

I. 1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [1]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [2].

Dans ce chapitre, nous commencerons par un aperçu sur les énergies renouvelables, la définition de l'énergie solaire et l'historique du PV. Puis la constitution des cellules photovoltaïques, leur caractéristique ainsi que le principe de fonctionnement et enfin nous présenterons les différents types des cellules photovoltaïques ainsi que les avantages et inconvénients de l'énergie PV.

I. 2 Les ressources des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables.

Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [3].

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [4], [5].

I.2.1 Définition d'énergie renouvelable

On appelle une énergie renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [4], [6].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [4], [3].

I. 3 L'énergie solaire

Le soleil est une étoile parmi les autres. Son diamètre est d'environ cinquante fois celui de la Terre. Sa lumière, à la vitesse fantastique de 300 000 Kilomètres par seconde, met un peu plus de 8 minutes pour nous parvenir. La masse du soleil est telle qu'il peut encore rayonner pendant des milliards d'années. On évalue à environ 100 milliards de milliards de Kilowatts-heure l'énergie rayonnée à chaque seconde dans toutes les directions par le soleil, et la Terre avec son atmosphère n'en reçoit qu'environ 30 milliards par seconde.

Pour exprimer en unités thermiques l'énergie solaire parvenant en une année à l'entrée de l'atmosphère terrestre, si l'on adopte l'unité Q employée dans les études énergétiques globales ($Q=10^{18}$ BTU« British Thermal Unit ») et correspondant à 40 milliards de tonnes de charbon normal, on trouve que cette énergie solaire annuelle représente 5 000 unités Q. On constate combien cette énergie est fantastique, si on la compare d'une part à l'énergie utilisée par l'humanité, égale en 1972 à 0.2 Q, d'autre part à l'énergie solaire utilisée par la photosynthèse sur notre globe en un an égale aussi à 0.2 Q.

Le rayonnement solaire est réparti en un spectre s'étendant de la longueur d'onde 0.3 micron (ultraviolet) à la longueur d'onde 5 microns (infrarouge), avec un maximum pour 0.47 micron dans le spectre visible. Ce dernier s'étend des longueurs d'onde de 0.35 micron (violet) à 0.7 micron (rouge) et c'est au-dessus de 0.7 micron que commence le proche infrarouge [7].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [8].

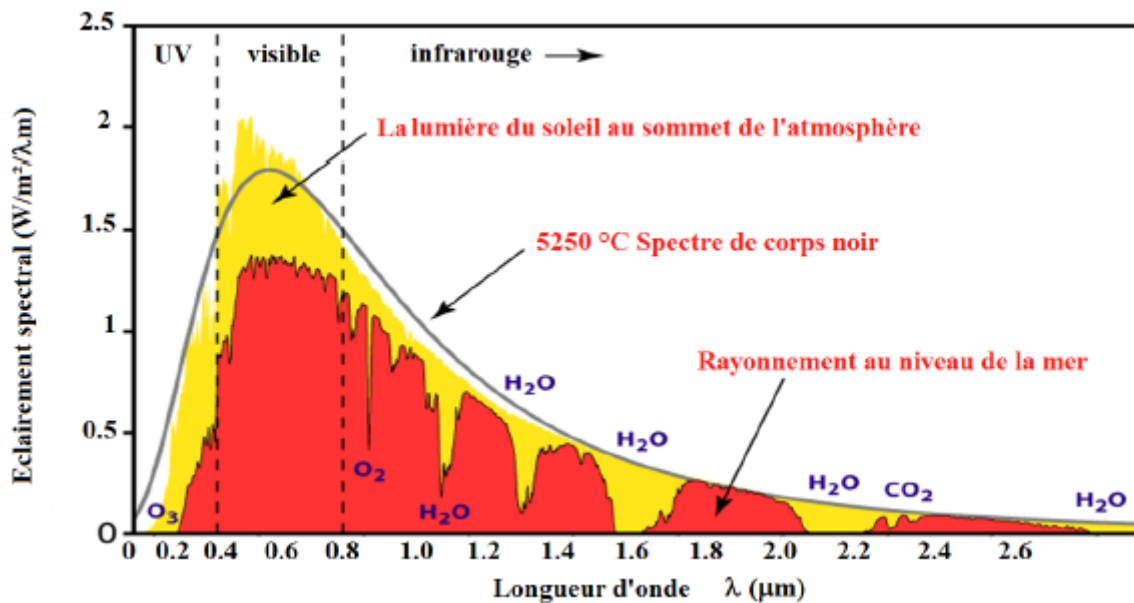


Figure (I.1): Analyse spectrale du rayonnement solaire

I.3.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain. On utilise la notion AM pour AirMass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [8] :

➤ Rayonnement direct :

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

➤ **Rayonnement diffus :**

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

➤ **Rayonnement réfléchi ou l'albédo:**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.

