

## I.1-Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise pour cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie. L'utilisation des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur l'énergie solaire et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire) et par la suite le module photovoltaïque.

## I.2-Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5  $\mu\text{m}$  pour une puissance d'environ 60  $\text{MW}/\text{m}^2$ , soit un total de  $9,5 \cdot 10^{25} \text{W}$ . En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36  $\text{kW}/\text{m}^2$  hors atmosphère.

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith [1]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{I-1})$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation,  $\theta = 0^\circ$ ,  $AM=1$  : la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiante hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiante de 970  $\text{W}/\text{m}^2$ , mais a été arrondi à 1  $\text{kW}/\text{m}^2$ .

L'intensité  $I_d$  reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante [2]:

$$I_d = 1,353 \cdot (0.7^{AM})^{0.678} \quad (\text{I-2})$$

Avec  $I_d$  en  $\text{kW}/\text{m}^2$ , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure(I.1) :

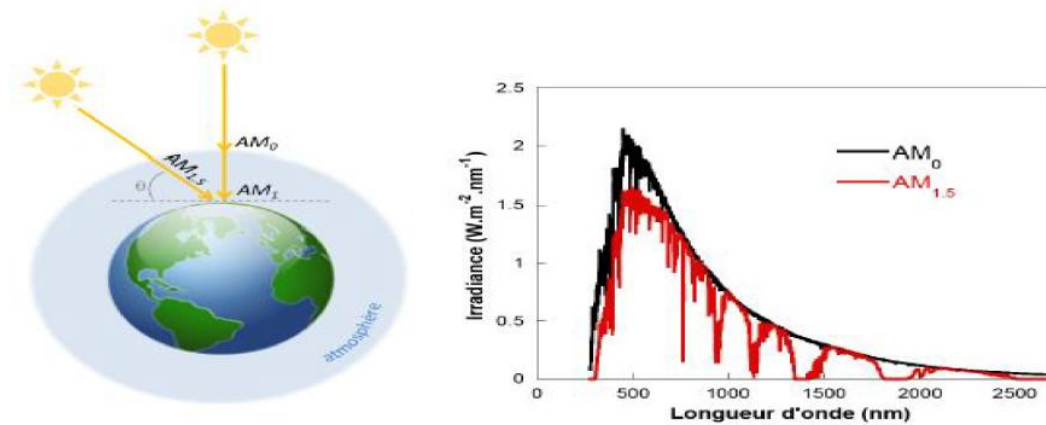


Figure (I- 1) : Définition du nombre d'air masse (AM) et spectre d'émission du rayonnement solaire homologué par la société américaine de tests et matériaux [3]

### I.3-L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet la génération d'électricité à partir de la lumière, il a été découvert par Edmond Becquerel en 1839 et décrit par Heinrich Hertz en 1887 [Hertz, 1887]. L'effet photovoltaïque est la création d'un courant ou d'une tension par un matériau soumis à un rayonnement électromagnétique. Pour que cet effet ait lieu il faut que l'énergie fournie par le rayonnement électromagnétique soit supérieure ou égale à la largeur de bande interdite:[3].

$$E\lambda = h\nu \geq E_{\text{gap}} \quad (\text{I-3})$$

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

\*« Phots », qui signifient lumière.

\*« Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

Appelé aussi « module photovoltaïque » ou PV, c'est un panneau solaire qui est destiné récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC).

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire. L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (kWc) [4].

## I.4-Conversion photovoltaïque

### I.4.1-Principe de 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 [5].

Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique.

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque.

Le fait d'avoir associé deux types de dopage pour créer une jonction permettant de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650-670nm[6].

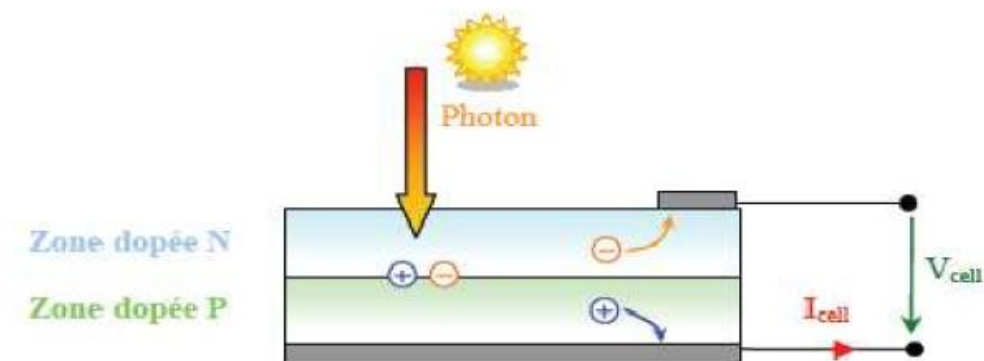


Figure (I- 2) : Schéma de principe de la conversion photoélectrique [6].

### **I.4.2-Matériaux photovoltaïques**

L'intérêt de l'utilisation de semi conducteurs pour la réalisation des cellules photovoltaïques tient à la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser, que par la direction que peut prendre ce courant, la possibilité de moduler dans le temps et dans l'espace la concentration interne des porteurs de charges. Cette faculté est elle-même dépendante de la structure électronique fondamentale des semi-conducteurs qui les différencie nettement des métaux et dans une moindre mesure des isolants. En effet les semi conducteurs produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin. En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium mono ou multi cristallin. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène, le silicium ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la silice, purifié, mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique. Pourtant aujourd'hui le silicium cristallin est utilisé par 90% des panneaux produits dans le monde. Mais il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisées comme les couches minces ou en phase de recherche [7].

### **I.5-Rappel sur les propriétés des semi-conducteurs**

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant [8].

Dans un semi-conducteur, un courant électrique est favorisé par deux types de porteurs : les électrons et les trous.

\* La propagation par l'intermédiaire d'électrons est similaire à celle d'un conducteur classique: des atomes fortement ionisés passent leurs électrons en excès le long du conducteur d'un atome à un autre, depuis une zone ionisée négativement à une autre moins négativement ionisée.

\* La propagation par l'intermédiaire de trous est différente : ici, les charges électriques voyagent d'une zone ionisée positivement à une autre ionisée moins positivement par le mouvement d'un trou créé par l'absence d'un électron dans une structure électrique quasi pleine.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant avec des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P [9].

