

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou



Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electronique



Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique
Spécialité : Matériaux et Dispositifs Electroniques et Photovoltaïques

Thème

**Modélisation et simulation d'un panneau
photovoltaïque sous MATLAB-SIMULINK.**

Proposé et diriger par :

Mme. Kahina LAGHA

Présenté par:

- **Mahdia TANSAOUT**
- **Silia KHEMMAR**

Mémoire soutenu publiquement le 28/09/2016 devant le jury composé de :

Mr. ZIRMI Rachid : Maitre de conférences à l'UMMTO.

Mme. NEMMAR Farida : Maitre de conférences à l'UMMTO.

Mme. BOUMEDINE Fazia : Maitre Assistant à l'UMMTO.

Mme. LAGHA Kahina : Maitre de conférences à l'UMMTO.

Promotion 2015/2016

Remerciements

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

*Nous tenons à remercier vivement Mme. KAHINA.LAGHA.M notre
promotrice qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses
conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury
pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre
soutenance.*

*Nos vifs remerciements aussi à Mr.DJOUDI, Mr. SI BRAHIM
MADJID ,enseignants au Département d'Électrotechnique
EtMr.ZIRMI.RACHID, enseignant au Département d'électronique.*

*pour leurs précieux conseils et leur disponibilité. Et tous les
enseignants de Département de Génie Électrique.*

*Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de
loin à l'élaboration de notre mémoire.*

*Enfin, Nous remercions, tous ceux qui nous ont permis d'arriver à ce
stade nos parents et nos amis, pour leur soutien et encouragements.*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protège
pour leurs soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mes frères: Hakim, Saïd, Aghilas.

A mes sœurs : Sylia , Radia.

A mon très chère mari :Mohand

A ma belle-mère et beau-père.

A ma belle-sœur et beau-frère.

Mes tantes et mes oncles.

A ma Grand-mère et grand père .

Aux chers amis (es).

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



Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------	----------

<u>Chapitre 1 : Rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque</u>
--

1.1. Introduction	3
1.2. Rayonnement solaire	3
1.2.1. Généralités sur le soleil	3
1.2.2. Energie solaire	4
1.2.3. Le nombre de masse d'air	6
1.2.4. Le spectre du rayonnement extraterrestre	7
1.2.5. Durée d'insolation	8
1.2.6. Spectre solaire	9
1.2.7. Types de rayonnement	9
1.2.8. Position du soleil	11
1.2.9. Coordonnées géographiques terrestres	12
1.3. L'effet photovoltaïque	13
1.3.1. Les matériaux semi-conducteurs	14
1.3.2. Dopage	15
1.3.3. Jonction PN	17
1.3.4. Polarisation de la jonction PN	18
1.4. Cellule photovoltaïque	19

1.4.1. Fonctionnement de cellule photovoltaïque	19
1.4.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	20
1.4.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	23
1.4.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	24
1.5. Générateur photovoltaïque et ses performances	26
1.5.1. Caractéristique Courant-Tension	27
1.5.2. Influence de l'association série ou parallèle des cellules PV	28
1.6. Conclusion	31

Chapitre 2 : Le système photovoltaïque

2.1. Introduction	32
2.2. Système de régulation	32
2.2.1. Régulateur de charge	32
2.2.2. Fonctions du régulateur de charge	33
2.2.3. Principaux types de régulateur de charge	33

2.2.4. Rendement du régulateur	35
2.3. Système de stockage	36
2.3.1. Les Caractéristiques principales d'une batterie	36
2.3.2. Types d'accumulateurs	38
2.4. Système de conversion	42
2.4.1. Le convertisseur continu - continu	42
2.4.2. Le convertisseur continu-alternatif	42
2.5. La Charge	45
2.6. Conclusion	46

Chapitre 3 . La commande MPPT

3.1. Introduction	47
3.2. Convertisseur DC-DC	48
3.2.1. Convertisseur élévateur (boost)	48
3.2.2. Convertisseur buck	49
3.2.3. Convertisseur buck-boost	50
3.3. Couplage avec convertisseur MPPT	50
3.3.1. La commande MPPT	50
3.3.2. Principe de la commande MPPT	51
3.3.3. Différents types de MPPT	51
3.4. Conclusion	57

Chapitre 4 . Modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque

4.1. Introduction	58
4.2. L'outil Matlab/simulink	58
4.3. Modélisation du GPV	60
4.3.1. Modélisation du générateur PV idéal	60
4.3.2. Modélisation d'une Cellule photovoltaïque réel	61
4.4. Module photovoltaïque MSX-60 de SOLAREX	64
4.5. Résultats des simulations	71
4.5.1. Influence de la température sur le module	72
4.5.2. Influence de l'éclairement sur le module	73
4.5.3. Influence de R_s et R_p sur le module	75
4.6. Conclusion	79
Conclusion générale	80

Listes des symboles

E_{ph} : Energie du photon.

λ_0 : longueur d'onde (m).

C : vitesse de la lumière (m/s).

h : Constante de Planck ($6.62 \cdot 10^{-34}$ j.s).

G : Eclairement (W/m^2).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_0 : Courant de saturation (A).

V : est la tension aux bornes de la cellule (V).

P_{pv} : puissance délivrée par le générateur photovoltaïque(W).

n : le facteur d'idéalité de la jonction.

V_t :Tension thermique.

q : La charge électrique($1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

K :constante de Boltzman($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T :La température effective des cellules en kelvin.

R_s : Résistance série ().

R_p :La résistance parallèle ou shunt ().

k_i : Le coefficient de courant en fonction de température ($A/^\circ C$).

k_v :Le coefficient de tension en fonction de température(V/C)

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

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

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

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{\max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{\max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

I :courant de sortie en (A).

P_{inc} :puissance incidente.

C :capacité (AH).

Abréviations Utilisés

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

Nss :nombre de module en serie.

Npp : nombre de module en parallèle.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

Liste des figures :

Figure	Titre	Page
Figure (1.1)	Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal.	4
Figure (1.2)	Les deux types d'énergie solaire.	5
Figure (1.3)	Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.	6
Figure (1.4)	Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.	7
Figure (1.5)	l'héliographe de Campbell– Stokes	8
Figure (1.6)	spectre électromagnétique.	9
Figure (1.7)	différents composants de rayonnement.	11
Figure (1.8)	Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.	12
Figure (1.9)	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire par effet photovoltaïque.	14
Figure (1.10)	dopage type N de silicium (Si).	16
Figure (1.11)	dopage type P de silicium (Si).	17
Figure (1.12)	jonction PN	17
Figure (1.13)	Jonction PN en polarisation directe et inverse.	18
Figure (1.14)	structure d'une cellule solaire.	19
Figure (1.15)	différents couches d'une cellule solaire.	20

Figure (1.16)	Type des cellules photovoltaïques.	22
Figure (1.17)	Schéma équivalent électrique de la cellule PV.	23
Figure (1.18)	Caractéristique de la cellule photovoltaïque dans le noir et sous éclairage.	27
Figure (1.19)	Caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque.	28
Figure (1.20)	la caractéristique résultante obtenue en associant en série des cellules identiques.	29
Figure (1.21)	la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles des cellules identiques.	30
Figure (1.22)	caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle cellules identiques.	31
Figure (2.1)	Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle.	34
Figure (2.2)	Schéma de principe d'un régulateur de charge série.	35
Figure (2.3)	Constitution d'une batterie monobloc.	39
Figure (2.4)	onduleur dans un système PV	43
Figure (2.5)	Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque.	44
Figure (2.6)	Filtrage de la tension par l'inductance de sortie.	45
Figure (3 .1)	Convertisseur continu-continu.	47
Figure (3 .2)	Schéma de base d'un convertisseur boost.	49
Figure (3 .3)	Schéma de base d'un convertisseur buck.	49
Figure (3 .4)	Schéma de base d'un convertisseur buck-boost.	50

Figure (3 .5)	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.	51
Figure (3 .6)	schéma du principe de la méthode.	52
Figure (3 .7)	Organigramme de la méthode «Perturbation et Observation».	53
Figure (3 .8)	principe de la méthode d'incrémentement de la conductance.	54
Figure (3 .9)	Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.	56
Figure (4.1)	bibliothèque simulink	59
Figure (4 .2)	Modèle de cellule photovoltaïque idéal	60
Figure (4 .3)	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	62
Figure (4.4)	représentation du schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc	64
Figure (4.5)	schéma block du courant I_{ph}	69
Figure (4.6)	schéma block du courant de saturation I_0	69
Figure (4.7)	schéma block du courant I_a	70
Figure (4.8)	schéma block du courant I	70
Figure (4.9)	Résultats de simulation des caractéristiques courant- tension Pour différentes température et un éclairement $G=1000W/m^2$	72
Figure (4.10)	Résultats de simulation des caractéristiques puissance-Tension pour différentes températures à un Eclairement $G=1000W/m^2$	73
Figure (4.11)	Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différentes Eclairéments à une Température $T=25^{\circ}C$	74

Figure (4.12)	Résultats de simulation des caractéristiques puissance-Tension pour différentes Eclairéments et à une Température $T=25^{\circ}\text{C}$	75
Figure (4.13)	Résultats de simulation des caractéristiques I-V Pour différent valeur de R_s	76
Figure (4.14)	Résultats de simulation des caractéristiques V-P Pour différent valeur de R_s	77
Figure (4.15)	Résultats de simulation des caractéristiques I-V Pour différentes valeurs de la résistance parallèle	78
Figure (4.16)	Résultats de simulation des caractéristiques V-P Pour différentes valeurs de la résistance parallèle.	79

Liste des tableaux :

Tableau	Titre	Page
Tableau (1.1)	Longueur d'onde du rayonnement solaire.	8
Tableau (1.2)	Les différents types des cellules avec leur rendement	23
Tableau (4.1)	Caractéristiques du panneau photovoltaïque SOLAREX MSX-60	65

Introduction générale :

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés, les sources fossiles sont l'origine de la production mondiale d'énergie. Par ailleurs ces sources, après consommation, donnent lieu à des gaz à effet de serre causant la pollution de l'atmosphère terrestre en plus de l'affaiblissement des réserves naturelles en ces ressources avec une consommation excessive, ce qui affecte les générations futures.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par ces sources fossiles, on cite : (l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la biomasse...)

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet, on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

L'Algérie est un pays qui dispose de sources potentielles importantes en matière d'énergies renouvelables, même si leur contribution ne représente, pour le moment, pas plus de 2% de l'ensemble de la production électrique nationale. Notre gouvernement entend s'investir pleinement dans les énergies renouvelables. Un nouveau programme de développement sur ce secteur, se résumant à une soixantaine de projets (en grande majorité solaire), avec comme objectif, à l'horizon 2025, la production d'électricité de l'ordre de 3.000MW et une couverture de 40% des Besoins d'électricité du pays en 2030.

La conversion de l'énergie solaire en électricité se fait grâce à la cellule photovoltaïque. L'association de ces cellules en série ou en parallèle constituent un panneau photovoltaïque qui est l'élément essentielle du système de conversion de l'énergie solaire. Les performances de ce système dépendent fortement des conditions météorologiques telles que la température, l'éclairement solaire et le vent.

La simulation des modules photovoltaïques est un moyen qui permet d'étudier l'influence des conditions climatiques sur les performances des modules PV.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé le modèle de la cellule solaire à une seule diode à fin de simuler avec MATLAB Simulink les effets de la température, de l'éclairement et des résistances série et parallèles sur les caractéristiques puissance-tension et courant- tension du panneau solaires MSX60 de SOLAREX.

Dans le premier chapitre nous présentons le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque.

Les différents composants du système photovoltaïque (système de régulation, système de stockage, système de conversion et la charge) sont détaillés dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Aussi, nous avons décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC basée sur la contre réaction de puissance.

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation et la simulation par MATLAB-SIMULINK du générateur photovoltaïque Solarex (MSX60).

1.1 Introduction :

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

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre une étude théorique sur le rayonnement solaire et un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances. [1]

1.2 : Rayonnement solaire :

1.2.1 : Généralités sur le soleil :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1392870 km, soit environ 109 fois celui de la terre. Il est composé à 74% d'hydrogène, 25 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.[2]

Sa lumière, à une vitesse de 299 792 458 m/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la Terre. Sa distribution spectrale présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m :

- Diamètre de soleil $D_s = 1.39 \cdot 10^9 \text{ m} = 1,39 \cdot 10^6 \text{ Km}$.

- Diamètre de la terre $D_T=1.27 \cdot 10^7\text{m}=1.27 \cdot 10^4\text{Km}$.
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{TS}=1.5 \cdot 10^{11}\text{m}=1.5 \cdot 10^8\text{Km}$. [2]

Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à 2500 KWHh/m² par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes (Voir Figure I.1). La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que 0,5 % de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire. [3]

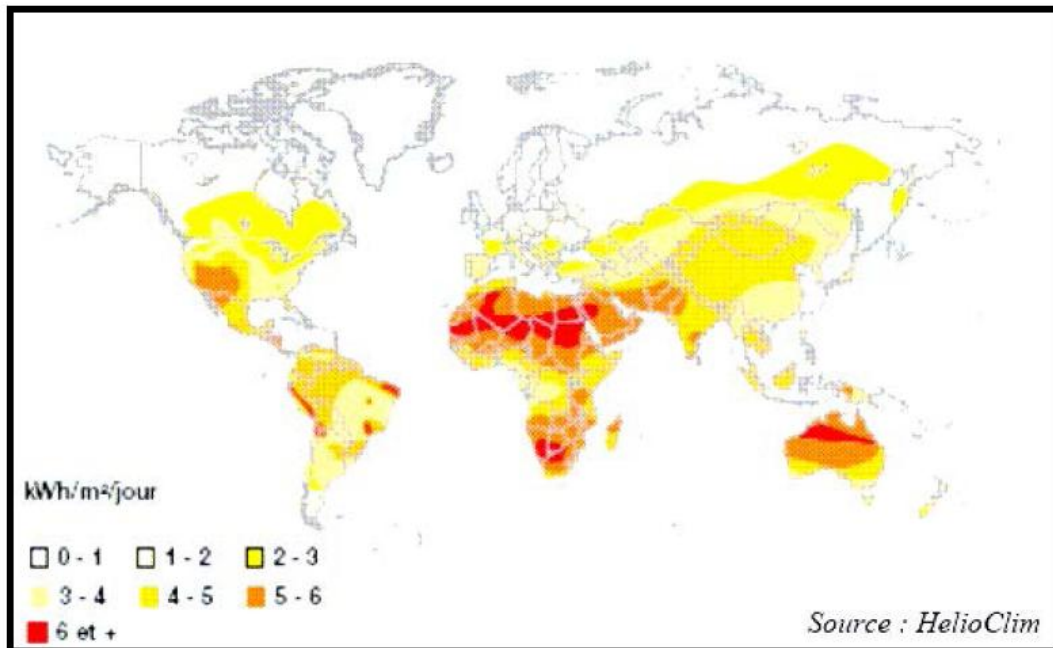


Figure (1.1) : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal. [11]

1.2.2 : Energie solaire :

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide des cellules photovoltaïques, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique à l'aide des capteurs plans, chauffe-eau solaires, échangeurs thermiques [3].
.figure(1.2)

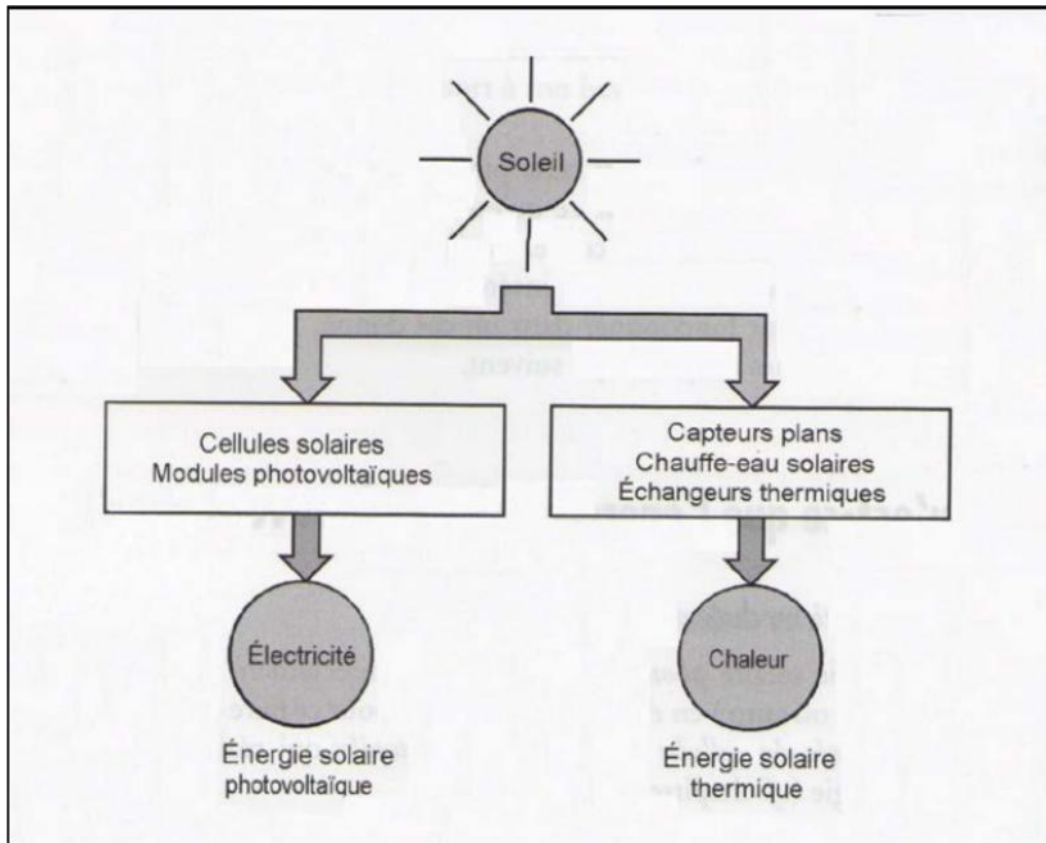


Figure (1.2) : Les deux types d'énergie solaire. [3]

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

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda_0} \quad (1.1)$$

avec:

λ_0 : longueur d'onde (m)

h : Constante de Planck

c : vitesse de la lumière (m/s).

D'après l'équation (1.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c'est-à-dire plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. [3]

1.2.3 : Le nombre de masse d'air:

On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350 W/m^2 (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre.[3] Voir la figure (1.3)

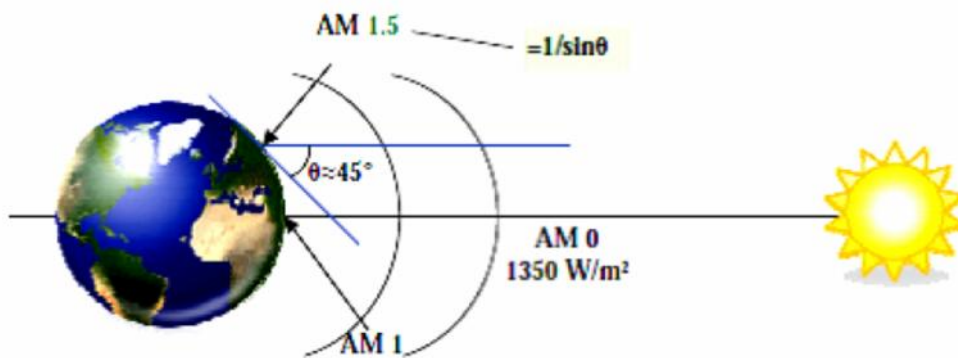


Figure (1.3) : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [4]

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé.

Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5). Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus.

Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 , la Figure 1.4 correspondant à nos latitudes.[3]

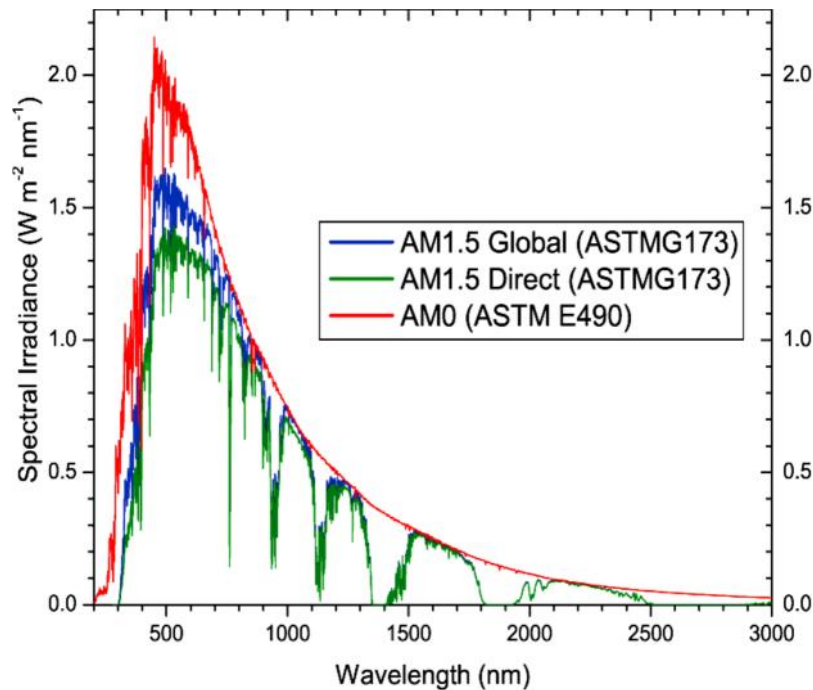


Figure (1.4) : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. [4].