➤ **Rayonnement global :**

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

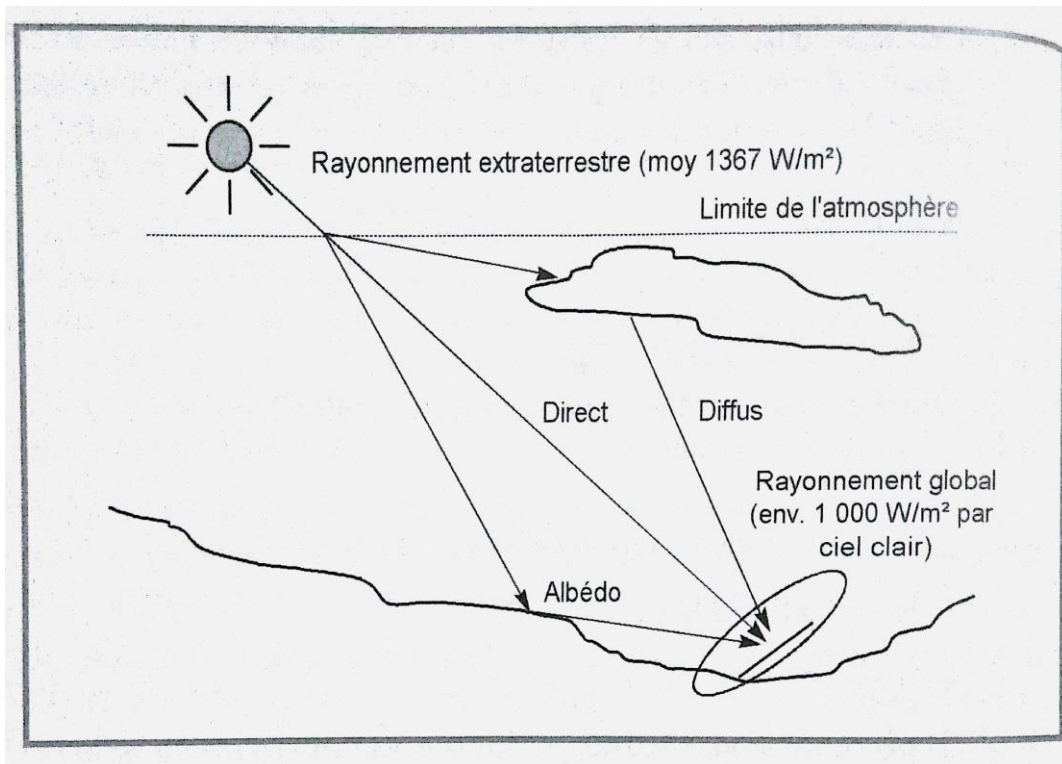


Figure (I.2): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.3.2 Estimation de l'énergie disponible

Le rayonnement global pour une surface inclinée à un angle θ par rapport à l'horizontale est déterminé par la relation suivante qui ne tient pas compte de la réflexion solaire des environs immédiats :

$$H_{\theta} = \frac{H_s \sin(90^{\circ} - L \pm (d + \theta))}{\sin(90^{\circ} - L \pm d)} + H_D \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (I.1)$$

Où

- H_s est le rayonnement reçu directement du soleil sur une surface horizontale (mesuré par un pyrhélimètre) ;
- H_D est le rayonnement diffus, sur une surface horizontale qui est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa diffusion par les nuages (mesuré par un pyromètre avec écran masquant le soleil) ;
- L est la latitude du site ;
- θ est l'angle d'inclinaison du capteur ;
- $+d$ est la déclinaison du Soleil dans l'hémisphère nord ;
- $-d$ est la déclinaison du Soleil dans l'hémisphère sud.

I. 4 Historique du Photovoltaïque

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

En 1839 : le physicien français [Edmond Becquerel] découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : C'est l'effet photovoltaïque.

En 1883 : Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se [8].

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

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

En 1970 : Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andrée et al en URSS [8].

En 1973 : Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu₂S [8].

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

En 1996 : Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland) [8].

En 2002 : Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW [8].

En 2007 : Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA) [8].

En 2008: Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne) [8].

En 2009: Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (SolarmerEnergy Inc., University of California, University of Chicago, USA) [8].

I. 5 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La figure (I.3) illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

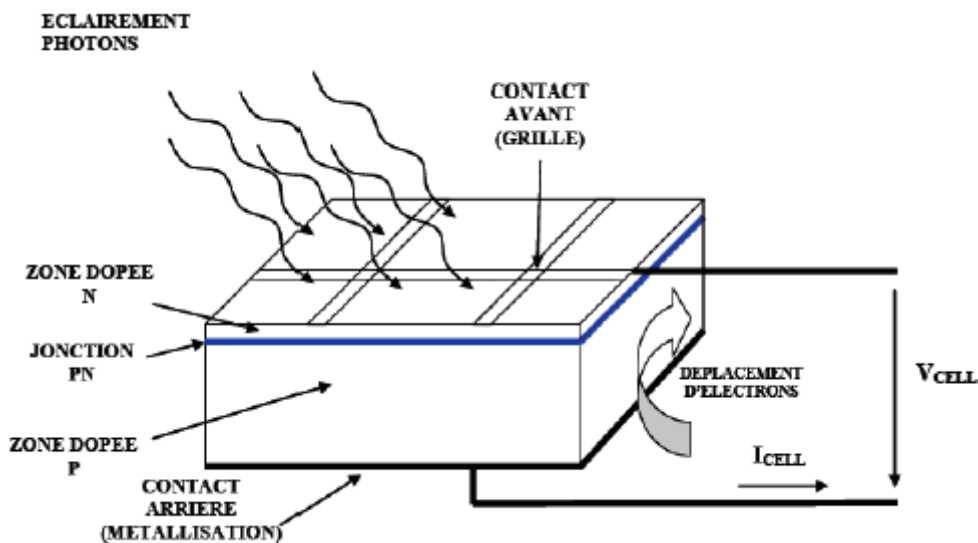


Figure (I.3): Structure d'une cellule photovoltaïque.

Comme pour le cas d'une diode classique, une cellule PV peut donc être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel.

I.5.1 Constitution d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. 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 multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

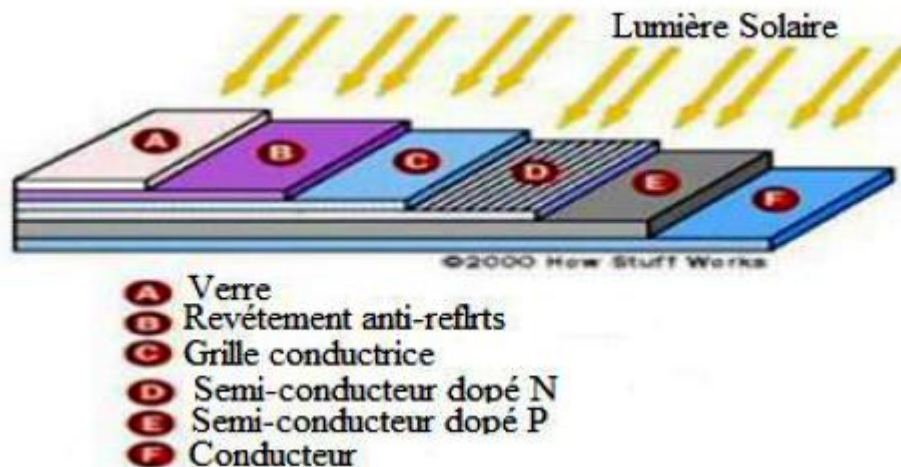


Figure (I.4): Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [5].

