

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 08 mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrotechnique et Automatique

706



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master  
Académique

Domaine : sciences et techniques

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques



ÉTUDE DES CARACTIRISTIQUES DES ÉLÉMENTS  
D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Présenté par :

- M<sup>r</sup> BOUAMINE SADEQ
- M<sup>r</sup> SAYAD YACINE

Sous la direction :

- M<sup>r</sup> LADJIMI ABDELAZIZ

Juin 2011

11/2/2022



# Remerciements :

*Nous tenons à remercier tout d'abord le bon dieu tout puissant que nous guide vers le bon chemin et qui nous aide dans notre travail malgré les difficultés rencontrées.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur « LADJIMI ABDELAZIZ pour l'aide qu'il nous à apporte, pour tous les conseils qu'il nous à donne.*

*Nous sommes également profondément reconnaissant envers monsieur « FERAGA CHAMS EDDINE »*

*Nous tenons à remercier également tous le personnel enseignant de « département d'électrotechnique » qui sont devon à fine de nous permettre d'acquérir beaucoup de connaissance dans le domaine électrique*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à ma chers mère  
qui m'encouragée et m'aidés, et à mon frère et  
ma sœur et à toute ma famille*

*Cette dédicace s'adresse également à tous mes  
amis et camarades de la promotion 2011.*

# *SADEQ*

# *Dédicace*

*Je dédie ce présent mémoire à ces très chères  
personnes :*

*Mes parents qui m'ont soutenu durant mes études, mes  
sœurs et mon frère, à toute*

*La famille*

*A mes collègues universitaires, à mes chères amies*

# *YACINE*

# RÉSUMÉ

Titre : *ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉLÉMENTS D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE*

Le mémoire traite l'étude des performances du système photovoltaïque. En effet ; dans le premier chapitre on a présenté des généralités sur le système photovoltaïque.

Le deuxième traite la structure et les caractéristiques électriques des éléments essentiels d'un système photovoltaïque.

Le troisième chapitre nous a permis d'analyser la modélisation d'un système PV et le raccordement au réseau et puis les nouvelles technologies PV.

## MOTS CLÉ :

Système photovoltaïque, Panneaux photovoltaïques, Générateur photovoltaïque, cellule solaire, module photovoltaïque. Les nouvelles technologies PV.

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

DC : Direct Curent

AC: Alternation Curent

AM: Air Mass

PV: Photovoltaïque

$I_{cc}$ : Courant de Court-circuit

$V_{co}$  : Tension de Circuit Ouvert

PPM : Point de Puissance Maximum

$I_{opt}$  et  $V_{opt}$  : Courant et Tension Optimaux au PPM

MPPT: Maximum Power Point Tracking

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

$R_{sh}$  : Résistances shunt. (Ohm)

$R_S$ : Résistance série (ohm).

FF: Facteur de forme.

$P_m$ : La puissance maximale produite PV (W).

$V_{bat}$ : La tension aux bornes de la batterie (V).

STC: Standard Test Conditions.

# Sommaire

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION GENERALE

#### CHAPITRE I : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques

|   |    |
|---|----|
| I.1. Introduction.....  | 01 |
| I.2. La conversion photovoltaïque.....  | 01 |
| I.3. L'effet photovoltaïque.....  | 03 |
| I.4. Les critères qui influent sur les performances des générateurs photovoltaïques | 04 |
| I.4.1. Rayonnement solaire.....   | 04 |
| I.4.2. Spectre solaire.....   | 06 |
| I.4.3. Durée d'insolation.....  | 06 |
| I.5. La cellule photovoltaïque.....   | 07 |
| I.5.1. Définition.....  | 07 |
| I.5.2. Les différents types de cellules solaires.....                               | 07 |
| a- Les cellules monocristallines.....   | 07 |
| b- Les cellules poly cristallines.....  | 08 |
| c- Les cellules amorphes.....   | 08 |
| I.6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....                   | 08 |
| I.7. Le semi-conducteur.....  | 09 |
| I.8. Type de systèmes photovoltaïques.....  | 10 |
| I.8.2. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....                            | 10 |
| I.8.1. Systèmes autonomes.....  | 11 |
| I.8.2. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....                            | 11 |
| I.9. Evaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....                 | 11 |
| I.9.1. La répartition de la puissance installée par application.....                | 12 |
| I.9.2. Potentiel solaire.....   | 12 |
| I.10. Conclusion.....   | 14 |

#### CHAPITRE II : Caractéristiques Electriques d'un Générateur PV

|  |    |
|--|----|
| II.1. Introduction.....  | 15 |
| II.2. Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque..... | 15 |
| II.2.1. Courant de court-circuit.....                                | 17 |

|   |    |
|---|----|
| <b>II.2.2.</b> Tension de circuit ouvert.....   | 18 |
| <b>II.3.</b> Les paramètres d'une cellule photovoltaïque.....   | 20 |
| <b>II.3.1.</b> Influence de la résistance série.....  | 21 |
| <b>II.3.2.</b> Influence de la résistance shunt.....  | 21 |
| <b>II.4.</b> Le module photovoltaïque.....  | 22 |
| <b>II.4.1.</b> Association en série.....  | 23 |
| <b>II.4.2.</b> Association en parallèle.....  | 23 |
| <b>II.4.3.</b> Caractéristiques électriques des modules.....  | 23 |
| <b>A.</b> La puissance de crête.....  | 23 |
| <b>B.</b> Le rendement de la conversion.....  | 23 |
| <b>II.5.</b> Définition et principe de fonctionnement de l'Mppt d'un système solaire Photovoltaïque.. | 24 |
| <b>II.6.</b> Les composant d'un système PV.....   | 26 |
| <b>II.7.</b> La partie de la production d'énergie.....  | 27 |
| <b>II.7.1.</b> Les panneaux solaires photovoltaïques.....   | 27 |
| <b>II.7.2.</b> Installation des panneaux.....   | 27 |
| <b>a)</b> Disposition des panneaux.....   | 28 |
| <b>b)</b> Fixation des panneaux.....  | 28 |
| <b>c)</b> L'orientation des panneaux.....   | 28 |
| <b>II.8.</b> Rôle des suiveurs.....   | 29 |
| <b>II.9.</b> La partie contrôle d'énergie (stockage et régulation).....                               | 30 |
| <b>II.9.1.</b> Les batteries.....   | 30 |
| <b>II.9.2.</b> Stabilisation de la tension.....   | 30 |
| <b>II.9.3.</b> Types d'accumulateurs.....   | 30 |
| <b>A.</b> Les Accumulateurs au plomb acide.....   | 30 |
| <b>B.</b> Les Accumulateurs au Nickel-cadmium.....  | 32 |
| <b>II.10.3.</b> Installions des éléments de la batterie.....  | 33 |
| <b>II.10.4.</b> Câblage électrique.....   | 33 |
| <b>II.11.</b> Les régulateurs de charges.....   | 33 |
| <b>II.11.1.</b> Régulation de décharge.....   | 34 |
| <b>II.11.2.</b> Régulation de la charge.....  | 34 |
| <b>II.11.3.</b> Régulation de la charge série.....  | 34 |
| <b>II.12.</b> Les convertisseurs (DC/DC).....   | 34 |
| <b>II.13.</b> Les convertisseurs (DC/AC).....   | 35 |
| <b>II.13.1.</b> Définition.....   | 35 |

|   |    |
|---|----|
| II.13.2. Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques(PV).. | 35 |
| II.13.3. Différents types d'onduleurs.....  | 37 |
| a. Onduleur string.....   | 37 |
| b. Onduleur multi string.....   | 38 |
| c. Onduleur central.....  | 38 |
| II.14. Partie d'utilisation de l'énergie produite.....                              | 38 |
| II.15. Conclusion.....  | 39 |

### **CHAPITRE III : Modélisation d'un Système PV et Raccordement au Réseau**

|  |    |
|--|----|
| III.1. Introduction.....   | 40 |
| III.2. Modélisation d'un système PV.....                                     | 40 |
| III.2.1. Modèle d'une cellule solaire.....                                   | 40 |
| III.2.2. Présentation du modèle mathématique.....                            | 40 |
| III.3. Modélisation du générateur PV.....                                    | 42 |
| III.3.1. Modèle de facteur de rendement.....                                 | 43 |
| III.3.2. Modèle de quatre paramètres.....                                    | 43 |
| III.3.3. Modèle à cinq paramètres.....                                       | 46 |
| III.4. Les systèmes raccordés directement au réseau.....                     | 47 |
| III.4.1. Structure à convertisseur unique.....                               | 47 |
| III.4.2. Structure a bus à basse tension alternative.....                    | 48 |
| III.4.3. Système a bus continu intermédiaire.....                            | 48 |
| III.4.4. Structure avec hacheur et onduleur.....                             | 48 |
| III.5. Avantages des centrales PV.....                                       | 49 |
| III.6. Modélisation des systèmes PV raccordées au réseau électriques.....    | 50 |
| III.6.1. L'architecture du système photovoltaïque raccordé au réseau BT..... | 50 |
| III.7. Nouvelles technologies photovoltaïques.....                           | 51 |
| III.7.1. Génération de cellule photovoltaïque.....                           | 51 |
| III.8. Conclusion.....   | 56 |

### **CONCLUSION GENERALE**

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de "continuer à vivre comme maintenant" sans que cela n'aggrave nos émissions de gaz à effet de serre, en attendant tranquillement que l'efficacité énergétique permette de diminuer les émissions. Mais il est important de savoir que l'on ne peut pas filtrer l'atmosphère pour en retirer le gaz déjà émis. La technique ne peut donc rien sur ce plan, et ne nous évitera pas un réchauffement programmé et inévitable d'au moins 1°C en un siècle. Souvent, la révolution des énergies renouvelables est avancée comme un dénouement à tous nos problèmes de production d'énergie électrique. Mais il serait plus raisonnable de voir ces nouvelles solutions techniques comme un simple frein au réchauffement climatique à condition que notre consommation énergétique ne continue pas d'augmenter exponentiellement. Cela éviterait ainsi de reproduire les mêmes erreurs du passé en pensant à des solutions "miracles" qui seraient inépuisables et sans impact sur notre mode de vie ou sur l'environnement. Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Seule la géothermie échappe à cet inventaire.

Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit. L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière. Même si cette ressource est maintenant de mieux en mieux reconnue en tant que source potentielle d'énergie, cela n'a pas été facile face aux nombreux préjugés existants sur ce sujet. On a reproché par exemple à l'énergie solaire d'être intermittente (jour, nuit, saison), de ne pas être fiable et de dépenser plus d'énergie pour la conception d'un panneau solaire qu'il ne peut en fournir durant toute sa durée de vie. Ces affirmations sont en passe d'être aujourd'hui dénigrées par les progrès techniques accomplis sur les cellules photoélectriques mais

également sur le traitement de l'énergie. Actuellement, la plupart des panneaux photovoltaïques produisent largement plus d'énergie au cours de leur vie que l'énergie nécessaire à leur production. On a vu apparaître ces dernières années la notion de remboursement énergétique noté EPT (Energy Payback Time). Selon les technologies et les lieux de production, l'EPT s'étend de 2 à 4 ans pour des panneaux ayant une durée de vie de 15 à 25 ans. Les progrès de fabrication ont été considérables ces dernières années permettant d'avoir des fonctionnements de générateurs photovoltaïques garantis au-delà de 25 ans avec en plus des coûts de fabrication qui tendent à baisser quand on ramène le prix de l'installation au prix du Watt Crête.

Si on se penche sur les diverses avancées technologiques effectuées ces dernières années, on voit apparaître dans la littérature quantités de matériaux différents ainsi que plusieurs assemblages possibles pour créer un générateur photovoltaïque fiable. Pour l'utilisateur final, la nature technologique de la cellule utilisée pour produire de l'énergie importera donc peu en premier lieu. Les paramètres plus pertinents sont donc tout d'abord le prix du watt crête du module, son rendement, sa durée de vie, sa taille, son poids, son apparence esthétique et l'impact de la fabrication et du retraitement sur l'environnement. Ainsi, en fonction des applications visées, chaque critère sera plus ou moins pondéré pour mieux sélectionner les meilleures combinaisons (système autonome hautement sécurisé, système de forte production pour la connexion réseau, production domestique, systèmes embarqués et portables, etc ...).

Du point de vue des chercheurs, une bonne compréhension des différentes technologies de cellule et de module est cruciale pour continuer à réduire les coûts, augmenter les performances et améliorer l'impact sur l'environnement en trouvant par exemple des solutions de recyclage dès la conception de nouveaux modules PV. De nombreuses technologies sont aujourd'hui opérationnelles mais beaucoup exigent encore des travaux de recherche et de développement spécifiques pour atteindre le degré de maturité nécessaire à une forte production.

Dans ce contexte, dans le premier chapitre, on va décrire les principes généraux de la conversion photovoltaïque et les critères qui influent sur les performances des générateurs photovoltaïques, ainsi que les principes de fonctionnement de La cellule photovoltaïque et les

différents types de systèmes photovoltaïques en suite on va présenter l'évaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.

Dans le deuxième chapitre on va voir les caractéristiques électrique d'un générateur PV et les critères qui influent sur le générateur PV ; ainsi que les différentes composantes d'un système photovoltaïque.

En fin, dans le troisième chapitre on va présenter la modélisation du système PV qui nous va permettre d'analyser le fonctionnement de chaque élément, et de faciliter l'étude de l'influence du générateur PV sur le réseau électrique, tout en optimisant le fonctionnement du GPV. À la fin de ce chapitre on va rappeler brièvement les futures générations de cellules photovoltaïques qui procurent un bon rendement au générateur PV comparativement aux générations antérieures.

# **CHAPITRE I**

## **GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES**

## **I.1. INTRODUCTION :**

Ce chapitre est consacré aux principes généraux de la conversion photovoltaïque, les cellules solaires, et les différents organes constituant un système photovoltaïque. L'influence du rayonnement et spectre solaire, de la durée d'insolation sur les performances des générateurs photovoltaïques (GPV) sont aussi envisagées. On décrira aussi le principe de la conversion photovoltaïque et puis l'effet photovoltaïque. On terminera par les définitions types de systèmes photovoltaïques aussi que l'évaluation de l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie [1].

## **I.2. La conversion photovoltaïque :**

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique.

Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs PV a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue. Le taux de conversion photon-électron est faible car un certain nombre de conditions doivent être réunies pour que ce phénomène se produise. L'effet thermique est donc majoritaire sur la plupart des capteurs détériorant d'autant plus les performances de ces derniers.

