

Energie solaire photovoltaïque

Introduction :

Dans ce chapitre on va donner les notions fondamentales sur l'énergie solaire photovoltaïque, les cellules solaires, du rayonnement solaire.... Nous verrons les phénomènes qui interviennent entre la lumière incidente du soleil et le semi-conducteur (absorption d'une lumière et génération d'une paire électron-trous), nous verrons aussi le principe de fonctionnement de la cellule, afin de déterminer les différents paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque. Ainsi, les différentes couches formant la cellule a base de CIGS.

III-1 Notions sur le rayonnement solaire :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil, la surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à température d'environ 5800 K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm pour une puissance d'environ 6025 MW/m^2 . En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36 kW/m^2 hors atmosphère.

La notion d'Air Mass (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

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

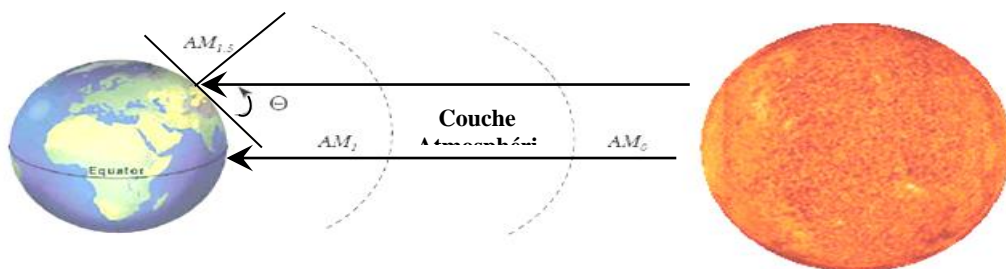


Figure III-1 Description du nombre d'air masse

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta = 0^\circ$, $AM=1$: la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m², mais a été arrondi à 1kW/m². L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante.

$$I_D = 1.353(0.7^{AM})^{0.678} \quad (\text{III-2})$$

Avec I_D en kW/m², pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure III- 2.

La Figure III-2, montre que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire.

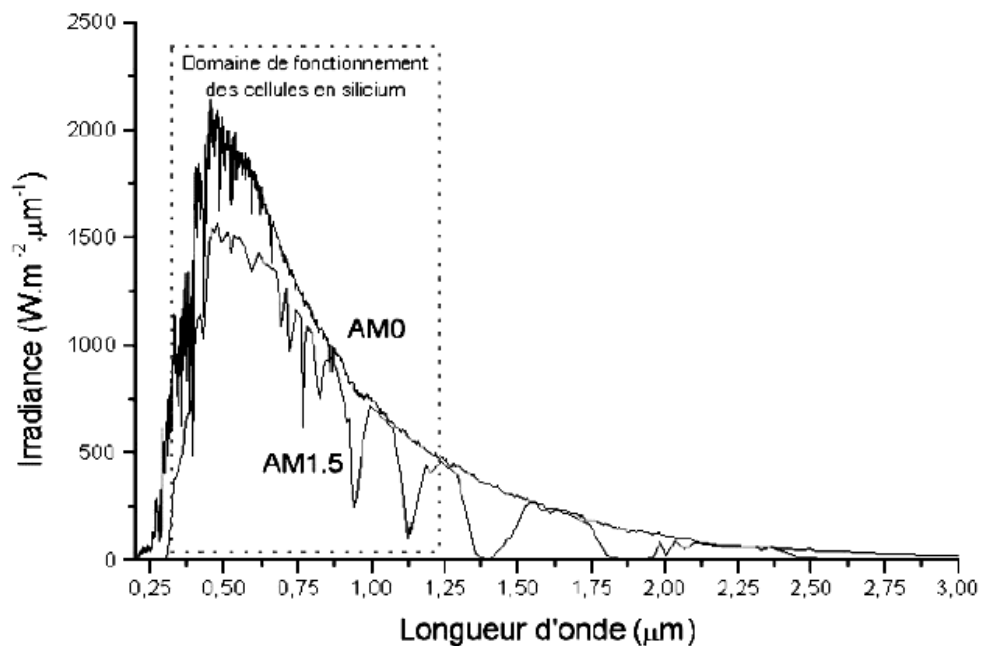


Figure III-2: La représentation graphique des spectres AM0 et AM1,5. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence

III-2- Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839, il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5% . Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

III-2-1- L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure (III-3) présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure I-3 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I-3 (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

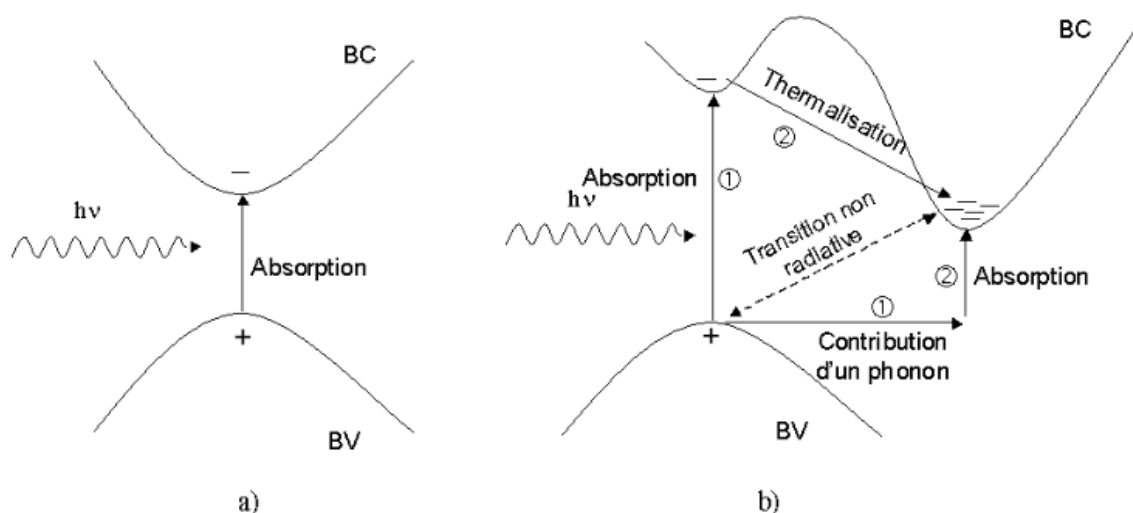


Figure III-3 Transition inter-bandes d'électron dans un semi-conducteur, le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure III-3 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition [15].

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

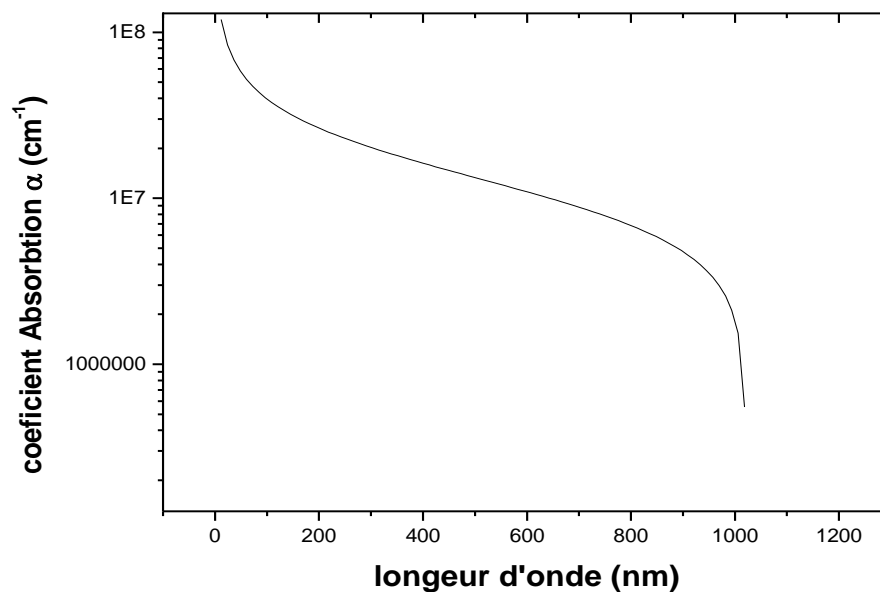


Figure III-4 : Coefficient d'absorption du CIGS de $E_g=1.2\text{eV}$ en fonction de la longueur d'onde

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau.

