

*les cellules solaires
photovoltaïques*

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons les notions de base des cellules solaires, leur principe de fonctionnement, généralités sur l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire, les différents types des cellules solaires et les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

I.2 Energie solaire :

I.2.1 Spectre solaire :

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre ; 150 millions km, le soleil est constitué principalement de gaz (composé de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium), dont la fusion continue à produire une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène et des atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin [2] [3].

Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre $0.2 \mu m$ et $3 \mu m$. Hors atmosphère, le rayonnement émis par le soleil (AMO) est constitué de :

9% d'UV($0.1 < \lambda < 0.4 \mu m$).

43% de visible($0.4 < \lambda < 0.75 \mu m$).

48% d'infrarouges($0.75 < \lambda < 5 \mu m$).

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde des spectres AM 0 et AM 1.5G (FigureI.1).

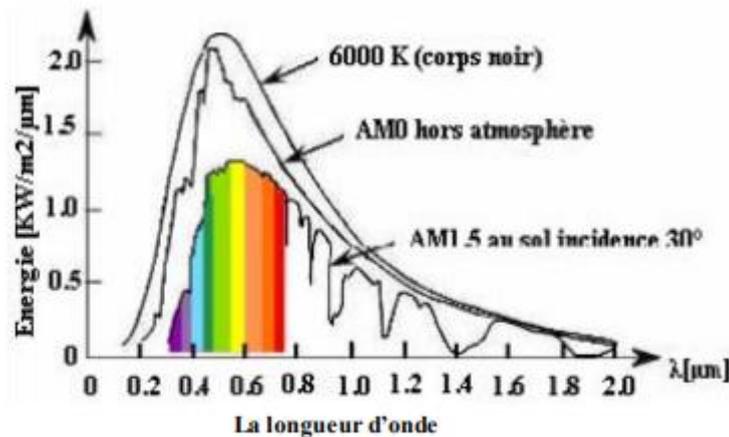


Figure. I.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [4].

On remarque que l'absorption, due à l'atmosphère à certaines longueurs d'ondes, est très importante.

Les longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du spectre solaire sont comprises entre 290nm et 2770nm avec les rayons ultraviolets, la lumière visible et les rayons infrarouges. L'atmosphère terrestre joue le rôle de filtre, les nombreux gaz présents dans

l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement. La notion d'*Air Mass (AM)* quantifie la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle du soleil par rapport au zénith. Le spectre solaire *AM 0* représente le spectre solaire hors atmosphère, il est principalement utilisé dans le cadre des applications spatiales $P \approx 1.36KW.m^{-2}$. Le spectre *AM 1.5* représente le spectre solaire sur Terre au niveau de la mer (soleil au zénith par temps clair avec un angle de 48°) $P \approx 1KW.m^2$ [5].

Dans le spectre *AM 1.5G* :

Le "1.5" signifie que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil.

Le « G » représente le rayonnement "global".

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre *AM1.5* sous un éclairage de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$.

I.2.2 Types des rayonnements solaires:

On distingue plusieurs types de rayonnement dont nous allons voir quelques-uns.

- **Rayonnement diffus :**

Il intéresse 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 [6].

- **Rayonnement direct :**

Il représente des rayons ultraviolets. Il est émis du soleil et arrive à la Terre directement. Il a une trajectoire linéaire Il est employé dans les systèmes de concentration et se symbolise par la lettre "D" dans le spectre *AM 1.5D*.

- **Rayonnement réfléchi :**

Il représente des rayons réfléchis par la Terre.

- **Rayonnement Global :**

Il constitue un ensemble de rayons (direct, diffus et réfléchi) qui est employé pour faire fonctionner les panneaux solaires.

I.3 Energie photovoltaïque :

I.3.1 Historique :

L'énergie photovoltaïque est la conversion du rayonnement solaire en électricité. « Photovoltaïque » est un mot grec qui réunit photo qui veut dire lumière et volt qui est une unité qui mesure de la tension électrique et qui tient son nom du physicien Volta.

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

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

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où h est la constante de Planck, c la célérité de la lumière et λ sa longueur d'onde.

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

En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. C'était en 1958 où le premier engin spatial alimenté par énergie photovoltaïque a été lancé dans l'espace. Jusqu'à maintenant, l'énergie solaire photovoltaïque est le seul type d'énergie d'alimentation des satellites [7].

Les Américains ont lancé en 1959 le satellite vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%.

La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. C'est en 1983 que la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt 4000 kilomètres en Australie. Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers. Les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20% [8].

I.3.2 Cellule photovoltaïque :

C'est un composant électronique qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique c'est-à-dire il convertit le photon reçu en une tension électrique continue. Cela se fait à partir d'un processus nommé « effet photo-électrique ». Cette cellule est, généralement, faite de matériaux semi-conducteurs. Les cellules réunies forment le module ou le panneau photovoltaïque. Elle peut être conçue à base d'une homojonction ou d'une hétérojonction.

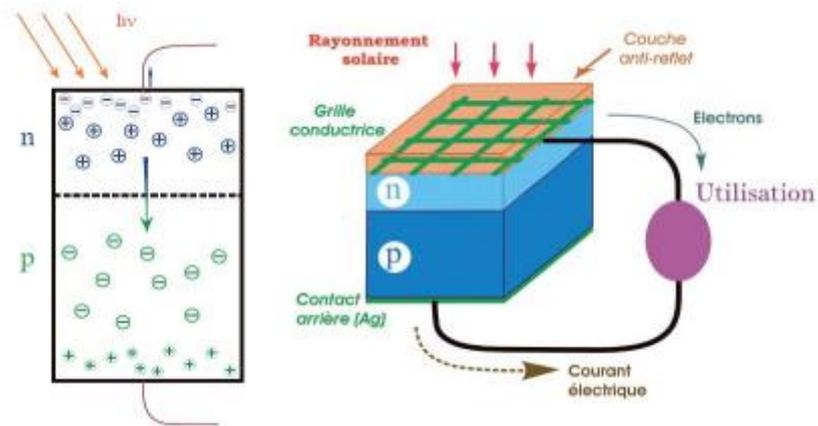


Figure. I. 2 : Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque [9].

I.3.3 Le Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:

La cellule photovoltaïque absorbe des photons de la lumière incidente à l'aide du matériau semi-conducteur constitué d'une bande de conduction et d'une bande de valence qui, entre elles, se trouve la bande interdite (gap).

Si l'énergie de photon incident est supérieure à l'énergie de gap, alors il transmet son énergie à l'électron qui est à son tour transporté de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant un trou dans la bande de valence. Cette absorption du photon entraîne une création des paires électron-trous.

Si l'énergie du photon est insuffisante, alors il n'est pas absorbé et il traverse le matériau sans transmettre son énergie.

Après création de paires électron-trous, si les porteurs ne sont pas extraits d'une manière suffisamment rapide de part et d'autre de la cellule, alors il y aura une recombinaison entre l'électron et le trou.

Pour cela, on impose un champ électrique interne à la cellule pour séparer les porteurs et pour orienter des porteurs chargés positivement et négativement en sens inverse.

La création du champ électrique interne est due à l'utilisation d'une jonction P/N constituée de deux matériaux semi-conducteurs dopés respectivement, positivement et négativement.

