REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**

**F**aculté de **T**echnologie

**D**épartement du **G**énie **E**lectrique

## Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energies renouvelables

## Thème :

# Commande d'un système photovoltaïque à batterie par mppt

Présentés par :

**BEN AICHA MUSTAFA**
**GUENDOUZI ADEL**

le jury composé de

**Dr Gacemi Abderrazak** ……..…….. **Président**

**Dr Kara Reda** ……..……. **Examinateur**

**Dr Chiba Younes** …….…… **Examinateur**

**Dr Sofi Naima** …….. **Encadreur**

**Promotion 2022**

# *Remerciement*

Avant tout, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce a lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à notre encadreur DR SOFI NAIMA qui nous a soutenus tout au long de ce travail. Sa compétence et sa disponibilité ont été pour nous un soutien certain pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions également DR. ABU DURAH SALAM et les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail. Notre remerciement aussi à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant les années du cursus.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements à nos parents, à nos frères et sœurs, à nos amis et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de notre travail.

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....01

CHAPITRE I : Généralités sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction..... 04
I.2.Les ressources des énergies renouvelables..... 05
I. 2.2.Définition d'énergie renouvelable..... 05
I.3.L'énergie solaire..... 05
I.3.1.Rayonnement solaire..... 06
I.3.2.Spectre du rayonnement..... 07
I.3.3.Durée d'insolation..... 08
I.4.Description des éléments d'un système photovoltaïque..... 08
I.4.1.Cellule photovoltaïque..... 08
I.4.1.1. Historique d'une Cellule photovoltaïque ..... 08
I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque..... 09
I.4.2.L'effet photovoltaïque..... 09
I.4.2.1. Définition..... 09
I.5. Module photovoltaïque..... 11
I.5.1.Caractéristiques d'un module..... 11
I.6. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque..... 12
I.6.1. Cas d'une cellule idéale..... 12
I.6.2. Cas d'une cellule réelle..... 13
I.6.3. Influence de l'éclairement..... 15
I.6.4. Influence de la température..... 17
I.7.Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)..... 18
I.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle..... 18
I.7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série..... 19
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie PV ..... 22
I.8.1. Inconvénients ..... 22
I.8.2. Avantages..... 22
I.9. Conclusion ..... 23

# CHAPITRE II : Modélisation du générateur photovoltaïque


II.1. Introduction.....25

II.2. Modèle d'une cellule solaire idéale.....25

II.3. Modèle d'une cellule solaire réelle.....26

II. 3. 1. Modèle à une diode (à une seule exponentielle).....26

II .3.2. Modèle à une diode sans résistance shunt.....27

II. 3.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles).....28

II. 3.4. Modèle à deux diodes sans résistance shunt.....28

II.4. Caractéristique I-V.....30

II.5. Constitution d'un module photovoltaïque.....30

II.6. Caractéristique d'un GPV élémentaire.....32

II.7. Protection d'un GPV élémentaire.....33

II.8. Modélisation du module photovoltaïque.....33

II.8.1. Influence de l'éclairement et la température.....36

II.8.2. Recherche du point optimal de fonctionnement.....38

II.8.3. Influence de la résistance série.....39

II.8.4. Influence du facteur de qualité.....40

II.9. Conclusion.....40


# CHAPITRE III: Simulation de la commande MPPT du GPV


III. 1. Introduction.....42

III. 2. Principe de fonctionnement de MPPT.....42

III. 3. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance maximale.....45

III. 4. Méthodes indirectes.....45

III. 4.1. Méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....45

III. 4.2. Méthode de court-circuit.....46

III. 4.3. Méthodes directes.....46

III. 4.4. Méthode Perturbe & Observe (P&O).....46

III.4.5. Méthode incrémentation de la conductance.....48

III.5. Structure et simulation de la commande MPPT « P&O »..... 50
III.6. Simulation d'un GPV en mode autonome ..... 51
III.6.1. Utilisation de la commande PO-MPPT..... 51
III.6.2 Utilisation de la commande INC-MPPT..... 55
III.7. Conclusion ..... 58
CONCLUSION GENERALE..... 59

# Liste des figures


Figure I.1 : Composante du rayonnement global sur un plan 07

Figure I.2 : spectre solaire hors atmosphère 08

Figure I.3 : Schéma d'une cellule élémentaire 10

Figure I.4 : Spectre du rayonnement solaire 11

Figure I.5: Module photovoltaïque 11

Figure I.6: Boite de jonction 12

Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule idéale 13

Figure I.8: Schéma d'une cellule photovoltaïque réelle 15

Figure I.9: Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque 16

Figure I.10: Caractéristique I-V d'une cellule PV 17

Figure I.11: Caractéristique P-V d'une cellule PV 17

Figure I.12: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement. 17

Figure I.13: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement. 18

Figure I.14: Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement 19

Figure I.15: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température. 20

Figure I.16 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température. 20

Figure I.17 : Ca rac éristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température. 21

Figure I.81 : Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle 23

Figure I.19: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle 23

Figure I.20: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle 23

Figure I.21: Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en série 24

Figure I.22: Caractéristique P-V des cellules PV accorder en séries 24

Figure I.23: Caractéristique P-V des cellules PV accorder en séries 24

Figure I.24: Block du module dans SIMULINK 25

Figure I.25: Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement 26

Figure I.26: Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement 26

Figure I.27: Caractéristique P-I du module PV selon l'éclairement 27

Figure II.2: Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque 30

Figure II.3: Schéma équivalent d'une cellule solaire 31

Figure II.4: Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt 32

Figure II.5: Schéma équivalent à deux diodes 33

Figure II.6: Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt 34

Figure II.7: Schéma bloc d'une cellule PV 34

Figure II.8: Caractéristique I(V) d'un cellule photovoltaïque 35

Figure II.9: Groupement des cellules PV en série 36

Figure II.10: Groupement des cellules en série- parallèle 36

Figure II.11: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour 37

Figure II.12: caractéristique I (V) et P (V) à T=25°C et E=1000W/$m^2$ 40

Figure II.13: Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque 41

Figure II.14: Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à E=1000W/$m^2$ 42

Figure II.15: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C 42

Figure II.16: Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique I(V) 43

Figure II.26: Caractéristiques courant-tension et puissances optimales 43

Figure II.17: Influence de RS sur la caractéristique I(V) à T=25°C et E=1000W/$m^2$ 44

Figure II.18: Influence de facteur de qualité sur la caractéristique I (V) 45

Figure III.1: La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM 48

Figure III.2: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque 48

Figure III.3: Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, ( b) suite à une variation de charge,( c) suite à une variation de température 49

Figure III.4: Schéma de converge vers le PPM par P&O 52

Figure III.5: Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O la nouvelle puissance 52

Figure III.6: Trajectoire par Incrémentation de Conductance 54

Figure III.7: Algorithme d'incrémentation de la conductance 54

Figure III.8: Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation » 56

Figure III.9: Schéma block de la commande MPPT 56

Figure III.10: Signal commande MPPT 57

# Listes des Symboles

$\lambda$: longueur d'onde en mètre

h : Constante de blanc

C : la vitesse de lumière

E : Energie de photon

$\eta_{STC}$ : Le rendement de la cellule photovoltaïque

$P_m$ : La puissance produite par le générateur PV

$E_{STC}$ : L'éclairement absorbé par la cellule

$S_{cellule}$ : La surface de la cellule [$m^2$]

$I_{ph}$ : le photo courant

$I_d$ : le courant de diode

V : la tension imposée sur la diode

$I_0$ : la saturation inverse ou le courant de fuite de la diode (A)

$T_c$ : la température réelle de la cellule (K)

q : la charge d'électrons ($1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C)

$N_S$ : le nombre de cellules PV connectées en série

A : le Facteur d'idéalité

$I_p$ : la fuite actuelle en résistance parallèle

$R_p$: Résistance shunt de la cellule PV

$R_S$: Résistance série de la cellule PV

$V_{oc}$ : Tension du circuit ouvert

$I_{SC}=I_{cc}$: courant de court-circuit

$N_P$ : Nombres des cellules en parallèle

G : Irradiation ($w/m^2$)

$G_{ref}$ : Irradiation à STC =1000($w/m^2$)

$I_{ph,ref}$ : Photo curent (A) à STC

$R_L$ : Résistance de filtres

L : Inductance de filtres

$E_g$: Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev]

# INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [1].

Les objectifs des différentes recherches scientifiques sont de capter les rayons solaires et de les transformer en énergie électrique dont la demande ne cesse de croître dans tous les pays du monde. Et de rendre cette énergie électrique disponible en particulier pour les zones rurales.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire [1].

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournit est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence des différentes algorithmes de commande MPPT sur le comportement énergétique du générateur photovoltaïque [1]. Cette mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous évoquons l'historique des systèmes photovoltaïques, nous introduisons les principes de la conversion photovoltaïque ainsi les descriptions des différents composants et une synthèse des travaux de recherches antérieur.

Dans le deuxième chapitre, nous sélectionnons les équations théoriques qui donnent les modèles existes des panneaux photovoltaïques en fonction del'éclairement et la température.

Dans le troisième chapitre nous présentons quelques méthodes de commande et de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux photovoltaïques.

Nous enchaînons notre étude par la présentation des résultats et courbes obtenus ainsi que leurs interprétation.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation

# Chapitre I

## *Généralités sur le système photovoltaïque*

## I.1.Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [1]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps 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.

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 au19ème siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquere]. 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 [2].

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 : [3]

-Les systèmes autonomes,

- Les systèmes connectés au réseau,

-Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

## I.2. Les ressources des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, …) [4]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [5-6].

## I. 2.2. Définition d'énergie renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [5-7].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [4-5-8].

## I.3. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [9], les rayons du soleil mettent donc environ 8minutesà nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prisera le à 1360W/$m^2$. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ $m^2$ à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \qquad \text{(I.1)}$$

h : la constante de Planck,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est : $E= 1.26 / \lambda$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (µm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

-%6 dans la bande des ultraviolets (<0,4µm).

-%74dans la bande visible (0,4 à 0,8 µm).

-%77dans la bande des infrarouges (>0,8µm).

## I.3.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2et 4.10-6m. sans la nécessite d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent

♦ **Le rayonnement direct** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

♦ **Le rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

♦ **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

♦ **Le rayonnement global :** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis. **[1]** .

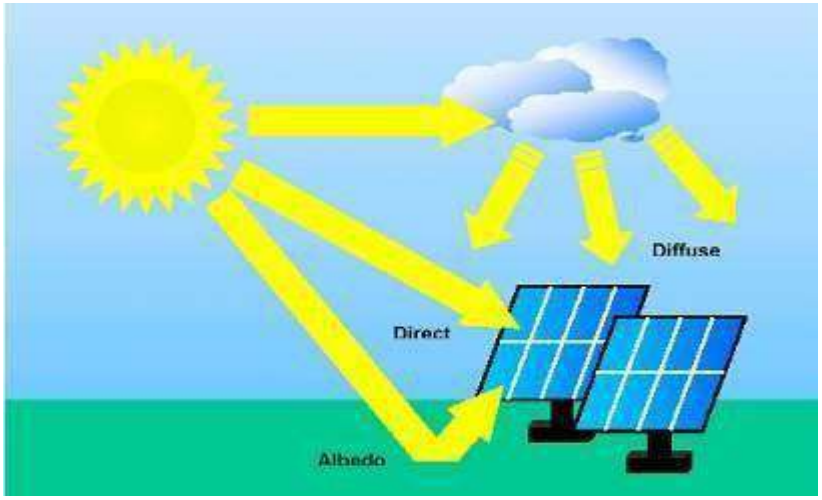



**Fig (I.1):** Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

## I.3.2 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde $\lambda$ :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [10]:

Ultraviolet $U_V$ 0.20 < l < 0.38 mm 6.4% Visible 0.38 < l < 0.78 mm 48.0%
Infrarouge $I_R$ 0.78 < l < 10 mm 45.6%

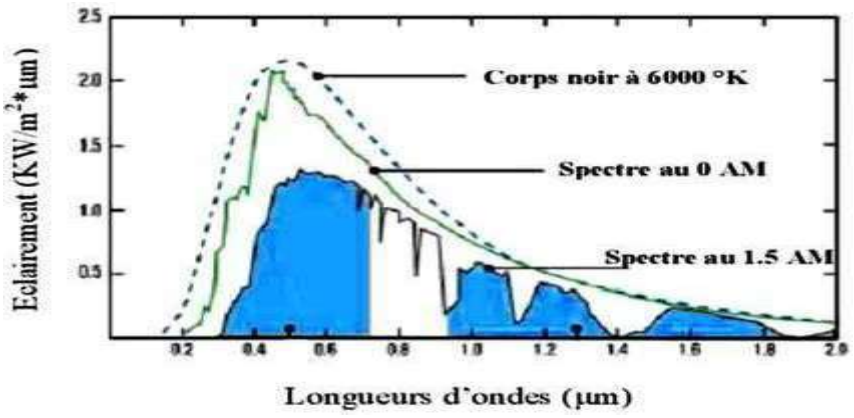



**Fig (I.2)** Spectre solaire hors atmosphère

### I.3.3. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell− Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est biens visible sont enregistrées on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

## I.4. Description des éléments d'un système photovoltaïque

### I.4.1. Historique d'une Cellule photovoltaïque

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui Noté :

1839: Le physicien français Edmond becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide c'est l'effet photovoltaïque.

1866: Werner Von siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954: Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000kmen Australie.

## I.4.2. Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.3). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques

(couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [11-12]

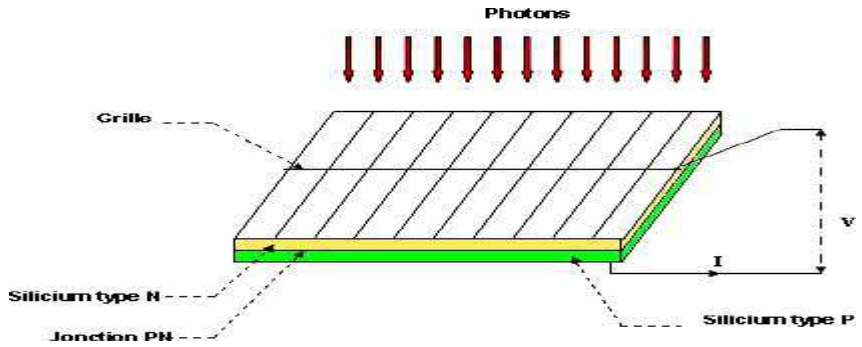



**Fig (I.3)** Schéma d'une cellule élémentaire

## 1.4.2. L'effet photovoltaïque

## I.4.2.1. Définition

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie $E_{ph}$ qui répond, elle-même, à la relation suivante [13]:

$$E_{ph}=h*(c/\lambda) \qquad (I.3)$$

D'après la relation (I.3), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que le montre la figure (I.4),. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au

spectre hors atmosphère.

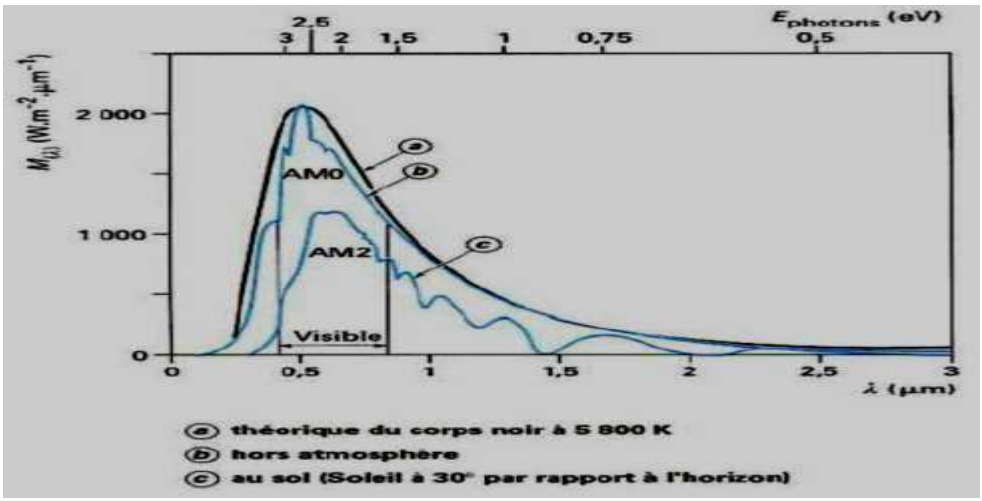



**Fig (I.4)** Spectre du rayonnement solaire

## I.5. Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure (I.5-a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA ( éthylène -vynil-acétate) Figure (I.5-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [15].

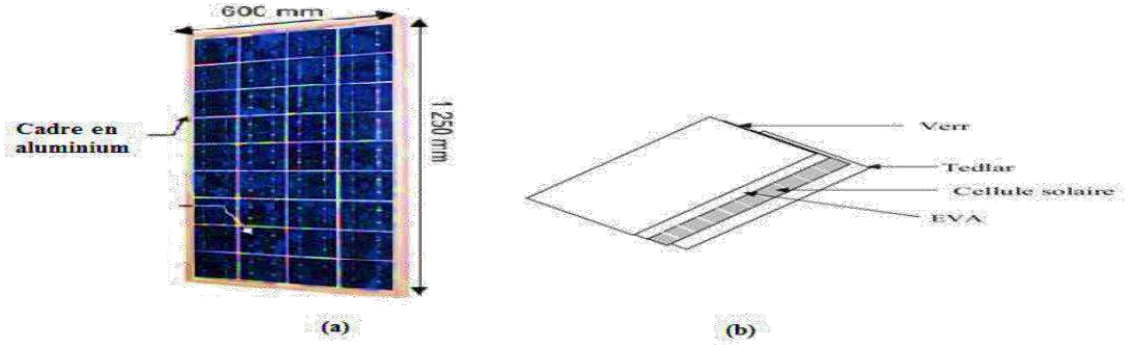



**Fig (I.5):** Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boite de jonction contenant 2 diodes antiparallèles Figure (I.6). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [16].



**Fig (I.6):** Boite de jonction.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium monocristallin (c-si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100 $W_c$ (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [15].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [17].

## I.5.1 Caractéristiques d'un module

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes [18]:

♦ **La puissance de crête, Pc :** Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

♦ **La caractéristique I=f (V) :** Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

♦ **Tension à vide, $V_{co}$ :** Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

♦ **Courant de court-circuit, $I_{cc}$** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

♦ **Point de fonctionnement optimum, Pm ($V_m$, $I_m$)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m . I_m$

♦ **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

♦ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} . I_{cc}$.

## I.6. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

### I.6.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant $I_{ph}$ en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.7), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [19].