1.2.4. Le spectre du rayonnement extraterrestre :

Il 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: [13]

Rayonnement	Longueur d'onde	Pourcentage
Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45.6%

Tableau (1.1) : longueur d'onde du rayonnement solaire. [13]

1.2.5. 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 bien 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. [13]



Figure (1.5) : l'héliographe de Campbell– Stokes.

1.2.6. Spectre solaire :

Les rayons solaires sont classés en fonction de leur longueur d'onde : les ondes courtes et les ondes longues. Les rayons à ondes courtes comprennent notamment les rayons X, rayons bêta, rayons Ultra-violet les rayons gamma. Ces rayons sont extrêmement dangereux, mais heureusement ils sont arrêtés par l'atmosphère de la terre, et notamment par la couche d'ozone.

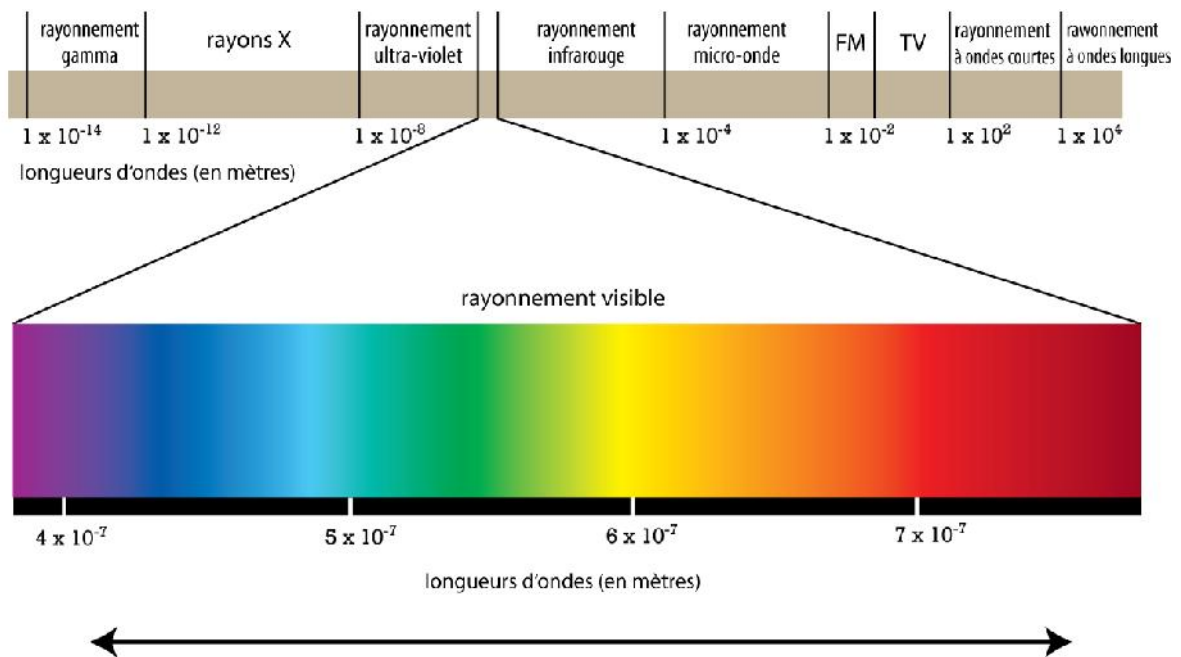


Figure (1.6) : spectre électromagnétique.

1.2.7. Types de rayonnement :

a- Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère .

b-Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère .

c-Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...).Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo.

d- L 'albédo :

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages. C'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considérée et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

$$L\text{ albédo} = \frac{\text{energie réfléchie}}{\text{energie reçue}}$$

e- Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi .[2]

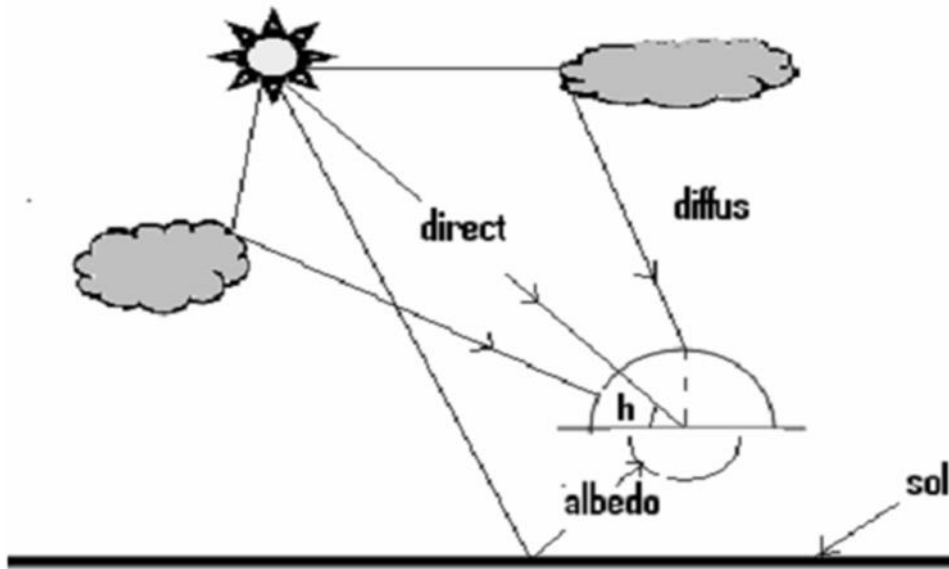


Figure (1.7): différents composants de rayonnement. [5]

1.2.8. Position du soleil :

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale. [3]

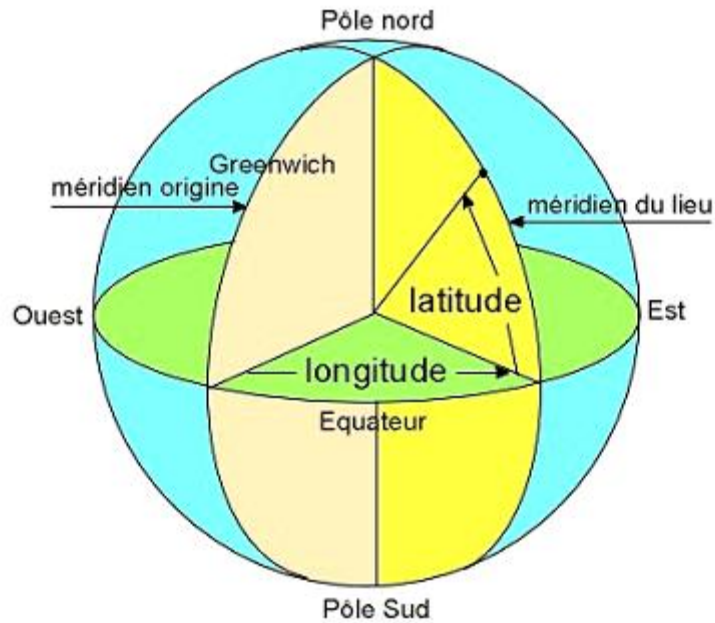


Figure (1.8): Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné. [6]

1.2.9. Coordonnées géographiques terrestres :

Tout point de la surface terrestre est repérée par ses coordonnées géographiques :

Longitude, latitude, l'altitude. [3]

a-Longitude L :

La longitude d'un lieu est l'une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de la méridienne origine

La longitude sera désignée ici par la lettre « L ».

* Longitude OUEST $L < 0^\circ$.

* Longitude EST $L > 0^\circ$. [5]

b-Latitude :

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud [3].

Exemple : Pour la ville de Tizi-Ouzou latitude est environ de $36^{\circ}42'42''$ Nord. [5]

c-L 'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre. Pour la ville de Tizi-Ouzou L'altitude par rapport au niveau de la mer : 206 m. [5]

1.3. L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et signifie Lumière, il est composé de deux parties

- « Photos », qui signifient lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules solaires généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [1].

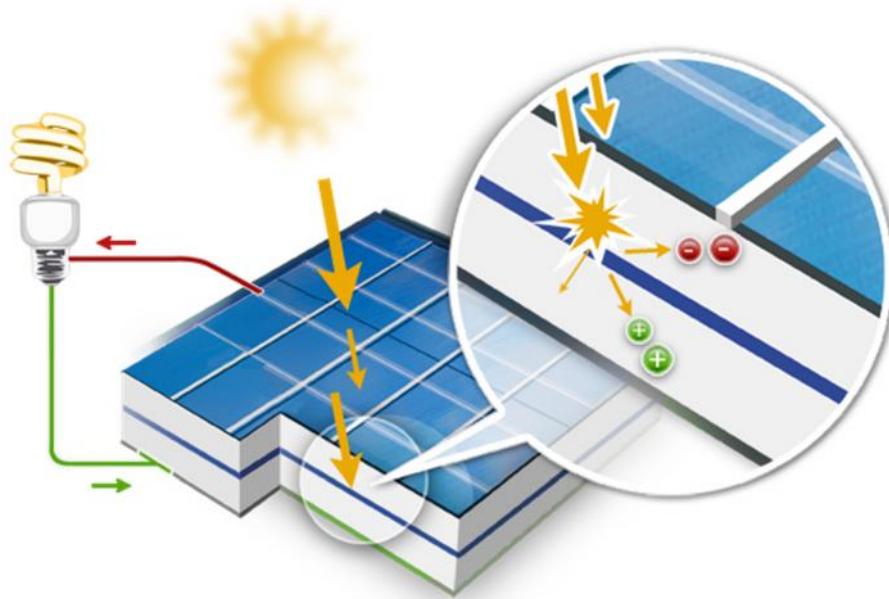


Figure (1.9): Principe de fonctionnement d'une cellule solaire par effet photovoltaïque.

1.3.1 Les matériaux semi-conducteurs :

Un matériau semi-conducteur est un matériau qui a une conductivité électrique intermédiaire entre celles des isolants et celles des conducteurs.[14]

a-Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsqu'il est pur : il ne comporte aucune impureté et son comportement électrique ne dépend que de la structure du matériau. Ce comportement correspond à un semi-conducteur parfait, c'est-à-dire sans défaut structurel ou impureté chimique. Un semi-conducteur réel n'est jamais parfaitement intrinsèque mais peut parfois en être proche comme le silicium monocristallin pur.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, les porteurs de charge ne sont créés que par des défauts cristallins et par excitation thermique. Le nombre d'électrons dans la bande de conduction est égal au nombre de trous dans la bande de valence. Ces semi-conducteurs ne conduisent pas, ou très peu, le courant, excepté si on les porte à haute température.[14]

b- Les semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.[14]

1.3.2 Dopage :

Le dopage consiste à implanter des atomes correctement sélectionnés nommés « impuretés » à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque afin d'en contrôler les propriétés électriques. La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P. Les matériaux ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques.[14]

- Dopage N :

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le Semi-conducteur. Par exemple, dans le cas du silicium (Si), les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome voisin par une liaison covalente formant un tétraèdre. Pour doper le silicium en N, on inclut des atomes ayant cinq électrons de valence, comme ceux de la colonne V du tableau périodique : le phosphore(P), l'arsenic (As) ou l'antimoine(Sb)...

Ces atomes incorporés dans le réseau cristallin présentent quatre liaisons covalentes et un électron libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Aux températures ordinaires. Quasiment tous ces électrons le sont.

Comme l'excitation de ces électrons ne conduit pas à la formation de trous dans ce genre de matériaux , le nombre d'électrons dépasse de loin le nombre de trous. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires. Et parce que les atomes à cinq électrons ont un électron supplémentaire à « donner », ils sont appelés atomes donneurs. [14]

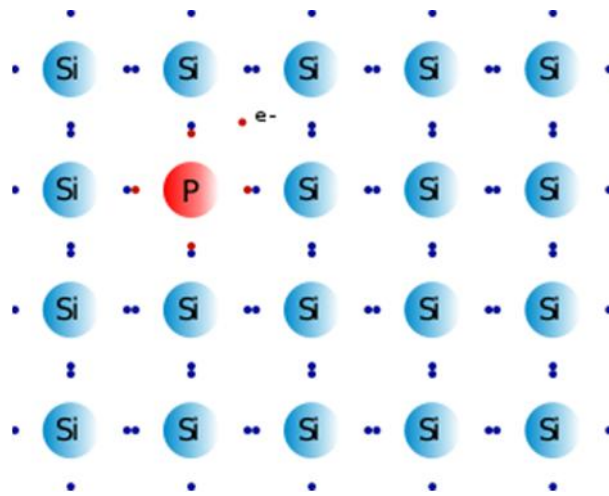


Figure (1.10) : dopage type N de silicium (Si).

- Dopage P :

Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur. Pour le faire, on inclut un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous. Dans l'exemple du silicium, on inclura des atomes trivalents (colonne III du tableau périodique), généralement un atome de bore. Cet atome n'ayant que trois électrons de valence, il ne peut créer que trois liaisons covalentes avec ses quatre voisins créant ainsi un trou dans la structure. Ce trou qui pourra être rempli par un électron donné par un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons. Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires.[14]

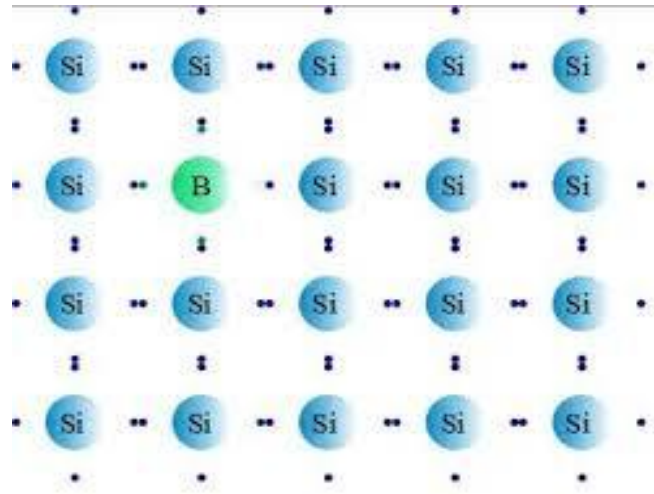


Figure (1.11) : dopage type P de silicium (Si).

1.3.3 Jonction PN :

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. Lors du contact, les électrons diffusent du côté N vers le côté P en laissant des charges fixes positives non compensées. Les trous qui sont majoritaires du côté P diffusent vers le côté N et laissent des charges fixes négatives. Ces charges fixes créent ce qu'on appelle la zone de charge d'espace et maintient un champ électrique interne E_i . À l'équilibre thermodynamique le champ électrique interne arrête la diffusion des porteurs majoritaires. Il y'aura aussi égalisation des niveaux de Fermi par décalage des bandes. [14]

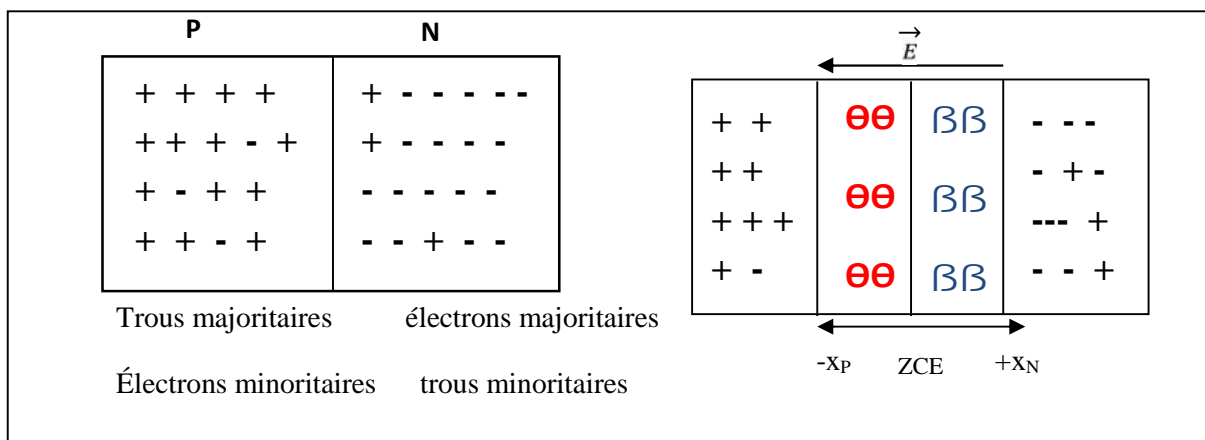


Figure (1.12) : jonction PN.

1.3.4 Polarisation de la jonction PN :

Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension.

Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.[14]

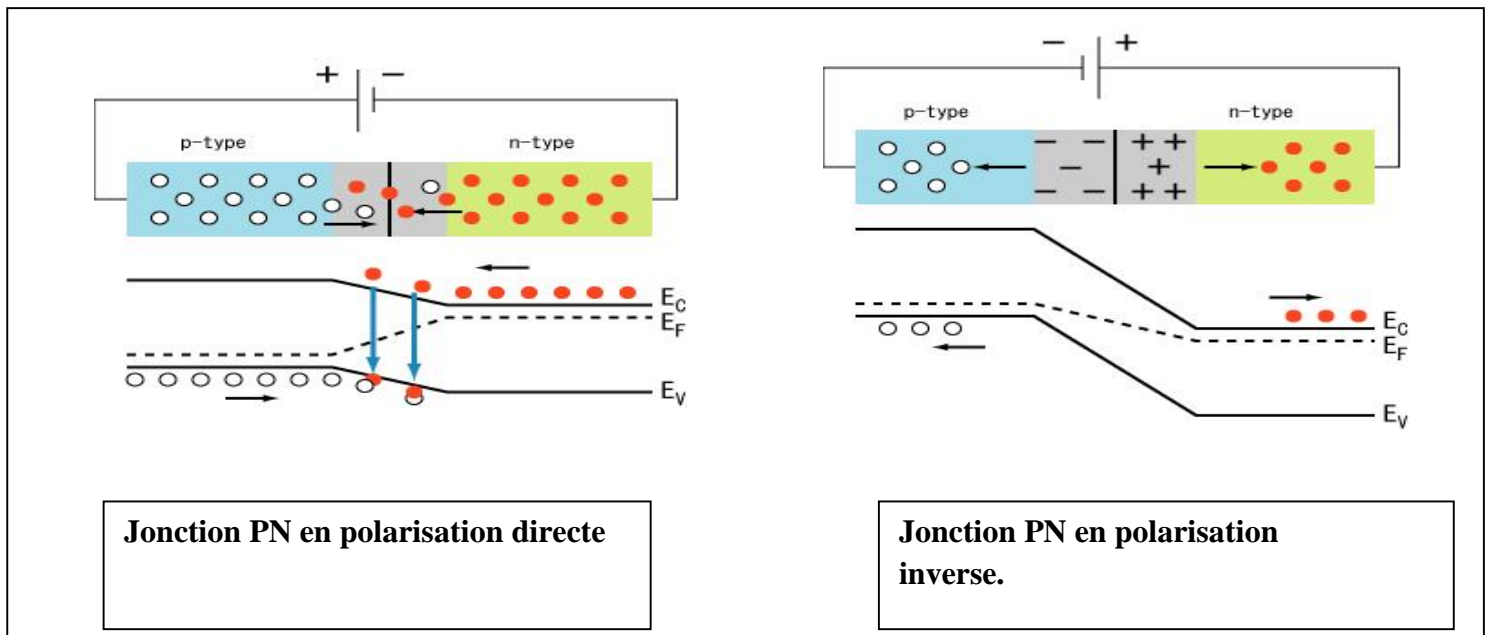


Figure (1.13) : Jonction PN en polarisation directe et inverse.

1.4. Cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est un composant électronique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée à partir d'une jonction PN (cellule solaire à homojonction PN ou à partir d'une cellule solaire à hétérojonction).

Dans le cas de la cellule solaire à homojonction PN, la zone (N) est couverte par une grille métallique qui sert de cathode K tandis qu'une plaque métallique recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. [13]

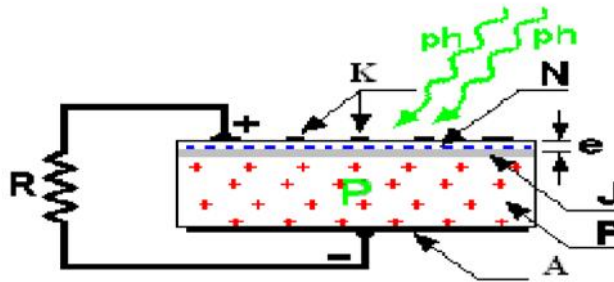


Figure (1.14) : structure d'une cellule solaire. [8]

1.4.1 Fonctionnement de cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite :

- Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- Séparation des porteurs de charge.

- Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de 0,5V en circuit ouvert. L'intensité du courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge. [3]

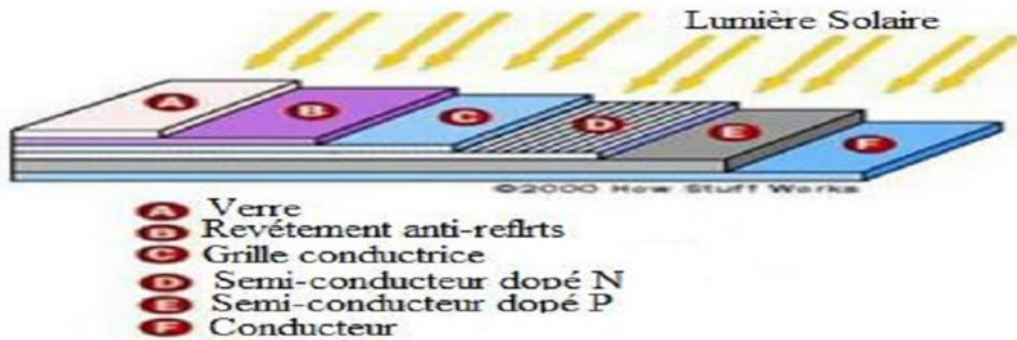


Figure (1.15) : différents couches d'une cellule solaire. [2]

1.4.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules : [6]

a- Les cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant beaucoup d'énergie, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin.

Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage

et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 % voir jusqu'à 24% en laboratoire).[6]

Avantages :

- bon rendement, de 14 % à 22 % .
- nombre de fabricants élevé.

Inconvénients :

- coût élevé.
- rendement plus faible sous un faible éclairage ou un éclairage diffus.
- baisse du rendement quand la température augmente.

b- Les cellules poly cristallines :

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux, (Voir Figure). Elles ont un rendement de 11 à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé crée une structure Poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans [6].

Avantage :

- cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur rassemblement dans un module,
- rendement de 9 à 11 %
- lingot moins cher à produire que le monocristallin.

Inconvénient :

- rendement faible sous un faible éclairage ou soleil diffus

c- Les cellules amorphes :

Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, une des techniques . La cellule est de couleur gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire). [6]

Avantage :

- fonctionne avec un éclairage faible.
- un peu moins chère que les autres techniques.
- intégration sur supports souples ou rigides.

Inconvénients :

- rendement faible en plein soleil, de 5 % à 8%.
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin.
- performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à 20 % selon la structure de la jonction).

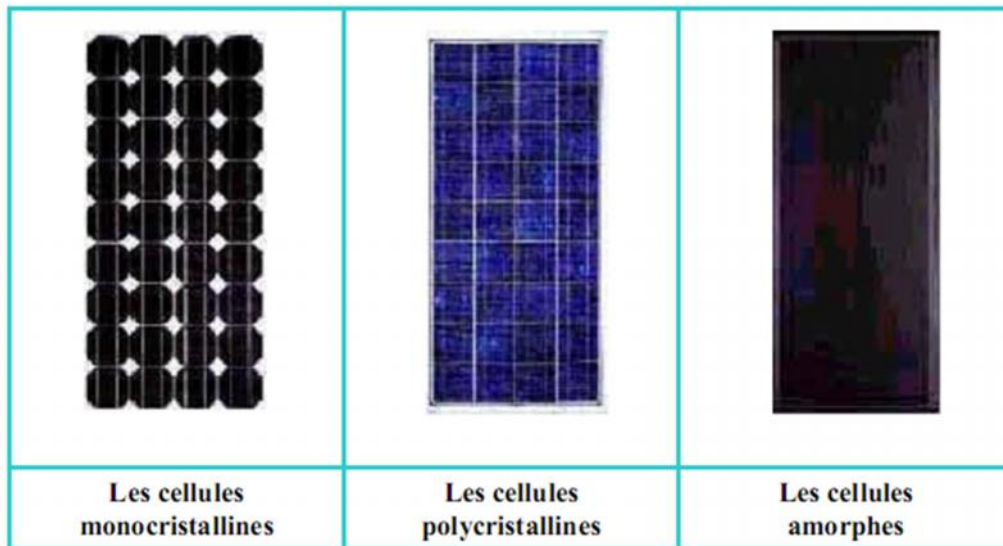


Figure (1.16): Types des cellules photovoltaïques. [6]

Le tableau suivant présente les différents types des cellules avec leur rendement

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium poly cristallin(p-Si)	19,8%	11 à 15%
Silicium monocristallin(m-Si)	24,7%	13 à 17%

Tableau 1-2 : Les différents types des cellules avec leur rendement. [9]

1.4.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

La figure (1-18) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{PH} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances sont introduites dans ce schéma.

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

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;
- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

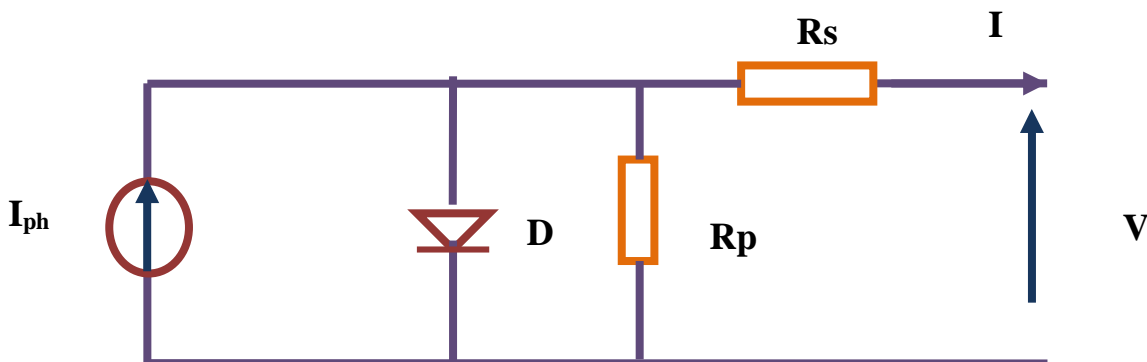


Figure (1.17) : Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV à une seule diode est donné par

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot (\exp((V + I \cdot R_s)/V_t) - 1) - (V + R_s \cdot I)/R_p \quad (1.1)$$

Où :

$V_t = kT/q$, I_0 est le courant de saturation, k est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), q est la charge de l'électron ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), I est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit), R_p est la résistance parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.[2]

1.4.4 Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes: [2]

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

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.1), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \exp \frac{I_{cc} \cdot R_s}{nkT} - 1 - \frac{(I_{cc} \cdot R_s)}{R_p} \quad (1.2)$$

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

$$I_0 \exp \frac{I_{cc} \cdot R_s}{nkT} - 1 \quad (1.3)$$

devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (1.4)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement

$$I_{CC} = I_{ph}).$$

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

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

$$0 = I_{cc} - I_0 \exp \frac{qV}{nkT} - 1 - \frac{V}{R_p} \quad (1.5)$$

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

$$V_{co} = V_t \cdot \ln \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \quad (1.6)$$

c-Rendement photovoltaïque :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{max}, V_{max})$

et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{inc}} \quad (1.7)$$

Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

d-Facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(I_{max}, V_{max})$ et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_p

il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.8)$$

1.5. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge.

En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque. La puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit.

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

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

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

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série ou en parallèle.

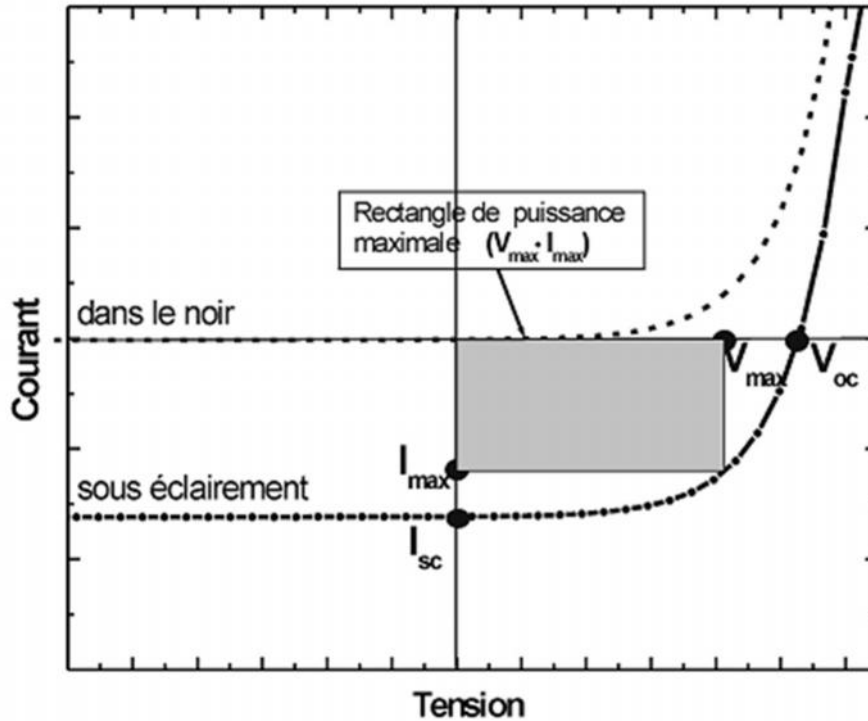


Figure (1.18): Caractéristique de la cellule photovoltaïque dans le noir et sous éclairage.[7]

1.5.1 Caractéristique Courant-Tension :

La figure (1.19) représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

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

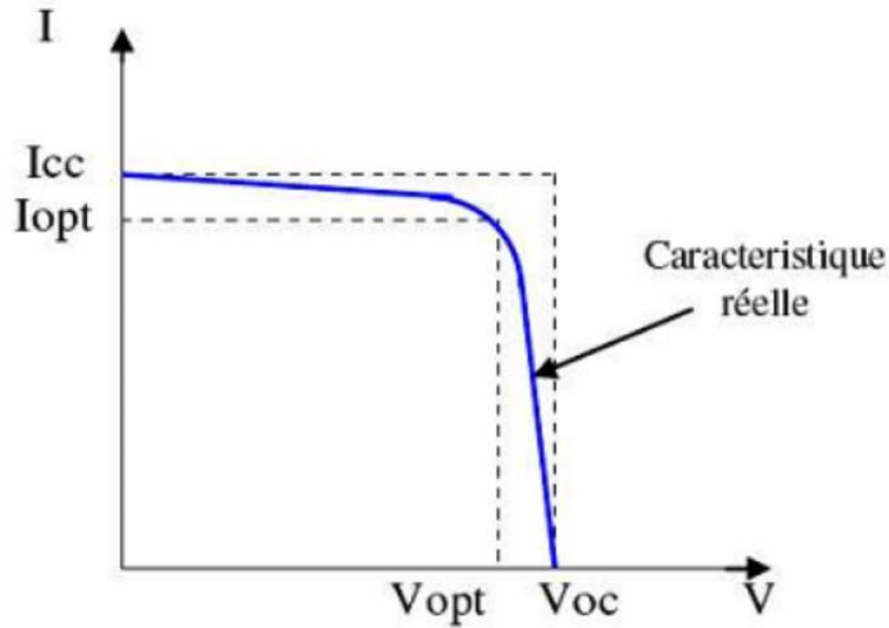


Figure (1.19) : Caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque. [1]

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_{max} où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_{max} . [1]

1.5.2 Influence de l'association série ou parallèle des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 36 cellules en série est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le

courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour du courant .

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.[1]

a-Association en en série :

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même. La figure (1.20) montre la caractéristique résultante (I_{cns}, V_{cons}), avec $I_{cns}=I_{cc}$ et $V_{cons}=n_s*V_{co}$. [10]

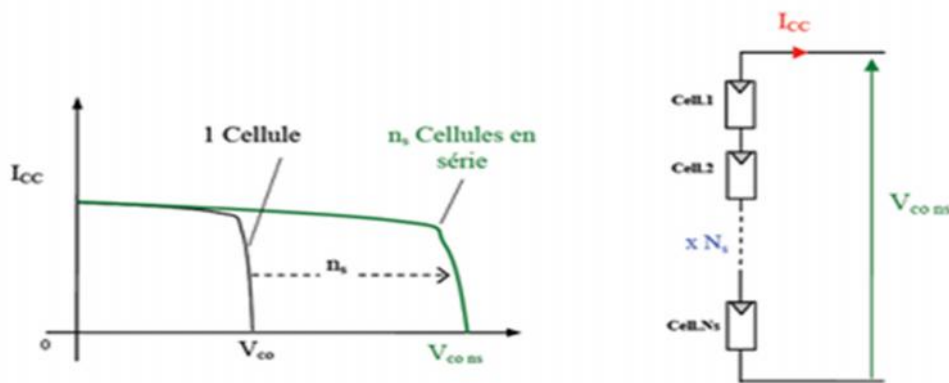


Figure (1.20): la caractéristique résultante obtenue en associant en série des cellules identiques.[10]

b-Association en parallèle :

Dans le cas d'un groupement de n_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La Figure (1.21) illustre la caractéristique résultante avec $I_{cnp} = n_p \cdot I_{cc}$ et $V_{conp} = V_{co}$. [10]

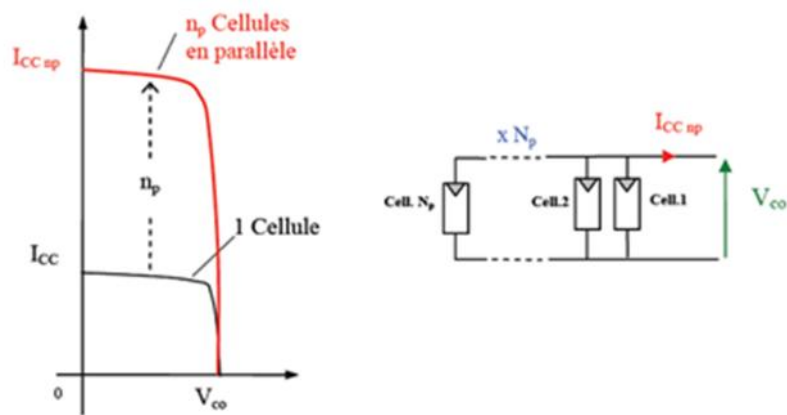


Figure (1.21): la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles des cellules identiques. [10]

c-Association en Série/Parallèle :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de Court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc}$$

$$V_{toc} = n_s \cdot V_{oc}$$

n_p : nombre de cellule en parallèle.

n_s : nombre de cellule en série.

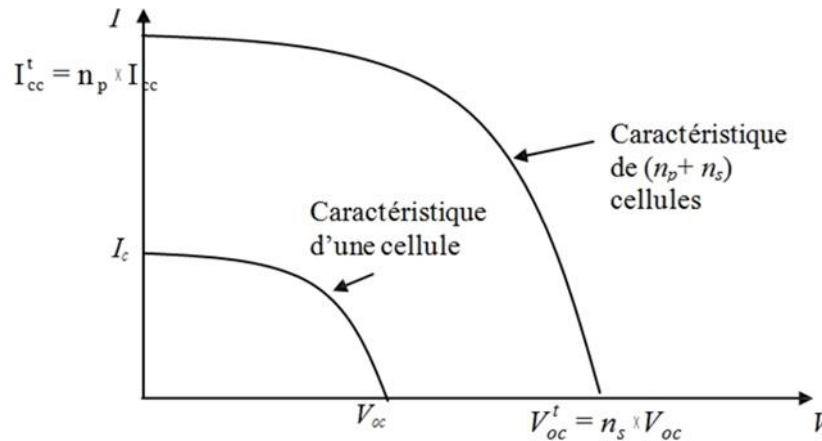


Figure (1.22): caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle cellules identiques. [9]

1.6 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur le Rayonnement solaire et de l'effet photovoltaïque et la cellule solaire (ses différents types) et ses paramètres. Ainsi on a parler du principe du générateur photovoltaïque et l'influence de l'association série/parallèle des cellules photovoltaïques.

On a vu que l'association de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même. Par contre le regroupement de N_p cellules on parallèles, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants.

Dans le chapitre prochain, on présentera les différents composants d'un système photovoltaïque.

2.1. Introduction :

Un système solaire est composé, d'un système de régulation (régulateur de charge solaire), d'un ou plusieurs panneaux photovoltaïques, d'un système de stockage (batteries) et d'un système de conversion (onduleurs).

2.2. Système de régulation :

2.2.1. Régulateur de charge :

Contrôle tout le flux énergétique du système. Il garantit un chargement rapide et optimal de la batterie par le panneau solaire tout en la protégeant contre les surcharges. Lorsque les utilisations déchargent la batterie, le régulateur de charge solaire déconnecte les utilisations exactement au bon moment grâce à un système intelligent de surveillance de la batterie de détermination de l'état de charge et protège ainsi la batterie contre toute décharge profonde dangereuse, afin de maximiser la durée de vie.

- **Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :**

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation. [13]

il existe plusieurs types de régulateurs :

Ñ **Régulation de décharge :**

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension préétabli bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharger lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil.[13]

Ñ Régulation de la charge :

La régulation de la charge effectue par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge. Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb.[13]

2.2.2. Fonctions du régulateur de charge :

- Collecte les informations relatives à l'état de charge de la batterie (tension, état de charge)
- Compare ces informations aux seuils de régulation préfixés.
- Protège la batterie de la décharge profonde.
- Protège la batterie de la surcharge. [15]

2.2.3. Principaux types de régulateur de charge :

Il existe deux types de régulateurs de charge dans les applications photovoltaïques.

a-Régulateur parallèle ou Shunt :

Le régulateur shunt régule la charge de la batterie en l'interrompant par un court-circuit du générateur photovoltaïque. L'utilisation d'une diode série est indispensable entre la batterie et l'organe de commutation (transistor) afin d'éviter un court-circuit simultané de la batterie.[15]

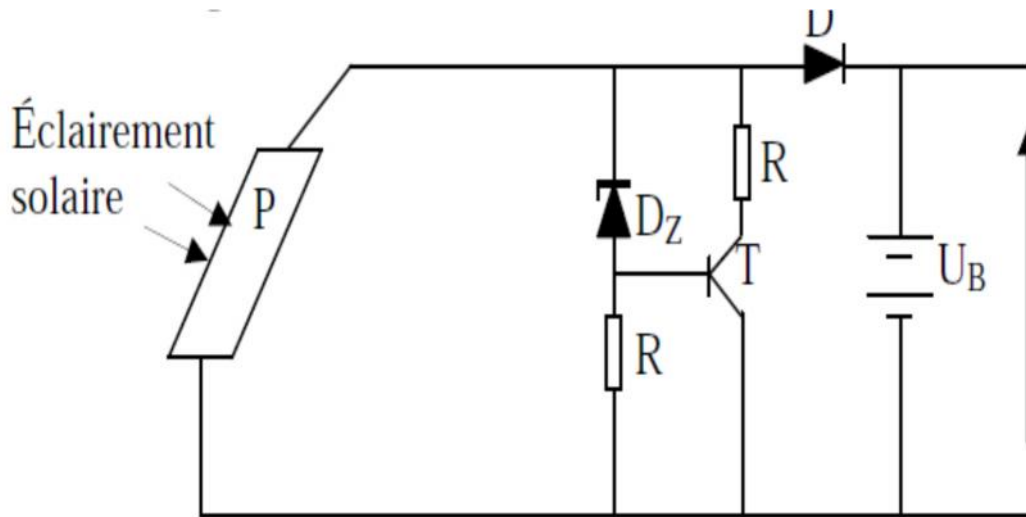


Figure (2.1) : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle. [13]

- **Avantages du régulateur shunt :**
- Aucune chute de tension dans l'unité de charge.
- Consommation du régulateur négligeable durant la période de non régulation.
- La défectuosité du régulateur n'entraîne pas l'interruption de la charge de la batterie.
- **Inconvénient :**
- Nécessité d'un dispositif de dissipation thermique adéquat.[15]

b-Régulateur série :

Dans le cas du régulateur série, l'organe de commutation est en série dans le circuit du générateur.[15]

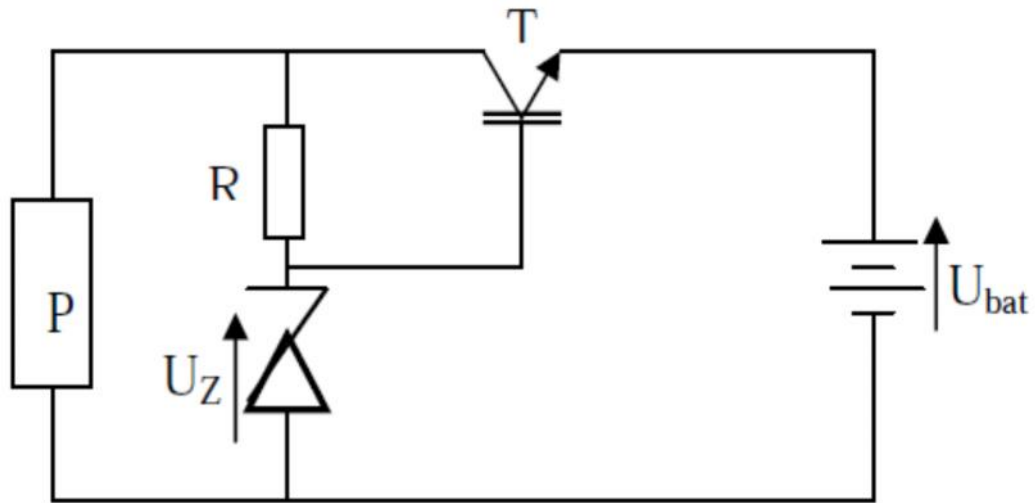


Figure (2.2) : Schéma de principe d'un régulateur de charge série. [13]

- **Avantages du régulateur série :**
 - La diode de blocage n'est pas indispensable.
- **Inconvénients :**
 - Chute de tension dans l'unité de charge.
 - Consommation du régulateur durant la période de non régulation.
 - La défectuosité du régulateur entraîne l'interruption de charge de la batterie.