## I.6-Structure des bandes d'énergies

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. On distingue :

- ❖ Les électrons internes qui occupent les couches internes et qui sont très fortement liés au noyau.
- ❖ Les électrons périphériques (ou de valence) qui occupent la couche la plus externe et qui sont peu liés au noyau.

Les électrons de l'atome sont assujettis à occuper des niveaux discrets  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , qui définissent chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si on choisit comme origine des énergies ( $E=0$  eV,  $1\text{eV}=1,6 \times 10^{-19}$  joule) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs de  $E_n$  sont négatives. Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron [7].

Le cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalente.

Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparés par des bandes interdites. Comme dans le cas de l'atome, le nombre d'électrons susceptibles d'occuper une bande d'énergie est limité et les électrons du solide comblent en priorité les états d'énergie les plus faibles.

Un électron dont l'énergie est située dans une bande en dessous de la bande de valence est lié à un atome donné du solide. Dans la bande de valence, l'électron est commun à plusieurs atomes.

La bande située au-dessus de la bande interdite s'appelle la bande de conduction. L'électron dont l'énergie est comprise dans cette bande circule librement dans le solide. C'est un porteur de charge qui participe à l'écoulement du courant dans le solide lorsque ce dernier est sous différence de potentiel.

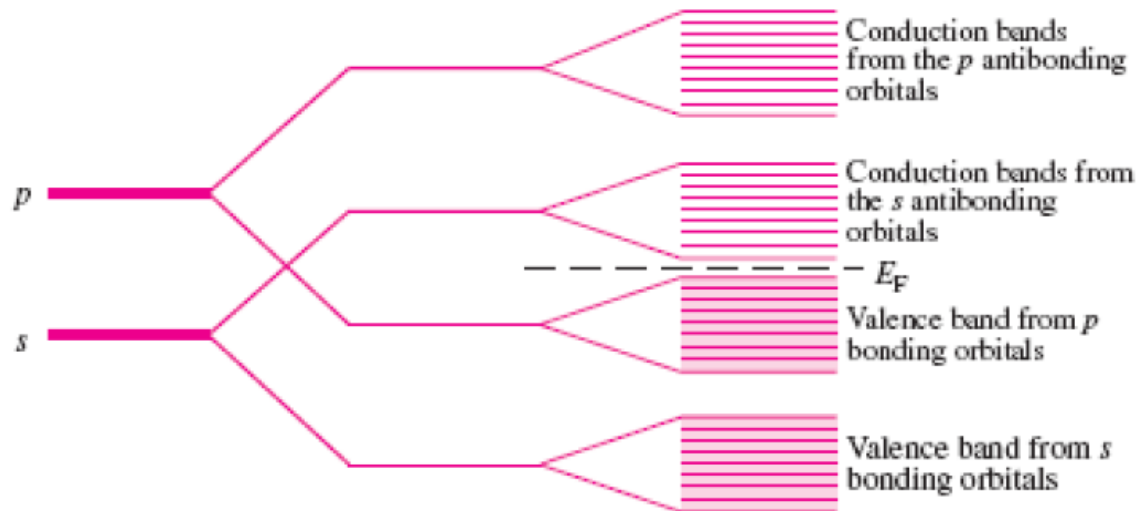


Figure (I- 3) : Évolution des orbitales atomiques de S et de P dans des bandes de valence et de conduction dans un semi-conducteur [10].

Chaque type de matériau présente une hauteur de bande interdite de lui propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs.

### I.7-La notion de gap

L'écart entre les bandes de valence et les bandes de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des matériaux.

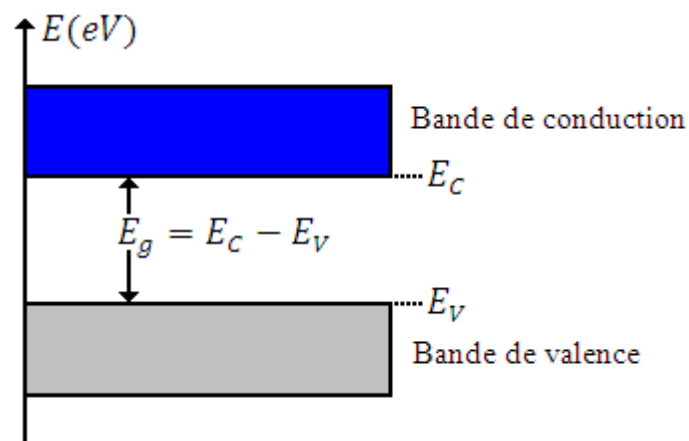


Figure (I- 4): Gap du matériau [2].

L'énergie de la bande interdite  $E_g$  est la différence entre le niveau énergétique le plus bas de la bande de conduction et le niveau le plus haut de la bande de valence. Chaque matériau possède un gap  $E_g$  fixe à une température donnée, et selon la nature du gap il y a deux types de semi-conducteur :

### I.7.1-Semi-conducteur à gap direct

Un semi-conducteur dit à gap direct, lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace K (correspondent à la même valeur d'impulsion). C'est le cas de GaAs.

### I.7.2-Semi-conducteur à gap indirect

Un semi-conducteur dit à gap indirect, lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence ne coïncident pas dans l'espace K (ne correspondent pas à la même valeur d'impulsion). C'est le cas de Si, Ge.

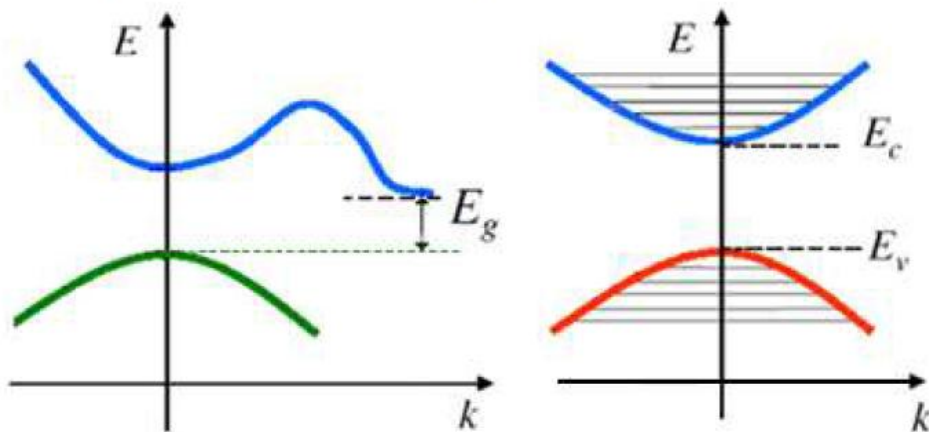


Figure (I- 5): Gap direct et indirect dans les semi-conducteurs [10].