Lors du contact des deux semi-conducteurs il apparait trois régions :

Région dopée N, région dopé P, région interface des deux autres. Dans cette dernière il y a diffusion des porteurs libres majoritaires et recombinaison entre eux. Cette zone est appelée la zone de déplétion (zone de charge d'espace ZCE). Les charges portées par les atomes dopés qui ne sont plus à proximité d'un porteur libre de charges opposées, sont responsables de la formation d'un champ électrique. Ce dernier est à la base de la séparation des paires électron-trous photo

générées, bien sûr sous illumination, et à l'attraction des électrons dans le matériau dopé N et les trous dans celle dopé P, Tout cela fait naitre un photo courant.

La conversion photovoltaïque dans une cellule solaire repose sur :

- L'absorption de la lumière et la génération des paires électron-trous.
- La diffusion et la séparation des pairs électron-trous créés par photons.
- La collecte des charges : les pairs électro-trous se font retourner par voie d'un champ électrique de la jonction vers les régions où elles seront majoritaires (Figure.I.3) c.-à-d. les électrons vers l'émetteur (région type N) et les trous vers la base (région type P).

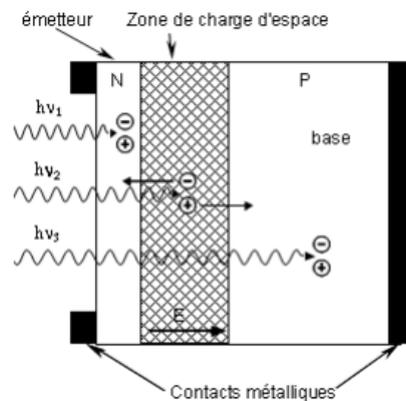


Figure.I.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [10].

La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction PN, le courant sous obscurité dans telle structure est donné par la formule suivante [11] :

$$I_{obs} = I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] \quad (I.2)$$

I_{obs} : le courant sous obscurité.

I_s : le courant de saturation de la diode.

q : charge de l'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19} C$);

V : tension appliquée.

K : constante de Boltzmann ($K = 1.38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$);

T : température absolu en Kelvin.

Le coefficient « n » est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égale à 1 si la diode est idéale, et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison) [12].

Et sous éclaircissement le courant est donné par la formule :

$$I = I_{obs} - I_{ph} = I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] - I_{ph} \quad (I.3)$$

I_{ph} : photocourant de la diode.

I.4 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque:

La modélisation électrique de la cellule photovoltaïque tient compte des différents paramètres :

- **Le générateur de courant** : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- **La résistance série R_s** : elle prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de silicium.
- **La résistance shunt R_p** : elle représente la résistance shunt qui modélise les fuites par l’effet de bord autour de la cellule solaire ; connue aussi sous le nom de résistance de court-circuit [13].
- **La diode d_1** : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l’émetteur.
- **La diode d_2** : modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d’espace.

n : facteur d’idéalité; il dépend des propriétés physiques et technologiques de la cellule.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donné par la relation :

$$I = I_{s1} \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] + I_{s2} \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I.4)$$

Le schéma équivalent de la cellule solaire est le modèle représenté à la Figure.I.4 suivante :

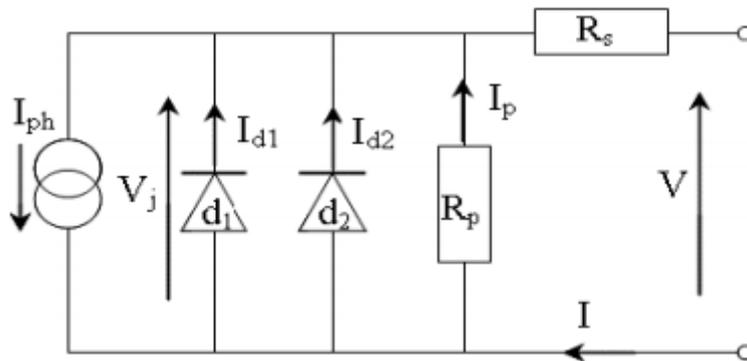


Figure. I.4 : Modélisation électrique d’une cellule photovoltaïque [11].

I.5 Caractéristiques d’une cellule solaire photovoltaïque:

Les paramètres d’une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (I-V) (Figure.I.5) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

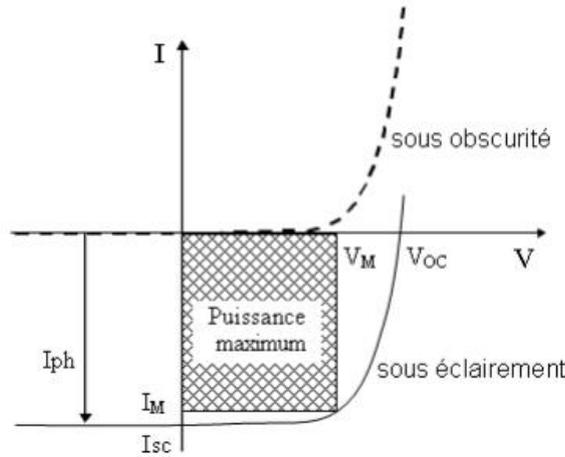


Figure. 1.5 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire sous obscurité éclairément.

I.5.1 Courant de court-circuit I_{cc} : Le courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au courant produit à tension nulle $V = 0$. Le courant est d'autant plus élevé que l'absorption de la cellule est grande et que les recombinaisons sont faibles.

I.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} : La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairément de la cellule.

$$I = 0 \rightarrow I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] - I_{ph} = 0$$

V_{co} : est donné par :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (I.5)$$

I.5.3 Facteur de forme (FF) : Le facteur de forme (FF) de la courbe I-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale. Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

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

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

I.5.4 Le rendement η : Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule P_{max} et la puissance lumineuse incidente $P_{incidente}$ [14] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{co} I_{cc} FF}{P_{incidente}} \quad (I.7)$$

Aussi faut –il ajouter à paramètres un point important ou le courant et la tension atteignent le maximum qui se définit par :

la puissance maximale P_m : Soit P maximal, il faut être dans les conditions où le produit V I est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile.

$$P_{max} = V_{max}I_{max} \quad (I.8)$$

I.6 Types des cellules photovoltaïques :

I.6.1 Cellules cristallines : Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. On distingue deux types de cellules cristallines :

I.6.1.1 Cellules en silicium polycristallin :

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains [15].

La qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinautes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes des grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de gains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction. Les techniques de production du silicium polycristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre [16]. Avec une efficacité de 12 % à 14% [17].

I.6.1.2 Cellules en silicium monocristallin :

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 % à 15% [17].



Figure.I.6 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [16].

I.6.2 Cellules à base de couches minces :

I.6.2.1 Cellules en Silicium amorphe :

Les cellules en silicium amorphe sont des cellules dont les atomes sont agencés sans réelle organisation ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Désorganisations de la matière entraîne des difficultés de déplacement des charges générées, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Il en résulte un faible rendement. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si : H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes [18]. Le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs), possède un rendement de 5 % à 7% sur une surface de 15m² [17].

