

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Option : Conversion photovoltaïque

Thème :

**ETUDE DE L'EFFET DE LA COUCHE ANTIREFLET TCO SUR LES CELLULES  
SOLAIRES A BASE DE SILICIUM**

Présenté par :

Bouchelaghem Selma

ENCADREUR :

Dr : Bedia Fatima Zohra

## Remerciement :

En préambule à ce mémoire je remercie le Dieu qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces années d'étude.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury d'avoir accepté de faire partie du jury pour examiner ce mémoire et je tiens à remercier l'encadreur de ce mémoire Mde Bedia Fatima Zohra

On n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Je remercie aussi mes amis avec qui j'ai partagé tant de moments de la vie heureux et difficiles, et qui m'ont aidé à traverser certaines épreuves au cours cette période.

Merci à tous et à toutes.

## ملخص:

عمل هذه الدراسة هو دراسة المحاكاة العددية لتحسين المعلمات من متغيرات الخلايا الشمسية نوع أكسيد موصل شفاف/ السليكون

الجرينوفولفين(ن) / السليكون البلوري(ع) مستخدما جهاز محاكاة البرمجيات SCAPS.

قمنا بتحليل تأثير سماكة و تأثير المنشطات من التكلفة الإجمالية للملكية على أداء الخلايا الشمسية.

قد وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في المحاكاة أن هذا النوع الخلايا الشمسية نوع أكسيد موصل شفاف ذات

لأكسيد الزنك ZnO قد يصل مردودها إلى 18.10% بسمك  $0.08 \mu\text{m}$  إلى ITO وكذلك بالنسبة قد يصل مردود

إلى 17% بسمك  $0.08 \mu\text{m}$ .

هذه الخلايا الشمسية يحمل حلا وسطا جيدا بين الشفافية البصرية و المردود التحويل.

الكلمات الرئيسية: TCO, خلية متغايرة, SCAPS, محاكاة

## Résumé :

Le travail de ce mémoire est une étude par simulation numérique afin d'optimiser les paramètres d'une cellule solaire a hétérojonction du type oxyde transparent conducteur/ $\mu\text{c-Si} : \text{H(n)/c-Si(p)}$  en utilisant la simulation numérique avec logiciel SCAPS.

Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur et le dopage du TCO sur la performance de la cellule solaire.

Les résultats acquis en simulation montrent que ce type des cellules solaires (sans contact) peut avoir un bon rendement théorique lorsque les paramètres du TCO sont bien choisis. En effet, une épaisseur du ZnO de  $0.08 \mu\text{m}$  et un dopage de  $N_D=10^{20}$  la cellule ZnO/  $\mu\text{c-Si} : \text{H(n)/c-Si(p)}$  permet a ces cellules atteindre un rendement de l'ordre de 18.10%. Et une épaisseur de ITO de  $0.08 \mu\text{m}$  un dopage de  $N_D=10^{20}$  pour le ITO lorsqu'il s'agit des cellules ITO/  $\mu\text{c-Si} : \text{H(n)/c-Si(p)}$  peuvent atteindre un rendement de 17%.

Compte tenu de ces résultats, les cellules solaires a hétérojonction du type ZnO et ITO/  $\mu\text{c-Si} : \text{H(n)/c-Si(p)}$  présente un bon compromis entre le rendement de conversion et la transparence optique.

MOTS CLES : TCO, Hétérojonction, SCAPS

## ABSTRACT:

The work of this thesis is a numerical simulation study to optimize the parameters of a solar cell oxide type transparent conductive heterojunction /  $\mu\text{c-Si: H (n) / c-Si (p)}$  using simulation SCAPS with digital software.

We analyzed the influence of the thickness and doping of the TCO on the performance of the solar cell.