III-2-2- Absorption Optique

Les théories fondamentales de la lumière nous permettent de connaître d'abord les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux, dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation [16].

$$E_P (\text{eV}) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (\text{III-3})$$

ν : Fréquence de la radiation

λ : Longueur d'onde de la radiation en μm

c : Vitesse de la lumière

E_P : Énergie du photon en eV

h : Constant de Planck

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert-Bouguer

$$I(x) = I(1 - R) \exp(-\alpha x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{III-4})$$

x : profondeur d'absorption du faisceau dans la matériau à partir de la surface du semi-conducteur

R : coefficient de réflexion, représente la part de l'énergie lumineuse incident I , réfléchi à la surface du matériau

α : Coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur, Il change selon le matériau.

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence sur la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer Ce phénomène appelé mode d'absorption intrinsèque dans les piles solaires.

III-3-Génération Optique

Dans un semi-conducteur homogène, l'intensité incidente diminue dans le matériau, en vertu d'une loi exponentielle donnée par la relation.

$$I(x) = I(1 - R) \exp(-\alpha x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{III-5})$$

Le taux d'absorption des photons dans le semi-conducteur (en $\text{photon} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) s'exprime par

$$\beta = \frac{\partial \Phi(x, \lambda)}{\partial x} = \alpha \Phi(x, \lambda) \quad (\text{III-6})$$

$\Phi(x)$ Étant le flux de photons à la profondeur x de la surface (en $\text{photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

α : Coefficient d'absorption en cm^{-1} .

III-4- Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

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

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction *pn*. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (III-4).

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. La photo-porteuse aura un comportement différent suivant la région:

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

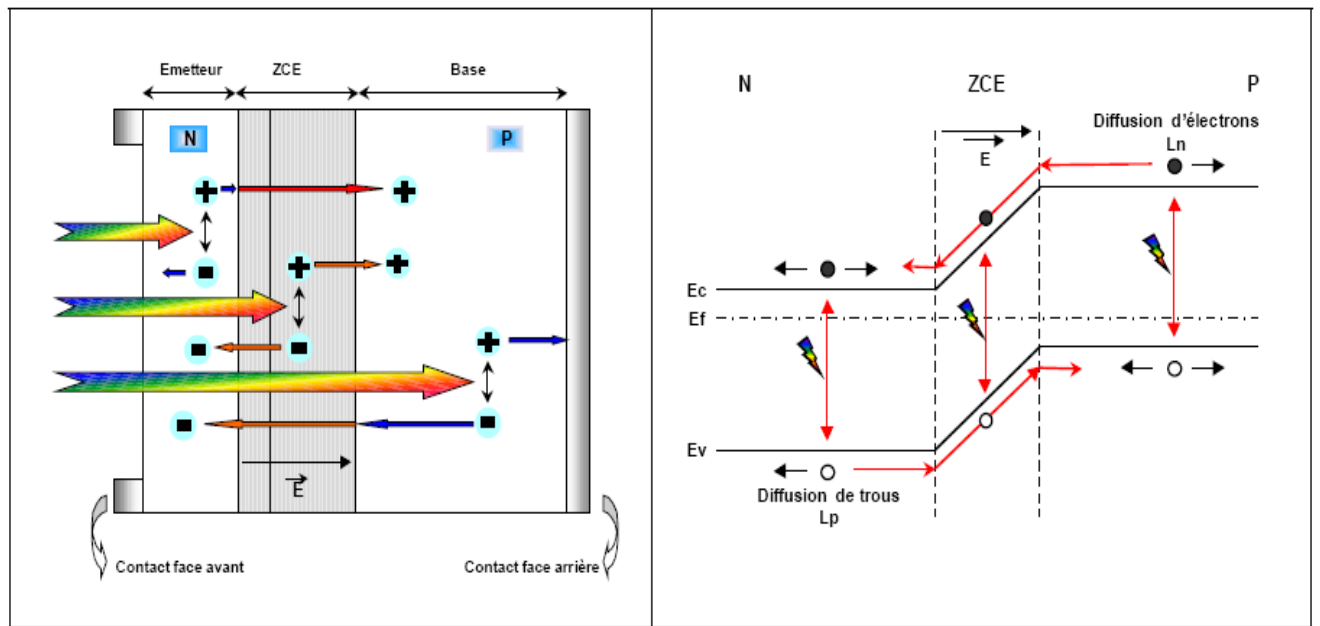


Figure III.5 : Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de bande (à droite).