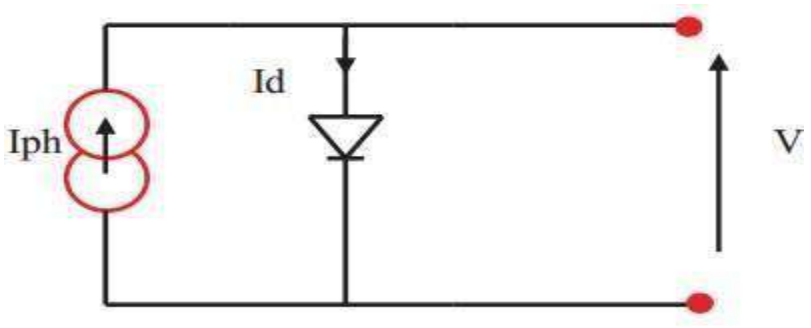



**Fig (I.7):** Schéma équivalent d'une cellule idéale.

♦ Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d$$

♦ Le courant $I_{ph}$ est assimilé au courant $I_{sc}$ avec $V_{pv}$= 0, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$Iph = Isc = \frac{E}{E_{ref}}$$

**E:** L'éclairement absorbé par la cellule

**$E_{ref}$ :** L'éclairement de référence (1000 W/m$^2$)

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{Vt}} - 1 \right)$$

**$I_0$:** Courant de saturation inverse de la diode

$$V_t = \frac{NKT}{q}$$

**Vt :** Tension thermique

**N :** Facteur d'idéalité de la photopile

**K :** Constant de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}$J/K)

**q :** Charge de l'électron ($1{,}6.10^{-19}$C)

### I.6.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (I.8).Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant ($I_{ph}$) caractérisant le photo-courant, une résistance série ($R_s$) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (Rsh) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ($R_s$) [20]

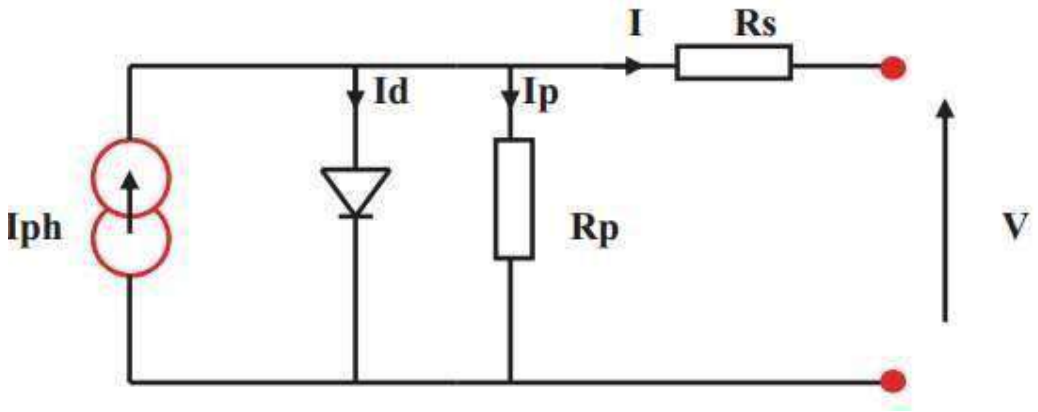



**Fig (I.8):** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

♦ Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p$$

**$I_{pv}$:** Courant générer par la cellule photovoltaïque

**$I_{ph}$:** Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

**$I_d$:** Le courant circulant dans la diode.

$$I_o = I_{or}\left(\frac{T}{T_n}\right)^3 e^{\left[\frac{Eg}{BK}\left(\frac{1}{T_n}-\frac{1}{T}\right)\right]} - 1\Big)$$

$$I_d = I_0\left(e^{\frac{V_d}{Vt}} - 1\right)$$

$I_{or}$: est le courant de court- circuit de la cellule à la température de référence *Tn* et l'éclairement

de référence

T : Température de la jonction des cellules PV [°K]

$T_n$ : Température de référence des cellules PV [°K]

B : facteur d'idéalité de la jonction

$E_g$ : Énergie de gap [ev]

$R_s$: résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsiles résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

$V_{pv}$: La tension de sortie

$I_p$: Le courant circulant dans la résistance $R_P$

$R_p$: Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

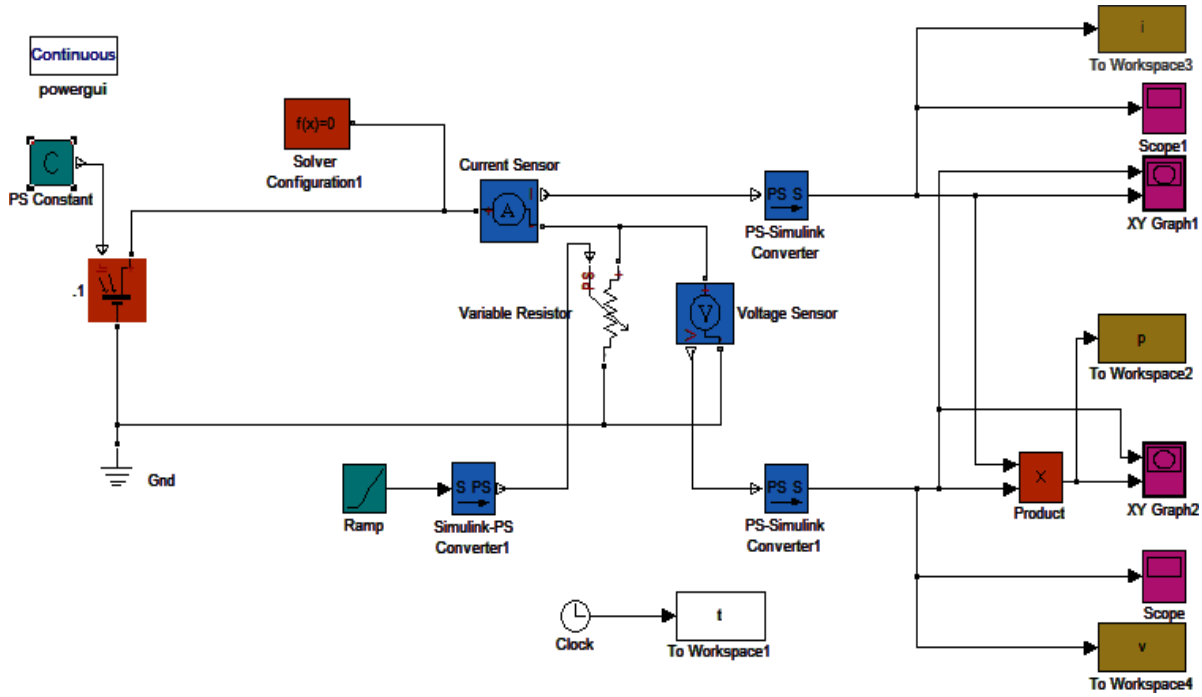
Les résistances $R_S$ et $R_P$

sont calculées par une boucle de programmation voir l'annexe (A.1)

En substituant les équations (I.9 ; I.10) dans l'équation (I.8) le courant $I_{PV}$ devient Donc :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_0 \left[e\left(\frac{Vpv+Ipv.R_S}{V_t}\right) - 1\right] - \frac{Vpv+Ipv.R_S}{R_P}}$$

♦ Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Contraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'.




♦ **Fig (I.9):** Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque

♦ Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (I-1) et les autres paramètres sont reportés en détails :

| Les paramètres de module | La valeur de chaque paramètre |
|---|---|
| Le nombre des cellules en série Ns | 1 |
| La tension maximale Vr à PPM (V) | 0.4822 |
| La tension en circuit ouvert Voc (V) | 0.598 |
| Le courant maximal Ir à PPM (A) | 6.98 |
| Le courant de court-circuit Ir (A) | 7.2 |

**Tableau ( I.1)** Valeurs des paramètres de simulation.

Les courbes suivantes montre les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

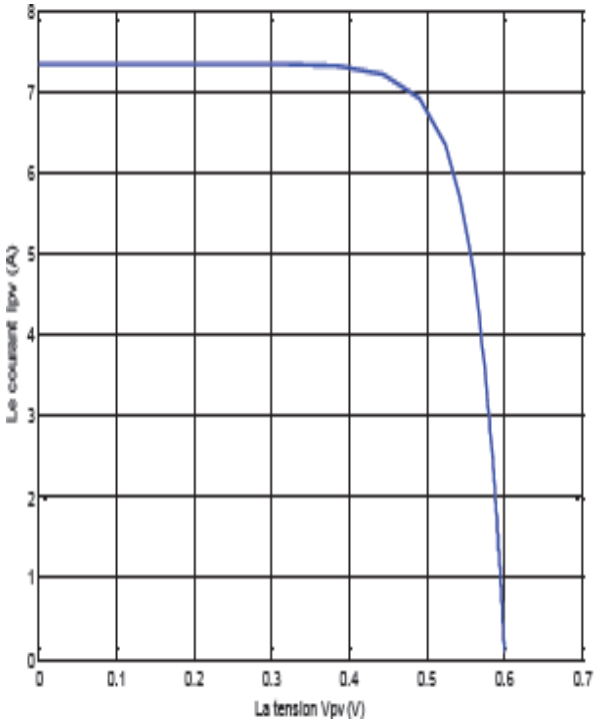



Fig (I.10): Caractéristique I-V d'une cellule PV

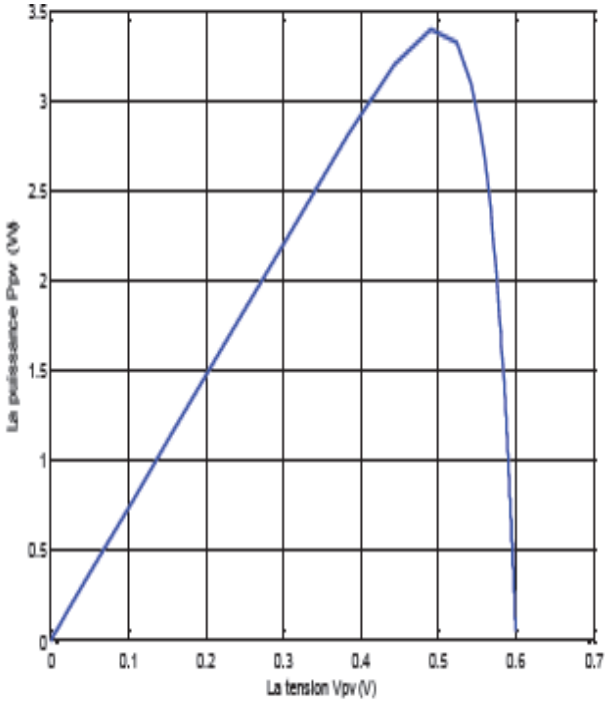



Fig (I.11): Caractéristique P-V d'une cellule PV

## I.6.3. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (I.7) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes7

Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement figure (I.12).

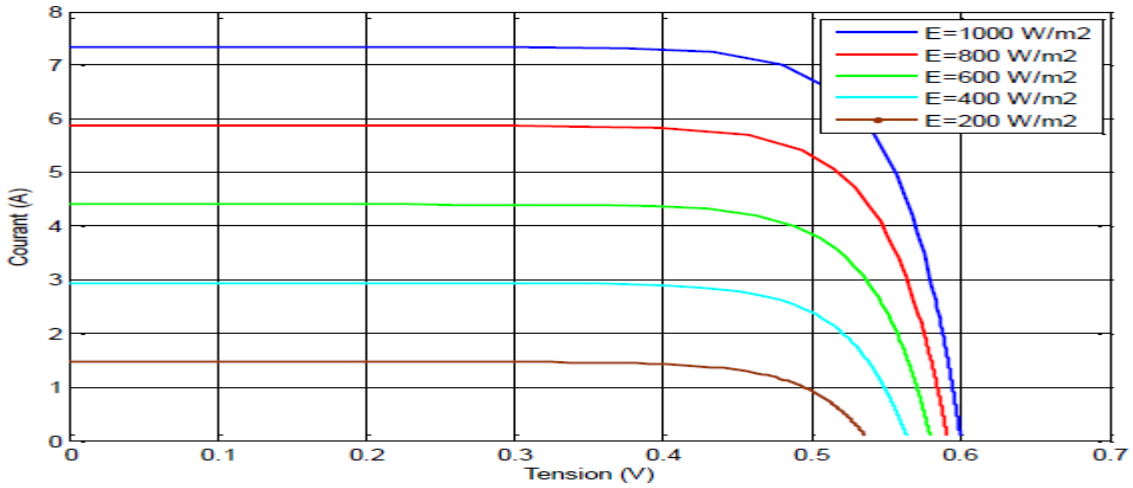



**Fig (I.12):** Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

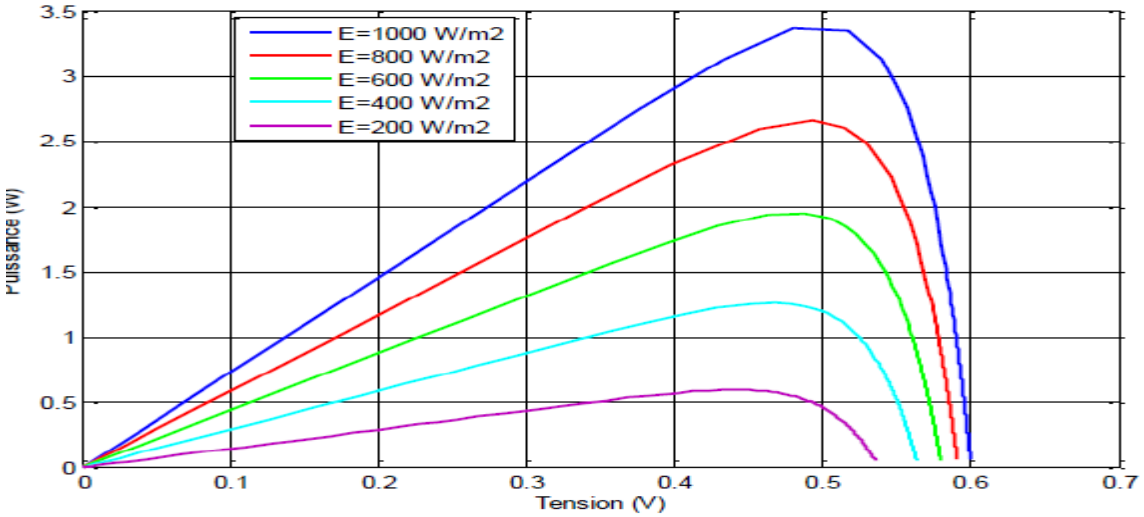



**Fig (I.13):** Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonctionde l'éclairement.

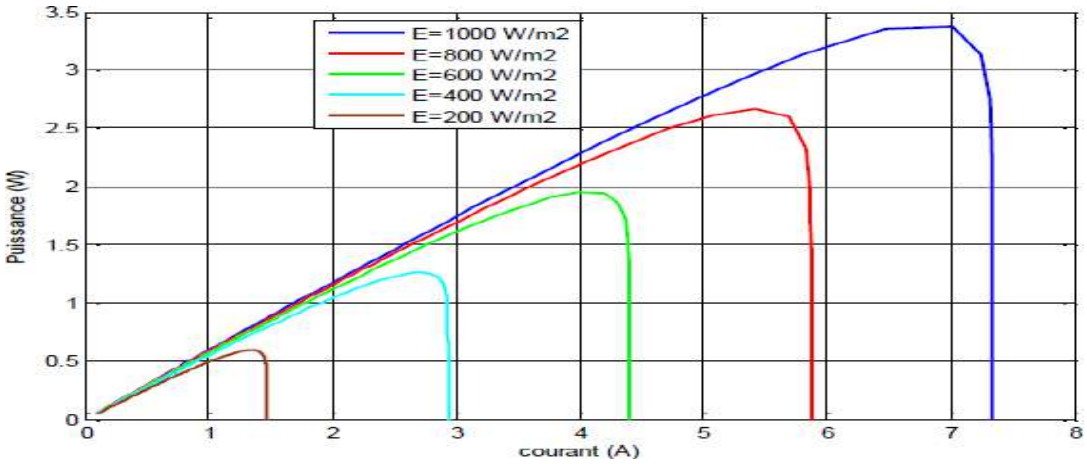



**Fig (I.14):** Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonctionde l'éclairement.

## I.6.4 Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température , de la cellule (Tc) est toujours plus élevée que la température ambiante (Ta).

$$T_c = T_a + E_m/800\ (T_{UC}-20) \qquad (I.12)$$

La figure (I.15), montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale [21]

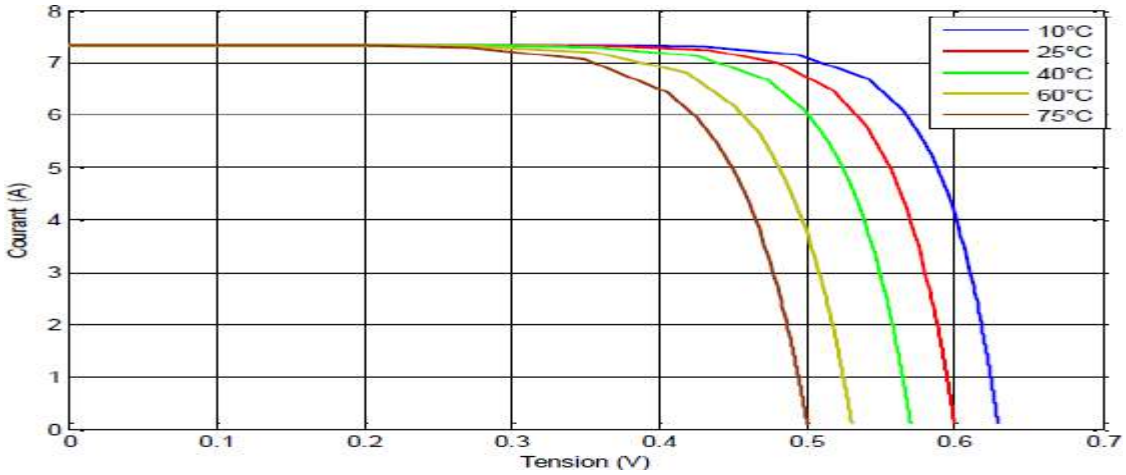



**Fig (I.15):** Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonctionde la tempér**a**ture

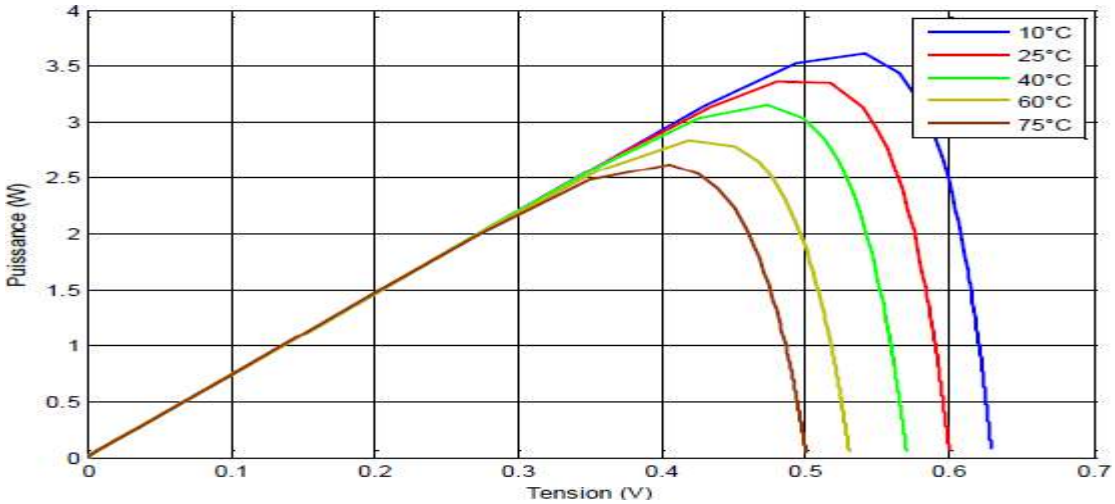



**Fig ( I.16) :** Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonctionde la température

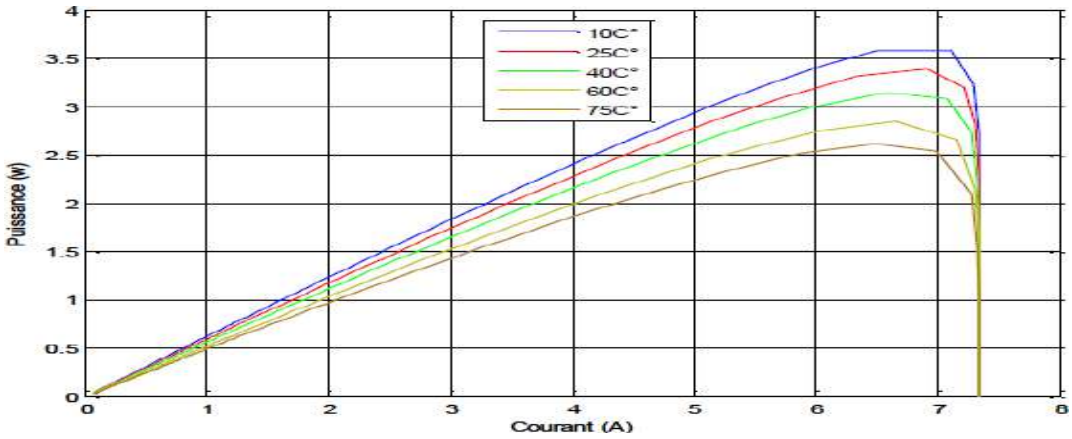



**Fig ( I.17) :** Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonctionde la température.

## I.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures suivantes.

### I.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont Soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. Les figures. (I.19)- (I.20)) montrent les caractéristiques résultantes ($I_{PCC}$,$V_{PCO}$) obtenues en parallèle (indice p) Np cellules identiques:

