



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique
Option : Micro- électronique

Réf:.....

*Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:*

MASTER

Thème

*ETUDE ET MODELISATION
D'UN
GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE*

Présenté par :

Arbi Mohamed Rafik

Devant le jury compose de :

<i>Mr</i>	<i>: Belkacem Houcine</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>
<i>Mme</i>	<i>: Trguni Ouarda</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mme</i>	<i>: Djaalal Nadjoua</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>

Promotion : Juin 2013

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique
Option : Micro-électronique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**ETUDE ET MODELISATION
D'UN
GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE**

Présenté par :

Arbi Mohamed Rafik

Avis favorable de l'encadreur :

Mme : Djaalal Nadjoua

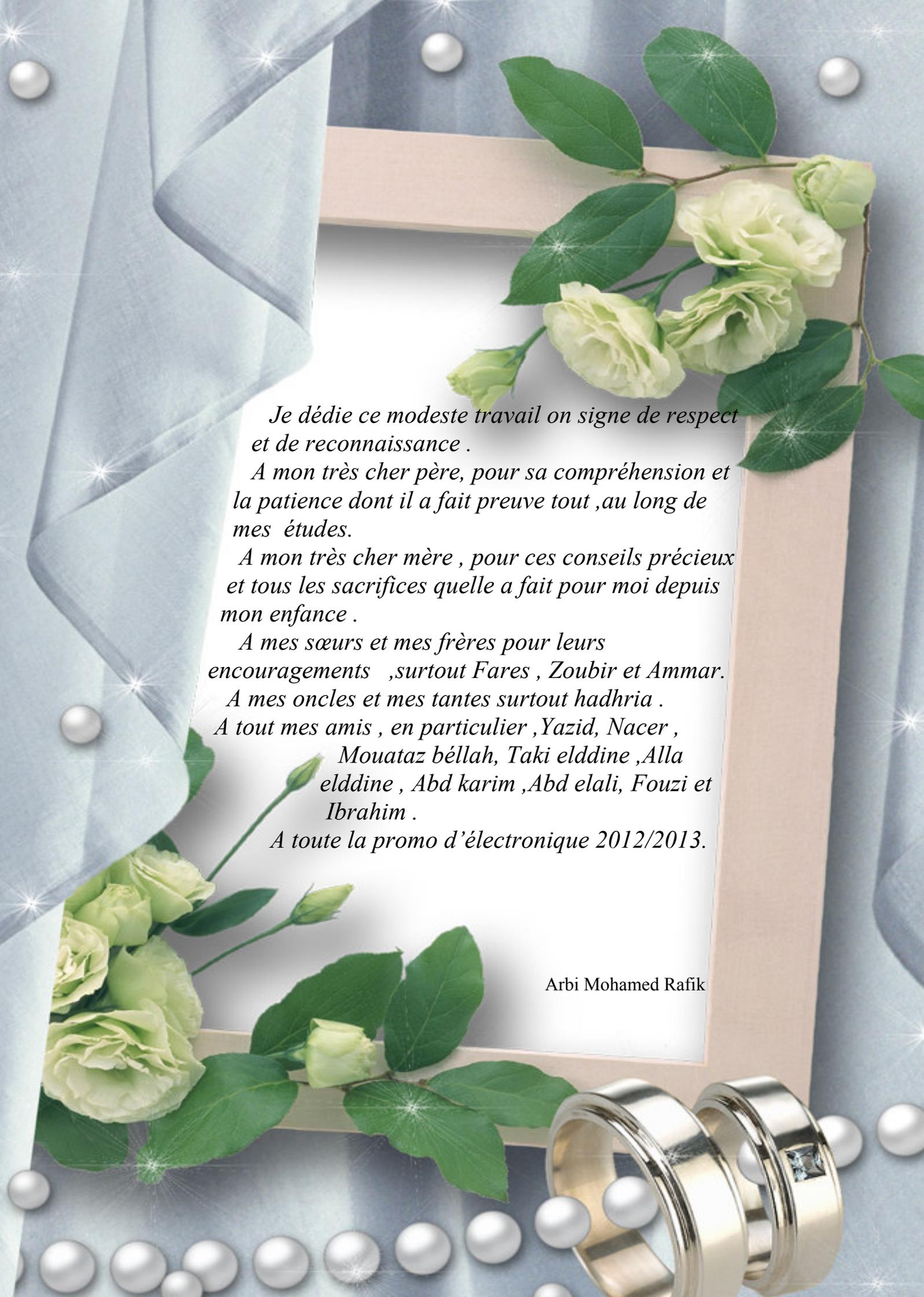
Avis favorable du Président du Jury :

Mr : Belkacem Houcine

Mme : Trguni Ouarda

Cachet et signature

Dédicaces



*Je dédie ce modeste travail on signe de respect
et de reconnaissance .*

*A mon très cher père, pour sa compréhension et
la patience dont il a fait preuve tout ,au long de
mes études.*

*A mon très cher mère , pour ces conseils précieux
et tous les sacrifices quelle a fait pour moi depuis
mon enfance .*

*A mes sœurs et mes frères pour leurs
encouragements ,surtout Fares , Zoubir et Ammar.*

A mes oncles et mes tantes surtout hadhria .

*A tout mes amis , en particulier ,Yazid, Nacer ,
Mouataz béllah, Taki elddine ,Alla
elddine , Abd karim ,Abd elali, Fouzi et
Ibrahim .*

A toute la promo d'électronique 2012/2013.

Arbi Mohamed Rafik



Remerciment



*R*EMERCIEMENT

*La mise en œuvre de ce mémoire au ministère de la département de génie électrique , faculté des sciences et technologie de l'université de Mohammed khider Biskra, sous la supervision du Prof **Djaalal Nadjoua**, professeur au département de génie électrique de l'université Mohamed Khider Biskra, à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué pendant toute la durée de ce travail.*

*Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **Belkacem Hocine**, professeur au département du génie électrique de l'université de Mohamed Khider de Biskra, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire.*

*Sincères remerciements à madame **Trguni ourda**, professeur au Département de génie électrique de l'Université Mohamed Khider de Biskra sur leur intérêt pour ce travail en me donnant l'honneur de participer à cette équipe.*

*Je suis très reconnaissant également à monsieur **Borni Abd Halim**, un médecin du centre de recherche en Ghardaia, pour l'aide qu'il m'a apporté durant toute la préparation de cette mémoire.*

*Je suis très reconnaissant également à madame **Tahri Khadra** , professeur au département du génie électrique de l'Université de Tlemcen , pour l'aide qu'il m'a apporté durant toute la préparation de cette mémoire.*

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir .



Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : les cellules photovoltaïques	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Energie solaire.....	3
I.3 Principe de fonctionnement d'un cellule photovoltaïque.....	5
I.3.1 l'interaction photon /semi conducteur.....	5
I.3.2 Fonctionnement d'un cellule photovoltaïque.....	7
I.4 Différents technologies existantes.....	10
I.4.1 Le Silicium.....	10
I.4.1.1 Silicium monocristallin.....	11
I.4.1.2 Silicium polycristallin.....	11
I.4.1.3 Silicium ruban auto-supporté.....	12
I.4.1.4 Silicium en couches minces monocristallin et amorphe.....	12
I.4.2 Cellules en couches minces.....	13
I.4.2.1 Matériaux à base de tellure de cadmium.....	13
I.4.2.2 Matériaux à base de cuivre indium.....	13
I.4.3 Les cellules multijonctions.....	13
I.4.4 Les cellules noncristallines à colorant on cellules de grätzel.....	14
I.4.5 Les cellules photovoltaïque organiques.....	14
I.5 Association des cellules solaires.....	15
I.5.1 Association en série.....	15
I.5.2 Association en parallèle.....	15
I.5.3 Association en hybride(en série et en parallèle).....	16
I.6 Conclusion.....	17
Chapitre II : les Modules photovoltaïques	
II-1 Introduction :	18
II-2 Le module photovoltaïque	19
II-2-1 Caractéristique d'un module.....	20
II-3 Le panneau solaire	21
II-4 Système de stockage	23
II-4-1 Types d'accumulateurs	24
II-4-1-1- Les Accumulateurs au plomb acide	24

Sommaire

a) Composition d'une batterie solaire plomb- Acide	25
b) Principe de fonctionnement	27
II-4-1-2- Les Accumulateurs au Nickel- cadmium	27
II-5 Système de régulation	28
II-5-1 Régulation de décharge	28
II-5-2 Régulation de la charge	28
II-5-2 -1 Régulations de charge série	28
II-5-2 -2 Régulateur de charge de coupure	29
II-5-2 -3 Régulateur de charge à découpage	29
II-5-2 -4 Régulateur de charge série à coupure partielle	30
II-5-2 -5 régulateur de charge parallèle	30
II-6 Système de conversion	30
II-6-1 Le convertisseur continu -continu	31
II-6-2 Le convertisseur continu- alternatif	31
II-7 La Charge	33
II-8 Installation des panneaux.....	33
II-8 -1 Disposition des panneaux.....	33
II-8 -2 Fixation des panneaux.....	33
II-8 -3 L'orientation des panneaux	34
II-8 -4 Installions des éléments de la batterie	34
II-8 -5 Câblage électrique	35
II-8 -6 Câblage de liaison	35
II-9 Avantages et inconvénients d'une installation PV	35
II-9-1 Avantages	35
II-9-2 Inconvénients	35
III-10-Les différents types d'utilisation de générateurs photovoltaïques.....	51
III-10-1- Alimentations électriques faibles puissances.....	51
III-10-2- Installations électriques photovoltaïques autonomes.....	51
III-10-3- Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau.....	53
III-10-3-1-Installation PV raccordée au réseau sans injection(auto-consommation)....	53
III-10-3-2- Installation PV raccordée au réseau avec injection des excédents de production.	54
III-10-3-3- Tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque.....	54

III-10-3-4- Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite.....	55
III-11- Applications de l'électricité photovoltaïques.....	56
II-12- Conclusion	36
Chapitre III: Modélisation d'un générateur photovoltaïque	
III-1- Introduction.....	37
III-2- L'outil MATLAB/SIMULIK.....	37
III-3-Modélisation des cellules photovoltaïques.....	38
III-3-1-Modèle à quatre paramètres.....	38
III-3-2- Modèle à cinq paramètres.....	39
III-3-3-Modèle à paramètres constants.....	41
III-3-4- Comportement thermique.....	42
III-4- Caractéristique d'un module solaire.....	43
III-4-1-Caractéristique courant-tension I(v).....	43
III-4-2-Caractéristique puissance-tension P(v).....	44
III-5- Simulation d'un générateur PV.....	44
III-6-Influence des différents paramètres.....	45
III-6-1-Influence de la l'éclairement sur les caractéristiques I-V.....	45
III-6-2Influence de température sur les caractéristiques I-V.....	46
III-6-3-Influence de la résistance série sur les caractéristiques I-V.....	47
III-6-4- Influence du facteur qualité sur les caractéristiques I-V.....	48
III-6-5- Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV	48
III-7-Zones de fonctionnement du module solaire.....	49
III-8-Fonctionnement optimal du générateur.....	50
III-9-Protection d'un générateur photovoltaïques	51
III-10 -Conclusion.....	58
Conclusion général.....	60
Références bibliographiques.....	61
Annexe.....	63

Liste des figures

Chapitre I : Les cellules photovoltaïques

Figure. I. 1. schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre

Figure I.2 . Rayonnements AM0 , AM1 et AM1.5

Figure. I.3 . Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur . le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à gap indirect.

Figure. I.4 . Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.

Figure. I.5 .Structure (image gauche)et diagramme de bande(image droite) d'une cellule.

Figure. I.6.Caractéristiques $I=(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une Cellule photovoltaïque.

Figure. I.7 .Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.

Figure. I.8 . Photos de cellule solaire monocristallin

Figure. I.9 . Photos de cellule solaire polycristallin

Fig. I.10. Photos de cellule solaire amorphe

Figure. I.11. caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

Figure. I.12 .caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle .

Figure. I.13 . caractéristique résultante d'un montage hybride (N_s et N_p) cellules

Figure. I.14. à gauche cellules A et B en série à droite cellules A et B en parallèle
(a) cellules identiques (c) cellules non identique

Chapitre II : Les modules photovoltaïques .

Figure. II.1. Schéma simplifié d'un système PV.

Figure. II.2. Module photovoltaïque.

Figure. II.3. Boîte de jonction .

Figure. II.4. Panneau de solaire .

Figure. II.5. Boîte de dérivation .

Figure. II.6.Construction d'une batterie monobloc .

Figure. II.7. Schéma de principe d'un régulateur de charge série .

Figure. II.8.Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage .

Figure. II.9.Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle .

Figure. II.10.Schéma de L'onduleur.

Figure .II.11.Schéma considéré Les alimentations électriques faibles puissances.

Figure .II.12. Schéma considéré d'un système photovoltaïque autonomes .

Figure .II.13. Schéma considéré installation PV raccordée au réseau sans injection.

Chapitre III : Modélisation d'un générateur photovoltaïque .

Figure. III.1 . Bibliothèque SIMULINK.

Figure. III.2. Modèle à quatre paramètres .

Figure. III.3. Modèle à cinq paramètres.

Figure.III.4 .schéma bloc d'une cellule PV.

Figure.III.5 . Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque.

Figure.III.6 . Caractéristique $P=(V)$ d'un module photovoltaïque $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

Figure. III.7 . Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Figure. III.8. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique :a) $I=f(V)$, b) $P=f(v)$, $T=25^{\circ}\text{C}$.

Figure.III.9..L'influence de la température sur la caractéristique :a) $I=f(V)$,b) $P=f(v)$,
 $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

Figure.III.10. L'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$.

Figure.III.11. L'influence du facteur de qualité pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ w}/\text{m}^2$.

Figure.III.12. L'influence du facteur de qualité pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ w}/\text{m}^2$.

Figure.III.13. Différentes zones de la caractéristique $I(V)$ à $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $G= 1000\text{W}/\text{m}^2$.

Les abréviations

AM x : La notion de masse d'air.

c : La vitesse de la lumière.

CdS-CdTe : la filière à base de Sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium .

Cz : méthode Czochralski.

E_{ph} :La qualité d'énergie.

EVA : Ethylène – vynil – acétate.

FF : facteur de forme .

FZ : Float Zone.

h :La constante de Planck.

λ : La longueur d'onde.

η : rendement de conversion.

G : L'éclairement réel (W/m²)

G_{ref} : L'éclairement à condition de référence (W/m²) .

IGBT :Insulated Gate Bipolar Transistor.

I : courant de sortie du générateur (A).

I_{obsc} : densité de courant d'obscurité.

I_{cc} : courant de court- circuit (obtenu pour V=0) .

I_m : à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .

I₀ : Courant de saturation inverse (A) .

I₀₁, I₀₂: Respectivement les courants de saturation de la diode 1 et de la diode 2.(A).

I_{ph} : Courant photonique de la cellule (A).

I_{ph,ref} : Courant photonique de référence de la cellule (A).

I_{mp} : Courant maximal de la cellule (A).

I_{mp,ref} : Courant maximal de la cellule (A).

I_{SC} : Courant de court circuit du panneau solaire (A).

I_{SC,ref} : Courant de court circuit de référence du panneau solaire (A).

K : Constante de Boltzmann, 1.381×10^{-23} J/K .

