

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Informatique Industrielle**

## **THÈME**

**Optimisation de la couche absorbante d'une cellule solaire en  
couche mince**

*Préparé par : Yagouni Soumia  
Trari Fatma*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>M.R.OTMANI</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>
<b>M.F.MOULAHCENE</b>	<b>MCB</b>	<b>Examinateur</b>
<b>M.Y.BELHADJI</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2016 /2017**

*Le projet est le brouillon de l'avenir. Parfois il faut à l'avenir des centaines de brouillons.*

*Jules Renard*

# *Dédicace*

*A*

*Mes parents*

*Mes frères et sœurs*

*Mes amis*

*A tous ceux qui me sont Chers*

## **Remerciement**

*Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuse reconnaissance à notre encadreur.*

*Pour sa bonne volonté d'accepter de nous encadrer, pour tout le temps qu'il nous a octroyé et pour tous les conseils qu'il nous a prodigué.*

*Nous remercions les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de lire et d'évaluer notre travail.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à nos enseignants et à nos amis, pour leur présence chaleureuse et leur encouragement.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour compléter ce mémoire.*



# Sommaire

Introduction générale .....	2
I.1.Introduction.....	5
I.2. Définition d'une Cellule solaire.....	5
I.3. L'effet photovoltaïque .....	6
I.3.1.Principe de fonctionnement .....	6
I.3.2. Etapes de la conversion photovoltaïque.....	9
A. L'absorption de la lumière .....	9
B. Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement [10].....	10
C. La collecte des charges [10].....	11
I.3.3. Rendement de conversion .....	11
I.4. Etapes de fabrication et d'exploitation d'une cellule solaire [27] .....	11
I.5. filières technologiques des cellules solaires .....	12
I.5.1.filière du silicium cristallin .....	13
I.5.2. Cellules en couche mince.....	13
I.5.3.cellules amorphes .....	14
I.6.Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	16
I.5.1. Caractéristique I(V).....	16
I.6.2.Courant de court circuit $I_{sc}$ .....	16
I.6.3.Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	17
I.6.4.Réponse spectrale $SR(\lambda)$ .....	17
I.6.5. Puissance maximale $P_{max}$ .....	17
I.6.6. Facteur de forme FF .....	18
I.6.7. Rendement de conversion $\eta$ .....	18
I.7. Les Cellules en couches minces .....	18
I.7.1. Définition d'une couche mince.....	18
I.7.2.Critères de choix pour une cellule couche mince .....	19
I.7.3. Les différentes filières de cellules en couches minces .....	19
I.7.3.1.La filière de silicium .....	19
I.7.3.2. La filière au tellure de cadmium (CdTe) .....	20
I.7.4. Structure d'une cellule solaire en couche mince .....	21
I.7.5.Optimisation de rendement d'une cellule en couche mince .....	23

I.7.6. Avantages et inconvénients d'une couche mince .....	23
I.7.6.1. Avantage .....	23
I.7.6.2. Inconvénients .....	24
I.8. Conclusion .....	24
II.1. Introduction .....	26
II.2. Présentation logicielle SCAPS .....	26
II.3. Les démarches d'implémentation d'une cellule solaire par SCAPS.....	25
II.4. Avantages et inconvénients de l'utilisation du logiciel SCAPS.....	28
II.5. Applications : Simulation de cellules en couches minces .....	31
II.5.1. Structure amorphe (PIN).....	31
II.5.1.1. Effet de l'épaisseur.....	31
II.5.1.2. Effet de la température .....	33
II.5.1.3. Effet du dopage .....	33
II.5.2. Etude comparative entre quelques structures de cellules en couche minces .....	35
II.6. Optimisation de la couche absorbante (contact avant et contact arrière) d'une cellule de type : PNN.....	37
II.7. Simulation d'une cellule de type CIGS .....	38
II.7.1. Effet de la couche d'absorbeur CIGS .....	39
A. Influence du dopage de l'absorbeur .....	39
B. Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur .....	40
II.7.2. Effet de la couche tampon Cds .....	40
A. Influence du dopage de la couche Cds.....	40
B. Influence de l'épaisseur de la couche tampon Cds.....	41
II.7.3. Effet des paramètres de la couche fenêtre ZnO .....	41
A. Influence du dopage de la couche fenêtre ZnO.....	41
B. Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO.....	42

## Liste des figures partie I :

<b>Fig.1.1</b> : Cellule solaire photovoltaïque [4].....	5
<b>Fig.1.2</b> : Les niveaux énergétiques d'une cellule solaire [5].....	6
<b>Fig.1.3</b> : Dopage de type N par des atomes de Phosphore [7].....	7
<b>Fig.1.4</b> : Dopage de type P par des atomes de Bore [7].....	7
<b>Fig.1.5</b> : Illustration du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque conventionnelle [8].....	8
<b>Fig.1.6</b> : Meilleur rendement réalisé pour les différentes filières de cellule solaire au cours de quatre dernières décennies [6].....	12
<b>Fig.1.7</b> : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire.....	18
<b>Fig.1.8</b> : Comparaison entre une cellule en a-Si et une cellule en c-Si [22].....	20
<b>Fig.1.9</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe avec la couche d'absorbant dopé p (en mauve) [24].....	20
<b>Fig.1.10</b> : Structure utilisées pour les cellules PV sur couches minces.....	21

## Liste des figures partie I :

<b>Fig.2.1</b> : Fenêtre principale du simulateur solaire SCAPS.....	28
<b>Fig.2.2</b> : Présentation d'une structure sous SCAPS.....	28
<b>Fig.2.3</b> : Panneau décrivant les propriétés des contacts de la cellule solaire.....	29
<b>Fig.2.4</b> : Panneau des couches des résultats de simulation.....	30
<b>Fig.2.5</b> : Cellule photovoltaïque de type a-Si : H (pin).....	31
<b>Fig.2.6</b> : Cellule (a-Si/c-Si/a-Si) (c-Si/a-Si/c-Si) (c-Si/c-Si/c-Si).....	35
<b>Fig.2.7</b> : Caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension pour la structure (a-Si/c-Si/a-Si).....	36
<b>Fig. 2.8</b> : Caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension pour la structure (c-Si/a-Si/c-Si).....	36
<b>Fig.2.9</b> : Structure de la cellule solaire de type n-ZnO/n-CdS/p-CIGS.....	38

## Liste des tableaux

<b>Tab.1.1.</b> Le coefficient d'absorption pour certains types de semi-conducteurs [10].....	10
<b>Tab.1.2.</b> Comparatif entre principales filières des cellules solaires [15].....	15
<b>Tab.2.1 :</b> l'effet de l'épaisseur de la couche a-Si(P).....	32
<b>Tab.2.2 :</b> l'effet de l'épaisseur de la couche a-Si(N).....	32
<b>Tab.2.3 :</b> Effet de la température sur les paramètres électriques de la cellule .....	33
<b>Tab.2.4:</b> Effet du dopage.....	34
<b>Tab.2.5 :</b> Les Paramètres physiques et géométriques ainsi que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule (a-Si/c-Si/a-Si)......	35
<b>Tab.2.6 :</b> Les Paramètres physiques et géométriques ainsi que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule (c-Si/a-Si/c-Si).....	36
<b>Tab.2.7 :</b> Les Paramètres physiques et géométriques ainsi que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule (c-Si/c-Si/c-Si) .....	37
<b>Tab.2.8 :</b> Paramètre physique et résultat de la structure PNN des défèrent métaux (contact avant). .....	36
<b>Tab.2.9 :</b> Paramètre physique et résultat de la structure PNN des défèrent métaux (contacte arrière).....	37
<b>Tab.2.10:</b> Effet du dopage de la couche absorbeur d'une cellule solaire de CIGS.....	39
<b>Tab.2.11 :</b> Effet de l'épaisseur de la couche absorbeur d'une cellule solaire de CIGS.....	40
<b>Tab.2.12:</b> Influence du dopage de la couche tampon CdS .....	41
<b>Tab.2.13 :</b> Influence de l'épaisseur de Cds.....	41
<b>Tab.2.14 :</b> influence du dopage de ZnO.....	42
<b>Tab.2.15 :</b> influence de l'épaisseur de ZnO.....	43

## Liste de symboles

Symbole	description
E	Energie
E(x)	Champ électrique
$E_g$	Largeur de la bande interdite (gap)
$\alpha$	Coefficient d'absorption
N, P	Concentration des électrons et des trous respectivement
h	la constante de Planck (J.s)
c	Vitesse de la lumière ( $m.s^{-1}$ )
$\lambda$	longueur d'onde (m)
$I_s$	le courant de saturation.
V	la tension appliquée
i	le facteur d'idéalité de la diode
q	la valeur absolue de la charge élémentaire
$I_{ph}$	le courant photo généré
T	La température
q	la valeur absolue de la charge élémentaire
d	L'épaisseur
$E_{abs}$	énergie absorbée
$I_{dif}$	Courant de diffusion
$I_0$	le courant de saturation en inverse
KB	la constante de Boltzmann
V	la tension appliquée à la diode
$R_s$	la résistance série de la diode.
$R_{sh}$	la résistance parallèle

A	le facteur d'idéalité
Igen	le courant de génération

# *Introduction générale*

## Introduction générale

L'énergie est indispensable à la vie de tout le monde, peu importe quand et où ils sont. Cela est particulièrement vrai en ce nouveau siècle, où les gens continuent à poursuivre un haut niveau de vie. Parmi les différents types d'énergie que l'Homme a besoin au quotidien, l'électricité est la plus importante qui lui sert pour l'éclairage, le chauffage, la cuisson, la distraction, la communication et l'information, etc. Au cours du XXe siècle, on a abondamment utilisé les combustibles et les sources d'énergie à base d'hydrocarbures, ce qui s'est manifesté par le dégagement de grandes quantités de gaz notamment le dioxyde de carbone.

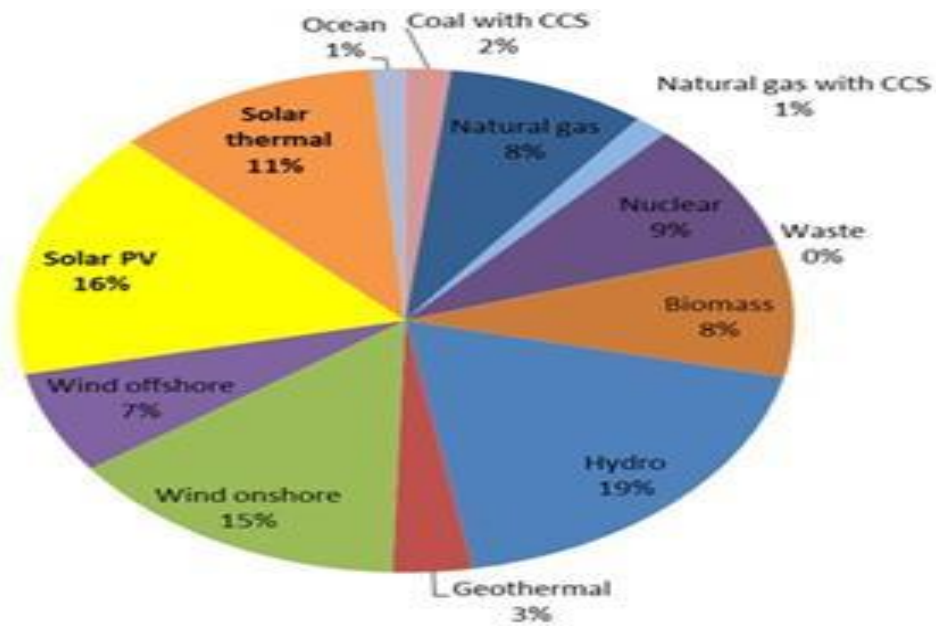
La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueux de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas. Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies.

Selon Agence Internationale de l'Energie (AIE), le soleil pourrait être la plus importante source mondiale d'électricité d'ici à 2050, devant les combustibles fossiles, le vent, l'hydroélectricité et le nucléaire.

Les deux "feuilles de route" technologiques de l'AIE montrent que l'énergie solaire photovoltaïque (PV) pourraient générer jusqu'à 16% de l'électricité mondiale d'ici 2050 tandis que l'électricité solaire thermique (STE) de l'énergie solaire concentrée (CSP) pourrait fournir un montant supplémentaire de 11% [1].





**Fig.1 :** Production de l'électricité en 2050.

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, cette conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble de cellule dites photovoltaïque (PV).basé 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 (une énergie suffisante). 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 donne lieu à un module photovoltaïque.