I.6.2.2 Cellules CIGS :

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 µm d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n, par exemple du sulfure de cadmium (CdS), du cadmium... mais sur une épaisseur de 0,04 à 0,07 µm, seulement autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction. Rendements de conversion faible environ (7%, 11%) [18][17]. Comme son homologue au silicium amorphe, la cellule CIGS résiste mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe [18].

I.6.2.3 Cellules CdTe:

Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (CdTe) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium [18].

I.6.3 Cellules organiques :

Les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces

cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [19].

I.6.4 Cellules à haut rendement :

I.6.4.1 Cellules à jonction :

- Cellules tandem (Cellule micro-morphe) :

Quand on empile deux cellules simples l'une sur l'autre, on obtient des cellules tandem, La cellule « top » est mince (amorphe) et n'absorbe que les photons à haute énergie (bleue) tandis que la cellule « Botton » (en microcristallin) collectionne le reste des photons et les transforme en électricité par exemple : une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium cristallin. Ce tandem optimise le rendement comparé à celui produit par des cellules simples toutes seules et ce, qu'elles que soient leurs caractéristiques (amorphes, cristallines ou microcristallines).

Les cellules empilés l'une sur l'autre sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert des cellules si elles étaient prises toutes seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules.

Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites (Spectres d'absorption) différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption.

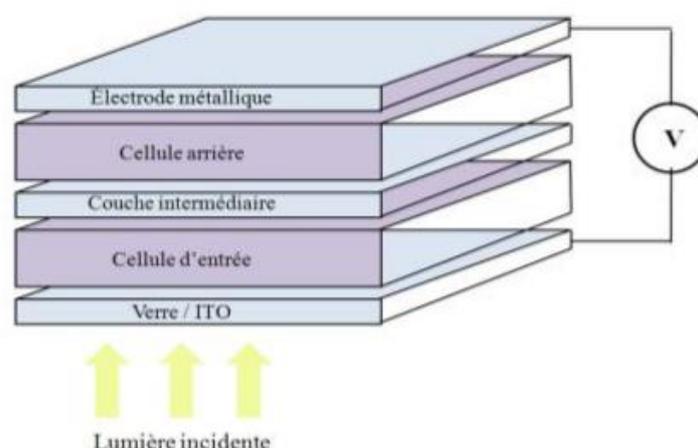


Figure.I.7 : Schéma d'une structure tandem [20].

I.6.4.2 Cellules multi-jonctions :

Les cellules multi-jonctions sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...) possédant chacun un spectre limité, de telle sorte que le choix des matériaux dont les longueurs d'onde limites soient les plus proches possibles les unes des autres. On obtient ces cellules multi-jonctions à partir de différentes couches minces, ce qui permet d'optimiser le travail d'absorption et obtenir un meilleur rendement, atteignant 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place. Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure.I.8). Ainsi, il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [6].

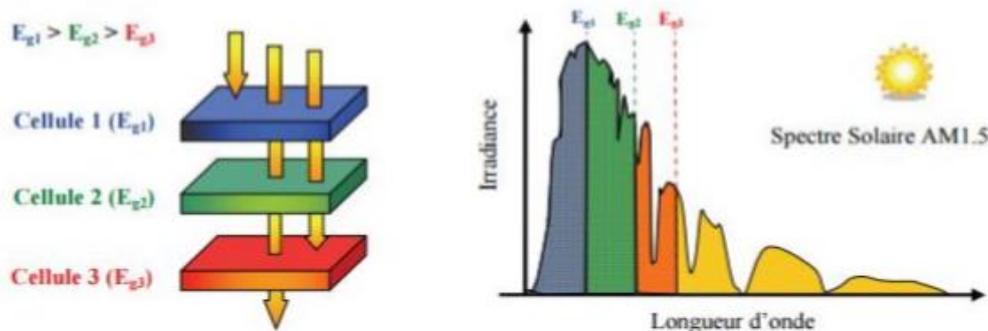


Figure.I.8 : Principe de la cellule à hétérojonction [6].

I.6.5 Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC) :

Inspiré par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 90 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié est de 10,4% pour une cellule de 1cm², réalisé par la société Sharp [21].

I.7 Architectures d'une cellule photovoltaïque : La cellule solaire est constituée de plusieurs couches qui sont présentées sur la Figure.I.9 :

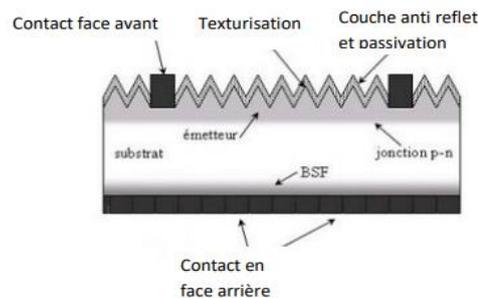


Figure.I.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [22].

I.7.1 Texturisation de la surface :

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium [23]. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement en forme de pyramide. Cette forme pyramidale du relief multiplie les réflexions dans le but de donner les chances à la lumière pour pénétrer dans le matériau. Dans le cas d'une réflexion double (Figure.I.10), son coefficient devient R^2 , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale sur cette surface. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

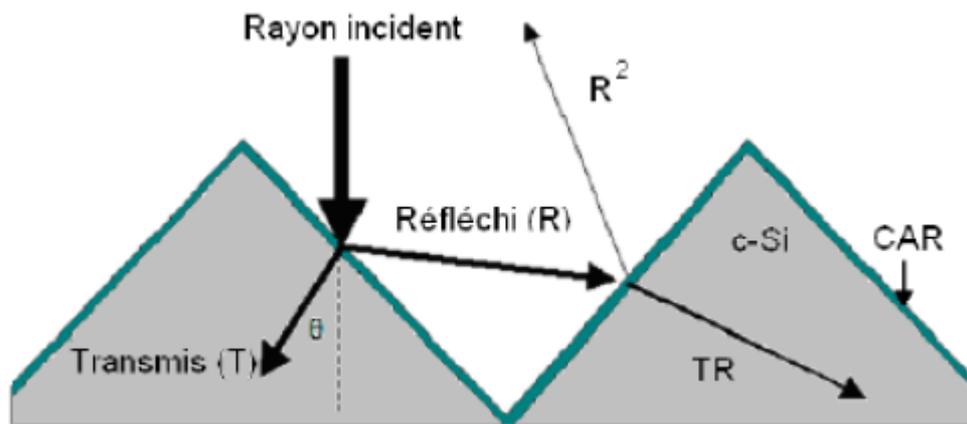


Figure.I.10 : Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée) [24].

I.7.2 La couche antireflet :

La cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface au niveau de la face avant, il faut que cette surface soit recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Réflexive Coatings CAR). La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le semi-conducteur.

La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau n_{CAR} , de l'épaisseur de la couche déposée d_{CAR} , de l'angle d'incidence λ et de l'état de polarisation du rayon incident.

De différentes couches anti-réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes: TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrices : ZnO ou l'ITO [25].