- Lorsque la cellule à l'obscurité :

Le courant dans une telle structure de type jonction *p-n* est appelé courant d'obscurité et a la forme suivante [15]:

$$I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \tag{III-7}$$

Avec : q = charge élémentaire = $1.6 \cdot 10^{-19}C$

V = tension aux bornes de la jonction (V)

k = constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$

T = température (K)

I_s = courant de saturation inverse de la jonction p-n

n = coefficient d'idéalité de la jonction

Ce courant d'obscurité correspond au **courant de la diode** (I_d), il résulte de la polarisation de la jonction.

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors [15]:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \tag{III-8}$$

Soit :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \tag{III-9}$$

III-5-Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres électriques d'une solaires généralement sont :

ICC : courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$) ;

VCO : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$) ;

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

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

η : rendement de conversion ;

FF : facteur de forme.

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

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (\text{III-10})$$

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

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

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{III-11})$$

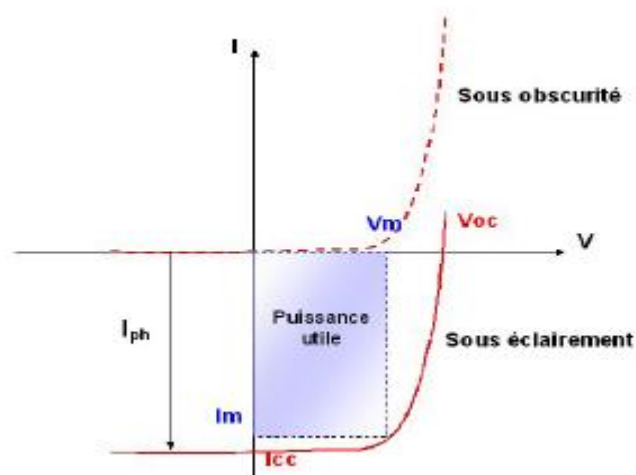


Figure III-6 : Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque

III-6- Le Rendement Quantique :

Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photo-générés. Ce terme tient donc compte des recombinaisons de porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule, et il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire).

$$QE(\lambda) = \frac{\Delta J / q}{\Phi} \quad (\text{III-12})$$

Avec Φ en $[\# / \text{cm}^2 \text{s}]$.

I-7- Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque :

La figure I-6 propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photo-généré ainsi que des résistances complémentaires, R_s et R_p , et deux diodes $d1$ et $d2$.

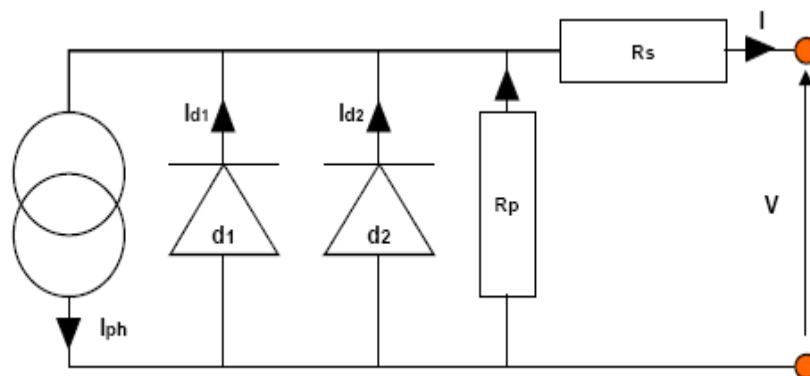


Figure III-7 : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- a-** *Le générateur de courant* : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- b-** *La résistance série R_s* : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur,

et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

- c- *La résistance parallèle R_p* : également connue sous le nom de résistance de court-circuit, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.
- d- *La diode $d1$* : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.
- e- *La diode $d2$* : modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

$$I(v) = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - \frac{V_j}{R_p} =$$

$$I_{ph} - I_{s1} [\exp(\alpha_1 V_j) - 1] - I_{s2} [\exp(\alpha_2 V_j) - 1] - \frac{V_j}{R_p} \quad \text{(III-13)}$$