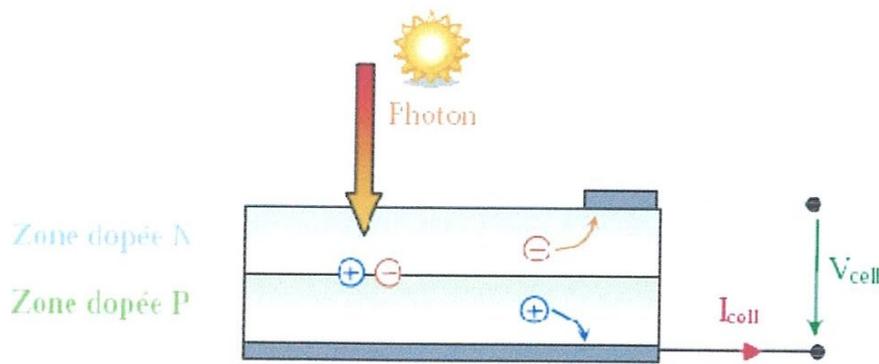


Figure I.1. Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un.

Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau, ...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par Schrockley et Quassier [5]. Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1.4eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1.12eV. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes

sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit

( $I_{cc}$ ). Ces valeurs peuvent changer fortement en fonction du matériau utilisé, de la température et de l'ensoleillement. La Figure 2-4 représente les caractéristiques typiques mesurables  $I_{cell}=f(V_{cell})$  d'une jonction PN soumise à un flux lumineux constant et dans l'obscurité [2].

### 1.3.L'effet photovoltaïque :

C'est le résultat de l'interaction de la lumière avec les atomes de cristal. L'énergie d'un photon dépend de sa longueur d'onde. Un photon d'énergie suffisante (c'est à dire dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 1,1  $\mu\text{m}$  ~ spectre visible) qui heurte un atome de silicium peut arracher un électron et lui communiquer une certaine vitesse. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers la jonction PN, où la présence du champ électrique a pour conséquence la collecte de l'électron vers la région N, le champ empêchant la recombinaison de l'électron avec son atome d'origine.

Une tension électrique apparaît entre les deux zones N et P. Le dispositif devient générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques, en forme de grille sur chaque face. Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant circule.

L'épaisseur nécessaire pour réaliser ce phénomène n'est que de quelques dizaines de microns, mais pour des raisons mécaniques, les cellules atteignent généralement des épaisseurs de 200 à 400 microns ( $10^{-6}$  mètres).

Selon la technologie utilisée (amorphe en couche mince, poly cristallin, monocristallin), le rendement de conversion s'échelonne de 6 à 20 % actuellement pour le silicium. Cela permet notamment une puissance d'environ 100 Watts-crête/m pour le silicium cristallin (compte tenu des espaces restant entre les cellules) et 60Watts-crête/m pour l'amorphe (à 20°C) [1].

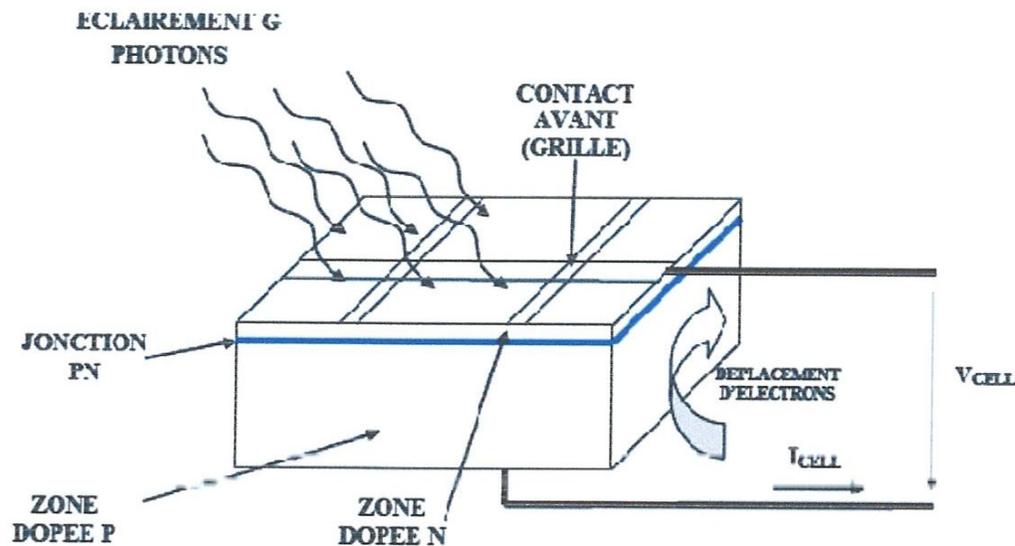


Figure I.2. Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule.

#### I.4. Les critères qui influent sur les performances des générateurs

##### Photovoltaïques :

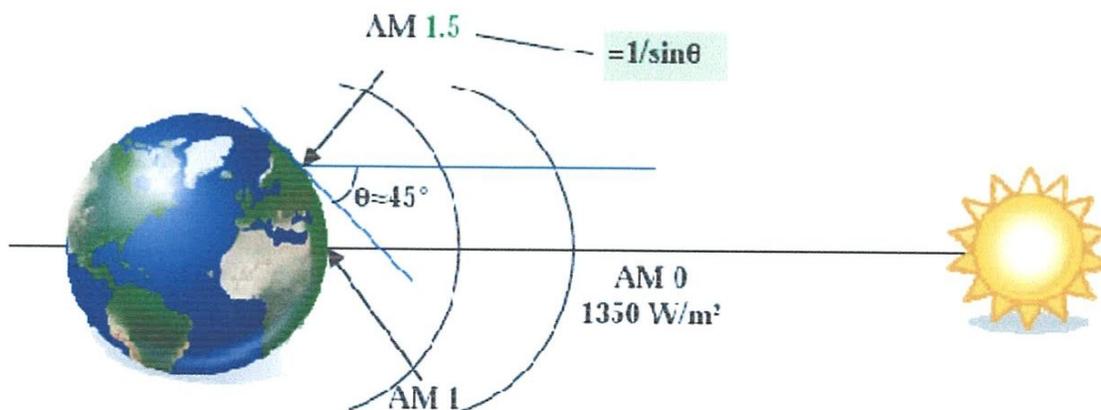
##### I.4.1. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0.2 \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2.5 \mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergie émise [1, 2]. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de  $1350 \text{W/m}^2$  (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure I.3). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières.

Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à  $90^\circ$  d'inclinaison) atteint  $1000 \text{W/m}^2$  du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple,

l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de  $48^\circ$  avoisine les  $833 \text{ W/m}^2$  (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la Figure I.3 correspondant à nos latitudes.



**Figure I.3.** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière.

Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$E = h \cdot c / \lambda$  où  $h$  EST la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière ET  $\lambda$  sa longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905 [2].

### I.4.2. Spectre solaire :

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

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^{\circ}$  K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0.

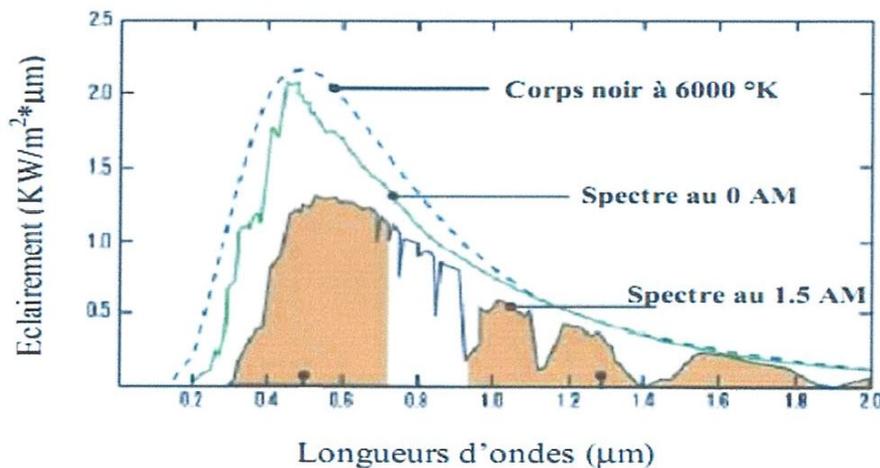


Figure I.4. Spectre solaire hors atmosphère.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\mu\text{m}$  (ultra-violet) et  $4\mu\text{m}$  (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\ \mu\text{m}$ . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre  $0,2\ \mu\text{m}$  et  $2,5\ \mu\text{m}$ . De  $0,4\ \mu\text{m}$  à  $0,78\ \mu\text{m}$ , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons [3].

### I.4.3. Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont

enregistrées ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle même dépend de la période de l'année considérée [3].

## **I.5. La cellule photovoltaïque :**

### **I.5.1 Définition :**

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère une tension électrique : cet effet est appelé **l'effet photovoltaïque**.

Elle est constituée de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (S Cd) ou de tellure de cadmium (Cd Te). Elle se présente sous la forme de deux fines plaques [type-n et type-p] en contact étroit [jonction n-p].

Elle est considérée comme un détecteur de lumière (photodiode), qui -lorsqu'on l'éclaire avec une certaine quantité de lumière- produit du courant électrique.

Elle mesure à peu près  $100 \text{ cm}^2$  [carré de 4 pouces] et produit environ 0.5 Volts.

Elle est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs (Silicium monocristallin, silicium poly cristallin, silicium amorphe, et dans une moindre mesure l'arséniure de gallium, et le cadmium).

La cellule "photovoltaïque" est aussi appelée cellule "photo-galvanique"[4].

### **I.5.2 Les différents types de cellules solaires :**

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

#### **a- Les cellules monocristallines :**

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée [4].

### b- Les cellules poly cristallines:

Leurs conception étant plus facile, leurs coût de fabrication est moins important, cependant leurs rendement est plus faible (11%-13%).

### c- Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres [4].

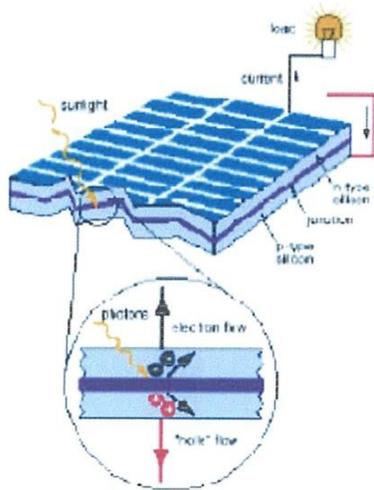


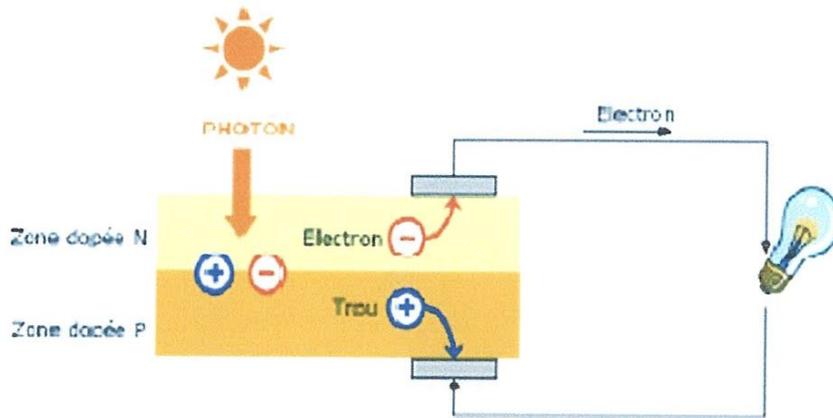
Figure I.5.a: Schéma synthétique de l'effet  
Photovoltaïque



Figure I.5.b : Structure d'une  
Cellule solaire

## I.6.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes. La Fig1.6 présente le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque d'électricité.



FigI.6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.7. Le semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du «bonde gap»,  $E_g$  en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin (c - Si), et 1.7 eV pour le silicium amorphe (a - Si).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule.

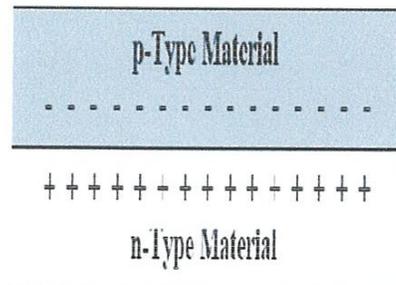


Figure I.7 La Jonction P-N

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il

Faut introduire un champ électrique  $e$ , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du 'dopage' par des impuretés. Deux types de dopage sont possibles [5].

## I.8. Type de systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont deux types : autonomes et reliés au réseau

### I.8.1. Systèmes autonomes :

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [6].

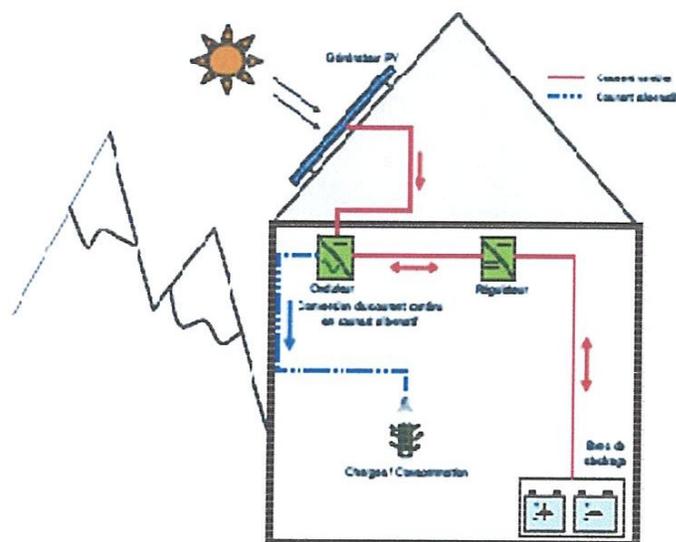


Figure I.8. Exemple de la structure d'un système PV autonome

### I.8.2 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Etant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou Pendant les jours sans soleil [6].

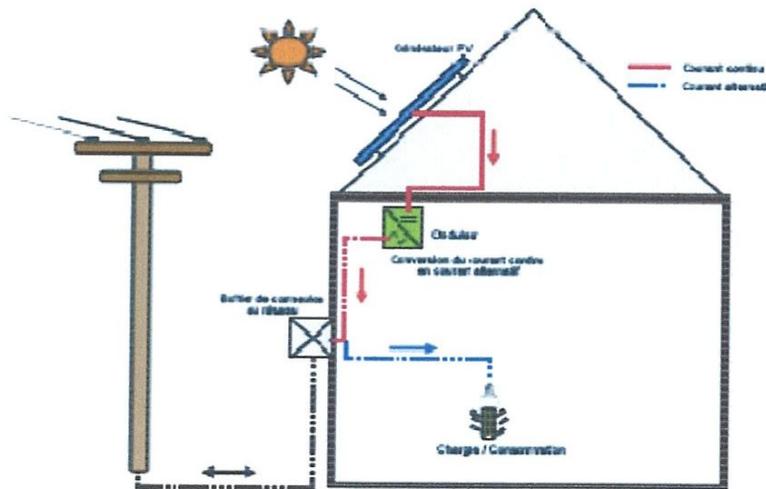


Figure I.9. Exemple de la structure d'un système PV connecte au réseau

### I.9. Evaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie :

Le potentiel de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies solaire photovoltaïque est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 500 MW cette année 2010, amenant la part de l'électricité produite par les énergies solaires photovoltaïques à 5% de l'électricité totale produite [5].