L'énergie du soleil à l'avantage d'être disponible dans le monde entier en quantité illimitée Pour cela, il faut que le coût de cette conversion photovoltaïque soit, économiquement, compétitif à ceux de l'énergie conventionnelle.

La technologie la plus largement utilisée actuellement pour la conversion photovoltaïque est celle des cellules solaires en silicium cristallin, et l'on conjecture que cela restera le cas dans les prochaines années à venir. Ces cellules solaires sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium très purifié, d'une épaisseur de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$ . [2] Cette filière bénéficie d'une maturité industrielle qui lui assure beaucoup de force.

Ce mémoire est divisé en deux partie, la première partie dresse tout d'abord le contexte global du photovoltaïque, la physique du fonctionnement des cellules solaires, puis le principe des cellules en couche mince le cas de notre étude, Ce type de cellules permet des coûts de fabrication plus

modérés car elles utilisent dix fois moins de silicium purifié. De plus, leur mode de fabrication diffère peu de celui des cellules conventionnelles, rendant leur industrialisation plus aisée.

La deuxième partie présente l'outil de simulation utilisé dans ce travail à savoir le logiciel SCAPS. Par la suite, les résultats obtenus pour des différentes structures (PIN, PNN, CIGS).

*partie I*

*physique de la cellule photovoltaïque*

## I.1.Introduction

L'Énergie Photovoltaïque est l'une des nombreuses énergies actuellement disponibles. C'est une énergie propre produite par l'exploitation du rayonnement solaire, via une composante électronique appelée : cellule photovoltaïque. Le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est à dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau semi-conducteur. Dans cette partie les notions liées au principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi que leurs caractéristiques seront discutées. Aussi, une description physique et technologique des cellules en couches minces dites de seconde génération est présentée.

## I.2. Définition d'une Cellule solaire

La cellule solaire ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur permettant la conversion directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique [3].



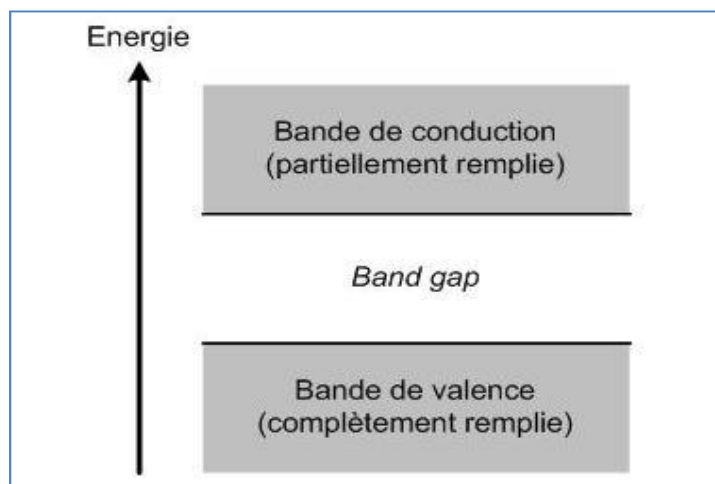
**Fig.1.1** Cellule solaire photovoltaïque [4]

### I.3. L'effet photovoltaïque

#### I.3.1.Principe de fonctionnement

Pour réaliser une cellule solaire, il faut disposer d'un matériau photoconducteur dont sa conductivité électrique croît sous l'action d'un rayonnement électromagnétique. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie (être assez conducteur) afin de faciliter l'écoulement du courant. D'où l'intérêt grandissant des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron, lié à son atome (bande de valence), devienne libre (dans la bande de conduction) il faut qu'une énergie extérieure (électrique, thermique ou lumineuse) soit fournie au matériau. Cette énergie doit être supérieure ou égale à son gap d'énergie [4]. **La bande de valence** est la dernière bande d'énergie complètement remplie d'électrons tant que **la bande de conduction** qui est la bande d'énergie supérieure ou égale à celle de la bande de valence, mais qui n'est pas remplie. L'énergie qui sépare ces deux bandes est appelée **gap** ( $E_g$ ) [5]. On note que le gap est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Il est égal à 1,12 eV pour le silicium cristallin (c-Si) et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).



**Fig.1.2** les niveaux énergétiques d'une cellule solaire [5]

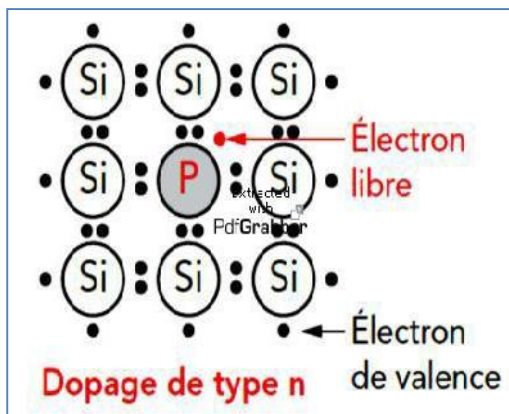
Dans le cas des cellules solaires, l'excitation lumineuse (rayonnement solaire) sera divisée en trois parties : une partie réfléchi, une autre qui sera absorbée et la troisième partie passera au travers de l'épaisseur de la cellule. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$ , vérifiant la relation suivante :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I-1})$$

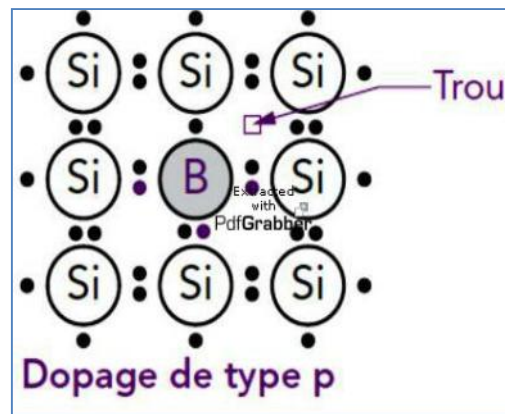
Avec :

- $h$  : la constante de Planck (J.s)
- $c$  : Vitesse de la lumière ( $\text{m.s}^{-1}$ )
- $\nu$  : Fréquence ( $\text{s}^{-1}$ )
- $\lambda$  : longueur d'onde (m)

Les photons absorbés ayant une énergie supérieure à l'énergie du band gap, vont libérer un électron laissant derrière lui un trou. Afin de séparer ces paires électrons-trous et recueillir un courant, un champ électrique doit être introduit de part et d'autre de la cellule. La création de ce champ électrique repose sur l'introduction des impuretés, en charges opposées et des concentrations contrôlées, par le procédé de dopage. Donc une jonction p-n est formée. Le dopage de type N s'obtient par l'intégration d'atomes de phosphore (p), contenant plus d'électrons périphériques par rapport au silicium (Fig. 1.3). Pour le dopage de type P, il est obtenu par l'intégration d'atomes de Bore (B), contenant moins d'électrons périphériques que le silicium [6] (Fig. 1.4).



**Fig.1.3** Dopage de type N par des atomes de phosphore [7]



**Fig.1.4** Dopage de type P par des atomes de Bore [7]

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte après recombinaison des charges libres. Cela a pour effet de créer un champ électrique interne donnant naissance à une barrière de potentiel au niveau de la zone dite de déplétion ou zone de charge d'espace (ZCE). Les porteurs générés créent par la suite un champ électrique opposé au

champ interne. Ce champ opposé induit une différence de potentiel électrostatique  $V_d$  entre le côté P et N. Donc une auto-polarisation dans le sens passant de la diode (cellule).

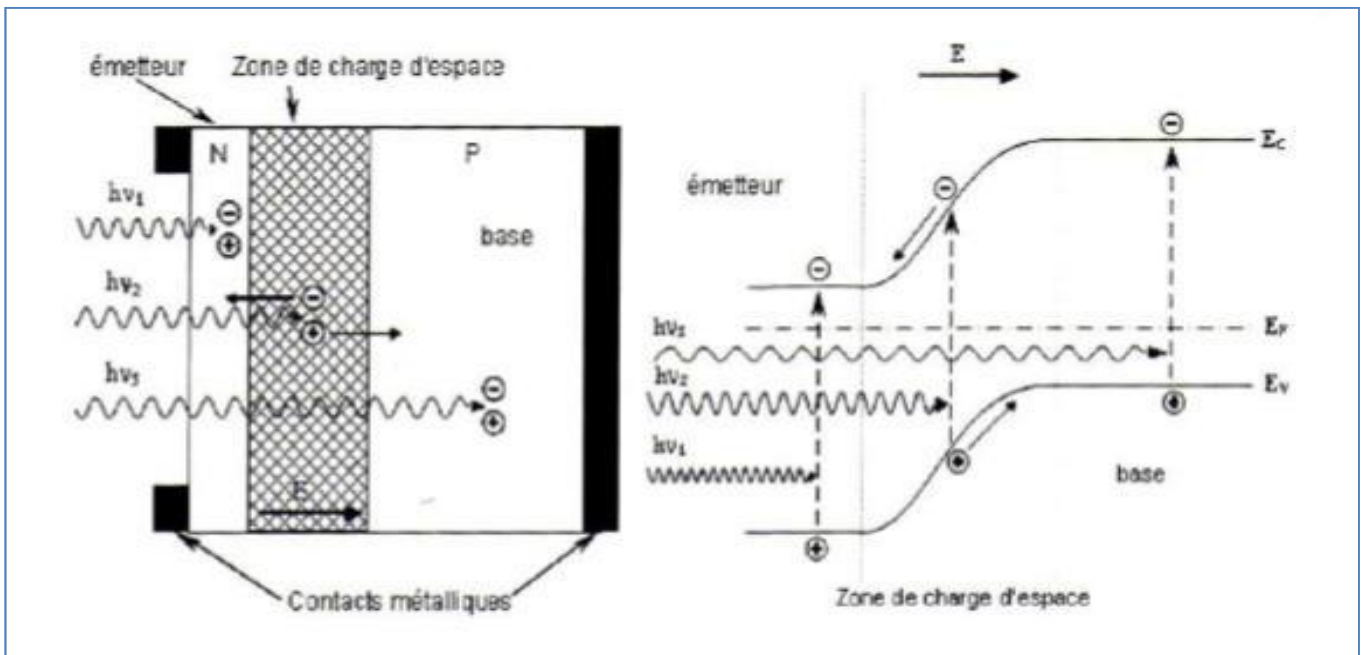
Dans le cas de la cellule, la tension  $V_d$  est la même tension qu'il faudrait appliquer, dans le sens passant de la diode non éclairée, pour qu'un courant  $I_d$  puisse passer. Ce courant est égal au photocourant  $I_{ph}$  dû au rayonnement.

De plus, l'apparition de la tension aux bornes d'une jonction illuminée porte le nom effet photovoltaïque. La valeur maximum de cette tension est  $V_d$  qui reste inférieure à  $E_g/q$ .

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photos porteuses auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la ZCE 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. Les paires électron-trou générées près de la ZCE auront la plus grande probabilité d'être collectées. On aura donc, un photo-courant de diffusion
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou, créées par les photons incidents, sont générées par le champ électrique. On aura donc un photo-courant de génération.

Un résumé du principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est illustré dans la figure 1.5.



**Fig.1.5** Illustration du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque conventionnelle [8].

Le courant aux bornes d'une jonction p-n constituant la cellule photovoltaïque est donné par l'expression suivante :

$$I = I_s \left( e^{\left(\frac{qV}{iKT}\right)} - 1 \right) - I_{ph} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

**I<sub>s</sub>** : le courant de saturation.

**K** : la constante de Boltzmann.

**V** : la tension appliquée.

**T** : la température.

**i** : le facteur d'idéalité de la diode.

**I<sub>ph</sub>** : le courant photogénéré.

**q** : la valeur absolue de la charge élémentaire.

### I.3.2. Etapes de la conversion photovoltaïque

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés [9] :

- a) L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- b) Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques;
- c) La collecte des charges. Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

#### A. L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir principalement trois évènements optiques qui sont :

- La réflexion, auquel cas la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- La transmission, où cette fois la lumière traverse l'objet.
- L'absorption, où ici la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme, à savoir généralement sous forme thermique.