$$I_{PCC}=N_P * I_{CC} \quad , \quad V_{PC0}=V_{C0} \qquad (I.13)$$

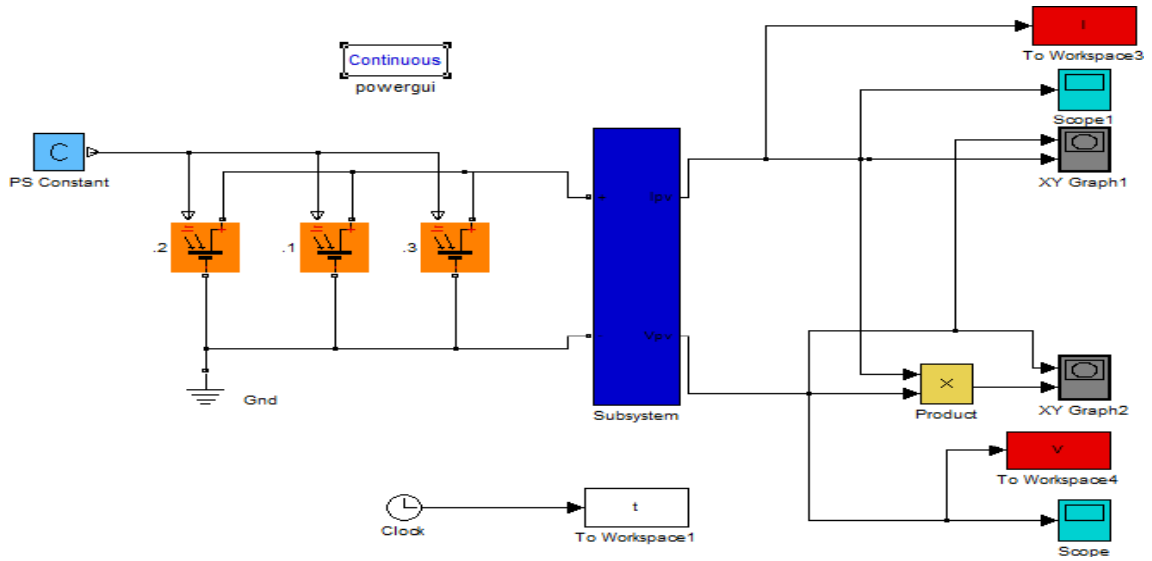



**Fig (I .81) :** Schéma de simulation de la 3 cellules PV associées en parallèle

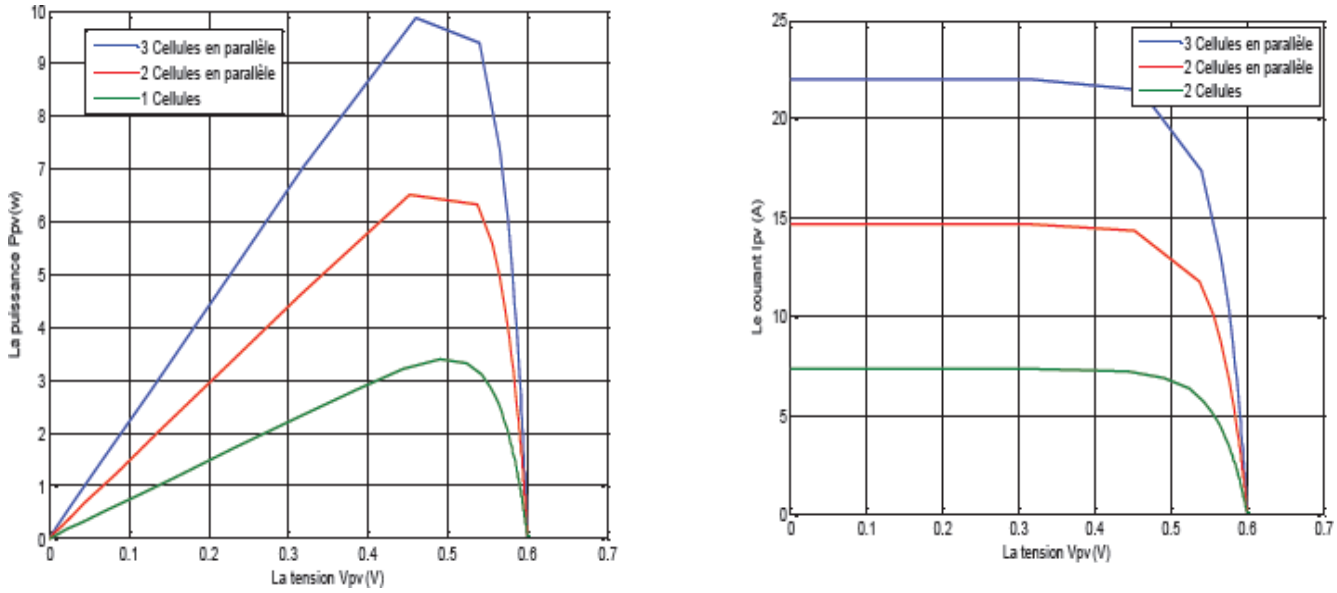



**Fig (I.19):** Caractéristique P-V et I-V respectivement des cellules raccordées en parallèle

## I.7.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Série

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. Les figures (I. (22 ; 23)) montrent la caractéristique résultante ($I_{SCC}$,$V_{SCO}$) obtenue en associant en série (indice s)Ns cellules identiques ($I_{CC}$,$V_{CO}$)

$$I_{PCC}=I_{PC0}\ ,\ V_{SC0}=N_S * V_{C0} \qquad (I.14)$$

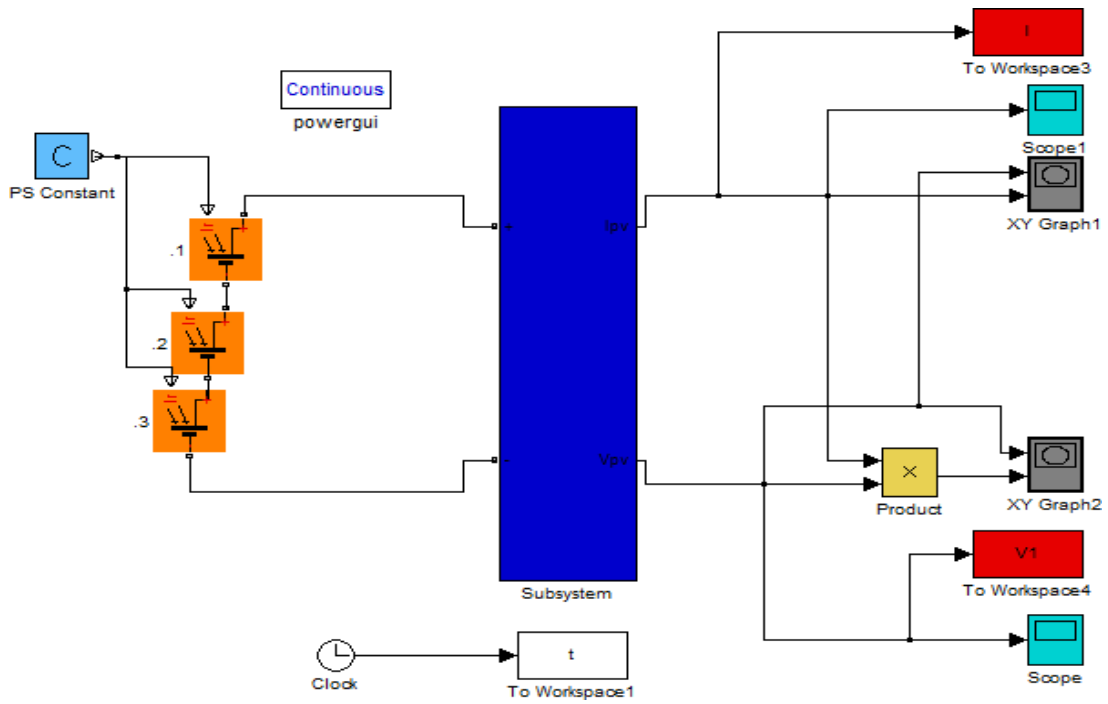



**Fig ( I.21)** Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en série

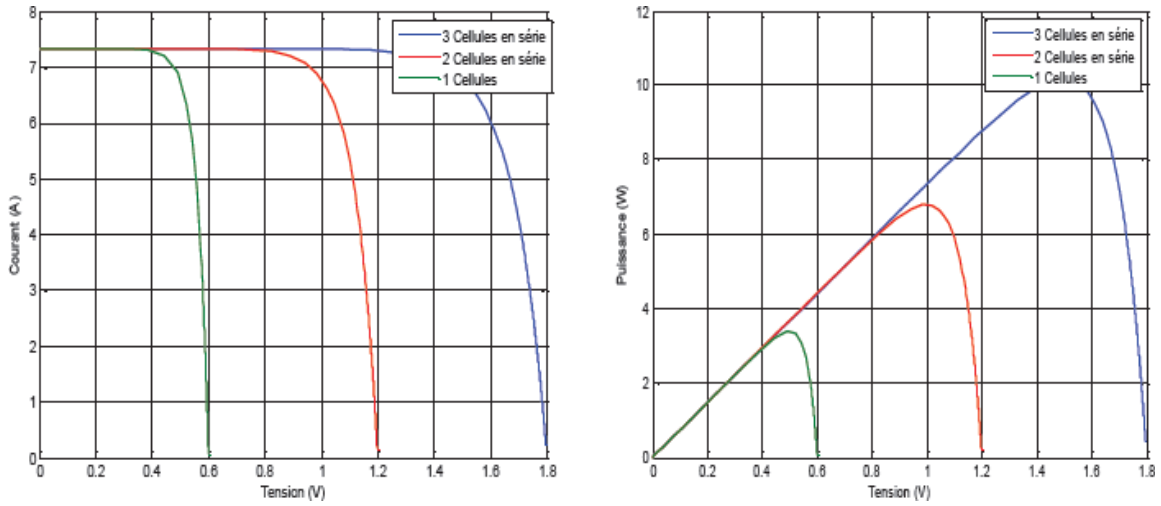



**Fig (I.22)** Caractéristique I-V et P-V respectivement des cellulesPV accorder en séries

Chaque module est caractérisé par des paramètres illustrés dans le tableau (I.2)

| Les paramètres de module | La valeur de chaque paramètre |
|---|---|
| Le nombre des cellules en série Ns | 83 |
| La tension maximale Vr à PPM (V) | 94.15 |
| La tension en circuit ouvert Voc (V) | 21.5 |
| Le courant maximal Ir à PPM (A) | 6.98 |
| Le courant de court-circuit Ir (A) | 7.2 |

**Tableau ( I.2)** Valeurs des paramètres de simulation

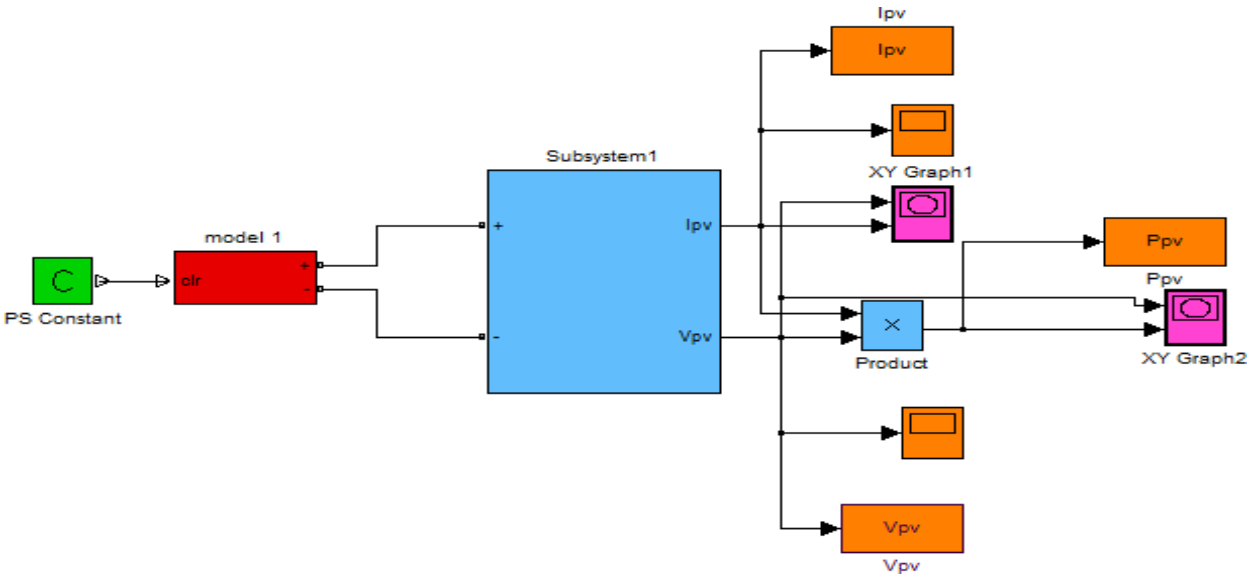



**Fig (I.24)** Block du module dans Matlab/Simulink

## ♦ Influence de l'Éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique (Ipv=f(Vpv)) est donnée par les figures (I. (25,26 et 27)). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m$^2$ et une température de 25 °C.

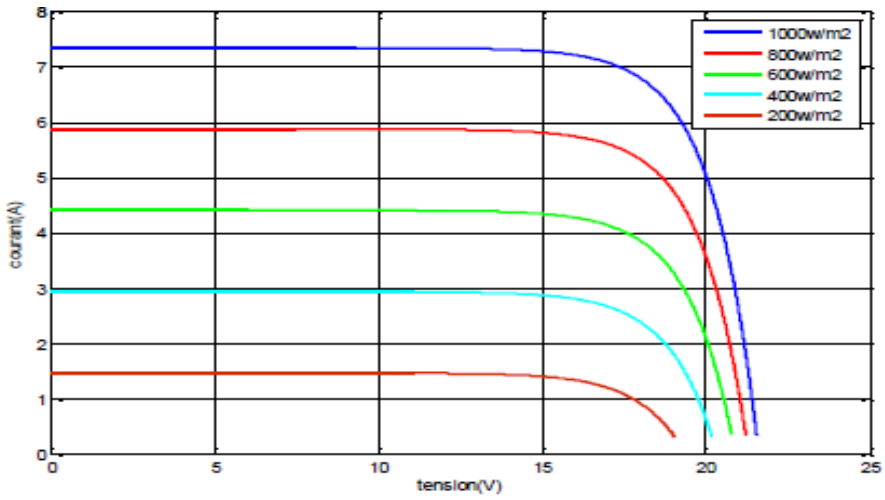



**Fig (I.25):** Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement

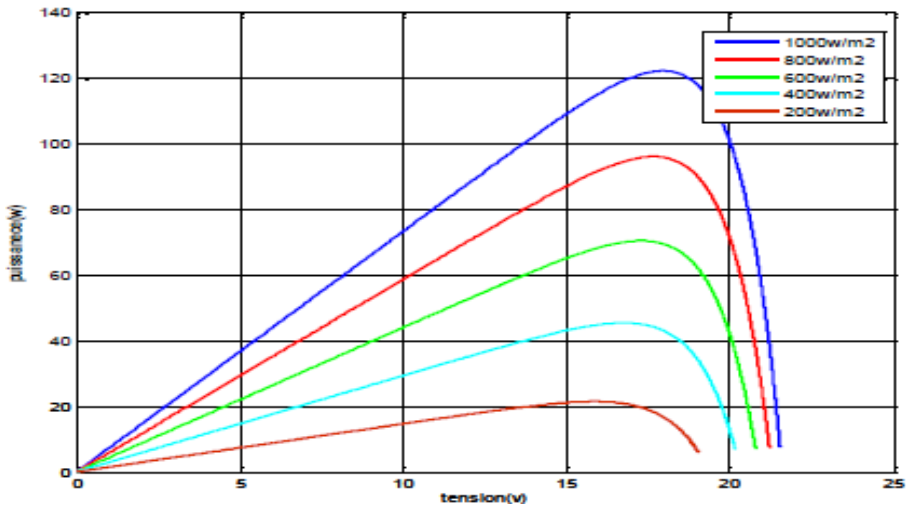



**Fig (I.26):** Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement

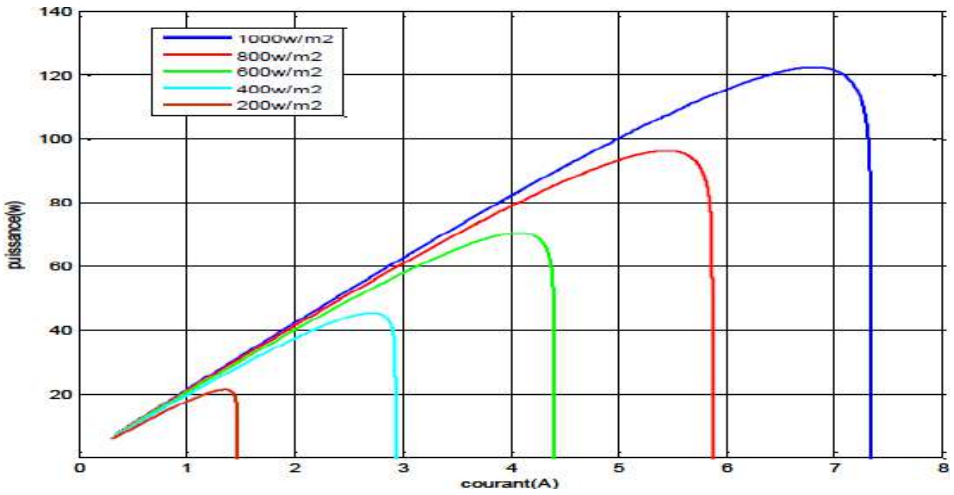



**Fig ( I.27)** Caractéristique P-I du module PV selon l'éclairement

## I.8. Avantages et inconvénients

### I.8.1. Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles de mandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombre des problèmes.

### I.8.2. Avantages

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

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance saillant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entre tiens réduits et il ne nécessitée combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aux une perturbation du milieu, ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

## 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. Ensuite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances. Dans le chapitre suivant, on présente une étude sur les générateurs photovoltaïque et ces caractéristique et les modèles de la cellule solaire.

# Chapitre II

# Modélisation du générateur photovoltaïque

## II.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courante tension *I-V* non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit $I_{SC}$ et la tension en circuit ouvert $V_{OC}$. La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté, il est plus ou moins éloigné du PPM caractérisé par le courant et la tension optimaux, notées ($I_{mp}$ ; $V_{mp}$ ).

Dans ce chapitre, nous allons tenter de définir un modèle s'appliquant aux cellules photovoltaïques, la détermination de ses paramètres se fera sur bases dedonnées fournies par le constructeur de panneaux

## I.2. Modèle d'une cellule solaire idéale

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction P-N).

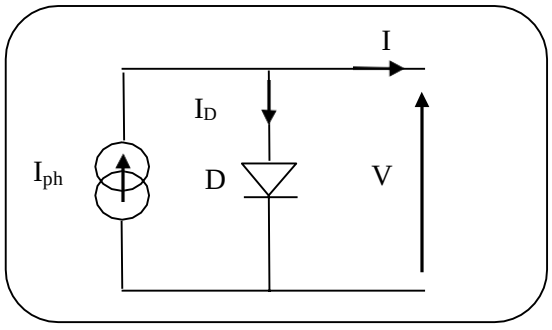



**Fig (2-2)** Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_D \quad \text{(II-1)}$$

$$I = I_{ph} - I_0 . \left[ e^{\frac{q.V}{A.K.T}} - 1 \right] \quad \text{(II-2)}$$

## II.3. Modèle d'une cellule solaire réelle

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui différent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

Reichenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvés que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant les significations liées aux phénomènes physiques de la cellule.