### I.9.1 La répartition de la puissance installée par application :

| Application       | Puissance installée (KW) | Pourcentage |
|-------------------|--------------------------|-------------|
| Electrification   | 1353                     | 58 %        |
| Télécommunication | 498                      | 21 %        |
| Pompage           | 288                      | 12 %        |
| Eclairage public  | 48                       | 2 %         |
| Autres            | 166                      | 7 %         |

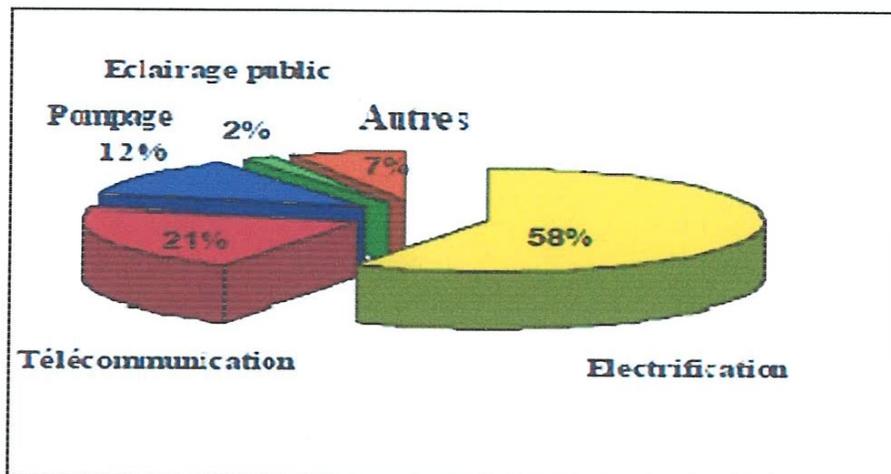


Figure I.10 Répartition des usages de la filière ER en Algérie

### I.9.2 Potentiel solaire :

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [5].

| Régions  | Région côtière | Hauts plateaux | Sahara |
|--|----------------|----------------|--------|
| Durée moyenne d'ensoleillement<br>(heures/an)                  | 2650           | 3000           | 3500   |
| Energie moyenne reçue<br>(KW <sub>a</sub> /m <sup>2</sup> /an) | 1700           | 1900           | 2650   |

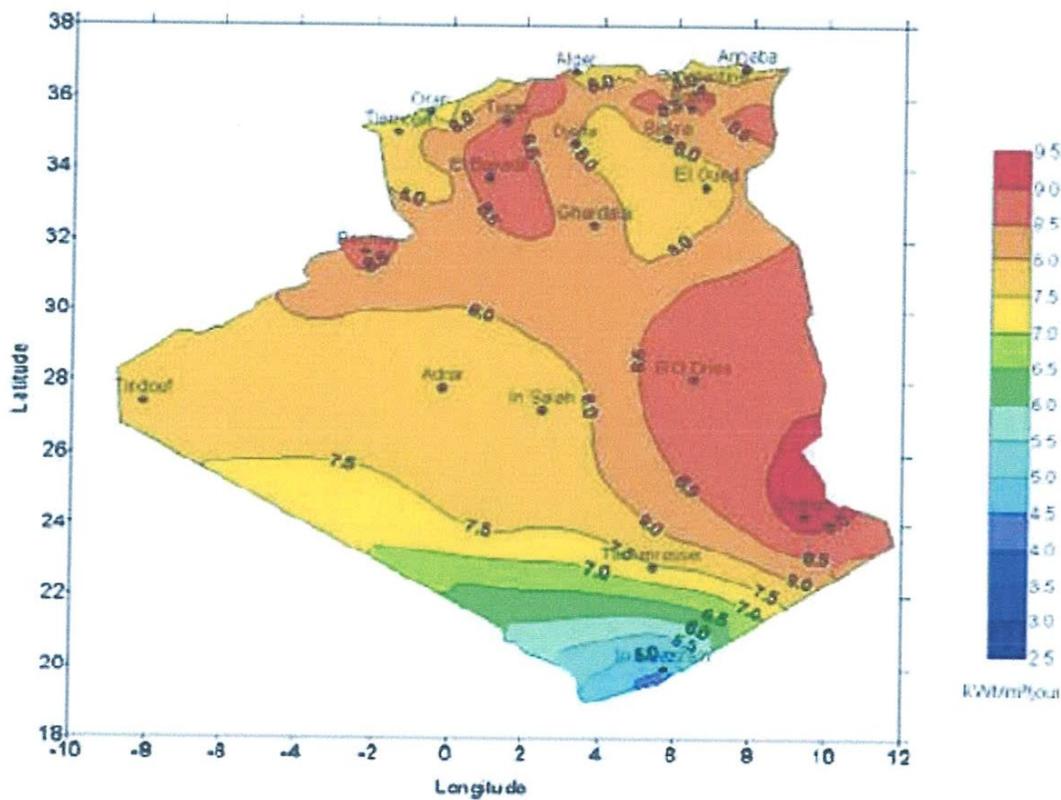


Figure I.11. Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)

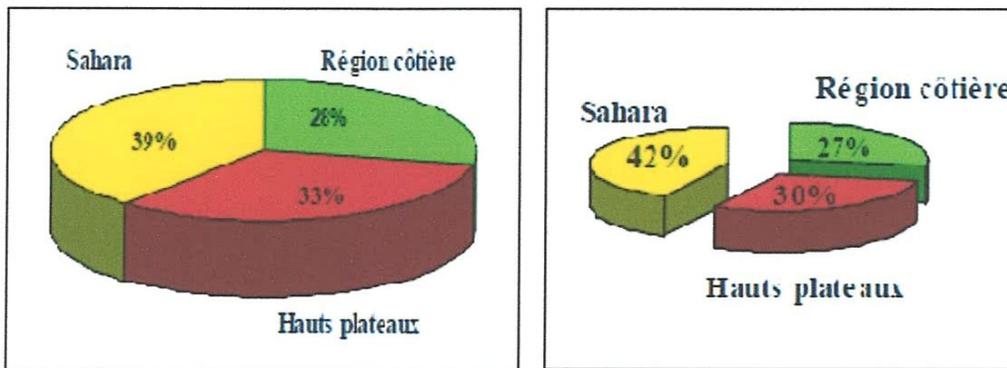


Figure I.12.a Durée moyenne d'ensoleillement Figure I.12.b Energie moyenne reçue

En Algérie

En Algérie

### I.10. Conclusion :

Dans le premier chapitre nous avons décrit les principes généraux de la conversion photovoltaïque et les critères qui influent sur les performances des générateurs photovoltaïques, ainsi que les principes de fonctionnement de La cellule photovoltaïque et les différents types de systèmes photovoltaïques en suite on a présenté l'évaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.

# CHAPITRE II

CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE ET  
COMPOSANTS D'UN SYSTEME PV

## II.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré aux principes généraux de la conversion photovoltaïque, les cellules solaires, et les différents organes constituant un système photovoltaïque. L'influence du rayonnement, de la température et les résistances des contacts sur les performances des générateurs photovoltaïques (GPV) sont aussi envisagées. Vue l'importance du système de stockage dans les installations photovoltaïques. On décrira aussi le principe de fonctionnement des batteries solaire et les différents types utilisés dans les systèmes PV.

On terminera par les définitions des composantes du rayonnement solaire (global, diffus et incliné) ainsi que les techniques d'orientation et d'inclinaison des modules photovoltaïque. Tout système photovoltaïque peut se décomposer en trois parties: une partie production d'énergie, une partie de contrôle et de stockage et une partie utilisation de l'énergie produite

## II.2.Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (II.1), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

La courbe de la cellule solaire  $I=f(V)$  passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  en M ;
- La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  en S ;
- La puissance maximale en A.

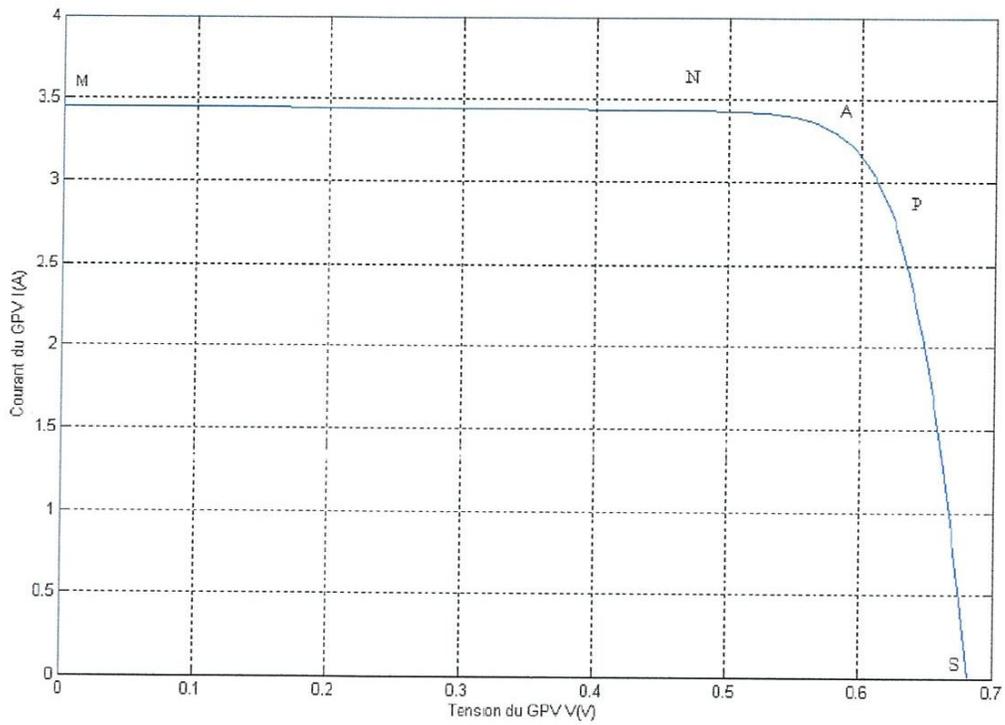


Figure II.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

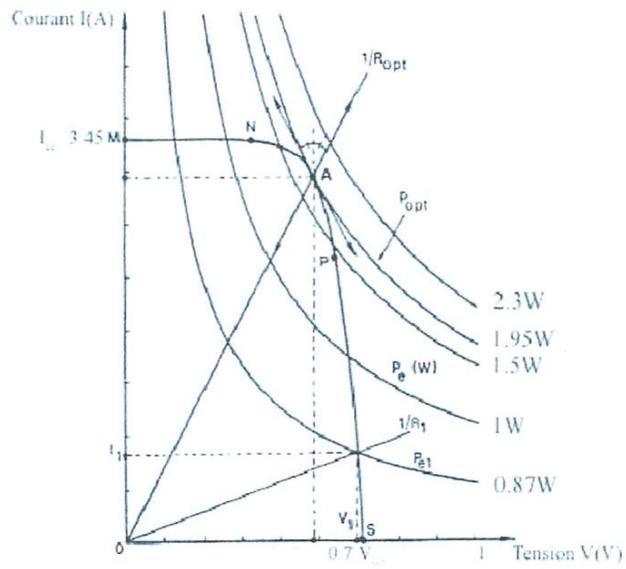
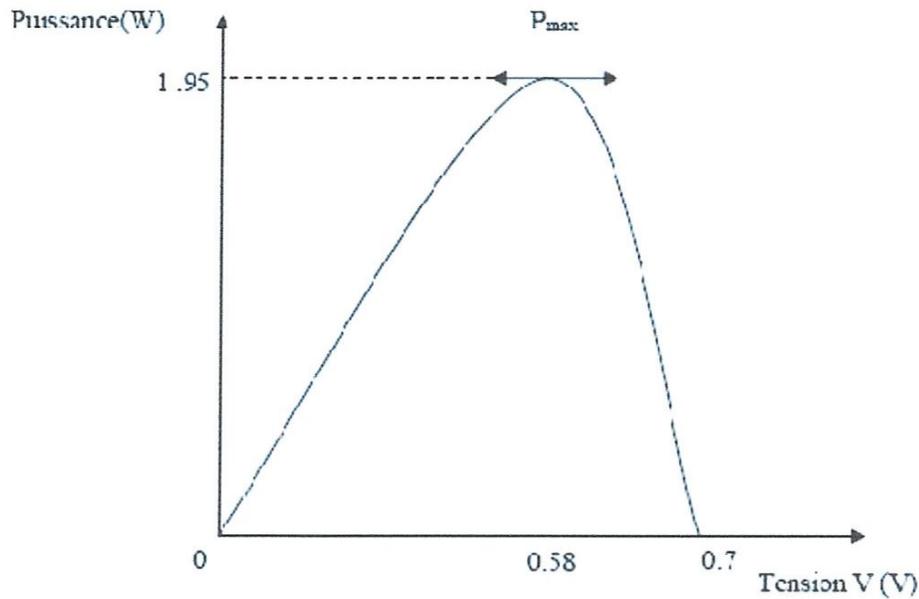


Figure II.2.a : Courbe d'équipuissance et droite de charge.



**Figure II.2.b :** Courbe caractéristique P- V.

La figure (II.1) montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension).

En effet, sa caractéristique se divise en trois parties :

- la zone MN où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement ;
- la zone PS où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$  ;
- la zone NP où l'impédance interne du générateur varie rapidement [7].

### II.2.1.Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ( $V=0$ ) [3].

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{q(R_S I_{cc})}{AK_B T}} - 1 \right) - \frac{(R_S I_{cc})}{R_{sh}} \quad (II.1).$$

$I_{cc}$  : courant de court-circuit.

$I_{ph}$  : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement.

$I_{sat}$  : courant de saturation.

$R_s$  : résistance série du générateur solaire.

$R_{sh}$  : résistance shunt du générateur solaire.

A un niveau d'éclairement standard (égale à 1 kW/m<sup>2</sup>), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure (II.1)). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent à la photo -courant  $I_{ph}$ , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement  $\Phi$  :

$$I_{cc} = I_{ph} = C\Phi \quad (II.2)$$

Où :

$C$  : constante

$\Phi$ : Flux solaire.