## I.8-Types de matériaux

Suivant la valeur du gap ( $E_g$ ) le matériau peut être :

- ❖ Conducteur, dans ce matériau les liaisons chimiques n'utilisent pas tous les électrons de la couche périphérique. Ceux qui sont excédentaires sont alors libres de circuler et se déplacent naturellement dans la bande de conduction (même à 0 °K). Ceci traduit par un gap nul ou négatif, les bandes de conduction et de valence se chevauchent.
- ❖ Isolant, possède un gap élevé. Tous les électrons de la couche périphérique sont utilisés dans les liaisons chimiques covalentes. A la température de 0 °K, il n'y a pas d'électron dans la bande de conduction. Une élévation de température peut toutefois apporter l'énergie nécessaire au passage de certains électrons dans la bande de conduction, mais à température ambiante, cette probabilité est très faible, et le matériau reste isolant.
- ❖ Semi-conducteur, possède un faible gap. Il est parfaitement isolant à 0 °K, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous forme quelconque (lumière ou chauffage). Il reste proche de l'isolant à température ambiante ; on parle alors de semi-conducteur intrinsèque [4].

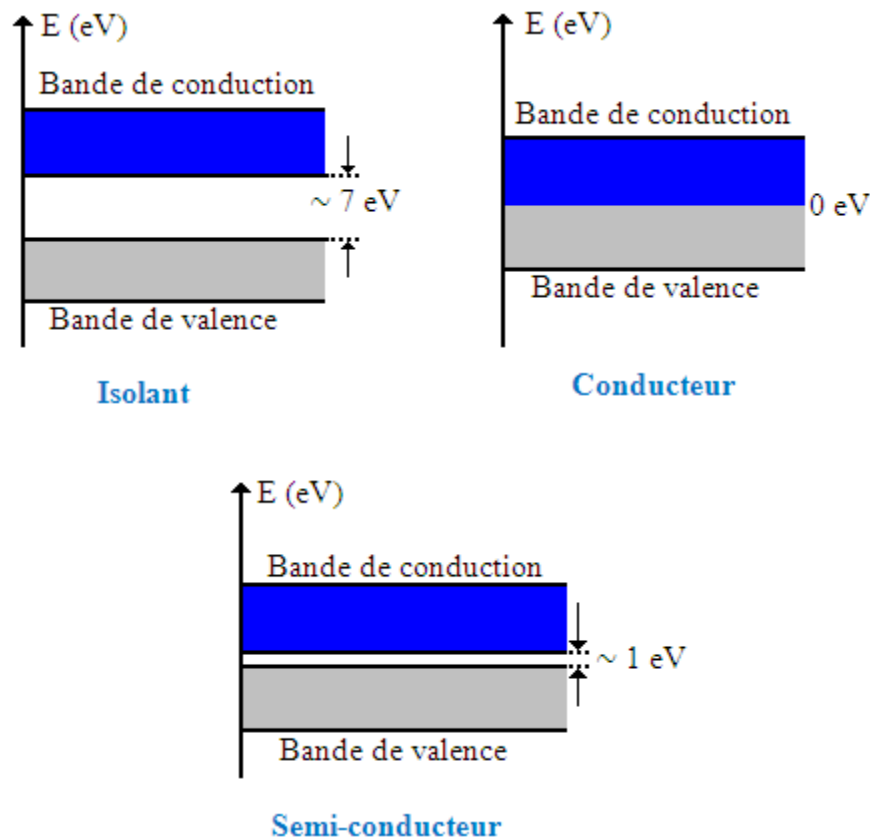


Figure (I- 6): Bandes d'énergie pour les différents types de matériaux [10].

## I.9-Types de semi-conducteurs

Du point de vue chimique, on peut généralement distinguer deux grandes catégories de matériaux semi-conducteurs :

### I.9.1-Les semi-conducteurs élémentaires

Sont les cristaux constitués d'un seul élément chimique. Les deux éléments les plus importants pour l'électronique sont le silicium (Si) et le germanium (Ge).

### I.9.2-Les semi-conducteurs composés

Sont constitués de plusieurs éléments par exemple :

Les composés binaires sont constitués de deux éléments distincts de la colonne IV (SiC, SiGe) d'éléments des colonnes III et V (composés III-V tels que le GaAs et le GaN) ou encore des éléments des colonnes II et VI (composés II-VI tels que le ZnS et le CdS ).

Enfin, on peut également trouver des alliages de types ternaires (AlGaAs et quaternaire GaInAsP)



### I.9.3-Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique.

Dans un cristal de silicium intrinsèque, les atomes constitutifs ont quatre électrons périphériques. La couche de valence peut contenir huit électrons, elle n'est donc pas saturée. Dans le cristal, un atome donné met ses électrons en commun avec les quatre atomes voisins pour établir des liaisons covalentes. Une liaison résulte ainsi de la mise en commun de deux électrons issus de deux atomes voisins. Les électrons sont attirés par les deux noyaux et sont donc liés. On peut dire que dans le cristal, un atome donné est entouré de huit électrons liés, ce qui sature sa couche de valence. A une température proche du zéro absolu, les quatre électrons de valence des atomes participent aux liaisons covalentes. Aucun électron n'est disponible pour la conduction électrique. Le cristal est alors un isolant électrique.

### I.9.4-Ionisation thermique

Lorsque la température augmente, certaines liaisons se brisent et libèrent des électrons dans le cristal, les électrons libérés deviennent des porteurs de charge libres.

L'atome qui a perdu un électron devenu un ion positif et la liaison covalente non satisfaite est appelée trou. Les trous sont des porteurs de charge (positive) libres[10].