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière, si  $E_{Inc}$  est l'énergie incidente, l'énergie restante s'écrit :



$$E = E_{inc} * \exp(-ad) \quad (\text{I-3})$$

Donc l'énergie absorbée dans l'épaisseur \*d\* est égale à :

$$E_{abs} = E_{inc} \exp(-ad) = E_{inc} [1 - \exp(-ad)] \quad (\text{I-4})$$

Avec  $\alpha$ : coefficient d'absorption qui dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente. Le tableau 1.1 regroupe quelques valeurs normalisées de ce coefficient pour certains matériaux semi-conducteurs.

Matériaux	$\alpha [cm^{-1}]$
Silicium cristallin	$4,5.10^3$
Silicium amorphe	$2,4.10^4$
GaAs	$5,4.10^4$

**Tab.1.1** Le coefficient d'absorption pour certains types de semi-conducteurs [10].

La condition qu'un matériau est sollicité pour une application photovoltaïque, est que ce dernier doit présenter un spectre d'absorption épousant au mieux le spectre d'émission du soleil. L'association de plusieurs polymères et/ou de molécules est l'un des moyens aujourd'hui mis en œuvre pour étendre le spectre d'absorption des cellules. Par ailleurs, la mobilité des charges dans les polymères semi-conducteurs étant plus faible que celle mesurée dans les matériaux inorganiques cristallins ou poly-cristallins. L'épaisseur des films organiques ne doit pas excéder une centaine de nanomètres afin de s'affranchir le piégeage des charges photo-générées. Cela n'a pas d'incidence sur les capacités d'absorption optique de la cellule car les matériaux organiques ont un coefficient d'absorption très élevé.

### **B. Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement [10].**

Les photons absorbés, par un matériau, 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 si l'on les attire ensuite vers l'extérieur. Si un électron est attiré vers l'extérieur laissant derrière un trou, un autre électron d'un atome voisin va venir se recombinaison avec ce trou, et laissant de même un autre trou qui se recombine avec un électron voisin et ainsi de suite. Donc création d'un déplacement de

charges élémentaires électrons/trous donnant naissance à un courant électrique par photoconductivité. Le seuil d'énergie minimum nécessaire à la libération des électrons, par les photons, est directement lié à la structure électronique qui diffère d'un matériau à un autre.

### C. La collecte des charges [10]

Dans les régions « n » et « p » de la cellule, les photo-porteurs minoritaires diffusent vers la zone de charge d'espace où ils seront propulsés par le champ électrique vers la région de même charge où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent au courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires (e-h) photo-générés seront dissociés par le champ électrique interne (jonction), l'(e) est propulsé vers la région de type « n » et le (h) vers la région de type « p ». Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération.

## I.3.3. Rendement de conversion

On parle du rendement de conversion ( $\eta$ ), le pourcentage d'énergie convertie (photons-courant) et collectée par la cellule solaire à travers d'un circuit électrique. Pour augmenter le rendement des cellules solaires on peut:

- A. Améliorer l'interaction avec la lumière:
  - Augmenter l'absorption.
  - Réduire la réflexion.
  - Concentrer la lumière.
- B. Transformer et mieux adapter le spectre solaire:
  - Pour les photons proches infrarouges.
  - Pour les photons ultra-violets. [11]

## I.4. Etapes de fabrication et d'exploitation d'une cellule solaire [27]

Les étapes de fabrication d'une cellule solaires peuvent être classées comme suit :

**Etape 1 :** Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique (obtenu à partir de quartz).

**Etape 2 :** Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques.

**Etape 3 :** Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.

**Etape 4 :** Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.

**Etape 5 :** Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

### **I.5. filières technologiques des cellules solaires**

De nombreuses filières technologiques existent dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. La différence entre ces filières réside dans les matériaux employés ainsi que dans leur principe de mise en œuvre. Aujourd'hui trois principales filières technologiques sont largement répandues dans le domaine de la photovoltaïque : la filière du silicium cristallin, la filière en couches minces et celle à base des matériaux organiques. Les progrès rencontrés au cours des quarante dernières années dans la réalisation de différentes cellules solaires sont exposés dans la figure 1.6. Les technologies ainsi présentées, coexistent sur le marché en des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré les prix et les rendements qui restent différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs.

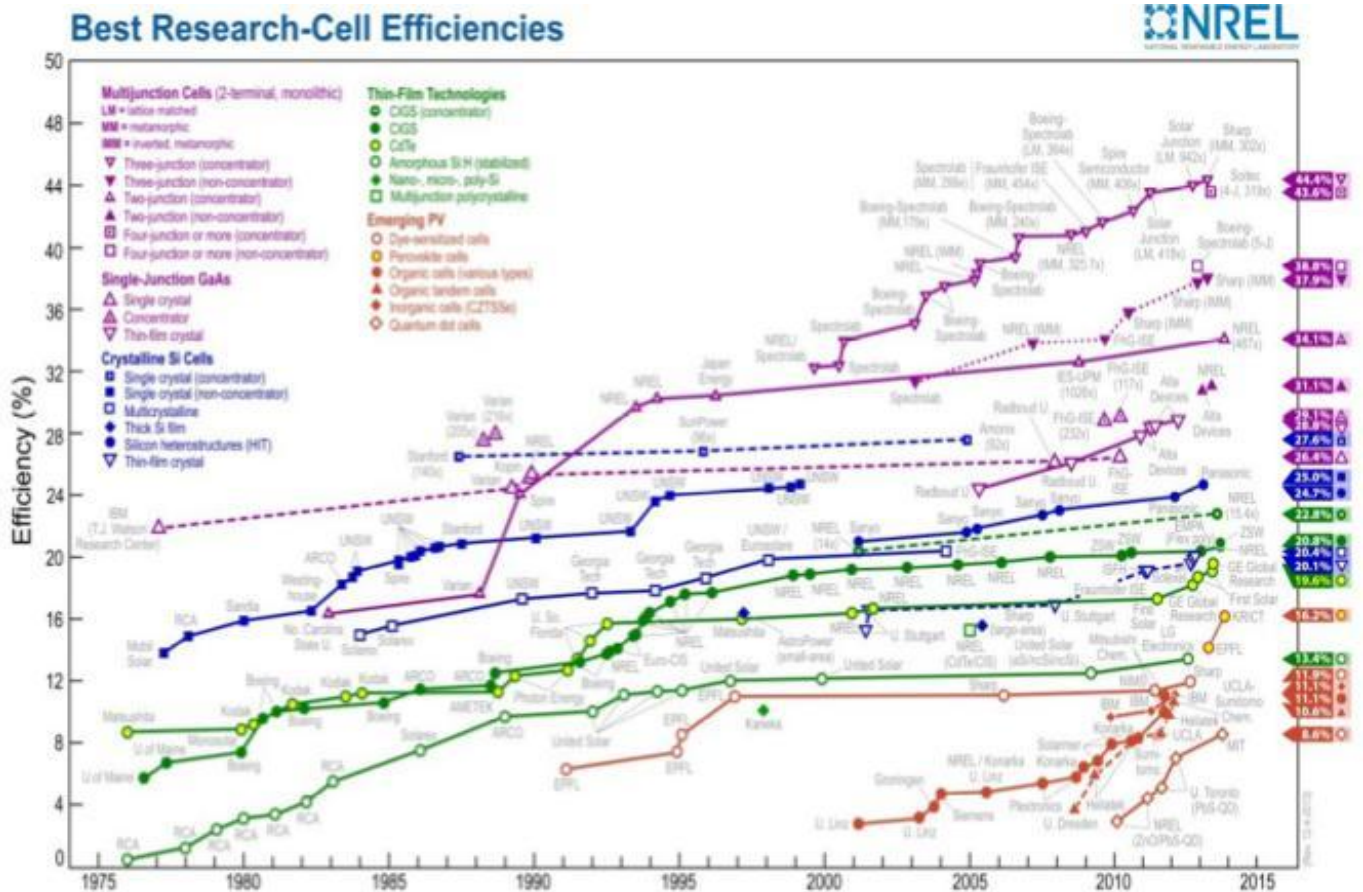


Fig.1.6 Meilleur rendement réalisé pour les différentes filières des cellules solaires au cours des quatre dernières décennies [6].

### 1.5.1. filière du silicium cristallin

Ce type de cellule est constitué de fines plaques de silicium, un élément chimique très abondant et qui s'extrait notamment du sable ou du quartz. le silicium est obtenu à partir d'un seul cristal ou de plusieurs cristaux : on parle alors de cellules monocristallines ou multicristallines. Les cellules en silicium cristallin sont d'un bon rendement (de 14 à 15 % pour le multicristallin et de près de 16 à 19 % pour le monocristallin). Elles représentent un peu moins de 90 % du marché actuel. [12].

### 1.5.2. Cellules en couche mince

La technologie en couche mince, dont la plus mure est le silicium amorphe (a-Si), représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technologie est l'utilisation de substrats à

cout réduit. Le prix de cette filière est plus faible que les cellules cristallines. En revanche, leur rendement d'une cellule en a-Si est inférieure à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation les cellules **amorphe** se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Aussi, Ces cellules constituent une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères. En plus du silicium amorphe, d'autres matériaux sont également utilisés dans la fabrication des filières en couches minces comme le Tellure de cadmium (Couramment connues sous le nom **CdTe**), le di-séléniure de cuivre et d'indium (**CIS**) et de gallium (**CIGS**). Ces technologie possèdent de bons rendements pouvant aller jusqu'à 19% [13].

### **I.5.3.cellules amorphes**

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées à partir d'un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal. Ceci via un procédé de vaporisation sous vide. Les cellules ont la couleur gris foncé [14].

#### **A. Avantage**

Il s'agit d'un type de cellule bon marché que l'on retrouve dans la plupart des objets du quotidien se basant sur l'énergie solaire comme source d'énergie telles que : les calculatrice, montre solaire, etc. Cette technologie est pratique est utilisable sur de nombreux supports et elle ne requiert pas beaucoup d'ensoleillement.

#### **B. Inconvénient**

Le rendement est faible (7 à 8 %) et la durée de vie des panneaux est limitée à une dizaine d'année.

Le tableau 1.2 donne un comparatif des caractéristiques des principales filières de cellules solaires.

<b>Matériau</b>	<b>Rendement</b>	<b>longévité</b>	<b>Caractéristiques</b>	<b>Principe utilisation</b>
<b>Silicium mono cristallin</b>	12 à 18% (27% en laboratoire)	20 à 30 ans	*très performant *stabilité de production d'W *Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, Facades...
<b>Silicium poly cristallin</b>	11 à 15% (19.8% en laboratoire)	20 à 30 ans	*Adapté à la production à grande échelle. *Stabilité de production d'W plus de 50% du marché mondiale.	Modules pour toits, façade générateurs...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% (13% en laboratoire)		*Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. *Fonctionnement par temps couvert. *La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment.
<b>Composite Mono cristallin (GaAs)</b>	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		*Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
<b>Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGase2, etc.)</b>	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment.

Tab.1.2. Comparatif entre principales filières des cellules solaires [15]

## I.6. Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire

### I.5.1. Caractéristique I(V)

La connaissance de la caractéristique  $I(V)$  constitue une démarche importante dans la détermination des performances d'une cellule solaire. Le courant  $I$  récolté à la sortie de la cellule est défini comme étant l'association de deux termes : le courant de génération noté  $I_{gen}$  et le courant de perte [16]. Le courant de génération représente la quantité de photons absorbés dans le matériau tandis que le courant de perte est la somme de deux types de courants : courant de diffusion noté  $I_{diff}$  et le courant de recombinaison noté  $I_{rec}$ . Le courant de diffusion est le courant de diode classique qui s'écrit sous la forme :

$$I_{diff} = I_0 \left( e^{\left( \frac{qv}{k_B T} \right)} - 1 \right) \quad (I-5)$$

Avec :

- $I_0$  : le courant de saturation en inverse
- $k_B$  : la constante de Boltzmann
- $V$  : la tension appliquée à la diode

Chacun des deux courants  $I_{gen}$  et  $I_{rec}$  font intervenir un formalisme mathématique et diverses caractérisations qui seront détaillées par la suite.

Pour déterminer la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule on se base sur un modèle d'une diode. A partir de ce modèle, la caractéristique  $I(V)$  prend l'expression suivante :

$$I(v) = I_0 \left( e^{\frac{q(V-R_S I(V))}{AK_B T}} - 1 \right) + \frac{V-R_S I(V)}{R_{sh}} - I_{gen} \quad (I-6)$$

Avec :

- $R_s$  : la résistance série de la diode.
- $R_{sh}$  : la résistance parallèle.
- $A$  : le facteur d'idéalité.
- $I_{gen}$  : le courant de génération.

