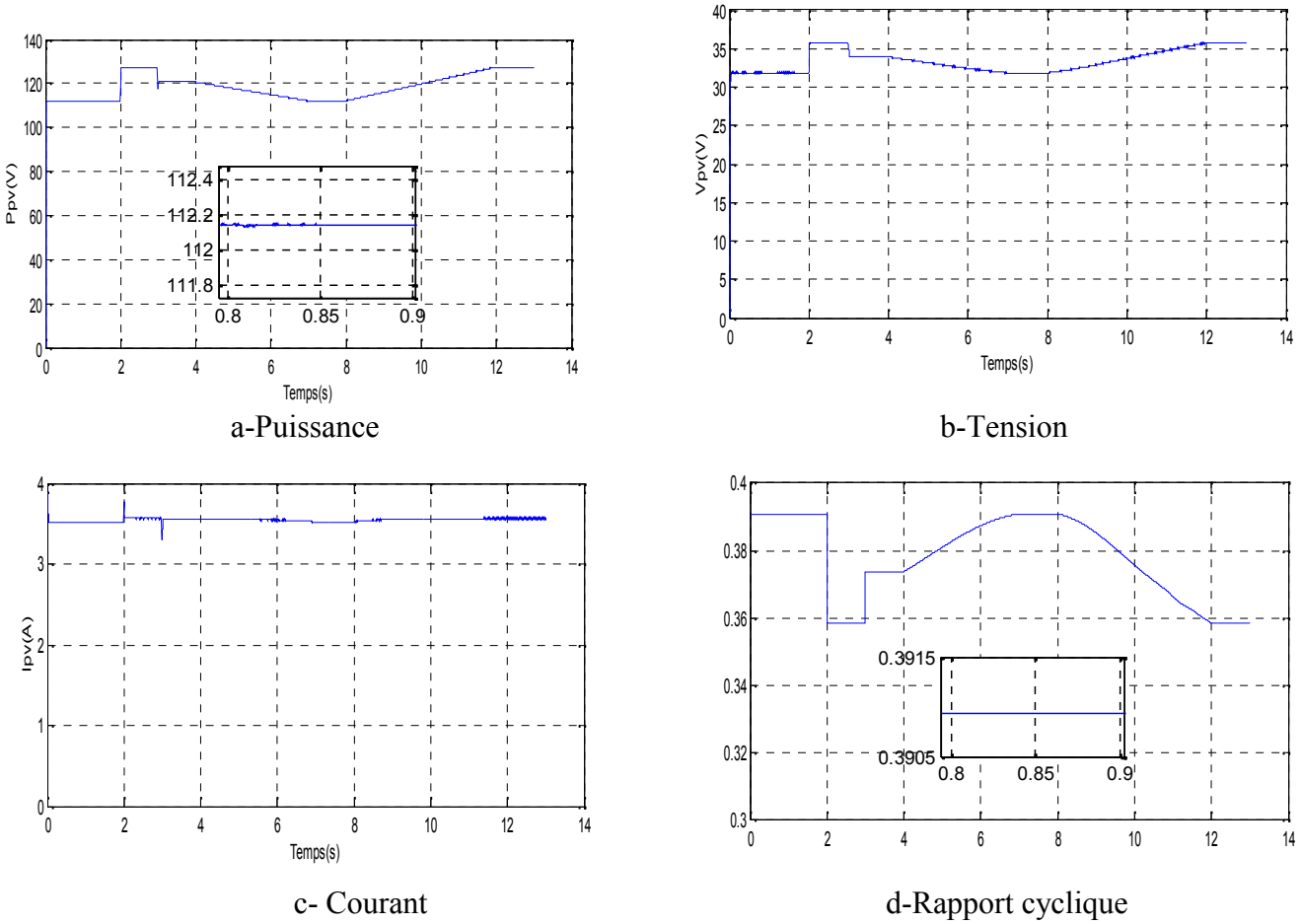


d-Rapport cyclique

Figure V.12 .Réponse du contrôle RNA pour une variation d'irradiation dans (T=25C°).