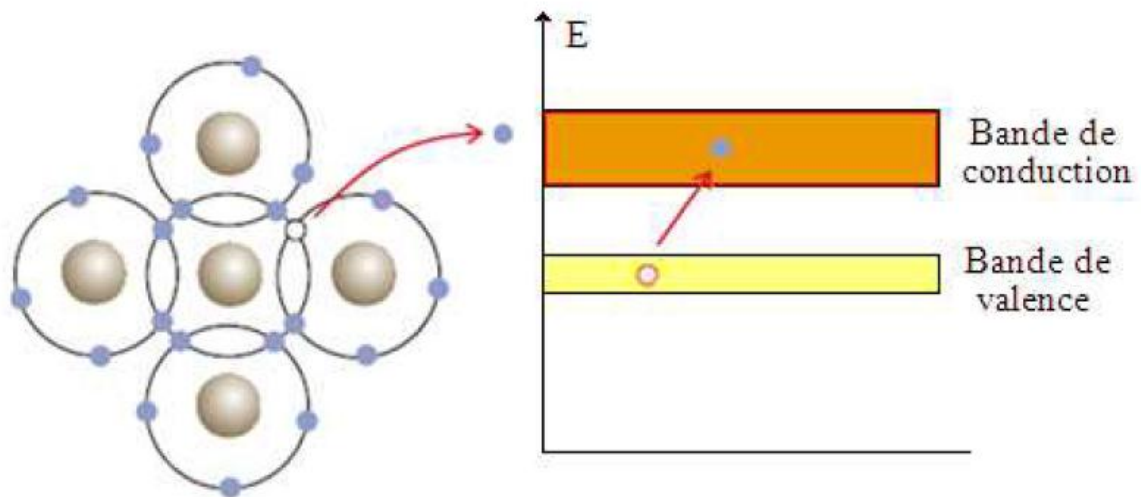


Figure (I- 7): La création d'une paire électron-trou dans un semi-conducteur [1].

Sous l'effet du champ électrique les électrons (charge négative) se déplacent dans le sens inverse du champ, les trous (charge positive) se déplacent dans le sens du champ. Autorisant la circulation d'un courant électrique.

La concentration intrinsèque en électrons libres  $n_i$  et en trous libres  $p_i$  par  $\text{cm}^{-3}$  à la température  $T$ , et varie de la façon suivante avec la température [2]:

$$n_i = p_i = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (\text{I-4})$$

Avec

A: constante propre au matériau. Pour le Silicium :  $A = 7.3 \times 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$

K : constante de Boltzmann :  $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$E_g$ : L'énergie du gap. Pour le Silicium :  $E_g = 1.12 \text{ eV}$  à  $T = 300\text{K}$

### I.10- Recombinaison

Dans un semi-conducteur à l'équilibre thermique, il se produit en permanence un processus de génération de paire électron-trou par agitation thermique. Cependant il existe aussi le processus inverse, un électron se recombine avec un trou, c'est la recombinaison. À l'équilibre thermique les deux processus s'équilibrent de façon à ce que la concentration en porteurs libres reste constante.

En effet, un électron libre, arrivant, lors de son déplacement dans le cristal, à proximité d'un ion positif peut être capturé par ce dernier afin de satisfaire sa liaison de covalence (trou libre). La liaison de covalence est alors rétablie.

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon). Le photon émis a une énergie  $E_{ph}$  égale à  $E_g$  selon [10]:

$$E_{ph} = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{I-5})$$

$$\lambda \cdot E_g = h \cdot c \quad (\text{I-6})$$

$$\lambda(\mu\text{m}) \cdot E_g(\text{eV}) = 1.24 \quad (\text{I-7})$$

Avec

$\lambda$  : longueur d'onde.

h : constante de Planck.

c : vitesse de la lumière.

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à  $E_g$  a la capacité de générer une paire électron-trou.

### I.11- Concentration des porteurs dans le semi-conducteur intrinsèque

A l'équilibre thermique la densité des porteurs libres ; d'électrons  $n$  dans la bande de conduction ( $n$  électrons.cm<sup>-3</sup>), et les trous  $p$  dans la bande de valence ( $p$  trous.cm<sup>-3</sup>), S'exprime selon la loi [10]:

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_C}{KT}\right) \quad (\text{I-8})$$

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{KT}\right) \quad (\text{I-9})$$

Où :

$N_c$  et  $N_v$  sont respectivement la densité effective d'état des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'état des trous dans la bande de valence .A température constante, la concentration en électrons libres  $n$  et en trous libres  $p$  sont égales à  $n_i$  la concentration intrinsèque ( $n = p = n_i$ ) donc on obtient l'expression suivante, pour la concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque [10]:

$$n_i = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (\text{I-10})$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_v + E_c) + \frac{3}{4}KT \log \frac{m_h}{m_e} \quad (\text{I-11})$$

D'après l'expression précédente, le niveau de Fermi intrinsèque  $E_F$  est toujours très proche du centre de la bande interdite.

### I.12- Interaction entre lumière - semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres 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 "band gap"  $E_g$ . Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera une partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Un photon absorbé par un semi-conducteur, permet la création d'une paire électron-trou [10].

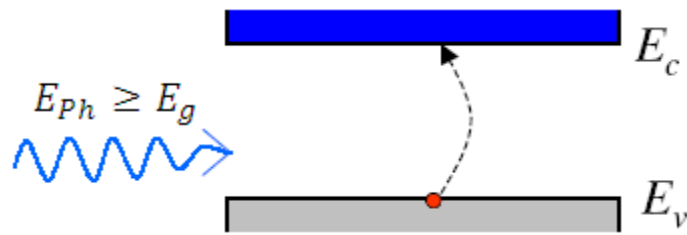


Figure (I- 8):La création d'une paire électron-trou par l'absorption d'un photon [10].

La création d'une paire électron-trou, ne peut avoir lieu que pour les photons ayant une énergie supérieure ou égale à l'énergie  $E_g$ . Il existe trois situations différentes, selon la différence d'énergie entre le photon et le gap du semi-conducteur [10] :

- ❖ Si  $E_{ph} < E_g$  : le photon a une énergie insuffisante. Il est soit, réfléchi ou absorbé ailleurs, dans un autre milieu. Dans ce cas, l'énergie du photon est perdue.
- ❖ Si  $E_{ph} = E_g$  : le photon est absorbé et il génère une paire électron-trou.
- ❖ Si  $E_{ph} > E_g$  : le photon est absorbé, une seule paire électron-trou est générée et l'excès d'énergie est transformé en chaleur (thermalisation),
- ❖ Si  $E_{ph} \gg E_g$  : le photon peut créer une paire électron-trou dont l'électron libéré possède une grande énergie cinétique  $E_c$ . Un tel électron pourrait encore, avant de thermaliser, entrer en collision avec un deuxième électron et générer ainsi une paire électron-trou,

L'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique.