### II.2.2.Tension de circuit ouvert :

Φ Dans le cas du circuit ouvert (point S de la figure (II.1)), la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante [3] :

$$V_{oc} = \frac{AK_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_{sat}}{I_{sat}} \right) \quad (II.3)$$

Si la résistance série est nulle et la résistance shunt est infinie, l'expression devient : Φ

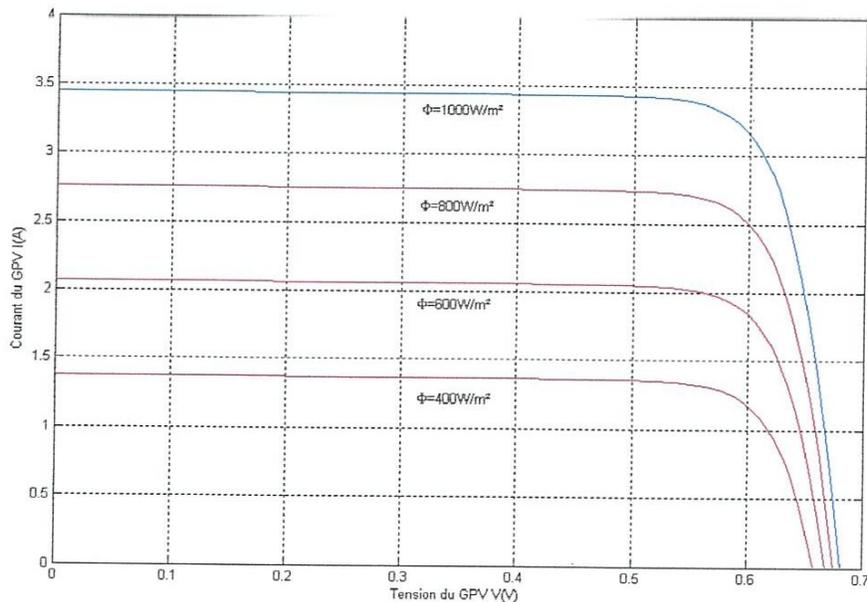
$$V_{oc} = \frac{AK_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (II.4)$$

La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  correspond, en fait, à la chute de tension dans la jonction PN, lorsqu'elle est traversée par le photo -courant  $I_{ph}$  [3].

Nous avons vu que le courant produit par la photopile ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel au flux lumineux ( $\Phi$ ). Par contre, la tension ( $V$ ) aux bornes de la jonction varie peu car elle

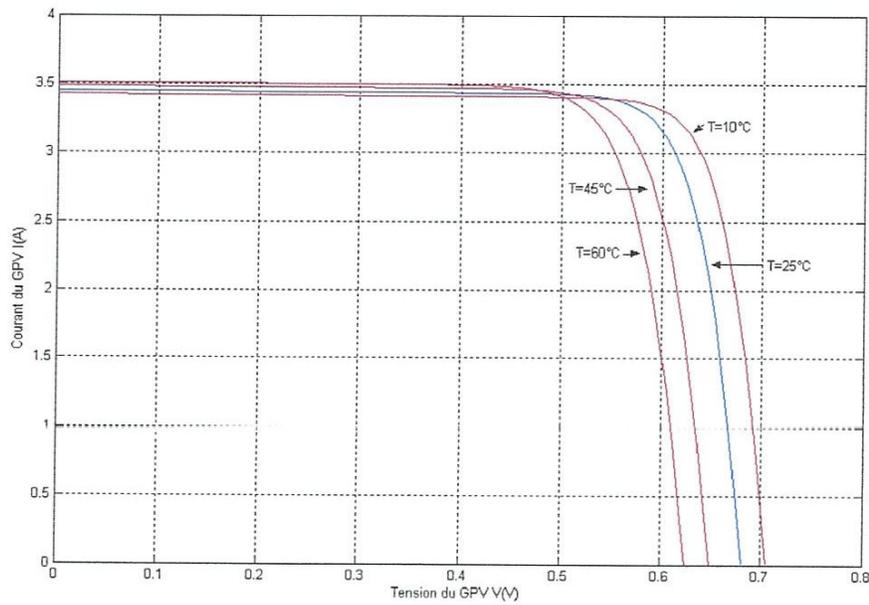
est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour  $T_j = 25^\circ\text{C}$ ). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que [7]:

- La puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement;
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (figure I.2).



**Figure II.3** Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V.

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque (voir figure 2.5). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ  $0,025 \text{ mA/cm}^2/^\circ\text{C}$  alors que la tension décroît de  $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}/\text{cellule}$ . Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ  $0,4\%/^\circ\text{C}$ . Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque [3].



**Figure II.4 :** Influence de la température sur la caractéristique I-V  
D'un générateur photovoltaïque.

### II.3. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont [3] :

- La résistance shunt  $R_{sh}$ .
- La résistance série  $R_s$ .
- Le courant de saturation  $I_{sat}$ .
- Le flux d'éclairement  $\Phi$ ;
- La température  $T$ .

Pour un flux  $\Phi$  égale à  $1 \text{ kW/m}^2$ , ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation  $I_{sat}$  qui dépend directement de la température  $T$  de la cellule.

### II.3.1. Influence de la résistance série :

D'une valeur généralement très petite, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension (figure (II.5)). Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert. Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit [7].

La valeur de la résistance série est fonction de la résistivité du matériau semi-conducteur, des résistances de contact des électrodes et de la résistance de la grille collectrice.

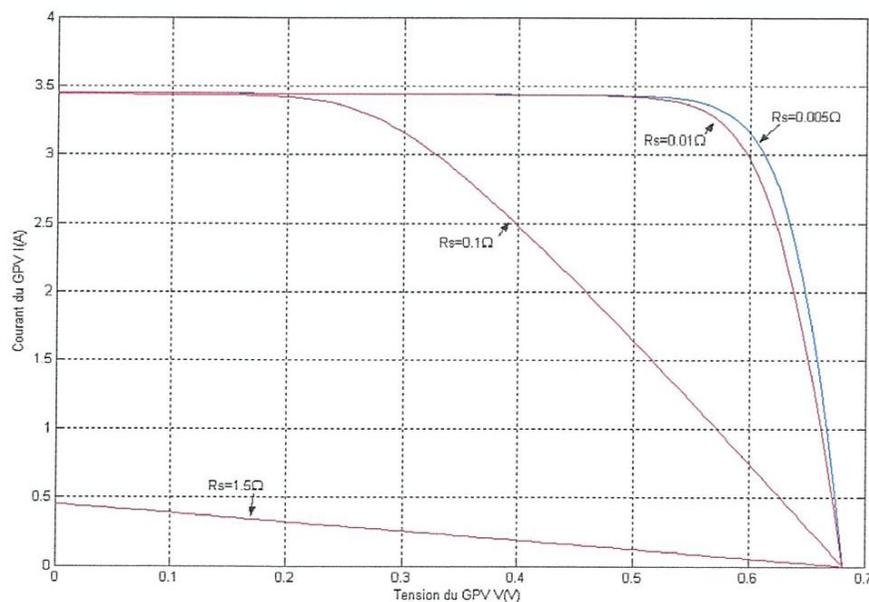


Figure II.5. : Influence de la résistance série sur la caractéristique

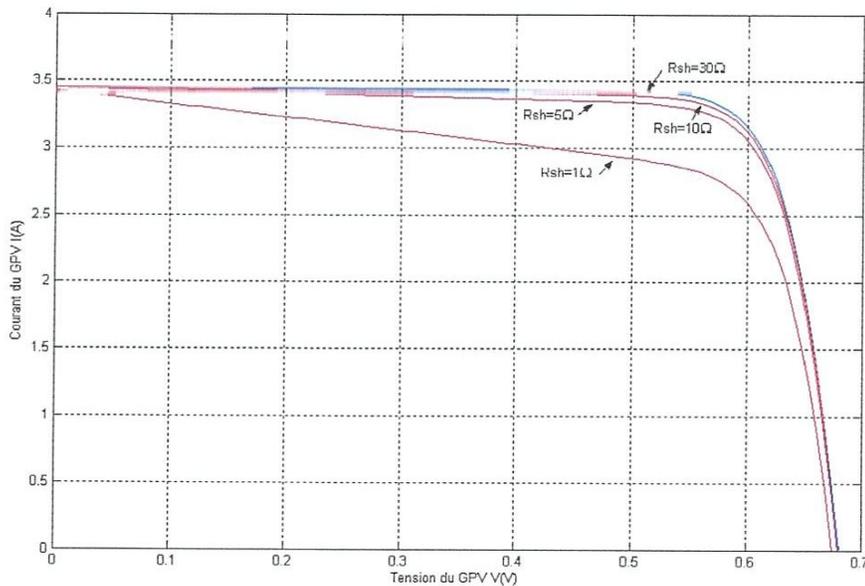
I-V d'un générateur photovoltaïque.

### II.3.2. Influence de la résistance shunt :

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photo-courant, outre le courant de la diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée.

La résistance shunt est en général très élevée. Si elle diminue on remarque une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit sur la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque (figure (II.6)).

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit -ouvert de la cellule : en effet, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclairement [7].



**Figure II.6 :** Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V

D'un générateur Photovoltaïque.

#### II.4. Le module photovoltaïque :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il

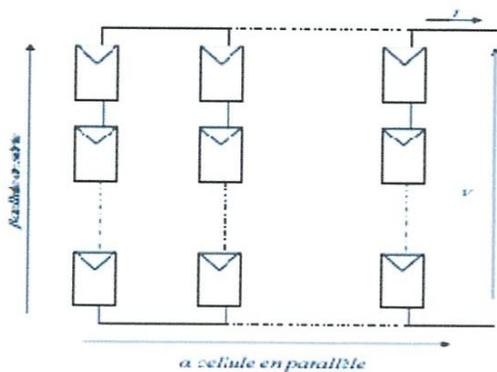
importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [8].

#### II.4.1. Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

#### II.4.2. Association en parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.



**Figure II.7.** Association de  $\alpha$  cellules solaires photovoltaïques en parallèle et  $\beta$  en Série.

#### II.4.3. Caractéristiques électriques des modules :

##### A. La puissance de crête :

Exprimée en watt-crête (Wc), c'est la puissance maximale d'un élément ou d'un ensemble photovoltaïque, travaillant dans des conditions de température et d'ensoleillement normalisées, une irradiation de  $1000 \text{ w/m}^2$ , alors que la température des cellules est de  $25^\circ\text{C}$ .

##### B. Le rendement de la conversion :

Le rendement de la conversion est défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{opt}}{S\Phi} \quad (II.5)$$

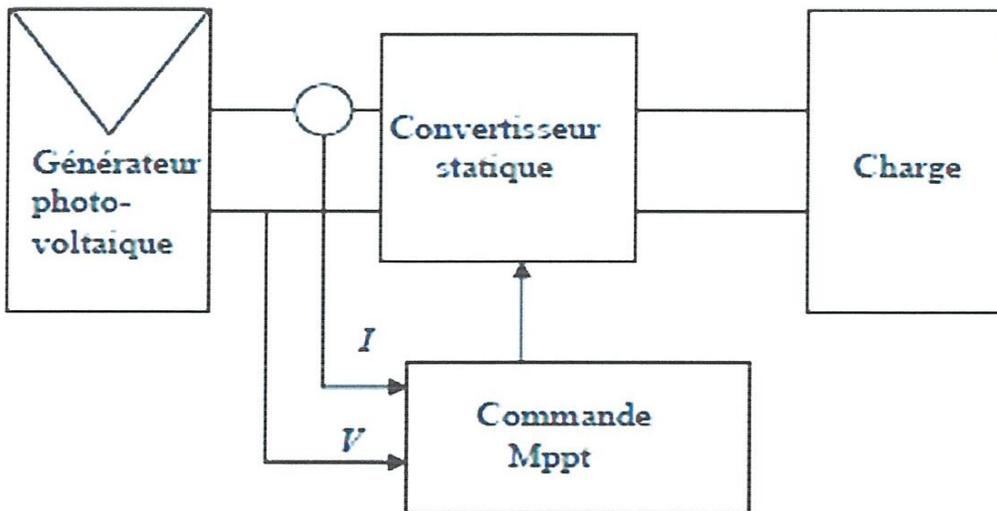
$P_{opt}$  : la puissance électrique optimale délivrée par le module photovoltaïque exprimée en watt.

$S$  : la surface effective du générateur photovoltaïque en  $m^2$  [8].

### II.5.Définition et principe de fonctionnement de l'Mppt d'un système solaire Photovoltaïque:

L'MPPT d'un système solaire photovoltaïque peut être définie comme étant une commande qui fait varier le rapport cyclique d'un convertisseur statique de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque soit le  $P_{max}$  disponible à ses bornes.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher la puissance maximale, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le point de puissance max en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur statique ( $I$  et  $V$ )



**Figure II.8.** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque.

Le principe d'un contrôleur MPPT est souvent basé sur le « coude » de la caractéristique P-V C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure (II.8).

On se place à un endroit de la courbe ( $X_1$ ), et l'on regarde si la valeur du point suivant est supérieure ou Non. Si oui, on se déplace au point suivant ( $X_2$ ), jusqu'au moment où le terme suivant ( $X_n$ ) sera inférieur au précédent ( $X_{n-1}$ ). A ce moment, on prend un intervalle de valeur entre chaque point plus faible, et l'on recommence à partir de ( $X_{n-1}$ ), jusqu'à obtenir le MPP( $X$ ).

Cependant, ce principe, facile à réaliser semble t-il dans ces conditions, devient moins accessible lorsque l'éclairement intervient. En effet, lorsque l'intensité de l'éclairement varie, on passe ici à une valeur  $E_2 < E_1$ , la caractéristique P-V change. Le point X, qui était jusqu'à présent le MPP, se retrouve être un mauvais point de fonctionnement dans les nouvelles conditions, comme le montre la figure (3.16). On voit apparaître un nouveau point de fonctionnement ici appelé X'.

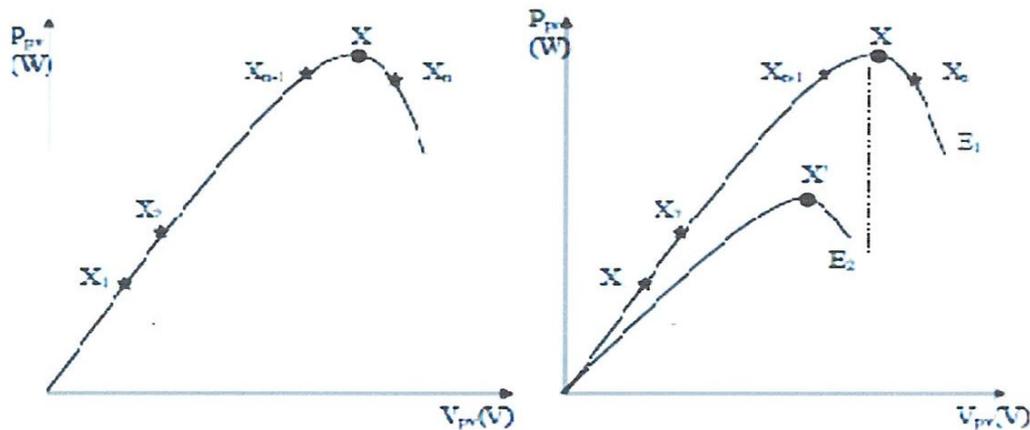


Figure II.9. Le principe d'un contrôleur Mppt.

Comme pour les régulateurs linéaires, le contrôle est basé sur un système de régulation qui a  $X_s$  et  $X_e$  respectivement comme variables de sortie et d'entrée. Dans la plupart des systèmes de régulation, seulement une mesure est nécessaire pour connaître le rapport entre  $X_s$  et  $X_e$ , mais ce n'est pas une condition suffisante dans un système où le rapport est une fonction du temps.