### I.6.2. Courant de court circuit $I_{sc}$

Une autre caractéristique à connaître lors de la modélisation d'une cellule est le courant de court-circuit. Ce dernier est le courant débité par la cellule sous éclairage en court-circuitant la sortie. C'est-à-dire que :  $I_{sc} = I_{V=0}$  pour une cellule solaire idéale. Donc ce courant est égal au courant photovoltaïque  $I_{ph}$ .

### I.6.3. Tension de circuit ouvert $V_{co}$

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert, C'est-à-dire :  $V_{co} = V(I=0)$ . Dans le cas d'une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée comme suit :

$$v_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s}{I_s} - I \right) \approx v_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (I-7)$$

Avec :

- $V_{co}$  : la tension de circuit ouvert.
- $Kt$  : la constante de Boltzmann.
- $I_{ph}$  : le courant de photon.
- $q$  : la constante de charge d'électron.

### I.6.4. Réponse spectrale $SR(\lambda)$

Cette réponse s'exprime par l'équation ci-après :

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (I-8)$$

### I.6.5. Puissance maximale $P_{max}$

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit  $V.I$  est maximum. Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour les quels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de coté  $V_m$  et  $I_m$  tel que :



$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{I-9})$$

Avec :

- $P_m$  : la puissance maximale.
- $I_m$  : le courant maximale.

### I.6.6. Facteur de forme FF

Le facteur de forme indique à la qualité de cellule, il indice l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale au produit  $I_{sc}V_{oc}$ .

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc}V_{oc}} \quad (\text{I-10})$$

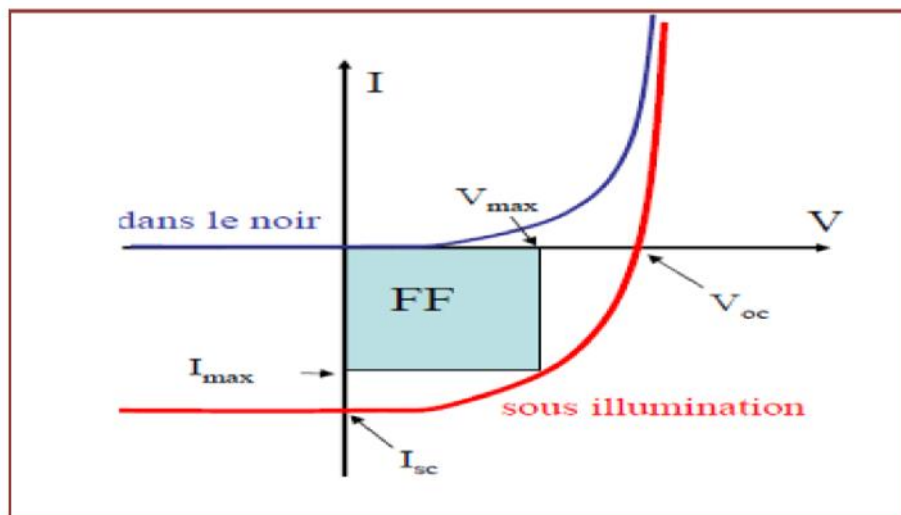


Fig1.7 : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire.

### I.6.7. Rendement de conversion $\eta$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est défini comme étant le rapport entre la puissance débitée au point de puissance maximale et la puissance lumineuse disponible tel que :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{lm}} \quad (\text{I-11})$$

## **I.7. Les Cellules en couches minces**

### **I.7.1. Définition d'une couche mince**

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé « substrat ». L'une des dimensions clé de cette couche est son épaisseur fortement réduit de telle sorte qu'elle varia de quelques « nm » à quelques «  $\mu\text{m}$  » (typiquement ce sont des couches allant de 10 à 100 nanomètres). Cette faible distance entre les deux surfaces limites (face avant et face arrière) entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques. Le plus souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des "n" corps massif très différentes [17].

La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est que dans l'état massif on néglige généralement l'effet des conditions des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince sont au contraire les effets liés aux surfaces limites sont prépondérants. En revanche, lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif.

### **I.7.2. Critères de choix pour une cellule couche mince**

Les critères suivantes sont à les considérées lors du choix d'une cellule solaire en couche mince :

- Le contact face avant : Oxyde transparent conducteur ( $T_{CO}$ ) = oxydes dopés.
- L'émetteur : Crée la jonction.
- L'absorbant: Matériau semi-conducteur.
- Le contact face arrière : Contact ohmique.
- Le support : Solidité mécanique et Utilisé en face Avant ou Arrière.

### **I.7.3. Les différentes filières de cellules en couches minces**

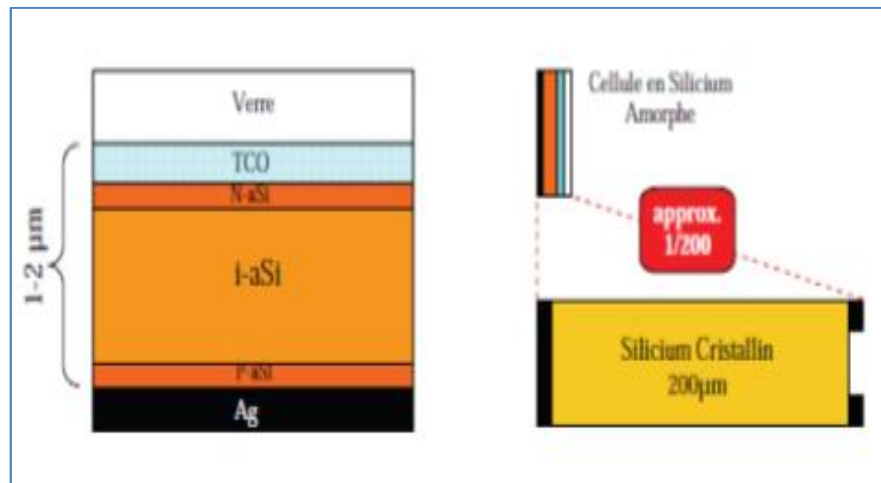
#### **I.7.3.1. La filière de silicium**

Le potentiel des cellules photovoltaïques en couches minces n'est aujourd'hui plus à démontrer. Un rendement maximal de conversion de 21,5% a en effet été obtenu par l'équipe de Zhao sur une cellule de 47  $\mu\text{m}$  d'épaisseur [19].

Ce résultat est proche du rendement de conversion record de 24,7% [18] obtenu avec la même technologie sur des plaques de silicium plus épaisses. D'autres résultats sont venus par la suite confirmer la viabilité de cette voie technologique [20].

Dans un premier temps, la recherche s'est orientée vers la fabrication de cellules photovoltaïques basées sur le silicium microcristallin ( $\mu\text{c-Si}$ ) avec une taille de grains inférieure à  $1\ \mu\text{m}$  élaborées sur le verre. Les rendements de conversion obtenus sont voisins de 10%. Par la suite les études sont dirigées vers l'utilisation de silicium polycristallin (poly-Si) à larges grains déposé sur des substrats résistants à haute température (graphite ou céramique). Les rendements de conversion sont alors de l'ordre de 15% [21]. Ces substrats permettent en effet, une haute température de dépôt donc une plus grande taille des grains.

Les couches minces cristallines de silicium peuvent être obtenues typiquement selon deux voies: basse température  $T < 600^\circ\text{C}$  et haute température autour de  $1000^\circ\text{C}$  [22]. A basse température, le dépôt de silicium peut être effectué sur des verres [23], des métaux ou des plastiques. A haute température, le silicium multi-cristallin à gros grains ou même du silicium monocristallin peuvent être obtenus. Ainsi, du point de vue du rendement, les approches à haute température sont plus prometteuses.

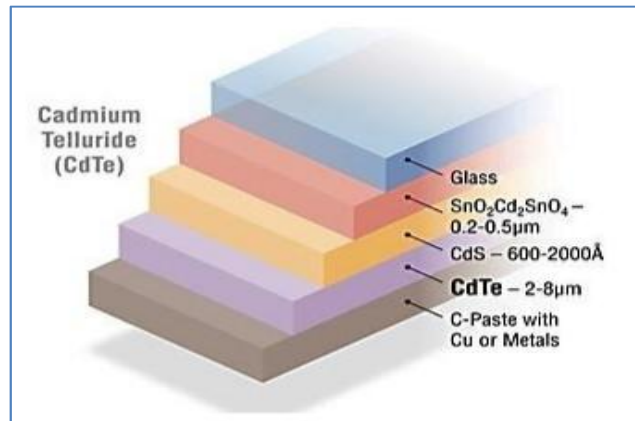


**Fig.1.8** : comparaison entre une cellule en a-Si et une cellule en c-Si [22].

### I.7.3.2. La filière au tellure de cadmium (CdTe)

Le coût de fabrication d'une cellule au tellure de cadmium est de deux à trois fois moins important que celui d'une structure cristalline (figure 1.8). Ceci est réalisé grâce à l'optimisation du

procédé de fabrication, la faible main-d'œuvre requise et aux économies d'échelle baisse du coût à la suite de l'augmentation de la productivité.



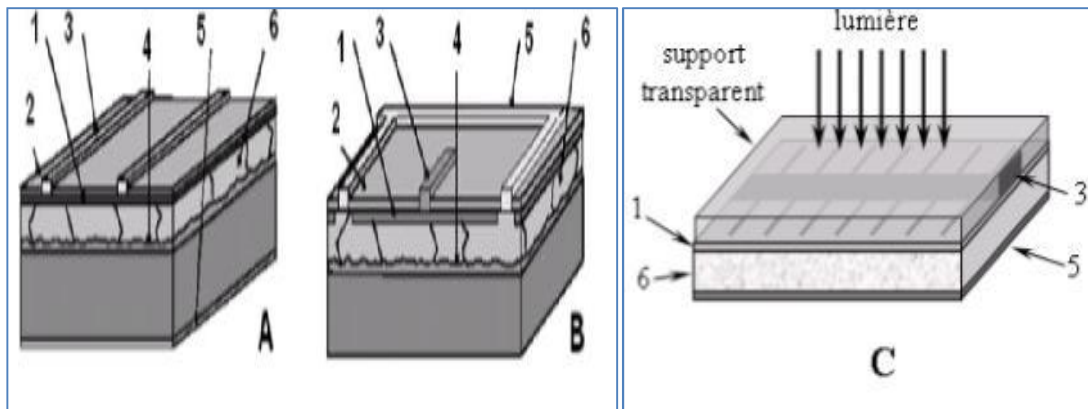
**Fig.1.9** : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe avec la couche d'absorbant dopé p (en mauve) [24]

Une cellule au CdTe se compose de [24] :

- Une vitre protectrice.
- Une couche conductrice transparente, par exemple faite d'oxyde d'indium-étain (ITO) ou d'oxyde de zinc (ZnO). Elle récolte les charges négatives sur une (épaisseur de 0.2 à 0.5 µm).
- Sulfure de cadmium CdS dopé n (épaisseur de 0.06 µm).
- Tellurure de cadmium dopé p (épaisseurs de 2 à 8 µm).
- Couche conductrice inférieure métallique parfois fabriquée à partir d'une pâte de carbone enrichie en cuivre.
- Substrat : Sa nature peut varier selon les propriétés désirées (souple ou rigide).

#### I.7.4. Structure d'une cellule solaire en couche mince

Les cellules en couches minces ont besoin de support pour leur tenue mécanique. La structure de la cellule photovoltaïque varie selon la technologie d'élaboration de la couche mince et le matériau de support. La figure 2.3 représente les architectures principales de cellules photovoltaïques en couches minces.



**Fig.1.10:** Structures utilisées pour les cellules PV sur couches minces.

- |                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| <b>A</b> : support conducteur | <b>3</b> : contact à l'émetteur |
| <b>B</b> : support isolant    | <b>4</b> : couche intermédiaire |
| <b>C</b> : cellule biface     | <b>5</b> : contact au substrat  |
| <b>1</b> : émetteur           | <b>6</b> : substrat en silicium |
| <b>2</b> : couche antireflet  |                                 |

La composition des cellules A et B est utilisée pour les couches minces obtenues sans report. La structure (A) est utilisée si le support est un conducteur. Dans ce cas le support sert de contact arrière. La couche intermédiaire peut servir pour améliorer le contact entre le support et le substrat.

Si le support est isolant, tous les contacts doivent être placés sur la même face de la cellule PV (structure B). La réalisation de ce type de contacts nécessite l'utilisation de sérigraphie alignée ou de lithographie.