Donc, l'interaction photon-semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie la conductivité du matériau.

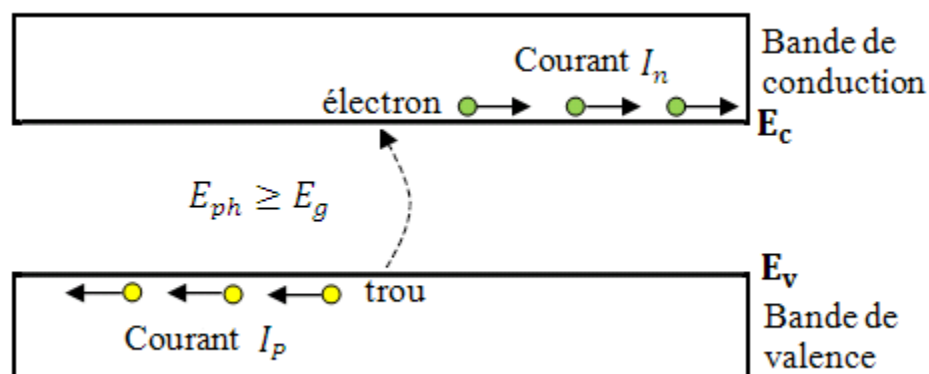


Figure (I- 9): Le courant dans un semi-conducteur [10].

### **I.13-Dopage du silicium :**

Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente.

**I.13.1-Dopage de type N:** Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb)) est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous.

**I.13.2-Dopage de type P:** Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons [9].

### **I.14-Jonction P-N :**

La jonction P-N est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est créée par la mise en contact d'un semi conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N (théoriquement). Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec les trous. De même, les trous des segments P pénètrent dans le segment N et se recombinent avec les électrons. Ce phénomène est appelé diffusion. Il en résulte, au niveau de la transition des segments, l'apparition d'une zone exempte de charges mobiles appelée Zone de transition (aussi nommée Zone de Charge d'Espace ou Zone d'épuisement), où seuls demeurent les atomes d'impuretés fixes (ions accepteurs dans le segment P, ions donneurs dans le segment N) et les atomes de semi-conducteur neutres. Les charges constituées par les ions fixes sont à l'origine d'un champ électrique  $E$  dans la zone de transition, et par la même d'une différence de potentiel  $V_0$  (appelée barrière de potentiel) aux bornes de cette zone. Cette zone possède une grande impédance. Le champ électrique  $E$  tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives et s'oppose ainsi à la cause qui lui donne naissance, ce qui conduit à un état d'équilibre[11].

### **I.15-Comportement de La jonction PN :**

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure (I-10). Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de

claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction [11].

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau  $E_g$ . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction.

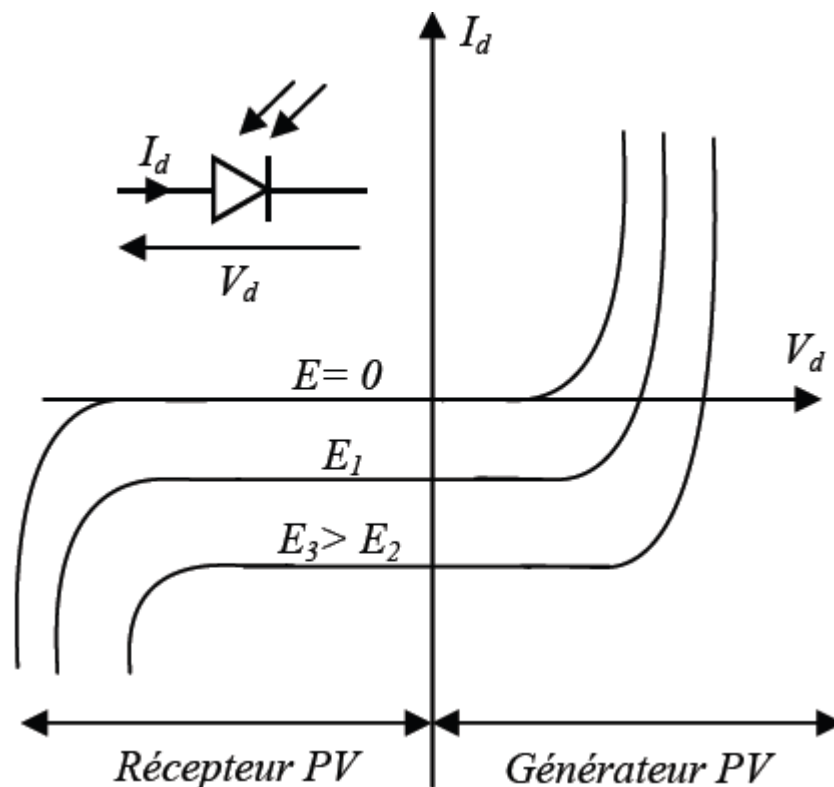


Figure (I- 10) : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairements ( $E$ ) [11].

## I.16-La Cellule Photovoltaïque

### I.16.1- structure des cellules photovoltaïques

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- \*d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- \*d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- \*d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- \*les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multi couches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [12].

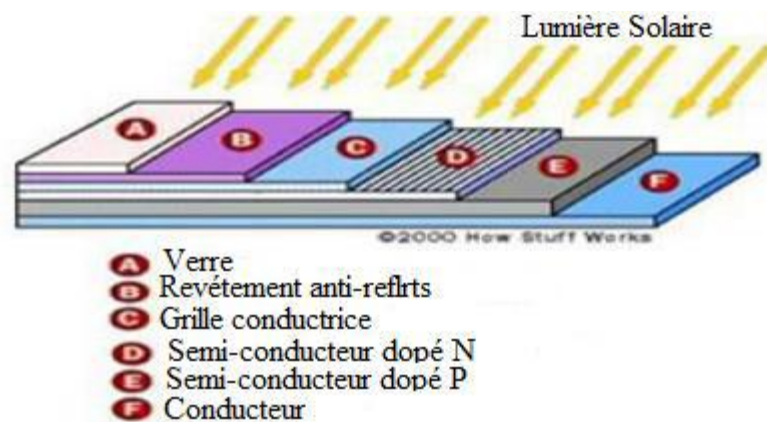


Figure (I- 11) : Structure basique d'une cellule solaire [4].