The results obtained in simulation show that this type of solar cells (contactless) can have a good theory when the parameters of the TCO are well chosen. Indeed, a thickness of ZnO of  $0.08\mu\text{m}$  and a doping of  $N_D = 10^{20}$  the cell ZnO /  $\mu\text{c-Si: H (n) / c-Si (p)}$  allows these cells to reach this yield and the thickness of ITO is  $0.08 \mu\text{m}$  and doping of  $N_D = 10^{20}$  the case of cells ZnO/  $\mu\text{c-Si: H (n) / c-Si (p)}$  showed a yield of the order of 17 %.

Given these results, the heterojunction solar cells of the type ZnO and ITO /  $\mu\text{c-Si: H (n) / c-Si (p)}$  is a good compromise between the conversion efficiency and Optical transparency.

KEYWORDS: TCO Heterojunction, SCAPS

## LISTE DES FIGURES :

### Chapitre I :

Figure I.1 : Structure de bande d'énergie des TCO.....	5
Figure I.2 : Evolution du nombre de publications traitant de ZnO, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et SnO <sub>2</sub> depuis 1970 à 2008 (Recherche effectuée sur la base de données Scopus ).....	7
Figure I.3 : Exemple de capteur à CO basé sur une couche mince de SnO <sub>2</sub> .....	12
Figure I.4 : Exemple d'une fenêtre électro chromique avec les différentes couches la composant.....	14

### Chapitre II :

Figure II.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	18
Figure II.2: Réflexion, transmission et absorption.....	19
Figure II.3: Structure et diagramme de bande d'une cellule PV.....	22
Figure II.4: Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule PV.....	23
Figure II.7 : Structure la cellule HIT.....	26
Figure II.7 : Schéma général présentant les trois places d'une couche de TCO.....	28

### Chapitre III :

Figure III.1. : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.....	31
Figure III.2 : Panneau des bandes d'énergie.....	33
Figure III.3 : Panneau d'affichage des courbes $I-V$ à l'obscurité et en éclairage.....	34
Figure III:4 Structure de cellule de référence utilisée pendant la simulation .....	35
Figure III:5 Caractéristiques $J(V)$ en obscurité et sous AM1.5G de la cellule référence...38	
Figure III : 6 variation du $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; $FF$ ; $\eta$ de la cellule HJ avec le travail de sortie.....	39
Figure III : 7 variation du $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; $FF$ ; $\eta$ de la cellule HJ avec l'épaisseur du substrat.	40
Figure III : 8 variation du $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; $FF$ ; $\eta$ de la cellule HJ avec l'épaisseur de la couche TCO.....	41
Figure IV : 9 variation du $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; $FF$ ; $\eta$ de la cellule HJ avec le dopage de la couche TCO.....	43

## LISTE DES TABLEAUX :

### Chapitre I :

**Tableau I.1 :** Caractéristique minimale pour un TCO.....8

### Chapitre III :

**Tableau III.1** Les paramètres de la cellule  $\mu\text{c-Si:H(n)}$  / c-Si (p) .....36

**Tableau III.2** Les paramètres électriques des TCO.....41

## SOMMAIRE

### Chapitre I : Etat de l'art sur les TCO

I. Introduction générale.....	1
I.1 Historique .....	4
I.2. Définition d'un matériau TCO :.....	4
I.3 Enjeu économique:.....	5
I.4 Critères de choix des oxydes transparent conducteurs (TCO) : .....	7
I.5 Présentation des oxydes transparents conducteurs étudiés.....	9
I.5.1 Oxyde de Zinc (ZnO) :.....	9
I.5.1.1 Propriétés optiques :.....	9
I.5.1.2 Propriétés électriques .....	10
I.5.2 Oxyde d'indium dope à l'étain (ITO).....	10
I.5.2.1 Propriétés électriques .....	10
I.5.2.2 Propriétés optiques .....	11
I.6 Applications des Oxydes transparent conducteurs : .....	11
I.6.1 Capteurs à gaz :.....	11
I.6.2 Cellules solaires : .....	12
I.6.3 Couches protectrices ou intelligentes : .....	13
I.6.4 Systèmes optoélectroniques :.....	15