La cellule de type (C) peut être élaborée par transfert de couche épitaxiale. Dans ce cas, la cellule est réalisée partiellement sur la couche épitaxiale. Un rendement de 15.4% a été démontré pour une cellule de type (C) par Brendel.

La technologie de transfert de couche permet d'élaborer des couches minces de silicium monocristallin de bonne qualité. Une longueur de diffusion des porteurs minoritaires de 100-200  $\mu\text{m}$  a été démontrée pour une couche épitaxiale de 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La longueur de diffusion étant supérieure à l'épaisseur de la cellule, l'architecture de la cellule photovoltaïque avec contacts arrière peut être utilisée.

### **I.7.5. Optimisation de rendement d'une cellule en couche mince**

On cherche à optimiser toujours plus le rendement. Mais il y a d'autres enjeux importants comme réduire le poids. Beaucoup de recherches tournent également autour du substrat et de son procédé de fabrication.

Le silicium est appliqué à un substrat sous forme d'une couche d'environ 3  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, évitant d'avoir à opérer des découpes de grande précision dans des galettes particulièrement coûteuses. Présentant un rendement élevé, ces modules solaires à couche mince de silicium sont constitués de deux couches superposées qui absorbent différentes fractions de la lumière. Ce rendement est toutefois associé à plus de complexité. Chaque couche est divisée en plusieurs sous-couches qui s'influencent mutuellement de manière complexe.

Les filtres anti-reflets des lunettes sont aussi des couches minces. C'est là encore une histoire de design. Il faut concevoir des motifs qui permettent de réduire au maximum la réflectivité. [25]

En harmonisant différentes approches de gestion de la lumière et d'optimisation des matériaux d'absorption de la lumière, les scientifiques est parvenue à concevoir une nouvelle génération de modules solaires à couche mince de silicium présentant un rendement de 12 % [26]. Pour obtenir ce rendement élevé, ils ont essayé différents nanomatériaux et couches fonctionnelles optiques, tout en redéfinissant l'ensemble de la chaîne de traitement. Ils ont cherché à améliorer le facteur de remplissage ainsi que la tension en circuit ouvert, afin d'augmenter le rendement de la conversion des modules solaires faits de silicium en couche mince. Les propriétés optiques et électroniques des différentes couches ont été améliorées par l'utilisation de nouveaux nanomatériaux tels que l'oxyde de silicium nanocristallin. Grâce à sa structure résistante.

### **I.7.6. Avantages et inconvénients d'une couche mince**

#### **I.7.6.1. Avantage**

- Semi-conducteurs à gap direct : très faible quantité de matière impliquant un temps de retour énergétique de 18 mois au lieu de 5 ans. Faible bilan carbone.
- Esthétique : couleur noir profond, homogène et uniforme.
- Gamme variée de tensions et de courants : limites fixées par l'optimisation des largeurs de bandes.
- Seulement 13 étapes de processus de fabrication.

- Capacité de faire des générateurs monolithiques de très grande taille (jusqu'à 5 m<sup>2</sup>).
- Possibilité de les intégrer sur toutes sortes de substrats (Verre, Alu, Acier, etc.)
- Faible coefficient de température donc meilleure intégration au bâti
- Possibilité de vraie semi-transparente.
- Possibilité de structures tandem.

### **I.7.6.2. Inconvénients**

- Rendement encore limité en production (<12%).
- Processus industriels pas encore bien maîtrisés.
- Retour d'expérience insuffisant sur la durée de vie – Ressources rares.

### **I.8. Conclusion**

Dans cette partie nous avons vu des notions théoriques sur le photovoltaïque et ces applications sur les cellules solaires, ensuite nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales, puis nous avons abordé les cellules photovoltaïques en couches minces de silicium.

Dans la partie suivante nous attacherons à optimiser l'architecture, la géométrie et le rendement des cellules photovoltaïque avec logiciel SCAPS.

# Partie II

## Simulation de cellules en couches minces



## II.1.Introduction

L'objectif de cette partie en premier lieu, est l'étude de l'influence des paramètres de la Cellule solaire à couche mince de quelques structures. Nous chercherons les paramètres physiques et géométriques optimaux qui assureront les meilleures caractéristiques de sortie de la cellule à savoir; le rendement de conversion en puissance, le facteur de forme et le rendement quantique. On utilisant logiciel SCAPS.

## II.2.Présentation logicielle SCAPS

SCAPS est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique ( ELIS ) de l'Université de Gent , Belgique . Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement : Marc Burgelman , Koen Decock , Johan Verschraegen , Alex Niemegeers , Stefaan Degraeve 20–25 . Une description du logiciel , et les algorithmes qu'il utilise , se trouve dans la littérature.

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de  $\text{CuInSe}_2$  et de  $\text{CdTe}$  . Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines ( Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe ) .

Un aperçu du principal avantage offert par SCAPS est donné ci-après :

- Possibilité de réaliser des structures à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres physique peuvent être calibrés ( en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule ) : Par exemple ,  $\chi$  ,  $\varepsilon$  ,  $N_C$  ,  $N_V$  ,  $V_{thn}$  ,  $V_{thp}$  ,  $\mu_n$  ,  $\mu_p$  ,  $N_A$  ,  $N_D$  , tous types de défauts (traps)  $N_t$ .
- Prise en mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct), la SRH Auger.
- les niveaux de défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, dans le matériau ou les interfaces( un seul niveau, uniforme, gaussien, etc...), leurs charges (neutre, donneur, accepteurs, etc...)et type de recombinaison sont aussi prisent en compte.
- La source d'illumination : des variétés de spectres solaires sont inclus (AM0, AM1.5D, AM1.5G, etc.....).

- Le programme calcul les bandes d'énergies, les concentrations ainsi que la caractéristique de courant et d'autres caractéristiques telles que la caractéristique J-V.

Une description simplifiée de l'utilisation du logiciel Scaps est donnée dans la section II et pour plus de détail se référer au manuel.

### II.3. Les démarches d'implémentation d'une cellule solaire par SCAPS

Après le lancement du simulateur SCAPS, la fenêtre principale du simulateur <<action panel>> apparaît (**Fig.2.1**). À partir de cette fenêtre, l'utilisateur peut accéder aux différentes étapes de l'implémentation de la cellule solaire telles que :

- ✚ **Fenêtre 02** : définition du problème où toutes les propriétés électriques et optiques ainsi que la géométrie de la cellule solaire sont définies à travers ce menu. Après la sélection de cette étape (**Fig.2.2.a**), l'utilisateur aura la possibilité de : soit créer une nouvelle structure soit charger une structure prédéfinie et même sauvegarder la structure en cours de simulation.

Dans le cas de la création d'une nouvelle structure les couches, formant la cellule, sont définies une par une avec toutes les propriétés optiques et électriques (**Fig.2.2.b**). Aussi, le sens de la lumière peut être choisi en direction du contact avant ou arrière.

Les propriétés des contacts sont définies par la sélection de la fenêtre left contact/Right contact (**Fig.2.3**). Les principales propriétés spécifiées dans cette fenêtre sont : la vitesse de recombinaison des électrons et des trous auprès des interfaces avant et arrière, la fonction de travail du métal constituant les contacts ainsi que les propriétés optiques de l'interface.

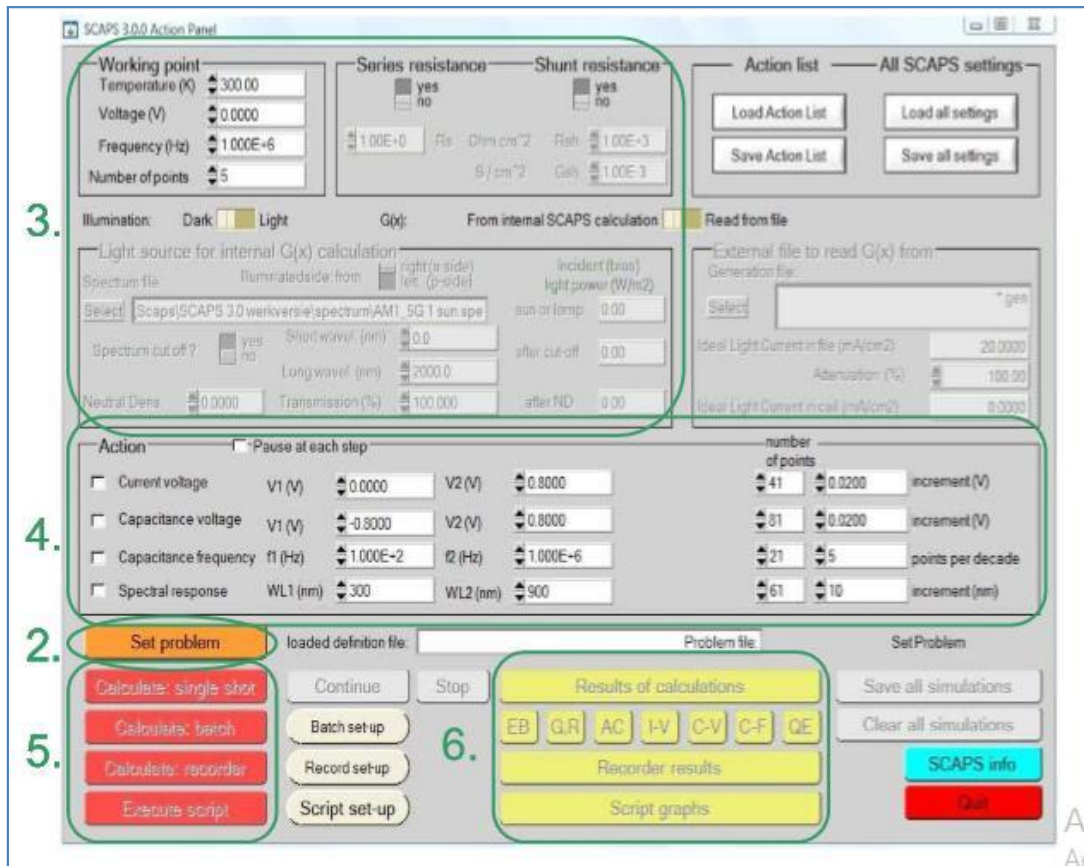


Fig.2.1 : Fenêtre principale du simulateur solaire SCAPS.