MPPT : Maximum power point tracking.

MLI : Modélisation de largeur d'impulsion.

N_{cs} : Nombre des cellules.

N_p : Nombre des modules en parallèle.

N_s : Nombre des modules en série.

P_i : puissance d'éclairement reçue par unité de surface .

P_m : La puissance maximale .

Les abréviations

P_c : La puissance de crête.

PWM : Pulse width modulation.

q : Constante de charge d'électron, 1.602×10^{-19} C

R_S : Résistance série (Ω).

S : surface de la cellule .

T : Le transistor.

T_c : Température de la cellule ($^{\circ}$ K)

T_{ref} : Température de cellules, à condition de référence ($^{\circ}$ K).

V : La tension de sortie du générateur (V).

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .

V_{OC} : Tension à vide du panneau solaire (V) .

V_{OC,ref} : Tension à vide de référence du panneau solaire (V).

γ : Facteur de qualité de la diode.

γ_1, γ_2 : Respectivement le facteur de qualité de la diode 1 et de la diode 2.

γ_{ref} : Facteur de qualité de référence de la diode .

μ_{isc} : Coefficient de la température du courant de court circuit ($A/^{\circ}$ C).

μ_{oc} : Coefficient de la température en circuit ouvert($V/^{\circ}$ C).

U_{bat} : La tension de la batterie.

U_Z : La tension de la diode Zener .

W_c : Watt- crête.

الملخص:

تقدم هذه مذكرة نموذج محاكاة للتنبؤ اداء الضوئية في ظروف الارصاد الجوية للموقع التثبيت نظام التشغيل (PV). وتستخدم النظم الكهربائية الضوئية الفردية على نطاق واسع في تطبيقات مصادر الطاقة المتجددة و انه من المهم ان يكون لها القدرة على تقييم اداء النظم المثبتة. ويستند المعادلات الرياضية المتقدمة لنمذجة اداء المولدات الكهروضوئية على التيار-الجهد مميزة من وحدات.

وفي دراستنا قمنا باخذ المولد الكهروضوئية ذو الصنف MSX60 المنتج في الشروط النظامية للتجربة, استطاعة اعلاه 60 واط و ذو تيار قيمته 3.5 امبير بجهد 17.1 فولط. نتائج المحاكاة المتحصل عليها بواسطة Matlab/Simulink. **الكلمات المفتاحية:** نظام الكهروضوئية – التصميم – المحاكاة - خلية شمسية – لوح – مولد الكهروضوئي .

Résumé :

Ce mémoire présente un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système photovoltaïque (PV) fonctionnant dans les conditions météorologiques du site d'installation. Les systèmes photovoltaïques individuels sont largement utilisés dans les applications des sources d'énergie renouvelables et il est important d'avoir une capacité à évaluer la performance des systèmes installés. Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la performance du générateur PV sont basées sur la caractéristique courant – tension des modules.

Dans notre étude, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module MSX60 produisant, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 60W, un courant optimal de 3.5 A et une tension optimale de 17.1V. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink .

Mots clés : Système PV - Modélisation - Simulation- cellule solaire- Module –GPV.

Abstract :

This memoir presents the development of a simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic (PV) system operating under prevailing meteorological conditions at the site location. Stand-alone photovoltaic systems are widely used in renewable energy sources applications and it is important to be able to evaluate the performance of the installed systems. Mathematical equations developed for modelling the performance of the PV generator are based on current-voltage characteristic of the modules.

In our study, we conceived a PV system where the PV generator is the panel MSX60, this panel gives under the test standard conditions (CST), a power peak of 60W, an optimal current of 3.5A and an optimal voltage of 17.1V. The simulation results under Matlab/Simulink.

Keywords : PV system- Modeling- emulation- solar cell -module-GPV.

Résumé

Introduction générale

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de trouver des nouvelles solutions pour fournir et de développer, et même de rationaliser l'exploitation de ces énergies.

Jusqu'à maintenant, l'énergie électrique est la source la plus utilisée dans les différents domaines, dans les plus grandes usines ou même les plus petits appareils électroniques, que ce soit les plus importants domaines, tels que ceux utilisés dans les hôpitaux, ou ceux utilisés dans les Jouets. Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, on trouve notamment les générateurs, basés sur l'énergie fossile, en particulier le pétrole, ou bien qui utilise l'énergie nucléaire, ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, ce qui fait obligé de penser sérieusement aux énergies renouvelables.

Parmi les énergies les plus modernes, qui ont un brillant avenir, car ils sont propres et écologiques : « l'énergie solaire ». Il existe plusieurs façons d'utiliser cette énergie pour produire de l'électricité, mais la plus importante, et celle qui nous concerne dans ce mémoire, est la méthode basée sur le principe de la photovoltaïque.

La première cellule photovoltaïque a été réalisée en 1954, à base du silicium, aujourd'hui il reste encore le matériau le plus couramment utilisé, malgré la concurrence toujours plus rude des Tellures de Cadmium, et l'Arséniure de Gallium. Cette filière technologique à base des semi-conducteurs inorganiques caractérisées par son prix élevé, par sa fabrication très compliquée, sa rigidité (fragile)...

L'objectif principal de cette étude est de simuler les performances d'une seule composante du système PV, à savoir le générateur PV. C'est l'élément le plus onéreux et le plus sensible aux conditions climatiques sur le site. Les méthodes d'optimisation du générateur PV sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits.

A cet effet, nous avons fait dans notre étude :

Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur la technologie photovoltaïque, en commençant par des notions sur le rayonnement solaire. Dans un deuxième temps, nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque, et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ensuite on va citer les différentes filières technologiques des cellules solaires. Nous finissons

Introduction générale

ce chapitre par la présentation des différents montages des cellules solaires dans un module photovoltaïque.

Second chapitre est très important car il donne une description générale du principe de fonctionnement de chaque élément des éléments constitutifs du système solaire.

Dans le chapitre trois, on étudie une modélisation et une simulation par MATLAB-SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque).

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

Chapitre I :
Les cellules photovoltaïques

I-1- INTRODUCTION :

L'effet photovoltaïque a été découvert la première fois par Edmund Becquerel en 1839. Quand il a observé que l'action de la lumière sur une électrode en platine enduite argentée immergée dans l'électrolyte a produit un courant électrique. Quarante ans après les premiers dispositifs photovoltaïques à semi-conducteur ont été construits par le travail étudiant la photoconductivité récemment découverte du sélénium.

Cependant, ce n'était pas les propriétés photovoltaïques des matériaux comme le sélénium qui a excité les chercheurs, mais la photoconductivité, le fait que le courant produit était proportionnel à l'intensité de la lumière incidente. Pendant les années 1950, le développement de l'électronique et surtout l'utilisation du silicium, et après la découverte des jonctions PN en silicium, la première pile solaire de silicium a été rapportée par Chapin, Fuller et Pearson en 1954 et a converti la lumière du soleil avec une efficacité de 6%, six fois plus haut que la meilleure tentative précédente. Actuellement des cellules dites de troisième génération visent à passer la limite maximale de rendement des cellules conventionnelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif (cellule multi-jonction, les cellules nanowires).

Dans ce premier chapitre, Nous aborderons en premier lieu quelques notations sur le rayonnement solaire, ensuite, nous décrivons le principe de l'effet photovoltaïque, et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Dernièrement on va citer les différentes filières cellules solaires.

I-2 – ENERGIE SOLAIRE :

Le soleil libère continuellement une énorme quantité d'énergie rayonnante dans le système solaire ; en moyenne, 1367 watts atteignent chaque mètre carré de la couche atmosphérique externe. Il faut noter que la terre reçoit une fraction minuscule de cette énergie. En effet, en traversant les différentes couches de l'atmosphère, une partie de l'énergie solaire s'atténue : certaines longueurs d'onde (absorption des rayons de l'UV jusqu'au visible) ou comme la vapeur d'eau qui possède plusieurs raies dans le visible et dans l'infrarouge.

Pourtant, la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la terre en une heure est plus importante que la quantité totale d'énergie consommée par la population

mondiale en une année . le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond , elle-même ,à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{Equ.I.1})$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie , λ la longueur d'onde , h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière .

Pour tenir compte de la longueur effective parcourue à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct , la notion de masse d'air (AM x) est introduite figure I.1. Elle correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique . La masse d'air est exprimée comme un multiple du parcours traversé en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [1].

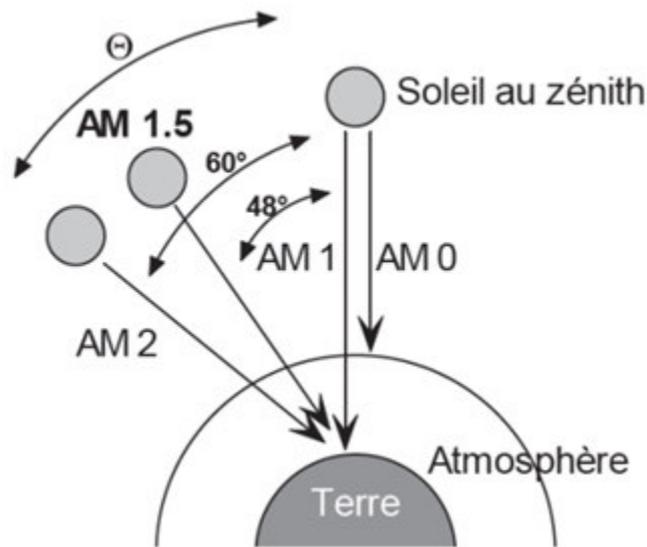


Fig. I. 1. schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre

On introduit le nombre d'air masse défini par :

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{Equ.I.2})$$

Où l'angle est l'élévation solaire, c'est -à-dire l'angle en radian entre le rayonnement solaire et le plan horizontal. Le spectre solaire AM0, correspond à une masse d'air nulle pour un éclairage solaire au delà de l'atmosphère à incidence normale .Pour un ciel clair avec le soleil à l'aplomb, on a le rayonnement de la masse d'air "1"(ou AM1). L'éclairage solaire

arrivant sur la terre avec un angle de 48° est de $100\text{W}/\text{m}^2$ (soit $100\text{Mw}/\text{cm}^2$) avec une masse d'air AM1[1].

Le spectre solaire AM 1.5 est composé de 3~4% de lumière ultraviolette ($<390\text{nm}$), de 45% de lumière visible ($390\text{-}750\text{nm}$) et de 52 % de lumière infrarouge [Proche IR($750\text{-}1400\text{nm}$)= 38% et lointain ($>1400\text{nm}$)=14%].

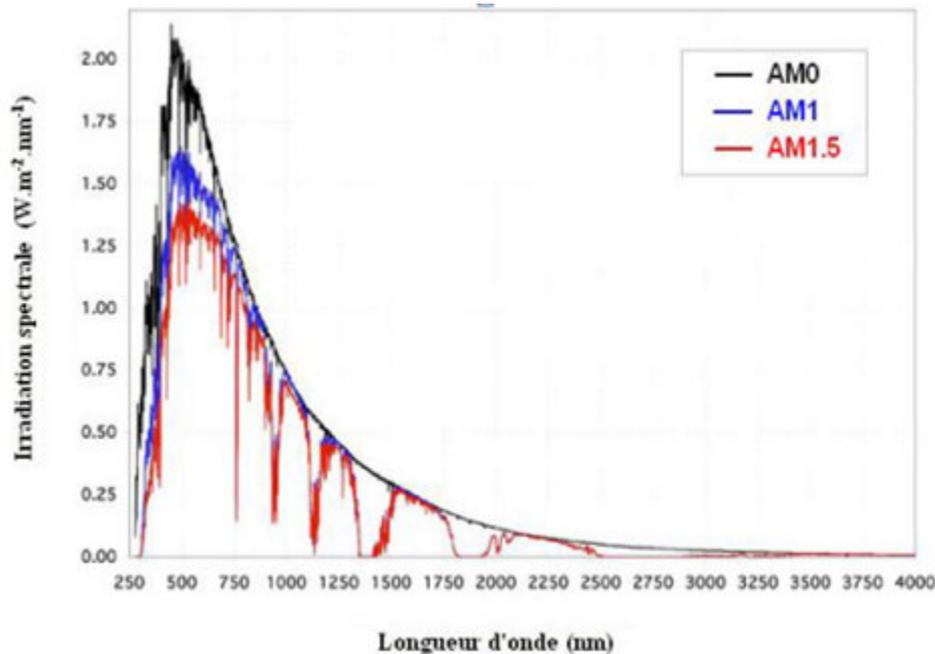


Fig. I.2 . Rayonnements AM0 , AM1 et AM1.5 [1].

I-3- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :

I-3-1- L'INTERACTION PHOTON / SEMICONDUCTEUR :

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs . La figure I.3 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement , et sont donc radiatives (Figure I-3(a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V , tels que le GaAs , beaucoup utilisés en optoélectronique . Dans le cas du silicium , le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques , donc

non radiatives puisqu'elles impliquent du vecteur d'onde de l'électron . les électrons du sommet de la valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie . Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect , il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron ,afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence , pour absorber un photon (figure I.3(b)).Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12eV à 300K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4eV (soit 365nm) [2] .

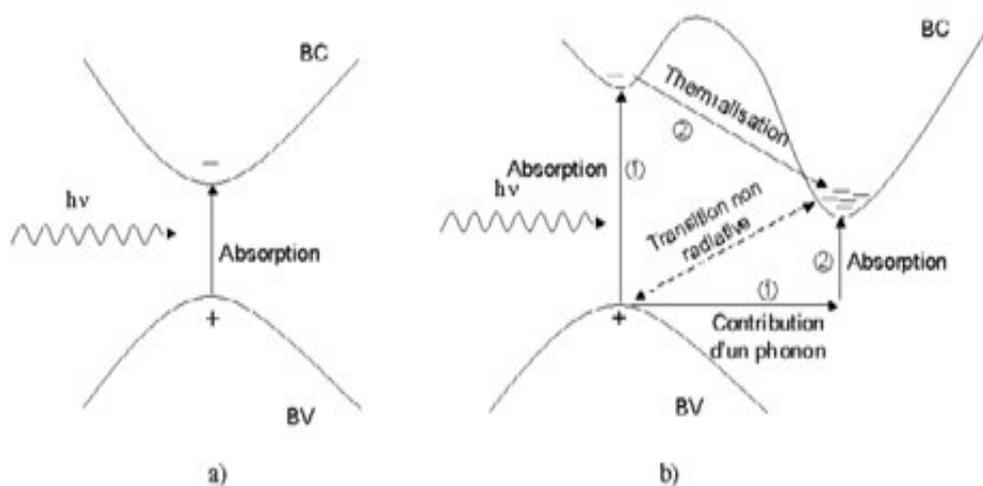


Fig. I.3 . Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur . le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à gap indirect.

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption .Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde .la Figure I.4 nous donne celui du silicium .nous constatons que pour des longueur d'ondes inférieures à 365nm , la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100premiers du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment , ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueur d'ondes plus grandes .Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction . Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption . lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près) , la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé [2] .