Reichenbach (1980) et Green (1981) ont passé en revue plusieurs circuits équivalents et ils ont recommandé l'utilisation de circuit d'une seule diode à quatre paramètres.

Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et Alghuwainem(1992) ont employés le modèle à quatre paramètres.

Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques rencontrées dans la littérature.

### II.3.1 . Modèle à une diode (à une seule exponentielle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

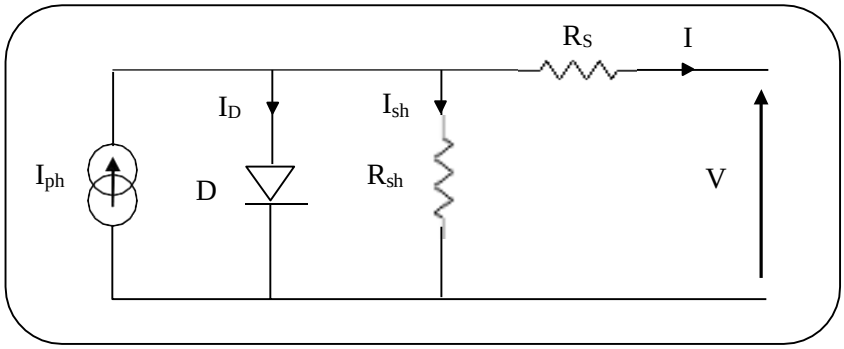



**Fig ( 2-3)** Schéma équivalent d'une cellule solaire

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique *I-V* de la photopile:
la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.
Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \qquad \text{(II-3)}$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \qquad (2\text{-}4)$$

$$= I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - \left( \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \qquad (2\text{-}5)$$

## II.3.2 . Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure (2-4) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode.

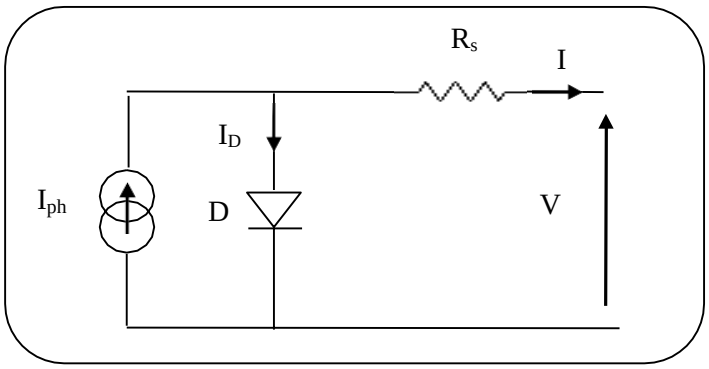



**Fig (2-4)** Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt

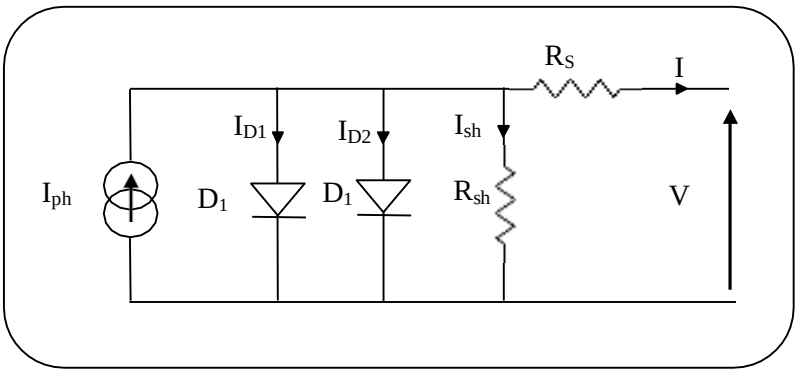
Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D \quad \text{(II.6)}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \quad \text{(II.7)}$$

## II.3.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (fig. 2- 5), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.




**Fig(2-5)** Schéma équivalent à deux diodes

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad \text{(2-8)}$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \quad \text{(2-9)}$$

$$I_{D2} = I_{02} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \quad \text{(2-10)}$$

Avec : $I_{01}, I_{02}$ courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} \right] - \left( \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad \text{(2-11)}$$

## II. 3. 4. Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (fig. 2-6), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairement),

deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.

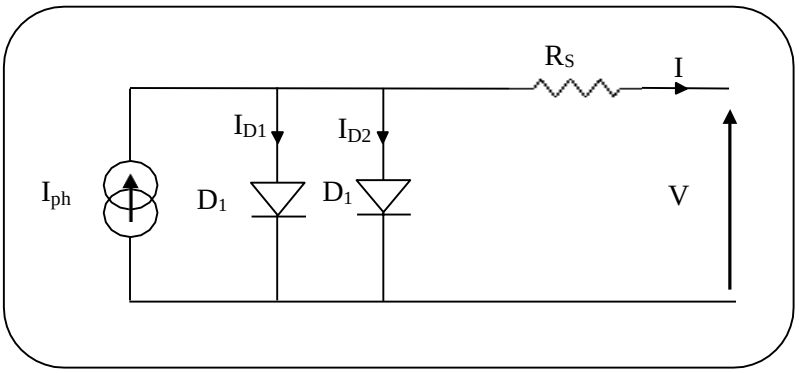



**Fig : (2-6)** Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad \text{(II.12)}$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} \right] \quad \text{(II.13)}$$

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (fig2-7).

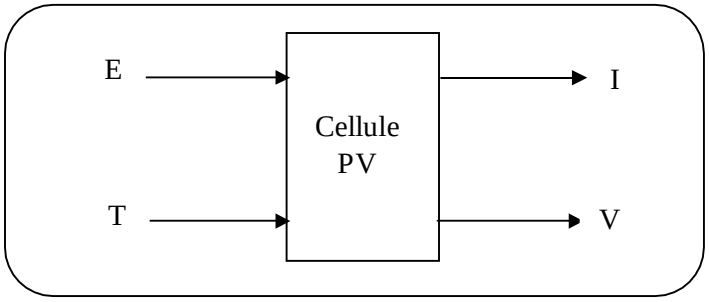



**Fig (2-7)** Schéma bloc d'une cellule PV

Avec deux variables d'entrée :

*E* : ensoleillement dans le plan de la cellule (W/m$^2$).

*T* : température de la cellule

(°C).et deux variables de sortie :

*I* : intensité de courant fournie par la cellule (A).

*V* : tension aux bornes de la cellule.

## II.4 . Caractéristique I-V

Des nombreux constructeurs offrent une gamme importante des modules solaires, on prend l'exemple d'un panneau MSX 83 avec une puissance de *83 W*. La figure (2-8) représente la caractéristique tension – courant tracée pour un éclairement $E = 1000\ W/m^2$ et une température ambiante $T = 25^0C$.

On constate que la caractéristique de la cellule se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension constant dans la partie verticale, on note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale.

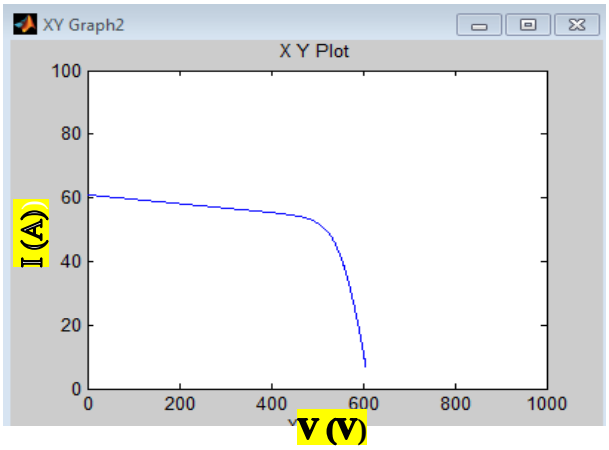



**Fig (2-8)** Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque

## I.5 . Constitution D'un Module Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque seule est souvent peu utilisable ; son faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins de 1V. Ainsi pour accroître la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle.

Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire **(**module photovoltaïque). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant (fig.2-9)

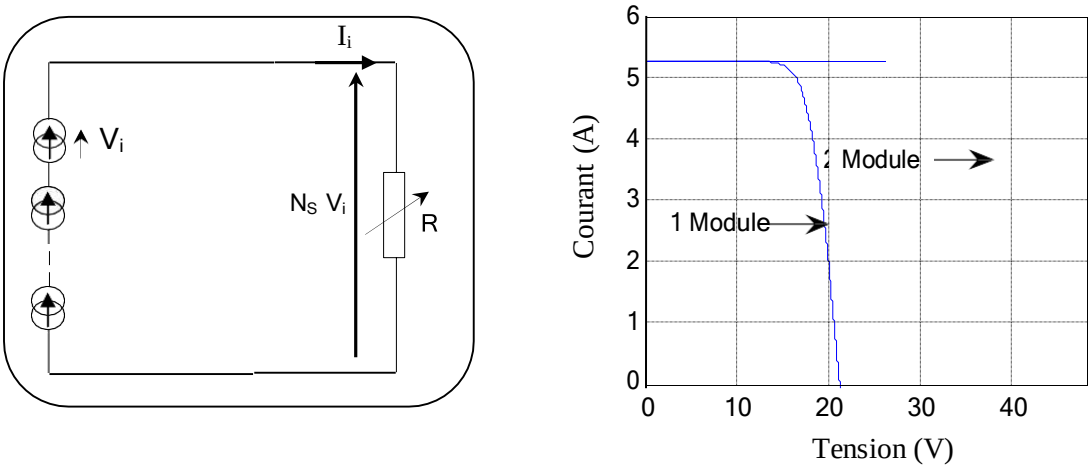



**Fig (2.9) : Groupement des cellules PV en série**

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension (fig.2-10).

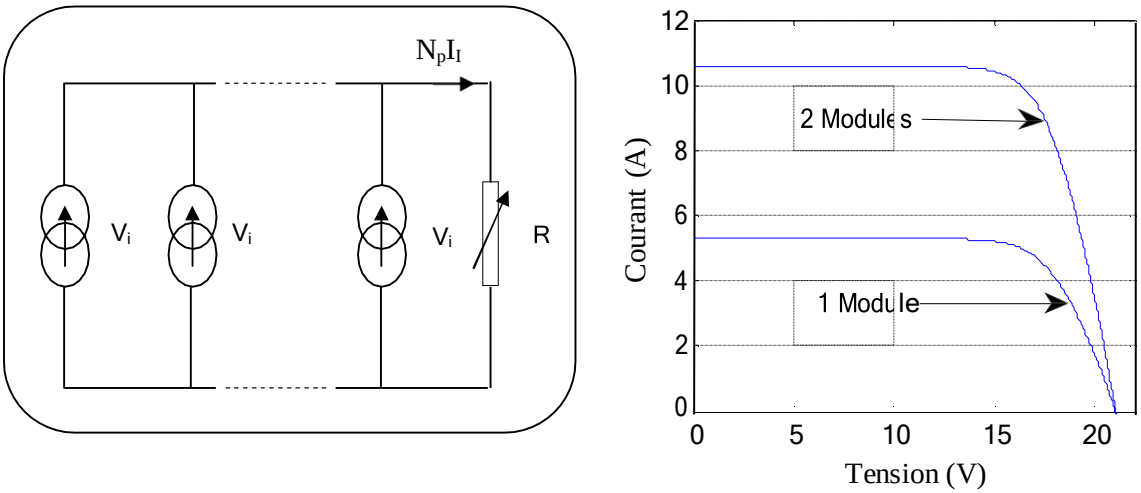



**Fig (2.10) : Groupement des cellules en série- parallèle**

La plupart des panneaux PV commercialisés sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ses sous réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série. Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importantes du GPV en cas de défaut partiel. La figure (2-11) montre le schématique classique adopté pour un GPV élémentaire ; le fonctionnement traditionnel comprend la connexion d'unediode by-pass et une diode anti-retour.

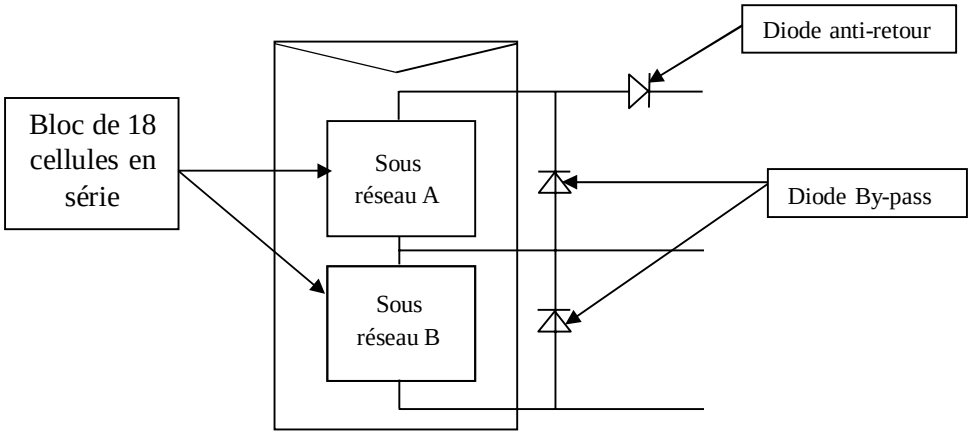



**Fig (2-11) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour**

La diode anti-retour est utilisée pour éviter les courants inverses et la diode By-pass n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble.

L'ensemble des cellules doit être encapsulé sous verre ou sous composé plastique. L'ensemble est appelé module photovoltaïque. Un module est souvent constitué de *36* ou *72* cellules, et l'ensemble des modules photovoltaïques est appelé champ photovoltaïque.

## II.6. Caractéristique d'un GPV élémentaire

On décrit un GPV élémentaire par les paramètres suivants:

- **La puissance de crête *Pc* :** puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (*25°C* et un éclairement de *1000 W/m²*),
- **la tension à vide** $V_{OC}$ : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ",
- **le courant de court-circuit** $I_{SC}$ : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ",
- **le point de fonctionnement optimum, (*Vmp, Imp* ) :** lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_{mp} \times I_{mp}$
- **le rendement :** rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente,
- **le facteur de forme :** rapport entre la puissance optimale *Pm* et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

## II.7. Protection d'un GPV

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).
-

## II. 8. Modélisation du module Photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. Le générateur photovoltaïque est un ensemble de modules connectés série/parallèle afin d'obtenir une puissance et une tension désirées. L'élément de base est la cellule solaire (rappelons que le modèle en une seule exponentielle est non linéaire et implicite), donc une solution itérative sera déterminée par la méthode de Newton-Raphson., ainsi la connaissance des données fournies par le constructeur sont nécessaire. [10-11].Le circuit est composé d'un courant photodiode, une résistance série *Rs* plus faible et unediode (Fig. 2- 4).

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont données par les relations suivantes : La relation entre la tension *V* et le courant *I* est donnée par la relation suivante :

Appliquons la première loi de Kirschoff :

$$I = I_{ph} - I_D \tag{II.14}$$

Avec : *Iph, Id, I* le courant photonique, le courant de la diode et le courant de fonctionnement, qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules.

$$I_D = I_0 \times \left[ e^{\frac{q\times(V+R_S I)}{nKT}} - 1 \right] \tag{II.15}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q\times(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.16}$$

avec :

*q:* charge de l'électron e=1.6*10$^{-19}$ coulomb.

*T :* température de la cellule (Kelvin).

$R_s$ : résistance série de la cellule (Ω).

$K$ : constante de Boltzmann (K=1.3854 * $10^{-23}$ J/K).

$A$ : facteur de qualité de la diode.

$I_{ph}$ : courant photonique de la diode qui est donnée par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph(T_1)} 1 + K_0 \times (T - T_1) \quad \text{(II.17)}$$

avec : $$I_{ph(T_1)} = \frac{E}{E_{ref}} \times I_{sc}\ (T_1) \quad \text{(II.18)}$$

et : $$K_0 = \frac{I_{sc(T_2)} - I_{sc(T_1)}}{T_2 - T_1} \quad \text{(II.19)}$$

$I_0$ : courant de saturation de la diode (A), donné par la relation suivante :

$$I_0 = I_{0(T_1)} \times \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \times e^{\frac{-q \cdot V_g}{A \cdot K \left(\frac{1}{T} \frac{1}{T_1}\right)}} \quad \text{(2-20)}$$

$$I_{0(T_1)} = \frac{I_{cc}(T_1)}{e^{\frac{q \cdot V_{oc(T_1)}}{A \cdot K \cdot T_1}} - 1} \quad \text{(2-21)}$$

*Voc* est la tension du circuit ouvert de la cellule et $V_g$ et la tension de seuil de la diode (*1.12 eV*).

La résistance série se calcule de la façon suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1\right]$$

$$dI = 0 - I_0 \cdot q \cdot \left(\frac{dV + R_s \cdot dI}{A \cdot K \cdot T}\right) \cdot e^{q\left(\frac{V + R_S \cdot I}{A \cdot K \cdot T}\right)} \quad \text{(2-22)}$$

$$R_s = -\frac{dI}{dV} - \frac{A \cdot K \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{q\left(\frac{V + R_S \cdot I}{A \cdot K \cdot T}\right)}}$$

$$R_s = -\left.\frac{dV}{dI}\right|_{Voc} - \frac{A \cdot K \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{A \cdot K \cdot T}}} \quad \text{(2-23)}$$

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en utilisant les données de fabricants de panneaux photovoltaïques.

La méthode choisie pour la simulation de ce modèle est la méthode de Newton Raphsonqui est décrit comme suit :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x^n)} \quad \text{(II.24)}$$

$f'(x)$ est la dérivée de la fonction $f(x) = 0$ .

D'après l'équation (2-16) :

$$f(I) = I - I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] = 0$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} \right)}{-1 - I_0 \left( \frac{q \cdot R_s}{AKT} \right) \cdot e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}}}$$

Le module BP MSX83 de BP Solar (Annexe 1) sera utilisé pour illustrer et vérifier le modèle. La photo courant est directement proportionnelle à l'éclairement.

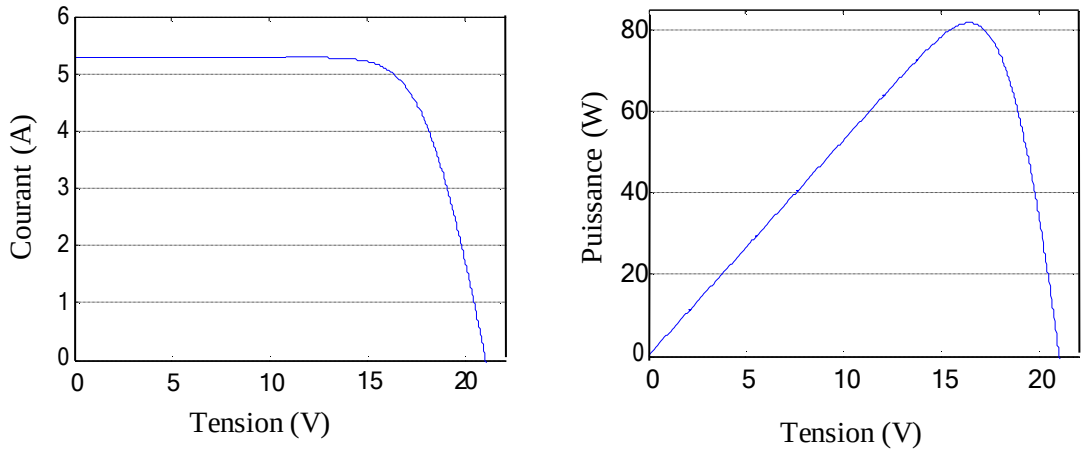
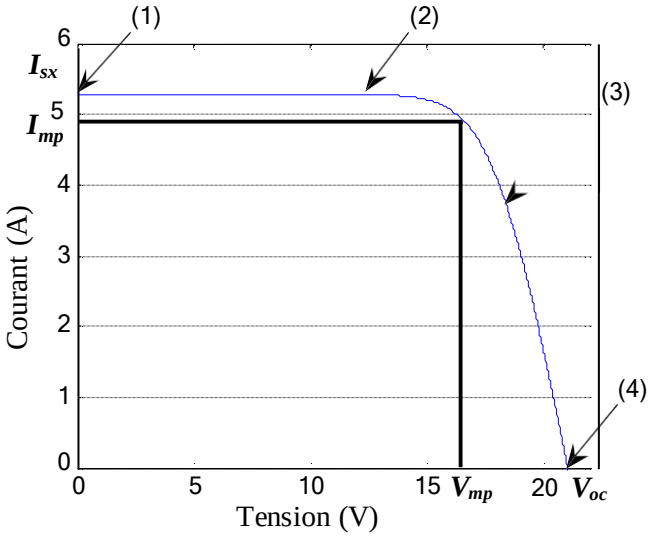



**Fig (2-12) : caractéristique I (V) et P (V) à T=25°C et E=1000W/m²**

Dont les points de fonctionnement caractéristiques sont :




**Fig(2-13)** Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

- *Voc* : Tension à circuit,
- *Isc* : courant de court-circuit.
- *Imp, Vmp* : le point de fonctionnement optimal.