### Chapitre II : Cellules solaire à base de Silicium

II. Introduction.....	17
II.1. Spectre solaire : .....	17
II.2 Conversion photovoltaïque : .....	18

II.2.1 Absorption de la lumière :	19
II.2.2 Transfert d'énergie des photons aux charges électriques :	20
II.2.3 Collecte des charges :	21
II.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :	21
II.4 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire	22
II.5 Paramètres d'une cellule solaire :	24
II.5.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$ :	24
II.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :	24
II.5.3 Facteur de forme $FF$ :	24
II.5.4 Rendement de conversion $\eta$ :	25
II.5.5 Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque :	25
II.6 Etat de l'art de la structure HIT	26
II.7 Avantages de la structure HIT :	27
II.8 Principe généraux d'utilisation de couches TCO dans la cellule solaire de Si	27

### Chapitre III : Simulation numérique par SCAPS

III.1 Introduction	30
III.2 Notions de base :	31
III.2.1 Lancer SCAPS :	32
III.2.2 Définir le problème :	32
III.2.3 Définir le point de fonctionnement :	32
III.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler :	32
III.2.5 Lancer le calcul	33
III.3 Définition d'une cellule solaire	34
III.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire:	34
III.3.2 Contacts :	35

III.3.2 Définition des couches .....	36
III.4 Simulation de l'hétérojonction TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p) :.....	36
III.4.1 Le choix des paramètres et la structure simulée:.....	37
III.4.2 la caractéristique J(V) de la cellule simulée : .....	38
III.5 Optimisation de la structure $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p) .....	42
III.5.1 L'effet du contact : .....	38
III.5.2 L'effet de la couche antireflet TCO sur la cellule solaire HJ :.....	39
III.5.3 L'influence de l'épaisseur du TCO/ZnO/ITO sur la cellule solaire HJ .....	40
III.5.3.1 L'influence du dopage TCO/ZnO/ITO sur la cellule solaire HJ .....	41
III.5.3.2 Simulation de l'hétérojonction TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p) .....	42
III.6 conclusion .....	43
Références	



# Introduction Générale

Au cours de ces dernières années, le besoin énergétique augmente car l'évolution des activités humaines ce qui entraîne le développement et le promouvoir des énergies renouvelables ainsi l'énergie solaire dont fait partie de ces énergies. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires est le silicium (plus de 95% du marché mondial). En effet, c'est un élément très abondant sur la croûte terrestre.

Les semi-conducteurs transparents sont des oxydes qui en plus d'être transparent, peuvent devenir conducteurs qu'ils possèdent un excès d'électrons dans leur réseau (de type n). On appelle ces oxydes des Oxydes Transparents Conducteurs (TCO). Ces TCO possèdent un gap élevé et sont en fait des semi-conducteurs dégénérés, c'est-à-dire que leur niveau de Fermi se situe tout proche de la bande de conduction BC, voire même à l'intérieur de cette bande. Ils sont largement utilisés pour la fabrication des diodes électroluminescentes (LED), les détecteurs de gaz, dans les fenêtres réfléchissant la chaleur (bâtiment, four,...), et dans les cellules solaires comme couche antireflet à travers laquelle la lumière est captée par la cellule. En fait, une couche de TCO sert d'électrode transparente pour collecter les porteurs de charges électriques tout en laissant passer la lumière solaire.

Cette étude est orientée vers l'utilisation du TCO dans les cellules à base de silicium à hétérojonction  $\mu\text{-Si:H(n)/c-Si(p)}$  et a permis de déterminer les paramètres critiques qui conditionnent les performances de la cellule à hétérojonctions. Ce manuscrit est organisé de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre nous présentons un état de l'art du TCO ainsi leurs propriétés physiques et optiques.
- Dans le deuxième chapitre nous donnerons une étude sur les cellules solaires à base de Silicium en général et les cellules HIT en particulier. Nous décrirons le fonctionnement et les caractéristiques de ces cellules solaires.

- Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à la description générale et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ses caractéristiques électriques et optiques. Nous présentons les cellules solaires à base de Silicium à hétérojonction HIT ainsi que l'utilisation du TCO dans les cellules solaires.
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique des cellules de type TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$  /  $\text{c-Si(p)}$  dans le but d'optimiser leurs performances photovoltaïques.
- Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale dans laquelle nous décrivons l'ensemble des résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art sur les TCO**

*Dans ce chapitre nous présentons les propriétés optiques et électriques des oxydes transparents et conducteurs TCO et leurs applications. Nous nous intéressons aux critères de choix des TCO que l'on va étudier : ZnO et ITO.*

## **I.1 Historique**

Les oxydes transparents conducteurs (TCOs) ont été observés pour la première fois en 1907 par K. Badeaker lors de la découverte de l'oxyde de cadmium (CdO) [1]. Les avancées dans le domaine TCOs n'ont réellement émergé que dans les années 1930-1940, avec notamment deux brevets portant sur l'oxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ) non dopé et dopé déposés respectivement en 1931 et 1942 [2]. En 1951, il y a eu la synthèse de l'oxyde d'indium dopé étain ( $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  ou ITO) par la technique de pulvérisation "sputtering" par J.M. Mochel [3]. L'oxyde de zinc ZnO a été découvert en 1971 par M. Matsuoka [4]. A ce jour, de nombreux matériaux TCO sont apparus, citons en particulier des composés binaires tels que  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$  et ZnO, et / ou leurs dérivés comme par exemple  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO),  $\text{ZnO}:\text{Al}$  et  $\text{SnO}_2:\text{F}$  [5].

## **I.2 Définition d'un matériau TCO**

Selon la théorie des bandes d'énergie, trois états électriques sont possibles : métal, isolant et semi-conducteur. Dans le métal, la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV) se recouvrent, permettant la libre circulation des électrons. Le semi-conducteur, quant à lui, a une bande interdite qui sépare BV et BC communément appelée gap et notée  $E_g$ . Les électrons ne peuvent pas prendre les énergies situées dans cette bande. Il faut qu'ils acquièrent de l'énergie pour passer dans BC. Pour un gap supérieur à 3 eV, on parle d'isolant car même à température ambiante, BC est vide. Un matériau, avec une transparence dans le visible et des propriétés de conduction, a des propriétés contradictoires d'un point de vue physique.

En fait, les matériaux conducteurs tels que les métaux réfléchissent une grande partie du spectre électromagnétique dont la partie du visible grâce à leurs électrons libres.

Les verres sont des matériaux communs transparents dans le visible. Un verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire sa structure n'est pas cristallisée. Ce matériau a une valeur de gap très élevée et ne peut conduire un courant électrique. Il est alors dit isolant. A première vue, l'association des deux propriétés est incompatible.

Cependant, les semi-conducteurs possédant un large gap (au minimum supérieur à 3.1 eV correspondant à une longueur d'onde de 400 nm [6]) sont théoriquement transparents dans le domaine du visible. Le dépôt en couche mince de ce type de matériau assure une faible absorption. Grâce au dopage du matériau, soit un apport d'impuretés qui augmente le nombre d'électrons libres, la conduction est accrue pour en faire un « mauvais métal ». Les oxydes métalliques sont en général des semi-conducteurs à grand gap. Ils peuvent être symbolisés par MO avec M un atome de métal et O un atome d'oxygène.