I.7.3 Champ électrique dans la zone arrière (BSF) :

La réalisation d'un champ électrique du type BSF (Back Surface Field) par transition abrupte de dopage sur la face arrière de la cellule solaire dans la zone de contact ohmique, permet de collecter les paires électron-trous qui sont créés par les radiations d'onde de spectre solaire. Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction, au lieu qu'il soit recombinaison dans ce voisinage. Ils participent à la photo-courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charges est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [14].

I.7.4 Les Contacts face, avant et arrière :

La collection du courant des porteurs photogénérés se fait par contacts métalliques de l'émetteur et du substrat. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractérisation ($I-V$) du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.

Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de 100 μm et une épaisseur de 10 μm à 30 μm [26] [27] permettant de conduire une forte densité de courant.

I.8 Influence de quelques paramètres extérieurs sur le rendement photovoltaïque :**I.8.1 Influence de la température :**

La température exerce une influence importante sur le comportement de la cellule, qui se manifeste principalement par :

- Une diminution de la tension générée,
- Et une légère augmentation du courant.

Donc, cette influence de la température aura aussi une influence sur le rendement de la cellule. Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux [28].

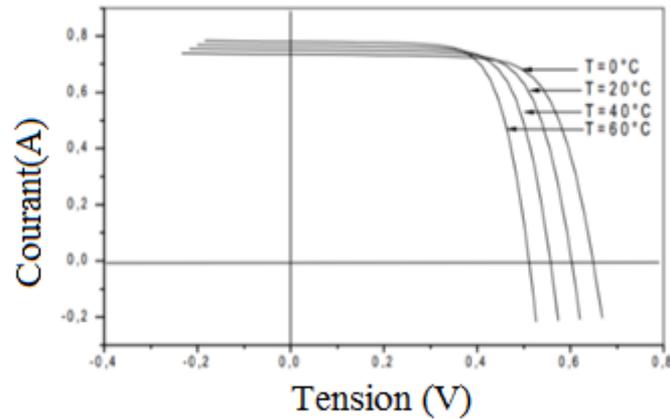


Figure.I.11 : Influence de la température sur une cellule solaire [28].

I.8.2 Influence de l'éclairement :

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m^2 . La nuit, il est nul ($0 W/m^2$). Il varie au cours de la journée entre 0 et $1000 W/m^2$ (valeur maximum), en fonction de la tension. L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de I_{cc} . Lorsqu'il double, I_{cc} double aussi. L'éclairement a très peu d'incidence sur la tension à vide V_{co} [28]

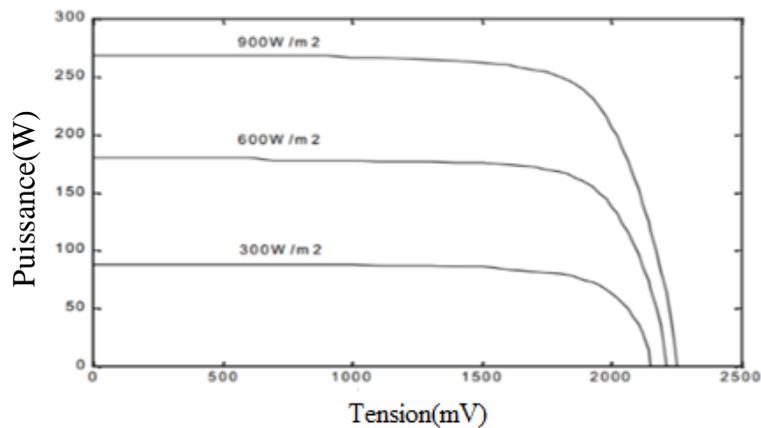


Figure.I.12 : Influence de l'éclairement sur la cellule solaire [28].

Chapitre II
Couche antireflet
et hétérojonctions

II.1 Introduction :

Dans cette section, on va exposer les bases fondamentales pour éclaircir la structure hétérojonction des cellules solaires et le rôle de la couche antireflet du TCO sur la cellule solaire comme suit :

On énonce l'état de l'art du TCO tout en mettant en évidence les propriétés optiques et électriques.

On discute aussi certaines conceptions sur la structure métal/semi-conducteur du point de vue description des phénomènes physiques qui la gère.

II.2 L'oxyde transparent conducteur (TCO) :**II.2.1 Définition :**

Les oxydes transparents conducteurs (Transparents Conductivité Oxydes) TCO sont des semi-conducteurs dégénérés à large gap (supérieur à 3.1 eV). Ils ont une transmission élevée (environ 90%). Ils constituent une classe unique de matériaux qui présentent à la fois la transparence dans le spectre du visible (longueur d'onde de 400 nm) et la bonne conductivité électrique simultanément [29]. En général, ces deux caractéristiques sont liées à l'épaisseur de la couche déposée. Par exemple, elles dépendent de la taille des grains, qui croit, habituellement, avec l'épaisseur du film.

Les oxydes d'indium, de cadmium, d'étain, de zinc et de gallium sont les plus connus parmi les TCO [30]. Couramment, les oxydes sont dopés par un métal. Cependant, ce dopant métallique n'est actif que lorsqu'il se substitue au métal primaire. La bande de conduction est, alors, fortement perturbée par chaque atome dopant, la diffusion des électrons de conduction est, alors, accrue, et la mobilité est en conséquence la conduction chute. C'est pourquoi certains oxydes sont dopés avec du fluor, qui, lorsqu'il se substitue à l'oxygène, engendre une perturbation de la bande de valence, ce qui minimise la diffusion des électrons de conduction [31].

Aussi, faut-il signaler que tous ces TCO sont de type N (les porteurs sont donc des électrons) et que la découverte récente de TCO de type P pourrait ouvrir la voie à une nouvelle électronique, même si leur conductivité est encore très mauvaise [32][33].

II.3 Les propriétés des TCO :

Les TCO présentent deux propriétés importantes qui sont propriétés optiques et propriétés électriques :

II.3.1 Les propriétés optiques :

Les propriétés optiques des matériaux sont régies par trois phénomènes essentiels qui sont : la transmission T, la réflexion R, l'absorption A.

II.3.1.a La transmission T :

La transmission optique est définie comme étant le rapport entre l'intensité de la lumière incidente (I_0) et l'intensité de la lumière transmise à travers le matériau (I_T).

$$T\% = 100 \cdot \frac{I_T}{I_0} \quad (\text{II.1})$$

II.3.1.b La réflexion R :

C'est l'intensité de la lumière qui est réfléchiée au niveau de sa surface (I_R) par rapport à l'intensité lumineuse incidente (I_0).

$$R\% = 100 \cdot \frac{I_R}{I_0} \quad (\text{II.2})$$

II.3.1.c L'absorption A:

C'est le rapport entre l'intensité de la lumière absorbée (I_A) et l'intensité lumineuse incidente (I_0).

$$A\% = 100 \cdot \frac{I_A}{I_0} \quad (\text{II.3})$$

La conservation du flux donne les relations :

$$I_0 = I_A + I_R + I_T \quad (\text{II.4})$$

On obtient alors la relation :

$$1 = A + R + T \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient d'absorption α :

La loi de Beer-Lambert permet de relier le flux transmis et l'épaisseur de la couche «d» au coefficient d'absorption illustré par l'équation suivante.

$$T = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (\text{II.6})$$

Avec T et R : transmission et réflexion du film TCO. d: l'épaisseur du film considéré.