I.5.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

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

➤ **Courant de court-circuit I_{cc} :**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.2), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} + I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.2)$$

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

$$I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}.$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (I.3)$$

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

$$(I_{cc} = I_{ph}).$$

➤ **Tension en circuit ouvert V_{co}**

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

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{eI_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (I.4)$$

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

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{pv}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.5)$$

➤ **Point de puissance maximale P_m**

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m .

➤ **Facteur de forme FF**

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.6)$$

➤ **Rendement énergétique η**

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{\phi \cdot S} \quad (I.7)$$

S : Surface de la cellule solaire.

ϕ : Flux incident.

I.5.3 Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (I.5) représente trois zones essentielles [9] :

- a) **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- b) **La zone (2)** : correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- c) **La zone (3)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une Tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

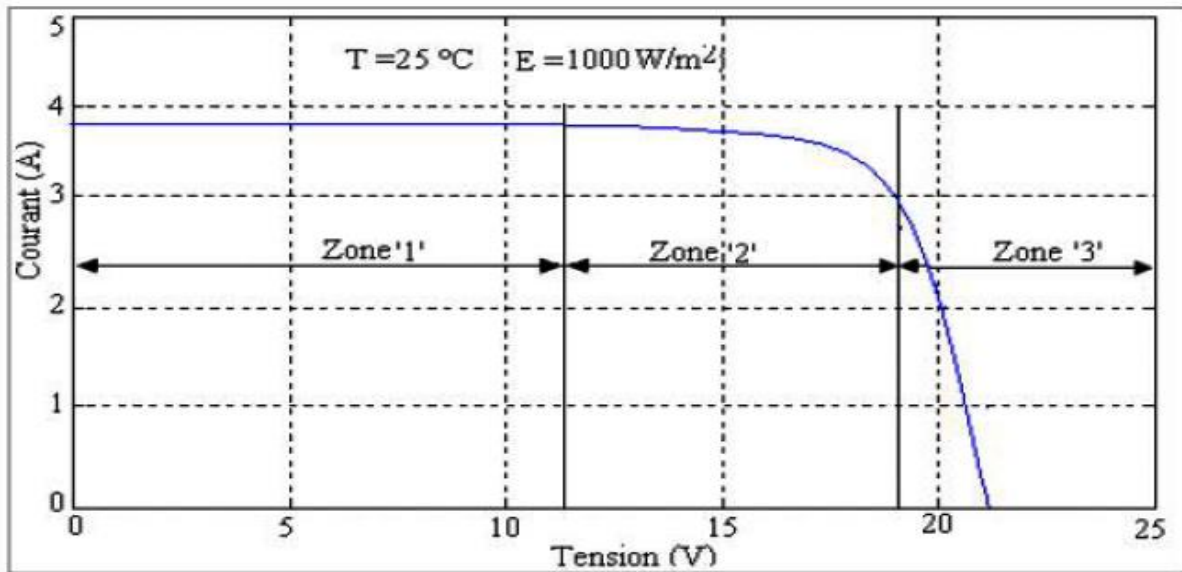


Figure (I.5): Les différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque.

I. 6 Générateur photovoltaïque

Le principal composant d'un générateur PV est la cellule photovoltaïque, dans laquelle se produit la conversion du rayonnement solaire en courant électrique. La cellule est constituée d'une fine couche de matériau semi-conducteur, généralement du silicium traité adéquatement, d'une épaisseur d'environ 0,3 mm et d'une surface de 100 à 225 cm². Le silicium, qui comprend quatre électrons de valence (tétravalent), est « dopé » en ajoutant des atomes trivalents (par ex. bore - dopage P) sur une « couche » et de grandes quantités d'atomes pentavalents (par ex. phosphore - dopage N) sur l'autre. La région de type P présente un excès de trous, tandis que la région de type N a un excès d'électrons.