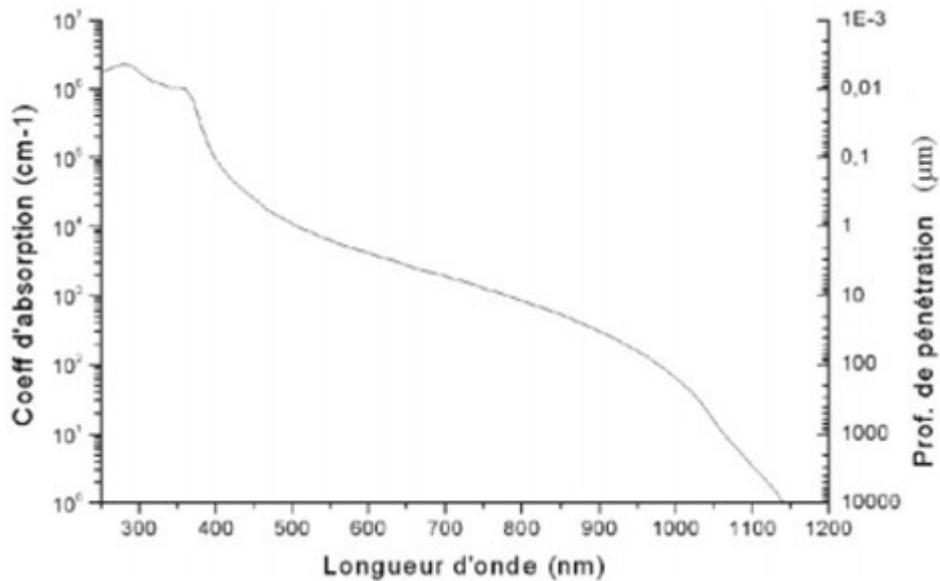


Fig. I.4 . Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.

L'interaction photon /électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou , qui modifie localement la conductivité du matériau .Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection , c'est-à-dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau . Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celles dopée p). la cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur [2] .

I-3-2- FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE:

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique [2] . Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption des photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison. Ce champ peut être généré de plusieurs manières : par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homo-jonctions ou jonction p-n).

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque [2].

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trou créées est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.5 :

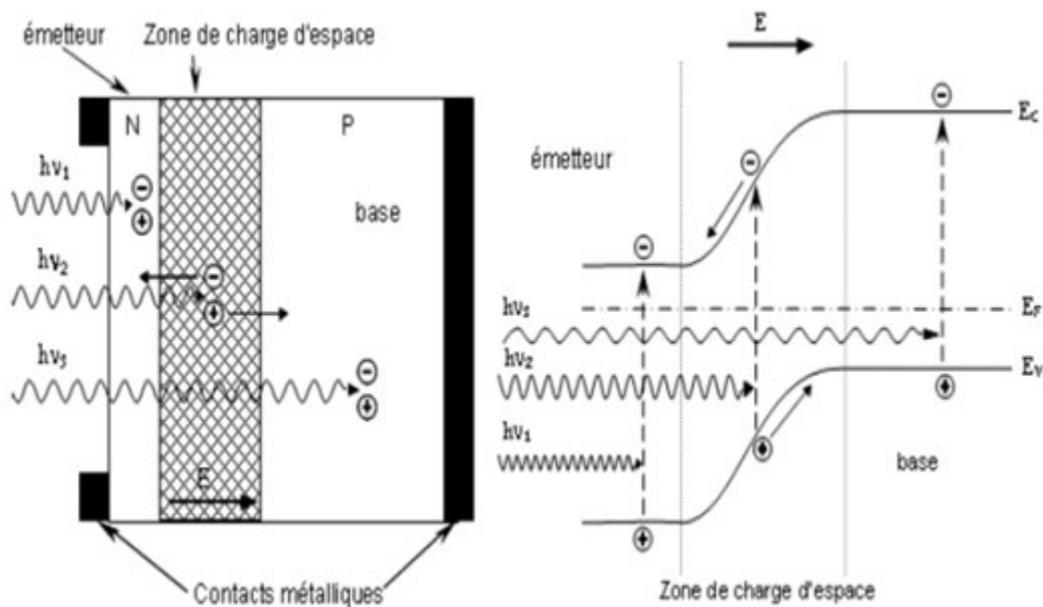


Fig. I.5 .Structure (image gauche)et diagramme de bande(image droite) d'une cellule.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace.

Les photo porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo courant de diffusion ;
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons /trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers région p. On aura un photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo courant résultant I_{ph} .

C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (\text{Equ.I.3})$$

Avec : I_{ph} : densité de courant photo-généré et I_{obsc} : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation(I.3) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_0 (\exp(qv / kT) - 1) \quad (\text{Equ.I.4})$$

Avec : I_0 : courant de saturation de la diode,

q : charge élémentaire,

K : constante de Boltzman,

T : température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairage, la caractéristique a l'allure présentée sur la Figure I.6.

A partir de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$) ;

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$) ;

I_m : à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

η : rendement de conversion;

FF : facteur de forme.

$\eta = (\text{puissance électrique maximale fournie}) / (\text{puissance solaire incidente})$

$$\eta = (I_m \cdot V_m) / (P_i \cdot S) = (FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}) / (P_i \cdot S) \quad (\text{Equ.I.5})$$

Avec P_i : puissance d'éclairement reçue par unité de surface ; S : surface de la cellule

$$FF = (\text{Puissance maximale délivrée sur charge}) / (V_{co} \cdot I_{cc})$$

$$FF = (I_m \cdot V_m) / (V_{co} \cdot I_{cc}) \quad (\text{Equ.I.6})$$

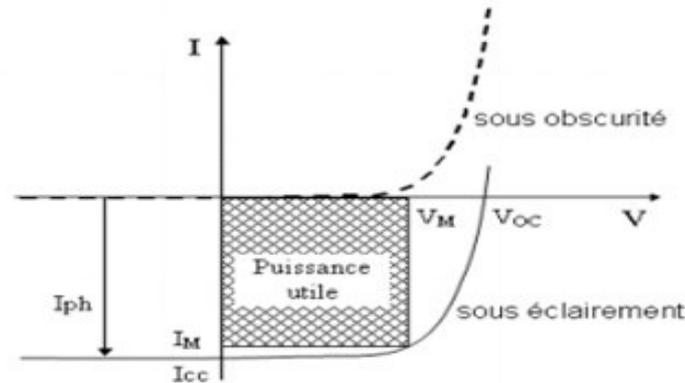


Fig. I.6. Caractéristiques $I=(V)$ sous obscurité et sous éclaircissement d'une Cellule photovoltaïque.

I-4- DIFFERENTES TECHNOLOGIES EXISTANTES :

Dans ce paragraphe on va citer les différentes filières technologiques des cellules photovoltaïques :

I-4-1- LE SILICIUM :

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure I.7 . Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique .On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin , poly-cristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïque commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [1] .

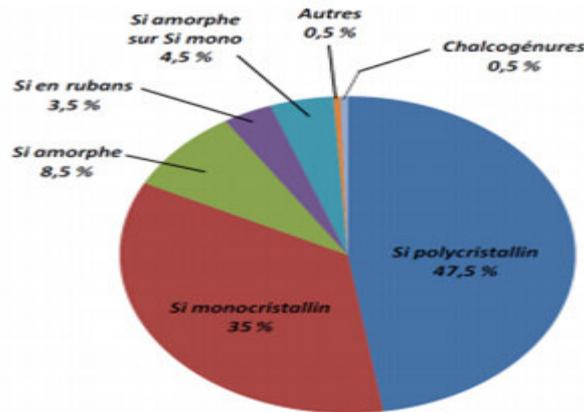


Fig. I.7 .Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.

I-4-1-1- SILICIUM MONOCRISTALLIN :

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir silicium monocristallin de qualité microélectronique , mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable , proche du MWh .Les silicium obtenus sont appelés Cz(méthode Czochralski) et FZ(Float Zone), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire , de l'ordre de 25% pour des cellules de 4 cm² (université de New South Wales, Australie)[3], soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériau.

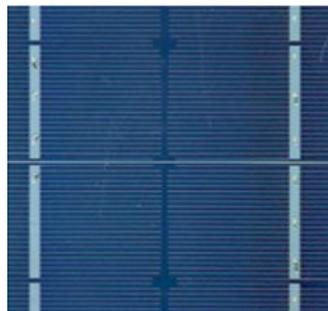


Fig. I.8 . Photos de cellule solaire monocristallin [4] .

I -4-1-2- SILICIUM POLYCRISTALLIN :

Le silicium poly-cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multi-cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multi-cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des

impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17% pour des grandes plaquettes de 200 cm² [3]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.



Fig. I.9 . Photos de cellule solaire polycristallin [4] .

I-4-1-3- SILICIUM EN RUBAN AUTOSUPPORTE :

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15% [3].

I-4-1-4- SILICIUM EN COUCHES MINCES NANOCRISTALLIN ET AMORPHE :

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres. Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1m²). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles

rendements (inférieurs à 10% au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [3]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro structures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo [3]) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21% et de 16% en production industrielle .



Fig. I.10. Photos de cellule solaire amorphe [5] .

I-4-2- CELLULES EN COUCHES MINCES :

Appelées aussi les chalcogénures , nous citons deux type CdS- CdTe et CIS :

I-4-2-1- MATERIAUX A BASE DE TELLURE DE CADMIUM :

Ce matériau est intéressant du fait de sa largeur de bande interdite de 1,45 eV et de sa forte absorption ce qui permet d'atteindre un rendement élevé. Pour constituer une cellule au CdTe, on pose une couche de conducteur transparent sur un substrat de verre, puis on dépose une couche de CdS (sulfure de cadmium) de type n puis une couche de CdTe dopé p, on constitue ainsi une hétérojonction. Les résultats de laboratoire sont très intéressants avec notamment un rendement de 15,8%. Malheureusement il contient du cadmium, connu pour sa toxicité et déjà interdit dans certains pays [6] .

I- 4-2-2- MATERIAUX A BASE DE SELNIURE DE CUIVER INDIUM :

Elles sont à base de cuivre , d'indium et de sélénium. Comme le CdTe, le CIS est déposé sur un substrat de CdS de type n. La largeur de la bande interdite du CIS est de l'ordre de 1 eV. Pour élargir le gap et augmenter le rendement, l'indium est allié au gallium et le sélénium à du soufre d'où le symbole CIGS pour Cuivre, (Indium, Gallium), (Sélénium, Soufre). Le CIS est actuellement le matériau en couches minces qui paraît le plus prometteur, mais ces cellules ont un inconvénient similaire aux cellules CdTe, elles

utilisent le cadmium dans le substrat [6].

I-4-3- LES CELLULES MULTI-JONCTION III-V:

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi-jonction III-V dites (de troisième génération) répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisés pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De part le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée.

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales.

I-4-4- LES CELLULES NANOCRISTALLIN A COLORANT OU CELLULES DE GRATZEL :

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon principe différent de celui décrit précédemment. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4% pour une cellule de 1cm² et est à mettre au profit de la société Sharp [3]. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour les rendements chutent alors à 6,7% [3].

I-4-5-LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE :

L'effet photovoltaïque est observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques. Les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles (<10⁻⁵%). En 1986 l'équipe de Tang a montré que les rendements proches du 1% sont atteignables [3]. Le rendement n'a pas été amélioré que depuis le début des années 2000,

il a dépassé les quatre pourcent avec les travaux de J.Xue , après ça une valeur record de 7.9% est obtenue par la firme SOLARMER , utilisant des matériaux dérivés du fullerène (PCBM) et un copolymère alterne.

I-5- ASSOCIATION DES CELLULES SOLAIRES :

I-5-1- ASSOCIATION EN SERIE :

Dans un montage en série, le même courant traverse toutes les cellules , la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par adition des tensions à courant donné .

La figure I.11 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série N_s cellules identiques.

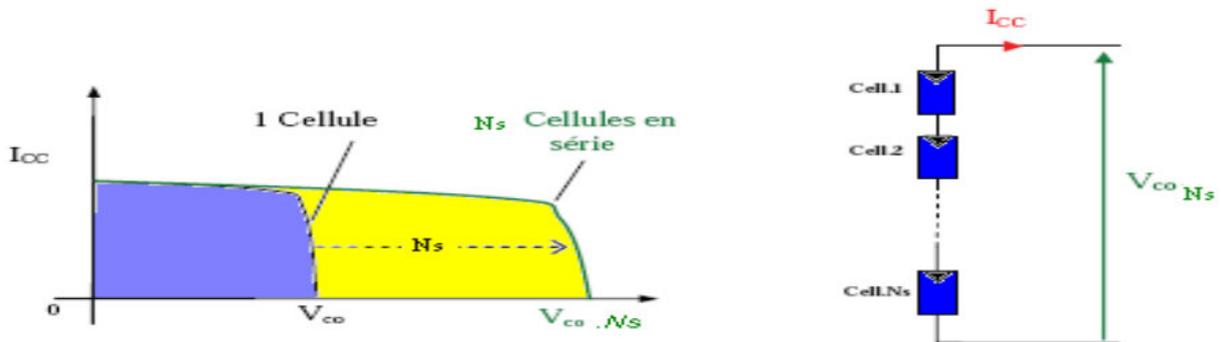


Fig. I.11. caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.[4]

I-5-2- ASSOCIATION EN PARALLELE :

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

La figure I.12 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles N_p cellules identiques.

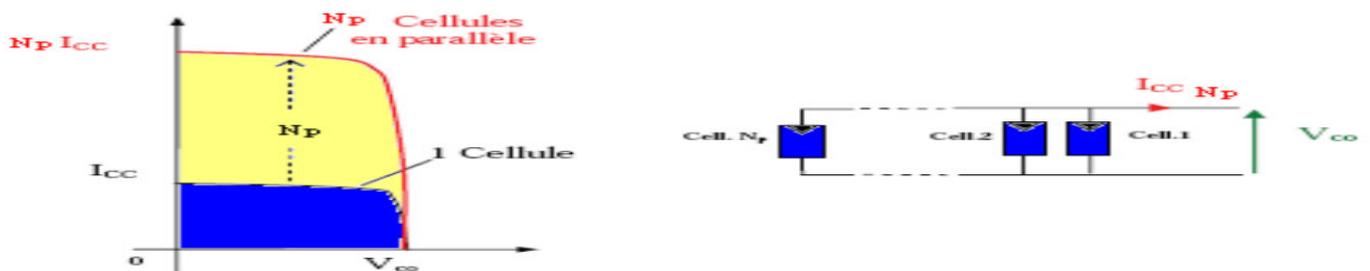


Fig. I.12 .caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle .[4]

I-5-3- ASSOCIATION HYBRIDE (EN SERIE ET EN PARALLELE) :

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 total sont données par les relations :

$$I_{cc}(\text{total}) = N_p \cdot I_{cc} \quad (\text{Equ.I.7})$$

$$V_{co}(\text{total}) = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{Equ.I.8})$$

N_p : nombre des cellules en parallèle, N_s : nombre des cellules en série.

La figure I.13 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p , cellules identiques.