Et les différentes zones de fonctionnement sont les suivantes :

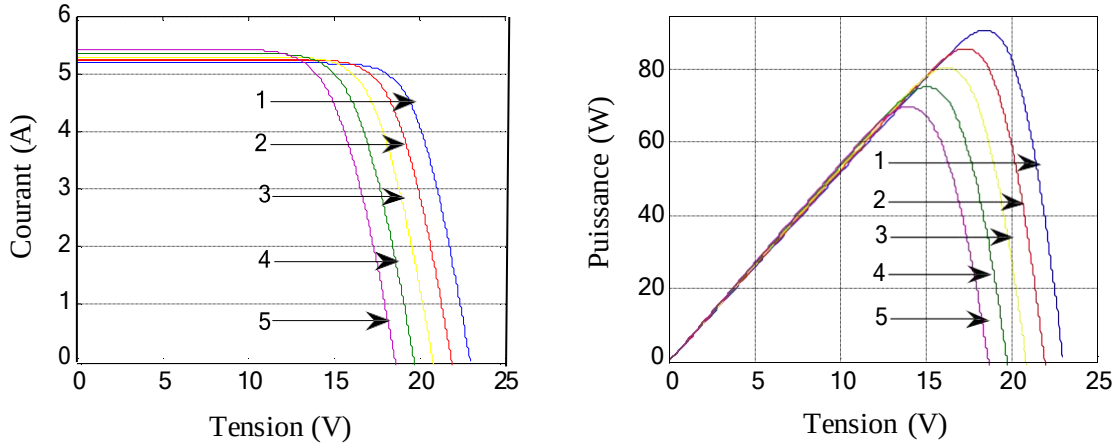
- Zone 1 – 2 : fonctionnement en générateur de tension.
- Zone 2 – 3 : zone préféré pour le fonctionnement du module, le point de fonctionnement optimal défini par le courant *Imp* et la tension *Vmp* est celui où le module délivre sa puissance maximale.
- zone 3- 4 : fonctionnement en générateur de courant constant proportionnel à l'éclairement.

Pour confronter un peu plus notre modèle à la réalité, il est nécessaire d'étudier comment certains paramètres, tels que le rayonnement reçu, ou la température de jonction vont influencer la caractéristique courant tension.

## II .8.1. Influence de l'éclairement et la température

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures (fig 2-14). La courbe caractéristique va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du

courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction.




**Fig(2-14)** Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à E=1000W/m²

**(1): 0 °C ; (2): 15 °C ; (3) : 30 °C ; (4) : 45 °C ; (5) : 60 °C.**

Par contre, lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairements (fig. 2-15), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert ($V_{OC}$) est une fonction logarithmique.

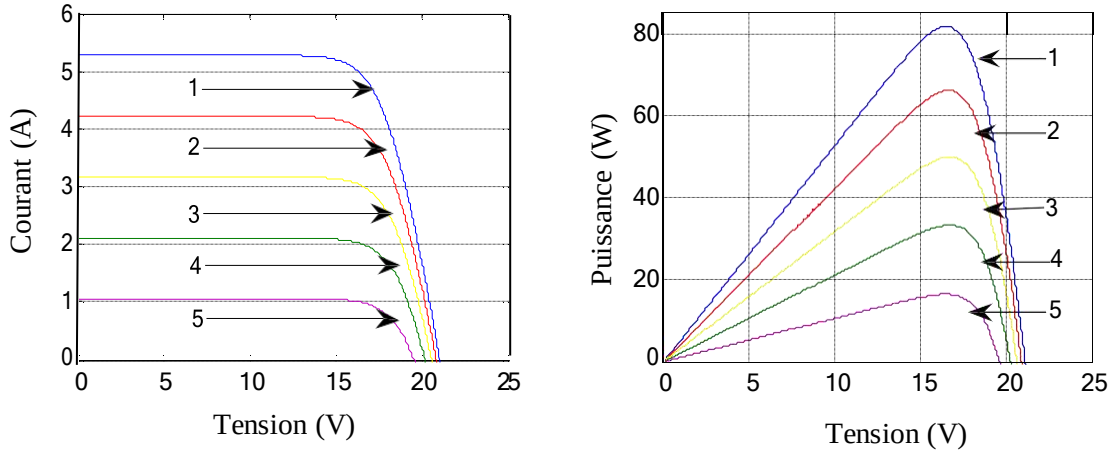
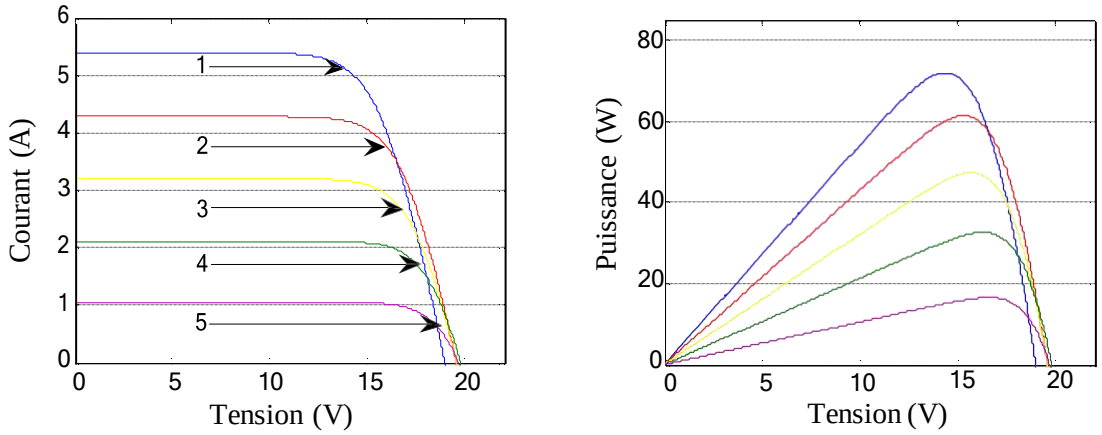



**Fig. (2-15)** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C

**(1) :1000W/m² ; (2) : 800W/m² ; (3) : 600W/m² ; (4) :400W/m² ; (5) :200W/m² .**

La variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert $V_{OC}$ qui n'est pas remarquable, par contre il y a une grande variation du courant $I_{SC}$ comme le montre la figure (2-16).




**Fig(2-16)** Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique I(V)

**(1) :1000W/m², 55°C ; (2) :800W/m², 44°C ; (3) :600W/m², 40°C ; (4) :400W/m², 32°C ; (5) :200W/m², 25°C .**

## II.8. 2. Recherche du point optimal de fonctionnement

Cette caractéristique permet d'obtenir le point optimal de fonctionnement du modèle et de calculer la puissance maximale du module photovoltaïque.

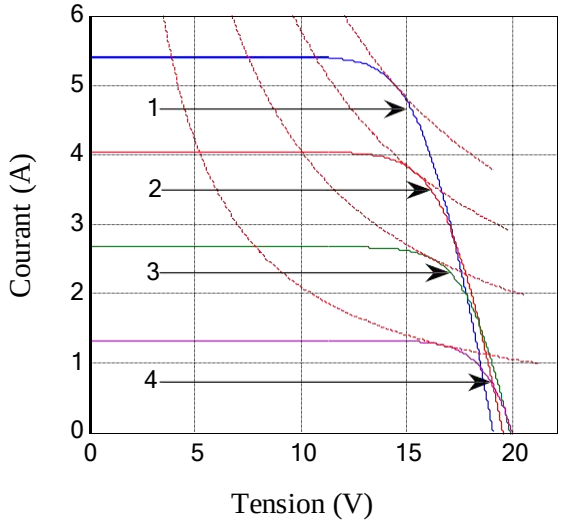



**Fig (2-26)** Caractéristiques courant-tension et puissances optimales.

**(1) :1000W/m², 55°C ; (2) :750W/m², 45 °C ; (3) :500W/m² , 35 °C; (4) :250W/m², 25°C .**

Le rendement est le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente [12].

$$h_{PV} = \frac{V_{mp} \quad I_{mp}}{E \quad S_m} \tag{2-24}$$

$S_m$ et la surface du panneau photovoltaïque.

Le rendement du module photovoltaïque dans les conditions standard (*25°C* et un éclairement de *1000 W/m²*), et de 14.22 %

Le tableau suivant donne la valeur de la puissance nominale calculée en fonction du rayonnement ainsi que le rendement :

| Rayonnement [W/m²] | Température [°C] | Puissance optimale [W] | Rendement |
|---|---|---|---|
| 1000 | 55 | 71.7672 | 12.04 |
| 750 | 45 | 57.3079 | 12.82 |
| 500 | 35 | 40.2689 | 13.51 |
| 250 | 25 | 20.8519 | 13.99 |

**Tableau 2-2 :** Rendement du module photovoltaïque MSX60.

Nous obtenons un rendement un peu supérieur à 10%, qui diminue avec l'intensité du rayonnement mais augmente avec la diminution de la température.

## II.8. 3. Influence de la résistance série

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsque elle augmente elle diminue la valeur de courant de courant de court-circuit Isc (Fig. 2-17)

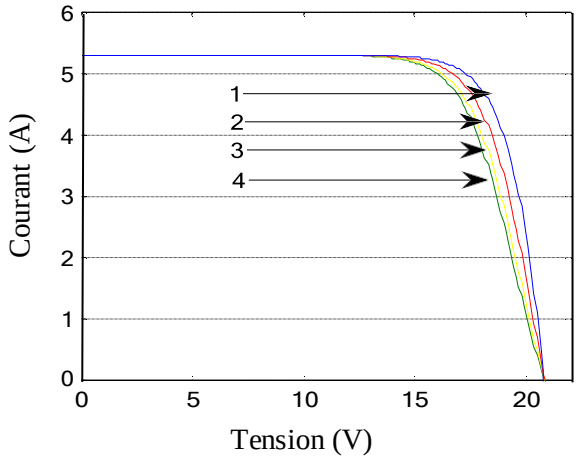



**Fig. (2-17)** Influence de $R_S$ sur la caractéristique I(V) à T=25°C et E=1000W/m²

**(1) : 0.002Ω ; (2) : 0.008Ω ; (3) : 0.015Ω; (4) : 0.02Ω.**

## II.8.4. Influence du facteur de qualité

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et conduit à une perte de puissance de la zone de fonctionnement Fig. (2-18).

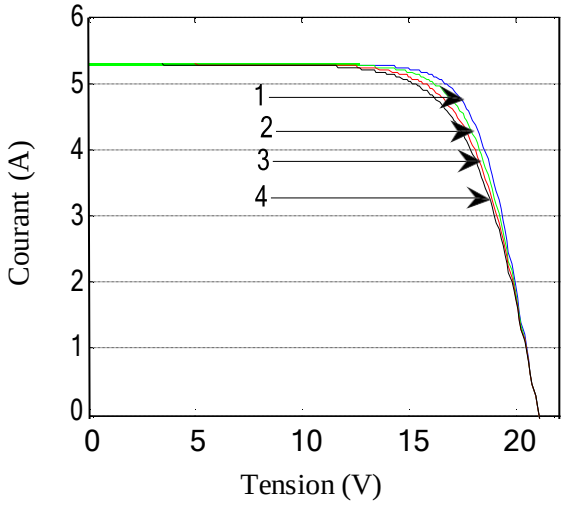



**Fig. (2-18)** Influence de facteur de qualité sur la caractéristique

**I (V)(1) : 1.2 ; (2) :1.4 ; (3) :1.6 ; (4) :1.8.**

## II. 9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présente des différents modèles (à une seule exponentielle et celui en double exponentielle) caractérisant les cellules photovoltaïques, ce qui nous a permis de modéliser et simuler le modèle en une seule exponentielle (sans la résistance shunt) en fonction de l'éclairement et la température. Ceci va nous permettre d'estimer la puissance fournie par une installation photovoltaïque.

# Chapitre III

# Simulation de la commande MPPT du GPV

## III.1 Introduction

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance.

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but.

Dans ce chapitre nous allons citer et expliquer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi les précédent s'appelle 'perturbation et observation', (P&O : Perturb-and-Observe).[15]

## III.2 Principe de fonctionnement de MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (III.1) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

La Figure (III.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une

Batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. [1]

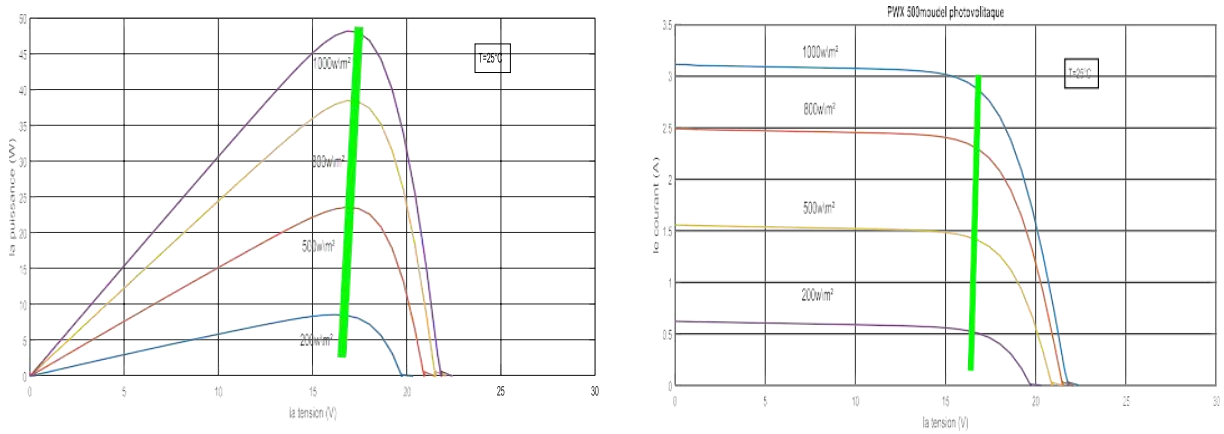



**Fig (III.1)** Caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Cracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé[30]

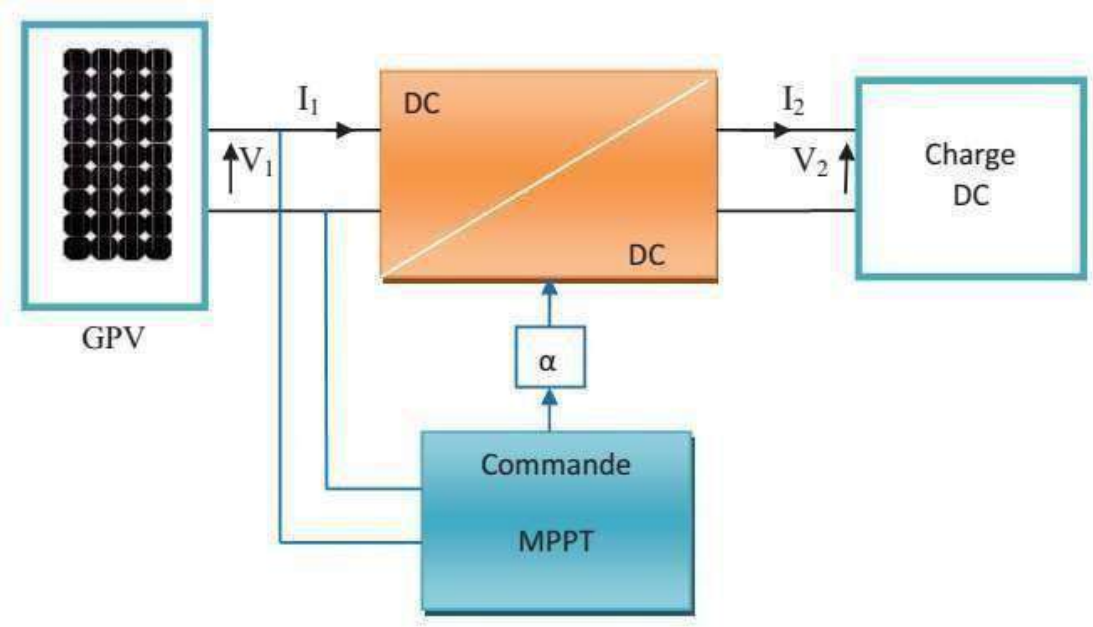



**Fig (III.2)** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La figure (III.3) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

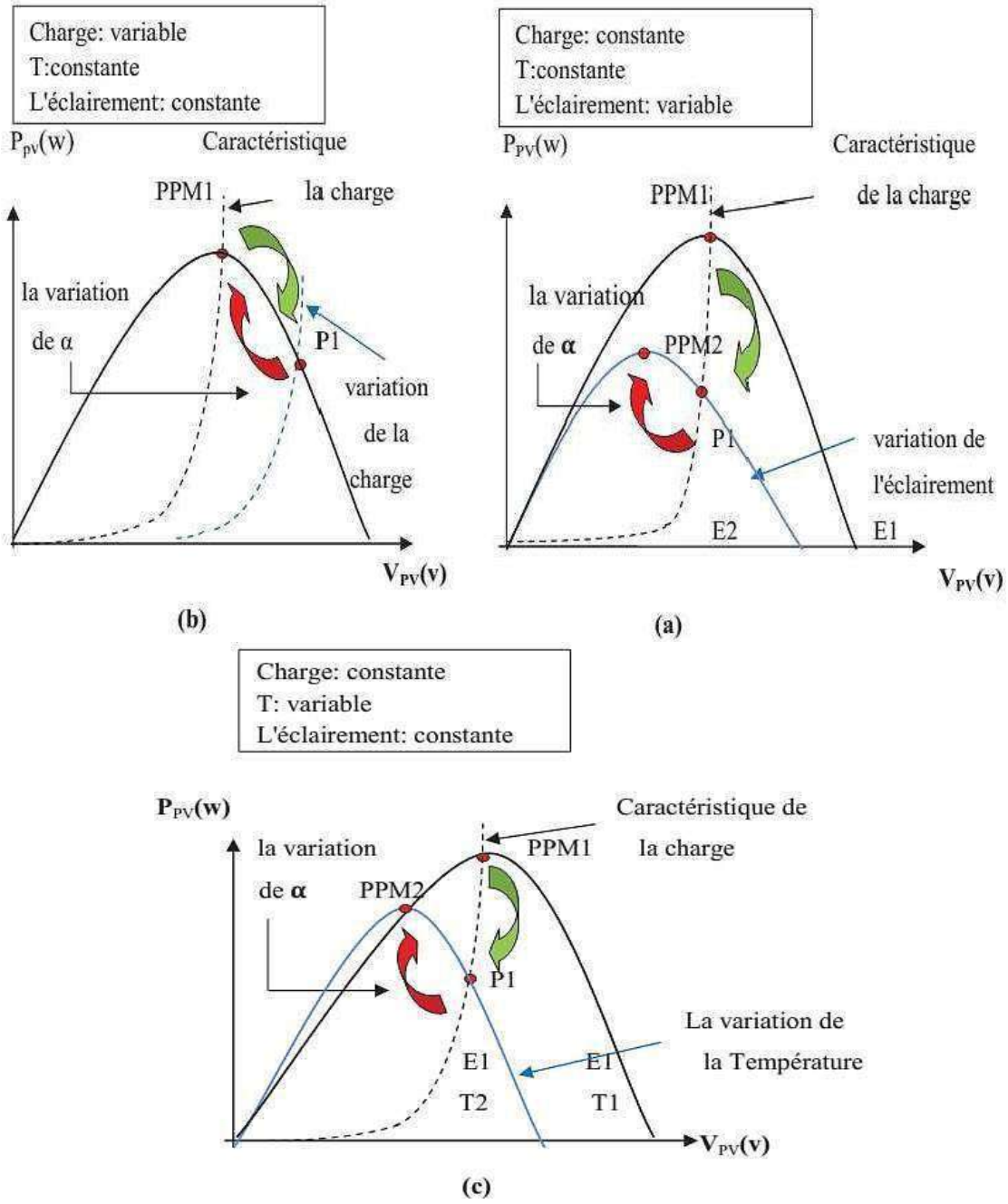



**Fig (III.3)** Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement,( b) suite à une variation de charge,( c) suite à une variation de température

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [21].