Le déplacement de  $X_e$  peut être assimilé à une perturbation dans la régulation du maximum.

En effet, quand le signe de la dérivée de  $X_s$  est connu, et si cela signifie que  $X_s$  s'éloigne du maximum, alors le contrôleur change le signe de la direction de  $X_e$  pour retrouver le maximum. Cette constante évolution de  $X_e$  introduit un état d'oscillation autour de la valeur maximale.

Cependant, plusieurs limites existent :

La caractéristique P-V du générateur peut avoir plus de un maximum. Cela se produit quand beaucoup de cellules PV, avec leurs diodes de protection, sont associées en série ou en parallèle.

Des variations brutales peuvent apparaître au niveau de l'éclairement ou de la charge. Si le MPPT n'a pas une bonne dynamique, le MPP peut être perdu. Pendant le temps qu'il faudra pour retrouver le MPP, de nouvelles pertes de puissance vont apparaître.

Des oscillations autour du MPP existent lors de la recherche de ce point. Cela introduit des pertes [9].

## **II.6. Les composants d'un système PV :**

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure II.10, en trois parties :

- Une partie de production d'énergie.
- Une partie de contrôle de cette énergie.
- Une partie d'utilisation de l'énergie produite.

On peut ajouter encore des moyens d'entretien du système photovoltaïque comme outil de nettoyage des modules

La partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité.

Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins d'1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque.

Dans notre étude on se base sur l'élément de base du système photovoltaïque qui est la cellule solaire.

La partie contrôle d'énergie est composée d'un système de stockage avec ou sans régulation, plus les câbles de connexion.

La partie utilisation se compose de plusieurs récepteurs (utilisateurs), (exemple : éclairage, pompage, ...)

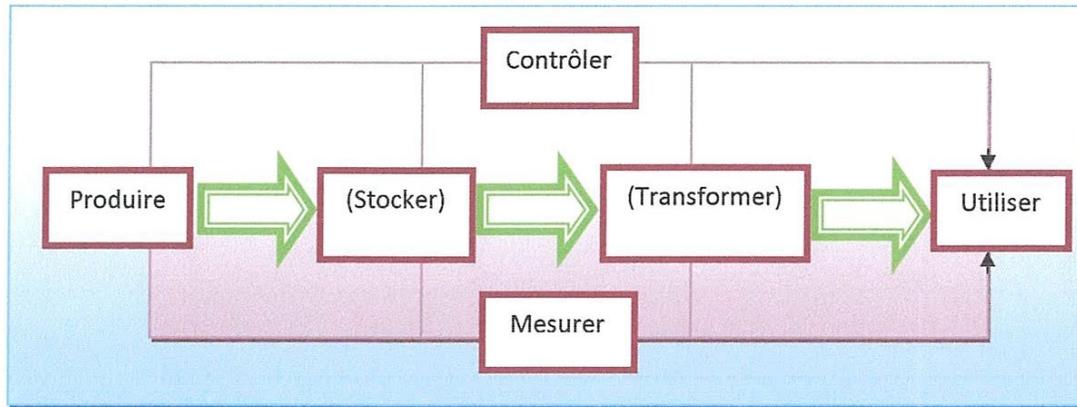


Figure. II.10 Composants principales d'un système photovoltaïque

## II.7. La partie de la production d'énergie :

### II.7.1. Les panneaux solaires photovoltaïques :

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.

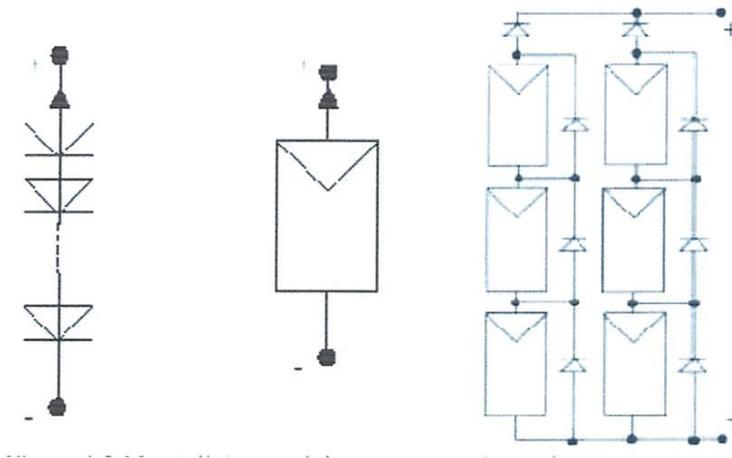


Figure II.11. Cellule, module et Panneau solaire

### II.7.2 Installation des panneaux :

Pour l'installer les panneaux solaire dans un site, il est nécessaire de vérifier les conductions suivantes:

**a) 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 inviolable) [10].

**b) 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

**c) 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.

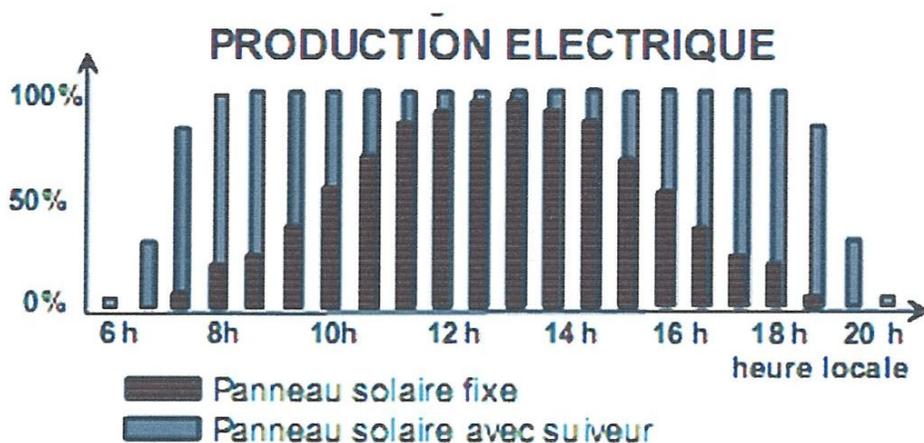
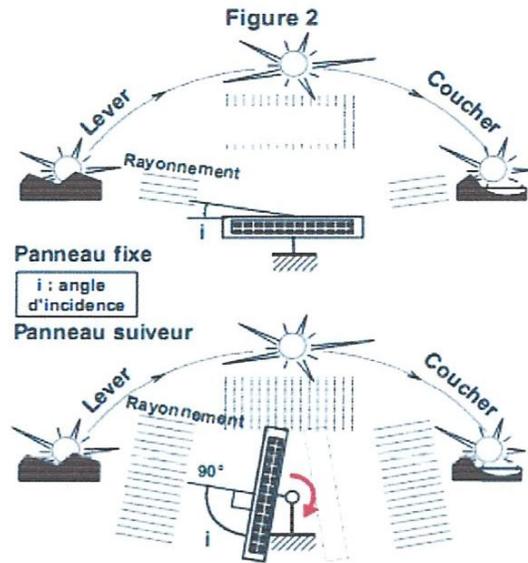
Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques 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.

Quand le panneau est également contrôlé et/ou garanti à un éclairage plus faible, les données sont parfois fournies, par exemple à 200W/m<sup>2</sup>. C'est un plus car les conditions STC ne sont pas respectives de toutes les situations rencontrées : l'ensoleillement est très élevé « AM0 hors atmosphère est de 1360W/m<sup>2</sup> ».

## II.8. Rôle des suiveurs :

Lorsqu'un panneau photovoltaïque est fixe par rapport au sol et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord), son rendement énergétique n'est pas constant au cours de la journée : en début et en fin de Journée, le mauvais angle d'éclairement du panneau diminue le rendement de la production électrique.

Lorsqu'un système suiveur oriente le panneau solaire en le faisant pivoter en direction du soleil et en maintenant en permanence un angle d'incidence des rayons «  $i$  » idéal, voisin de  $90^\circ$ , la production électrique par  $m^2$  de panneau atteint alors son maximum.



**Figure II.12** Le diagramme comparatif de production

Ce diagramme montre pour une journée ensoleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire.

D'une part à titre énergétique, la technologie avec suiveur ne se justifie qu'à la condition où la commande des mouvements de suivi ne gaspille pas une partie importante du surplus de l'énergie photovoltaïque produite [10].

## **II.9.La partie contrôle d'énergie (stockage et régulation) :**

### **II.9.1.Les batteries :**

La batterie d'accumulateurs stocke l'énergie produite par les modules pour assurer l'alimentation des récepteurs en toute période. Elle est constituée d'éléments de 2, 6, ou 12 V. La tension et la capacité désirées s'obtiennent par un couplage série / parallèle des éléments.

La capacité est déterminée en fonction des besoins des usagers, du mode de consommation de l'énergie et du nombre de jours d'autonomie souhaité. Pour un habitat dans les Pyrénées Orientales, on prévoira environ 7 jours d'autonomie, dans le Jura ce sera plutôt 15 jours.

La durée de vie des batteries stationnaires au plomb est d'environ 8 à 10 ans (sous réserve d'une bonne gestion, rôle de la régulation).

### **II.9.2.Stabilisation de la tension :**

Une batterie permet de fournir une Tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. Les deux types de batteries utilisées le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb acide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd).

### **II.9.3.Types d'accumulateurs :**

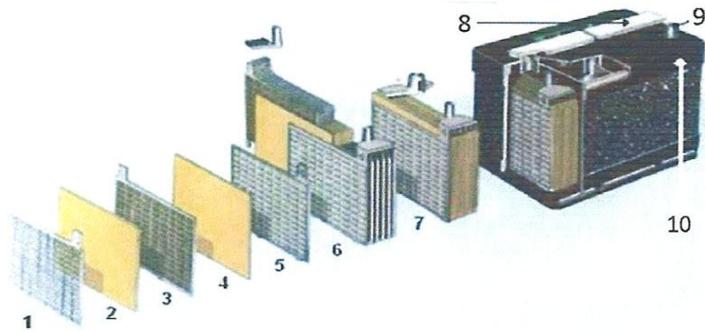
Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont.

#### **A- Les Accumulateurs au plomb acide :**

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [11].

#### **A-1-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.



**Figure II.13.** : Construction d'une batterie monobloc [14]

- |                      |                        |            |
|----------------------|------------------------|------------|
| 1 : Grille.          | 5: Barrette.           | 9 : Borne. |
| 2 : Séparateur.      | 6 : Faisceau négatif.  | 10 : Bac.  |
| 3 : Plaque positive. | 7 : Élément complet.   |            |
| 4 : Plaque négative. | 8 : Rampe de bouchons. |            |

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 [12].

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 conduction 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 bornes 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

### **B -Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [12] :**

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 :

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

**II.10.3 Installions des éléments 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 supérieur à 1000. Ce local doit satisfaire à certaines exigences, qui sont les suivantes :

La protection

- 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.10.4.Câblage électrique :**

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 [12].

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

**II.11.Les régulateurs de charges :**

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.

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 [13].

Il existe plusieurs types de régulateurs :

### II.11.1. Régulation de décharge :

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-régler 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.

### II.11.2 Régulation de la charge :

La régulation de la charge effectue par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge.

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb.

### II.11.3. Régulations de charge série :

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 :

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 lorsque la batterie se charge, la diode Zener conduise la tension  $U_z$  égale à la tension  $U_{bat}$ .

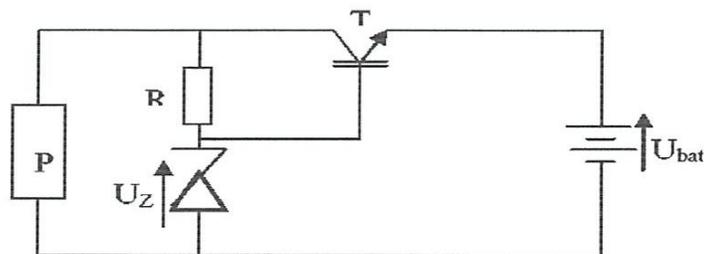


Figure II.14 Schéma de principe d'un régulateur de charge série [14].

## II.12. Les convertisseurs (DC/DC) :

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 présent 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.13. Les convertisseurs (DC/AC) :**

### **II.13.1. Définition :**

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue.

Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

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

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

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

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

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [14].

### **II.13.2. Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques(PV) :**

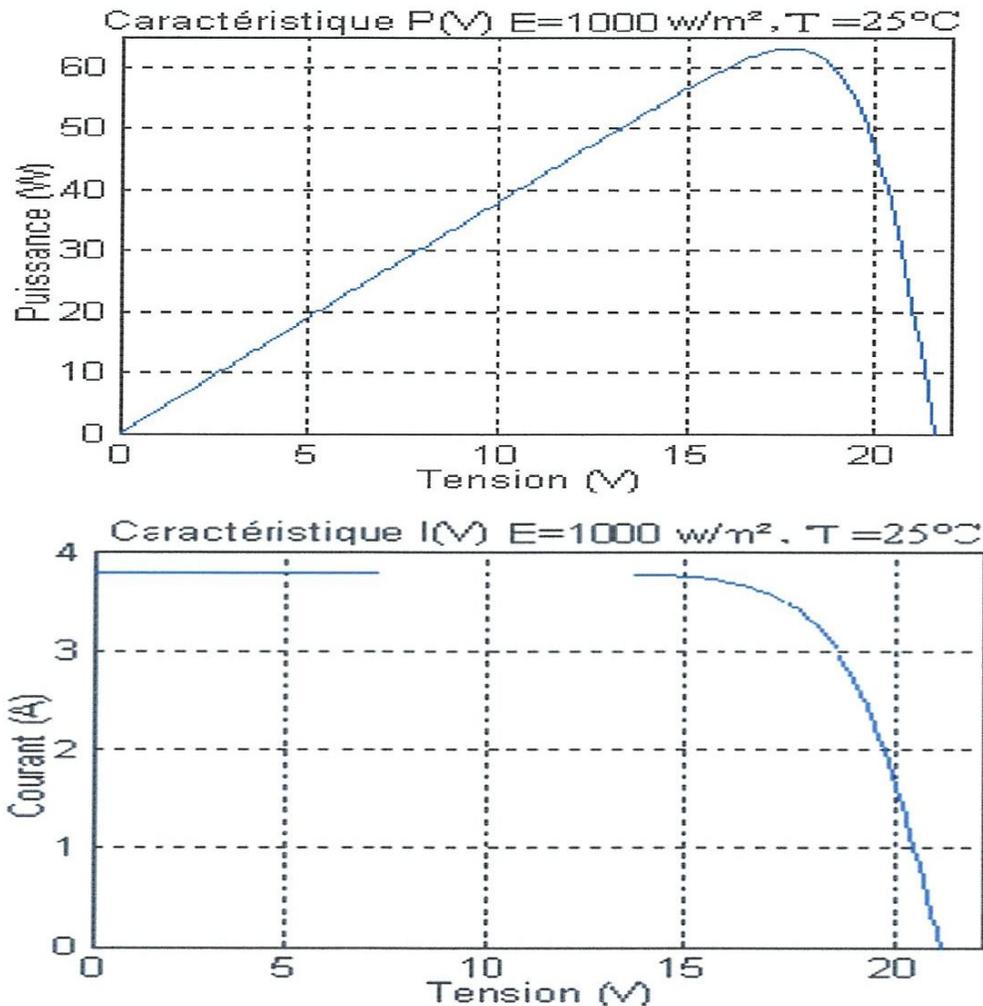
Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même.