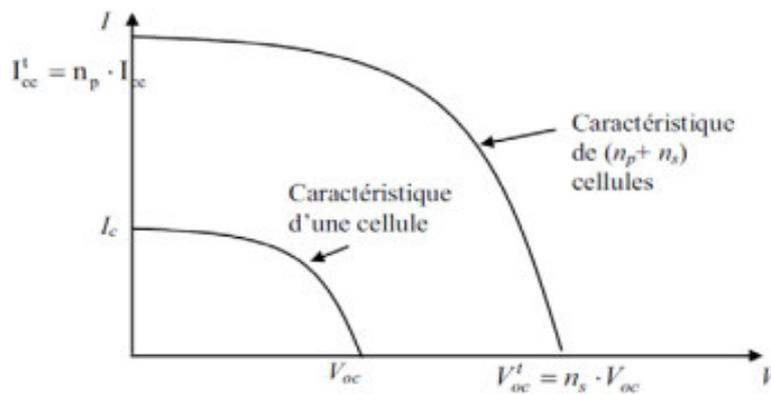


Fig. I.13 . caractéristique résultante d'un montage hybride (N_s et N_p) cellules[1].

Les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} sont plus ou moins importantes, à savoir l'association des cellules (série ou/et parallèle). la caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure général assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

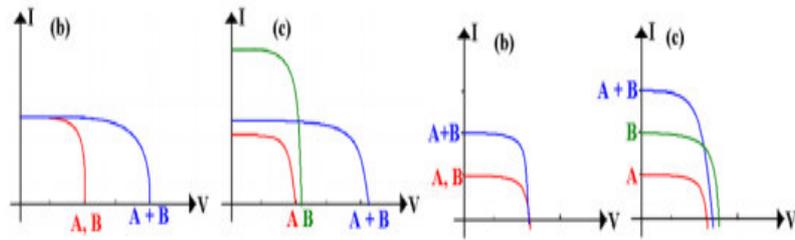


Fig. I.14 . à gauche cellules A et B en série à droite cellules A et B en parallèle

(b) cellules identiques (c) cellules non identique[1].

Les cellules non identiques génèrent à leur connexion plus de pertes que deux cellules identiques, ce qui impose une contrainte de reproductibilité dans la fabrication des cellules.

I-6- CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technologie photovoltaïque, allant de quelques idées sur le rayonnement solaire et la façon dont il entre dans notre atmosphère des angles et des points de vue différents sur la façon dont cette énergie peut affecter la (masse d'air AMX). Nous expliquons ensuite le processus de cellules photovoltaïques et de leurs différents secteurs de la technologie, dans le chapitre suivant parlent système photovoltaïque décrit bien.

Chapitre II :

Les modules photovoltaïques

II-1- INTRODUCTION :

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations [7]:

- non autonomes ou « grid connected » rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés au réseaux, les consommateurs standard de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau publique et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau.

- Autonomes ou « stand-alone », qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments [7].

-Un ou plusieurs modules PV.

-Le système de régulation.

-Une ou plusieurs batteries

-L'onduleur.

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque « stand-alone», et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

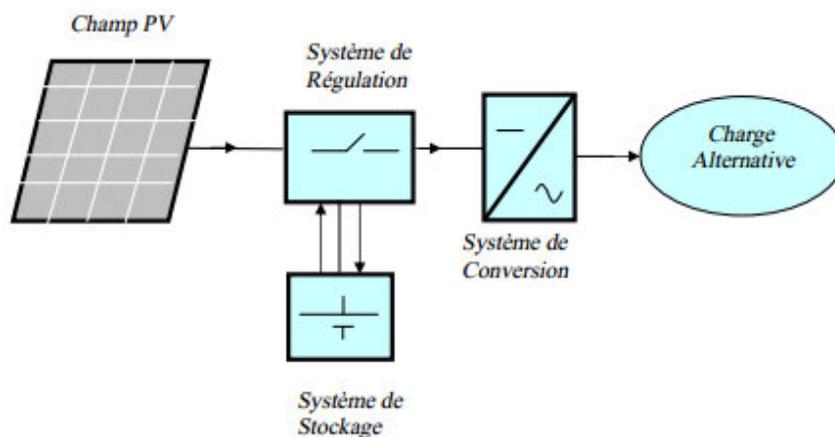


Fig. II.1. Schéma simplifié d'un système PV.

II-2- LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (II-2-a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène – vinyl - acétate) figure (II-2-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [8].

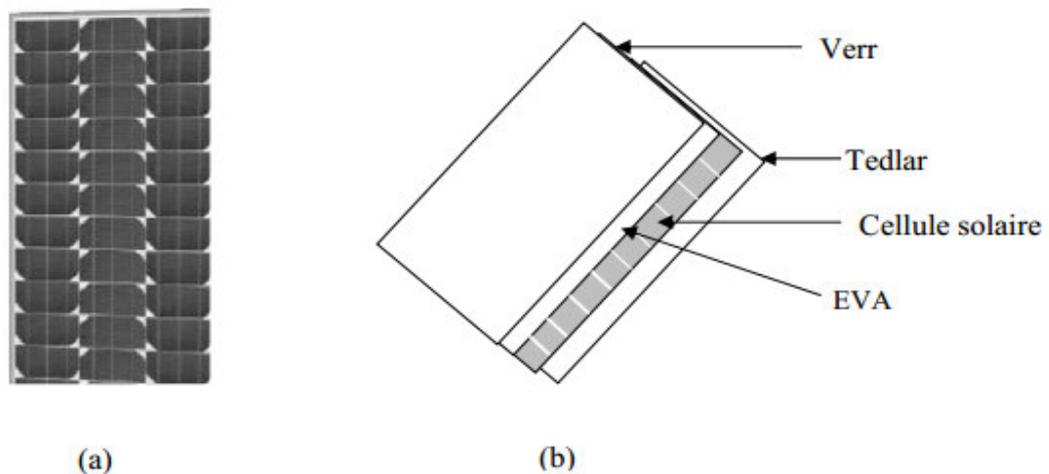


Fig. II.2. Module photovoltaïque.

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

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles figure (II-3). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [9] .

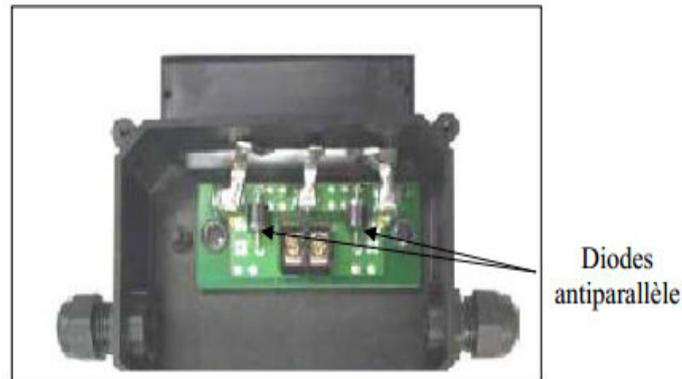


Fig. II.3. Boîte de jonction [9].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

Les modules en silicium monocristallin (c-Si, 64% de marché), polycristallin ou multicristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24,48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt- crête) puissance obtenue pour (l'ensoleillement maximal) [8].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module .Il ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [8] .

II-2-1- CARACTERISTIQUE D'UN MODULE [7] :

- La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- Tension à vide, V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum, (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$
- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$.

II-3- LE PANNEAU SOLAIRE :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [9].



Fig. II.4. Panneau de solaire .

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la figure (II-5), Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



Fig. II.5. Boite de dérivation [9].

La boite de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur le quel se trouvent:

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux .
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boite à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elle sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'enselement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'enselement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

II-4- SYSTEME 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 s'envisager des stockage suivant les conceptions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principales[10] :

- 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.

Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

- 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 lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par 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 [10] :

- 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.

- 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 [10].

- 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) [11].
- 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 aucuns dommages.

- La profondeur de décharge : Cependant, affecte même les batteries de cycle profond. plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.
- La tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- Le rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- Le taux d'autodécharge : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant

l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

II-4-1- TYPES D'ACCUMULATEURS :

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées 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 [12].

II-4-1-1- LES ACCUMULTEURS 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 vitale [13].

a) COMPOSITION D'UNE BATTERIE SOLAIRE PLOMB-ACIDE :

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte [14].

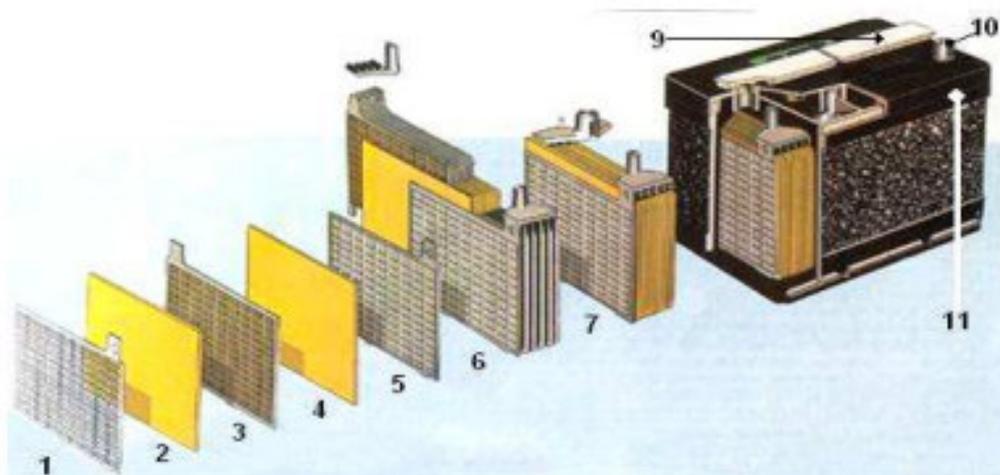


Fig. II.6.Construction d'une batterie monobloc .

1 : Grille.

2 : Séparateur.

3 : Plaque positive.

4 : Plaque négative.

5 : Barrette.

7 : Élément complet

8 : Pont

9 : Rampe de bouchons.

10 : Borne.

11 : Bac.

6 : Faisceau négatif.

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.

Peut être l'alliage est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge. Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. 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 dans non plus 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 varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conductions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%.(pour plomb- Acide)

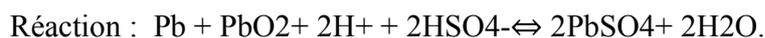
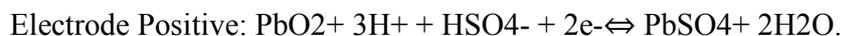
Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une 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 de niveau de l'électrolyte.

Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime [11].

b) 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 [15]. 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:



II-4-1-2- LES ACCUMULATEUR 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 prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages [14] :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxique à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel.

II-5 – SYSTEME DE REGULATION:

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit [15] .

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.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur la quelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs :

II-5-1- REGULATION DE DECHARGE :

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-réglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil [15] .

II-5-2- REGULATION 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 [15] .

II-5-2-1- REGULATION DE CHARGE SERIE :

Le principe consiste à intercaler entre le panneau PV et la batterie un dispositif qui module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante [15] :

Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_Z , le courant délivrer par le panneau charge la batterie à travers un transistor se bloque, et le courant ne passe qu' à travers la résistance.

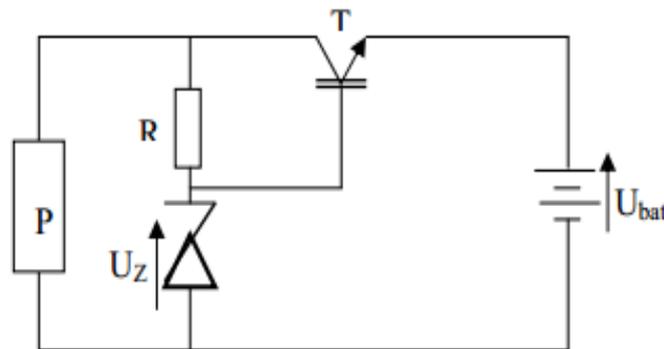


Fig. II.7. Schéma de principe d'un régulateur de charge série .

II-5-2-2- REGULATION DE CHARGE DE COUPURE :

Ce régulateur comporte un relais qui connecte et déconnecte le générateur PV à deux seuils différents et qui sont commandés par une unité de contrôle. Ils mesurent en permanence la tension aux bornes de la batterie [15] .

II-5-2-3- REGULATION DE CHARGE A DECOUPURE :

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu - continu qui délivre à la batterie sa tension de floatant chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut [15] .

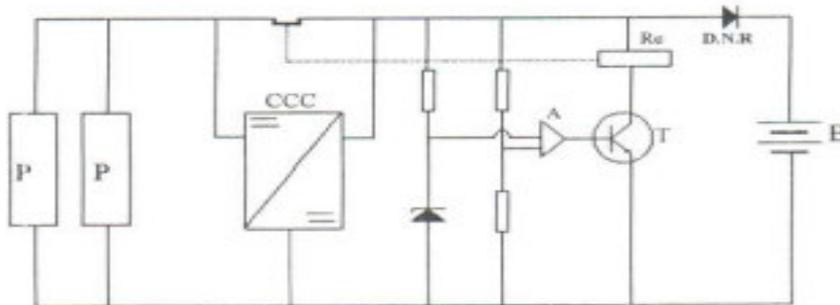


Fig. II.8.Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage .

II-5-2-4- REGULATION DE CHARGE SERIE A COUPURE PARTIELLE :

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau PV en deux parties. Chacune délivrer une même tension selon le principe suivant: une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure tant que l'autre partie est branchée directement pour la charge de la batterie en permanence [15] .

II-5-2-5- REGULATION DE CHARGE PARTIELLE :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant :

Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge.

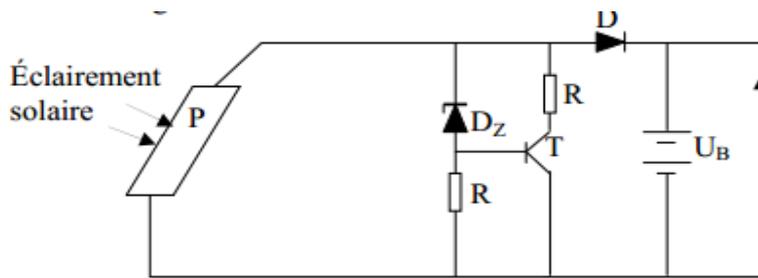


Fig. II.9. Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle .

II-6- SYSTEME 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 continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [13].

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du Courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.

II-6-1- 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 [13].

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 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.

II-6-2- LE CONVERTISSEUR CONTINU-ALTERNATIF :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs [13] :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

La figure suivante illustre un onduleur triphasé autonome à fréquence variable à commutation forcée de type MLI (modélisation de largeur d'impulsion) opéré en source de tension. Il est alimenté à partir de la tension continue générée conjointement par le redresseur et le hacheur série, il est réalisé à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularité à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de **KHz** et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors.

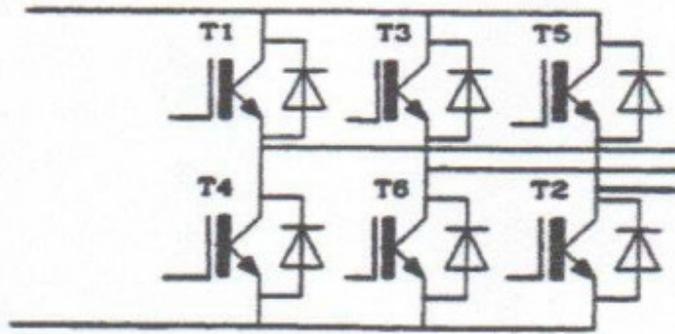


Fig. II.10.Schéma de L'onduleur.