Silicium dopé

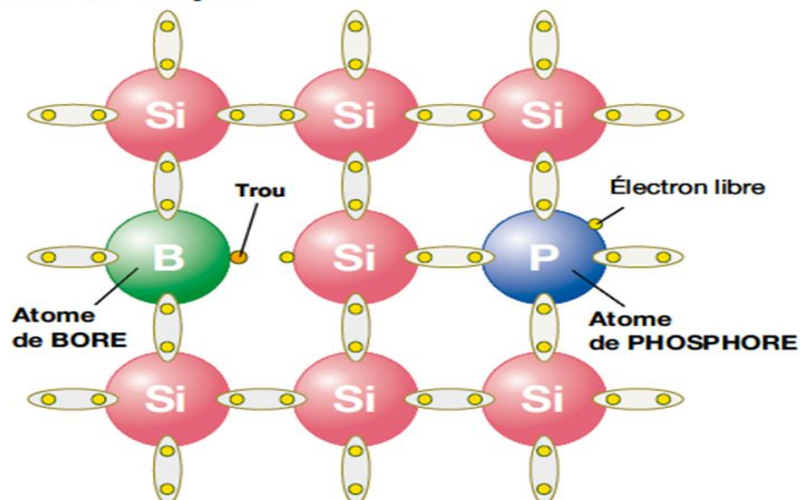


Figure (I.6): cellules photovoltaïques

Dans la zone de contact entre les deux couches différemment dopées (jonction P-N), les électrons ont tendance à se déplacer de la moitié riche de l'électron (N) à la moitié pauvre de l'électron (P), générant par conséquent une accumulation de charge négative dans la région P. Un double phénomène se produit pour les trous d'électron, avec une accumulation de charge positive dans la région N. Un champ électrique se crée donc autour de la jonction, empêchant la diffusion des charges électriques. En appliquant une tension de l'extérieur, la jonction permet au courant de circuler dans un seul sens (fonctionnement d'une diode). Lorsque la cellule est exposée à la lumière, en raison de l'effet photovoltaïque, des couples électron-trou se forment dans la région N ainsi que dans la région P. Le champ électrique interne permet aux électrons en excès (provenant de l'absorption des photons par une partie du matériau) d'être séparés des trous et les pousse dans des directions opposées les uns par rapport aux autres. Par conséquent, une fois que les électrons ont passé la région d'appauvrissement, ils ne peuvent pas revenir en arrière car le champ les empêche de circuler dans le sens inverse. En raccordant la jonction à un conducteur externe, il est possible d'obtenir un circuit fermé dans lequel le courant circule de la couche P, avec un potentiel supérieur, à la couche N, avec un potentiel inférieur, tant que la cellule est éclairée (Figure I.7).

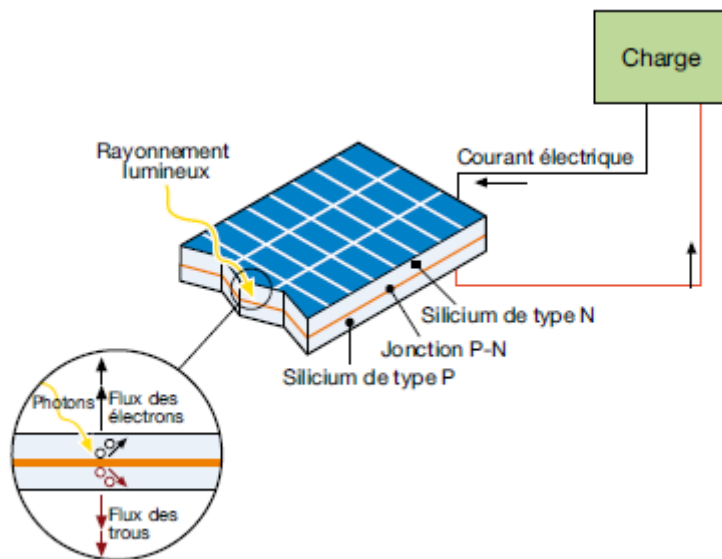


Figure (I.7): Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La partie du silicium contribuant à fournir le courant est la zone entourant la jonction P-N ; les charges électriques se forment dans les zones éloignées, mais le champ électrique ne peut pas les déplacer et par conséquent elles se recombinent. Il est donc important que la cellule PV ait une grande surface : plus la surface est grande, plus le courant généré est important.

La Figure (I.8) représente l'effet photovoltaïque et le bilan énergétique montrant le pourcentage considérable d'énergie solaire incidente non convertie en énergie électrique.

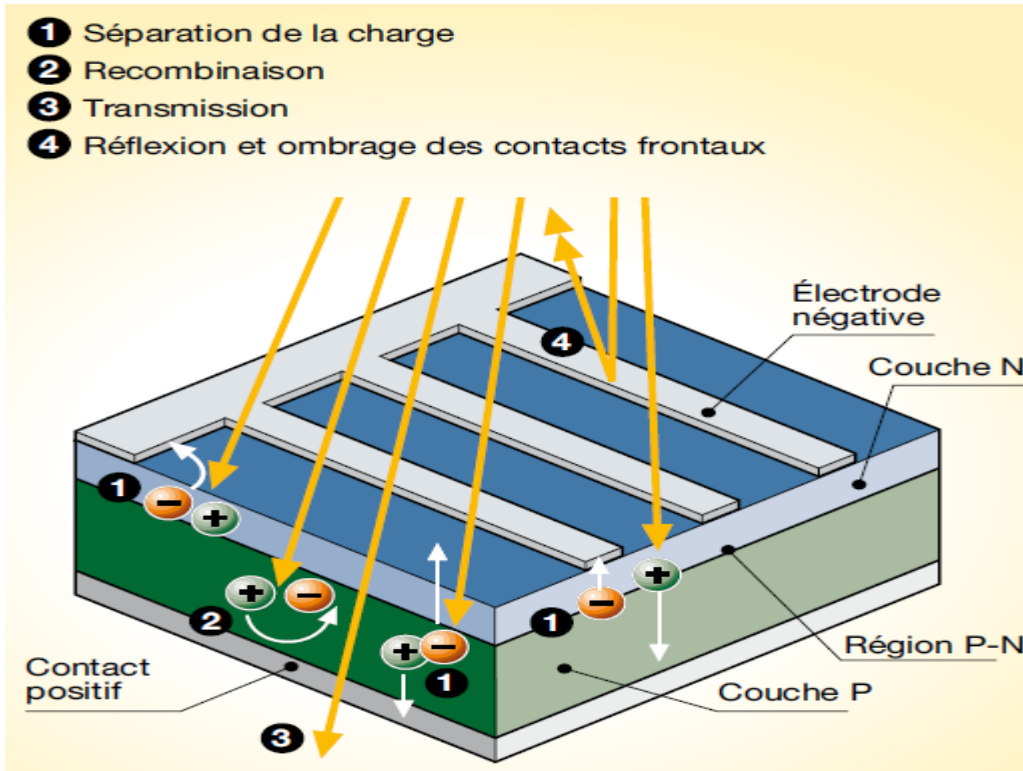


Figure (I.8): Effet photovoltaïque

- 100% de l'énergie solaire incidente
 - 3% de pertes par réflexion et ombrage des contacts frontaux
 - 23% de photons ayant une grande longueur d'onde et une énergie insuffisante pour libérer les électrons ; génération de chaleur
 - 32% de photons ayant une courte longueur d'onde et un excédent d'énergie (transmission)
 - 8.5% de recombinaison des porteurs de charge libres
 - 20% de gradient électrique dans la cellule, surtout dans les régions de transition
 - 0.5% de résistance en série, représentant les pertes par conduction
- = 13% d'énergie électrique utilisable

Dans des conditions d'utilisation standards (irradiante de $1\text{W}/\text{m}^2$ à une température de 25°C), une cellule PV génère un courant d'environ 3A avec une tension de 0.5V et une puissance crête de $1.5\text{-}1.7\text{Wp}$.