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

V.2.4.3 Comportement de la méthode à un changement de température



a-Puissance

b-Tension

c- Courant

d-Rapport cyclique

Figure V.13.Réponse du contrôle RNA pour une variation de température pour (G=1000W/m²)

Toujours l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV causé par une diminution de la température *T* si est l'éclairement est fixe. Et il donne aussi des résultats stables avec une très bonne performance

V.3. Etude comparative de la puissance entre les quatre contrôleurs :

Les quatre model doivent être simulés dans des conditions quasiment similaires pour pouvoir faire des comparaisons de performances des étages d'adaptation et en déduire s'il y a amélioration des performances.

V.3.1. Simulation de les quatre contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable):

On fait la comparaison entre les quatre contrôleurs au niveau de la puissance produite par le système PV avec un changement d'irradiation G (stable, rapide et lent) a température fixe T=25°C

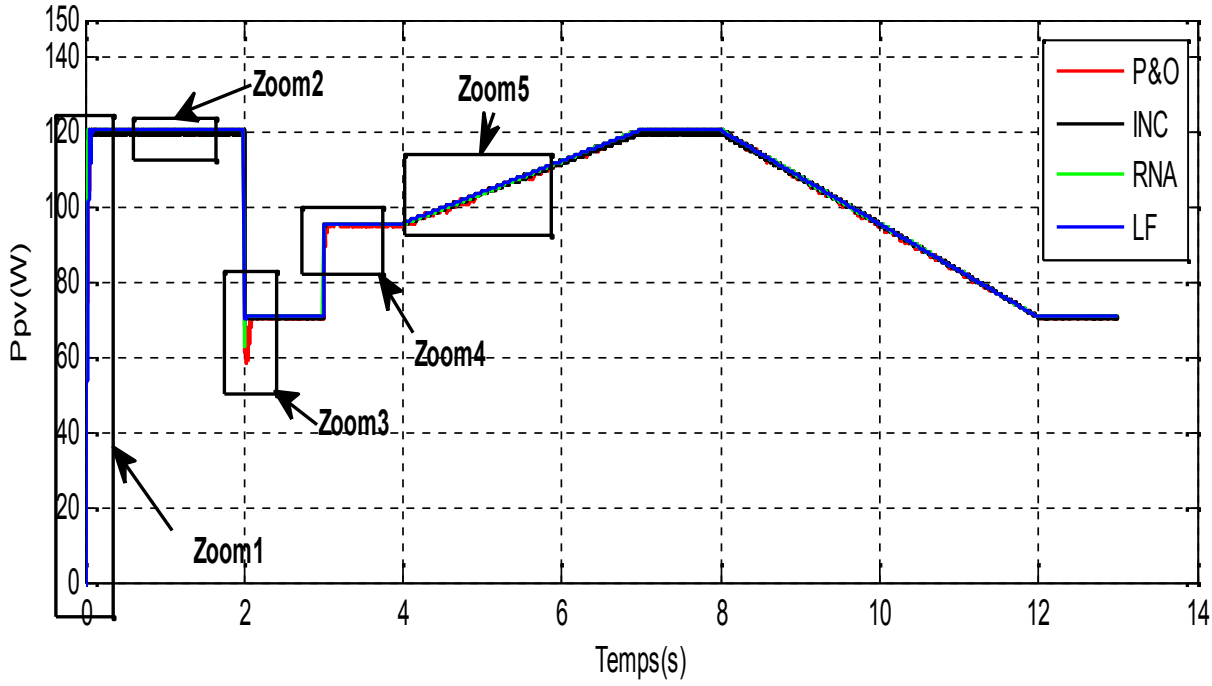


Figure V.14.variation de la puissance des quatre contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable).

Pour ces quatre contrôleurs, nous remarquons 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.