La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.

En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique (I-V) non linéaire (figure I-8).

Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant). Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus.

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement : augmente si l'éclairement augmente.



Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique (Figure II.15).

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

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

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux : d'un point de vue formel elle transforme l'onduleur de tension en onduleur de courant [15].

### **II.13.3 Différents types d'onduleurs :**

#### **a. Onduleur string :**

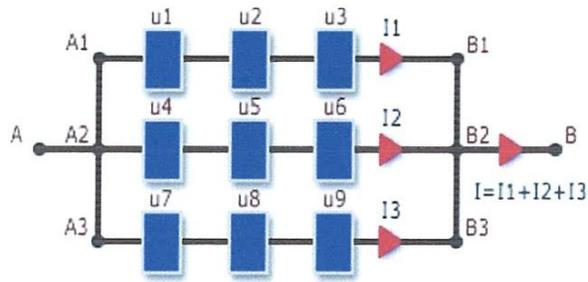
Unité de régulation : un seul MPP trackers.

Il permet la connexion d'un champ photovoltaïque dont les modules ont tous les mêmes caractéristiques et les mêmes contraintes de fonctionnement :

- orientations identiques
- inclinaisons identiques

C'est l'onduleur le plus utilisé dans les configurations classiques inférieures ou égales à 3 kWc.

La dénomination "onduleur string" ne signifie pas qu'il ne peut gérer qu'une seule string. Cela implique qu'il ne peut gérer qu'un seul couple tension/intensité venant du champ photovoltaïque [un seul MPP trackers]. Par contre, le champ lui-même peut être composé de plusieurs strings en parallèle, ce qui en final représente bien un générateur unique : 1 seule tension, 1 seule intensité [cas général d'une installation de 3kWc].



**Figure II.15.**Caractéristiques du générateur

Intensité =  $I$

Tension =  $UAB$

### b. Onduleur multi string :

Unité de régulation : plusieurs MPP trackers

Il permet la connexion de plusieurs champs photovoltaïques qui diffèrent par leurs contraintes de fonctionnement

- orientations différentes
- inclinaisons différentes
- etc...

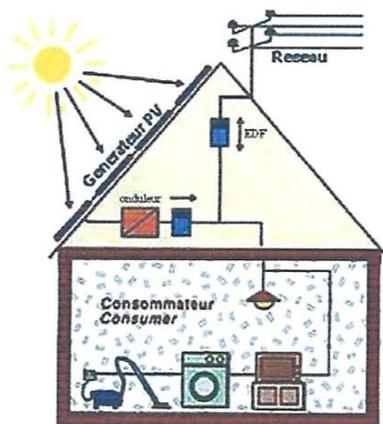
### c. Onduleur central :

Unité de régulation : complexe !

Il gère à lui seul tous les champs d'une grosse installation. Non utilisé dans le domaine domestique.

## II.14.Partie d'utilisation de l'énergie produite :

### Minis centraux photovoltaïques :



Plusieurs mini centrales PV connectée au réseau sont installée à travers le monde .en 1990 l'Allemagne a lancé un programme appelée "1000 Roof tops Program" pour l'installation des mini centrales PV de 1- 4 kW au profit de 2250 habitations. On 1997, le Japon a installé des mini centrales PV de 3 kW au profit de 9 400 habitations, le USA à lancé un programme ambitieux pour l'installation d'un million 1 000 000 des mini

centrales PV [10].

Quant à l'Algérie l'installation de ce type de systèmes est en ces premiers pas.

### **II.15.Conclusion :**

On a vu dans ce chapitre les caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque et les critères qui influent sur les composantes d'un système PV, et que chaque composante est une complémenté de l'autre composante. Dans ce cas le système fournie une puissance maximale. Cette puissance est très importante pour les utilisateurs (pompage, éclairage...). Dans le chapitre suivant, on abordera la modélisation d'un système photovoltaïque.

# CHAPITRE III

## MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PV ET RACCORDEMENT AU RÉSEAU

### III.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un système PV pour obtenir le meilleur modèle « optimal » qui produit la puissance maximale et puis on va voir les systèmes raccordés directement au réseau et enfin on va présenter les nouvelles technologies photovoltaïques.

### III.2. Modélisation d'un système PV :

#### III.2.1. Modèle d'une cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme le montre la figure (III.1).

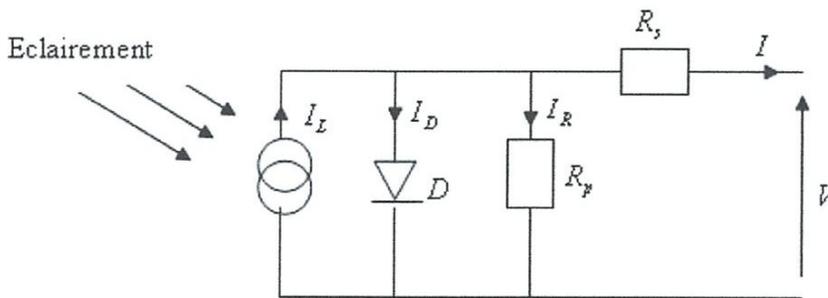


Figure III.1 Circuit équivalent de la cellule solaire.

La cellule comporte une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance en dérivation ou shunt ( $R_p$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;

- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée [17].

#### III.2.2. Présentation du modèle mathématique :

A partir de la figure (III.2) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (\text{III.1}).$$

Le courant de jonction  $I_D$  est donné par :

$$I_D = I_0 \left( e^{q \left( \frac{V+R_S I}{nKT} \right)} \right) \quad (\text{III.2}).$$

Le courant dans la résistance  $P R$  est donné par :

$$I_R = \frac{V+IR_S}{R_F} \quad (\text{III.3}).$$

A partir de l'équation (III.1), on obtient l'expression de courant  $I$  :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad (\text{III.4}).$$

Remplaçons dans (III.4) les équations (III.2) et (III.3) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V+R_S I}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_F} \quad (\text{III.5}).$$

Où :

$I$  : Le courant de cellule.

$V$  : La tension de cellule

$R$  : La résistance série de la cellule. [Ω]

$T$  : La température de la cellule [°K].

$q$  : La charge d'électron  $e = 1.6 * 10^{-19} C$ .

$I_0$  : Le courant de saturation [A]

$K$  : La constante de Boltzman ( $1.3854 * 10^{-23} JK^{-1}$ ).

$g V$  : La tension de seuil de diode ( $1.1n$  : Le facteur de qualité de diode.

$n$  : Le facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ( $= \infty p R$ ) l'équation (III.5) devienne:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V+R_S I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (\text{III.6}).$$

L'équation (3.6) en termes de  $I$  et  $V$  n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton-Raphson) doit être appliquée [16].

### III.3. Modélisation du générateur PV :

Nous allons s'intéresser dans cette partie à la modélisation de la source photovoltaïque. Cette modélisation nous permet de déterminer les caractéristiques tension/courant du GPV à partir des quelles nous pouvons déterminer la puissance maximale que peut fournir le GPV pour des conditions météo données.

La composante de base de cette source d'énergie solaire est la cellule solaire. Plusieurs cellules sont branchées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque, plusieurs modules branchés en série et en parallèles constituent un champ ou système photovoltaïque. Le modèle mathématique du système PV est la résultante d'une modélisation physique de la composante élémentaire la cellule photovoltaïque. Le modèle doit prédire la variation de la tension de sortie et le courant délivré par le module PV en fonction de la température et l'éclairement. Dans la littérature plusieurs modèles ont été développés, nous citons entre autres, le modèle de facteur de rendement, modèle de 05 paramètres, et le modèle de 4 paramètres. D'autres ouvrages utilisent des modèles appelés modèle une diode, modèle deux diodes, et le modèle polynomial [8]. Certains présentent les systèmes PV en deux autres modèles basés sur la nature de l'équation mathématique qui en résulte de la modélisation ; modèle un exponentiel, modèle deux exponentiels [9].

D'autres recherches ont été développées a fin de contribuée à l'amélioration des performances des modèles mathématiques des GPV (Luft et al. 1967) Dans leur travail effectué en (1967), ont proposé une équation pour prédire le courant produit par le GPV. L'équation permet de calculer l'ensemble des points de la courbe I-V. (King, 1998, 2000, 2003) a mis au point un modèle pour le calcul du courant produit par le GPV à partir de cinq points stratégiquement situés à sur la courbe I-V

Nous nous limitons ici a exposé les modèles les plus répandus et utilisées dans ce domaine à savoir : le modèle de facteur de rendement, modèle de 05 paramètres, et le modèle de 4 paramètres [16].

### III.3.1. Modèle de facteur de rendement :

Le premier modèle, détermine la puissance maximale du GPV sans le calcul des coefficients courant-tension.

Ce modèle suppose que le rendement de la conversion du PV est linéaire avec la température de fonctionnement et indépendante de l'ensoleillement.

L'efficacité est définie comme le ratio de la puissance de sortie sur la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{G.A} \quad (\text{III.7}).$$

G représente l'éclairement en W/m<sup>2</sup> et A est la surface du module en m<sup>2</sup>.

La puissance maximale est le produit du courant et de tension au point de puissance maximum (PPM), le rendement de référence peut être exprimé comme :

$$\eta_{ref} = \left[ \frac{V_{ppm}.I_{ppm}}{G_{ref}.A} \right] T = t_{ref} \quad (\text{III.8}).$$

L'utilisation du modèle du facteur d'efficacité est limitée aux applications dans lesquelles seules les puissances de sortie maximale sont souhaitées. Ce modèle, ne peut pas être employé dans les systèmes connectés aux réseaux ou plusieurs autres paramètres sont calculer et contrôler tel que tension, la fréquence, le courant et non seulement la puissance du PV.

L'avantage de ce modèle réside dans sa simplicité [18].

### III.3.2 Modèle de quatre paramètres :

Le modèle de quatre paramètres, est le modèle le plus répandue, il est souvent sollicité dans les simulations. Ce modèle développé par Beckmann and Townsend (1989), présente le système PV comme un circuit composé d'une source de courant, une diode et une résistance.

Ce modèle traite un PV comme source de courant connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance et la charge, cette source de courant dépend du rayonnement solaire.

Démarrons du modèle mathématique de la cellule solaire, le modèle suppose qu'une cellule PV peut être modélisée comme source de courant en parallèle avec une diode.

La caractéristique d'une diode au silicium (jonction p-n) dans l'obscurité (sans illumination) est donnée par l'équation de Shockley, où le courant produit est appelé le courant d'obscurité  $I_D$  :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_c q}{n k T_{ck}}} - 1 \right) \quad (\text{III.9.})$$

$I_D$  = courant traversant la jonction.

$I_0$  = courant de saturation inverse.

$V$  = tension aux bornes de la jonction,

$q$  = charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{c}$ )

$T_{ck}$  = température de la jonction en °K

$K$  = constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{j/K}$ )

$n$  = coefficient d'idéalité de la diode, compris entre 1 et 5.

Sous illumination, on définit un autre courant appelé photo courant  $I_L$ , qui résulte de la radiation solaire. Ce courant varie de façon linéaire avec l'intensité du rayonnement solaire, il circule dans les sens opposés de  $I_D$ , il est représenté par une source de courant DC Figure (III.2) [16].

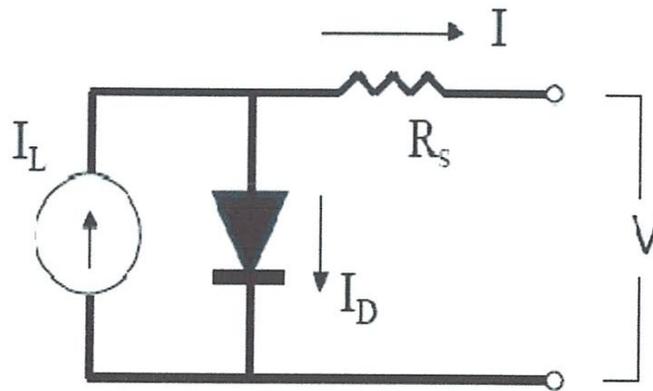


Figure III.2. : circuit équivalent d'une cellule solaire.

L'équation de la cellule sera de la forme suivante : A ce modèle une résistance est ajoutée pour tenir compte des pertes ohmiques dues à la circulation du courant, des pertes de métallisations et du contact métal/semi conducteur. Le circuit équivalent dans ce modèle est comme le montre la Figure III.3.

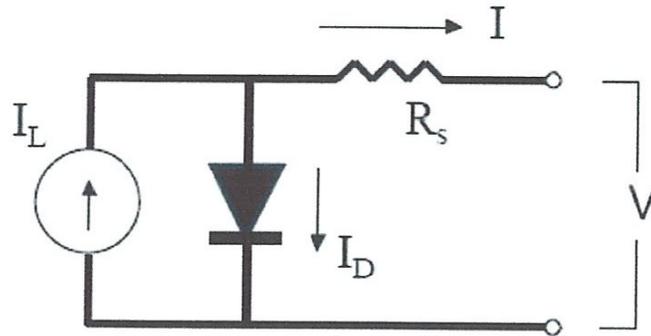


Figure III.3 : circuit équivalent du modèle du 4 paramètres

L'équation caractéristique  $I(V)$ , est la suivante :

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{(V_c + I_c R_s)_q}{nkT_{ck}}} - 1 \right) \quad (\text{III.10}).$$

Les quatre paramètres figurant dans cette équation  $I(V)$  sont le courant  $I_L$ , la résistance série  $R_s$ , et les deux paramètres de la diode  $I_0$  et  $n$ , d'où l'appellation modèle à 4 paramètres.

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont généralement pas inclus dans les données des fabricants. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes d'équations  $I(V)$  à différents points de fonctionnement, ces points sont tirés du catalogue de spécifications.

Les deux paramètres  $n$  et  $R_s$  du modèle sont supposés constants, contrairement, les deux autres paramètres varient en fonctions des conditions d'exploitation des PV.  $I_0$  varie avec la température et  $I_L$  est varié selon le rayonnement solaire incident.

Le modèle de quatre paramètres suppose que la pente de la courbe  $I(V)$  est horizontale au point du courant de court-circuit (valeur du courant lorsque la tension  $V=0$ ).

$$\left( \frac{dI}{dV} \right)_{v=0} = 0 \quad (\text{III.11}).$$

Les inconvénients de ce modèle consistent dans l'utilisation de silicium amorphe pour construire les modules PV qui provoquent une mauvaise précision des caractéristiques  $I(V)$ . Par Contre le modèle du facteur de rendement ne pose pas des hypothèses simplificatrices sur l'ensoleillement et la température car les caractéristiques  $I(V)$  sont non linéaires, dans ce cas le modèle dépende de ces paramètres [15].