Des modules photovoltaïques constitués d'un assemblage de cellules sont disponibles sur le marché. Les plus communs comprennent 36 cellules disposées en 4 rangées parallèles raccordées en série, avec une surface allant de 0.5 à 1m^2 .

Plusieurs modules raccordés mécaniquement et électriquement forment un panneau, autrement dit une structure commune qui peut être montée au sol ou à un bâtiment. Plusieurs panneaux raccordés électriquement en série constituent une rangée et plusieurs rangées raccordées électriquement en parallèle pour générer l'énergie requise constituent le générateur ou champ photovoltaïque.

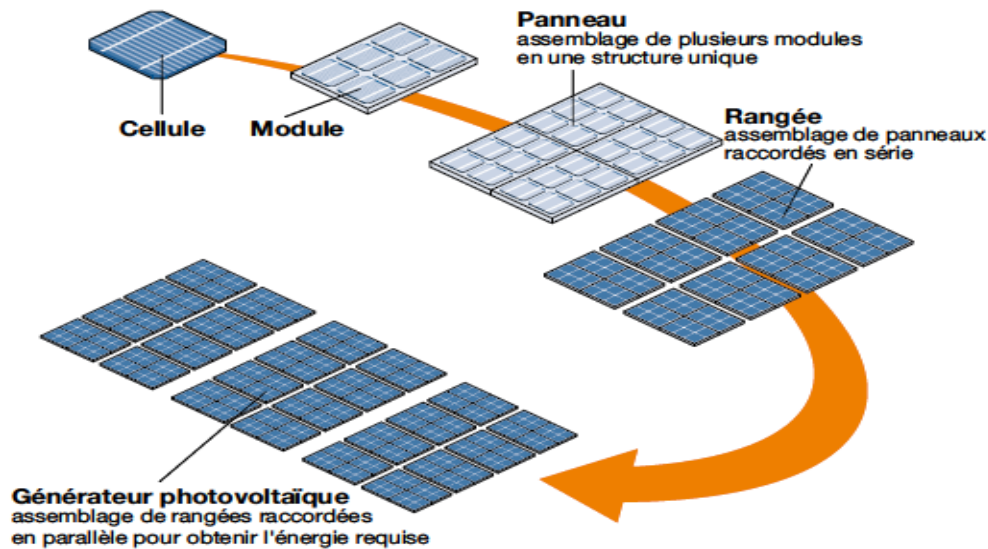


Figure (I.9): Assemblage des cellules pour former un générateur PV

I. 7 La conversion photovoltaïque

Elle met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés:

- _ l'absorption de la lumière dans le matériau ;
- _ le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- _ la collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [10].

➤ L'absorption de la lumière

Comme on l'a vu plus haut, la lumière se compose de photons, « grains de lumière », chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers : les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible.

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- la réflexion : la lumière est envoyée par la surface de l'objet ;
- la transmission : la lumière traverse l'objet ;
- l'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir : lumière du soleil ou autres sources artificielles. On prendra soin également de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission [10].

➤ le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, continus dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atome qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les « attire » ensuite vers l'extérieur. En régime permanent, l'électron libéré laisse un « trou » qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trou dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique [10].

➤ la collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les « attirer » hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. Sinon, elles se recombinent : l'électron, chargé négativement, neutralisent le « trou », chargé positivement. Autrement dit, les électrons libérés retrouveraient leur état initial à la périphérie de leur atome : cela libérerait de l'énergie thermique (chaleur) mais aucune énergie électrique.

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'extérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté [10].

I. 8 Technologies des cellules solaires

On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- _ les matériaux solides cristallisés ;
- _ les couches minces.

Ces couches minces sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible (de l'ordre du micron et en deçà) et déposées sur un support, alors que les photopiles cristallines sont massives et épaisses de 0,15-0,2 mm.

Le matériau le plus répandu dans les photopiles est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent (tétra = quatre) : cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec 4 autres atomes de même nature. Le silicium solaire est soit cristallin, soit amorphe [10].

I.8.1 Cellules au silicium cristallin

Les photopiles au silicium cristallin sont les plus répandues. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériau « cristallin », c'est parce que le silicium qui les constitue est un cristal, avec un arrangement parfait des atomes, selon une structure atomique ordonnée de type tétraédrique.

Si la photopile est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin, et elle a un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Si par contre la photopile est faite de silicium multi-cristallin (on dit plus couramment poly-cristallin), elle est composée de plusieurs cristaux assemblés, et présente l'aspect d'une « mosaïque » compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres, appelés grains.

a) Silicium monocristallin

Il est possible d'avoir des monocristaux par la méthode Czochralski (Cz) de 30 cm de diamètre, longs de plus de 1 cm. Il faut noter qu'en partant de 1 kg de silice, on n'obtient pas plus de 100 g de silicium monocristallin pour une dépense énergétique considérable, de l'ordre du MWh. De plus, la moitié de ce cristal sera perdue au cours de la découpe en tranches de 300 μm d'épaisseur. Il est de type p, c'est-à-dire dopé bore, à une concentration comprise entre 10^{16} et 10^{17} atomes cm^{-3} , de façon à présenter une résistivité de l'ordre de 0.1 à 1 $\Omega \cdot \text{cm}$. Ce choix résulte d'un compromis entre une résistivité la plus faible possible et un dopage modéré afin d'éviter la dégradation de la longueur de diffusion des porteurs photogénérés. Par la suite, il faut encore créer une barrière de potentiel nécessaire à la collecte des charges, c'est-à-dire la structure émettrice des cellules photovoltaïques qui ne sera pas détaillée dans le cadre de cette présentation [11]