2.2.4. Rendement du régulateur :

le rendement caractérise les pertes au niveau du régulateur de charge. Le rendement d'un bon régulateur doit être le plus élevé possible entre 90 et 95 % .

Protections : les protections suivantes doivent être exigées :

- Protection contre la surtension : l'entrée du générateur doit être protégée contre la surtension .

- Inversion de polarité de la batterie : le régulateur doit être protégé contre l'inversion de polarité aux bornes de la batterie.
- Protection contre les courts-circuits : le régulateur doit être protégé contre les courts-circuits (exemple par des fusibles).
- Boîtiers : les boîtiers des régulateurs, tout en permettant une bonne dissipation de la chaleur, doivent être assez étanches. (le manuel....). [15]

2.3. Système de stockage :

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

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV. [13]

2.3.1. Les Caractéristiques principales d'une batterie :

- **Capacité en Ampère heure:**

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant les quelles circule ce courant.

Exemple : une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

- **Rapports de chargement et déchargement:**

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite. [13]

- **Température :**

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie. [13]

- **La durée de vie :**

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) .[13]

- **Profondeur de décharge:**

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucun dommage. Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite. [13]

Ñ **La tension d'utilisation :**

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

Ñ **Le rendement :**

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

Ñ **Le taux d'autodécharge:**

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné. [13]

2.3.2. Types d'accumulateurs :

Il existe plusieurs types de stockages dans le système PV. Les puissances rencontrées dans ce domaine sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont :

- Les Accumulateurs au plomb acide
- Les Accumulateurs au Nickel- cadmium

a- Les Accumulateurs au plomb acide :

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est nécessaire. [13]

• Composition d'une batterie solaire plomb- Acide :

- l'électrode négative est constituée de plomb spongieux (Pb).
- l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb (PbO_2).
- l'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4).
- le séparateur en matière poreuse isolante a les propriétés suivantes :
 - grande résistivité électrique.
 - grande résistance chimique à l'acide sulfurique.
 - bonne porosité aux ions.

Le séparateur a pour but d'éviter un court-circuit interne entre deux électrodes. En effet, pour des raisons d'encombrement et de réduction de la résistance interne, les plaques positives et négatives d'un accumulateur sont très proches les unes des autres ($d \approx 10 \text{ mm}$).

L'électrolyte est fabriqué à partir de l'acide sulfurique hautement concentré en le versant dans de l'eau purifiée. La densité nominale de l'électrolyte pour les accumulateurs au plomb est spécifiée selon les applications par le fabricant de batterie et par rapport à une température nominale.

Les caractéristiques principales des batteries au plomb sont :

- **Tension nominale** : multiple de 2 V (6, 12, 24 ...).

- **La capacité nominale de la batterie**

La capacité d'une batterie détermine pendant combien de temps cette batterie peut être déchargée à courant constant. Ainsi une batterie de 50 Ah peut être déchargée avec un courant constant de 5 A pendant 10 heures ($5 \text{ A} \times 10 \text{ h} = 50 \text{ Ah}$).

La capacité C d'une batterie est donc le produit du courant de décharge I par le temps de décharge t .

$$C = I \cdot t$$

2.1

$$[\text{Ah}] = [\text{A}] [\text{h}]$$

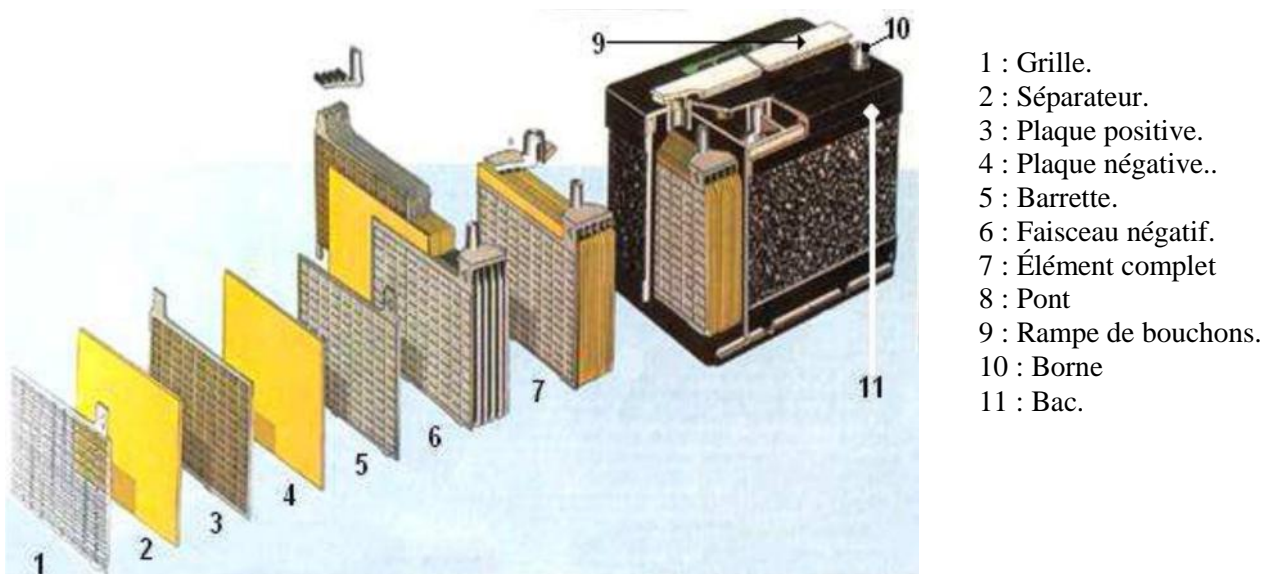


Figure (2.3) : Constitution d'une batterie monobloc. [13]

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie. L'alliage est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. La résistance de la batterie est faible pendant la charge si l'alliage contient moins d'antimoine.

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge. Par conséquent la consommation d'eau sera réduite. D'autre part, une plus grande

proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb- Antimoine sont de type de "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée (pas moins de 25%). D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées.

Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont des manchons, ouverts par en haut, qui sont uniquement placés sur les plaques positives.

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément".

Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie.

Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir.

Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conceptions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85% (pour plomb- Acide).

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques.

Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6.

Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

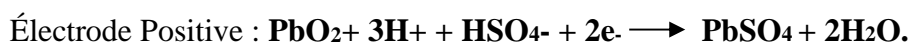
Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage du niveau de l'électrolyte.

Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnées de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime. [13]

- **Principe de fonctionnement:**

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale:



b- Accumulateurs au Nickel- cadmium :

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore excessif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxique à partir de l'électrolyte. [13]

2.4. Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif). [13]

2.4.1. Le convertisseur continu -continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un système PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important. [13]

2.4.2. Le convertisseur continu- alternatif :

- **Onduleur :**

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

Exemple : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Exemple : C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau. [12]



Figure (2.4) : onduleur dans un système PV

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [12]

- **Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV) :**

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC/DC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire (figure 2.5).

Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'encourt-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant).

Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus. La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement : augmente si l'éclairement augmente.[12]

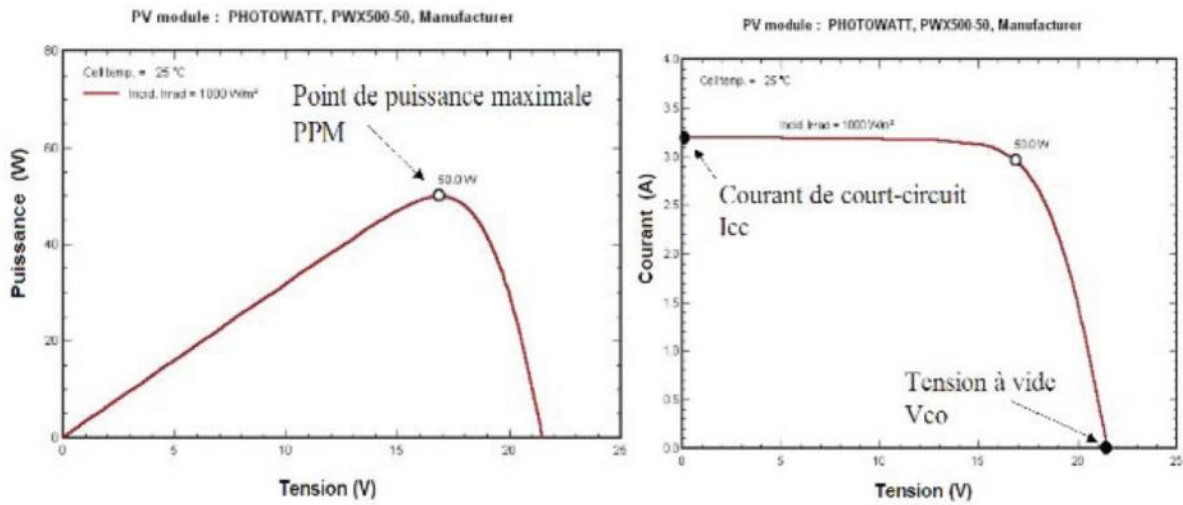


Figure (2.5) : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque. [12]

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique. (Figure 2.5)

En régime permanent établi, la tension et le courant du capteur sont considérés comme constants. L'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiellement motivée par des raisons technologiques.

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI* ou PWM* en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux : d'un point de vue formel elle transforme l'onduleur de tension en onduleur de courant (figure 2.6). [12]

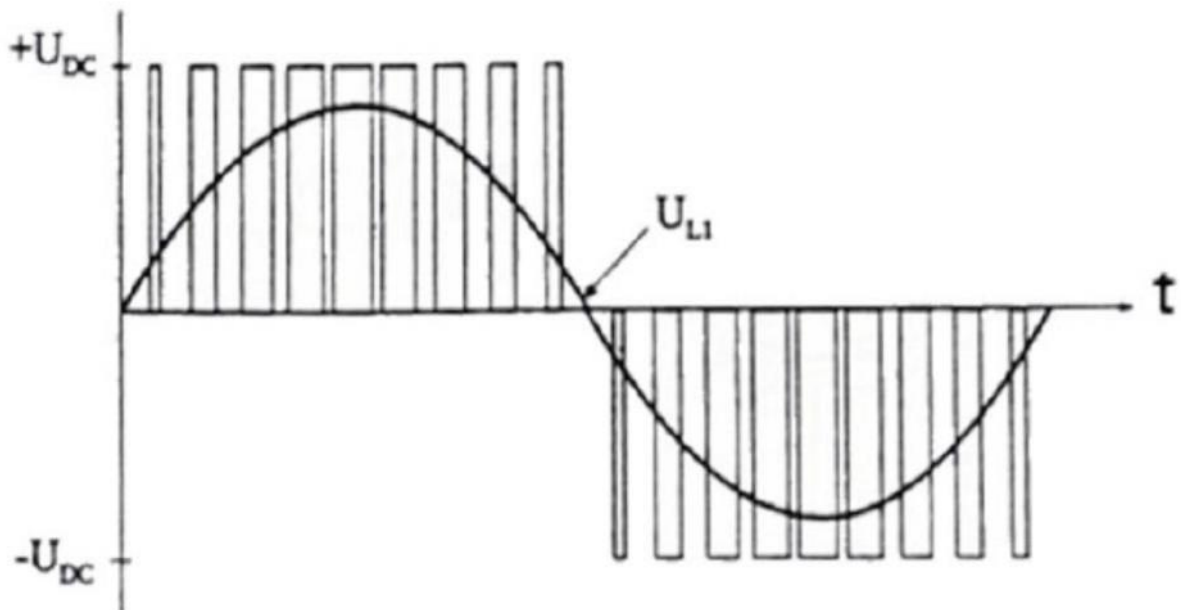


Figure (2.6) : Filtrage de la tension par l'inductance de sortie. [12]

U_{DC} correspond à la tension aux bornes du condensateur d'entrée d'un montage simple et U_{L1} à la tension injectée au réseau donc de fréquence 50 Hz. [12]

2.5. La Charge :

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur. [13]

2.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents composants d'un système photovoltaïque : système de régulation (régulateur, charge solaire) ,de stockage et d'un système de conversion, et la charge .

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur le convertisseur DC-DC (Hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance maximale.

3.1. Introduction :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque(PV), pour produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient la Condition météorologiques (température et irradiation) et quelles que soit la tension de la charge (charge résistive ou batterie), la commande du convertisseur place le système au point de Fonctionnement maximum (V_{max} , I_{max}).

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge (charge résistive ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite, figure (3 ;1). Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fourni à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairement pour une température donnée et de la nature de la charge.

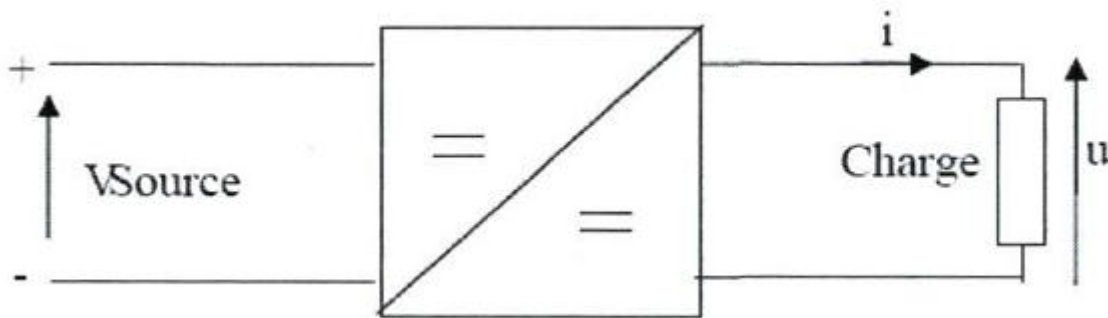


Figure (3.1) : Convertisseur continu-continu.

3.2. Convertisseur DC-DC :

En courant continu, un système photovoltaïque est principalement constitué d'un GPV, d'un étage d'adaptation DC-DC muni d'une commande MPPT et d'une charge. Cette structure autonome permet généralement d'alimenter une charge à courant continu ou une batterie qui sert pour le stockage d'énergie.

La conception d'un étage d'adaptation DC-DC permet de relier aisément un générateur photovoltaïque GPV à une charge de type continu (DC) avec un rendement de conversion assez important. En effet, La conception d'un étage d'adaptation DC-DC correspond à la modélisation des fonctions de base d'un convertisseur DC-DC (ou hacheur).

Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire l'adaptation entre le GPV et une charge DC pour avoir un transfert de puissance maximal. Le point de fonctionnement est donc maintenu au voisinage du PPM quelles que soient les conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, variation de charge, etc....).

Les types de convertisseurs DC-DC généralement utilisés sont : le convertisseur élévateur de tension (hacheur parallèle ou boost), abaisseur de tension (hacheur série ou buck) et élévateur-abaisseur de tension (hacheur série-parallèle ou buck-boost). Dans ce qui suit nous rappelons brièvement leur principe de fonctionnement en mode de fonctionnement continu. [10]

3.2.1- Convertisseur élévateur (boost) :

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte. La figure (3-2) représente le schéma de base d'un convertisseur boost.

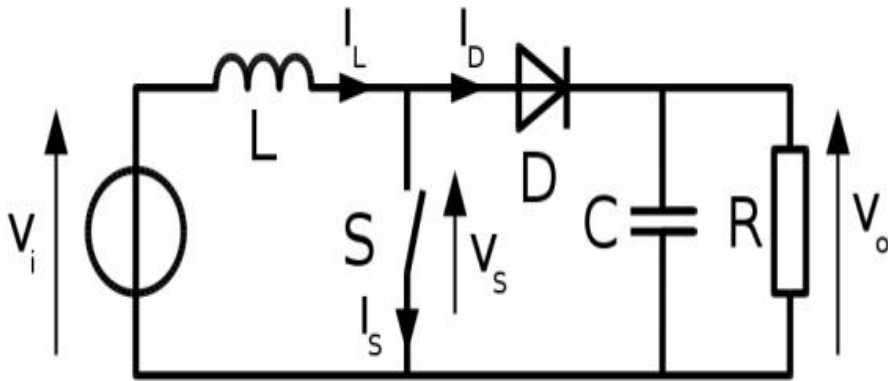


Figure (3.2) : Schéma de base d'un convertisseur boost. [10]

3.2.2. Convertisseur buck :

Un convertisseur buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible. Le schéma de base d'un convertisseur boost est représenté par la figure (3.3).

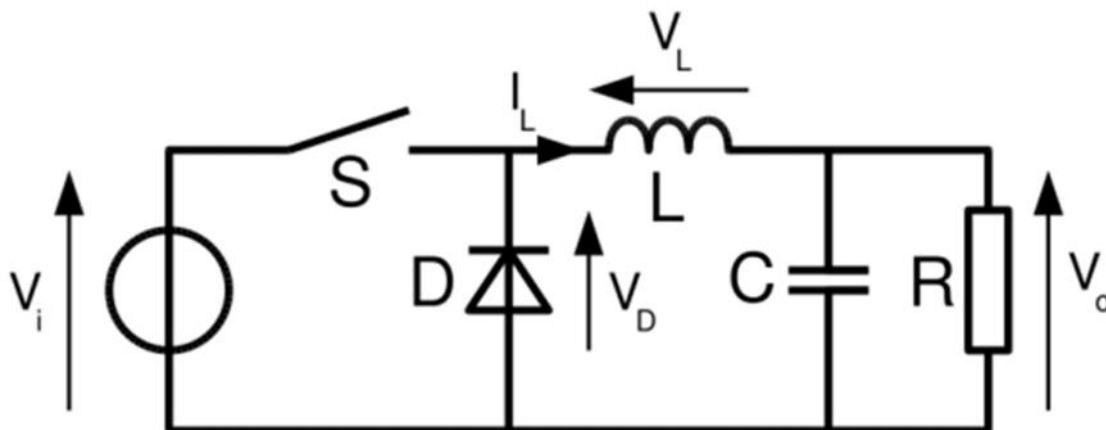


Figure 3-3 : Schéma de base d'un convertisseur buck. [10]

3.2.3. Convertisseur buck-boost :

Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible ou plus grande, mais de polarité inverse. Le schéma de principe d'un convertisseur buck-boost est représenté par la figure (3.4).