« α » étant le coefficient d'absorption du film, il est lié au coefficient d'extinction k qui traduit l'absorption du rayonnement par le matériau par la relation suivante :

$$K = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (\text{II.7})$$

Les mesures de la transmission, de la réflexion et de l'épaisseur des oxydes transparents conducteurs permettent de déduire l'indice de réfraction n, le coefficient d'extinction k et le

gap E_g . Le spectre typique de la transmittance d'un film de TCO est représenté sur la Figure.II.1 qui montre trois régions distinctes : absorption, transmission et réflexion [34].

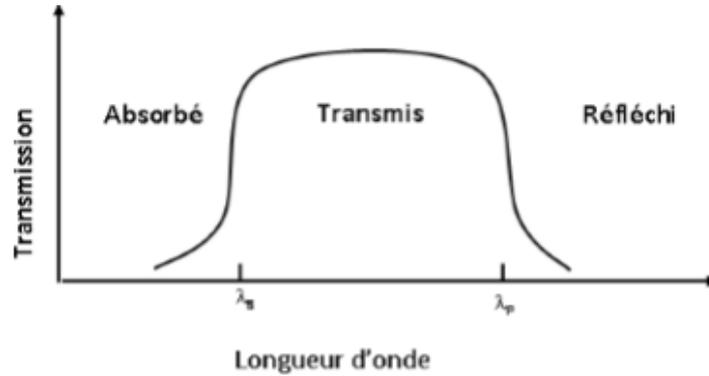


Figure.II.1 : La fenêtre optique des oxydes transparents conducteurs (TCO).

La fenêtre optique est centrée entre deux longueurs d'ondes caractéristiques où la lumière n'est plus transmise avec pour chaque zone un phénomène différent. À faible longueur d'onde dans le domaine de l'UV proche ($\lambda < \lambda_g$), l'absorption est dominée par les transitions bande à bande. Les photons incidents avec une énergie égale à celle du gap ou supérieure seront absorbés par des électrons de la bande de valence ce qui leur permettront d'aller dans la bande de conduction.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} \quad (\text{II.8})$$

h : la constante de Planck.

c : la vitesse de lumière.

À haute longueur d'onde, dans le domaine de le proche infrarouge ($\lambda > \lambda_p$), la lumière incidente est réfléchi par le matériau. (λ_p), qui est appelée longueur d'onde de plasma. Elle donne la fréquence de plasma par :

$$\omega_p = \frac{2\pi c}{\lambda_p} \quad (\text{II.9})$$

Ce phénomène peut être décrit par la théorie classique des électrons libres de Drude [35].

A cette longueur d'onde, la couche mince absorbe une partie du rayonnement incident, cette absorption dépend de la présence d'électrons libres dans le matériau, de sa concentration et de sa mobilité [36].

$$\lambda_p = 2\pi c \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_\infty \tau}{N e \mu}} \quad (\text{II.10})$$

Avec ϵ_∞ : la permittivité à haute fréquence. τ est le temps moyen entre deux collisions.

ϵ_0 : la permittivité du vide. μ : la mobilité des porteurs de charge.

II.3.2 Les propriétés électriques :

Les oxydes transparents conducteurs sont des oxydes semi-conducteurs à grand gap (E_g) décrit les propriétés électriques des TCO avec une conductivité électrique dans la gamme $10^4 - 10^5 S.cm^{-1}$.

II.3.2.a La conductivité électrique :

La conductivité électrique est due aux défauts intrinsèques (lacunes d'oxygène et atomes du métal dans des positions interstitielles) ou aux dopants extrinsèques.

Si un champ électrique E est appliqué à un matériau, la densité J en A/m^2 , est donnée par :

$$J = \sigma E \tag{II.11}$$

Et la mobilité des porteurs de charge μ ($cm^2V^{-1}S^{-1}$) et de la charge électrique élémentaire de l'électron q :

$$\sigma = q \cdot n_v \cdot \mu = \frac{1}{\rho} \tag{II.12}$$

ρ est La résistivité électrique, s'exprime en $\Omega.cm$ définie comme l'inverse de la conductivité.

II.3.2.b La résistance carrée :

La résistance carrée ou surfacique R_S est une propriété électrique de surface importante dans le domaine des TCO, elle est définie comme le rapport entre la résistivité ρ et l'épaisseur de la couche selon la relation suivante :

$$R_S = \frac{\rho}{d} \tag{II.13}$$

II.3.2.c La mobilité :

La mobilité est un paramètre qui influe sur la conductivité électrique, et l'augmentation de cette grandeur améliorera les propriétés électriques du l'TCO et s'exprimant en μ ($cm^2V^{-1}S^{-1}$). Cette relation est donnée par :

$$\mu = \frac{e \tau}{m^*} \tag{II.14}$$

Où τ est le temps moyen entre deux collisions, m^* est la masse effective de l'électron et e la charge d'électron.

II.4 Applications des TCO :

Les TCO sont utilisés dans de nombreuses applications différentes, telles que les cellules solaires, les capteurs de gaz, l'isolation des fenêtres et l'isolation thermique des lampes, la production de couches chauffantes de protection de pare-brise du véhicule contre le gel et le brouillard, les écrans tactiles, les vitrages "intelligents" écrans plats, fenêtre antigel fenêtre

réfléchissant la chaleur (four, bâtiment,...) , protection électromagnétique ou toutes autres applications optoélectroniques.

Je me contente uniquement de donner deux explications au TCO :

II.4.1 Cellules solaires :

Les TCO dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes. Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photogénérées. On peut utiliser les TCO dans tous les types des cellules solaires, telles qu'à-Si:H, poly-Si:H, CIGS, polymères, etc.

II.4.2 Couches protectrices ou intelligentes :

Les oxydes métalliques sont utilisés dans le domaine des fenêtres électrochromiques. Une fenêtre électrochromique est constituée de la superposition de plusieurs couches comprises entre deux plaques de verre. Deux couches de TCO y assurent les contacts électriques. Au centre, une solution d'électrolyte permet le passage des ions d'une électrode électrochromique à l'autre. Avec le passage d'un courant, la première couche électrochromique libère un ion qui se dirige vers l'autre couche par l'intermédiaire de l'électrolyte. Cet ion réagit avec la seconde couche électrochromique et le produit devient alors absorbant dans le domaine du visible. Ces matériaux sont utilisables pour réaliser des dispositifs tels que des miroirs chauffants (Heat Mirror films (HMF) [39]. Un exemple de cellule est donné à la Figure.II.2.