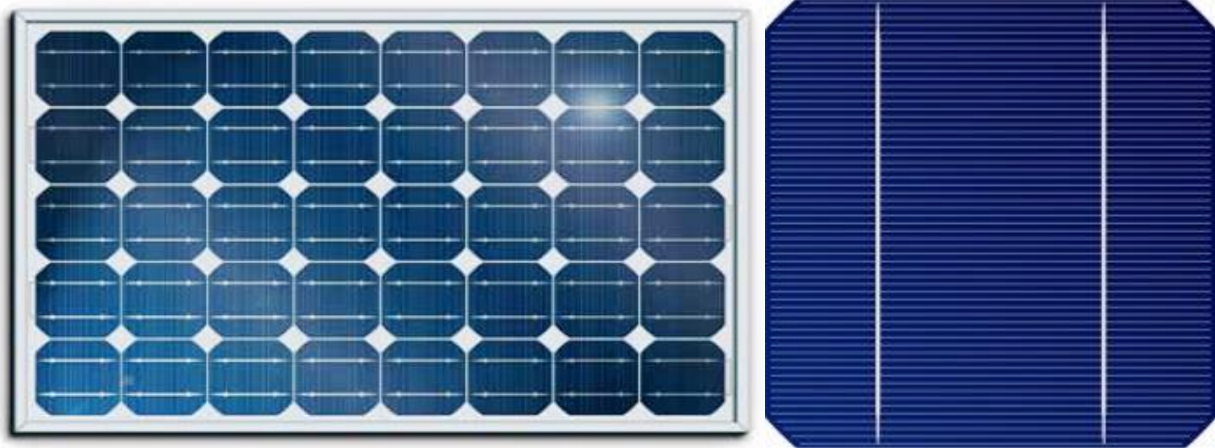


Figure (I.10): Panneau en silicium monocristallin

b) Silicium Multi-cristallin

En revanche, dans un poly-cristal, les monocristaux sont séparés les uns des autres par des zones perturbées, les joints de grains, et chaque cristal de plus petite dimension n'a pas la même orientation que son voisin. On privilégiera les techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (d'où l'appellation silicium multi-cristallin, mc-Si) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cette technique par solidification directionnelle, où des blocs de plus de 250 kg peuvent être obtenus par refroidissement contrôlé du silicium en fusion dans un module de nature appropriée (souvent en quartz), est plus rapide et moins coûteux en énergie qu'une croissance d'un lingot Cz ou FZ (24 à 48 heures contre quelques semaines pour ces derniers) [11].

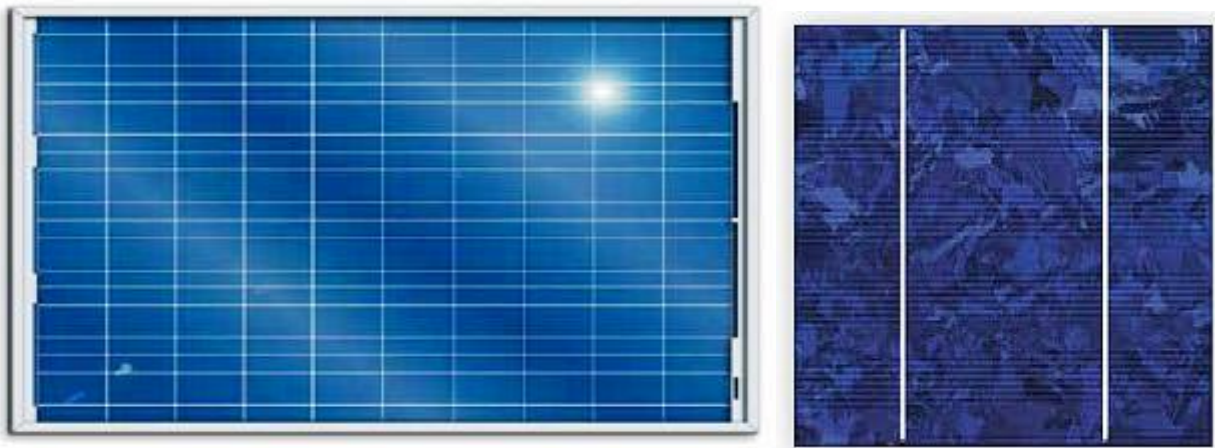


Figure (I.11): Panneau en silicium poly-cristallin (multi-cristallin)

c) Silicium en ruban

Les techniques de production de silicium en ruban autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique, qu'ils soient obtenus par capillarité entre deux couches de carbone ou

par croissance sur le film ou une maille de carbone. Ces rubans ont connu, dans les années 1990, de nombreux développements au niveau de la recherche et pour certains d'entre eux jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles.

Cependant, toutes ces techniques « ruban » ont toujours été largement pénalisées par une vitesse de croissance linéaire (généralement de quelques cm/min à quelques dizaines de cm/min), imposée par les critères de solidification qui déterminent la pureté du matériau par la ségrégation des impuretés.

I.8.2 Cellules en couches minces

a) Simple jonction ou silicium amorphe

Le silicium est aussi utilisé en couche mince dite « amorphe » car de structure désordonnée, de type « vitreuse ». L'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal, elle est déformée, et l'ordre cristallin n'est maintenu qu'à courte distance (2 à 3 liaisons atomique). Le matériau comporte alors des déformations, des petites cavités, et lorsque les atomes ne sont liés qu'à trois autres atomes au lieu de quatre, cela crée des liaisons non satisfaites ou liaisons pendantes. Le silicium amorphe pur est donc un mauvais semi-conducteur, plein de défauts, et on ne peut le doper.

Cependant, lorsque le silicium amorphe est fabriqué à partir du gaz silane (SiH_4), ce qui est le cas générale, il contient une proportion importante d'hydrogène (5 à 10%) qui va se lier à ces liaisons pendantes, ce qui réduit la densité de défauts et permettant la collecte des charges et le dopage du matériau. La figure I. montre l'arrangement schématique d'atomes de silicium amorphe avec l'hydrogène.