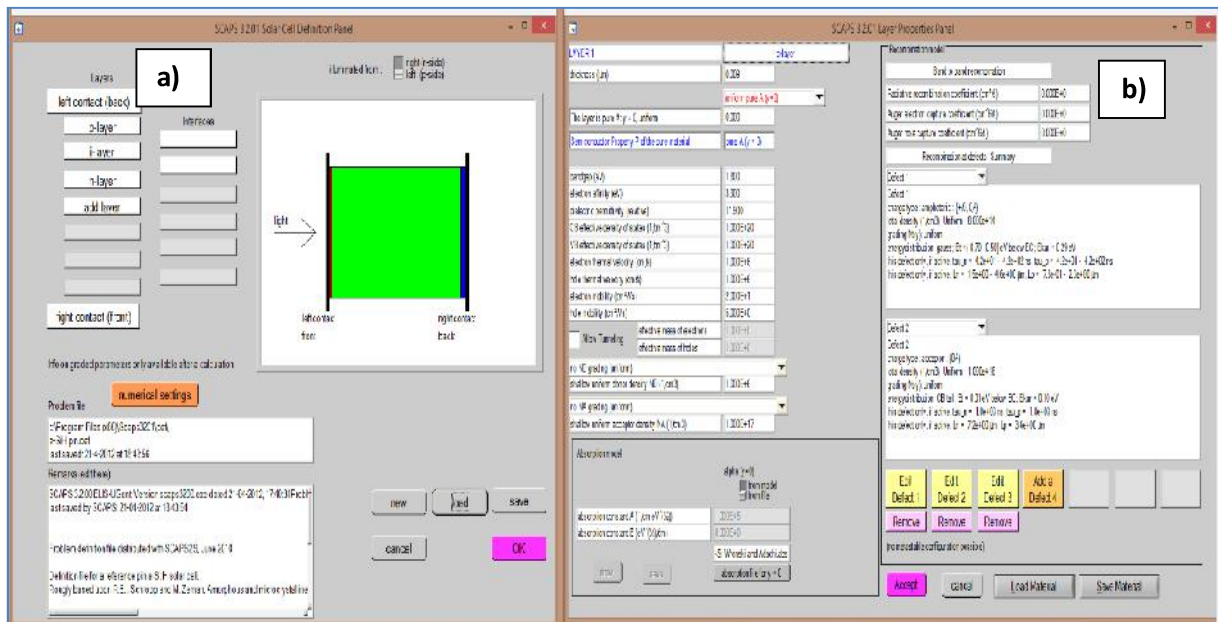
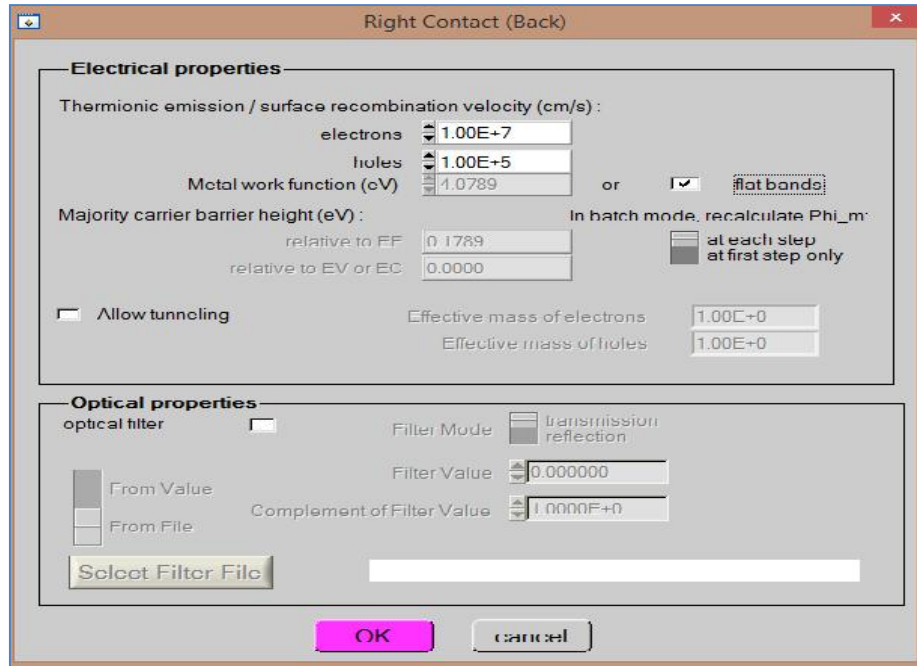


Fig.2.2 : Présentation d'une structure sous SCAPS.

a) Panneau de définition de la cellule solaire, b) Panneau de définition des propriétés de chaque couche.



**Fig.2.3:** Panneau décrivant les propriétés des contacts de la cellule solaire.

- ✚ **Fenêtre 03 :** Spécification des paramètres nécessaires à la simulation comme: la température, l'éclairement ou l'obscurité, le spectre solaire utilisé ainsi que les résistances parasites. Ces paramètres sont considérés fixes durant la simulation.
- ✚ **Fenêtre 04 :** Spécification des caractéristiques de sortie après la simulation : les courbes courant-tension, la réponse spectrale, etc.
- ✚ **Fenêtre 05 :** Lancement des calculs.
- ✚ **Fenêtre 06 :** Affichage des courbes de simulation (**Fig. 2.4**) : courant-tension, dopage, bandes d'énergies, etc.

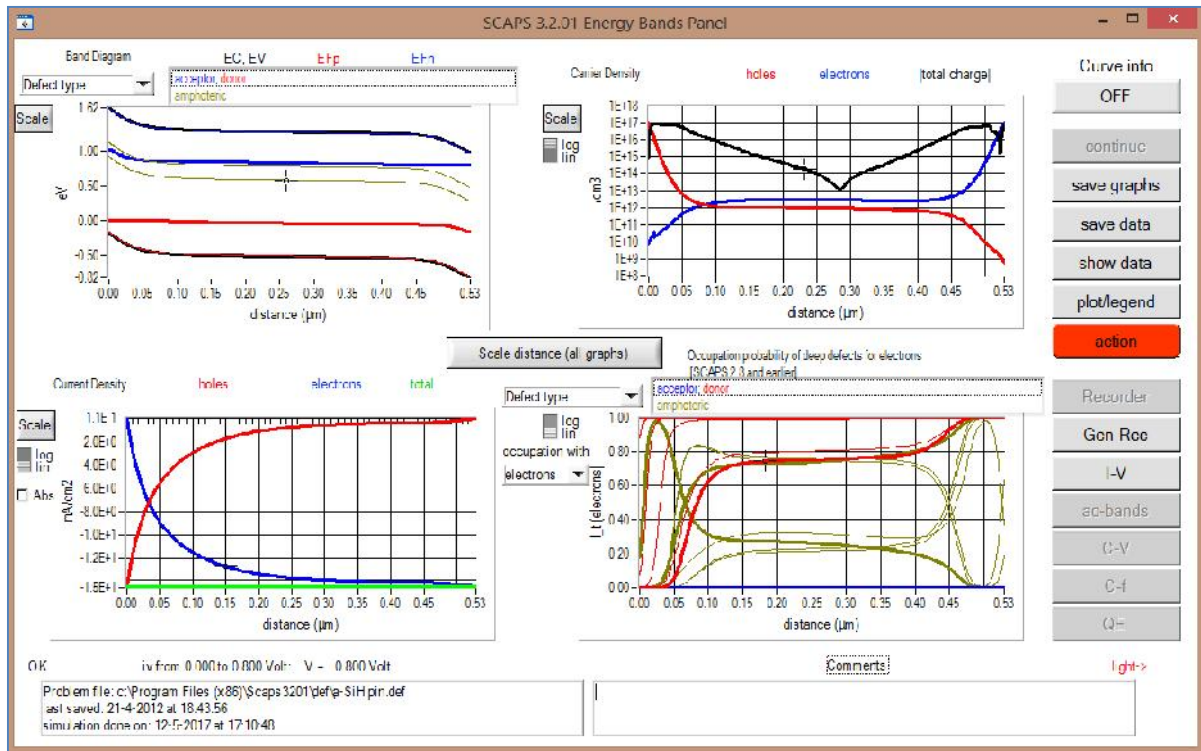


Fig.2.4 : Panneau des couches des résultats de simulation.

## II.4. Avantages et inconvénients de l'utilisation du logiciel SCAPS

Les avantages du SCAPS sont multiples à savoir :

- La grande vitesse d'exécution.
- Les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif.
- Possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celles-ci.
- L'introduction des résistances série et shunt.

Pour les inconvénients de ce logiciel sont :

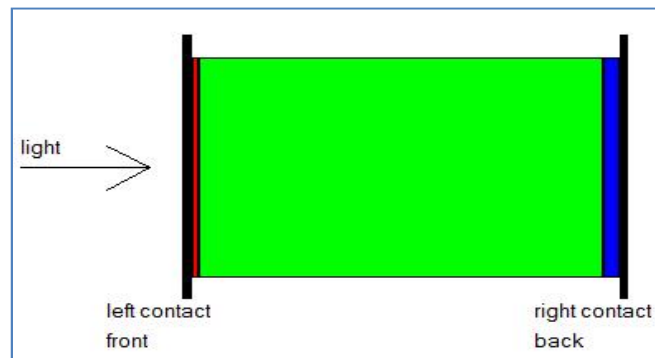
- L'absence de la réflexion aux interfaces de différentes couches constituant la cellule qui n'est pas gérée par le SCAPS et son programme de traçage inflexible.
- Aussi, il peut être instable lorsque le dispositif est loin d'être idéal et considère des barrières secondaires.

## II.5.Applications : Simulation de cellules en couches minces

A travers les simulations présentées ci-après, nous essayons d'envisager l'influence du dopage, de la température ainsi que la géométrie de la cellule sur les caractéristiques électriques de chacune des structures étudiées.

### II.5.1.Structure amorphe (PIN)

La figure ci-dessous illustre la structure d'une cellule de type PIN à base du silicium amorphe a-Si:H. Cette cellule fait partie de nombreuses structures contenant la bibliothèque de SCAPS. La simulation de cette cellule est fait à la température ambiante, sous un spectre AM1.5G d'une puissance incidente égale à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . les résistances parallèles et série sont considérées nulles.



**Fig.2.5** : Cellule photovoltaïque de type a-Si : H (pin).

#### II.5.1.1.Effet de l'épaisseur

Les résultats de l'analyse de l'effet de l'épaisseur sur les principaux paramètres électrique de la cellule sont regroupés dans le tableau 2.1.

➤ Effet de l'épaisseur de la couche a-Si (P)

Concédèrent que la couche a-Si (N) à une épaisseur de 0.02  $\mu\text{m}$  et un dopage  $10^{17} \text{at. Cm}^{-3}$  et  $10^6 \text{at. Cm}^{-3}$ .

$W_p (\mu\text{m})$	Voc (V)	Jsc (mA/cm)	FF (%)	$\eta$ (%)
0.04	1.50	17.37	43.72	11.06
0.3	1.28	9.15	49.70	5.84
0.9	1.12	5.05	56.66	3.23
1.2	1.11	4.76	57.34	3.04

**Tab.2.1** : l'effet de l'épaisseur de la couche a-Si(P).

➤ Effet de l'épaisseur de la couche a-Si (N)

Concédèrent que la couche a-Si (P) à une épaisseur de 0.09  $\mu\text{m}$  et un dopage donneur de  $1 \cdot 10^6 \text{at. Cm}^{-3}$  et un dopage accepteur  $1 \cdot 10^{17} \text{at. Cm}^{-3}$ .

$W_n (\mu\text{m})$	Voc (V)	Jsc (mA/cm)	FF (%)	$\eta$ (%)
0.04	1.32	8.10	42.25	4.55
0.3	0.98	2.76	53.44	1.46
0.9	0.82	0.875	60.60	0.44
1.2	0.8	0.652	61.32	0.32

**Tab.2.2** : l'effet de l'épaisseur de la couche a-Si(N).

D'après les résultats ci-dessus, quand l'épaisseur des deux couches augmente, une décroissance rapide du courant de court circuit a été enregistrée. Par conséquent le rendement énergétique de la cellule diminua. Aussi, l'augmentation de l'épaisseur à un effet limité sur la tension de circuit ouvert. Cette décroissance est expliquée par le retard dans temps de transit des paires électrons/trous de l'interface émetteur-base vers le contact arrière.



### II.5.1.2. Effet de la température

La température est le second paramètre important affectant le comportement de la cellule photovoltaïque. Le tableau 2.3 regroupe les résultats de l'effet de la température sur les paramètres de la cellule. D'après ces résultats nous remarquons que le courant et la tension sont fortement dépendants de la température. Pour la tension de circuit ouvert, elle décroît rapidement avec l'augmentation de la température. En effet, lorsque la température augmente le gap d'énergie devient plus étroit et ceci accélère beaucoup plus le phénomène de recombinaison des paires électrons-trous entre la bande de conduction et la bande de valence.

Ce problème est inévitable à cause de milieu d'installation de la cellule mais nous pouvons le minimiser en réalisant celle-ci à l'aide de matériaux résistant à l'augmentation de la température [28].

T(K)	Voc (V)	Jsc (mA/cm)	FF (%)	$\eta$ (%)
270	2.54	17.52	28.16	12.57
300	1.55	17.36	43.04	11.60
350	0.82	17.11	68.45	9.68
400	0.68	16.87	68.25	7.87

**Tab.2.3** : Effet de la température sur les paramètres électriques de la cellule.

### II.5.1.3. Effet du dopage

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats d'analyse de l'influence de la concentration des dopants sur les caractéristiques de la cellule. Les valeurs enregistrées montrent une augmentation remarquable du Voc, Jsc, FF et  $\eta$  en fonction de l'augmentation de la concentration des dopants. Par conséquent le rendement croit grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et leur durée de vie. On note que pour les forts dopages le rendement de la cellule risque de se décroître suite à la croissance des recombinaisons Auger.