## III.3. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

### III.4.1 Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement…) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

#### III.4.1.1 Méthode de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert Voc. La constante proportionnelle k1, dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{VMPP}{V_{OC}} < \text{cte} \qquad \text{(III.1)}$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (III.1). et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k1.

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

### III.4.1.2. La méthode de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existante entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{0C}} \approx cte < 1 \qquad (III.2)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

### III.4.2. Méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance ….

### III.4.2.1. Méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte Ainsi, comme l'illustre la figure (III.4), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV(VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

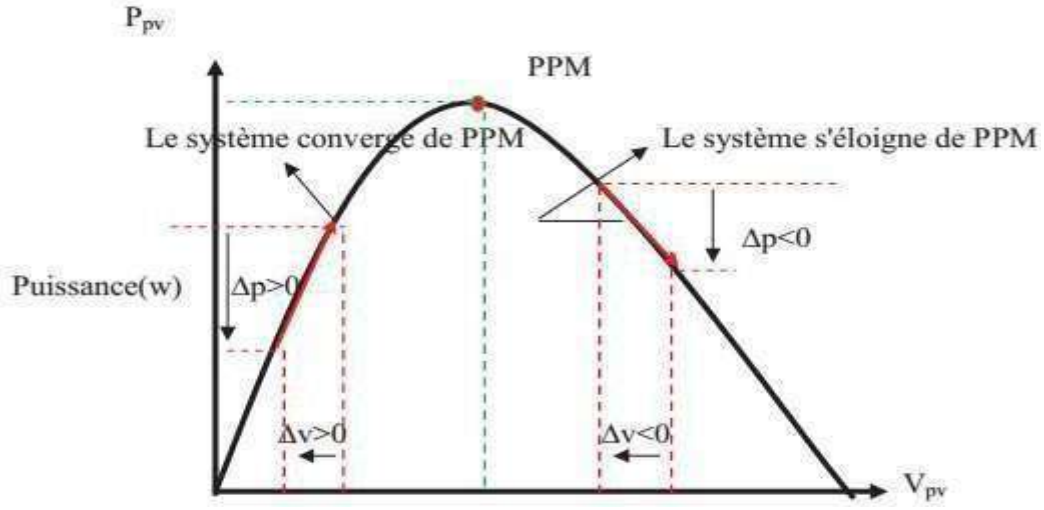



**Fig (III.4)** Schéma de converge vers le PPM par P&O

La figure III.5 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

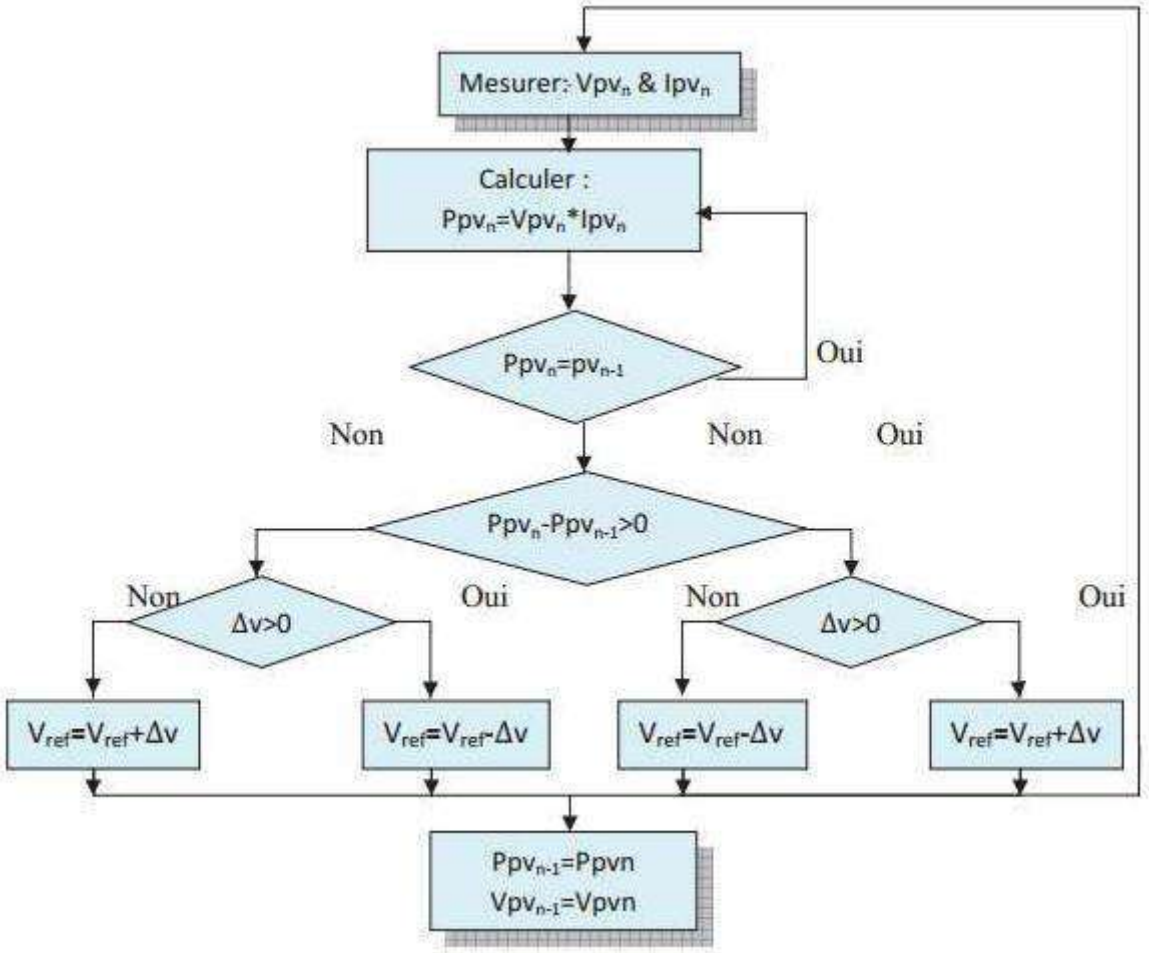



**Fig (III.5)** Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O la nouvelle puissance Ppvn

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant[22].

$P_{pvn-1}$: l'enceint puissance dans le temps ($t$-1)

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1} \quad \text{(III.3)}$$

$$\Delta P = PV_{PVn} - P_{PVn-1} \quad \text{(III.4)}$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée d'une part sa facilité d'implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser[22].

### III.4.2.2. Méthode incrémentation de la conductance

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [23].

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par:

$$P_{PV_n} = I_{PV}.V_{PV} \quad \text{(III.5)}$$

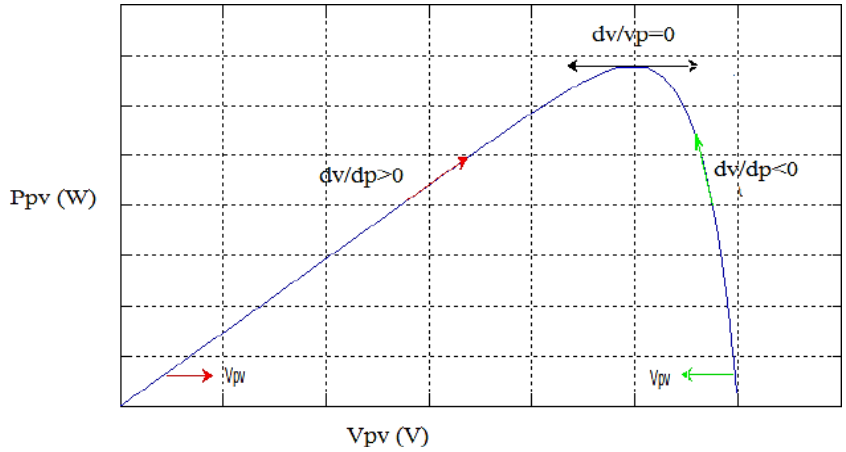
La conductance et l'incrémentation de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension Ppv:

$$\frac{1}{V}\frac{dP_{P7}}{dV_{P7}} = -\frac{I_{P7}}{V_{P7}} + \frac{dI_{P7}}{dV_{P7}} \quad \text{(III.6)}$$

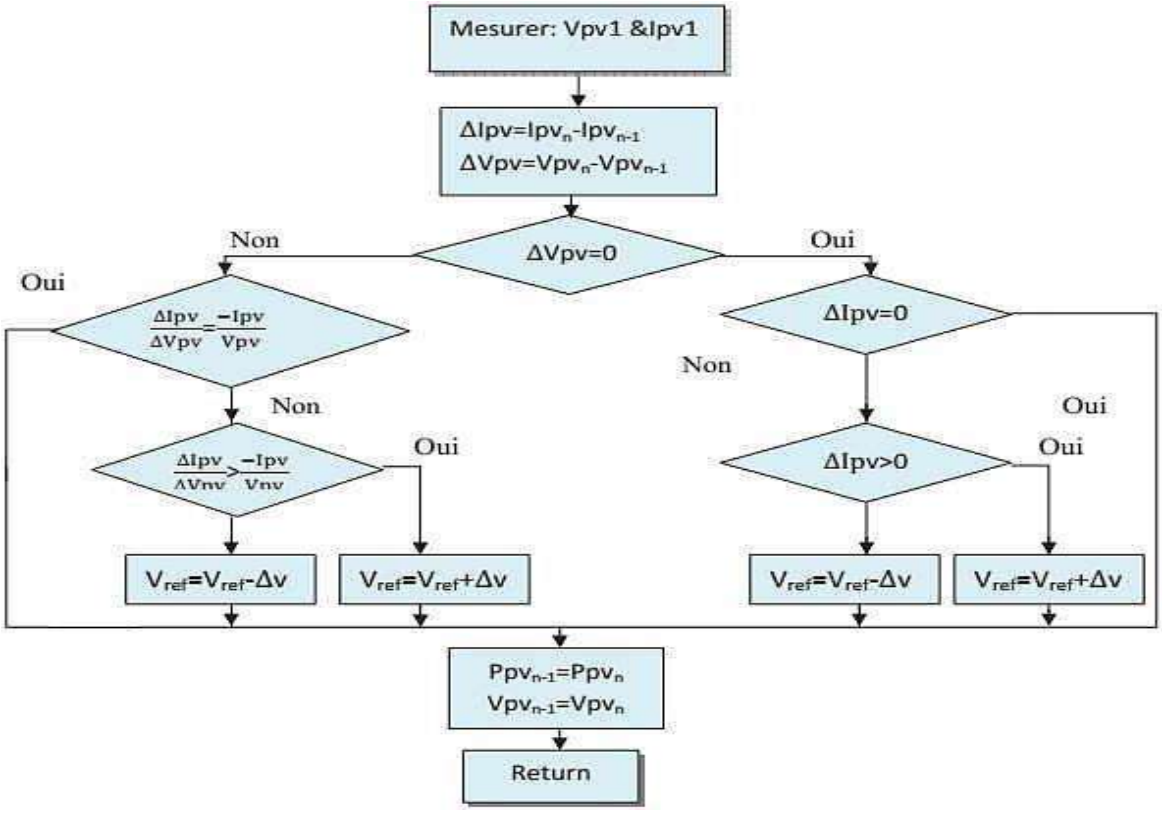
Ainsi on a noté avec G la conductance et avec G l'incrément de la conductance:

$$G = \frac{I_{P7}}{V_{P7}} \quad \text{(III.7)}$$

$$\Delta G = \frac{dI_{P7}}{dV_{P7}} \quad \text{(III.8)}$$




**Fig(III.6)** Trajectoire par Incrémentation de Conductance




**Fig(III.7)** Algorithme d'incrémentation de la conductance

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0$ :Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

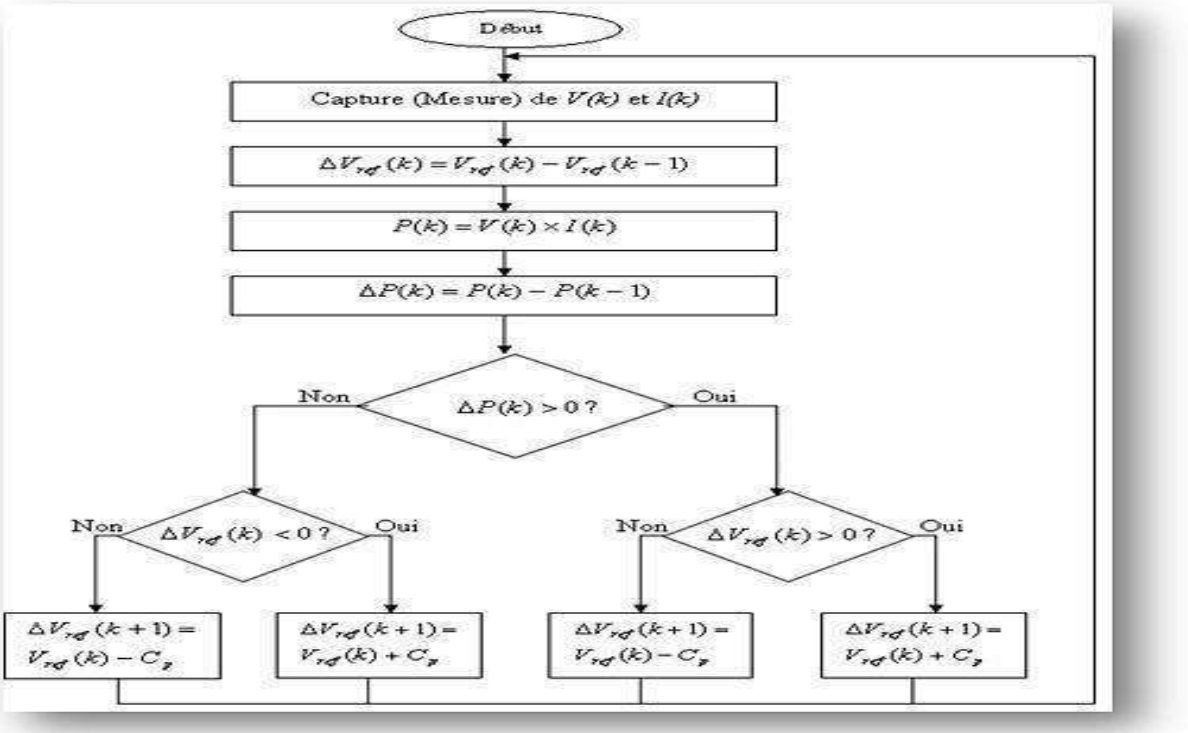
$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ :Le point de fonctionnement sur le PPM

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0$ :Le point de fonctionnement est droit de PPM

## III.5. Structure et simulation de la commande MPPT « P&O »

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [24].

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque Vpv et Ipv respectivement. Sur la figure (III.8), on a représenté le schéma la méthode MPPT « perturbation- observation » (p&o).[25] Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.




**Fig(III.8)** Algorithme de la méthode MPPT « Perturbation-Observation » (P&O)

# III.6. Simulation d'un GPV en mode autonome

## III.6.1. Utilisation de la commande PO-MPPT

La figure **(III.9)** ci-dessous représente le schémas de simulation d'un GPV avec la commande PO-MPPT :

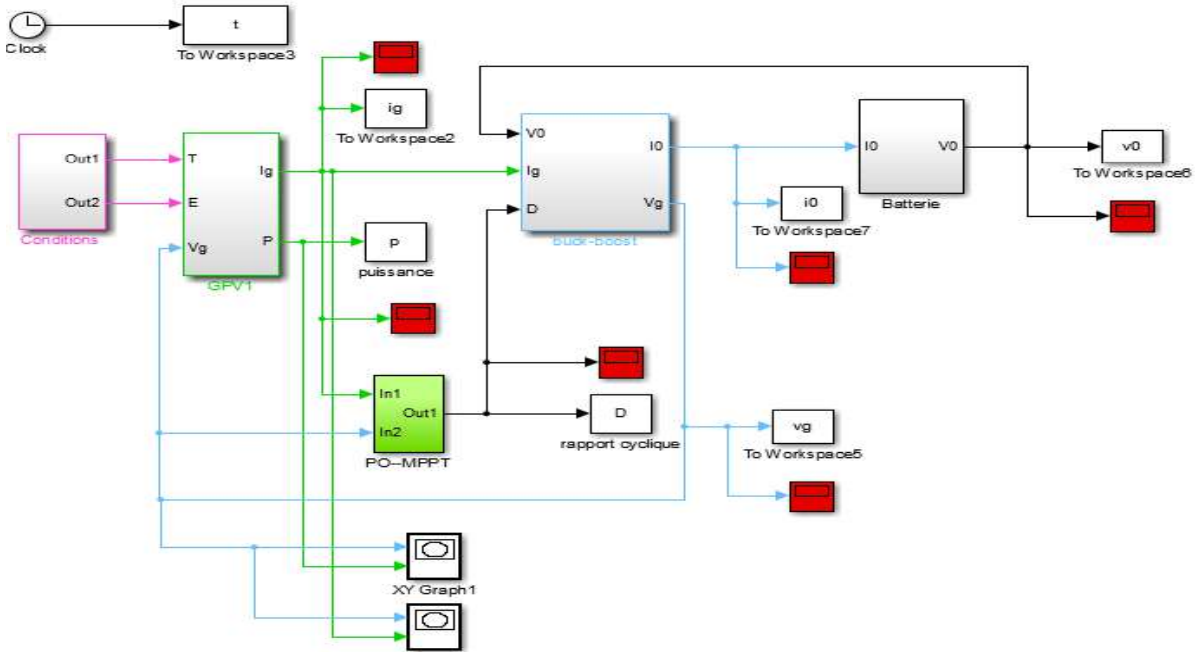
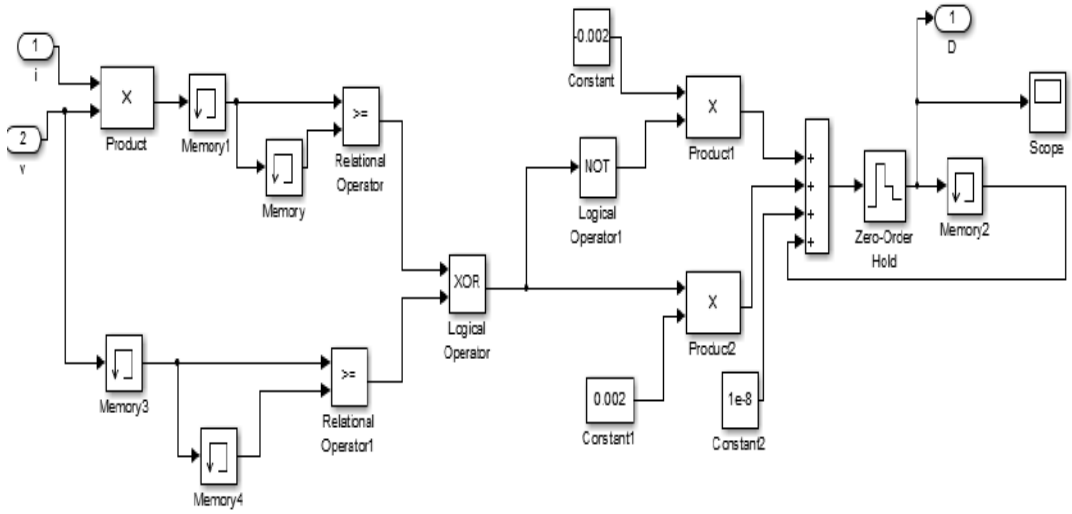
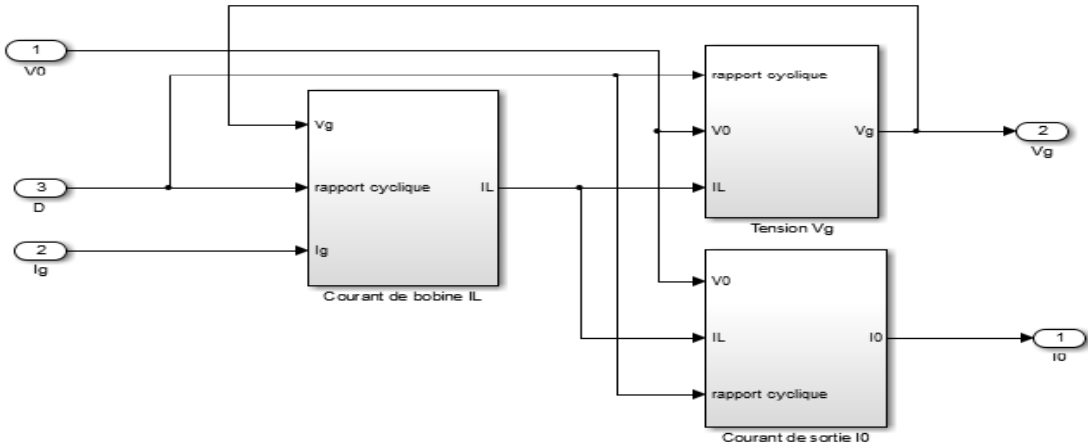