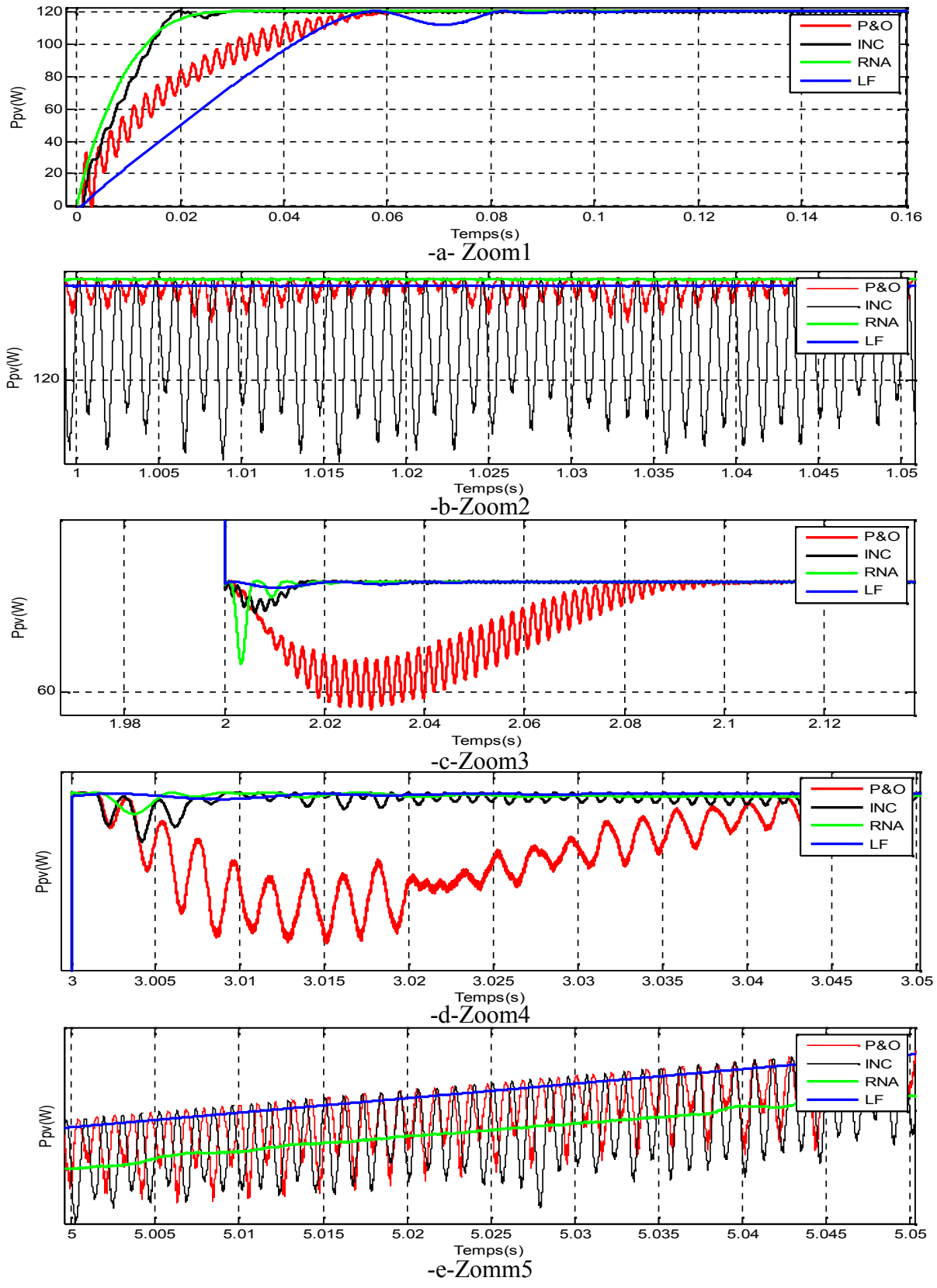


Figure V.15.Zoom sur la variation de la puissance des quatre contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable).