Dopage		Voc (V)	Jsc (mA/cm)	FF (%)	$\eta$ (%)
ND	NA				
1.000E+6	1.000E+2	0.36	15.88	53.18	3.06
1.000E+6	1.000E+14	1.34	17.21	47.60	10.99
1.000E+6	1.000E+16	1.52	17.32	43.38	11.48
1.000E+6	1.000E+19	1.58	17.22	42.60	11.64
1.000E+6	1.000E+20	1.59	17.20	42.55	11.65
1.000E+6	1.000E+22	1.59	17.20	42.53	11.66

**Tab.2.4:** Effet du dopage.

### II.5.2. Etude comparative entre quelques structures de cellules en couche minces

Dans cette partie, nous exposons les caractéristiques électriques de trois cellules différentes : (a-Si/c-Si/a-Si), (c-Si/a-Si/c-Si), (c-Si/c-Si/c-Si) selon la structure de la figure 2.6. Cette étude comparative a pour but d'optimiser une conception bien spécifique d'une cellule en couche mince. D'après la simulation, le rendement enregistré pour les cellules (a-Si/c-Si/a-Si), (c-Si/a-Si/c-Si) reste faible à celui obtenu pour la cellule **c-si/c-si/c-si** ( $\eta = 9.14\%$ ). On note que la dégradation du rendement dans le cas des cellules en silicium amorphe est liée aux défauts envisagés dans les structures (défauts donneurs, accepteurs, etc.). Ces défauts ont pour effet de piéger les porteurs de charge et donc une dégradation de leur concentrations.

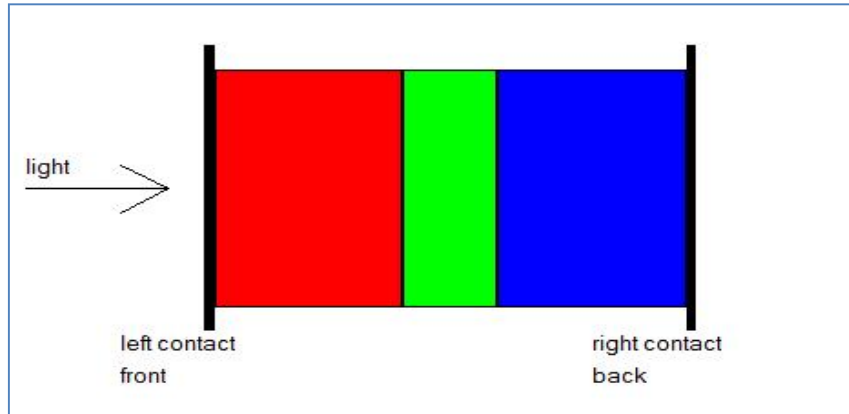


Fig.2.6 : Structure de base des cellules étudiées.

➤ Structure (a-Si/c-Si/a-Si)

Couche	Epaisseur (μm)	Dopage		J <sub>sc</sub> mA/cm <sup>2</sup>	η(%)
		Nd	Na		
a-Si (p)	0.04	1.000E+6	1.000E+16	11.43	9.10
c-Si (i)	0.02	1.000E+6	1.000E+6		
a-Si (n)	0.04	1.000E+19	1.000E+6		

Tab.2.5 : Les Paramètres physiques et géométriques ainsi que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule (a-Si/c-Si/a-Si).

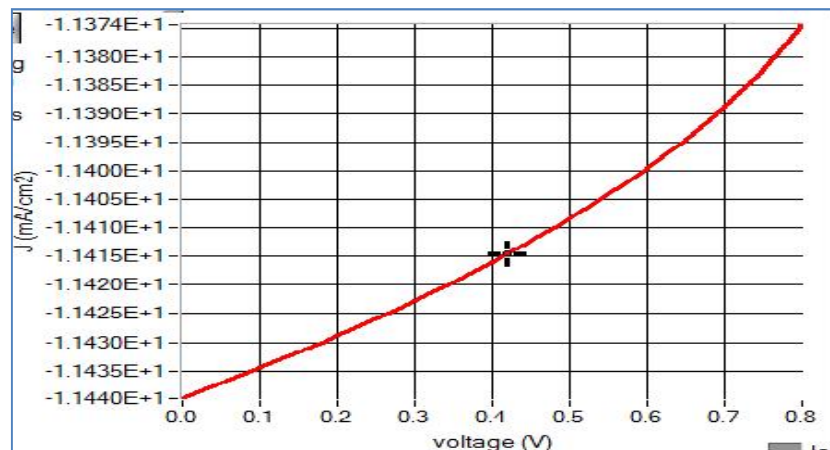
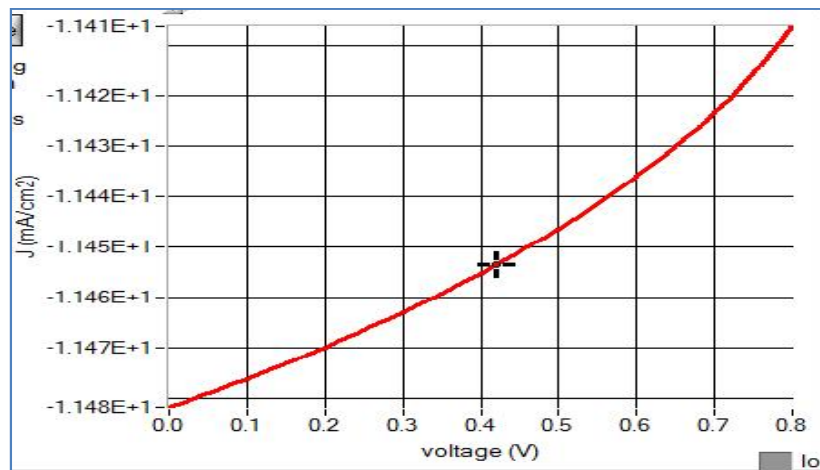


Fig.2.7: Caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension pour la structure (a-Si/c-Si/a-Si).

## ➤ Structure de la cellule (c-Si/a-Si/c-Si)

Couche	Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Dopage		$J_{sc}$ $\text{mA}/\text{cm}^2$	$\eta\%$
		Nd	Na		
c-Si (p)	0.04	1.000E+6	1.000E+16	11.48	9.12
a-Si (i)	0.02	1.000E+6	1.000E+6		
c-Si (n)	0.04	1.000E+19	1.000E+6		

**Tab.2.6:** Les Paramètres physiques et géométriques ainsi que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule (c-Si/a-Si/c-Si).



**Fig. 2.8 :** Caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension pour la structure (c-Si/a-Si/c-Si).

## ➤ Structure de la cellule (c-Si/c-Si/c-Si)

Couche	Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Dopage		$J_{sc}$ $\text{mA}/\text{cm}^2$	$\eta\%$
		Nd	Na		
c-Si (p)	0.04	1.000E+6	1.000E+16	11.48	9.14
c-Si (i)	0.02	1.000E+6	1.000E+6		
c-Si (n)	0.04	1.000E+19	1.000E+6		

**Tab.2.7 :** Les Paramètres physiques et géométriques ainsi que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule (c-Si/c-Si/c-Si).

## II.6.Optimisation de la couche absorbante (contact avant et contact arrière) d'une cellule de type : PNN

Dans cette partie nous avons étudiée l'effet de la couche absorbante sur le rendement d'une cellule de type PNN. Pour cela nous avons effectuer des essais pour quatre métaux différents : le platine, le Chrome, le cuivre et le Fer en faisant varier leurs fonctions de travail. On appel fonction de travail (work function) l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au niveau de fermi pour l'arracher du métal et l'amener au niveau du vide NV tel que :  $\phi_m = E_{NV} - E_F$  Cette fonction est une constante physique du métal considéré.

### II.6.1. Contact avant

Métal	$\phi_m$ (ev)	Voc(V)	Jsc(mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	$\eta(\%)$
Fe	4.5	0.12	11.60	51.67	0.73
Cu	4.65	0.27	11.87	67.32	2.16
Co	5.0	0.62	16.67	61.92	6.49
Pt	5.65	/	12.19	/	9.69

**Tab.2.8 :** Paramètre physique et résultat de la structure PNN des différent métaux (contact avant).

## II.6.2. Contact arrière

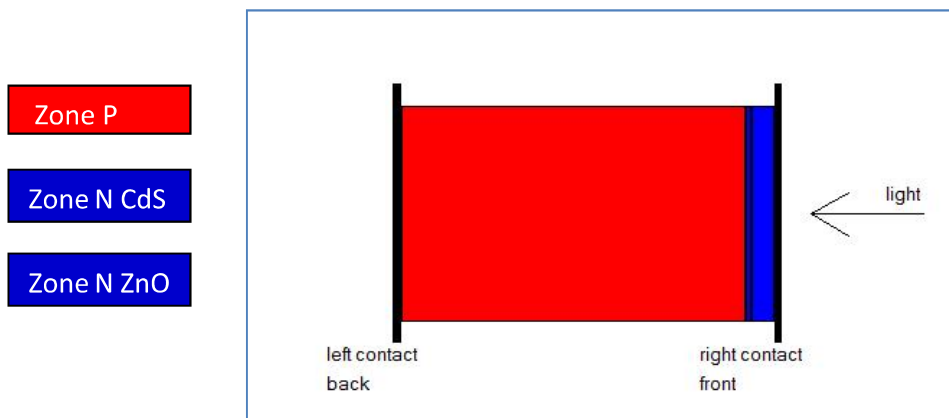
Métal	$\phi_m$ (ev)	Voc(V)	Jsc(mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	$\eta$ (%)
Co	5.0	0.23	10.99	63.65	1.65
Cu	4.65	0.58	11.16	78.17	5.11
Fe	4.5	0.73	11.19	80.88	6.66
Sc	3.5	/	11.24	/	8.93

**Tab.2.9:** Effet du contact arrière sur les caractéristiques d'une cellule PNN (contacte arrière).

D'après les résultats obtenus, pour les différents métaux étudiés, nous constatons que le type du métal constituant le contact avant affecte beaucoup le rendement de la cellule que celui du contact arrière. De plus un meilleur rendement égal à 9,69% est enregistré pour le Platine. De même, une optimisation de la géométrie des deux contacts est toujours sollicitée afin d'améliorer le rendement.

## II.7. Simulation d'une cellule de type CIGS

Une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat (Fig. 2.8). Dans cette partie nous allons étudier l'effet des trois couches ZnO, CdS et CIGS sur le rendement de conversion électrique afin d'obtenir les paramètres optimaux. Pour cela nous allons analyser l'effet de l'épaisseur ainsi que du dopage.



**Fig.2.9:** Structure de la cellule solaire de type n-ZnO/n-CdS/p-CIGS.

- **La couche absorbante en Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>**

La couche absorbante polycristalline en Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> est un semi-conducteur de type p favorisant l'absorption des photons qu'ils contribuent à la génération des paires électron-trou.

- **La couche tampon en CdS**

Une couche mince en sulfure de cadmium (CdS) de type n appelée couche tampon est déposée par bain chimique sur l'absorbeur afin de réaliser la jonction p-n avec le CIGS.

### II.7.1. Effet de la couche d'absorbeur CIGS

#### A. Influence du dopage de l'absorbeur

Le tableau 2.10 regroupe les valeurs des paramètres électriques de la cellule obtenues pour des concentrations des dopants accepteurs (de l'absorbeur CIGS) allant de  $2 \cdot 10^{15}$  à  $2 \cdot 10^{19} \text{ at. } \text{cm}^{-3}$ . De plus en plus que le dopage augmente le rendement de la cellule s'améliore de plus. Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau cristallin (à partir d'un certain seuil) agissent comme facteurs de perte. Par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs de charge en réduisant ainsi le rendement de conversion.

CIGS/ $N_A$ (at./cm <sup>3</sup> )	Voc (V)	Icc (mA)	FF (%)	$\eta$ (%)
2.000E+15	0.56	34.62	78.11	15.20
2.000E+16	0.61	32.87	80.53	16.19
2.000E+19	0.61	32.87	80.53	16.19

**Tab.2.10:** Effet du dopage de la couche absorbant d'une cellule solaire de CIGS.

### B. Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur CIGS allant de 0.4 à 3  $\mu\text{m}$  pour un dopage environ  $10^{17} \text{ at./Cm}^{-3}$ .

Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Voc (V)	Icc (mA)	FF(%)	$\eta$ (%)
0.4	0.64	23.30	36.85	5.53
0.8	0.65	27.64	42.24	7.68
1.2	0.66	29.74	44.79	8.87
1.6	0.60	32.51	79.41	15.55
2	0.60	33.05	79.65	15.97
2.4	0.60	33.41	79.77	16.24
2.8	0.61	33.65	79.81	16.42
3	0.61	33.74	79.82	16.49

**Tab.2.11.** Effet de l'épaisseur de la couche absorbeur d'une cellule solaire de CIGS.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une augmentation remarquable du rendement en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur CIGS. Un rendement maximal de 16.49% est enregistré pour une épaisseur de 3  $\mu\text{m}$ . Aussi la probabilité de recombinaison des porteurs générés est plus importante au voisinage du contact arrière. Quand les porteurs atteignent la couche d'absorbeur CIGS (la jonction p -n), se trouvent recombiner dans la couche tampon CdS, où ils vont circuler dans la couche d'absorbeur CIGS en diminuant la densité du courant photo-généré. Donc la diminution du rendement de conversion [29].