**Fig (III.9)** Schéma block d'un (GPV-Buck/boost-Battérie) avec la commande PO-MPPT

Le bloc PO-MPPT et donné par :

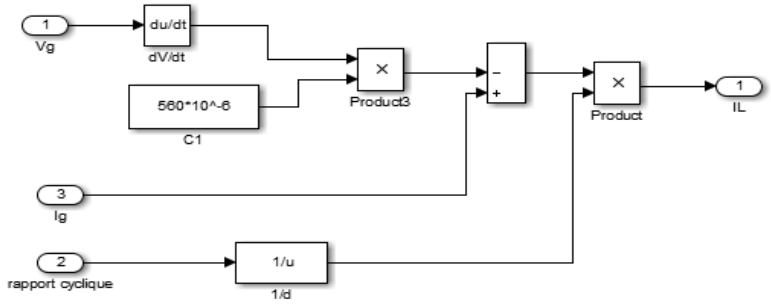



Le model moyenne du convertisseur Buck-Boost est donné par les figures suivantes:

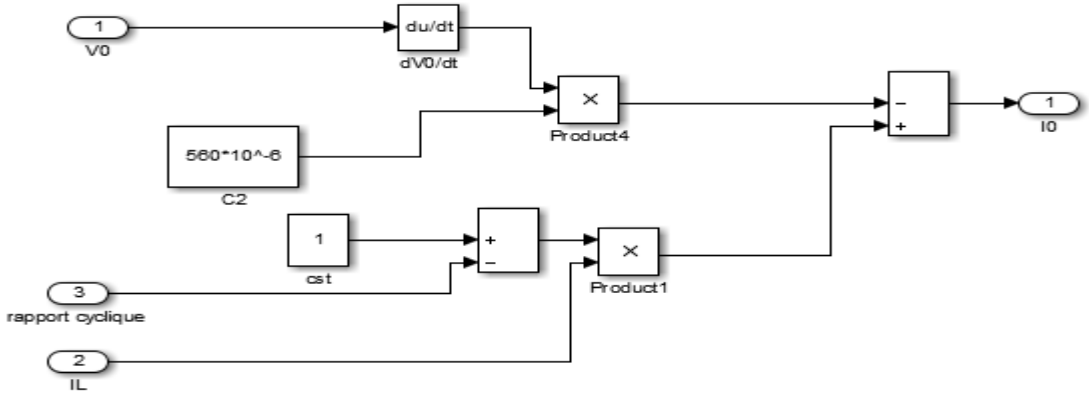



Bloc convertisseur buck-boost

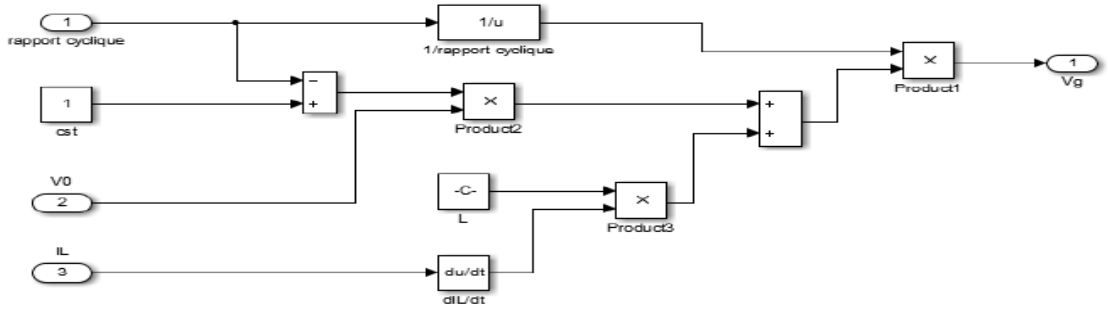
Avec:




Boucle du courant de l'inductance

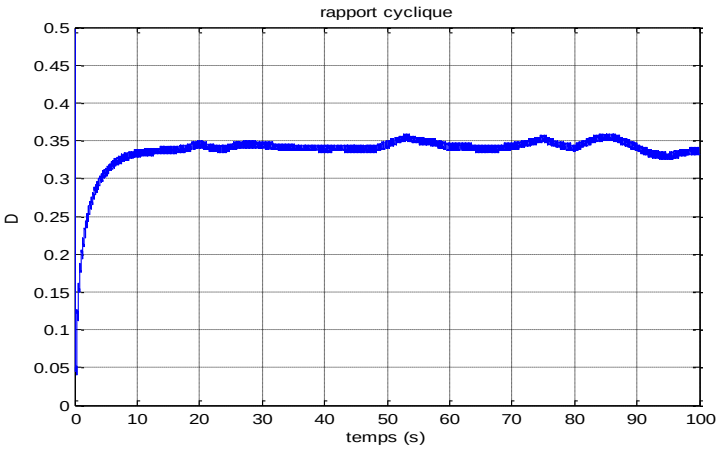


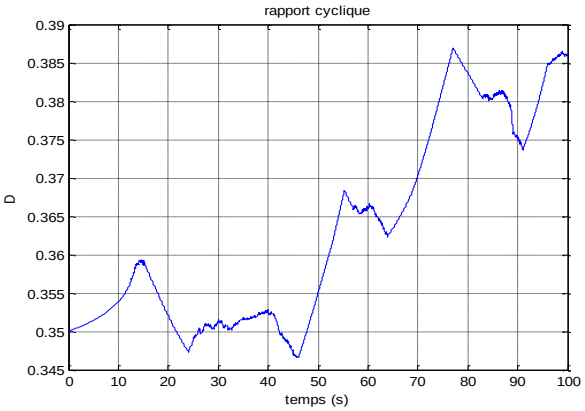

Boucle de courant de sortie

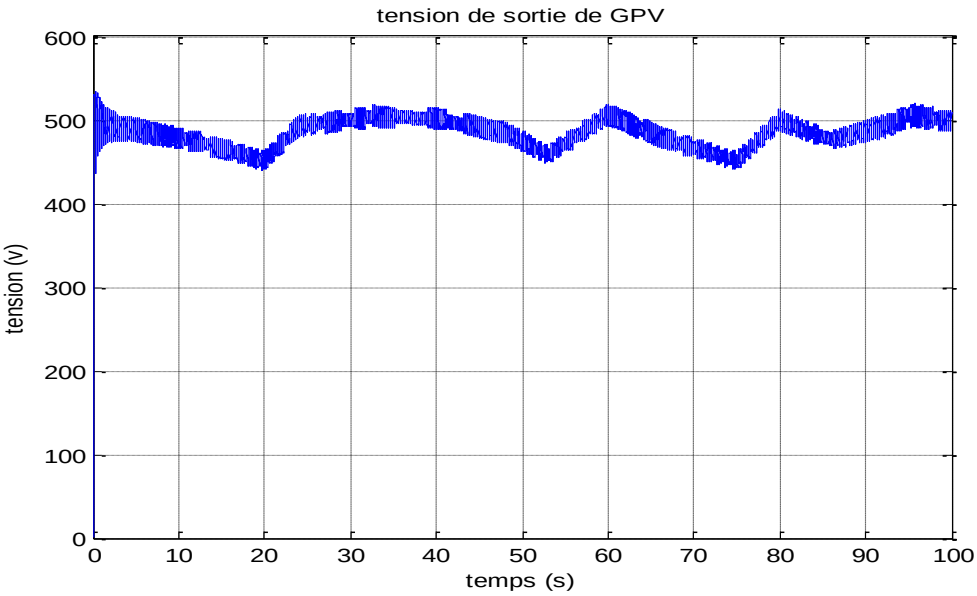


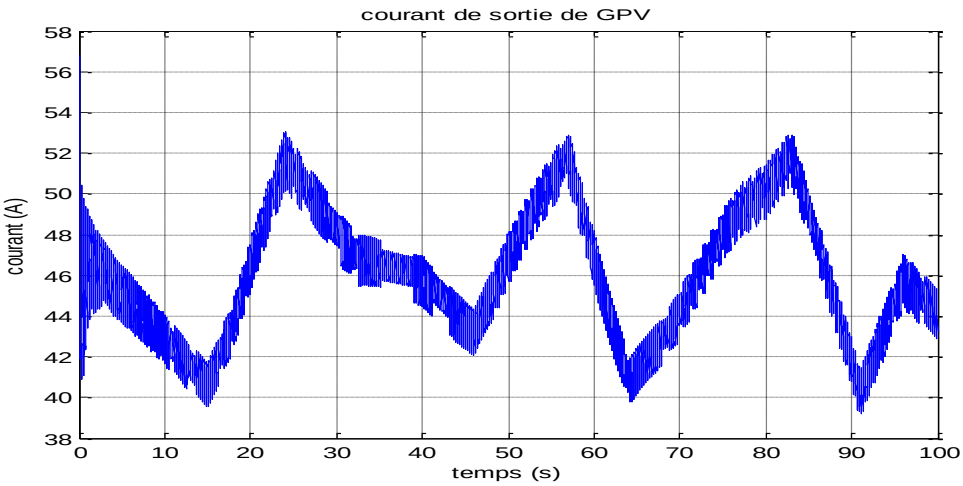

Boucle de calcule de tension d'entrée du convertisseur (injecté au GPV)

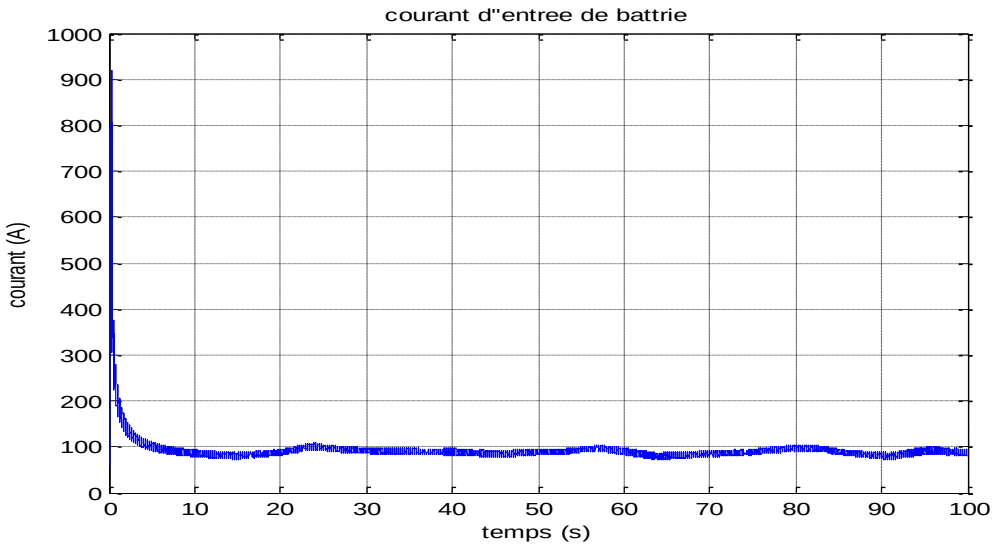
Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes:

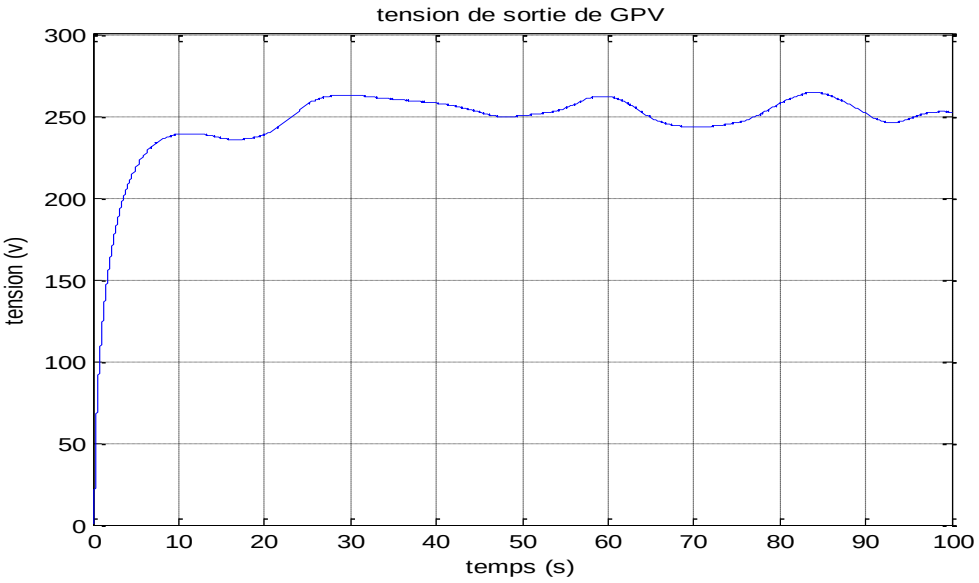


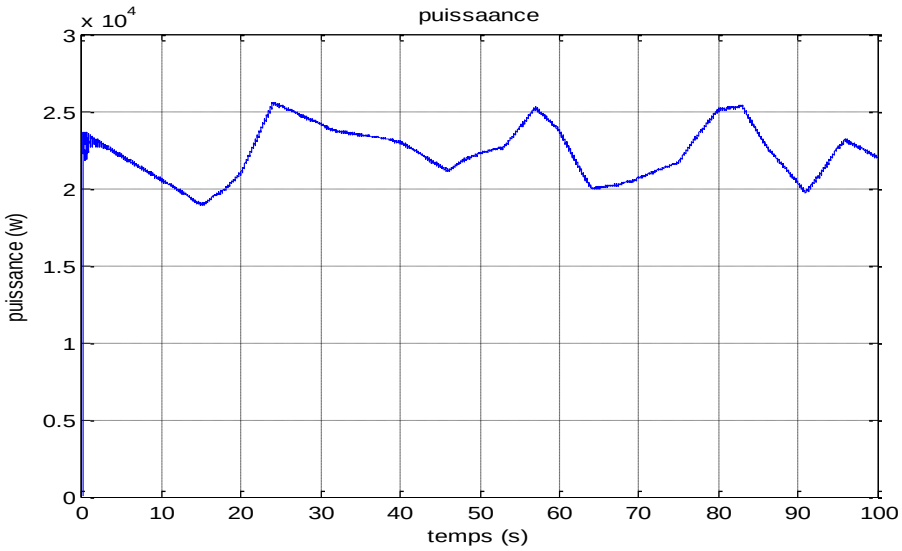




courant d''entree de battrie
courant (A)
temps (s)


tension de sortie de GPV
tension (v)
temps (s)


puissaance
x 10^4
puissance (w)
temps (s)