Avec:

$V_j = V + I R_s$ (dans le cas où la courbe I-V est représentée dans le quadrant correspondant au courant et à la tension positifs) ;

I_{ph} : courant de photo-génération ;

I_{d1} : courant de génération recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace.

I_{d2} : courant de diffusion dans les zones neutres ;

R_p : résistance parallèle ;

R_s : résistance série ;

I_S : courants de saturation ;

$\alpha = q/(nkT)$ avec n : facteur d'idéalité de la diode ;

I-8. Différentes filières photovoltaïques en couches minces

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une couche photoconductrice, dite couche absorbante, qui transforme le rayonnement lumineux en paires électrons trous. Par la suite, ces porteurs créés sont collectés en réalisant une jonction à la surface de cette couche absorbante. Cette jonction peut être soit une homojonction, c'est le cas de la filière

classique silicium, soit une hétérojonction, c'est à dire une jonction avec deux semi-conducteurs différents, soit une jonction Schottky, c'est à dire un contact métal -semi-conducteur Dans le domaine des couches minces, il existe trois principales filières:

- la filière du silicium microcristallin et/ou amorphe
- la filière Tellurure de Cadmium / Sulfure de Cadmium
- la filière des composés à structure chalcopyrite basée sur le CuInSe₂ (CIS)

Ce dernier qui nous intéresse et faire l'objet de notre travail.

III-9-La filière chalcopyrite Cu-III-VI₂

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques CuInSe₂/CdS par S. Wagner et coll de Bell Téléphone en 1974-1975. S. Wagner et coll avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n CuInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10 nm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers «la fenêtre» CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (70%) uniformes entre 0,55 et 1,25µm. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement CuGaSe₂, CuInS₂, Cu(InAl)Se₂ et Cu(InGa)Se₂ dont les caractéristiques structurales, optiques ainsi que les rendements actuels en couches minces sont indiqués au Tableau (III-1).

Matériau	a(nm)	c(nm)	E _g (eV)	Rendement(%)
CuGaSe ₂	0,560	1,099	1,67	8,3
CuInS ₂	0,551	1,106	1,53	11,4
Cu(InAl)Se ₂	0,575	1,145	1,16	16,9
CuInSe ₂	0,577	1,155	1,02	15,4
Cu(InGa)Se ₂	0,572	1,143	1,12	18,8

Tableau (III-1) : Caractéristiques des couches absorbantes chalcopyrites.

Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1,5-2 µm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire (contre 100 mm pour le silicium). Les deux principales méthodes de préparation de la couche absorbante de modules à hauts rendements sont la vaporisation et le dépôt séquentiel des différents constituants (ou des métaux précurseurs) suivi d'un recuit (sous atmosphère de chalcogène). Cependant, d'autres

techniques sont aussi utilisées telle que la méthode de dépôt par voie électrochimique, procédé de faible coût, qui permet le dépôt des différents composants de la cellule solaire avec des rendements prometteurs. Le matériau le plus prometteur semble être le CIS. Cependant, sa faible bande interdite (1,02 eV) limite la tension de circuit ouvert et donc le rendement de la photopile. Aussi, les travaux sur les cellules solaires à base de CIS portent aujourd'hui sur des alliages quaternaires Cu(InGa)Se_2 (CIGS). On introduit le Ga, qui se substitue partiellement à In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite.