- la puissance nominale : C'est la puissance exprimée en V_A que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

- Le rendement : c'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

- La consommation à vide : Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit). Pour cette raison, il est important de limiter les pertes à un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220V – 50Hz). La plus ou moins grande pureté de la tension de sortie est obtenue grâce à :

Un système de régulation qui tend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée.

Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

II-7- 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 [16] .

II-8- INSTALLATION DES PANNEAUX:

Pour l'installer les panneaux solaire dans un site, il est nécessaire de vérifier les conceptions suivantes [15] :

II-8-1- DISPOSITION DES PANNEAUX :

Les structures doivent être solides, fixées au sol, pour résister à des vents d'au moins de 150 Km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (autre l'aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inoxydable).

II-8-2- FIXATION DES PANNEAUX :

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

- Maintient de l'orientation.
- Résistance contre le vent et les autres intempéries.
- Résistance contre les agressions mécaniques.
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.
- ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement

II-8-3- L'ORIENTATION DES PANNEAUX :

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique.

On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de 15°. La hauteur maximale du soleil variant au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage, besoins importants en hiver dans l'hémisphère nord) ou haute (irrigation...) .

Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies.

Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur la surface active . Il arrive cependant qu'il soit impossible d'installer le panneau exactement face au sud.

II-8-4- INSTALLATIONS DES ELEMENTS DE LA BATTERIE :

L'utilisation de la batterie peut présenter des dangers :

Risque d'explosion, dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acide sulfurique). En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation. Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec un grand soin. Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité par la tension de décharge est supérieure à 1000. Ce local doit satisfaire à certaines exigences, qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé pour garantir la circulation des gaz.
- D'être à une température proche de 25°C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments.

II-8-5- CABLAGE ELECTRIQUE :

Ils seront à l'extérieur, exposés au vent, au gel, au soleil et autres agressions. Il est strictement nécessaire d'utiliser des câbles adaptés à des sections (diamètre) suffisantes.

Nous allons d'abord effectuer un branchement par un câble électrique qui sera un câble de qualité par exemple, il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil, du gel, croissance

marines et autres . La section sera d'au moins 1.5 mm^2 , 2.5 mm^2 dès que la longueur excède 25m ou que la puissance du module soit supérieure à 100 W .

II-8-6- CABLAGE DE LIAISON :

Il se trouve entre les modules et le régulateur, il doit être d'une section d'au moins $2,5 \text{ mm}^2$ ou plus si la longueur excède 15cm. Pour une intensité inférieure à 4A, sa section sera calculée de façon à ne pas avoir plus de 6% de chute de tension.

II-9-AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION

PV [17] :

II-9-1- AVANTAGES :

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

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli Watt au Méga Watt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

II-9 -2- INCONVENIENTS :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

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

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

II-10-LES DIFFERENTS TYPES D'UTILISATION DE GENERATEUR PHOTOVOLAIQUES:

II-10-1- ALIMENTATIONS ELECTRIQUES FAIBLES PUISSANCES :

Les alimentations électriques faibles telles que les caulettes ou les chargeurs de piles. Des modules PV peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles [18] .

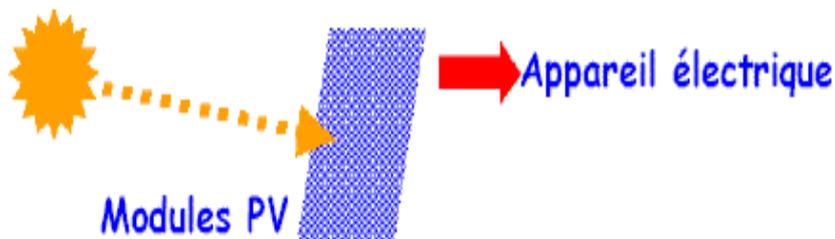


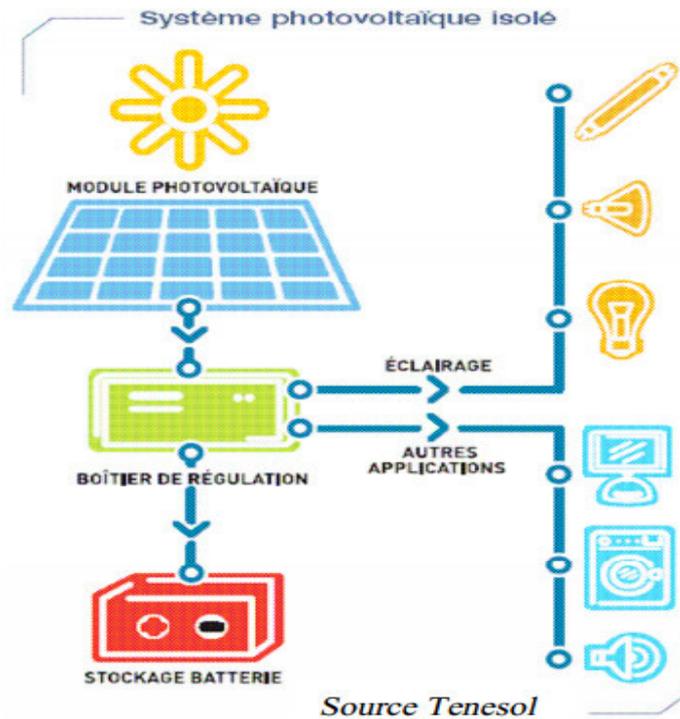
Fig. II.11.Schéma considéré Les alimentations électriques faibles puissances.

II-10-2- INSTALLATION ELECTRIQUES PHOTOVOTAIQUES AUTONOMES :

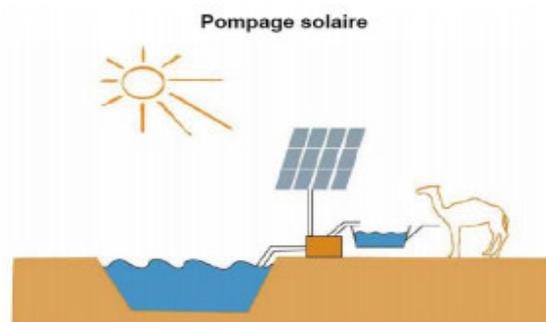
En site isolé le champ photovoltaïque peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique

en l'absence de soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques :

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie [18] .



La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en oeuvre réduits.



En site isolé on peut utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas , l'installation comprendra un onduleur [18] .

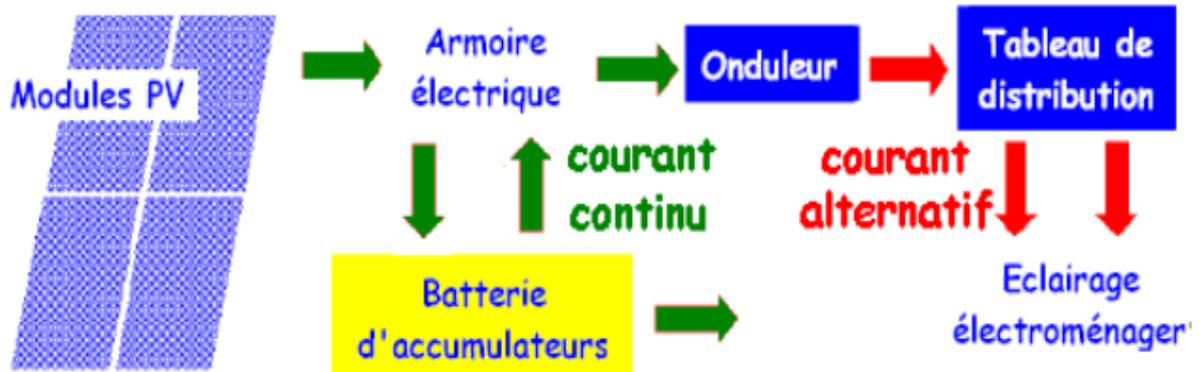


Fig. II.12. Schéma considéré d'un système photovoltaïque autonomes .

II-10-3- INSTALLATIONS ELECTRIQUES PHOTOVOLTAIQUES RACCORDEES AU RESEAU

II-10-3-1-INSTALLATIONS PV RACCORDEE AU RESEAU SANS INJECTION (AUTO-CONSOMMATION)

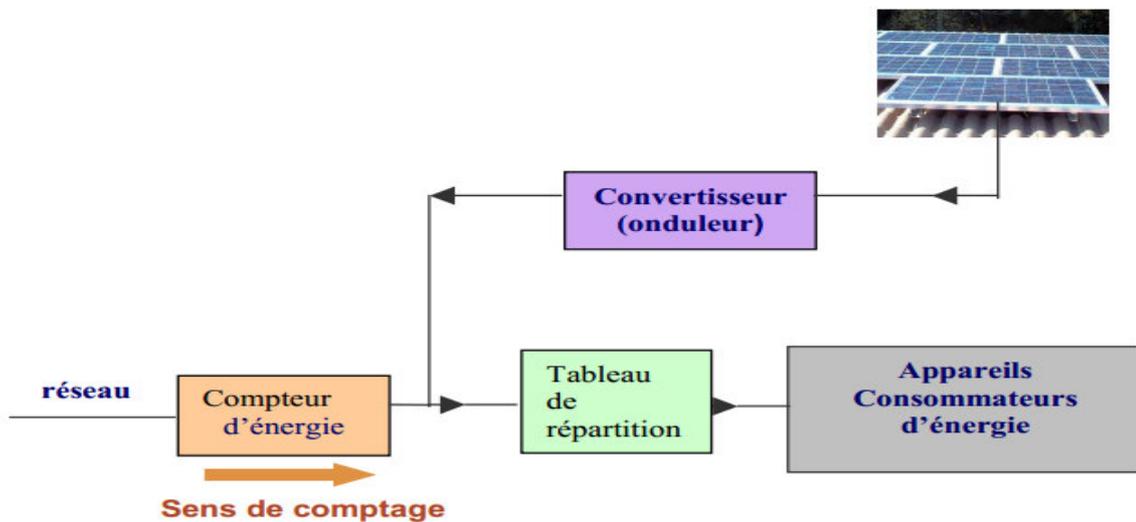


Fig. II.13.Schéma considéré d'installation PV raccordée au réseau sans injection.

II-10-3-2-INSTALLATIONS PV RACCORDEE AU RESEAU AVEC INJECTION DES EXCEDENTS DE PRODUCTION.

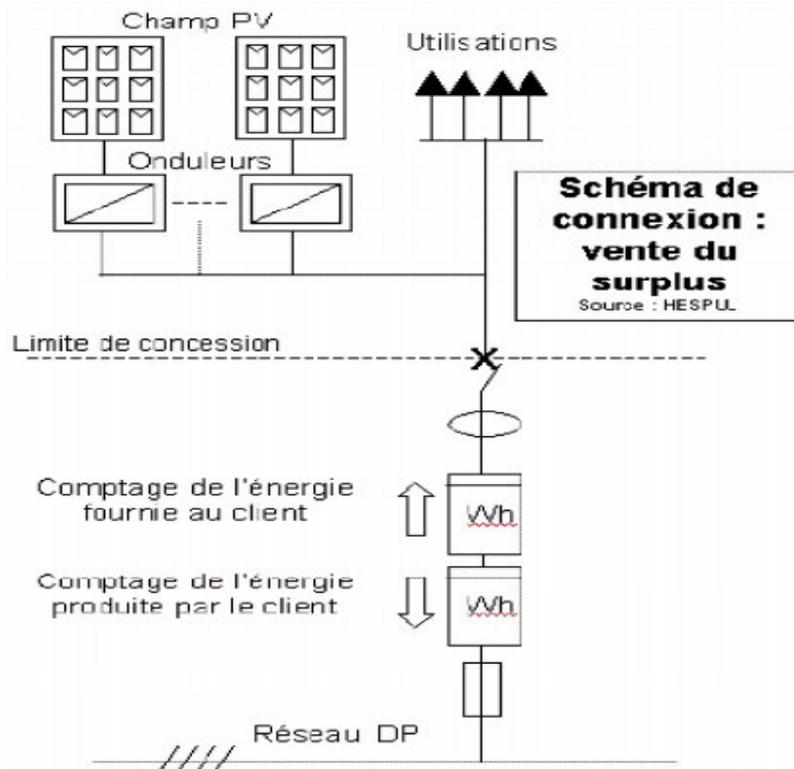
Le propriétaire de l'installation doit établir deux contrats pour être en mesure de vendre une partie de l'électricité photovoltaïque produite à tarif bonifié [18] :

- un contrat de raccordement au réseau public de distribution de l'électricité,
- un contrat d'achat de l'électricité par « l'acheteur » (EDF).

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires :

un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (EDF ...) et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque votre production dépasse votre consommation.

Le compteur de vente qui enregistre le courant injecté est installé sur la partie de ligne appartenant au réseau de distribution publique DP.



II-10-3-3-TARIF DE RACHAT DE L'ELECTRICITE PHOTOVOTAIQUES.

le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque a été fortement revalorisé en 2006 (Le décret d'application est paru au journal officiel le 26/07/2006). Soit [18] :

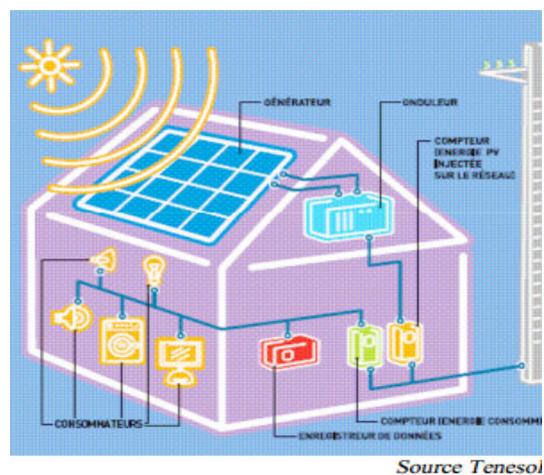
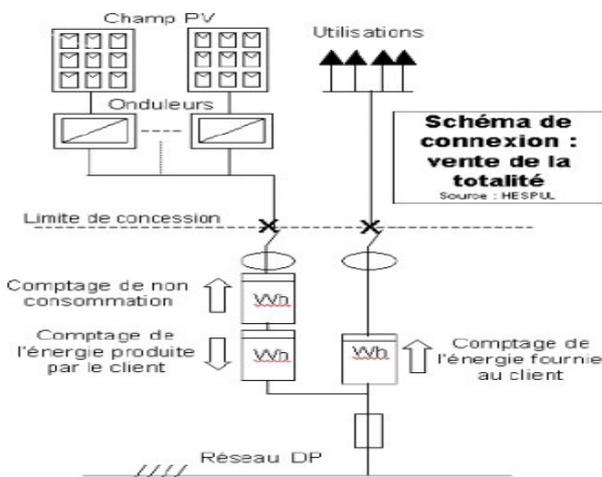
- 0,30 e / kWh pour les installations de type "surimposé" (par exemple sur le toit existant d'une maison)
- 0,55 e / kWh pour les installations dites "intégrées" au bâtiment.



II-10-3-4- INSTALLATION PV RACCORDEE AU RESEAU AVEC INJECTION TOTALE DE L'ENERGIE PRODUITE.

La tête de l'installation comprendra 2 disjoncteurs et 3 compteurs :

- un pour compter l'énergie d'origine photovoltaïque produite («comptage énergie produite par le client »),
- un pour compter l'énergie achetée au fournisseur et consommée par les récepteurs de l'installation (« comptage énergie fournie au client »),
- et un pour que le fournisseur d'énergie s'assure que le client ne consomme pas de l'énergie sur la ligne électrique de production (« comptage de non consommation »).