- On a vu dans la Figure V.14-a- que le temps de convergence ou temps de réponse du contrôleur « RNA » est plus rapide à 0.03 s suivie par « INC » à 0.04s puis le contrôle "P&O" à 0.06s ensuite le contrôleur « logique floue » avec un lent réponse à 0.09s .

- Dans la Figure V.14-b- les contrôleurs "P&O" et " IncCond" présentes des oscillations autour du PPM, ils ne présentent pas assez de précision et par la suite le système ne fonctionne pas toujours au point optimal exactement. tandis que les contrôleurs "Floue" et " RNA " restent assez constants.
- A partir de la Figure V.14-c- lorsque le changement rapide de l'irradiation G (à G= 800W/m²) Nous remarquons que la commande MPPT floue suivi rapidement le PPM suivie par (IncCond) et (RNA) Puis le P&O avec une réponse lent.
- Pour le changement rapide de l'irradiation G (à G= 800W/m²) on a vu que le temps de convergence ou temps de réponse des contrôleurs "Flou et RNA" est plus rapide que celui du contrôleur "IncCond" et le temps de réponse du contrôleur P&O il est très lent par rapport les autres. (Voir la Figure V.14-d-).
- Dans la Figure V.14-e- lorsque le changement lent d'irradiation G on a le contrôleur Floue toujours qui donne le meilleur résultat puis le RNA qui suivi le PPM avec des résultats stables et très bonne performance, tandis que les contrôleurs P&O et IncCond ils suivent avec des oscillations autour du PPM.

V.4. Etude comparative de l'énergie entre les contrôleurs MPPT :

Nous allons étudier l'énergie produite par le panneau photovoltaïque en appliquant les quatre contrôleurs MPPT, à partir de la figure V.14 l'étude sera divisée en cinq intervalles de temps.

temps(s) / MPPT	t=[0 ,0.15]	t=[1 , 1.5]	t=[2 ,2.1]	t=[3 ,3.05]	t=[5 , 5.5]
P&O	15.9108	60.2541	6.5886	4.6658	52.9506
IncCond	16.9879	60.0873	7.0426	4.7686	52.8901
RNA	17.1923	60.3048	7.0439	4.7749	52.9249
LF	14.9328	60.2849	7.0577	4.7778	53.0100

- Dans le premier intervalle (t= [0s, 0.15s]) le meilleure contrôleur qui nous a donné la plus grande production d'énergie c'est le « RNA », suivie par les contrôleurs « P&O » et « INC ». puis le contrôleur « FLC » qu'il est le plus basse à cause de son temps réponse lent.

-pour le deuxième intervalle (t= [1s, 1.5s]) la meilleure valeur d'énergie est produite par le contrôleur « RNA », suivie par « FLC » puis les contrôleurs « P&O » et « INC » qu'ils sont les plus basse.

-le troisième intervalle (t= [2s, 2.1s]) lorsque le changement rapide l'irradiation G, le contrôleur « FLC » nous a donné le meilleure résultat au niveau de la production d'énergie à cause de son rapidité de réponse suivie par les contrôleurs « RNA » et « INC » puis le contrôleur « P&O ».

-pour le quatrième intervalle (t= [3s ,3.05s]) reste toujours le contrôleur « FLC » donne le meilleur résultat et le « P&O » est le dernier.

-le cinquième intervalle (t= [5s, 5.05s]) lorsque le changement lent l'irradiation G le contrôleur « FLC » aussi nous a donné le meilleure résultat au niveau de la production d'énergie à cause de son stabilité suivie par les contrôleurs « RNA » et « INC » puis le contrôleur « P&O ».

V.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé les quatre algorithmes MPPT (P&O, IndCond, FLC, RNA).