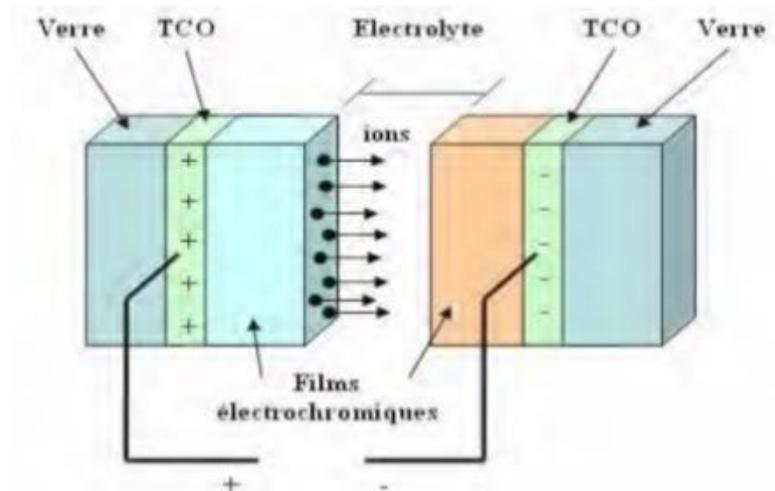


Figure.II.2 : Exemple d'une fenêtre électrochromique avec les différentes couches la composant [36].



Figure.II.3 : Quelques applications des TCO [38].

II.5 Les TCO les plus employés dans les cellules solaires :

II.5.1 L'oxyde de Zinc (ZnO) :

C'est un semi-conducteur de large gap, il est transparent dans le domaine visible [38]. Actuellement de nouvelles voies de recherches en optoélectronique suscitent un très vif intérêt pour ce matériau car ses propriétés sont multiples : grande conductivité thermique, grande capacité calorifique, constante diélectrique moyenne, haute résistivité, faible absorption. Il diffuse et absorbe fortement les rayonnements ultraviolets [25]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par ZnO sont : ZnO/Si(P) ; ZnO/Si(n) ; ZnO/Si(N)/Si(P) ; n-ZnO/p-CdTe.

II.5.2 Le dioxyde d'étain (SnO₂) :

Est un semi-conducteur de type n à large bande interdite (entre 3,5 et 4,1 eV) [39][40]. Le SnO₂ est un matériau chimiquement inerte et dur mécaniquement ; il résiste aux hautes températures et il est stable vis à vis de l'atmosphère [41]. Il facilite en particulier la décomposition de nombreux hydrocarbures au-dessus de 350°C. Ces propriétés assez particulières ont depuis très longtemps attiré l'attention des scientifiques qui ont tenté d'améliorer les performances électriques par différentes méthodes (stabilisation microstructurale, dopage...) [42]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par SnO₂ sont : SnO₂/Si(p) ; SnO₂/Si(N) /Si(P).

II.5.3 SnO₂ dopé In (ITO):

L'ITO est un semi-conducteur de type n fortement dégénéré à bande interdite directe (gap direct) variant entre 3.5 et 4.3 eV selon les auteurs, offrant ainsi une bonne transmission dans le domaine spectral du visible. Dans le cas où l'ITO est dégénéré, le niveau de Fermi est situé à l'intérieur de la bande de conduction (niveau E_c), son comportement est alors quasi métallique [43]. Deux causes sont à l'origine de cette dégénérescence : les lacunes d'oxygène et l'étain en substitution. La concentration des porteurs de charges d'un TCO performant est comprise entre $10^{20} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. L'ITO présente généralement une résistivité électrique $\rho \approx 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. Cette faible résistivité électrique est due à une importante concentration de porteurs [44]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par ITO sont : n-ITO/p-InP ; n-ITO/p-CdTe ; n-ITO/p-Si.

II.5.4 SnO₂ dopé F (FTO):

Les films de SnO₂ dopé fluor sont polycristallins (taille de grain, $\approx 400 \text{ \AA}$) et cristallisés suivant la structure rutile sans aucun changement dans le paramètre de maille. La diffraction des rayons X pour des films de SnO₂:F déposés par spray pyrolyses à différentes températures, montre une orientation préférentielle (200) parallèles au substrat. Ces films ont généralement une haute mobilité (environ $25-50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$) que SnO₂ ou d'ATO [45]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par FTO sont : SnO₂ : F/Si(P) ; SnO₂ : F/Si(N)/Si(P).

II.6 Les hétérojonctions :

II.6.1 Cellule homojonction :

La cellule homojonction est la conversion d'énergie qui repose sur l'absorption des photons par un seul type de semi-conducteur. Ce semi-conducteur est subdivisé en deux zones : la zone p, dopée avec des éléments chimiques accepteurs d'électrons tels que le bore et la zone n, dopée avec des éléments chimiques donneurs d'électrons comme le phosphore. La cellule homojonction est une cellule conventionnelle, car elle n'est pas réalisable. C'est pour cela on s'est intéressé à l'étude de la cellule hétérojonction.

II.6.2 Cellule hétérojonction :

Une hétérojonction est une jonction formée entre deux matériaux semi-conducteurs différents cristallin ou non cristallin [46]. Tel que la conversion d'énergie repose sur l'absorption des photons par deux types de semi-conducteurs.

II.7 Contact métal/Semi-conducteur :

On appelle structure métal/semi-conducteur tout dispositif unipolaire, le plus simple, qui constitue la base d'un grand nombre de structures complexes. Il se produit des échanges d'électrons de façon à aligner les niveaux Fermi, lorsqu'on met en contact un métal et un semi-conducteur.

Les contacts métal/semi-conducteur peuvent avoir des comportements de redresseurs ou ohmiques (Tableu.II.1).

Contact	Semi-conducteur de type n	Semi-conducteur de type P
Redresseur	$\phi_M > \phi_{Sc}$	$\phi_M < \phi_{Sc}$
Ohmique	$\phi_M < \phi_{Sc}$	$\phi_M > \phi_{Sc}$

Tableu.II.1 : Contact ohmique où redresseur selon les travaux de sortie de chaque élément.

ϕ_M : le travail de sortie du métal.

ϕ_{Sc} : le travail de sortie du semi-conducteur.

Le fonctionnement des cellules solaires repose sur le contact Schottky « redresseur » du type métal semi-conducteur.

II.7.1 Cas ou $\phi_m > \phi_s$:

Semi-conducteur type n :

Les électrons qui se trouvent dans les semi-conducteur de type n ont une énergie supérieure à ceux qui sont dans le métal. Dans le cas du contact, les électrons du semi-conducteur se diffusent vers le métal jusqu' à obtenir l'alignement des niveaux de Fermi. Les électrons qui sont diffusés depuis le semi-conducteur s'accumulent sur l'interface du métal jusqu' à alignement des niveaux de Fermi. Ce dernier est dû à l'abaissement des bandes de conduction et de valence d'une quantité de $e\phi_{bi}$ (contact redresseur).