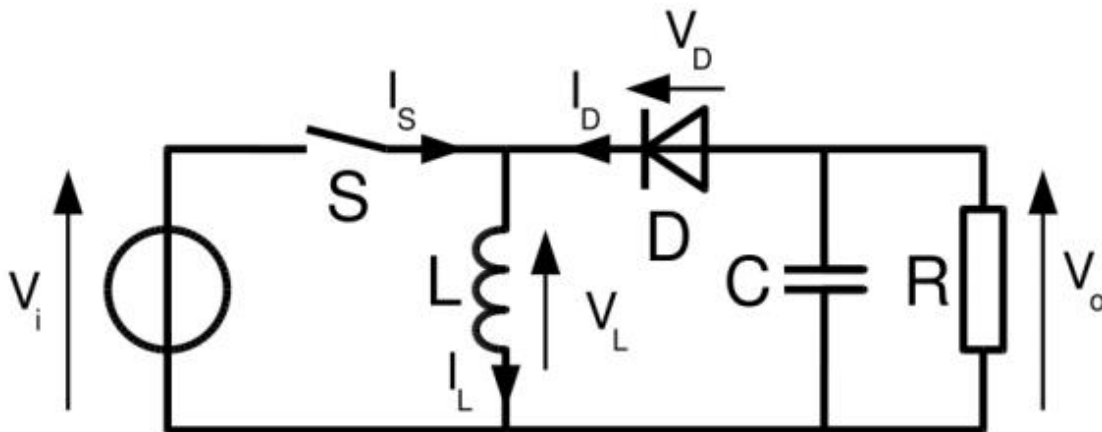


Figure (3.4) : Schéma de base d'un convertisseur buck-boost. [10]

3.3. Couplage avec convertisseur MPPT :

Lors du couplage direct d'une charge à un générateur PV, le point de fonctionnement situé à l'intersection de la caractéristique de la charge et du générateur, n'est pas en général le point de fonctionnement optimal. Ce qui nécessite l'utilisation d'un convertisseur MPPT lorsque la charge présente une mauvaise adaptation. Cette solution consiste à insérer un convertisseur MPPT entre la charge et la source PV de façon à ce que l'impédance d'entrée du convertisseur MPPT coïncide au mieux avec la caractéristique optimale du générateur PV ou demeure dans son voisinage quelles que soient les perturbations. [10]

3.3.1. La commande MPPT :

MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont

généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens. [2]

3.3.2. Principe de la commande MPPT :

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{max} , I_{max}). L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (3.5). [2]

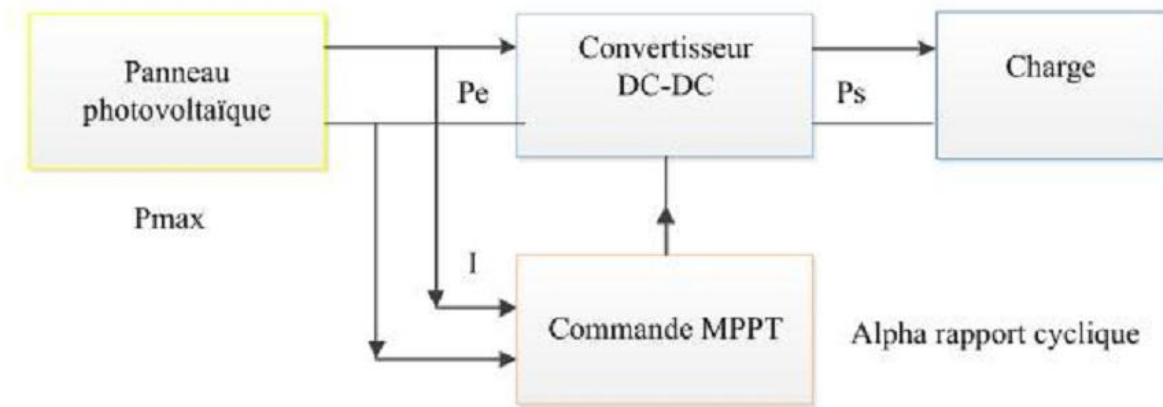


Figure (3.5) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT. [2]

3.3.3. Différents types de MPPT :

Pour faire suivre le point de puissance maximum, plusieurs algorithmes ont été proposés. Ces algorithmes sont :

- Perturber et observer (P&O: Perturb -and-Observe)
- Méthode d'incrémentation de la conductance

a-Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

La méthode P&O est une approche largement répandue dans les MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement la mesure de la tension du générateur PV « V_{pv} » et le courant délivré par le générateur « I_{pv} ». Cette méthode peut dépister le point de puissance maximum tout à fait exactement malgré les variations d'éclairement et de température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O utilise la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque. Comme illustré à la figure (3.6), on peut observer que si une incrémentation positive de la tension (V_{pv}) engendre un accroissement de la puissance (P_{pv}), le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Au contraire, si la puissance décroît, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique (P_{pv}, V_{pv}), on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de le faire converger vers le maximum de puissance en imposant une valeur appropriée au courant de sortie du module PV.[16]

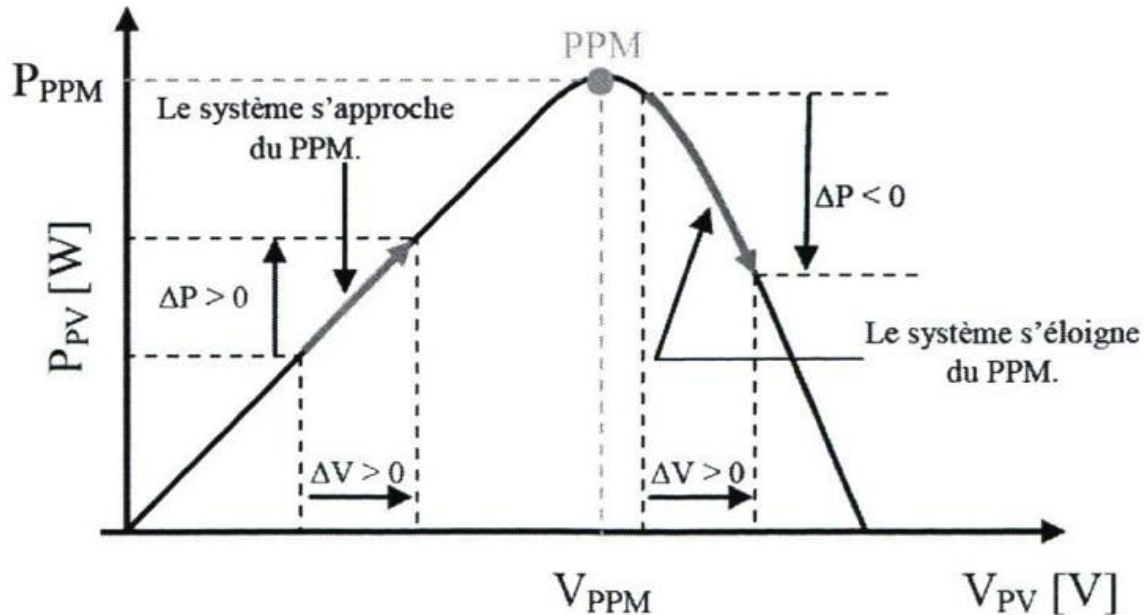


Figure (3.6) : schéma du principe de la méthode. [16]

La figure (3.7) est un organigramme de l'algorithme P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ Calculée au cycle précédent. Si la puissance obtenue a augmenté, V_{pv} est ajusté plus loin dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance obtenue a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée comme dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximum est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{pvmax} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec la taille du pas de la perturbation. Si ce est grand, l'algorithme de MPPT répond rapidement aux changements soudains de la condition de fonctionnement. D'autre part, si le pas est petit les pertes de puissance diminuent selon les conditions climatiques changeantes. Le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'irradiante. [17]

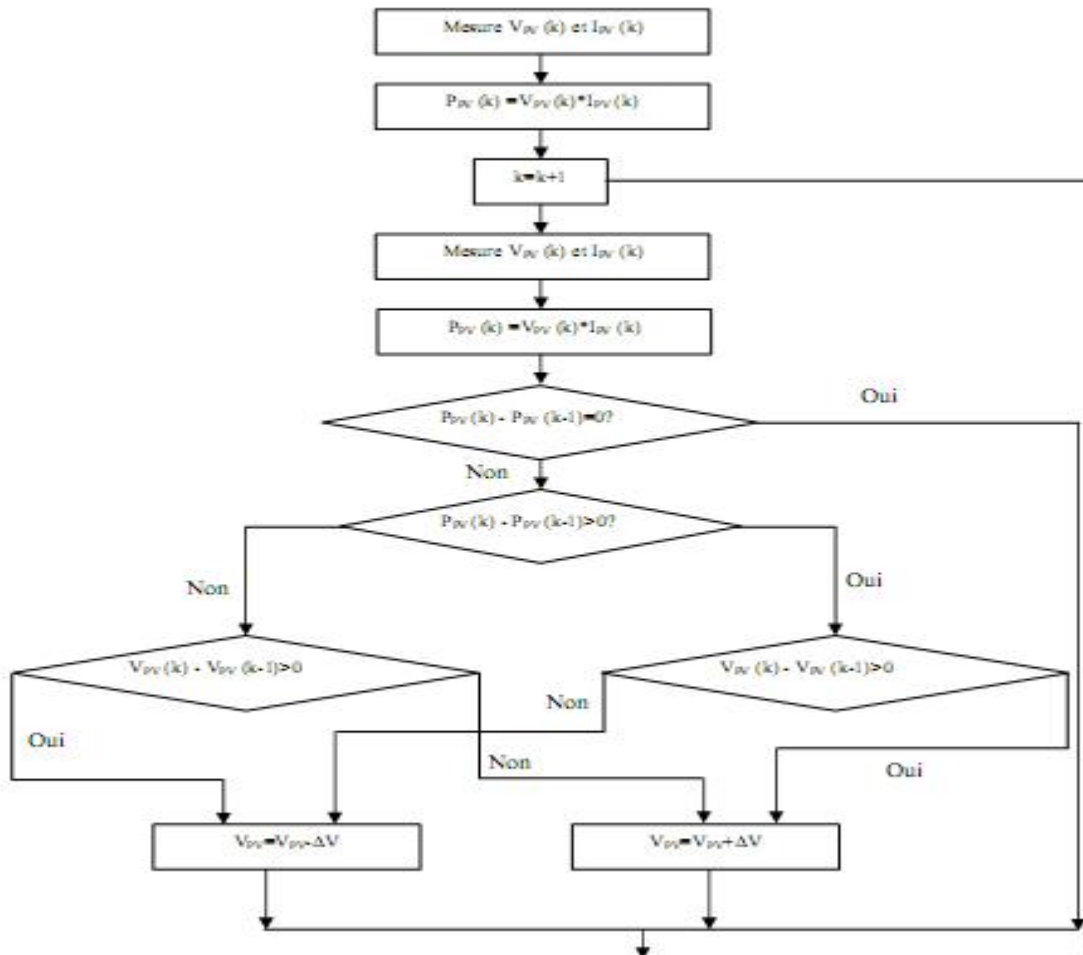


Figure (3.7) : Organigramme de la méthode «Perturbation et Observation». [17]

b-Méthode d'incrémentation de la conductance :

Le principe de cette commande a été théoriquement et expérimentalement démontré dans les publications. Les différentes étapes illustrant le principe de cette méthode MPPT sont représentées sur la figure (3-8). [16]

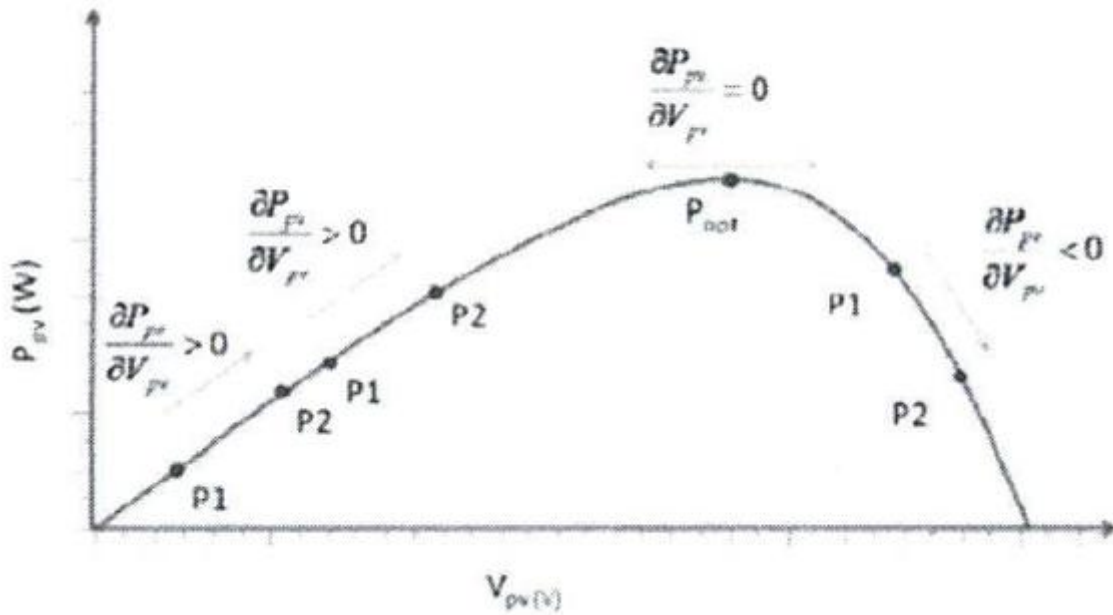


Figure (3.8) : principe de la méthode d'incrémentation de la conductance. [16]

L'algorithme d'incrémentacion de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si $\frac{dP}{dV}$ est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure (3-8) prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant: [18]

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad , \text{pour } V = V_{max} \quad (3.1)$$

- le point de puissance de fonctionnement correspond à la MPP.

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad , \text{pour } V < V_{max} \quad (3.2)$$

- le système se rapproche de la MPP.

$$\frac{dP}{dt} < 0 \text{ , pour } V > V_{max} \quad 3 - 3$$

- le système s'éloigne de la MPP. [18]

Sachant que $P=V*I$, la dérivée du produit par rapport à la tension V donne la relation suivante:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V * I)}{dV} = I * \frac{dV}{dI} + V * \frac{dI}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \quad (3.4)$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I}{V} \quad (3.5)$$

Les changements par accroissement nécessaires dV et dI sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour V et I à ceux mesurées durant le cycle précédent:

$$dV_k \approx V_k - V_{k-1} \quad (3.6)$$

$$dI_k \approx I_k - I_{k-1} \quad (3.7)$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes:

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I}{V} \quad (3.8)$$

$$\frac{dI}{dV} > - \frac{I}{V} \quad (3.9)$$

- Si la relation $dI/dV = -I/V$ est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension $V(k)$ n'est nécessaire. Si la relation $dI/dV = -I/V$ est fausse, selon que $V(k)$ est supérieure ou V_{max} inférieure à la tension $V(k)$ est ajustée en conséquence. [18]

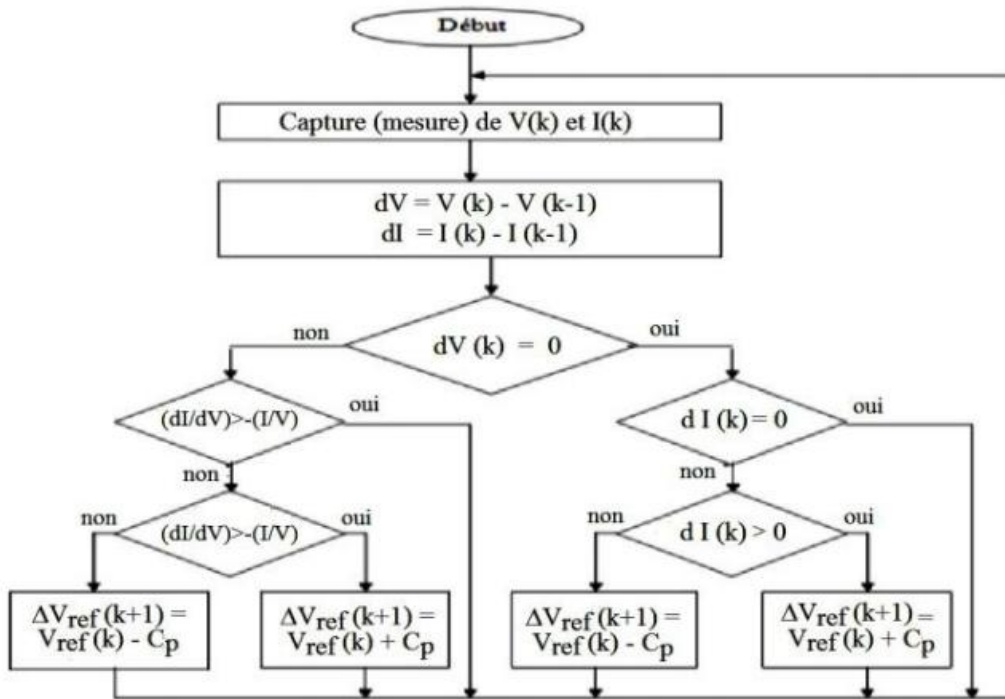


Figure (3 .9): Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance. [18]

3.4 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 des convertisseurs DC-DC qui font la poursuite de ce point (MPP) afin de délivrer le plus de puissance possible.

A l'aide de deux méthodes (Méthode d'incrémentation de la conductance et Méthode de perturbation et d'observation) et Dans une boucle, l'algorithme mesure la tension et le courant du générateur pour calculer la puissance fournie.

4.1. Introduction :

La modélisation des modules PV consiste principalement à l'estimation des courbes non-linéaire courant-tension (I-V) et puissance-tension (V-P). Des chercheurs ont déjà utilisé des circuits topologiques pour modéliser les caractéristiques du module lorsqu'il est soumis à des variations environnementales telles que les variations de l'éclairement et de la température.

De loin, l'approche la plus simple est le modèle de diode unique soit une source de courant en parallèle avec une diode ; le nombre de paramètres inconnus dans l'équation électrique représentative de ce circuit est de trois I_{ph} , I_0 et n qui sont respectivement, le photo courant, le courant de saturation de la diode et le facteur d'idéalité de la diode.

Une version améliorée est l'inclusion d'une résistance R_s en série au circuit. Bien que le modèle soit encore relativement simple, il présente des lacunes lorsqu'il est soumis aux variations de température élevée, car il ne tient pas compte du coefficient de la tension en circuit ouvert K_v , le nombre de paramètres inconnus dans l'équation électrique représentative de ce circuit est de quatre (I_{ph} , I_0 , n , R_s).

Une extension du modèle de diode unique qui comprend une résistance de shunt supplémentaire, R_p est suggéré par de nombreux auteurs. Y compris R_p , le nombre de paramètres est porté à cinq. En utilisant ce modèle, la précision est améliorée (I_{pv} , I_0 , n , R_s , R_p).

4.2. L'outil Matlab/simulink :

MATLAB : (contraction de MATrix LABoratory): est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple qui permet notamment de tracer des fonctions mathématiques et de résoudre des équations (Un peu comme une calculatrice).

SIMULINK : C'est l'extension graphique de MATLAB .Il s'agit d'un outil de modélisation des systèmes dynamiques et de simulation multi-Domaine.

En général l'utilisation est la suivante :

- Etablir (dessiner) le modèle du système (ou d'une de ses fonctions) en utilisant les "blocs" présents en librairie.
- Placer des sources de signaux aux "entrées" du modèle.
- Placer des "instruments de visualisation" en sortie du modèle.
- Paramétrer et lancer la simulation du fonctionnement du modèle.
- Observer les résultats à l'aide des "instruments de visualisation".

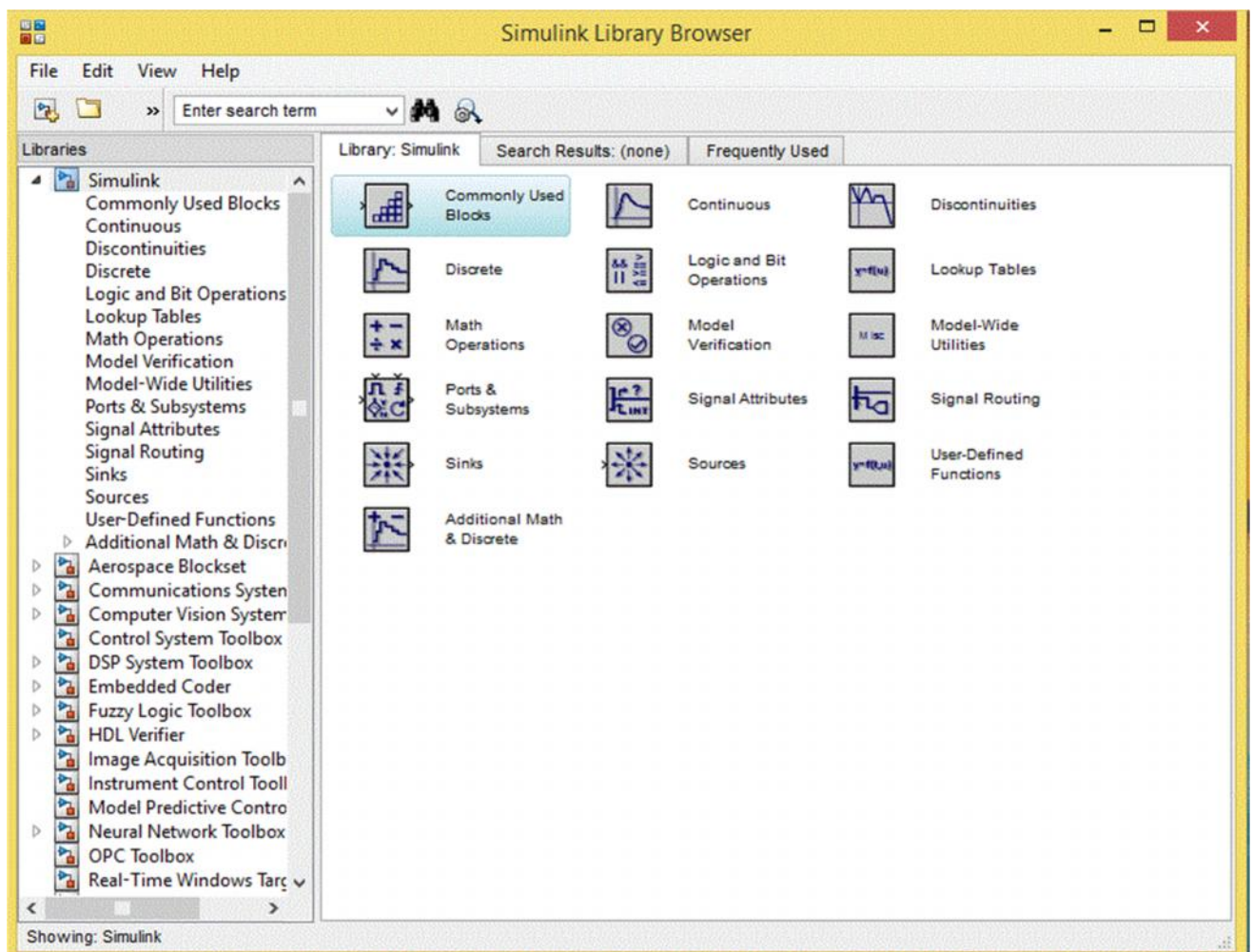


Figure (4.1) : bibliothèque simulink.