Ce matériau est donc un alliage amorphe de silicium et d'hydrogène que les scientifiques écrivent a-Si :H (silicium amorphe hydrogène). Cet alliage présente un gap plus élevé que le silicium cristallin et absorbe la lumière beaucoup plus fortement : une couche de 1 μm d'épaisseur suffit à capter le rayonnement reçu sur terre. En pratique l'épaisseur des jonctions peut descendre jusqu'à 0.2 μm .



Figure (I.12): Panneau en silicium amorphe

b) Multi-jonctions

Un autre intérêt de cette technologie silicium en couche mince est qu'elle permet de réaliser des structures multi-jonctions à gaps différents, chaque jonction étant spécialisée dans la conversion d'une bande du spectre de lumière. En effet, comme on l'a vu, il est facile d'empiler les couches en modifiant simplement le mélange gazeux au cours du dépôt de la photopile dans l'enceinte à plasma.

Or, le gap optique du silicium amorphe est de 1,77 eV, et il n'absorbe pas la partie rouge du spectre visible ($\lambda > 0,7 \mu\text{m}$). Le germanium, également tétravalent (avec 4 liaisons), a un gap beaucoup plus faible et un bon alliage silicium-germanium absorbera cette partie rouge. Donc il est intéressant de placer derrière la jonction silicium une jonction au silicium-germanium. Des cellules à double jonction (cellules « tandem »),

ou même triple jonction, ont donc un rendement plus élevé qu'une simple jonction silicium amorphe : sous un rayonnement solaire de 1 000 W/m², on atteint des rendements en production de 7 à 9% stabilisés, contre 6% pour une simple jonction silicium amorphe

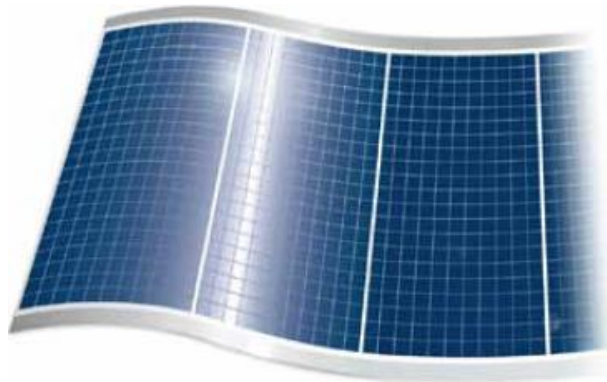


Figure (I.13): Panneau en silicium amorphe multi-jonction

c) Silicium microcristallin, micro-morphe et polymorphe

En introduisant une forte proportion d'hydrogène gazeux dans le plasma de silane destiné à produire du silicium amorphe, on peut créer dans le matériau en croissance une certaine proportion de micro-grains cristallisés. Le matériau obtenu, dit silicium microcristallin, est donc plus photoconducteur et présente un gap optique inférieur, ce qui le rend plus favorable à la conversion du spectre solaire que le silicium amorphe (en particulier dans le rouge). Malheureusement, sa vitesse de dépôt est généralement très faible. Il est souvent utilisé en couche très mince comme interface des certaines structures à multi-jonctions.

Le silicium polymorphe, quant à lui, a été mis au point en France à l'Ecole Polytechnique (laboratoire LPICM) : il s'agit d'un matériau que l'on pourrait qualifier de nanocristallin

puisque'il comporte des cristaux de taille inférieure à ceux du microcristallin incorporé dans une matrice amorphe. Son intérêt réside dans le fait qu'il pourrait allier vitesse de dépôt et propriétés de photoconductivité proche du microcristallin, y compris à des températures modérées compatibles avec le dépôt sur plastique [11].

I.8.3 Autres technologies

Entre matériau cristallisés et couches minces amorphes, il existe une autre famille de matériau, beaucoup moins répandus, il s'agit des couches minces poly-cristallines. Le silicium poly-cristallin en couche mince serait intéressant notamment s'il pouvait allier le rendement du silicium cristallin à fort éclairement et la simplicité de fabrication des films minces. Mais ce matériau ne fait pour le moment que l'objet d'étude de laboratoire.

Les autres films poly-cristallins déjà commercialisés sont à base d'autres semi-conducteurs comme le tellure de cadmium (CdTe) et les alliages à base de cuivre, d'indium et de sélénium (CIS ou CIGS).

a) Cellules au CdTe

Ce matériau est intéressant du fait de son gap optique 1,45 eV et de sa forte absorption qui permet en moins de 2 μm d'épaisseur d'absorber la quasi-totalité du spectre visible. Il est ordinairement déposé sur du CdS (sulfure de cadmium) de type n, qui sert de couche avant, pour former une hétérojonction (jonction à deux matériaux). Les résultats de laboratoire sont très intéressants avec notamment un rendement de 15,8% obtenus par une équipe de Floride.