II-11- APPLICATIONS DE L'ELECTRICIT PHOTOVOLTAIQUES.

L'électricité photovoltaïque peut être utilisée pour de grands projets mais aussi dans le fonctionnement de petits objets ou d'outils utilisés au quotidien. Présentation d'objets électriques, utiles ou concernant les loisirs, alimentés par des cellules photovoltaïques. Quelques applications photovoltaïques sont assez inattendues[19].

-TELEPHONE MOBILE A ENERGIE SOLAIRE.

Parmi les innombrables petits équipements alimentés par un panneau photovoltaïque, il faut mentionner le téléphone moE1107 de Samsung.

Les cellules solaires au dos du E1107 fournissent assez d'énergie pour assurer 8 minutes de communication par heure d'exposition au soleil.

Il est équipé d'un "éco-chargeur" qui, en mode "standby" consomme moins de 0.03 Watt, et (d'après le fabricant) est plus de 75% plus efficace que les autres chargeurs.



SANGLE SOLAIRE POUR APPAREIL PHOTO.

La sangle conçue par Weng Jie est composée d'une bande de cellules photovoltaïque intégrée. Le photographe la garde avec son appareil photo autour du cou en permanence. L'énergie est stockée dans deux batteries de petite taille à chaque extrémité



-LUNETTES A CAPTEUR SOLAIRES .

Cette paire de lunettes conçue par Hyun-Joong Kim et Kwang-Seok Jeong offre la possibilité de capter l'énergie solaire pour recharger de petits appareils, du style téléphone, lecteur mp3 ou console de jeux.

Les verres utiliseraient un colorant organique bon marché mais hautement énergétique capable de filtrer la lumière pour protéger la vue et récupérer de l'énergie.



-LECTEUR D'EBOOKS « SNIPPY ».

Ce lecteur conçu par Holly Gates fonctionne entièrement à l'énergie solaire. Il dispose d'une interface blue-tooth pour gérer la connectique, d'un écran de 15 cm de diagonale, avec une résolution de 800x600, 16 niveaux de gris et 166 ppi.

Avec une épaisseur de 8 mm et un poids de 221 grammes, Snippy aurait recours aux cartes micro SD pour le stockage. Son autonomie serait alors d'une page tournée toutes les 8 secondes ou toutes les 15 secondes si la fonction blue-tooth est activée.



- PAVE DE SOL

Le pavé de sol alimenté par une source lumineuse sans câblage, s'insérant en lieu et place de pavés béton ou autres supports en extérieur.

Ce pavé de 19,8 x 19,8 x 5,5 cm, est équipé de LED s blanches qui s'allument automatiquement après un chargement de la batterie par capteurs photovoltaïques au cours de la journée. L'effet de lumière douce le soir permet, outre l'aspect décoratif, de baliser une zone sans aucune différence de niveau de sol. Il se pose sur un lit de sable lissé, parmi les pavés béton.



-PRODUCTION D'EAU POTABLE.

La borne photovoltaïque BIO-SUN rend l'eau potable par la combinaison de la désinfection par UV et de l'énergie solaire.

Il suffit de remplir le réservoir avec l'eau que l'on souhaite désinfecter (l'eau de base ne doit ni être fortement polluée par des boues importantes, ni contenir une quantité très élevée de résidus de type pesticides et autres éléments tels que métaux lourds ou matières organiques). Cette eau fait l'objet d'une filtration et d'une désinfection par ultraviolets (UV-C). En quelques secondes l'eau est ainsi consommable.



-TONDEUSE A GAZON HYBRIDE SOLAIRE ET ELECTRIQUE .

"Automower" est le nom d'une tondeuse à gazon robotisée, fonctionnant à la fois à l'énergie solaire et à l'électricité. Fabriquée par l'entreprise suédoise Husqvarna, l'Automower est silencieux, n'émet pas de gaz d'échappement et assure un entretien continu de la pelouse. De plus il est recyclable à 90%. Les utilisateurs peuvent définir une zone de coupe en traçant un périmètre bien défini autour de leur jardin



avec du fil de fer. La tondeuse peut être programmée pour fonctionner pendant certaines heures de la journée et pendant certains jours de la semaine, elle est aussi capable d'éviter des obstacles comme les meubles de jardin par exemple. L'herbe est coupée d'une manière suffisamment fine pour ensuite la disperser sur la pelouse.

II-12- CONCLUSION :

Nous avons fourni dans ce chapitre des concepts différents qui entrent dans l'établissement d'un système de collecte de la lumière. Comme les principes de fonctionnement de Le panneau solaire, qui introduit la modélisation et l'analyse de ce système, qui offrira au chapitre III .

***Chapitre III:
Modélisation d'un
générateur photovoltaïque***

III-1 - INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons définir un modèle mathématique s'appliquant aux générateurs photovoltaïques, nous aborderons en premier lieu les différents modèles des générateurs photovoltaïques en consolidant la représentation des circuits électriques par le bond graph Correspondant, puis nous entamerons les caractéristiques des cellule photovoltaïques et les différents modes de connexion possibles. Le contrôle de la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK .

III-2- L'outil MATLAB/SIMULINK :

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

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [20].

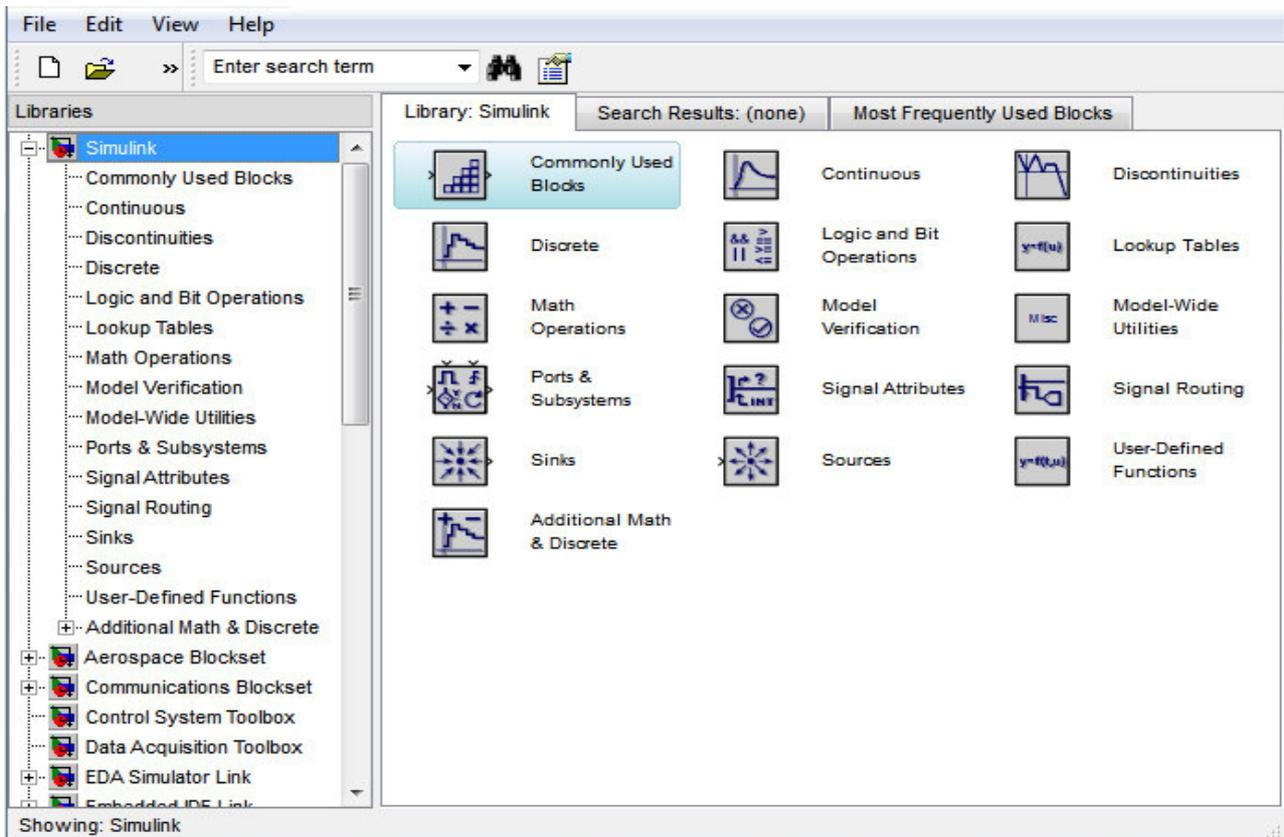


Fig. III.1 . Bibliothèque SIMULINK .

III-3- MODELISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES (PV) :

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Parmi ces modèles on peut citer :

III-3-1- MODELE A QUATRE PARAMETRES :

Le modèle à quatre paramètres (Figure III.2) est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend et Beckmann [20]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

D'après la loi de Kirchhoff, la relation entre la tension et le courant du générateur photovoltaïque est

donnée par la formule suivante:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + I R_s)}{\gamma K T_c}\right) - 1 \right] \quad (\text{Equ.III.1})$$

Où :

I, V : courant et la tension de sortie du générateur.

I_{ph} et I_0 représentent respectivement le courant photonique et le courant de saturation inverse, R_s, γ : le facteur de qualité et la résistance série.

K, q : Constante de Boltzmann, $K = 1.385410^{-23}$ [J/K] et Constante de charge d'électron, $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C.

Les différentes équations décrivant ce modèle seront détaillées par la suite.

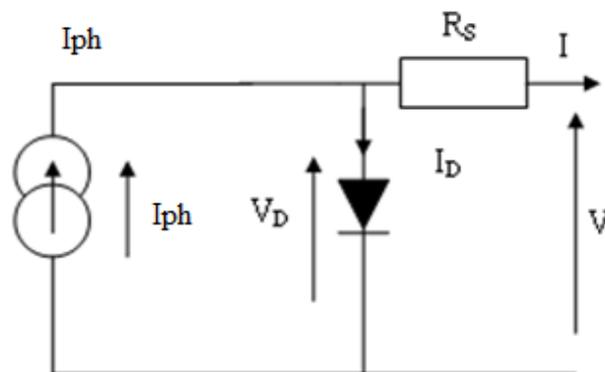


Fig. III.2. Modèle à quatre paramètres [20].

III-3-2- MODELE A CINQ PARAMETRES:

Nous avons cette fois-ci deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN . Ces diodes symbolisent la recombinaison de porteurs minoritaires, d'une part en surface de matériaux et d'autre part dans le volume de matériau [20] . Le schéma de la cellule photovoltaïque devient dans ce cas celui de la figure III.3.

Les cinq paramètres de ce modèle sont:

I_{ph} : courant photonique

I_{01} , I_{02} : respectivement les courants de saturation de la diode 1 et de la diode 2.

γ_1 , γ_2 : respectivement le facteur de qualité de la diode 1 et de la diode 2.

L'équation générale de ce modèle est:

$$I = \left[I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{qV_1}{\gamma_1 K T_c} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{qV_2}{\gamma_2 K T_c} \right) - 1 \right) \right] \quad (\text{Equ.III.2})$$

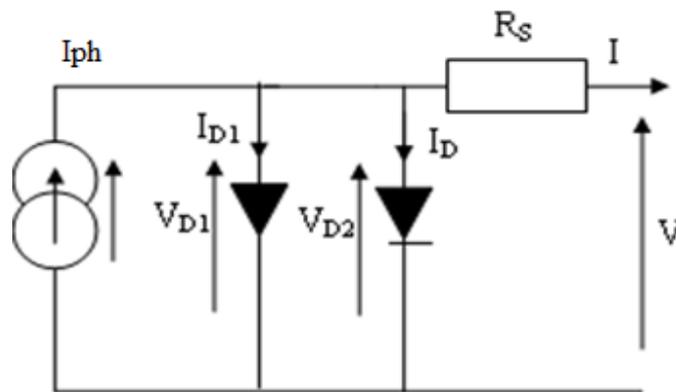


Fig. III.3. Modèle à cinq paramètres [20].

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (figure.III.4).

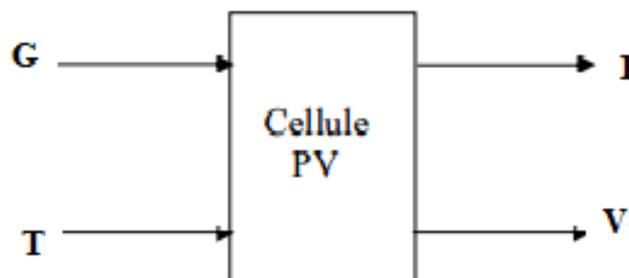


Fig.III.4 .schéma bloc d'une cellule PV

avec deux variables d'entrée :

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

T : température de la cellule(°C).

et deux variables de sortie :

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

V : tension aux bornes de la cellule.

III-3-3- MODELE A PARAMETRES CONSTANTS:

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I-V sont le courant photonique I_L , la résistance série R_s , et les deux caractéristiques de la diode (I_0 et γ). Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I-V pour différents points de fonctionnement (donnés par le fabricant) [21] .

Une méthode a été proposée par Duffie et Beckmann (1991): puisqu'il y a quatre paramètres inconnus, quatre états de courant (I) sont nécessaires.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{q R_s I_{sc,ref}}{\gamma K T_{c,ref}}\right) - 1 \right] \\ I_{ph,ref} = I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma K T_{c,ref}}\right) - 1 \right] \\ I_{mp,ref} = I_{ph,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{q (V_{mp,ref} + R_s I_{mp,ref})}{\gamma K T_{c,ref}}\right) - 1 \right] \\ \gamma = \frac{q (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s - V_{oc,ref})}{K T_{c,ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \end{array} \right. \quad (\text{Equ.III.3})$$

Cependant les fabricants fournissent habituellement I et V à seulement 3 conditions : le circuit ouvert, le court-circuit et le point de puissance de maximum. Le premier vient de la connaissance de μ_{oc} , μ_{isc} , le coefficient de la température, de la tension de circuit ouvert V_{oc} et du courant de court circuit I_{sc} , respectivement,

Les indices (oc, sc, mp et ref) se rapportent au circuit ouvert, au court circuit, à la puissance maximale et les conditions de référence, respectivement.

Le fabricant fournit généralement les grandeurs suivantes ($V_{oc,ref}$, $I_{sc,ref}$, $V_{mp,ref}$, $I_{mp,ref}$). Le procédé à suivre pour les trois paramètres $I_{0,ref}$, $I_{ph,ref}$ et γ_{ref} est de for çer le passage de la courbe (I-V) par ces trois points avec l'estimation de la résistance série qui permet de réaliser cette condition.

Les différents paramètres de cellules changent avec l'éclairement et la température ambiante et peuvent être estimés par le système d'équation suivant.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph} = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \left(I_{ph,ref} + \mu_{Isc} \left(T_c - T_{c,ref} \right) \right) \\ I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q\varepsilon_G}{KA} \right) \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \\ \gamma = \gamma_{ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right) \end{array} \right. \quad (\text{Equ.III.4})$$

$I_{ph,ref}$: courant photonique sous condition de référence [A].

G, G_{ref} : éclairement réel et éclairement à la condition de référence [W/m^2].