4.3. Modélisation du GPV :

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

4.3.1 Modélisation du générateur PV idéal :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un photo courant I_{ph} , proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure (4.2) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule photovoltaïque.

D'après la loi de nœuds :

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

4.1

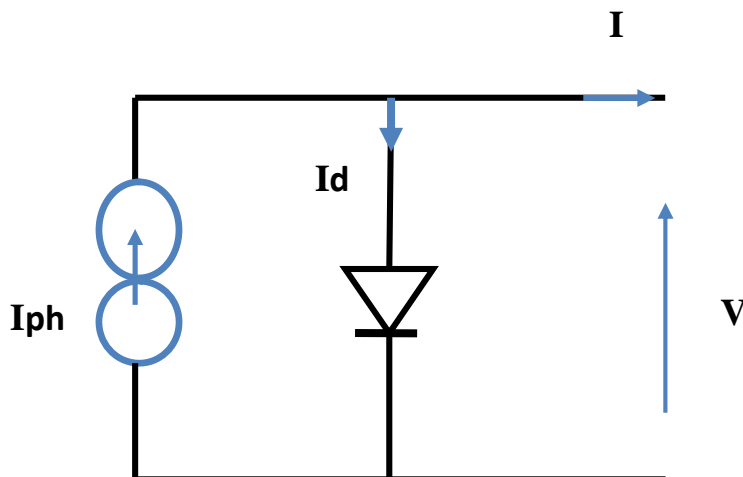


Figure (4.2) : Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (4.2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \cdot \exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \quad 4.3$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension aux bornes de la diode.

$V_t = kT/q$ potentielle thermique.

Donc la relation (4.1) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (4.4)$$

4.3.2. Modélisation d'une Cellule photovoltaïque réel :

Le model photovoltaïque précédent ne prend pas en compte tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p . [19]

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule photovoltaïque, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

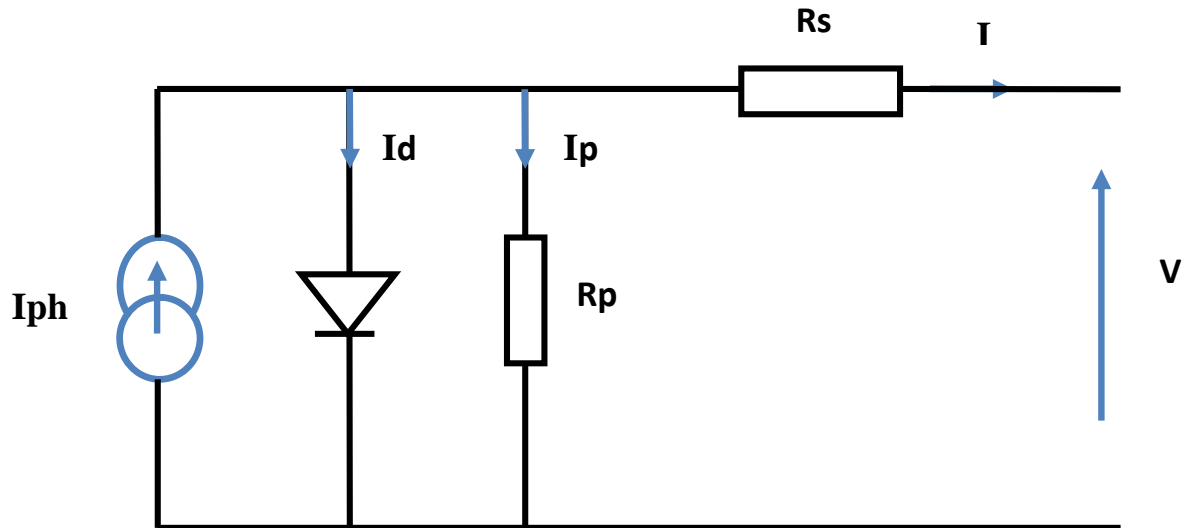


Figure (4.3) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (4.5)$$

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (4.6)$$

$$I_d = I_0 \cdot (\exp((V + I \cdot R_s)/V_t) - 1) \quad (4.7)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \cdot (G/1000)$: le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I₀ : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).

q : charge d'électron = $1.602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode .

T : La température de cellule en Kelvin.

Donc l'équation (4.5) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot (\exp((V + I \cdot R_s)/V_t) - 1) - ((V + R_s \cdot I)/R_p) \quad (4.8)$$

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque par un schéma bloc Figure (4.4) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont : l'ensoleillement dans le plan des panneaux $G(\text{W/m}^2)$, la température de la jonction des cellules **T** (K) et deux variables de sortie : courant fourni par le générateur **I_{pv}** (A) et la tension aux bornes du GPV **V_{pv}**(V).

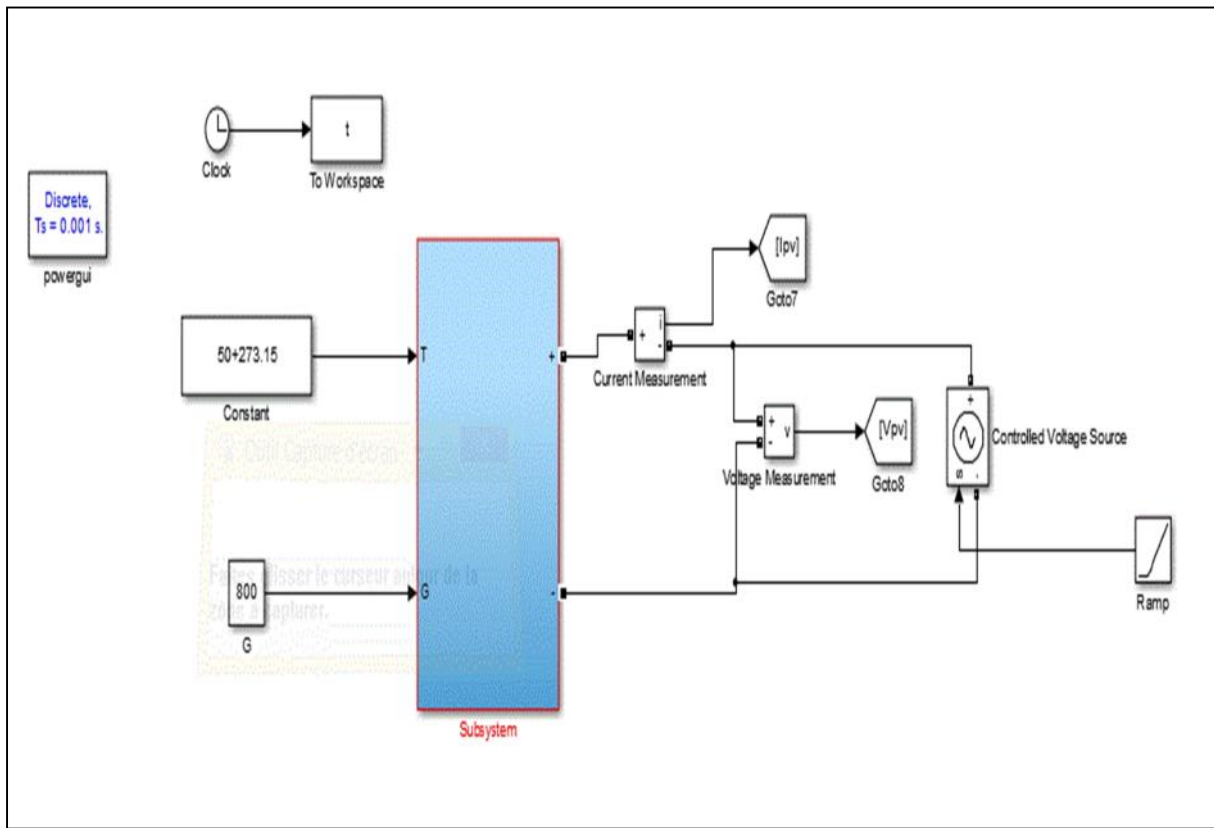


Figure (4.4) : représentation du schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc

4.4. Module photovoltaïque MSX-60 de SOLAREX :

Dans notre travail nous avons simulé sous Matlab simulink le générateur PV (MSX60). Ce module est en silicium poly cristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant de 3.5 A sous une tension optimale de 17.1V.[msx-60 ,64]

Eclairement standard, G	1000W/m ²
Température standard, T	25°C
Puissance maximale P _{max}	60W
Tension à P _{max} ou tension optimale (V _{co})	17.1V
Courant à P _{max} ou courant optimal	3.5A
Courant de court-circuit I _{sc}	3.8A
Tension à circuit ouvert V _{co}	21.1V
Nombre des cellules en séries	36
Energie de la bande interdite	1.12ev
Coefficient de température de I _{sc}	65mA/°C
Coefficient de température de V _{co}	-80mV/°C
Coefficient de température de puissance	(0.5±0.05)%°C
Resistance série R _s	146.0812 Ω
Resistance parallèle R _{sh}	0.3160 Ω

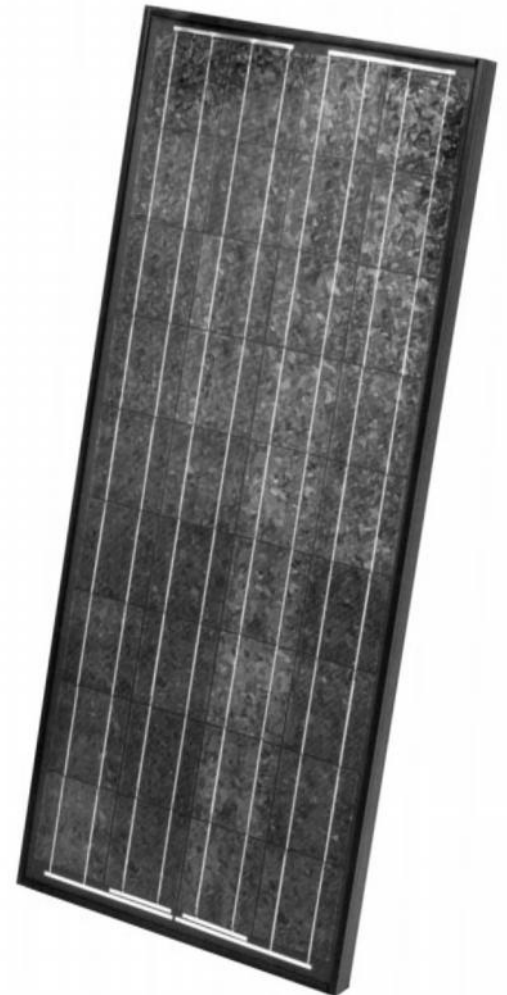


Tableau (4.1) : Caractéristiques du panneau photovoltaïque SOLAREX MSX-60 .

Le courant de saturation de la diode est donné par la suite:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp \left(q \cdot \frac{V + I \cdot R_S}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \quad (4.9)$$

Pour calculer I on considère ($R_p = \infty$) donc ($I_p = 0$) dans ce cas, l'équation (4.5) devient:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \exp \left(q \cdot N_s \frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \quad (4.10)$$

Avec R_s dans le point V_{oc} :

$$dI = 0 - I_0 \cdot \frac{V + R_s \cdot I}{V_t} \cdot \exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t} \right) \quad (4.11)$$

Donc :

$$R_s = - \frac{dI}{dV} - \frac{n \cdot V_t}{I_0 \cdot \exp \left(\frac{V + I_s \cdot R_s}{n \cdot V_t} \right)} \quad (4.12)$$

Telle que :

$$R_s = - \frac{dI}{dV_{v=v_{co}}} - \frac{n \cdot V_t}{I_{0 \cdot \exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_t} \right)}} \quad (4.13)$$

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 Raphson :est une technique puissante pour résoudre des équations numérique (non linéaire) , qui est décrite comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (4.14)$$

$f'(x)$: La dérivée de la fonction.

X_n :La présente itération.

X_{n+1} :L'itération suivante.

On considère que : $V=V_{co}$

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \cdot \exp\left(q \frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_t}\right) - 1 \quad (4.15)$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \cdot \left[\exp\left(q \frac{V + I_n \cdot R_s}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right]}{-1 - I_0 \cdot \frac{R_s}{n \cdot V_t} \cdot \exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{n \cdot V_t}\right)} \quad (4.16)$$

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_{ref}) \cdot \left[1 + K_i \cdot (T - T_{ref}) \right] \quad (4.17)$$

K_i : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

K_v : Le coefficient de variation de la tension en fonction de la température.

T_{ref} : La température de référence 298K (25°C).

G : L'irradiation solaire.

$$I_{Ph} = I_{phn} + k_i \cdot T - T_{ref} \cdot \frac{G}{1000} \quad (4.18)$$

Le courant de saturation en fonction de T(ref) peut s'écrire :

$$I_0 = I_0 T_{ref} \frac{T}{T_{ref}}^{\frac{3}{n}} \cdot \exp - \frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} \cdot \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \quad (4.19)$$

On peut écrire l'équation (4.19) :

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i \cdot T - T_{ref}}{\exp \frac{V_{co} + K_v \cdot T - T_{ref}}{n \cdot V_t} - 1} \quad (IV..20)$$

Pour la modélisation ou schéma block on donne :

$$I_a = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \exp \frac{q \cdot T \cdot N_{ss}}{n \cdot K N_s} V + \frac{l \cdot R_s}{N_{pp}} \cdot N_{ss} - 1 \quad (IV.21)$$

Telle que :

N_{ss} : Nombre de module connecté en série (dans notre cas =1).

N_{pp} : Nombre de module connecté en parallèle (dans notre cas =1).

N_s : Nombre de cellule connecté en série.

A partir des équations (4.18 – 4.20 – 4.21) on peut donner le schéma block de : I_{ph}, I_0 et I_m

- **Le photo courant I_{ph} :**

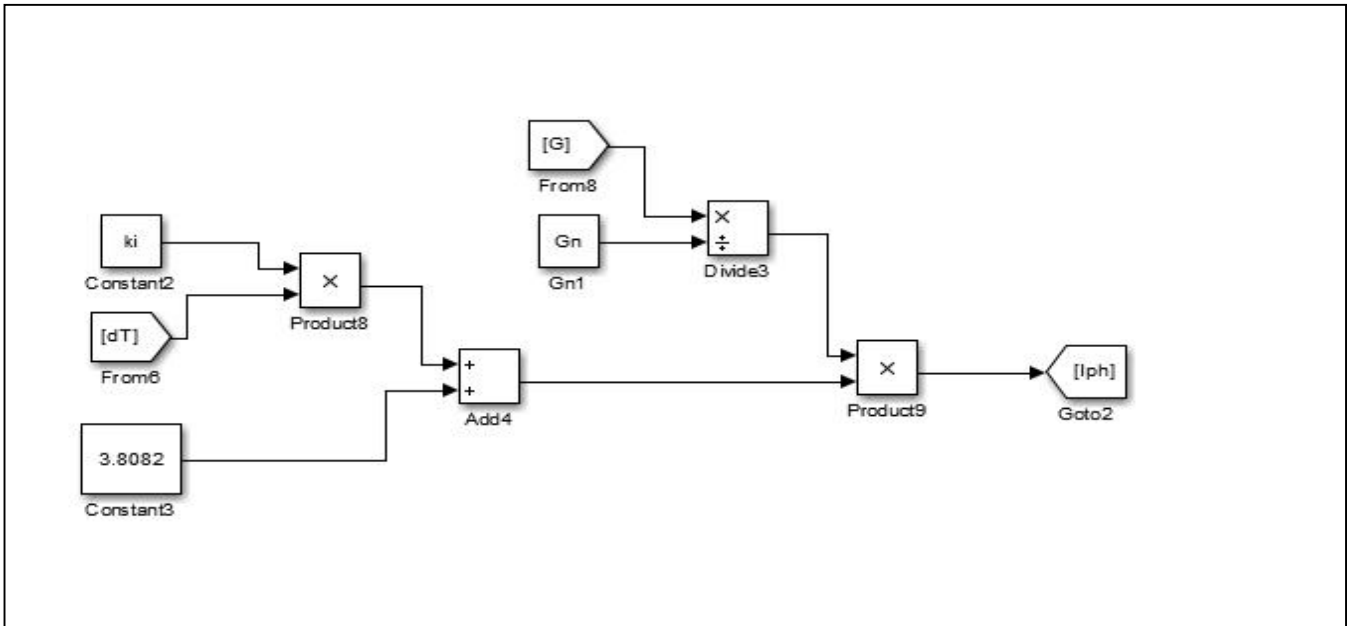


Figure 4.5 : schéma block du courant I_{ph} .

- **Le courant I_0 :**

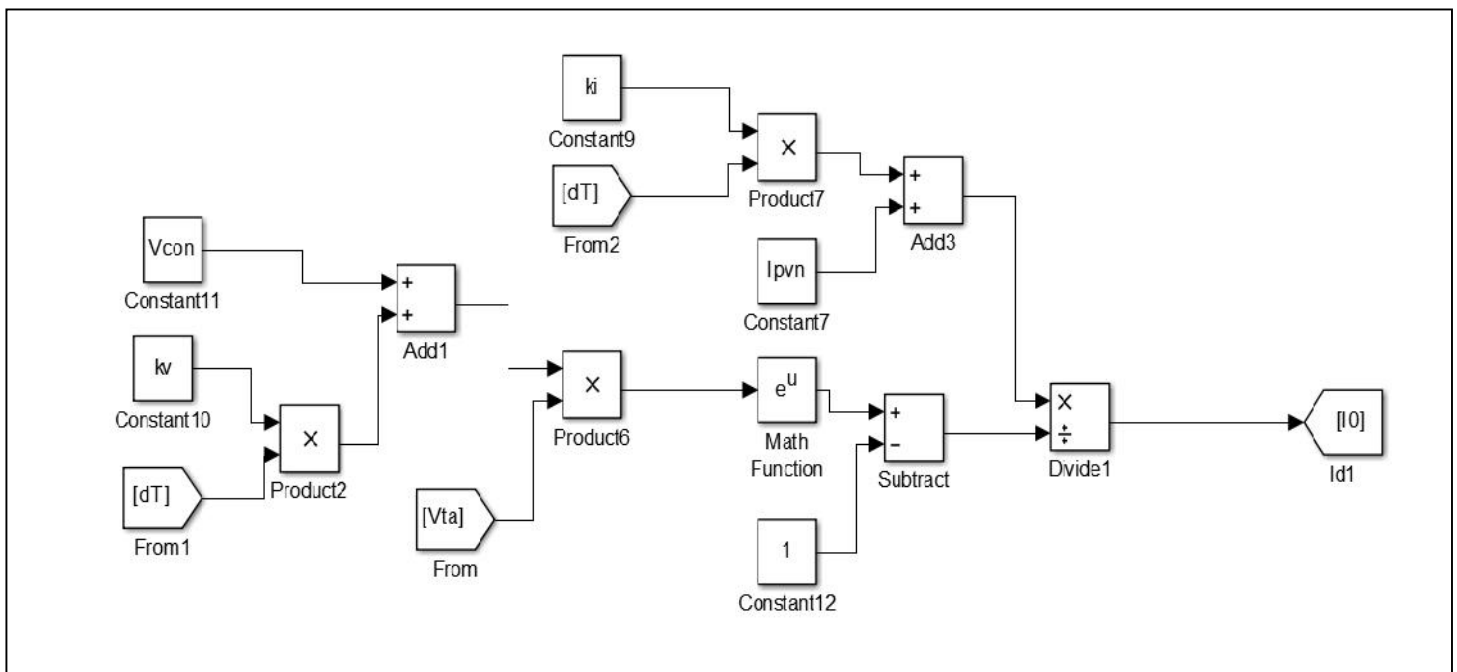


Figure 4.6 : schéma block du courant de saturation I_0 .