### I.16.2-Procédé de fabrication

Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support.

L'élaboration d'une cellule photovoltaïque à partir du sable ensuite de lingot nécessite un grand nombre d'étapes. Ces étapes permettent de faire évoluer la matière depuis son état normal et désordonné (le sable) vers une structure de grande complexité et la mieux ordonnée possible. Les principales étapes sont [7]:

- Purification du silicium,
- Tirage du lingot,
- Sciage du lingot,
- Traitement des plaquettes.

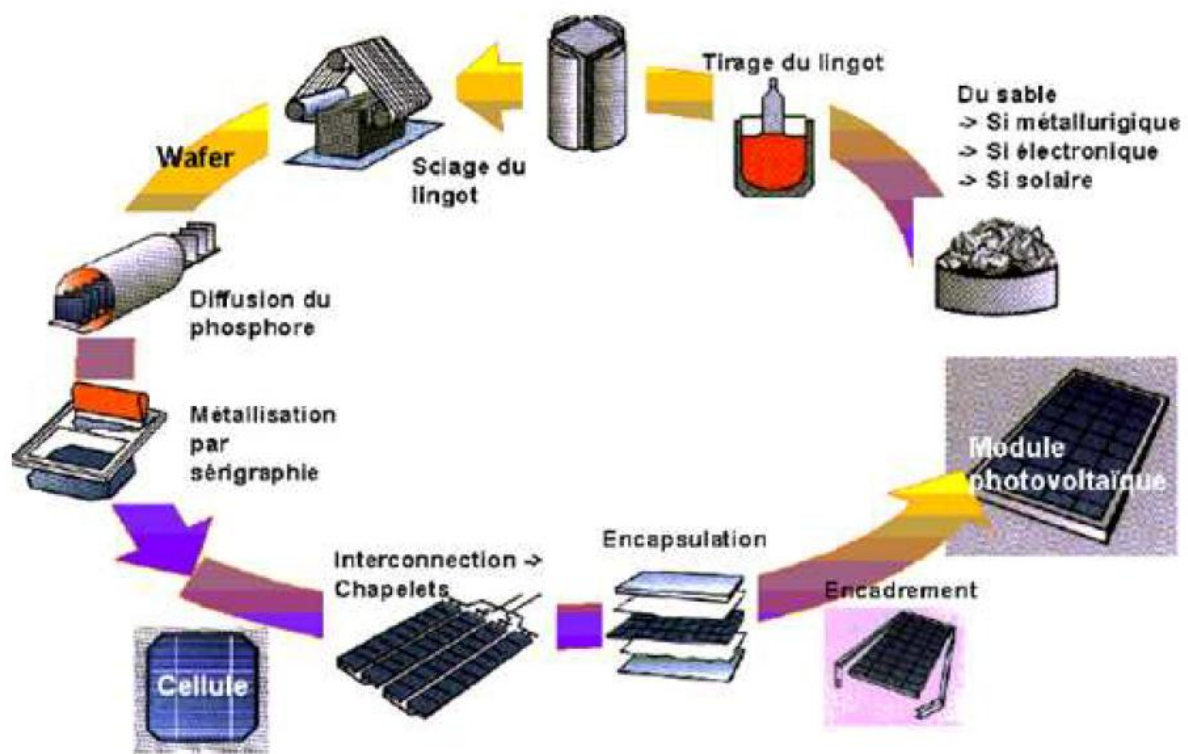


Figure (I- 12) : Différentes étapes de la production d'un module photovoltaïque [13].



### I.16.3-Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

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

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

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN [14].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure

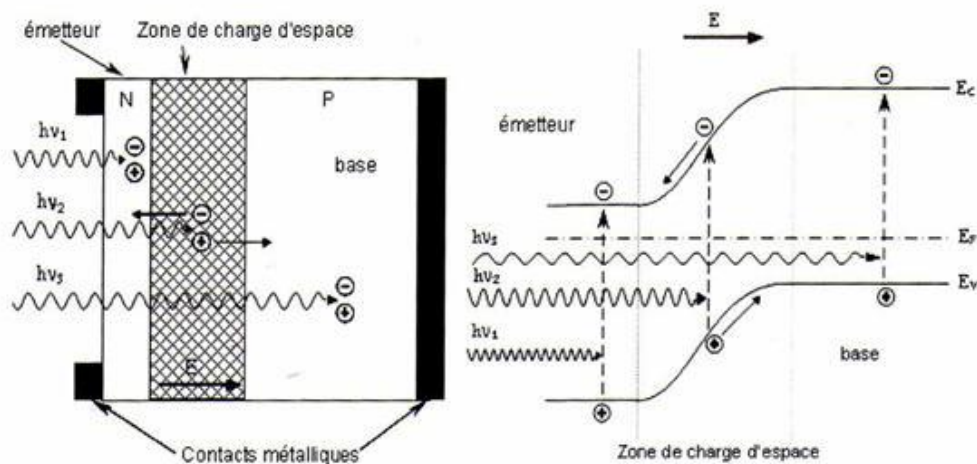


Figure (I- 13) : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [14]

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

Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- \*Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion,

\*Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura une photo courant de génération.

### I.17-Les différents paramètre d'un cellule PV

La différence de potentiel présentée 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 PV 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 ( $I_{sc}$ ). Ces valeurs peuvent changer fortement en fonction du matériau utilisé, de la température et de l'ensoleillement [15].

La Figure (I-5) représente les caractéristiques typiques mesurables  $I_{cell}=f(V_{cell})$  et  $P_{cell}=f(V_{cell})$  d'une jonction PN soumise à un flux lumineux constant [15].