Les résultats des simulations montrent que l'algorithme 'INC' 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 montre un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

L'objectif de ce mémoire est d'améliorer les performances et le rendement d'un système photovoltaïque en faisant appel à un algorithme spécifique. nous avons décrit les principaux éléments du système PV, adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi que le générateur photovoltaïque et leurs performances.

La modélisation de tout le système photovoltaïque étudié est établie facilitant son analyse. L'interface de puissance représentée par un convertisseur à commutation est profondément étudiée.

Et on a vu dans la deuxième étape quelques topologies de base des convertisseurs continus-continus (DC-DC) utilisés dans les systèmes photovoltaïques.On a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.on a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance,comme la méthode de Perturbation et Observation et Incrémentation de Conductance. Le P&O et IndCond, dite classiques,sont étudiées dans ce travail à cause de leur simplicité, et elles exigent seulement les mesures de la tension et du courant du panneau PV.

En suite, nous avons rappelé le principe de deux autre algorithmes MPPT,Logique floue et réseaux de RNA,qui sont basées sur le principe de l'intelligence artificielle. Enfin, nous avons terminé par une simulation des différents algorithmes.

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 du module PV. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST).
- ✓ Parmi tous ces algorithmes, le 'P&O' et 'IncCond' sont largement utilisés, mais la commande basée sur la logique floue et RNA montre un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.

- ✓ La commande MPPT soit classique (P&O, IncCond) ,Floue ou RNA permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de

faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue et MPPT RNA conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse , de l'erreur en régime permanent et pas d'ondulation dans la puissance générée par le panneau photovoltaïque).

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporter une contribution à l'applicatoion des contrôleurs à base de l'intelegence artificielle sur un système photovoltaïque.Et on espère l'implémentation de ce command MPPT sur une carte electronique pour validés avec un système photovoltaique réel.

L'annexe 1 : paramètres du convertisseur boost :

Les paramètres du convertisseur boost est :

- Vpv : 33.7 V
- V ch : 54V
- Puissance maximale PV : 120 W
- Fs : 10 KHz
- Maximum inducteur current ripple 10 %

L'équation de calcul de l'inducteur L

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

l'equation de calcul de rapport cyclique

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

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

$$D = 0.375$$

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

$$I_{ch} = \frac{120}{54} = 2.22\text{A}$$

La résistance charge est

$$R_{ch} = \frac{54}{2.22} = 24.3\ \text{ohm}$$

L'inducteur L est

$$L \geq \frac{54 \times 0.375 \times (1-0.375)}{10000 \times 2 \times 3.56 \times 0.1}$$

$$L \geq 444\ \mu H$$

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

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

$$C_{in} \geq \frac{2.22 \times 0.37592}{0.02 \times (1-0.375) \times 10000 \times 33.7}$$

$$C_{in} \geq 78.6\ \mu F$$

La capacité de sortie C_{out} utilisée la relation

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

$$C_{out} \geq \frac{540 \times 0.375}{10000 \times 0.54 \times 24.3}$$

$$C_{out} \geq 154.69\ \mu F$$

L'annexe 2: Data sheet BP MSX120

bp solar

BP MSX 120

120-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

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

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

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

Proven Materials and Construction

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

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



Weatherproof Connectors

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

High-Capacity Versatile Junction Box

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



Bronze Anodized Universal Frame

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

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

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

Limited Warranties

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

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

Individually Tested and Labeled

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



BP MSX 120

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

TUV

©2002 BP Solar Global Marketing

01-4003-2 2/02

Quality and Safety

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

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

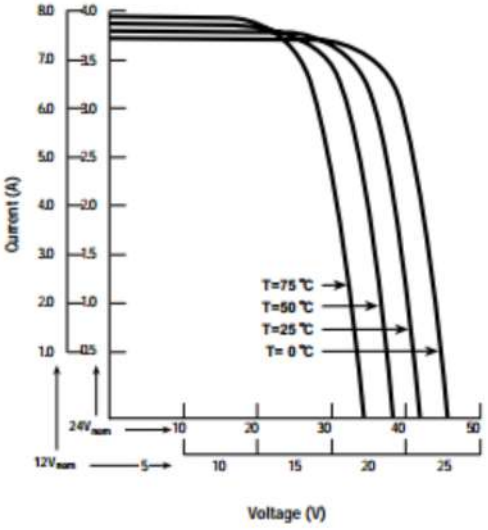
Electrical Characteristics[1]