### II.7.2.Effet de la couche tampon Cds

#### A. Influence du dopage de la couche CdS

Le tableau ci-dessous regroupe l'évolution du rendement électrique ainsi que d'autres paramètres en fonction du dopage des donneurs, pour une épaisseur de la couche égale à 0.05  $\mu\text{m}$ . Suivant les valeurs enregistrés on peut constater trois régions : pour le dopage allant  $1.000\text{E}+16 \text{ at./cm}^3$  à  $1.000\text{E}+20 \text{ at./cm}^3$  une augmentation considérable du rendement est enregistrée. Ce rendement reste inchangé pour le dopage compris entre  $1.000\text{E}+20 \text{ at./cm}^3$  et  $1.000\text{E}+21 \text{ at./cm}^3$ . Pour des forts dopages, le rendement décroît rapidement sous l'effet de l'augmentation des interactions électroniques.

$\text{Cds}/\text{ND}$ at./cm <sup>3</sup>	Voc (V)	Icc (mA)	FF (%)	$\eta$ (%)
1.000E+16	0.61	33.34	72.34	14.79
1.000E+19	0.61	32.74	80.54	16.12
1.000E+20	0.61	32.67	80.54	16.09
1.000E+21	0.61	32.68	80.54	16.09
1.000E+22	0.61	32.66	80.54	10.09

**Tab.2.12:** Influence du dopage de la couche tampon CdS.

### B. Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS

Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Voc (V)	Icc (mA)	FF (%)	$\eta$ (%)
0.05	0.61	33.74	79.87	16.49
0.045	0.61	33.92	79.88	16.59
0.040	0.61	34.07	79.95	16.69
0.030	0.61	34.33	80.12	16.86
0.020	0.61	34.53	80.30	17.00
0.015	0.61	34.61	80.39	17.06
0.01	0.61	34.68	80.47	17.11
0.005	0.61	34.73	80.53	17.15

**Tab.2.13 :** Influence de l'épaisseur de Cds.

Les résultats du tableau 2.13 montrent qu'il y ait une diminution en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS. Un rendement de 17.15% avec une épaisseur de 0.005  $\mu\text{m}$ . Ceci s'explique par une absorption considérable de photons ( $E_{\text{photon}} > E_{\text{g CdS}} = 2.4\text{eV}$ ) dans cette couche. Aussi, l'absorption dans la couche tampon diminue considérablement le nombre des photons incidents qu'ont une énergie supérieur au gap du CdS.

## II.7.3. Effet des paramètres de la couche fenêtre ZnO

### A. Influence du dopage de la couche fenêtre ZnO

Le tableau ci-dessous regroupe l'évolution du rendement électrique ainsi que d'autres paramètres en fonction du dopage des donneurs, pour une épaisseur de la couche ZnO égale à 0.2  $\mu\text{m}$ .



<b>Cds/ND at./cm<sup>3</sup></b>	<b>Voc (V)</b>	<b>Icc (mA)</b>	<b>FF (%)</b>	<b>η (%)</b>
1.000E+16	0.61	32.86	80.53	16.19
1.000E+18	0.61	32.86	80.53	16.19
1.000E+20	0.61	32.95	80.53	16.23
1.000E+23	0.61	32.98	80.55	16.41

**Tab.2.14:** Influence du dopage de la couche ZnO.

Nous remarquons que le rendement électrique augmente de 16.19% et 16.41%. C'est à partir d'une concentration de l'ordre de  $1.000E+20$  at./cm<sup>3</sup> que l'augmentation du nombre des dopants peut améliorer la collecte des porteurs photo-générés et par conséquent amélioration du rendement électrique.

### B. Influence de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO

Le tableau ci-dessous représente la variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur, pour un dopage de l'ordre de  $10^{18}$  at./cm<sup>-3</sup>.

<b>Epaisseur (μm)</b>	<b>Voc (V)</b>	<b>Icc (mA)</b>	<b>FF (%)</b>	<b>η (%)</b>
0.2	0.61	33.31	79.91	16.29
0.18	0.61	33.34	79.91	16.30
0.16	0.61	33.37	79.90	16.32
0.14	0.61	33.40	79.89	16.33
0.1	0.61	33.51	79.87	16.38
0.08	0.61	33.58	79.85	16.42
0.06	0.61	33.68	79.83	16.46
0.04	0.61	33.81	79.81	16.52
0.02	0.61	33.95	79.80	16.60

**Tab.2.15:** Influence de l'épaisseur de la couche ZnO.

La variation du rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Un meilleur rendement est obtenu pour les faibles épaisseurs.

conclusion générale

## Conclusion générale

Actuellement, il existe des filières en plein essor basées sur des technologies dites des couches minces. Elles permettent de convertir le plus de photons possibles en électricité en utilisant le minimum de matériaux réactifs. La réduction du coût de fabrication grâce à une réduction de matières premières et une méthode d'intégration totale sont deux points aujourd'hui à fort potentiel de développement. Contrairement aux filières de silicium cristallin, ces technologies ne nécessitent ni découpe ni post-assemblage de cellules pour aboutir à un module commercial réduisant les coûts de fabrication. Le travail réalisé dans ce mémoire rentre dans le cadre d'optimisation d'une cellule solaire en couche mince de type CIGS et celles à base de silicium amorphe.

Le principe de fonctionnement des cellules à base de silicium et ces caractéristiques électriques ont été bien détaillés dans la première partie de ce mémoire. Dans la deuxième partie nous avons simulé plusieurs structures, en analysant l'effet des différents paramètres physiques et géométriques tels que l'épaisseur, la température ainsi que le dopage sur le rendement énergétique des cellules. Après les résultats obtenus, l'effet de ces paramètres était remarquable notamment l'épaisseur, et le meilleur rendement est enregistré pour les cellules de type CIGS.

Comme perspective à ce travail une future réalisation pratique des cellules étudiées est bien suggérée pour comparer et concrétiser les résultats obtenus.

## ***Bibliographie***

**[1]** [http://tecsol.blogs.com/mon\\_weblog/2014/09/aie-comment-l%C3%A9nergie-solaire-pourrait-%C3%AAtre-la-plus-grande-source-d%C3%A9lectricit%C3%A9-au-milieu-du-si%C3%A8cle.html](http://tecsol.blogs.com/mon_weblog/2014/09/aie-comment-l%C3%A9nergie-solaire-pourrait-%C3%AAtre-la-plus-grande-source-d%C3%A9lectricit%C3%A9-au-milieu-du-si%C3%A8cle.html).

**[2]** stephen giraud << Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudre >> thèse de doctorat, 2015, université GRENOBLE.

**[3]** AMARA Karima « contribution à l'étude de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension » mémoire de magister, 2011, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

**[4]** BOUAFIA Mounir et DEBLAOUI Laid << Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de di séléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS » >> Diplôme de Master professionnel, 2011, Université Kasdi Merbah–Ouargla.

**[5]** <https://openclassrooms.com/courses/l-electronique-de-zero/introduction-aux-semi-conducteurs>.

**[6]** docteur Anne LABOURET « Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque » 5ème édition ,18 août 2010.

**[7]** Chap. 2 Structure et propriétés des matériaux « CONDUCTEURS – SEMI-CONDUCTEURS – SUPRACONDUCTEUR »

**[8]** ABAIDIA Abdelghafour et DAHMANE Abderrahmen « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) » université -KASDI MERBAH – OUARGLA, 2015/2016

**[9]** Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).

**[10]** DJERIOUAT Khadidja « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à Hétérojonctions : GaInP / GaAs », 2010, Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen.

[11] Barnett A. M., Ford D. H., Checchis J. C. et al. Very large area Silicon Film solar cells. Proc. 14th European PV Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 1997, pp. 999-1002.

[12] <http://www.enr.fr/solaire-photovoltaïque#> Les technologie du photovoltaïque.

[13] HELALI Kamelia << Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative >>, 2012, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[14] <http://groupe-capsud.com/cnt/capsud/Les-differents-types-de-cellules-photovoltaïques-6056-79008-prod.html>.

[15] Ben Abderrazak Ghania << Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS >> 2014, Université Med Khider Biskra.

[16] H. Mathieu. Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. Dunod. 2004.

[17] D. Ouarda << Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $Cu_2ZnSnS_4$ >>. Thèse de doctorat, 2012/1/2013, Université Mentouri de constantine.

[18] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green. High efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates, Proc. 11th Internat. Photovolt. Science and Engineering Conf., Sapporo, Japan, 1999, pp. 557.

[19] Zhao J., Wang A., Wenham S. R. 21,5% efficient 47  $\mu m$  thin layer silicon cell. Proc. 13th European PV Solar Energy Conference, Nice, France, 1995, pp. 1566-1569.

[20] Zheng G. F., Sproul A. B., Wenham S. R. et al. Improved performance of multilayer silicon solar cells. Proc. 13th European PV Solar Energy Conference, Nice, France, 1995, pp. 1642-1645.

[21] Barnett A. M., Ford D. H., Checchis J. C. et al. Very large area Silicon Film solar. cells. Proc. 14th European PV Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 1997, pp. 999-1002.

[22] FEROUANI Abdelmadjid << Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de  $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) >> 2015/2017, université Abou bakr Belkaid de tlemcen .

**[23]** Shi Z., Zhang W. et al. The effects of solvent and dopant impurities on the performance of Liquid Phase Epitaxial silicon solar cells, Proceeding of 1st WCEPVSEC, Hawaiï, USA, 1994, pp. 1339-1346.

**[24]** <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>.

**[25]** <http://strabic.fr/Des-couches-minces-dans-l-espace>. Entretien avec Pere Roca i Cabarrocas

**[26]** Final Report Summary - FAST TRACK (Accelerated development and prototyping of nano-technology-based high-efficiency thin-film silicon solar modules). Géré par l'Office des publications de l'UE

**[27]** par Philippe POINTEREAU (SOLAGRO) et Anouk ARNAL (Agence Paysages « Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental », Juillet 2009.

**[28]** chapitre 4 : Simulation numérique de la cellule CIGS sur SCAPS-1D.

**[29]** Djemai Mounira << Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga) >> , 2013-2014, Université Med khider Biskra.

## ملخص

في مجال الطاقة الضوئية، صممت الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرفيعة لخفض تكلفة الصناعة التحويلية وتحسين الكبير في كفاءة الخلايا. وأيضاً فإن تحقيق هذا النوع من الخلايا يرتبط كثيراً بالتطور السريع للعمليات التكنولوجية المتعلقة بوضع أشباه النواقل. فإن أغلبية الخلايا ذات الطبقات الرفيعة تتركز بشدة على الأبعاد الهندسية والخصائص الفيزيائية للطبقة الماصة. قصد تحسين كفاءة الطاقة في هذا النوع من الخلايا. اقترحنا إجراء دراسة بالحاكاة لهذا النوع من الخلايا في هذا العمل.

**الكلمات المفتاحية :** خلية ضوئية ، خلايا ذات طبقات رقيقة ، المرود ، SCAPS .

## Résumé

Dans le domaine de la photovoltaïque, réaliser des cellules solaires en couches minces a pour but de réduire le coût de fabrication et d'améliorer beaucoup plus le rendement énergétique des cellules. Aussi, la réalisation de ce type de cellules s'attache beaucoup à l'évolution rapide des procédés technologiques de croissance et de dépôt des couches semi-conductrices. Aussi, le rendement des cellules en couches minces est fortement dépendant des dimensions géométriques et les propriétés physiques de la couche absorbante. Donc, dans le but d'optimiser le rendement énergétique de ce type de cellules, une étude par simulation est proposée dans ce travail.

**Mot clé :** cellule solaire, couche mince, rendement, SCAPS.

## Abstract

In the field of photovoltaics, making thin-film solar cells is designed to reduce the cost of manufacturing and significantly improve the energy efficiency of the cells. Thus, the realization of this type of cells is very attached to the rapid evolution of the technological processes of growth and deposition of semiconductor layers. Also, the yield of thin-layered cells is strongly dependent on the geometric dimensions and physical properties of the absorbent layer. Therefore, in order to optimise the energy efficiency of this type of cell, a simulation study is proposed in this work.

**Key word :** solar cells, thin-film, performance, SCAPS.