### II.3.3 Modèle à cinq paramètres :

Le modèle à cinq paramètres est obtenu avec l'ajout d'une résistance shunt  $R_{sh}$  au modèle précédent à quatre paramètres décrit ci-dessus.

Cette résistance représente les fuites provenant de courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, par le bord en particulier et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés [énergie solaire photovoltaïque].

La deuxième résistance rend ce modèle applicable à la fois aux systèmes fabriqués en cristalline et en amorphe PVS.

Les cinq paramètres dont le modèle obtient son appellation sont  $I_L$ ,  $n$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ , et  $R_{sh}$ .

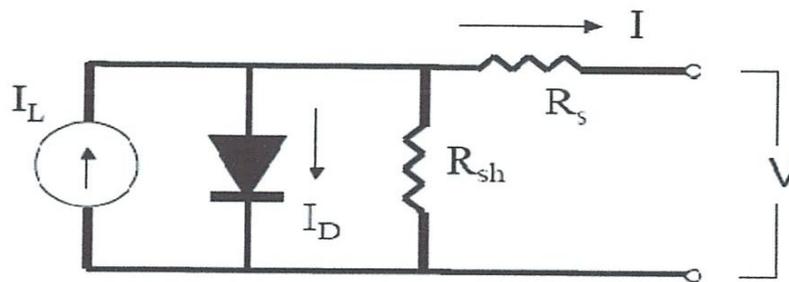


Figure III.4. : circuit équivalent du modèle du 5 paramètres.

En appliquant la loi de Kirchhoff :

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (\text{III.12}).$$

L'équation  $I(V)$  de ce modèle prend la forme suivante :

$$I_c = I_l - I_0 \left( e^{\frac{(V_c + I_c R_s)_q}{nkT_{ck}}} - 1 \right) - \frac{V_c + I_c R_s}{R_{sh}} \quad (\text{III.13}).$$

Le courant de court-circuit  $I_{CC}$  lorsque  $U=0$ , n'est plus constant, la pente de la courbe  $I(V)$  est négative et non nul.

$$\frac{dI}{dV_{v=0}} = - \frac{1}{R_{sh}} \quad (\text{III.14}).$$

Pour des valeurs grandes de  $R_{sh}$  ( $R_{sh}=\infty$ ) le modèle se réduira à un modèle de quatre paramètres [19].

### III.4. Les systèmes raccordés directement au réseau :

#### III.4.1. Structure à convertisseur unique :

C'est la plus simple configuration des systèmes connectés au réseau, comme présenté dans la figure (III.5), les panneaux solaire délivre une tension continue suffisamment grande, un onduleur assure la conversion de la tension continue en tension alternative souhaitée (220 V pour le réseau électrique BT), le transformateur assure l'isolation galvanique entre le systèmes photovoltaïques et le réseau électrique.

L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur .De plus le contrôle du point de maximum de puissance est approximatif car les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement [13].

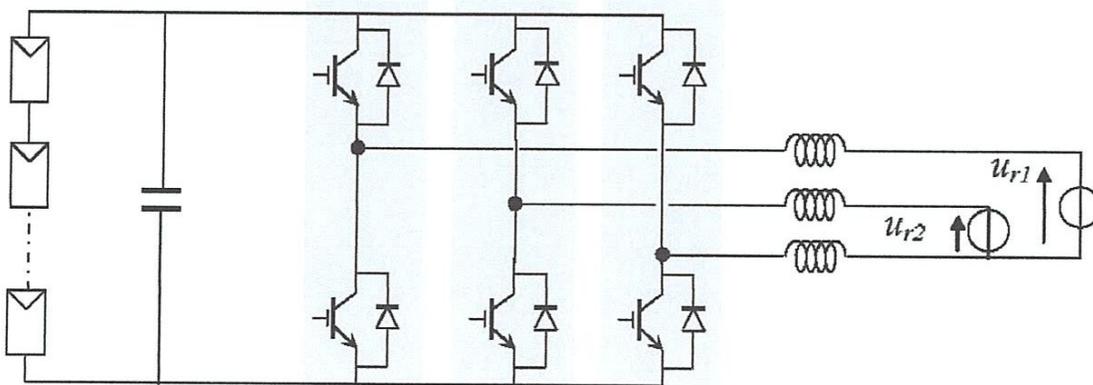


Figure III.5. : Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur.

### III.4.2. Structure a bus à basse tension alternative :

Dans le schéma ci-après, la tension alternative transformée par l'onduleur est une tension faible, pour pouvoir obtenir une tension utilisable (220 V), un bus alternatif véhicule cette tension vers un transformateur centrale qui l'élève au niveau désirée.

Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité du personnel. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joules [12], [13].

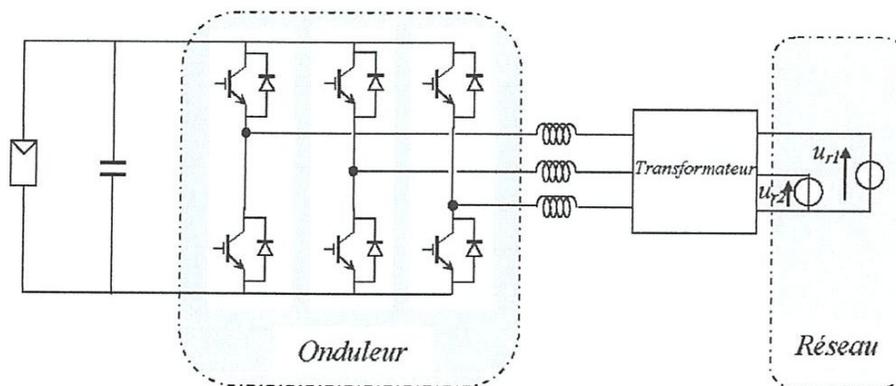


Figure III.6. : Bus à basse tension alternative.

### III.4.3. Système a bus continu intermédiaire :

Dans ce type de système, le générateur PV est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD), on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau électrique [19].

### III.4.4. Structure avec hacheur et onduleur :

La figure (III.7) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de 100V délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On

adjoit un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdal, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie "production " et la partie "utilisation». L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir Un système autonome .Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible [13].

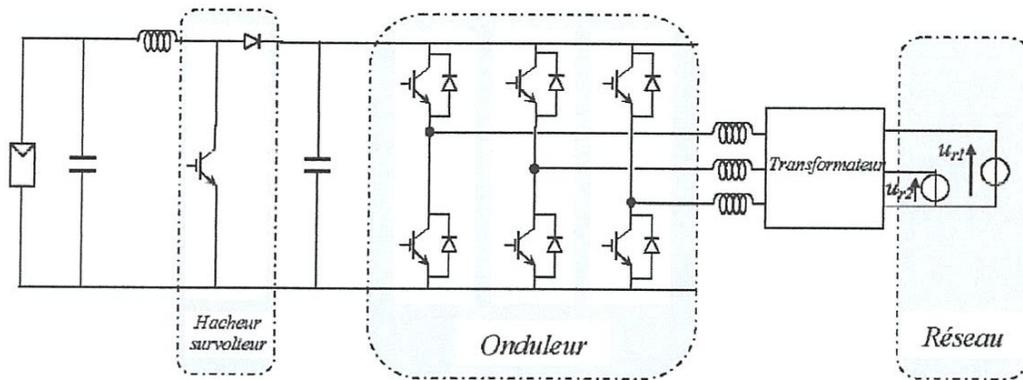


Figure III.7. Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé.

### III.5. Avantages des centrales PV :

- Réduction des pertes joules dans les lignes électriques.
- amélioration de la qualité de service pendant les heures de pointe (stabilisation de la tension).
- amélioration de la continuité de service pendant les heures de pointe (éviter les coupures par la surcharge).

Sur le plan économique, l'impact des systèmes PV sur les investissements dans le réseau électrique se résume comme suit :

- La réduction des coûts excessifs de la production, réalisation et installation (microcentrales et central diesel, réseau électrique), coût et problème de l'acheminement du combustible, coût de maintenance.
- défère et réduire les investissements de renforcement du réseau électrique
- Éviter et minimiser le besoin d'ajout des nouvelles capacités de production.
- Réduction des impacts environnementaux.

En outre, la contribution à la préservation d'un environnement non pollué, les systèmes PV éliminent le danger des champs électromagnétique qui découle des lignes électriques [20].



Figure. III.8. Vue de la centrale solaire photovoltaïque de Brandis (Allemagne) ( $P_c = 40$  MW).

### III.6. Modélisation des systèmes PV raccordées au réseau électriques :

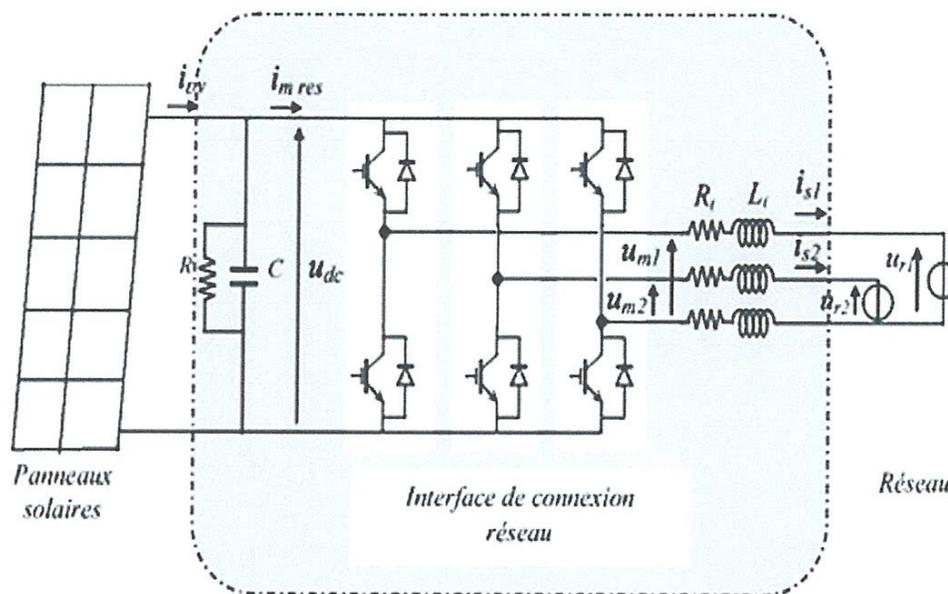
#### III.6.1. L'architecture du système photovoltaïque raccordé au réseau BT :

La modélisation des systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux électriques est fonction de la topologie et la structure du système à adopter.

Pour notre cas nous allons choisir la structure la plus basique et la plus simple celle de la connections direct au réseau électrique.

Le schéma général de raccordement d'un générateur PV au réseau est donné ci-dessous .la structure Comme présenté au chapitre précédent est composée de :

- des panneaux solaires.
- la connexion au réseau.
- le réseau.



Le panneau solaire délivre une tension continue suffisamment grande aux bornes d'un bus continu

(Condensateur et résistance de décharge). La tension de fonctionnement du générateur doit être la plus élevée possible afin de minimiser les pertes dans les convertisseurs.

Un onduleur assure la conversion de la tension continue en tension alternative souhaitée (220 V pour le réseau électrique BT). dans le cas d'une puissance importante du générateur PV un transformateur peut être intégrée pour assurer l'isolation galvanique entre les systèmes photovoltaïques et le réseau électrique.

Il est impératif d'avoir la tension adéquate au niveau du bus continu pour permettre le fonctionnement de l'onduleur.

La puissance produite par le GPV est ajusté par un régulateur MPPT (maximum power point trackers) permettant d'optimiser la production solaire en temps réel en fonction de l'ensoleillement.

Notre travail durant ce projet consiste donc à présenter les modèles mathématiques du système PV raccordé au réseau [20].

### III.7. Nouvelles technologies photovoltaïques :

#### III.7.1 Génération de cellule photovoltaïque :

Une première génération utilisait – et continue à utiliser - des plaquettes de silicium cristallin issues des technologies développées pour la microélectronique.

Le rendement théorique est de 27 %, celui en laboratoire est de 25 % et celui obtenu en production industrielle est de 15 % environ. La Fig. 4 montre le rendement énergétique d'une cellule PV en silicium cristallin tandis que la Fig. 5 représente les rendements de différents types de cellules PV en silicium. Cette technologie est mature et peu de progrès sont à en attendre, excepté la réduction du coût par la diminution de l'épaisseur des plaquettes et le développement de structures « tandem » associant Silicium cristallin (Sic) et silicium amorphe (Sia). Cette dernière technologie permet en effet d'augmenter la part des photons du spectre solaire transformée en courant électrique (Sic et Sia absorbent « utilement » dans deux parties différentes du spectre solaire). La Fig 6 montre le principe d'une cellule tandem. Actuellement 90 % des cellules PV sont en silicium. Il est à noter que le silicium ne supporte que de faibles concentrations du rayonnement.

Une deuxième génération fait appel à la technologie des films minces, ce qui réduit fortement le coût en matière première. La plupart des matériaux utilisés sont des semi-conducteurs non organiques, mais des semi-conducteurs organiques et des matériaux dopés en colorants absorbant à différentes longueurs d'onde, beaucoup moins coûteux, sont également étudiés et développés en tant que matériaux PV. La fig. 7 montre la structure d'une cellule type en couches minces de silicium amorphe [14]. Cependant le rendement est actuellement limité à 10 % pour les semi-conducteurs non organiques tels le tellure de cadmium (CdTe), le sélénure de cuivre et d'indium (CIS) et le disélénure de cuivre d'indium et gallium (CISG). Le rendement est de 5 % pour les semi-conducteurs organiques dont la durée de vie est limitée actuellement à 5 ans. Des progrès en termes de rendement et de durée de vie sont attendus pour cette technologie,

Enfin, une troisième génération est actuellement développée associant des cellules multi-jonction, absorbant utilement la plus grande partie du spectre solaire à des systèmes de concentration de la lumière pouvant atteindre 500 soleils (augmentation d'un facteur 500 de la densité de rayonnement solaire arrivant sur la surface de la cellule). L'empilement de matériaux PV absorbant utilement le rayonnement solaire à différentes longueurs d'onde permet d'accroître fortement le rendement global. La concentration permet de réduire la surface de matériau utilisée et d'augmenter le rendement pour ce type de matériau. La Fig. 8 montre le principe de ce type de cellule PV.

Ces cellules sont composées, en général, de germanium, d'arséniure de gallium et d'indium, dont la matière première est coûteuse (10 fois celui du silicium cristallin) mais le

rendement beaucoup plus élevé. La Fig. 9 montre les spectres d'absorption des différents matériaux utilisés dans une cellule tri-jonction tandis que la fig. 10 présente les rendements obtenus. Cette technologie fait appel au micro et aux nanotechnologies. La Fig. 11 montre la structure d'une cellule tri-jonction type en matériaux III-V ayant obtenu le record de rendement en laboratoire (40,8 %) à une concentration de 326 soleils [21].