- **Le courant I_a :**

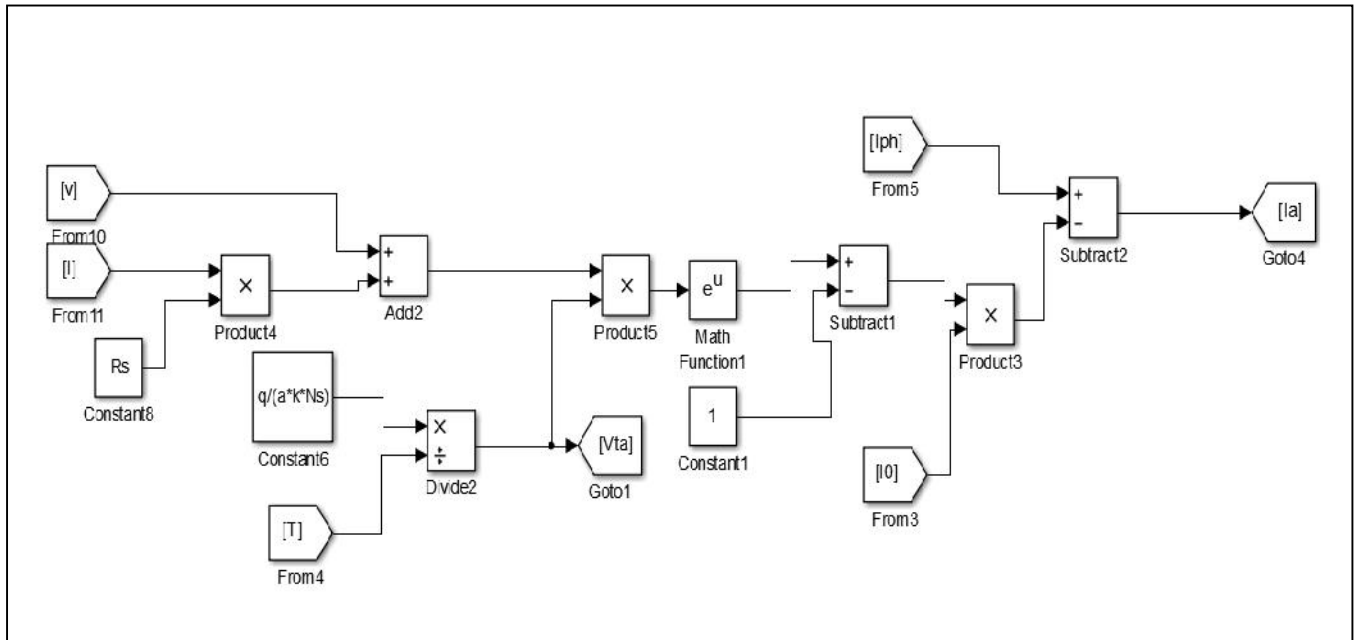


Figure 4.7 : schéma block du courant I_a .

- **Le courant I :**

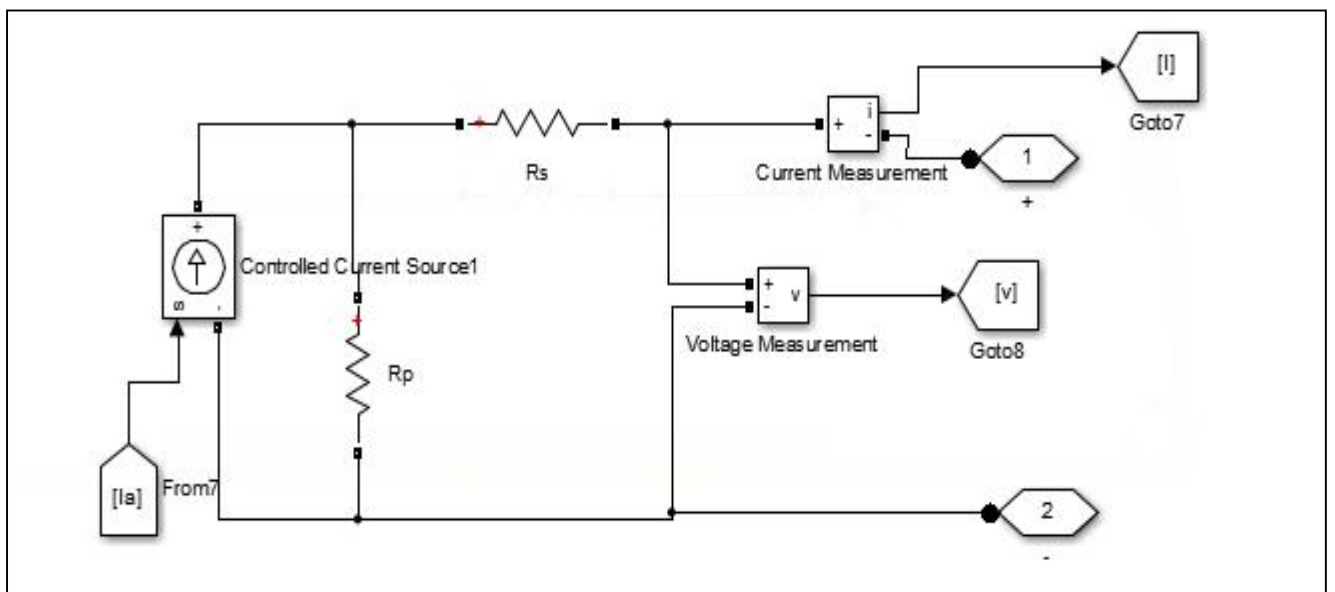
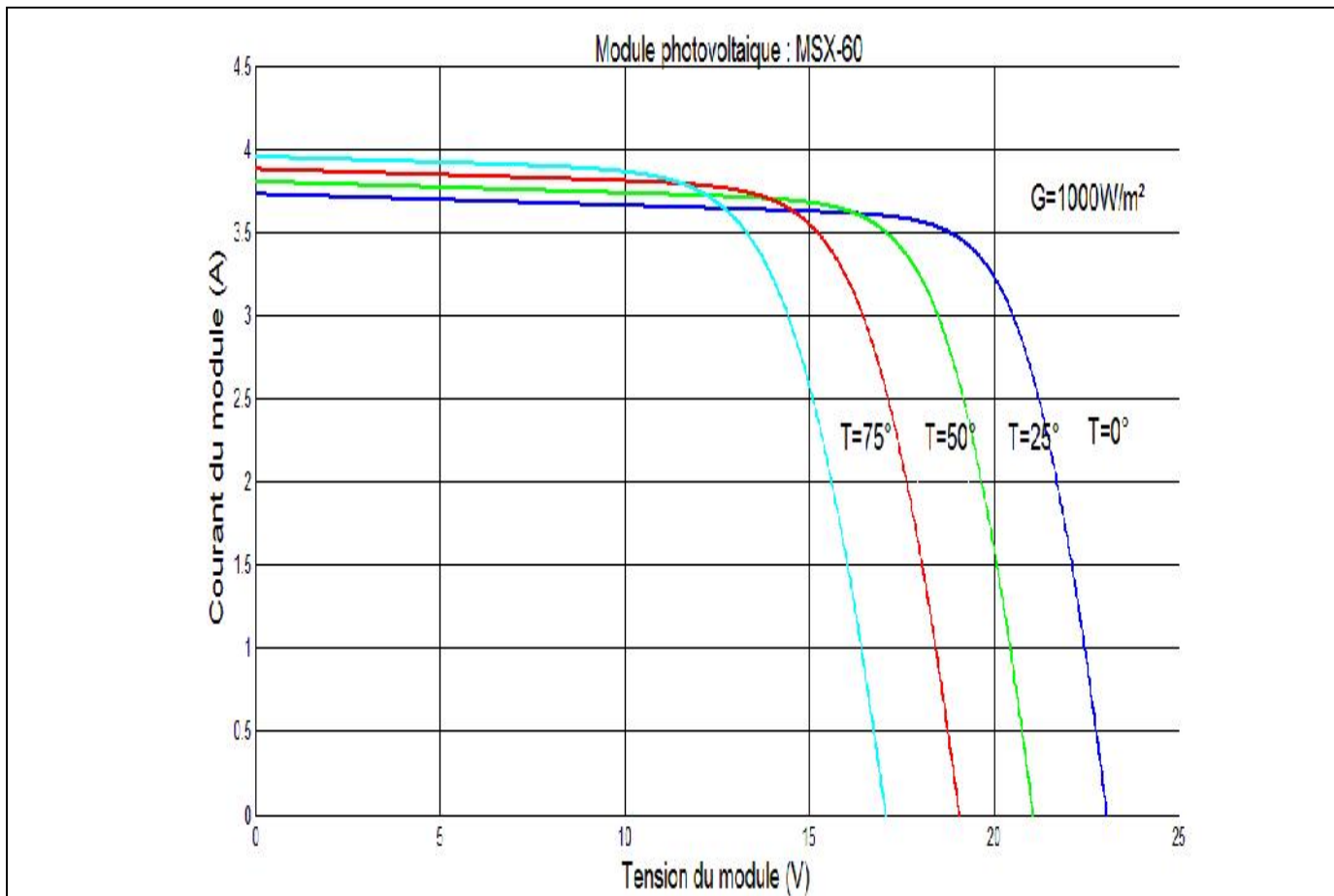


Figure 4.8 : schéma block du courant I .

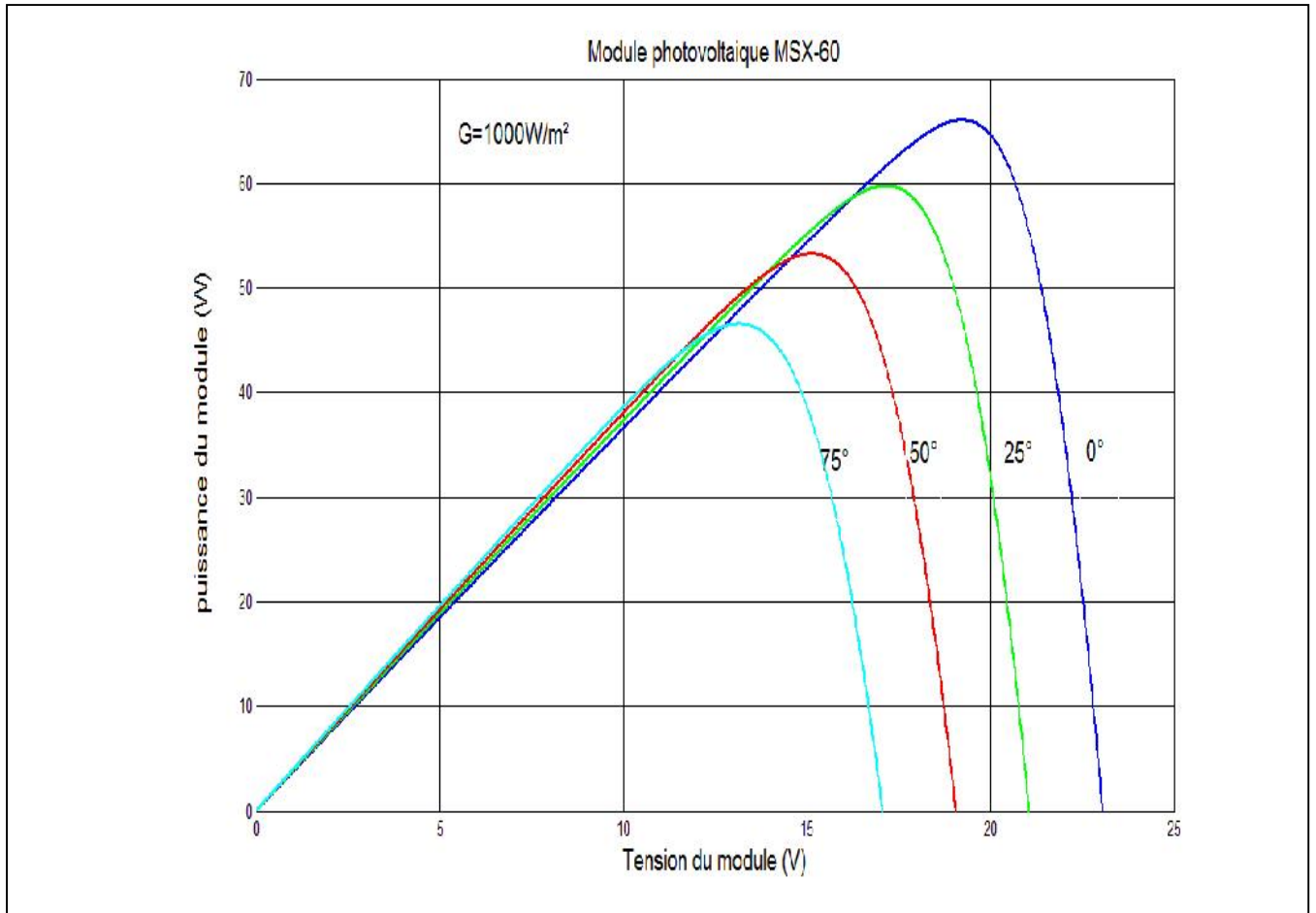
4.5. Résultats des simulations :

Les résultats des simulations du générateur photovoltaïque sont représentés par les figures (4.9) à (4.16). Ces figures représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différentes températures, différents éclaircements et pour différentes valeurs des résistances R_s et R_p .

4.5.1. Influence de la température sur le module :



Figure(4.9) : Résultats de simulation des caractéristiques courant- tension Pour différentes température et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$.



Figure(4.10) : Résultats de simulation des caractéristiques puissance-Tension pour différentes températures à un Eclairement $G=1000\text{W/m}^2$.

Les figures (4.9) et (4.10) ci-dessous nous montre que la température a un impact sur la tension de circuit ouvert (V_{co}) d'un module photovoltaïque. V_{co} diminue avec la croissance de la température. Le courant de court-circuit, par contre augmente légèrement avec l'augmentation de la température du module.

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule .On peut remarquer sur la figure (4.10) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

4.5.2. Influence de l'éclairement sur le module :

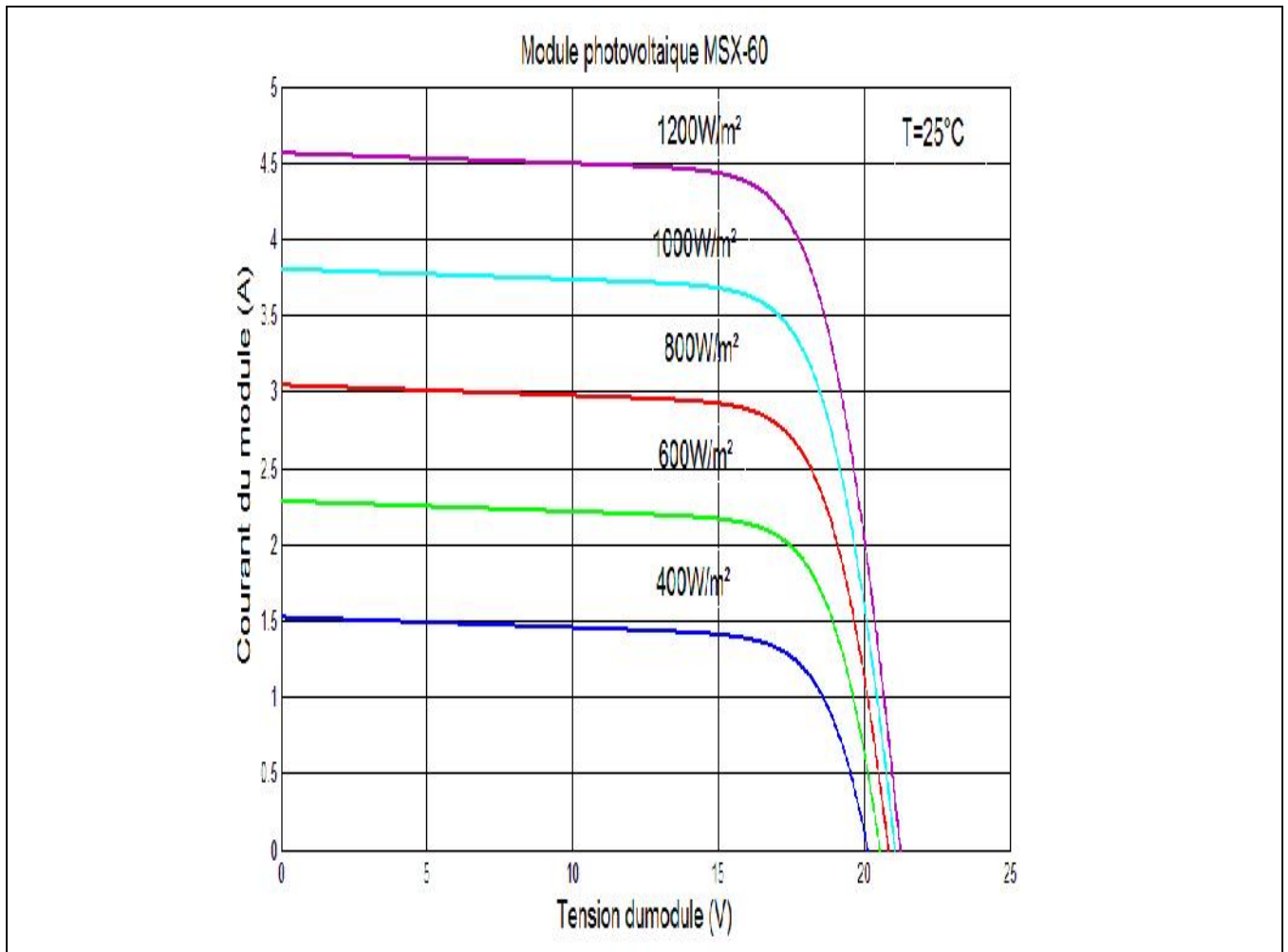


Figure (4.11) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents Eclairements à une Température $T=25^{\circ}C$.

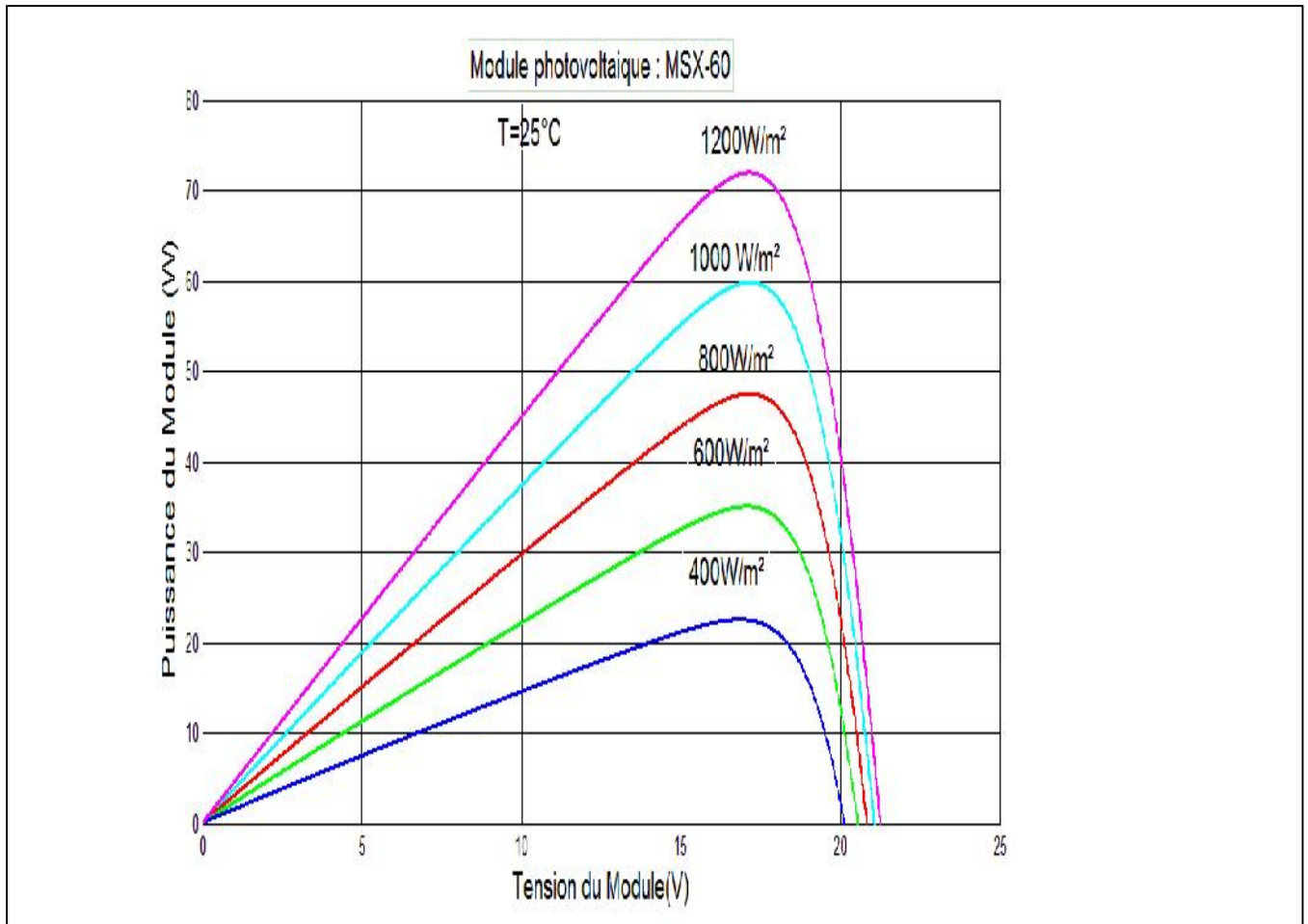


Figure (4.12) : Résultats de simulation des caractéristiques puissance-Tension pour différents Eclairements et à une Température $T=25^{\circ}\text{C}$.