III-10. Photopile à base de Cu(In,Ga)Se_2

III-10-1. Généralités :

La majorité des connaissances fondamentales sur les composés ternaires à base de CuInSe_2 a été établie avant les années 1980 tandis que les propriétés électriques, optiques et structurales de chalcopyrites ternaires semi-conducteurs $\text{Cu(Al,Ga,In)(S,Se,Te)}_2$, ont été examinées dans les années 1960 et les années es 1970. En 1974, Wagner a produit la première photopile à grand rendement (12,5 %) avec un dispositif $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ où le CdS (type n) était évaporé sur un cristal de CuInSe_2 de type p. Par la suite, un regain d'intérêt pour ces matériaux a eu lieu lors de la réalisation d'une cellule en couches minces avec un rendement de 9,4 %. En employant des alliages à base de Cu(In,Ga)Se_2 et de CuIn(S,Se)_2 des couches de bandes interdites plus larges ont été réalisées avec des tensions de circuit ouvert plus importantes. Par la suite, des couches à gradient de composition ont été réalisées permettant d'obtenir des valeurs de V_{oc} importantes tout en conservant des valeurs de J_{sc} identiques. Les valeurs des bandes interdites et les structures cristallographiques de ces composés ternaires et de leurs alliages ont aussi été examinées par calcul théorique dans les années 1980. Ces études ont montré qu'un alliage continu semblable à ceux obtenus dans les composés III-V pouvait être obtenu. L'examen de la physique des défauts dans ces matériaux est toujours en cours. Une compréhension du fonctionnement de base de la jonction p-n dans ces dispositifs photovoltaïques a commencé à être établie dans les années 1980. L'analyse a montré que le haut rendement obtenu dans ces photopiles était contrôlé par la recombinaison de la lumière dans le matériau actif absorbant, c'est-à-dire le CuInSe_2 ou ses alliages. Ceci vient du fait que le type de porteurs s'inverse dans ce matériau près de la jonction (probablement grâce à la diffusion n du cadmium du CdS), ce qui élimine la recombinaison d'interface comme mécanisme de perte. La recombinaison est alors contrôlée par des états dans la bande interdite de cette région. La perte de porteurs minoritaires aux joints de grains dans la couche absorbante est aussi réduite du fait que les joints de grains sont plus fortement

dopés que les grains. Le sodium est lui aussi un élément important dans la réalisation de cellules à fort rendement. Il provient soit directement du substrat de verre sodé soit d'une source extérieure, et permet une croissance et une texturation plus importante des grains, ainsi qu'une plus grande conductivité. Dans le secteur industriel, un certain nombre de sociétés commencent le développement commercial de modules photovoltaïque à base de CuInGaSe_2 . Parmi celles-ci, Siemens Solar Inc. (SSI), maintenant Shell Solar, est la plus avancée avec actuellement plusieurs modules de 12 V commercialisés (de 5 à 40 W). Les rendements moyens des modules sont de l'ordre de 9% avec une valeur maximale de 12%. On peut aussi citer la société Würth Solar GmbH, qui développe des modules déposés sur verre avec des rendements de l'ordre de 12% et 11% pour ceux sans cadmium. La société GSE (Global Solar Energy) développe pour sa part des modules flexibles en employant du polyamide ou de l'acier inoxydable comme substrat. Des rendements de l'ordre de 10% ont été obtenus sur des modules de faibles tailles. La société Energy Photovoltaics Inc (EPV) développe une technologie basée sur la déposition par voie physique de CuInGaSe_2 et projette de construire des sites industriels avec 1 MW de capacité au New Jersey, 10 MW en Allemagne et 5 MW en Californie. International Solar Electric Technology (ISET) et Unisun pour leur part développent des procédés ne nécessitant pas de pompes à vides. Leurs technologies se basent sur la pulvérisation chimique et l'impression de poudres de précurseurs sur des substrats recouverts de molybdène. Les rendements sont de l'ordre 11%.