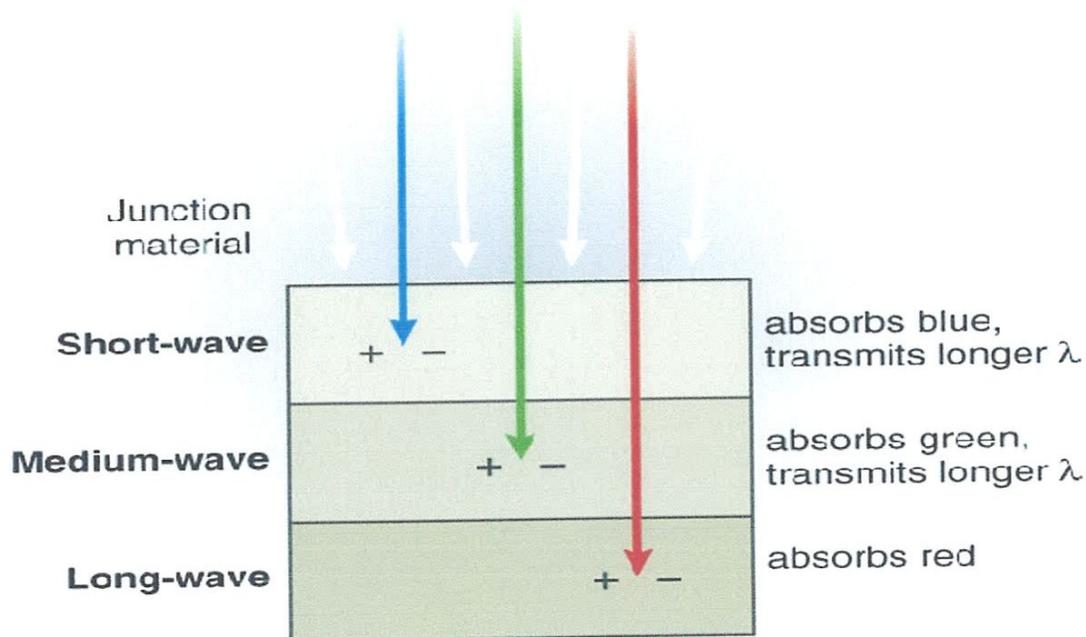


Fig. III.9. Principe d'une cellule photovoltaïque à 3 jonctions empilées.

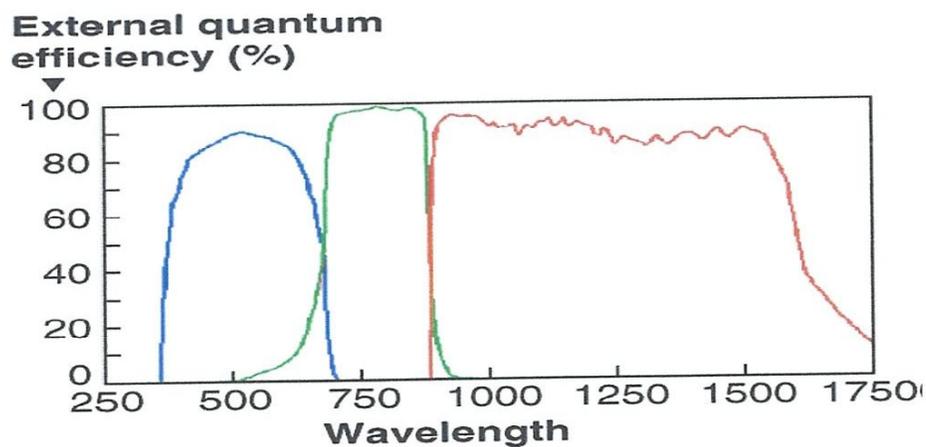
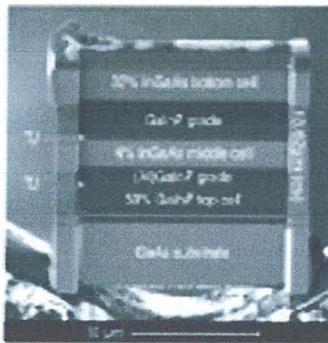


Fig. III.10. Spectre d'absorption d'une cellule photovoltaïque tri-jonction.

| Layer efficiencies in six-junction solar cell |                      |
|---|----------------------|
| Bandgap                                       | Ideal efficiency (%) |
| High 2.4 eV                                   | 13.3                 |
| GaInP 1.84 eV                                 | 14.3                 |
| GaAs 1.43 eV                                  | 11.7                 |
| Si 1.12 eV                                    | 7.8                  |
| Low 0.95 eV                                   | 3.7                  |
| Lower 0.70 eV                                 | 2.9                  |
| <b>Total</b>                                  | <b>53.5</b>          |

Designed for overall 50% efficiency at 20-fold solar concentration, including losses in the collection optics.

Figure III.11. Rendement théorique d'une cellule solaire à six jonctions.



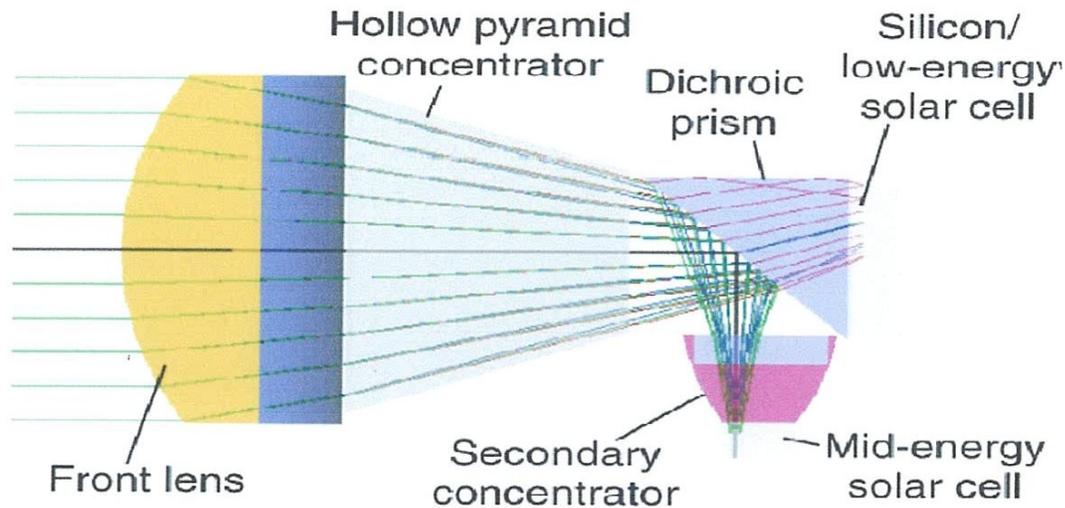
Structure d'une cellule tri-jonctions en matériaux III-V type ayant obtenu le record de rendement (40, 8 %) à une concentration de 326 soleils

Source: NREL (USA)

Figure III.12. Structure d'une cellule tri-jonction en matériaux III-V.

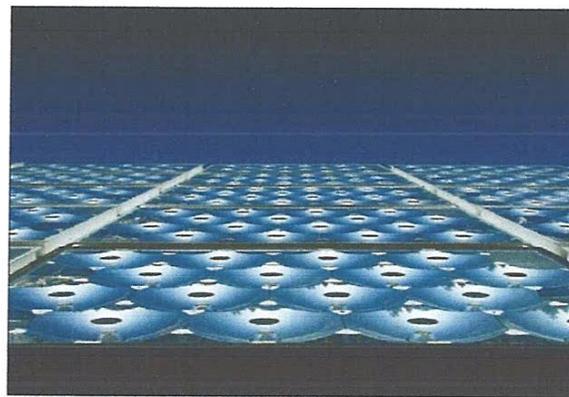
Les systèmes tri-jonction à concentration, par l'augmentation du rendement, permettent donc de réduire fortement l'emprise au sol par watt produit. Le rendement de ces structures atteint actuellement la valeur record de 42 % en laboratoire et 28 % sur des prototypes industriels, soit 75% de plus que les cellules en silicium [12]. Ces systèmes comprennent des optiques complexes comme le montre la Fig. 12. Ils nécessitent aussi de suivre le soleil dans sa course pour que le soleil soit toujours focalisé sur la surface utile réduite de la cellule. Cela est obtenu grâce à l'utilisation d'héliostats programmables (trackers). Il est également nécessaire d'éliminer la chaleur produite par la partie du rayonnement solaire absorbé non transformée en électricité. Le coût total de ces systèmes est actuellement important mais

devrait rapidement baisser par suite des progrès technologiques et du facteur d'échelle de la production industrielle. Ces systèmes sont essentiellement destinés aux grandes installations PV et aux ensoleillements élevés ( $>1800$  kWh/m<sup>2</sup> /année) car ils utilisent le seul rayonnement solaire direct, ils nécessitent des héliostats complexes et, leur modularité est réduite comparée aux panneaux solaires sans concentration [21].

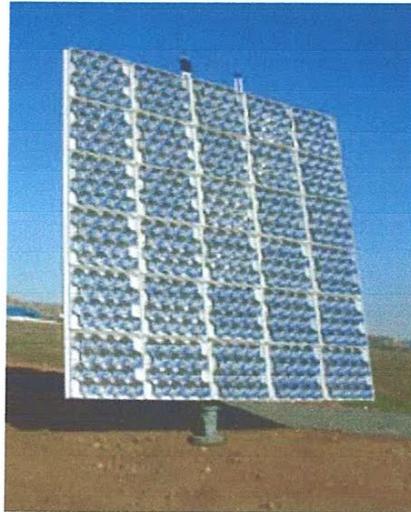


**Figure III.13.** Cellule photovoltaïque tri-jonction à séparation de bandes et concentration.

Sur un plan général et quel que soit la nature du matériau, l'utilisation d'héliostats orientables programmables (trackers) permet de maximiser le rayonnement solaire récolté par la cellule. La fig. 13 représente un prototype de panneau solaire tri-jonctions à concentration tandis que la fig. 14 montre un élément de ce type de panneau solaire.



**Figure III.14.** Prototype de panneau solaire Tri-jonctions à concentration.



**Figure III.15.** Eléments de panneau solaire tri-jonctions à concentration.

### **III.8.Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté les différentes structures de centrale de production photovoltaïque ce qui permet de situer leurs domaines d'application en fonction du cahier de charge. En outre, de par la modélisation du système PV on a pu analyser le fonctionnement de chaque élément, et de faciliter l'étude de l'influence du générateur PV sur le réseau électrique, tout en optimisant le fonctionnement du GPV. À la fin de ce chapitre on a rappelé brièvement les futures générations de cellules photovoltaïques qui procurent un bon rendement au générateur PV comparativement aux générations antécédentes.

# CONCLUSION GENERALE

Ce présent mémoire a trait à l'étude des caractéristiques des systèmes photovoltaïques ainsi que la modélisation d'un générateur photovoltaïque. L'idée de base est d'analyser son fonctionnement et de dégager un modèle mathématique, afin de faire évoluer sa propre installation PV en liaison avec son application.

Dans ce contexte, dans le premier chapitre nous avons décrit les principes généraux de la conversion photovoltaïque et les critères qui influent sur les performances des générateurs photovoltaïques, ainsi que les principes de fonctionnement de La cellule photovoltaïque et les différents types de systèmes photovoltaïques en suite on a présenté l'évaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.

Dans le deuxième chapitre on a vu les caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque et les critères qui influent sur les composantes d'un système PV, et que chaque composante est une complément de l'autre composante. Dans ce cas le système fournie une puissance maximale. Cette puissance est très importante pour les utilisateurs (pompage, éclairage...).

En fin, dans le troisième chapitre on a présenté la modélisation du système PV qui nous a permis d'analyser le fonctionnement de chaque élément, et de faciliter l'étude de l'influence du générateur PV sur le réseau électrique, tout en optimisant le fonctionnement du GPV. À la fin de ce chapitre on a rappelé brièvement les futures générations de cellules photovoltaïques qui procurent un bon rendement au générateur PV comparativement aux générations antécédentes.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine
- [2] *PETIBON Stéphane*  
(*Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour Les applications photovoltaïques*)
- [3] Burr-Brown, «Analog-to-Digital Converter Grounding Practices Affect System Performance », sbaa052, Application Bulletin, 02 Oct 2000.
- [4] Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.
- [5] M. Belhadj, 'Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque. Mémoire de magistère', Université de Béchar - 2008.
- [6] M. Oukachmih, P. Destruel, I. Seguy, G. Ablart, P. Jolinat, S. Archambeau, M. Mabilia, S. Fouet, H. Bock ; « New organic discotic materials for photovoltaic conversion », Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 85, Issue 4, 1 February 2005, Pages 535-543,
- [7] Kippelen,B.; « Organic Photovoltaics », Lasers and Electro-Optics, 2007. CLEO 2007. Conferenceon6-11May2007Page(s):1-2DigitalObject Identifier 10.1109/CLEO.2007.4453168
- [8] Puigdollers, J.; Voz, C.; Sporer, C.; Laukhina, E.; Martin, I.; Orpella, A.; Vetter, M.; Rovira, C.; Alcubilla, R.; « Organic photovoltaic solar cells based on MEH-PPV / PCBM blend », Electron Devices, 2005 Spanish Conference on 2-4 Feb. 2005 Page(s):279 - 281 Digital Object Identifier 10.1109/SCED.2005.1504379
- [9] Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006, Réalisation de Technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile.
- [10] L. Achoui, S.Hamidi « développement d'un système photovoltaïque onduleur-MAS, application au pompage photovoltaïque » PFE.ENP. juin 2004.

[11] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger ».2006

[12]: D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003

[13]: Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004

[14]: Z.Bachi, S.Elfordil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », université de Blida

[16] Carlin, John; Fred Mayes, ET Louise Guey-Lee, «Renewable Data Overview», Renewable Energy Annual 1996. Energy Information Administration: April 1997.

<http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/renewable.energy.annual/chap01.html>

[17] Eckstein, Jurgen Helmut, «Detailed Modeling of Photovoltaic Components», M. S. Thesis Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison: 1990.

[18] Widaly De Soto,« Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance», M. S. Thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison: 2004.

[19] W.Xiao G. Dunford A. Capel,« A Novel Modeling Method for Photovoltaic Cells»,35<sup>th</sup> 35 th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany. 2004

[20] K. Emery, et. Al ., «Temperature Dependence of Photovoltaic Cells, Modules, and Systems», 25<sup>th</sup> PVSC, 1996, pp.1275-1280.

[21] C.M. Whitaker, et. al.,«Effect of Irradiance and other Factors on PV Temperature Coefficients», 22<sup>nd</sup> IEEE PVSC, 1991,pp. 608-613.