Les figures (4.11) et (4.12) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, nous remarquons que l'irradiation a un impact très remarquable sur le courant I_{sc} , ainsi ce dernier augmente avec la croissance de l'irradiation, mais par contre la tension varie légèrement.

Ces figures montrent clairement la croissance du rendement causée par l'augmentation de l'éclairement. On peut remarquer sur la figure (4.12) que l'augmentation de l'éclairement se traduit aussi par une croissance de la puissance.

4.5.3. Influence de R_s et R_p sur le module :

- Influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I-V :

Les performances du module PV diminuent quand la résistance R_s augmente, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance R_s soit la plus faible que possible.

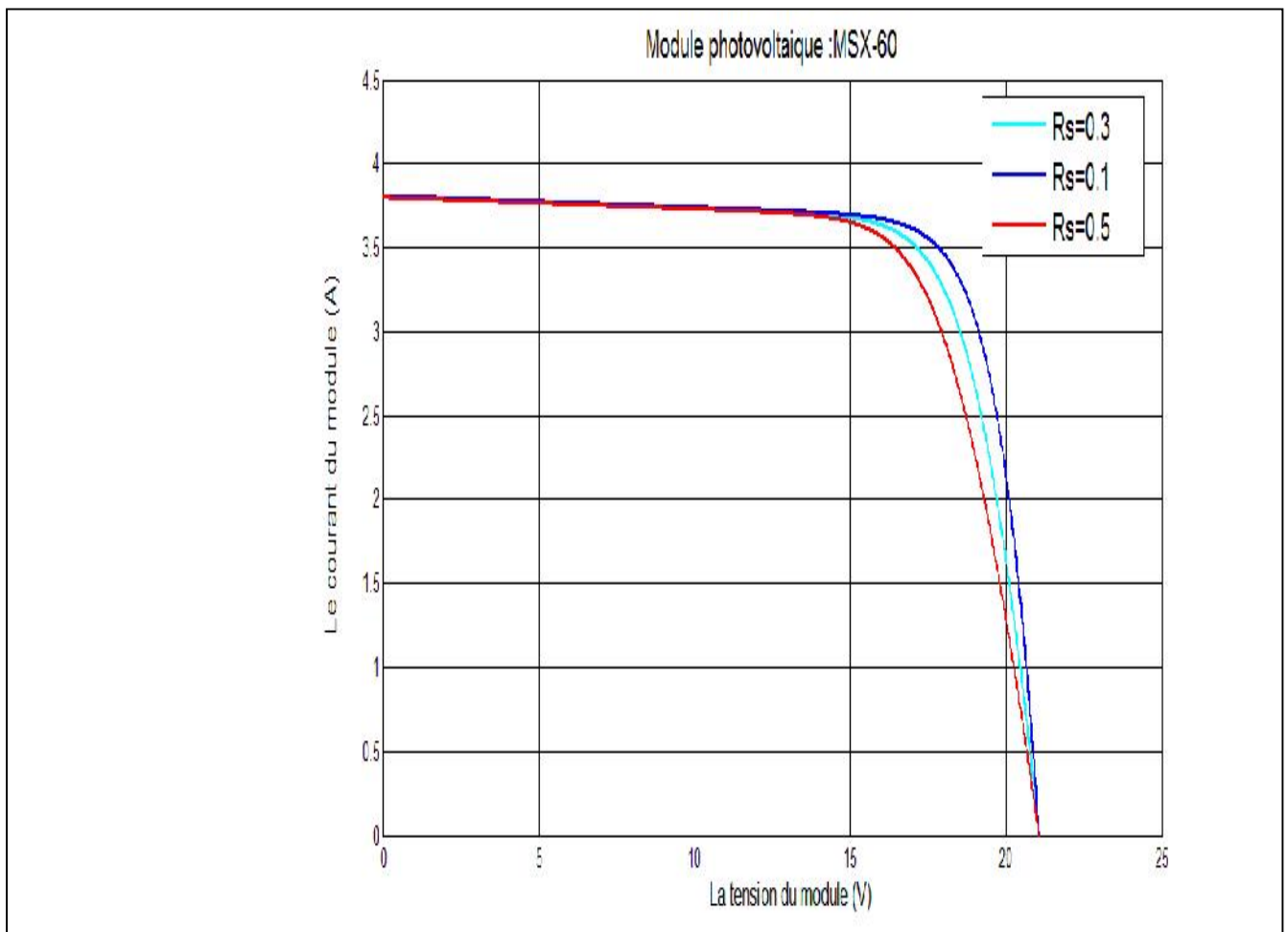


Figure (4.13): Résultats de simulation des caractéristiques I-V Pour différent valeur de R_s .

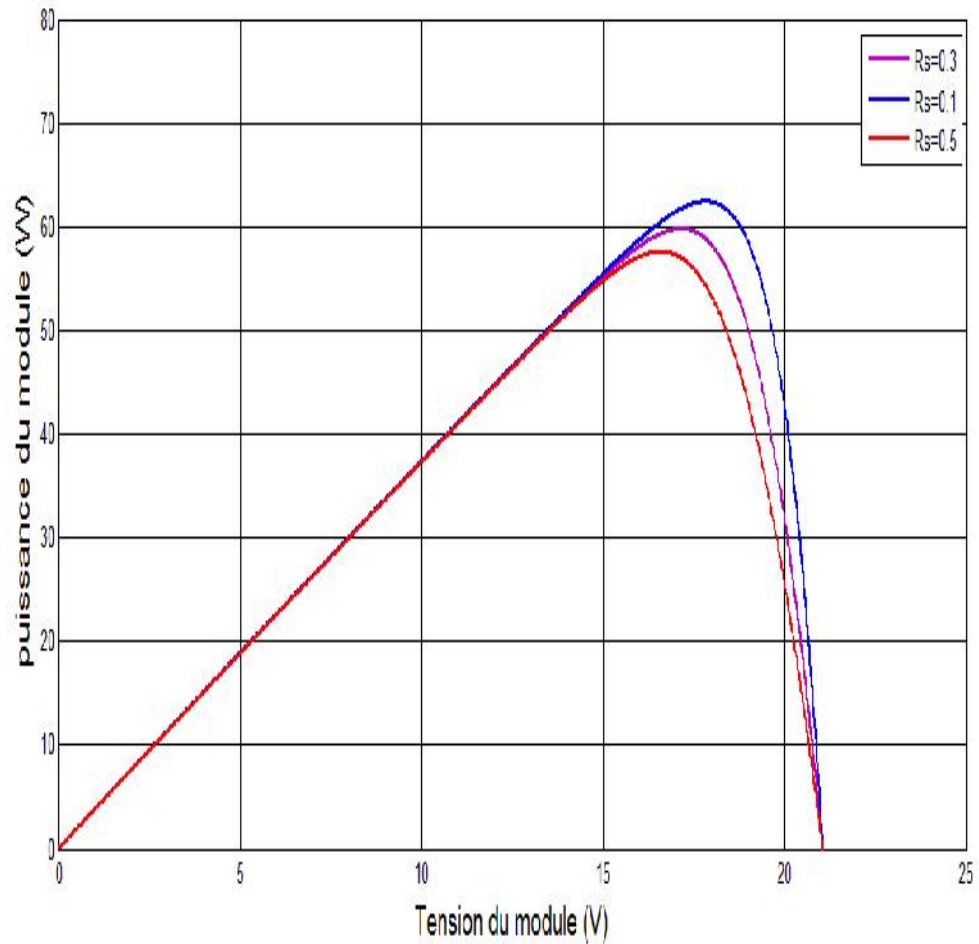


Figure (4.14) : Résultats de simulation des caractéristiques P-V Pour différent valeur de R_s .

- **Influence de la résistance R_p sur la caractéristique I-V :**

Les performances du module PV diminuent quand la résistance R_p diminue, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance R_p soit la plus élevée possible.

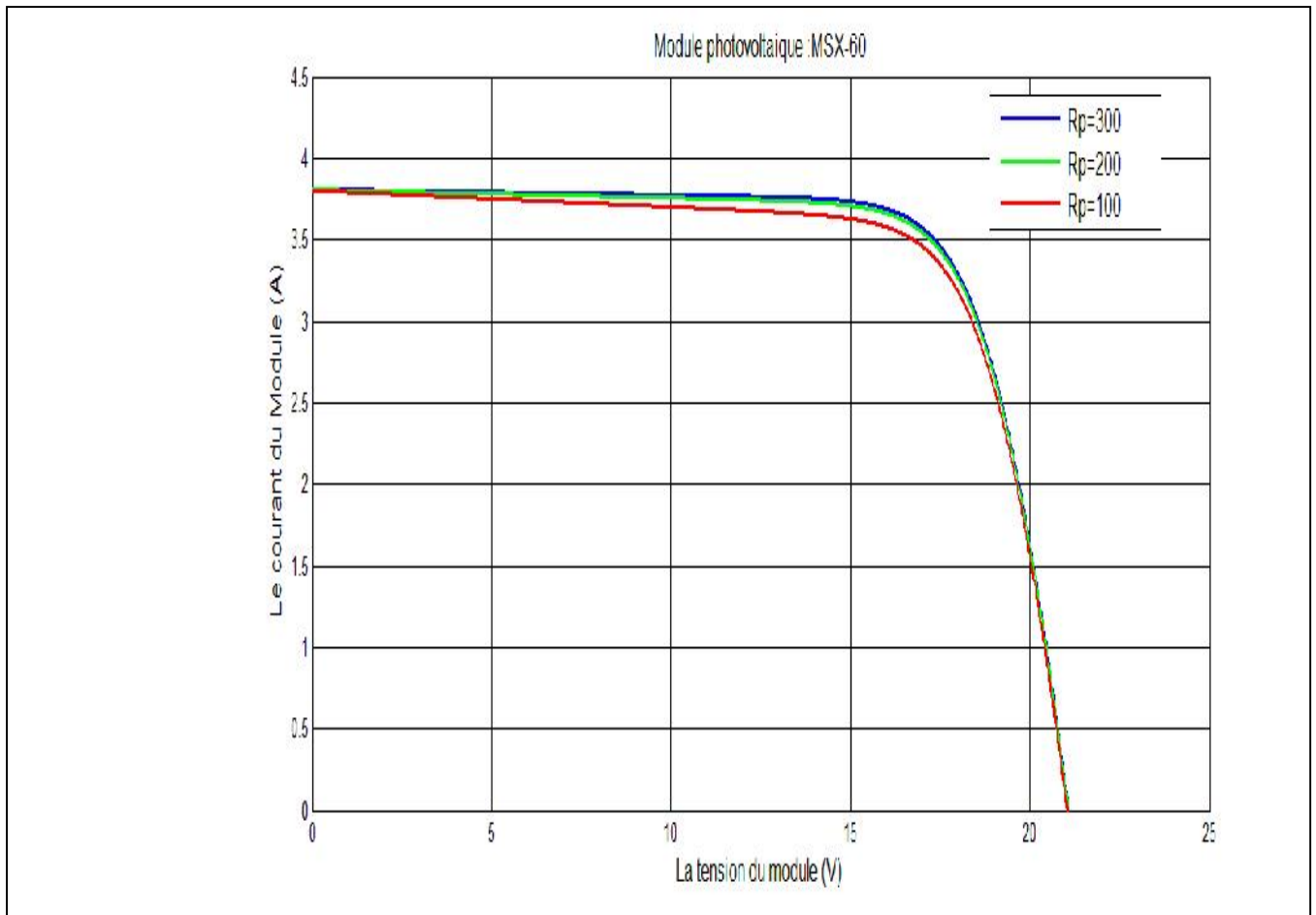


Figure (4.15) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V Pour différentes valeurs de la résistance parallèle .

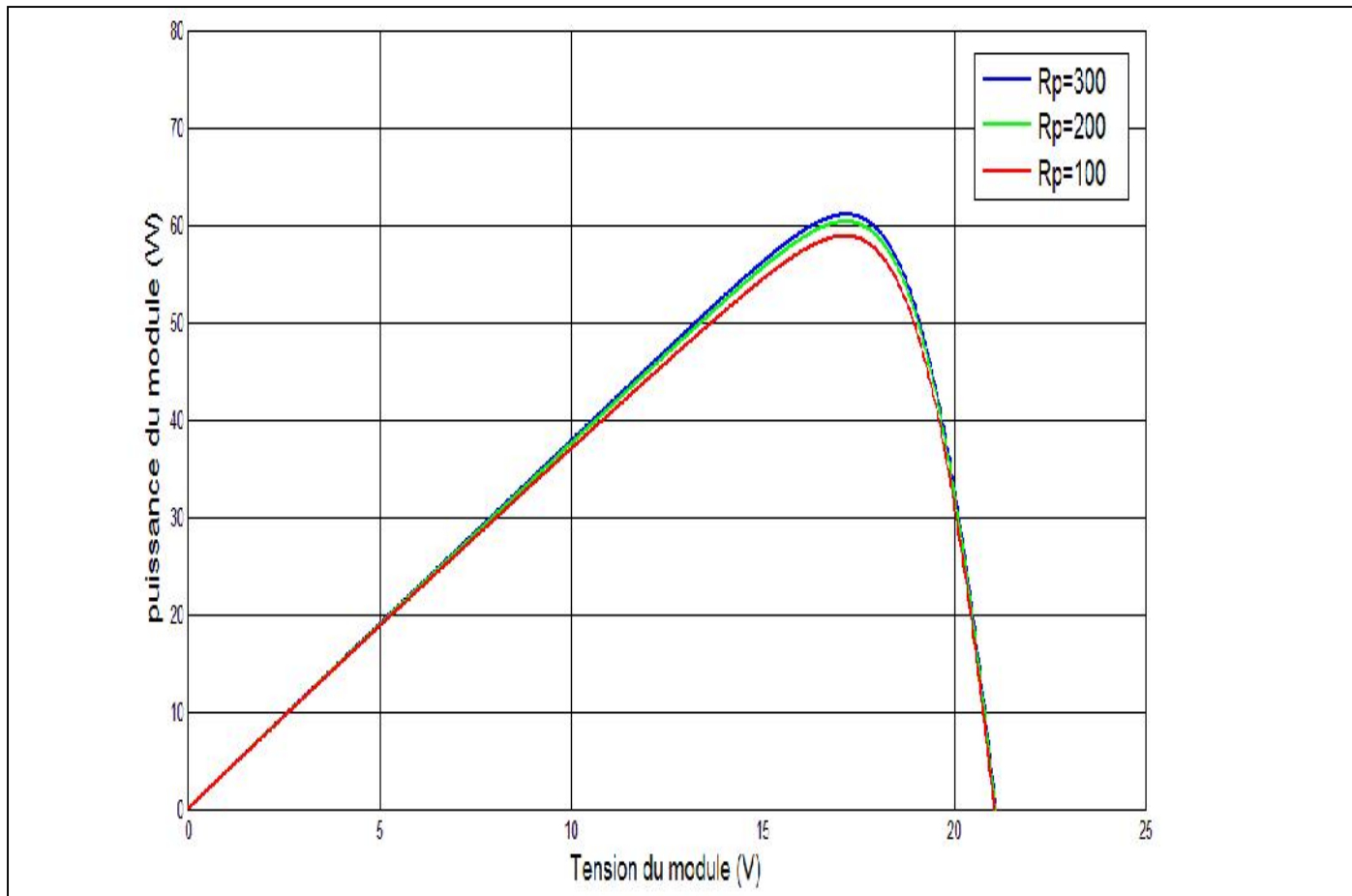


Figure (4.16) : Résultats de simulation des caractéristiques V-P Pour différentes valeurs de la résistance parallèle.

4.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle d'un module photovoltaïque sous Matlab Simulink. Ce modèle est tiré à partir d'un schéma électrique équivalent.

Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique de la cellule photovoltaïque est directement liée à des conditions météorologiques en grande partie comme l'éclairement et la température. Mais aussi aux paramètres internes des panneaux photovoltaïques comme les résistances série (R_s) et parallèle (R_p).

Conclusion générale :

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la problématique de la modélisation de module photovoltaïque en utilisant une méthode purement numérique qui est celle de (Newton-Raphson).

La méthode de modélisation de modules PV exposé durant ce travail, utilise le principe des algorithmes numériques (méthode NEWTON-RAPHSON) comme outil pour la détermination des paramètres inconnus d'un modèle électrique bien déterminé. Pour cela nous avons choisi le modèle d'une cellule a une seule diode qui a permis e simuler sous MATLAB Simulink les variations des caractéristiques courant-tension et puissance-courant du panneau MSX-60 de SOLAREX.

En effet, nous avons examiné précisément l'influence de l'éclairement, de la température et de la variation des résistances, série R_s et parallèle R_p sur le courant et la puissance délivrés par le panneau.

Le résultats de la simulation montrent que le courant de court-circuit dépend fortement de l'éclairement et des deux résistances et faiblement de la température. Par contre la tension de circuit ouvert dépend fortement de la température et faiblement de l'éclairement et des deux résistances (R_s, R_p). La puissance maximale est quant elle influencée par l'éclairement et la température et les deux résistances.

Bibliographie

- [1] **BENSACI.Wafa** <<Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT>>Thème de Master en Génie électrique, Université Kasdi Merbah–Ouargla.2011/2012.
- [2] **HANANOU Fatiha et ROUABAH Aicha** << Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque>> Thème de Master , Université Kasdi Merbah ouargla.2014 .
- [3] **Mr. FALLAH. Boumediene** <<Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah>>Mémoire de Magister Ecole Doctorale : Energies Renouvelables.2012-2013.
- [4] **M. PETIBON Stephane**<<: Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques>>Thèse de Doctorat , Université Toulouse III - Paul Sabatier.2009 .
- [5] **BENIS. Halouma**<<Contribution à la modélisation du problème de « Hot Spot » dans les modules solaire Photovoltaïque occultées>>Thèse de magister,2008
- [6] **Mr .BOUZID.Allal ElMoubarek et Mr.AZIZI Mouhamed**<<Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme>>Mémoire de projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état.2008.
- [7] **Salima ALEM-BOUDJEMLINE**<<Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastique>>Thèse de Doctorat, Ecole de doctorale d'Angers,2004.
- [8] **M^{elle} TRAHI.Fatiha** <<prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels>>Mémoire de magister ,UMMTO.2011.
- [9] **M^{elle} DEBILI. Narimen**<<Etude et optimisation en environnement Mat lab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïques>>Thèse de Magister. Université Constantine.2014-2015.
- [10] **Salim.ABOUDA.**<< Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïques>>Thèse. Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax.2015
- [11] **M^{me} MEZIANI. Zahra**<<Modélisation de modules photovoltaïque>>Mémoire de Magister .Université Batna, 2012.

[12]www.hespul.org

[13] **BELHADJ. Mohammed**<<Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome>>Mémoire de Magister,2007 -2008.

[14] www.prepa-cpe.fr/documents/Les_cellules_photovoltaiques.pdf.

[15]www .peracod.sn

[16] **Sofiane.ABADA**<<Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur SEPIC>>Université Laval Quebec.2011.

[17]**AOUN.Nouar**<<Etude et modélisation desdifférents modeles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales>>Mémoire de magister.2010.

[18]**N. AOUCHICHE, M.S. AIT CHEIKH et A. MALEK**<<Poursuite du point de puissance maximale d'un systèmephotovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation>>Article.2013.

[19]**Othmane BENSEDDIK, Fathi DJALOU**D « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque »Mémoire de Master ,Université KASDI MERBAH- Ouargla.2011/2012.

Mots clés :

Semi-conducteurs

Photovoltaïque

Modélisation

Simulation

Modèle mathématique

Cellule réelle

Cellule idéal

Régulateur de charge

Convertisseur DC-DC

Convertisseur AC-DC

Schéma bloc

Résumé :

Dans ce mémoire on a présenté la problématique de la modélisation de module photovoltaïque en utilisant une méthode purement numérique qui est celle de (Newton-Raphson).

La méthode de modélisation de modules PV exposé durant ce travail, utilise le principe des algorithmes numériques (méthode NEWTON-RAPHSON) comme outil pour la détermination des paramètres inconnus d'un modèle électrique bien déterminé. Pour cela nous avons choisi le modèle d'une cellule a une seule diode qui a permis e simuler sous MATLAB Simulink les variations des caractéristiques courant-tension et puissance-courant du panneau MSX-60 de SOLAREX.

En effet, nous avons examiné précisément l'influence de l'éclairement, de la température et de la variation des résistances, série R_s et parallèle R_p sur le courant et la puissance délivrés par le panneau.

Le résultats de la simulation montrent que le courant de court-circuit dépend fortement de l'éclairement et des deux résistances et faiblement de la température. Par contre la tension de circuit ouvert dépend fortement de la température et faiblement de l'éclairement et des deux résistances (R_s, R_p). La puissance maximale est quant elle influencée par l'éclairement et la température et les deux résistances.