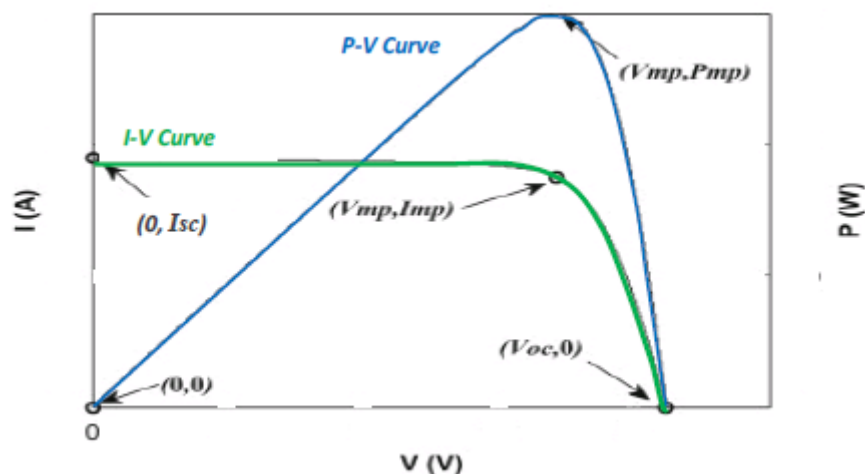


Figure (I- 14) : Caractéristique des courbes I-V et P-V[16].

#### I.17.1-Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V = 0$  V dans le schéma équivalent). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température[17].

**I.17.2-Tension à circuit ouvert  $V_{co}$** 

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).[16].

Enfin, cette valeur décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [17].

**I.17.3-Point de puissance maximale  $P_m$** 

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule  $P = UI$ , pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit ( $U \times I$ ) est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale  $P_m$ . On a coutume d'appeler  $U_m$  et  $I_m$  la tension et le courant correspondant à ce point  $P_m = U_m \cdot I_m$ [15].

**I.17.4-Facteur de forme  $FF$** 

Le facteur de forme  $FF$  rend compte de la qualité de la forme des courbes  $I(V)$ . Il est déterminé par l'équation suivante[17] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}}$$

Où  $I_{max}$  et  $V_{max}$  représentent respectivement le courant et la tension du point de fonctionnement qui permet d'extraire le maximum de puissance ( $P_{max}$ ) de la cellule (Figure I-15). Plus la valeur de  $FF$  est grande, plus la caractéristique  $I(V)$  ressemble à celle d'une source idéale de courant  $I_{cc}$  tant que  $V < V_{co}$  et à une source idéale de tension pour  $I > I_{cc}$ . Dans le cas limite  $FF \rightarrow 1$ , la puissance extraite de la cellule est maximale.

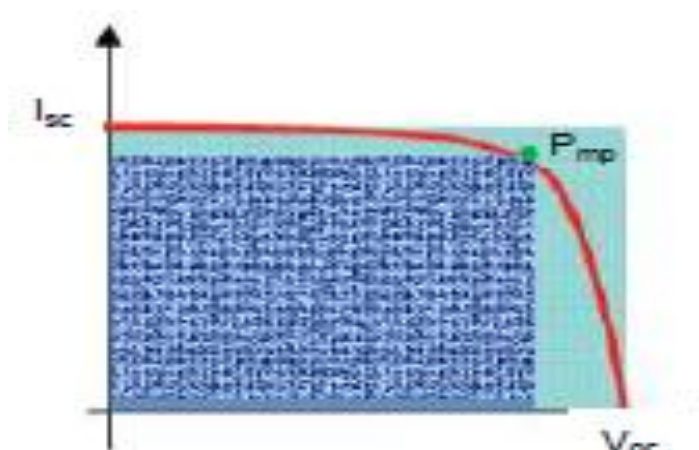


Figure (I- 15) : Notion de facteur de forme ( $FF$ ) pour une cellule [18].

### I.18-Les différents types des cellules

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

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [19]:

#### a. Les cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.



Figure (I- 16):Cellule monocristalline [19].

#### b.Les cellules poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire).

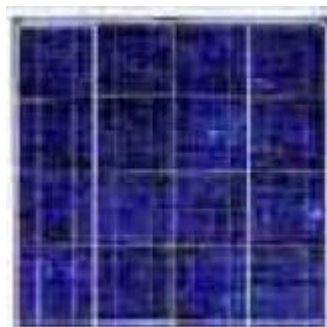


Figure (I- 17):Cellule poly cristalline [19].

#### c.Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire) , mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilise couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres [19].

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).



Figure (I- 18):Cellule amorphe [19].

### I.19- Module Photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension. Le module standard commercialisé, connectant 36 cellules cristallines en série pour des applications en 12V, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique, a généralement une tension à vide supérieure à 20 V et le point optimal de fonctionnement est au voisinage de 16 V à 25°C. Mais la température du module sous rayonnement est souvent supérieure à 40°C, et les performances des cellules sont réduites. On compte en général par cellule une baisse de 2 mV/°C, soit 72 mV/°C pour les modules de 36 cellules. La tension du module tombe alors aux alentours de 14 V ce qui est idéal pour la charge d'une batterie. Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 15 à 18%), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [14].

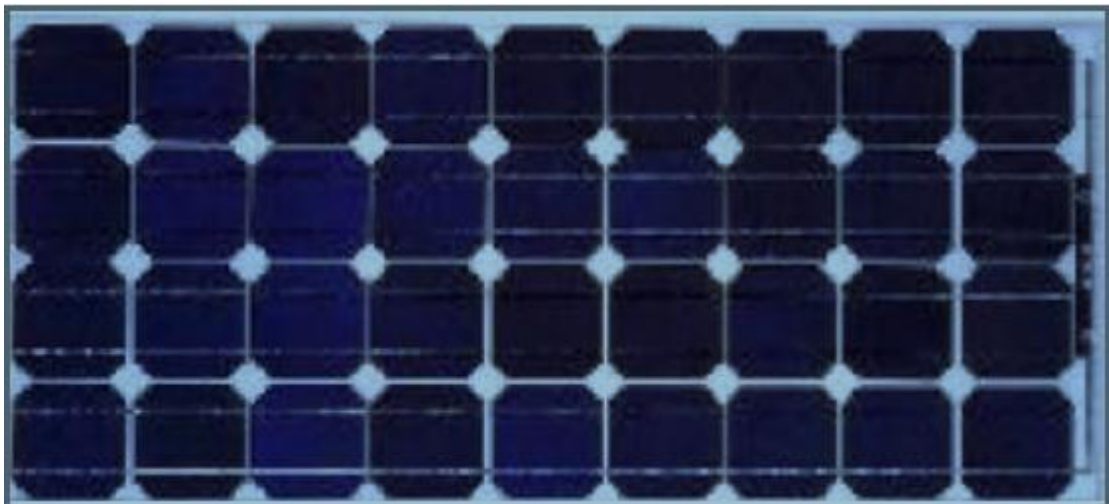


Figure (I- 19) : module photovoltaïque de 36 cellules cristallin [14].