	MSX 120	MSX 110[4]
Maximum power (P_{max})[2]	120W	110W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	33.7V	33.6V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.56A	3.3A
Minimum P_{max}	114W	105W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.6A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.1V	41.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[3]	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

Notes

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

MSX 120 I-V Curves



BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1] H. Abbes . H. Abid . K. Loukil « *Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système Photovoltaïque* » Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014).

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

[3] N.F. BENHADDOUCHE « *La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite* » mémoire de magister, université de Tlemcen, 2014.

[4] M.A.chermitti. m.moukliomar, «*conception et Réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure Gestion énergétique»,* Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[5] Villalva, M.G., Gazoli, J.R. and Filho, E.R.; « *Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays,* » Power Electronics Conference, IEEE 2009. COBEP '09. Brazilian, December 2009.

[6] BENSACI-Wafa *,« Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT »* ,mémoire de master en génie électrique, université kasdimerbah- ourgla, 2012.

[7] F. Chekired, *« Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA»*, mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[8] A. BETTACHE, A .YAHIAOUI « *Application de la technique du Mode Glissant pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque »* mémoire de master, université DR. YAHIA FARES DE MEDEA,2014.

[9] Yassine LASMI « *Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes »* Mémoire de Magistère, Université Sétif -1 –Algérie ,2013.

[10] V. Badescu, « *Single Optimization Procedure for Silicon-Based Solar Cell Interconnection in a Series-Parallel PV Module*', Energy Conversion and Management » Vol. 47, N°9-10, pp. 1146 - 1158, 2006.

[11] A. Y. Ould Mohamed « *Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque* **»** Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008).

[12] H . Kamelia « *Modalisation d' une cellule photovoltaïque* **»** Mémoire de Magistère ,Université Tizi-Ouzou, Algérie,2012.

Bibliographie

[13] Z. Bendjellouli « *contribution de Modalisation d'une cellule solaire »* Mémoire de Magistère, université de bechare.*,Algerie,2009.*

[14] A. NAIMI ; A. ZAOUI « *Etude des techniques MPPT pour les sources photovoltaïques. Application à une cascade source photovoltaïque onduleur multiniveaux »* Mémoire de Magistère Université Dr YAHIA FARES De Médéa.2011.

[15] A.f Filipov , *« Differential equation with discontinuous right-hand side»* .Amer.Mat Soc .Trans62p: 199-231, 1960.

[16] Dalila BERIBER. « *Optimisation et gestion d'Energie de Système de production Photovoltaïque-Eolienne avec stockage*», thèse de Doctorat, option : Instrumentation Electronique. USTHB 2010.

[17] F.boujema, *« commande par mode Glissant, applications aux convertisseurs Electriques»,* Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.

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

[19] Z. Ayache A. Bendaoud, H. Slimani « *Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue »*Université Djilali Liabès Sidi Bel Abbès 22000, Algérie.2013.

[20] M. Amarouayache « *Contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque »* Thèse de Doctorat d'état, université de constantine1 Algérie, 2014.

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

[22] M.Hatti, « *Controlleur Flou pour la poursuite des points de puissance maximum d'un système photovoltaique*», JCGE'08, Lyon, France, Décembre 2008.

[23] F. Rakotomananandro. «*Study of Photovoltaic System*», thèse de Master. Graduate School of The Ohio State University, 2011.

[24] A.Elgharbi D.Mezghani A. Mami « *A MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR A PV SYSTEM »* International Journal of Advances in Engineering & Technology, Nov. 2012.