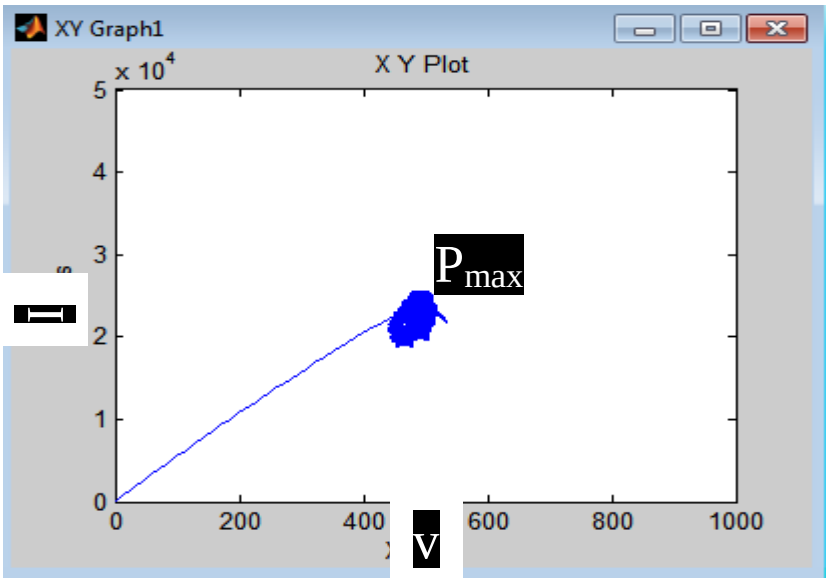



**Fig (III.10)** Résultats de simulation de l'ensemble (GPV-Buck/boost-Battérie) avec la commande PO-MPPT

## III.6.2 Utilisation de la commande INC-MPPT

Le schéma global de simulation du GPV avec la commande INC-MPPT

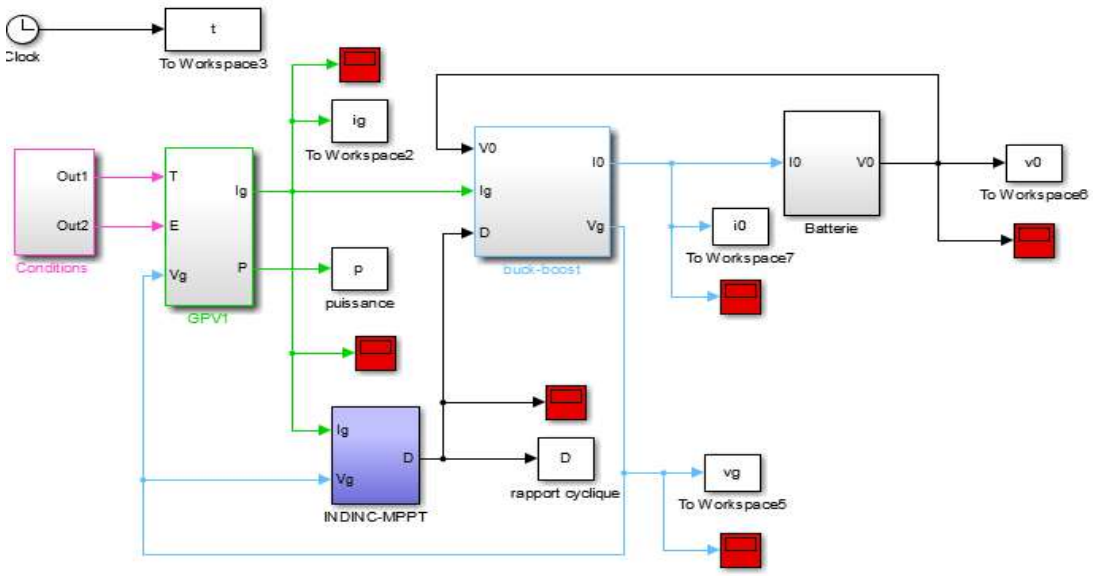
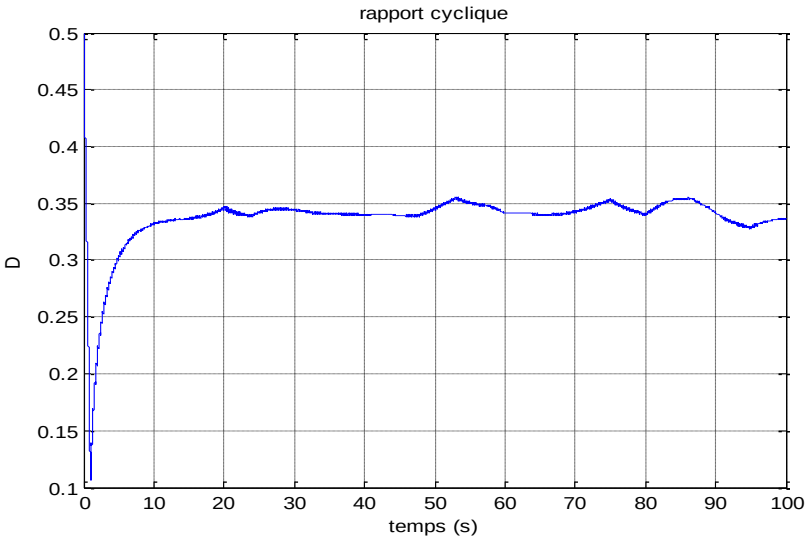
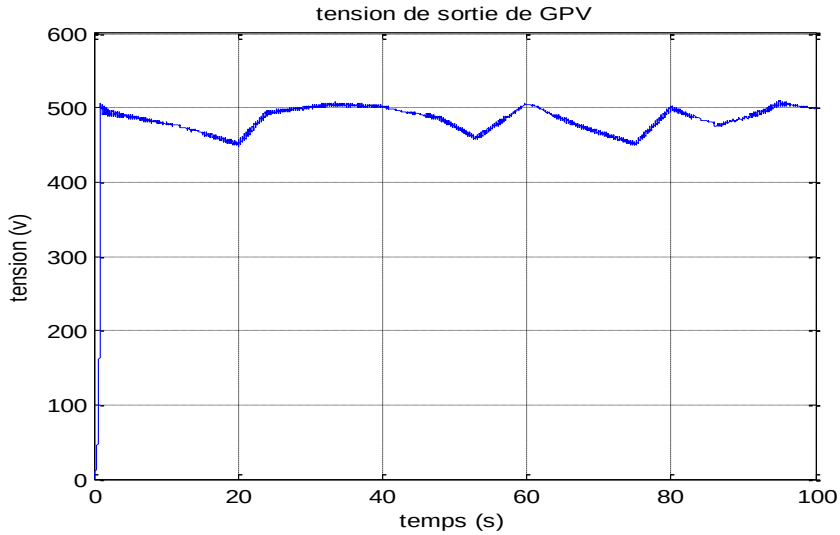
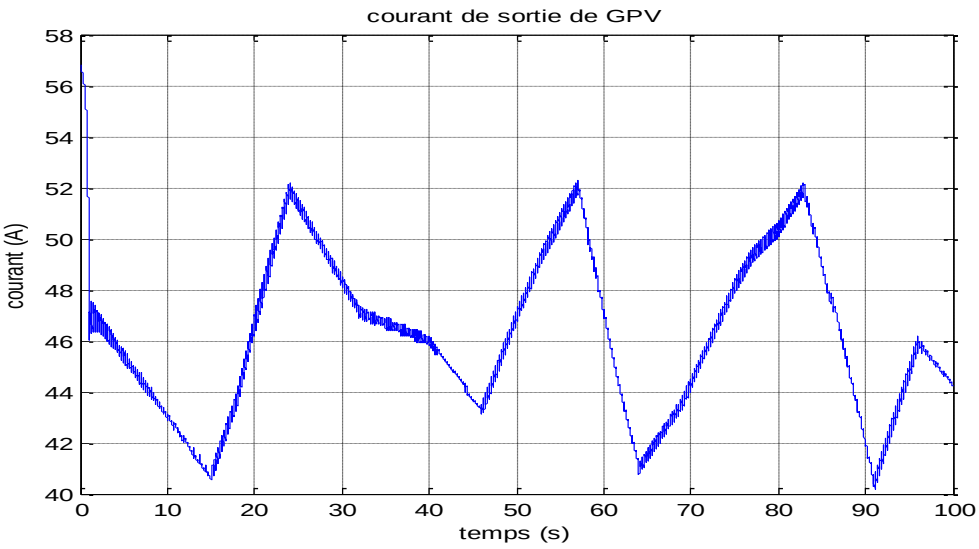


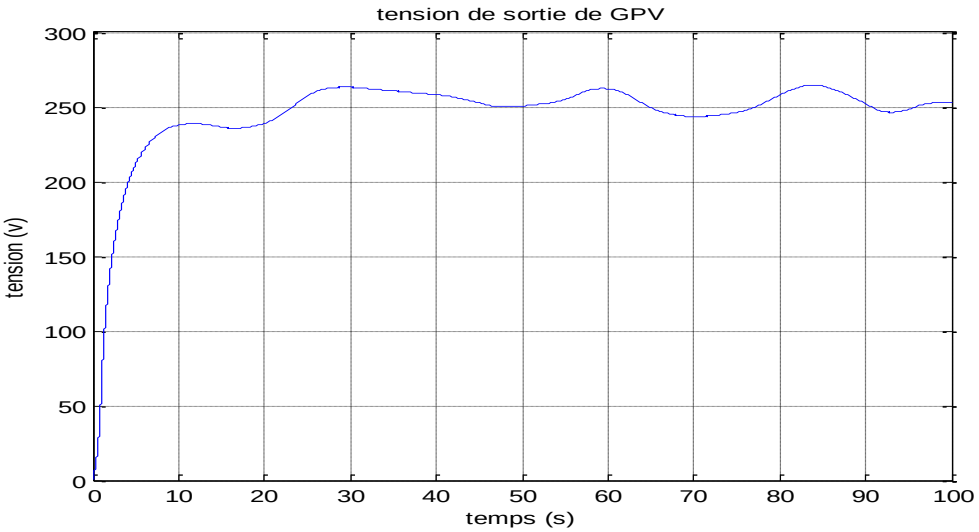

**Fig (III.11)** Schéma block d'un (GPV-Buck/boost-Battérie) avec la commande INC-MPPT

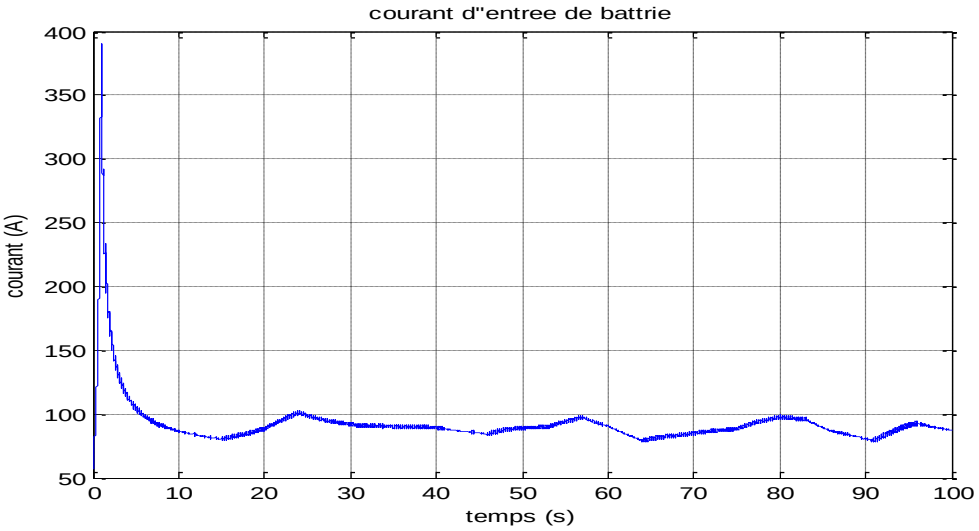
On peut conclure finalement, les résultats des simulations sont les suivantes:

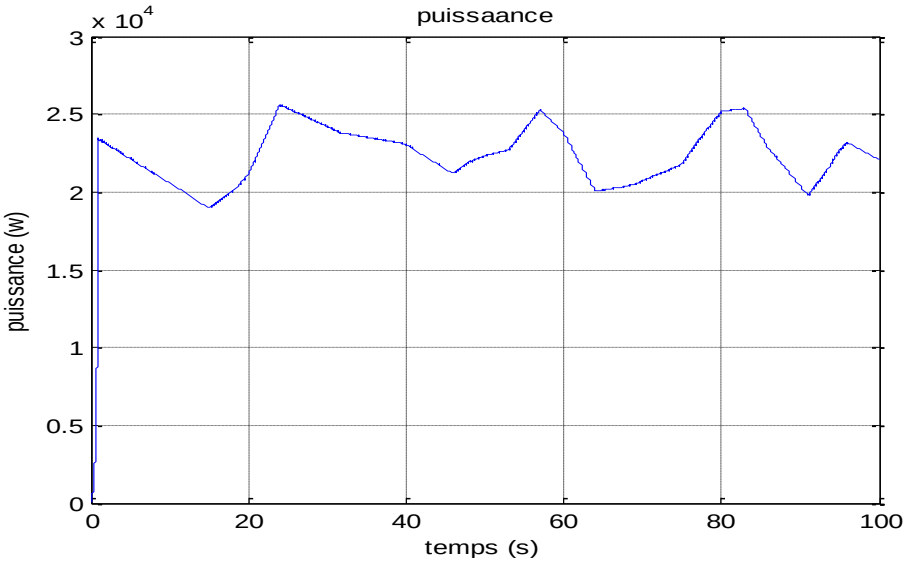

rapport cyclique
D
temps (s)
0.5
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100


tension de sortie de GPV
tension (v)
temps (s)
600
500
400
300
200
100
0
0
20
40
60
80
100


courant de sortie de GPV
courant (A)
temps (s)
58
56
54
52
50
48
46
44
42
40
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100


tension de sortie de GPV
tension (v)
temps (s)
0
50
100
150
200
250
300
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100


courant d''entree de battrie
courant (A)
temps (s)
50
100
150
200
250
300
350
400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100


puissaance
x 10^4
puissance (w)
temps (s)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
0
20
40
60
80
100

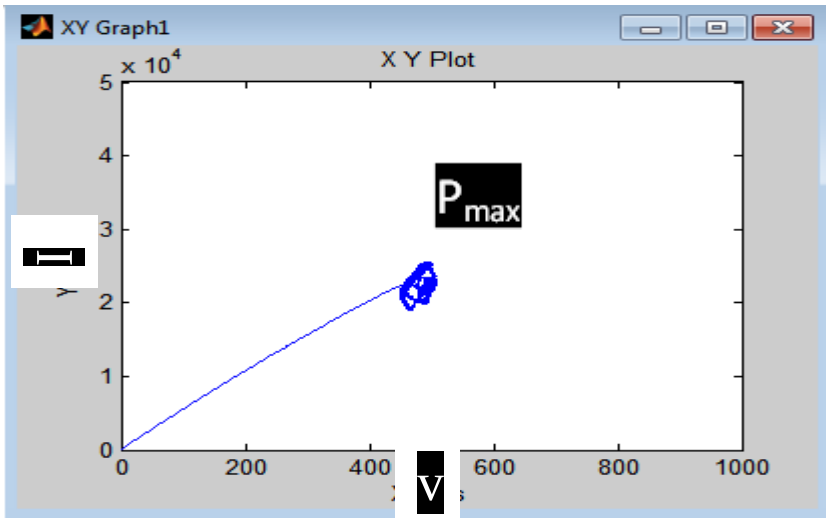



**Fig (III.12)** Résultats de simulation de l'ensemble (GPV-Buck/boost-Battérie) avec la commande INC-MPPT [ P=25 KW avec V=500 V ]

Les résultats obtenus, Figure III.10 et Figure III.12, montrent que le contrôle à base INC-MPPT répond correctement aux caractéristiques du panneau. La puissance électrique générée par le panneau solaire et toujours maintenue à sa puissance maximale, quelles que soient les conditions atmosphériques.

Les résultats de simulations montre que grâce au INC-MPPT la batterie est charge rapidement Par rapport PO-MPPT avec le maximum de puissance disponible. Algorithme basé sur INC-MPPT est une technique robuste et efficace qui fonctionne au point optimal.

## III.7. Conclusion

La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire. Il existe un MPP (Maximum power point) où la puissance est maximale. On utilise donc des régulateurs qui font la poursuite de ce point (MPPT) afin de délivrer le plus de puissance possible à batterie cette fonction est souvent réalisée par microcontrôleurs. Dans une boucle, l'algorithme mesure la tension et le courant du générateur pour calculer la puissance fournie, puis fait varier lesignal MLI du régulateur à découpage afin de maximiser la puissance délivrée par le panneau solaire à la batterie .

# CONCLUSION GENERALE

Le but ciblé par cette étude est une de faire une étude comparative entre des méthodes de commande P&O MPPT, et INC MPPT applique au générateur photovoltaïque avec batterie en mode autonome. L'objectif principal consiste à mettre en évidence la méthode qui aboutit à l'extraction de la puissance maximale à partir du panneau PV. Pour atteindre cet objectif, après avoir présenté des généralités sur les systèmes PV, nous avons commencé par la modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque. Le modèle obtenu formalise un regroupement de cellules en série ou en parallèle en se basant sur les caractéristiques du panneau étudié.

La présentation de ce modèle nous a permis d'élaborer deux schémas Matlab/Simulink de notre système (P&O MPPT, et INC MPPT) en mode autonome. Nous nous sommes intéressés au problème de maximisation de la puissance délivrée par générateur PV. Les résultats montrent que toutes les méthodes testées sous les conditions atmosphériques standards atteignent le point MPP avec succès. Les résultats de simulation nous ont montré que les deux techniques « P&O » et « INC » converge vers optimum local.. D'après cette étude, on peut dire que :

- Le convertisseur statique DC-DC est un convertisseur idéal pour le système. Il permetd'avoir une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le GPV.
- L'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer le rendement desinstallations PV.

Comme perspectives on propose la commande floue optimisée par le PSO donne des résultats beaucoup plus meilleurs et converge vers le MPP. Cette étude peut trouver son application dans le cas d'un système au fil du soleil (exemple une pompe d'irrigation).Notre étude peut être développée en adoptant les perspectives suivantes :

- Introduire une deuxième source renouvelable
- Raccordé le système avec au réseau électrique
- Conception d'un contrôleur floue ainsi l'utilisation du PSO permet d'optimiser ce contrôleur.

# Bibliographie

[1] Salama fateh , Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, Mémoire de Magister , UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF , 2011

[2] Y. JAUTARD, T. BOUDOL, L'électricité photovoltaïque, Site Internet "Architecture et énergies renouvelables", 2000.

[3] Anne, Labouret, Michel, Villoz., Energie photovoltaïque. (Dunod 3eme édition 2006). Bernard Eque, Energie solaire photovoltaïque (Ellipses 2004).

Sheik Mohammed, S., 2011. Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/ Simulink . Int. J. Chem. Environ. Eng. 2

[4] Huan-Liang Tsai., Ci-Siang Tu., Yi-Jie Su., 2008. Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/Simulink. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science October 22 - 24, San Francisco, USA.

[5] Chouder, A. Rahmani, L. Sadaoui, N. Silvestre, S. 2012. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. Simul. Model. Pract. Theory 20, 46–58.

[6] Beckman, W.A. Klein, S.A. Kou, Q. A method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled PV Pumping Systems, University Of Wisconsin Solar Energy Laboratory. 1500 Engineering Drive, Madison, U.S.A.

[7] De Soto, W. 2006. Improvement And Validation Of A Model For Photovoltaic Array Performance By Solar Energy, 80, 78-88.

[8] Bryan F. 1999, Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems. MS thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.

[9] Townsend, T.U. 1989, Method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Photovoltaic Systems. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. Of Wisconsin-Madison.

[10] BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Université

Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.

[11] A. Lyes, "Etude de connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011

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

[13] 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.

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

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

[16] S.ABADA "Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic" Mémoire Maître es Sciences, Université Laval, 2011.

[17] C. CABAL "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque" Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008

[18] M.ARROUF "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque", thèse doctorats université de Constantine,2007.

[19] - A. Hammidat, A. Hadj Arab et M.T. Boukadoum « Performances et coûts des systèmesde pompage PV en Algérie », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 157 - 166).

[20] - R. Abdessemed, M .Kadjoudj « Modélisation des machines électriques », presse del'universite de Batna 1997

[21] - B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïqueellipses 1993

[22] - Ch.P.De, Brichabaut, Ch.Yauge « le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique», Technique et documentation Lavoisier 1982.

[23] - B.Azoui «Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solarapplication », Thesis of doctorat of science, University of Batna 2002.

[24] - A. Saadi and A. Moussi « Neural Network Use in the MPPT of Photovoltaic PumpingSystem », Rev. Energ. Ren. ICPWE (2003) 39-45

[25] - K. Benlarbi « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.

# ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو إجراء دراسة مقارنة بين طرق التحكم **P&O MPPT** و **INC MPPT** المطبقة على المولد الكهروضوئي المزود ببطارية في الوضع المستقل.

الهدف الرئيسي هو إبراز الطريقة التي تؤدي إلى استخراج الطاقة القصوى من اللوحة الكهروضوئية.

لتحقيق هذا الهدف ، بعد تقديم العموميات على الأنظمة الكهروضوئية ، بدأنا بالنمذجة الرياضية للوحة الكهروضوئية وبعدها قمنا بمحاكاة التحكم **MPPT** للمولد الكهروضوئي.

**الكلمات المفتاحية:** مولد كهروضوئي ، تحكم بنقطة الاستطاعة القصوى ، تشويش و ملاحظة ، زيادة المواصلة .

## Résumé :

Le but ciblé par cette étude est une de faire une étude comparative entre des méthodes de commande P&O MPPT, et INC MPPT applique au générateur photovoltaïque avec batterie en mode autonome.

L'objectif principal consiste à mettre en évidence la méthode qui aboutit à l'extraction de la puissance maximale à partir du panneau PV.

Pour atteindre cet objectif, après avoir présenté des généralités sur les systèmes PV, nous avons commencé par la modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque et après on a fait la Simulation de la commande MPPT du générateur photovoltaïque.

**Mots clés:** GPV , commande MPPT , P&O , INC

## Abstract:

The purpose of this study is to make a comparative study between control methods P&O MPPT, and INC MPPT applied to the photovoltaic generator with battery in autonomous mode.

The main objective is to highlight the method that results in the extraction of the maximum power from the PV panel.

To achieve this objective, after having presented generalities on PV systems, we started with the mathematical modeling of a photovoltaic panel and then we did the Simulation of the MPPT control of the photovoltaic generator.

**Key words:** GPV , MPPT command , P&O , INC