### I.19.1-Les modules poly cristallins ou monocristallins

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et à celles des semi-conducteurs [14].

Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière viennent frapper la face avant de la cellule. Cette énergie est suffisante pour permettre aux électrons (présents en abondance sur cette face) de se déplacer sur la face arrière de la cellule (qui présente un manque d'électrons)

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 jusqu'à 60 cellules en série encapsulées entre deux plaques de verre ou une plaque de verre à l'avant et un matériau composite à l'arrière. Un cadre en aluminium permet la fixation de ce module sur différents types de supports. Des modèles sans cadre permettent différentes variantes pour l'intégration architecturale [14].

La puissance d'un module photovoltaïque est exprimée en Watt crête, c'est une valeur donnée pour un ensoleillement de  $1\,000\text{ W/m}^2$  et une température ambiante de  $25^\circ$ .

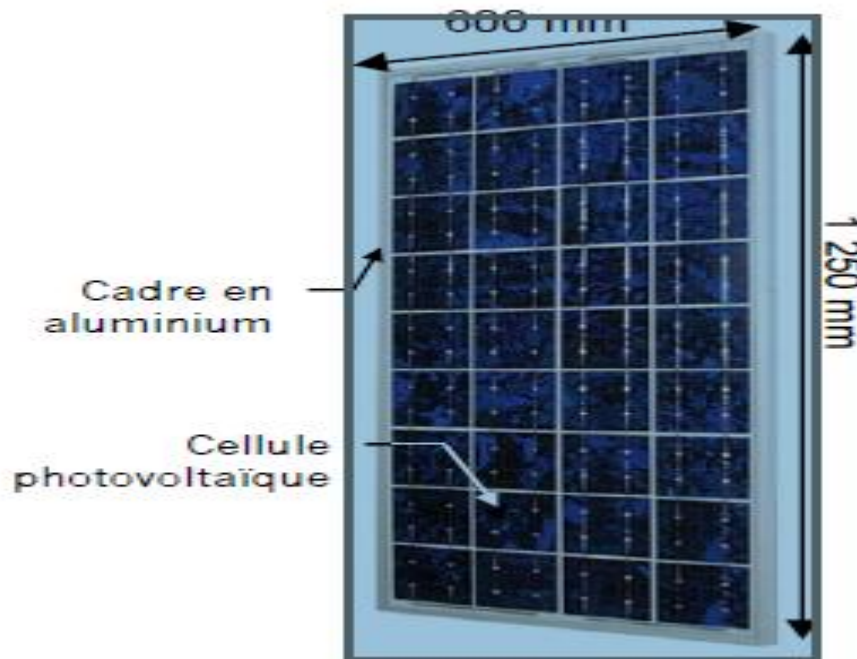


Figure (I- 20) : Un module photovoltaïque de 75 Wc ( $0,68\text{ m}^2$ )[20]

Les puissances mises en jeu en fonction des différentes technologies, poly cristallin ou monocristallin vont respectivement de 110 Wc à 150 Wc par mètre carré (soit un rendement entre 11 et 15 %). Le module produit un courant continu et une tension d'environ 20 V. Les fabricants garantissent 80 % de la puissance après 25 ans de fonctionnement.



### I.19.2-Les modules amorphes à couche mince

Le silicium est déposé sur un support généralement flexible, le rendement est d'environ 5%. Cette technologie permet de produire de l'énergie électrique même avec un temps nuageux (ceci n'est pas le cas avec les modules poly ou monocristallin).

Les bandes flexibles sont de longueur très variable (moins d'un mètre jusqu'à plus de 5 mètres)[20].



Figure (I- 21) : Un module photovoltaïque de 192 Wc (5,2 m²)[20].

### I.20-Rendement d'un module photovoltaïque

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Ces mesures sont aujourd'hui normalisées. Les cellules solaires sont donc testées par les constructeurs sous un spectre lumineux artificiel correspondant à un spectre solaire typique AM1.5 (soit à l'irradiance totale reçue sur le sol terrestre à une altitude de 0° avec un angle de 48°) sous une température fixe de 25°C. Pour simplifier, cette convention a permis de normaliser les rendements donnés dans les notices des capteurs afin de pouvoir les comparer. La puissance moyenne totale reçue lors des tests par les cellules assemblées en module PV est de 1000W/m² sous 25°C[6].

$$\eta_{\text{module}} = \eta_{\text{cellule}} \times \eta_{\text{connexion}} \times \eta_{\text{encapsulation}} \times \eta_{\text{diode}}$$

### **I.21-Nombre de cellule par module**

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 à 0.60 et un point de puissance maximale situé à 0.46-0.47 V. considérant que le module doit pouvoir charger une batterie 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3 V en câblage et du fait de l'élévation de température il faudra disposer d'un module fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouve le nombre arrondi de 36, valeur extrêmement courant comme nombre de cellules en série des modules usuels du marché.

De plus, cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangs de 9. En pratique, les modules les plus courants en 12 V comportent 32 à 34 cellules : cela dépend de la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation [14].

### **I.22-Encapsulation et encadrement**

Le but principal de l'encapsulation d'un ensemble de cellules solaires et des raccords électriques est de protéger leurs fils de l'interconnexion de l'environnement hostile dans lequel elles sont utilisées. Par exemple, les cellules solaires sont relativement minces et sujettes à des dommages mécaniques. En plus de ça la grille métallique sur la surface supérieure de la cellule solaire et le fil de l'interconnexion des cellules solaires peut être corrodée par l'eau ou la vapeur d'eau. Les deux principales fonctions de l'encapsulation est de prévenir les dommages mécaniques des cellules solaires et d'empêcher l'eau ou la vapeur d'eau de la corrosion des contacts électriques [21].

### **I.23-Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. Nous avons cité par la suite les notions de bases sur le module photovoltaïque : rendement, nombre des cellules dans le module, leur encapsulation et leur encadrement.