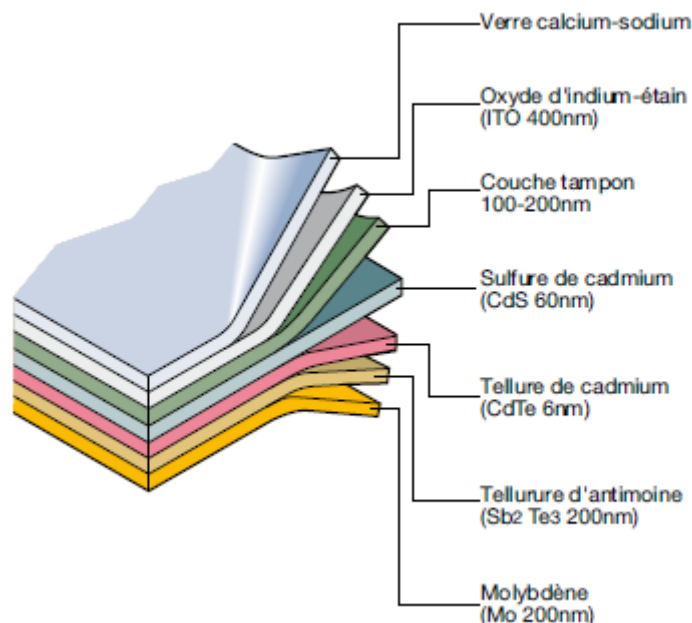


Figure (I.14): Structures des cellules à couche mince à base de CdTe-CdS

b) Cellules au CIS et CIGS

Le CIS, plus exactement le CuInSe₂, est un composé qui se dépose également sur une couche fenêtre en CdS de type n. le procédé de fabrication, qui utilise des technologies de dépôt sous vide, essentiellement la Co-évaporation, est aujourd'hui bien maîtrisé, bien que subsistent des problèmes de stabilité climatique. Théoriquement, cette hétérojonction peut atteindre 25% de rendement. Elle a d'excellentes propriétés d'absorption, mais son gap est un peu faible. Pour l'élargir, l'indium est allié au gallium et le sélénium à du soufre, d'où le symbole CIGS, pour CU (In, Ga) (Se, S)₂. Cela donne des jonctions qui, en pratique, peuvent atteindre 17% en laboratoire et 11% en usine.

Tableau 1.1

	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Couche mince (silicium amorphe)
η cellule	14% - 17%	12% - 14%	4-6% mono 7-10% tandem
Avantages	η élevé	coût inférieur	coût inférieur
	η constant	production plus simple	influence réduite de la température
	énergie supérieure	dimensions globales optimales	rendement énergétique supérieur avec rayonnement diffus
Inconvénients	énergie supérieure quantité nécessaire pour la production	sensibilité aux impuretés dans les processus de fabrication	dimensions supérieures coût de la structure et temps de montage

Tableau 1.2

	GaAs (Arséniure de gallium)	CdTe (Tellure de cadmium)	CIS (Alliages de cuivre iridium sélénium)
η cellule	32,5%	11%	12%
Avantages	grande résistance à des températures élevées (compatible avec les concentrateurs)	faible coût	très constant
Inconvénients	toxicité	toxicité	toxicité
	disponibilité des matériaux	disponibilité des matériaux	

Tableau de comparaison

Figure (I.15) : Tableau comparatif des différentes technologies de capteur

I. 9 Types d'installations photovoltaïques

I.9.1 Installations autonomes

Les installations autonomes sont des installations non raccordées au réseau, composées de panneaux PV et dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité. Étant donné que le courant fourni par le générateur PV est du courant DC, si l'installation de l'utilisateur requiert du courant AC, un onduleur est nécessaire. Ces installations sont avantageuses d'un point de vue technique et financier si le réseau électrique n'est pas présent ou s'il n'est pas facile d'accès, car elles peuvent remplacer des ensembles moteur-générateur. Par ailleurs, dans une configuration autonome, le champ PV est surdimensionné de sorte que, pendant les heures d'ensoleillement, l'alimentation de charge ainsi que la recharge des batteries de stockage puissent être garanties avec une certaine marge de sécurité en tenant compte des jours de faible ensoleillement.



Figure (I.16): schéma de principe d'une installation PV autonome.

I.9.2 Installations raccordées au réseau

Les installations raccordées en permanence au réseau utilisent l'énergie du réseau lorsque le générateur PV n'est pas en mesure de produire l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins du consommateur. En revanche, si le système PV produit un excédent d'énergie électrique, celui-ci est mis sur le réseau, qui agit par conséquent comme un grand accumulateur : les systèmes raccordés au réseau n'ont donc pas besoin de batterie d'accumulateur (Figure).

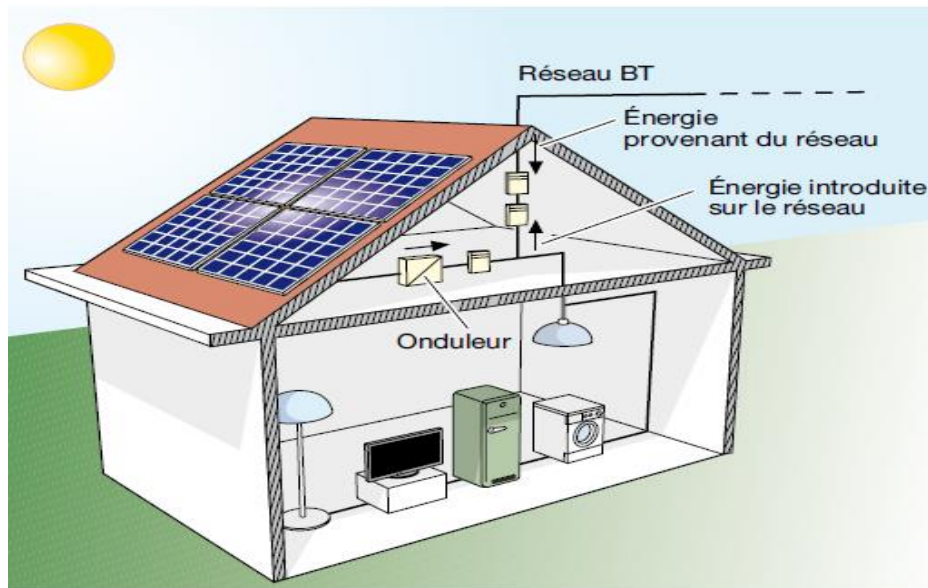


Figure (I.17): schéma de principe d'une installation PV raccordées au réseau.

I. 10 Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.10.1 Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [9].

I.10.2 Inconvénients

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

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

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [9].

I. 11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le monde de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres.

Dans le chapitre prochain, nous allons porter notre étude sur la modélisation de tous les composants de la chaîne photovoltaïque (Hacheur éleveur/MPPT P&O) et celle du système de pompage.