III-10-2. Différents composants de la cellule CIGS

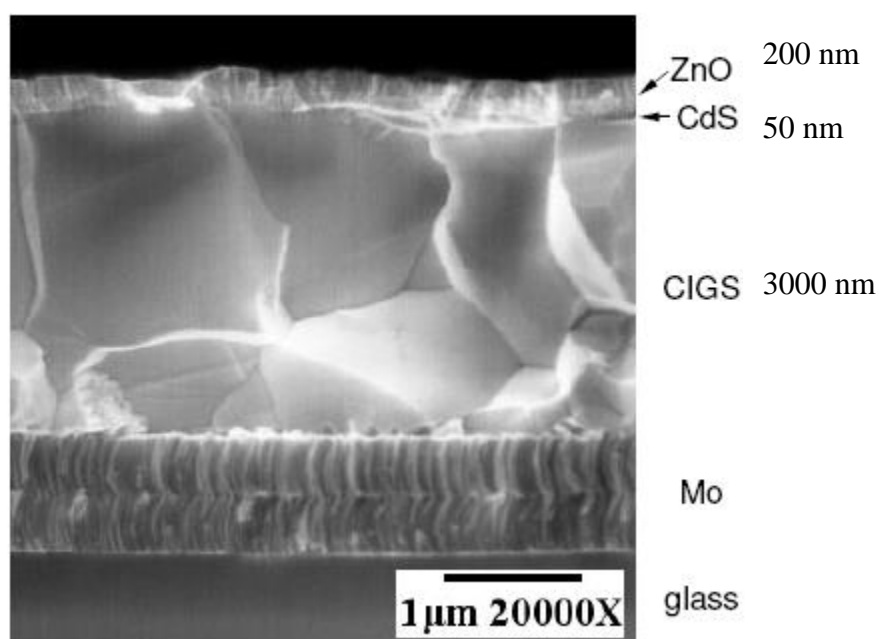


Figure III-8 : Image SEM d'une photopile en couches minces de type

CIGS de K. Ramanathan, NREL.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure (I-8) (cas du CIGS), il existe six éléments principaux dans la photopile en couches minces, à savoir :

- *le substrat* : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques.
- *un contact ohmique inférieur* : souvent le Mo.
- *une couche absorbante* : dans le cas présenté, le CIGS, de type p.
- *une couche tampon* : souvent le CdS ou bien le ZnS, de type n. c'est à cette interface que se situe la jonction p-n.
- *un oxyde transparent conducteur (OTC)* : ITO, ZnO.
- *un contact ohmique supérieur (grille métallique)* : Ni-Al.

A ceci est parfois ajoutée une couche anti-réflexion (MgF_2). Ces matériaux ne sont bien évidemment pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques bien particulières que nous allons voir maintenant.

III-10-3-La couche absorbante

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1 - 1,7 eV. Sa conductivité doit être de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2} (W.cm)^{-1}$. Sa conductivité est de type p.

III-10-4- La couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC). Si un contact couche absorbante/OTC est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister mais son rendement sera limité par :

- l'inadaptation des bandes interdites
- les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains De ce fait il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :
- une bande interdite intermédiaire permettant une transition «souple » entre celle du semi- conducteur et celle de l'OTC, soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV.

- une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p ; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de $10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
- elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains.

III-10-5- La couche d'oxyde transparent conducteur (OTC)

Celle-ci doit être simultanément transparente et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire la transmission des couches doit être supérieure à 80%. La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure à 10^3 cm^{-1} . De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , de leur alliage ITO et de ZnO . Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage. On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO puis une couche dopée de $\text{ZnO}:\text{Al}$ ou de ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite tout courant de fuite entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon (CdS par exemple) plus épaisse.

III-11-Les défauts physiques dans un semi-conducteur

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour pouvoir augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts diminue la possibilité de transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontrés que la relation entre le rayonnement solaire incident et la conversion photovoltaïque dans la cellule solaire éclairé, est une relation énergétique pure, parce que si on veut libérer un électron de telle atome il faut lui ajouter une énergie supplémentaire avec la seule condition que l'énergie incidente supérieur à l'énergie de liaison, et comme on a déjà vu les différents phénomènes optoélectroniques lorsque l'interaction entre les photons et la structure du semi-conducteur et les paramètre électrique, d'une cellule solaire d'une manière générale et dans le cas CIGS.

Nous avons aussi donné des détails sur les différentes couches formants une cellule solaire en couches minces à base des composés quaternaires $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, leurs épaisseurs, le rôle et les performances de chaque un d'elle.