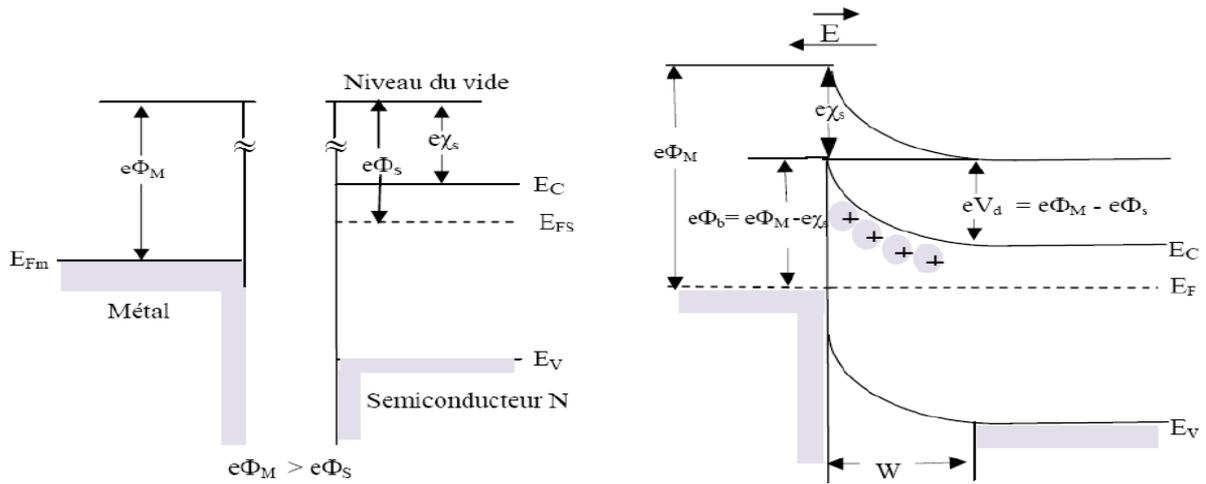


Figure.II.4 : Cas où le semi-conducteur est de type n.

II.7.2 Cas ou $\Phi_m < \Phi_s$:

Semi-conducteur type P :

Dans ce cas, l'énergie des électrons dans le métal est supérieure à celle des électrons du semi-conducteur. Puisque les énergies des électrons du métal et du semi-conducteur sont différents alors la diffusion des électrons se fait du métal vers le semi-conducteur, et ce, pour réaliser l'alignement de niveau de Fermi, qui est accompagné d'une courbure de bande d'énergie du semi-conducteur vers les basses énergies, et d'un déficit d'électron à l'interface du métal, et sur le côté du semi-conducteur. Se trouve une zone de charge d'espace négative. Les ions négatifs qui se trouvent dans le semi-conducteur de type vont être ionisé par les électrons provenant du métal ce qui en résulte une zone de charge d'espace du (ZCE) vide de porteur dans le semi-conducteur.

La tension de polarisation sera localisée au niveau de la (ZCE) du semi-conducteur dès la mise sous tension de la structure en question (contact redresseur).

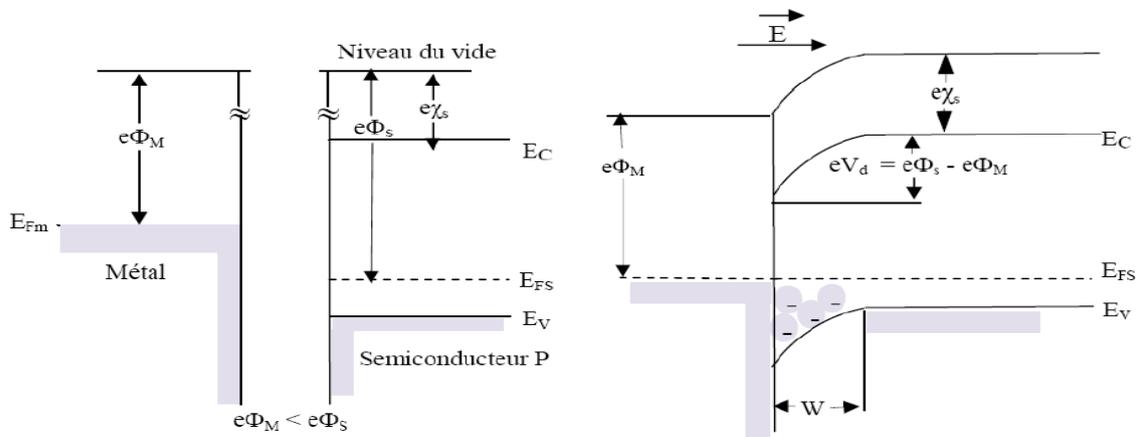


Figure.II.5 : Cas où le semi-conducteur est de type p.

Le courant électrique traversant le contact avec le courant thermoélectronique :

Si le semi-conducteur du type n est :

$$\phi_B = \phi_M + \chi_{SCn} \quad (\text{II.15})$$

Alors la barrière Schottky (V_d) entre le semi-conducteur et le métal est:

$$V_d = \phi_M - \phi_{SC} = \phi_M - \chi - \frac{E_C - E_{Fn}}{q} \quad (\text{II.16})$$

Si le semi-conducteur du type p est :

$$\phi_B = E_g + \chi_{SCp} - \phi_M \quad (\text{II.17})$$

Alors la barrière Schottky (V_d) entre le semi-conducteur et le métal est:

$$V_d = \phi_{SC} + \phi_M = \chi + \frac{E_C + E_{Fp}}{q} - \phi_M \quad (\text{II.18})$$

ϕ_B : travail de sortie du métal.

χ_{SC} : affinité électronique du semi-conducteur.

E_C : niveau d'énergie de la bande de conduction.

E_{Fn} : niveau d'énergie du niveau de Fermi du semi-conducteur type n.

E_{Fp} : niveau d'énergie du niveau de Fermi du semi-conducteur type p.

A l'interface entre le métal et le semi-conducteur, il y a émission thermoélectronique par-dessus de la barrière de potentiel.

Le courant qui est dirigé du semi-conducteur vers le métal s'écrit :

$$J_{SC \rightarrow M} = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{KT}\right)} e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)}$$

$$J_{SC \rightarrow M} = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{KT}\right)} e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} \quad (\text{II.19})$$

T étant la température, K la constante de Boltzmann et $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$ la constante de Richardson, m^* est la masse effective d'un électron libre et h est la constante de Planck.

Le courant qui est dirigé du métal vers le semi-conducteur s'écrit :

$$J_{M \rightarrow SC} = -A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{KT}\right)} \quad (\text{II.20})$$

Le courant thermoélectronique J_t est la somme des deux courants précédant selon la relation :

$$J_t = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{KT}\right)} \left(e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} - 1 \right)$$

$$J_t = J_s \left(e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} - 1 \right) \quad (\text{II.21})$$

Avec $J_s = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{KT}\right)}$ est le courant de saturation.

La courbe de caractéristique $J(v)$ a la même allure que pour la jonction PN.

II.8 Dynamique des photo-porteurs :

Au cours de la conversion photovoltaïque dans une cellule solaire à hétérojonction il se produit le phénomène de la recombinaison de surface et la recombinaison volumique.

II.8.1 La recombinaison volumique :

Cette dernière se divise en trois recombinaisons à savoir :

II.8.1.1 La recombinaison radiative :

Dans une cellule solaire l'électron absorbe l'énergie du photon, puis passe de la bande de valence vers la bande de conduction, d'où création d'une pair électron-trous. La recombinaison radiative est le phénomène inverse de la génération par illumination où l'électron perd son énergie en revenant à la bande de valence pour libérer le photon. L'énergie du photon résultant de la recombinaison est égale à l'énergie du gap, qui peut participer à la génération d'électron-trou. Ce type de recombinaison est négligeable dans le silicium à gap indirect.