$T, T_{c,ref}$: température de cellule, réelle et à la condition de référence [degré Kelvin]

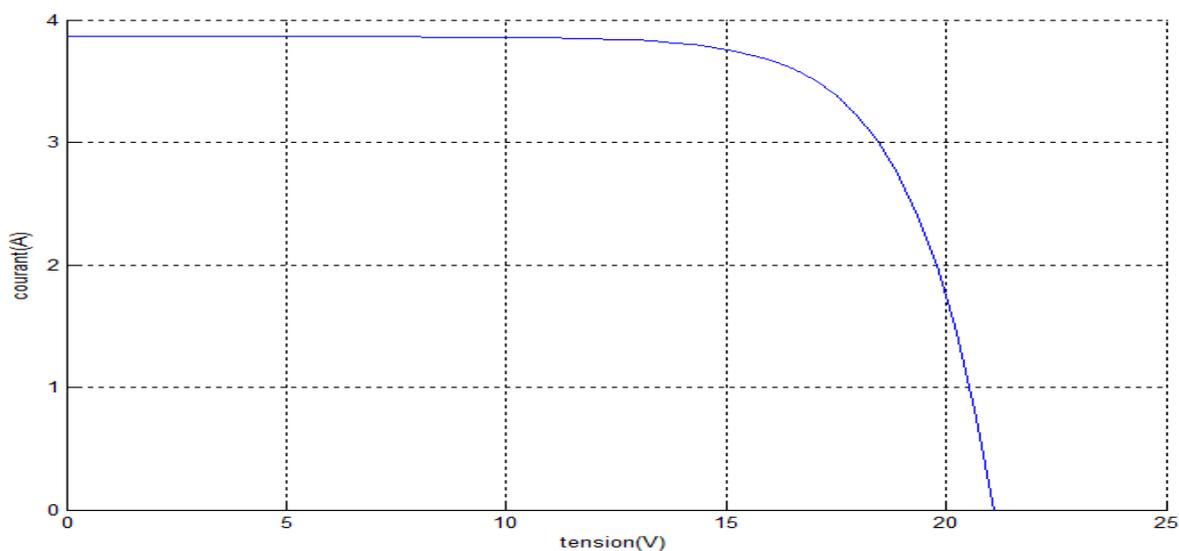
μ_{Isc}, μ_{oc} : coefficient de température au tension et courant de court circuit respectivement [$V/^\circ C$], [$A/^\circ C$]

$\gamma = A \cdot N_{cs} \cdot N_s$, avec N_{cs} et N_s , le nombre des cellules et le nombre des modules en série.

III-4- CARACTERISTIQUE D'UN MODULE SOLAIRE :

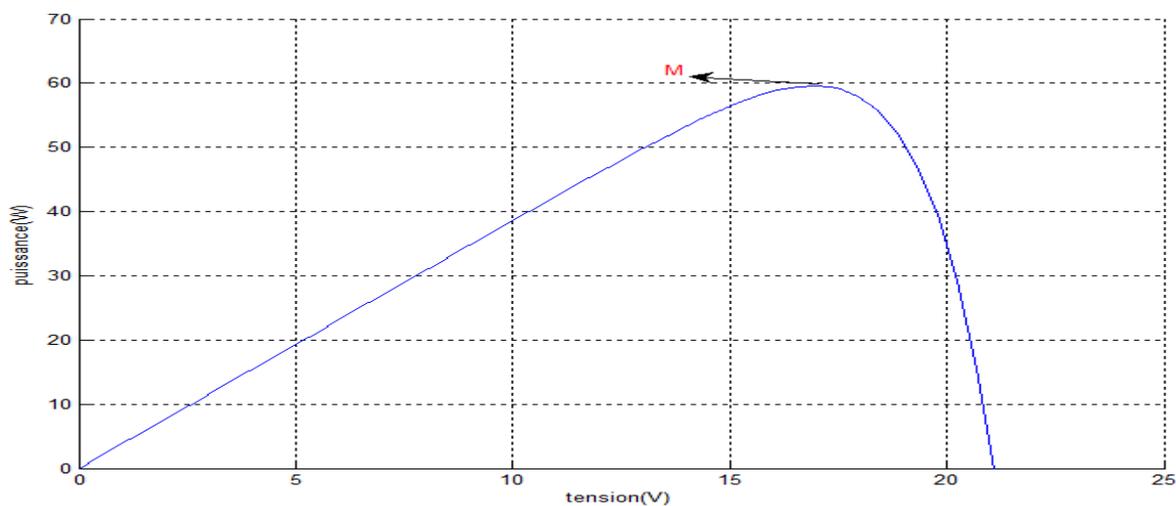
III-4 -1- CARACTERISTIQUE COURANT - TENSION I(V) :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire type MSX60 d'un nombre de cellule ($N_s=36$) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (figure III.5).

Fig.III.5 . Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque.

III-4-2-CARACTERISTIQUE PUISSANCE - TENSION (P-V) :

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure III.6). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

Fig.III.6 . Caractéristique $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$.

III-5 –SIMULALION DU GENERATEUR PV :

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par :

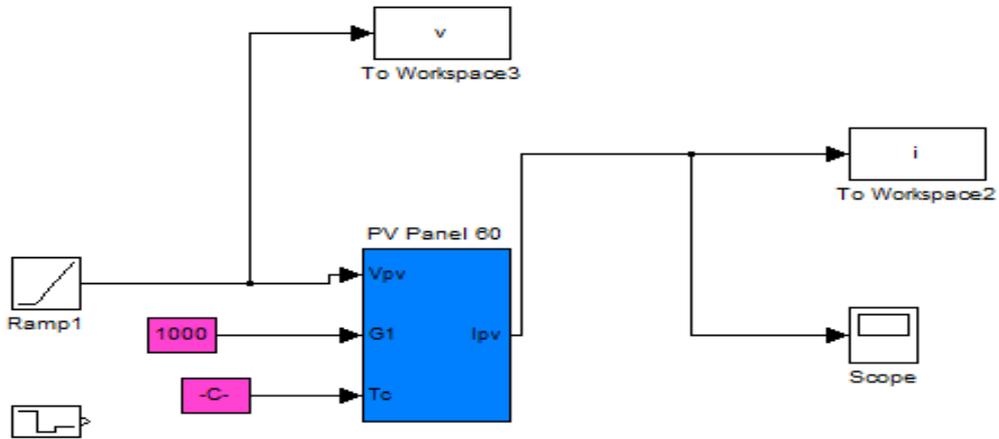
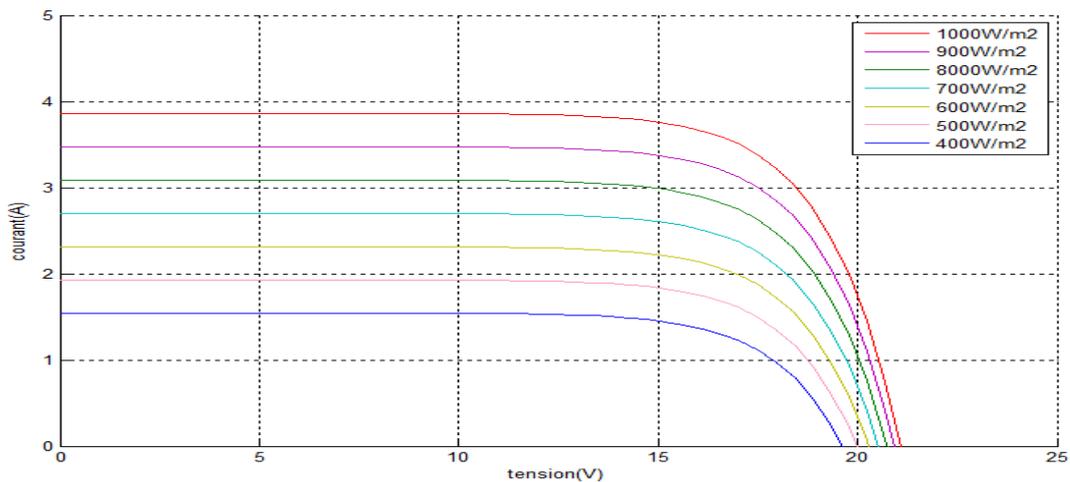


Fig. III.7 . Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

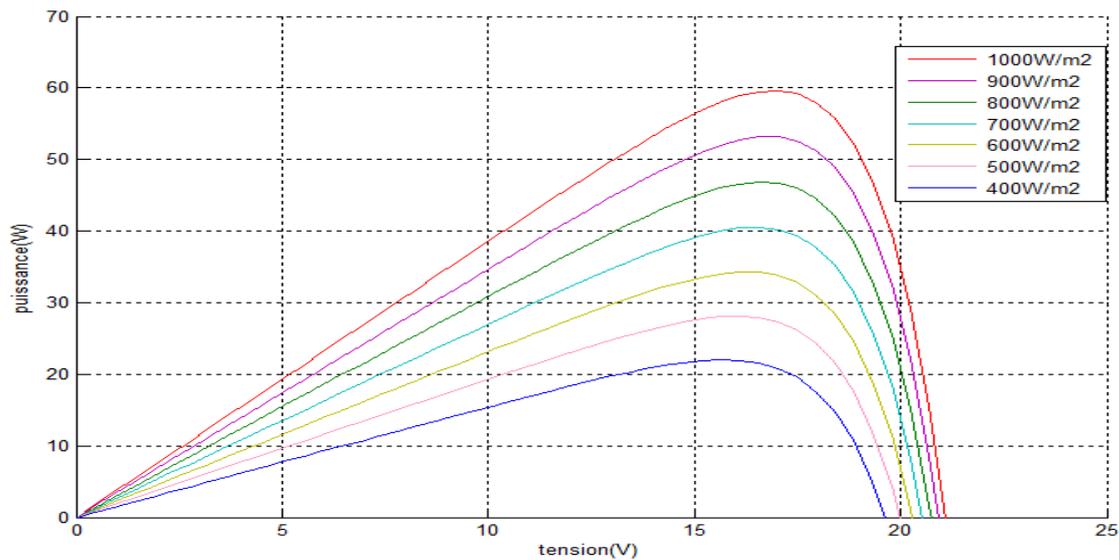
III-6-INFLUENCE DES DEFERENTS PRAMETRES:

III -6-1-INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT:

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Quand l'éclairement G varie on note une variation linéaire du courant de court-circuit par contre la tension de circuit ouvert présente une légère variation comme le montre la caractéristique $I(V)$ de la figure III.8 .



(a)



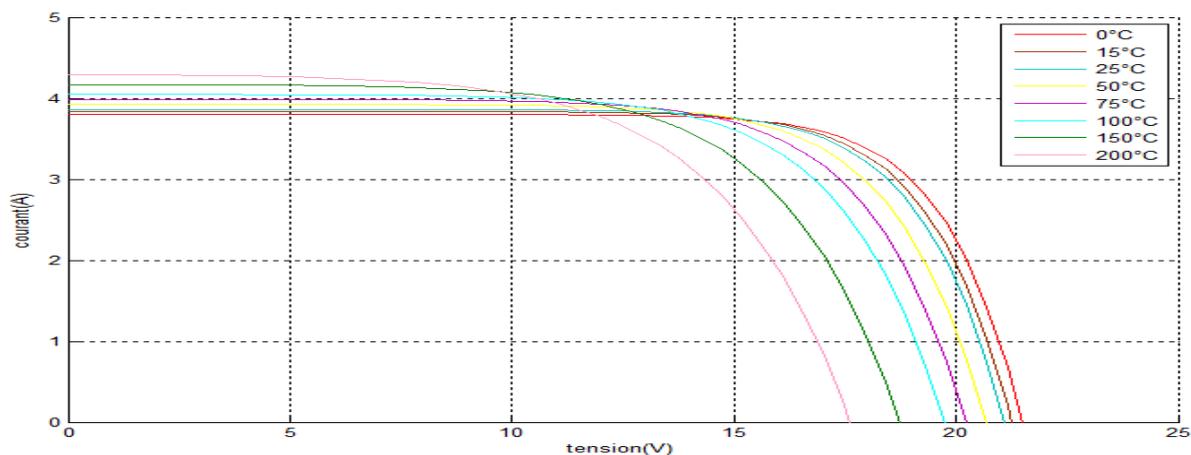
(b)

Fig. III.8. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique : a) $I=f(V)$, b) $P=f(v)$, $T=25^{\circ}\text{C}$.

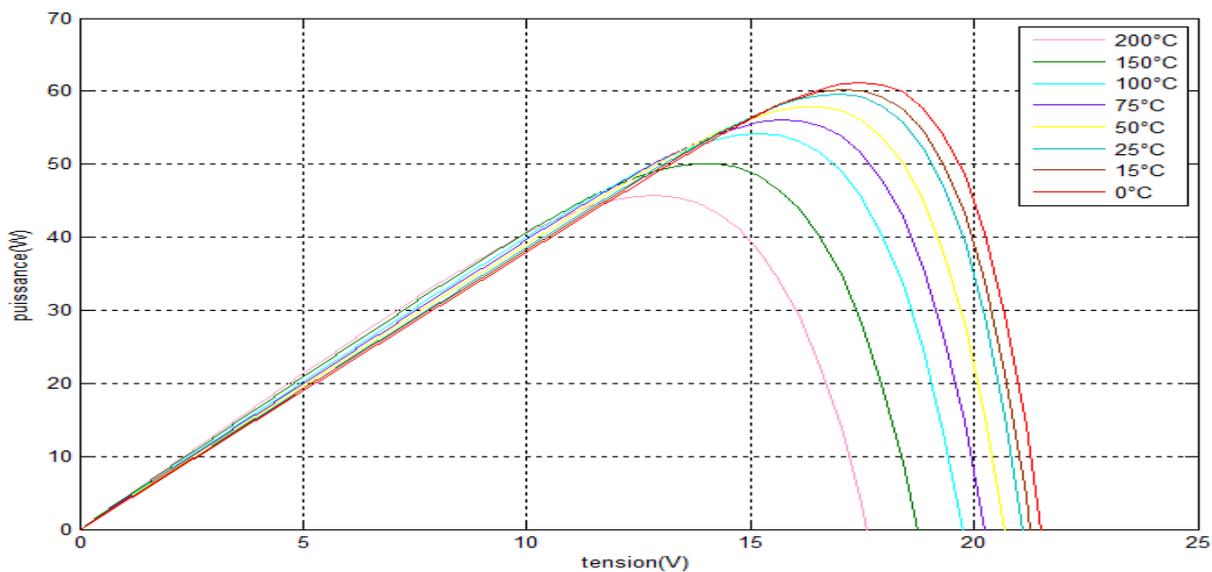
III-6-2- INFLUENCE DE TEMPERATURE :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne d'une part, une augmentation du courant photonique, en raison, principalement, de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau et d'autre part, une diminution de la tension du circuit ouvert V_{oc} . L'augmentation de la température entraînerait (figure .III.9):

- Une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06 % par °C).
- Une augmentation du courant (0.4 % par °C).
- Une diminution du rendement et de facteur de forme F



(a)



(b)

Fig.III.9..L'influence de la température sur la caractéristique :a) $I=f(V)$,b) $P=f(v)$, $G=1000W/m^2$.

III-6-3- INFLUENCE LA RESISTANCE SERIE :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit.(Figure.III.10).

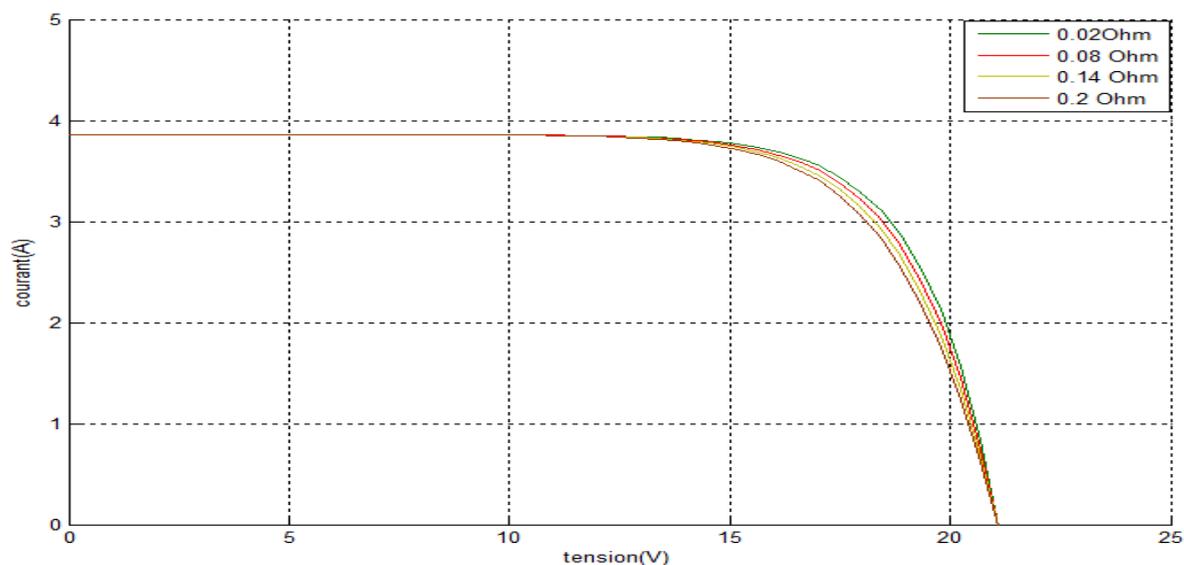


Fig.III.10. L'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$.

III-6-4- INFLUENCE DU FACTEUR DE QUALIT :

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la zone ou le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

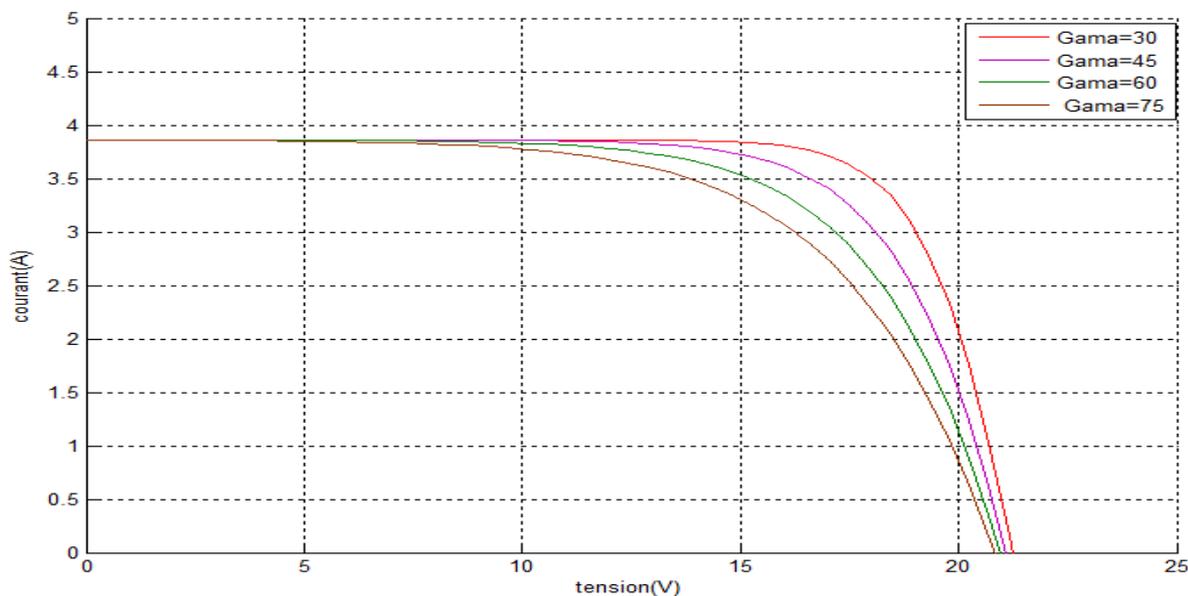


Fig.III.11. L'influence du facteur de qualité pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$.

III-6-5- ASSOCIATION EN PARALLELE, SERIE, MIXTE (SERIE ET PARALLELE) :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous (figure .III.12), ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Comme montré par la figure, ce genre de groupement augmente le courant ; la caractéristique équivalente sera alors celle d'une cellule.

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

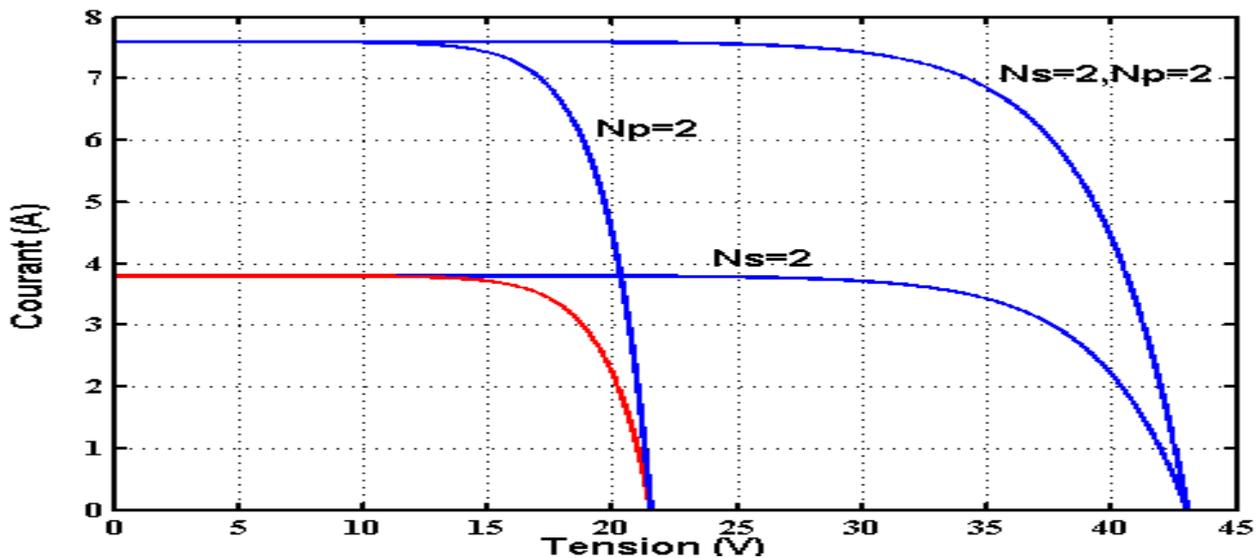


Fig.III.12. Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle.

III-7- ZONES DE FONCTIONNEMENT DU MODULE SOLAIRE :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I(V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (III.13) représente trois zones essentielles :

- La zone (I) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (II) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une Puissance maximale) peut être déterminé.
- La zone (III) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

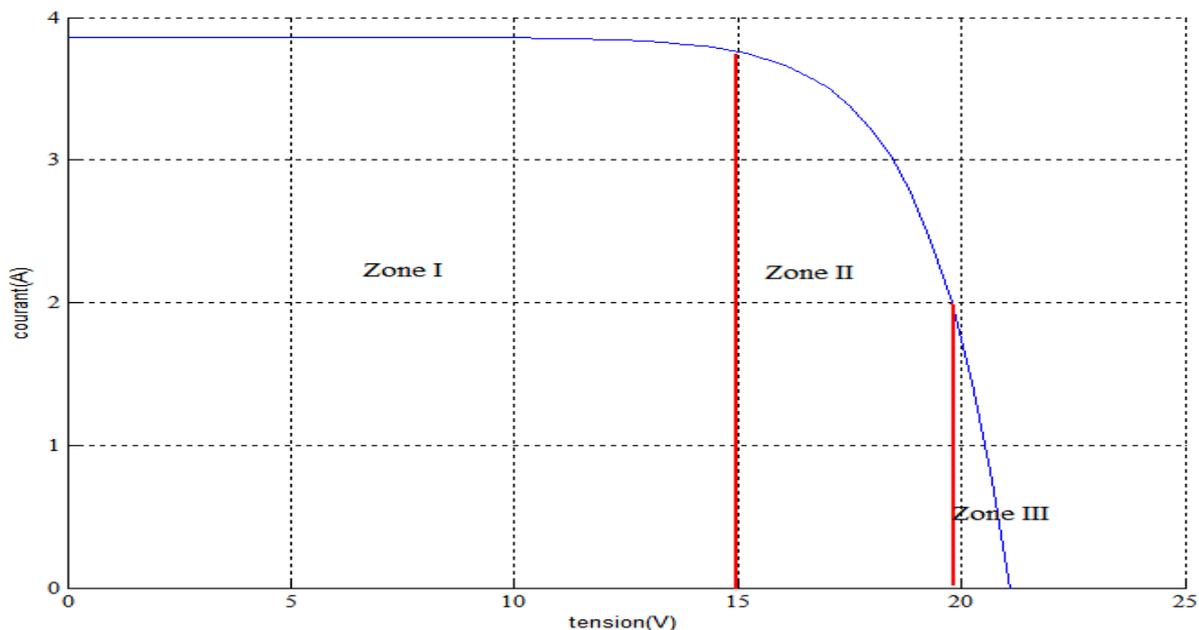


Fig.III.13. Différentes zones de la caractéristique I (V) à $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $G = 1000\text{W/m}^2$.

III-8- FONCTIONNEMENT OPTIMAL DU GENERATEUR:

Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. C'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux la caractéristique relative aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie. L'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimale en ce point noté $(V_{\text{opt}}, I_{\text{opt}})$.

Le point fonctionnement du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point (V_{opt}, I_{opt}) permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors $R_{opt} = V_{opt} / I_{opt}$.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales R_{opt} lorsque les condition varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire [22] .

III- 9– PROTECTION D’UN GPV:

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

- la protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by -pass) [23] .

III-12- CONCLUSION .

Dans ce chapitre, nous avons étudié l’état de l’art et le cahier de charge de notre générateur photovoltaïque. La caractérisation du modèle de la photopile paraît intéressante, l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ a été abordée. Enfin une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement et protection d’un générateur photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est une contribution à l'étude et la modélisation du générateur photovoltaïque. L'objectif de cette étude est de savoir comment la conversion d'énergie solaire en électricité, le meilleur rendement de cette conversion est obtenue pour un groupement de plusieurs cellules en parallèle ou en série ou hybride .

Dans un premier temps ,nous avons essayé de faire une revue assez générale sur la technologie photovoltaïque ,rappelant son principe de fonctionnement, ces différentes filières technologiques ,et l'association des cellules dans un module photovoltaïque.

Dans la deuxième partie du mémoire , nous avons étudié le principe et l'influence de chaque composant constituant le système PV, puis on à présenté les modèles de littérature de composant nécessaire dans notre étude tel que (le champs PV, régulateur, batterie et le convertisseur).

Finalement, on a étudié la modélisation du système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV (MSX60) par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV en utilisant la méthode de Duffie et Beckmann en utilisant le logiciel Matlab/SIMULINK. En cette chapitre, nous avons fait l'état de l'art tout en essayant de tenir compte du cahier de charge de notre générateur photovoltaïque. La caractérisation du modèle de la photopile parait intéressante ; l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ a été abordée, ainsi qu'une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement et application électrique d'un GPV.

On a constater d'après les courbes obtenue que dans l'association des cellules en série, pour un courant constant la tension augment, et que dans l'association des cellules en parallèle, pour une tension constante le courant augmente.

Pour une plus grande capacité sont regroupés cellules en parallèle et respectivement à un moment donné. Lors du raccordement des cellules de cette façon, nous obtenons la prise de fonctions du parallélisme et Plug droite en même temps, alors si nous obtenons l'effort est relativement élevée et le courant est relativement grande, et cette méthode est la plus utilisée.

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

Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement $1000\text{W}/\text{m}^2$ température 25°C (L' inverse et vrai).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Abdelhak Maoucha , « Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique » mémoire de magister ,Université de Batna, 2011.
- [2] :Nichiporuk Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » l'institut national des sciences appliquées de Lyon,2005.
- [3] :Mathieu URIEN, « Cellules photovoltaïque organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible », thèse de doctorat ,Université BORDEAUX I ,2008.
- [4] :Hellali Kamelia, « Modélisation d'une cellule photovoltaïques :Etude comparative »,mémoire de magister ,Université mouloud mammeri , Tizi-Ouzou,2012.
- [5] : ZOUAK Belkacem, «Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque thermoélectricité » , mémoire de magister ,Université mouloud mammeri , Tizi-Ouzou,2012.
- [6] : Aminata. Sarr, «Simulation du système hybrides Photovoltaïque », mémoire de doctora , canada , 1998.
- [7] : T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation », Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie,(AFME)
- [8] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience deradio détection à l'Observatoire Pierre Auger»,2006.
- [9] : A. Guen, « contribution à l'étude des système de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire », thèse de magister ,Université de Tlemcen, 1992.
- [10] : www.solarelectripower.org.
- [11] : N. Achaïbou, A Malek , N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [12] : I. Tsuda, K . Kurokawa ,K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 – 508,1994.
- [13] : A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin »Rev .Energ. Ren : physique Energétique ,pp.95-100 ,1998.
- [14] : D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003
- [15] : Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics », Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004

Références bibliographiques

- [16] : Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de magister, Université de Bechar, 2008
- [17] : Bonneaux déodat, David Lucien, Dumas Adrien, Germain Simon, « Etudes des cellules photovoltaïques », mémoire, Lycée Jean Monnet-annemasse, 2004 .
- [18] : B.Fléche, D.Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », Revue des Energies , pp14-17, 2007 .
- [19] : [www. outilssolaires.com/.../photovoltaïque /applications](http://www.outilssolaires.com/.../photovoltaïque/applications).
- [20] : Bensaci Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université kasdi Merbah-Ouargla, 2011.
- [21] : Zarour laid , « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau » , mémoire de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [22] : Borni abdelhalim, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction la puissance maximal d'un panneau solaire », mémoire de magister , Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [23] : B. Wafas Samah, « étude comparat ive dessystèmes de pompage photovoltaïque" mémoire ingénieurs, Université mohamed khider Biskra, 2006 .

Annexe

A.1 Caractéristiques du module photovoltaïque MSX60 (G=1000W/m², T=25°C)

I _{sc} (A)	I _{mp} (A)	V _{oc} (V)	V _{mp} (V)	P(W)	μ _{Isc}	Ncs μ _{voc}	Ncs	Ns
3.8	3.5	21.5	17.4	60	-0.00247	0.00222	36	30