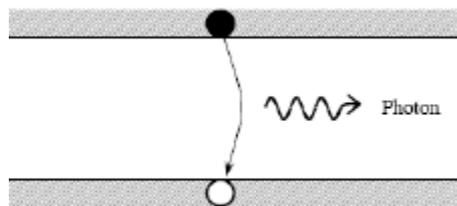


Figure.II.6 : Schéma représentant la recombinaison radiative.

II.8.1.2 La recombinaison Auger :

On dit qu'il y a une recombinaison Auger quand l'électron transmet son énergie à son voisin. Ce déficit d'énergie oblige l'électron à retomber en bande de valence mais l'électron qui vient de profiter de l'apport d'énergie l'emmagasine en tant qu'énergie potentielle. Il est présent principalement, dans les semi-conducteur fortement dopé, c'est-à-dire, il existe un grand nombre de porteurs dans la bande de conduction dans le semi-conducteur.

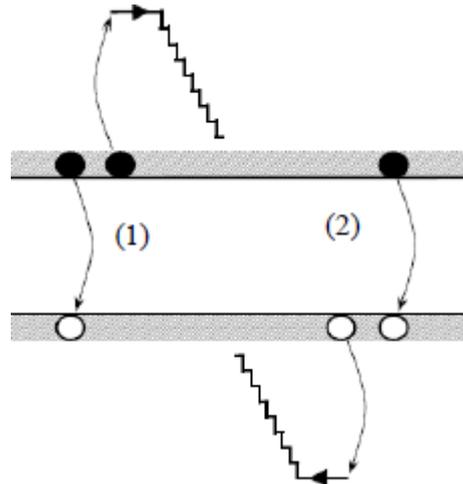


Figure.II.7 : Schéma représentant la recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron ou un trou.

II.8.1.3 La recombinaison de Shockley-Read-Hall (SRH):

Quand il y a des défauts dans le matériau on a, une recombinaison SRH. Ces défauts occasionnent des niveaux d'énergie parasites à se constituer à l'intérieur du gap du semi-conducteur. Au cours du transport de porteur de charge de la bande de valence à la bande de conduction, les niveaux d'énergie parasites piègent momentanément, les porteurs de charge.

Pour un seul niveau énergétique de défauts [47] :

$$R^{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + p_1) + \tau_p(n + n_1)} \tag{II.22}$$

n_1 et p_1 sont donnés par la statistique de Fermi pour le niveau d'énergie du piège considère :

$$n_1 = n_i e^{\frac{E_t}{kT}} \qquad p_1 = n_i e^{\frac{-E_t}{kT}}$$

E_t la position énergétique d'état de piège et n_i est la concentration intrinsèque.

τ_p et τ_n sont respectivement la durée de vie pour les trous et les électrons.

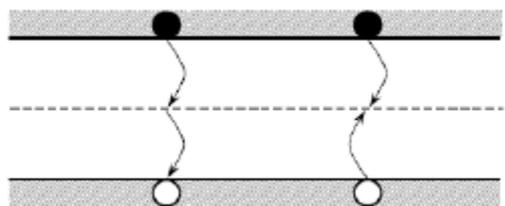


Figure.II.8 : Schéma représentant la recombinaison SRH.

II.8.2 La recombinaison de surface :

La discontinuité du réseau cristallin du silicium dans l'endroit de la recombinaison de surface génère une densité élevée de centres de recombinaison. La plupart de ces recombinaisons de surface est du genre SRH.

Le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall en surface est donné par l'expression :

$$R_{Surf}^{SRH} = \frac{S_n S_p (np - n_i^2)}{S_p (p + p_1) + S_n (n + n_1)} \quad (II.23)$$

S_n , S_p sont respectivement la vitesse de recombinaison en surface pour les électrons et les trous.

II.9 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque du type Métal-Semi-conducteur :

L'effet photoélectrique, ou la capacité des photons à créer des porteurs de charge est à la base de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Outre l'absorption des photons par le semi-conducteur ils transmettent leur énergie aux électrons par collision, et ce dans le cas d'une homojonction. La création des paires d'électrons-trous dans la zone de déplétion par arrachement des électrons se fait lorsque l'énergie transmise par les photons est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent ; sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone ; ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PN et une différence de potentiel.

Selon l'énergie du photon il peut se produire deux processus lorsque l'hétérostructure métal/semi-conducteur est éclairée :

- Il y a création d'une paire électron-trou, si l'énergie du photon est supérieure au gap du semi-conducteur. Cette paire sera séparée par le champ électrique interne lorsqu'elle est créée dans la jonction ou proche de celle-ci.
- Les électrons du métal passent du côté semi-conducteur si l'énergie du photon est plus grande que celle de la hauteur de barrière métal semi-conducteur ϕ_B .

II.10 Cellule solaire hétérojonction type SnO₂/Si(P) :

Les convertisseurs photovoltaïques à faible coût avec un rendement supérieur à 10% résultent des hétérostructures à base de matériau conducteur transparent en contact avec un semi-conducteur à faible bande interdite tel que le silicium [48][49].

Dans notre étude, on s'est basé sur les cellules solaires à hétérojonction, car elles présentent un coût de fabrication faible à l'élimination des étapes à hautes températures de la fabrication de la jonction et ces dernières ne nécessitent pas de dépôt d'une couche antireflet contrairement aux cellules solaires à homojonction PN. Le rendement théorique des cellules en question (SnO₂/Si(P)) a atteint l'ordre de 20%. Mais sur le plan expérimental il n'y a en que 9% de rendement [50] [51].

La bande d'énergie de la cellule solaire SnO₂/Si(P) est représentée par le diagramme ci-dessous dans la Figure.II.9.

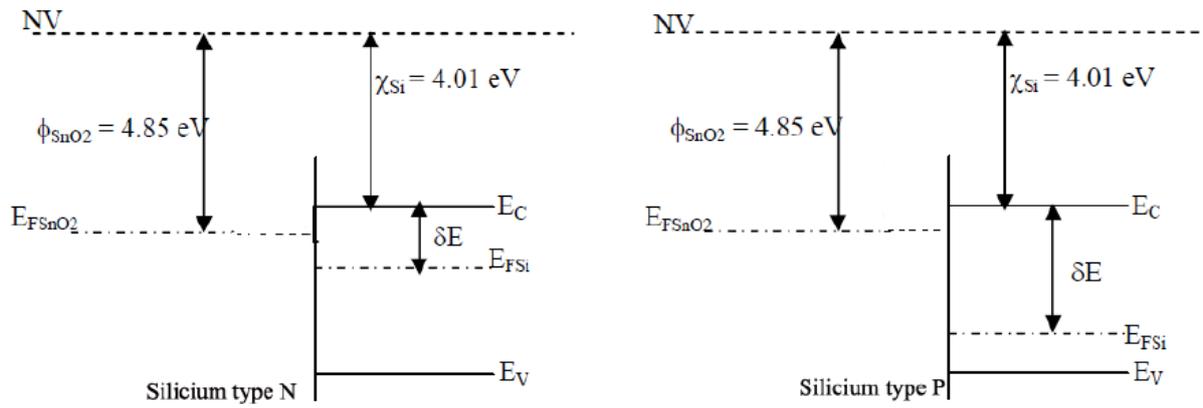


Figure.II.9 : Le diagramme de bande d'énergie d'hétérostructure du type SnO₂/Si.