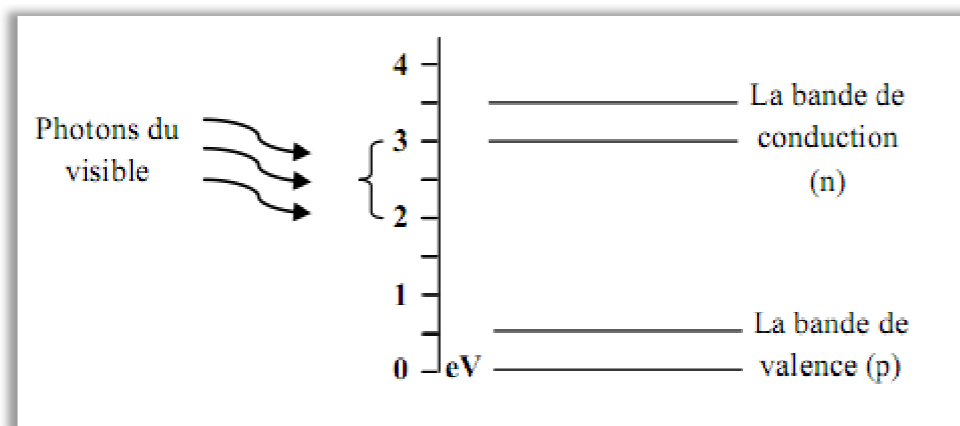


Figure I.1: Structure de bande d'énergie des TCO.

### I.3 Enjeu économique

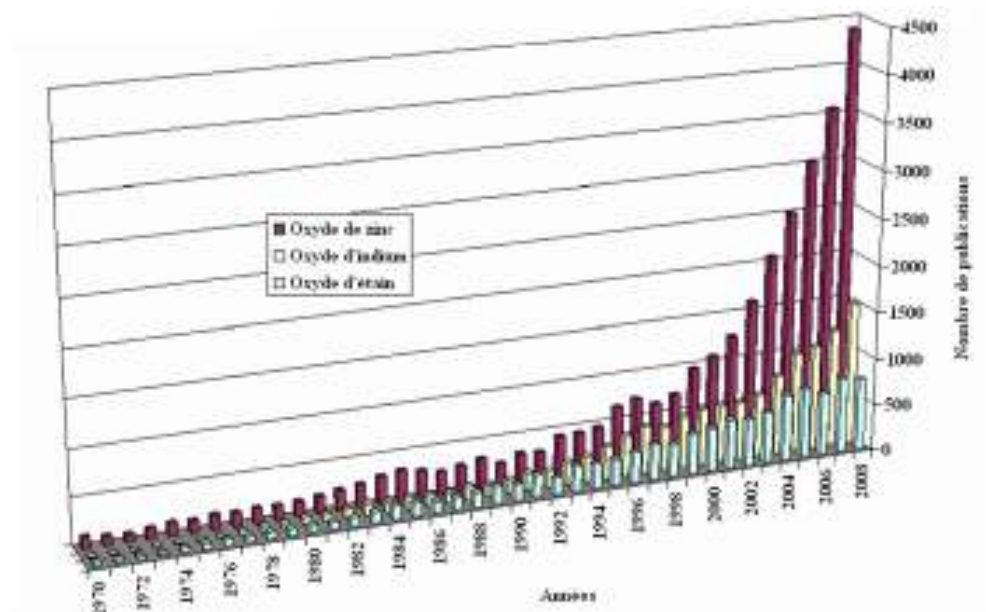
Les oxydes transparents conducteurs (TCOs) sont largement utilisés dans les dispositifs optoélectroniques comme les cellules solaires et les écrans d'affichages [7]. Parmi tous les TCOs, l'oxyde d'indium dopé étain (ITO) est le matériau le plus utilisé vu sa bonne transparence optique et sa faible résistivité électrique [8]. Cependant, l'indium est un élément rare sur terre qui rend l'ITO assez coûteux.

- Zinc: 70 000 µg/kg.

Le prix de l'indium était de 70\$/kg en 2001. Désormais, la grande demande de l'industrie des écrans plats a fait envoler son prix en quatre ans jusqu'à 1000\$/kg en 2005. Cette flambée a créé un regain d'intérêt pour trouver des remplaçants à l'ITO. Mais depuis cette hausse, son prix ne fait que diminuer au point d'atteindre une baisse récente de plus de 70 % par rapport à son ancien maximum de 1000\$. En effet, en novembre 2008, le kilogramme d'indium s'achetait à 540 \$ et atteint en août 2009, le prix de 362 \$/kg. Les fabricants de système à écran plat ne montrent aucun signe de changement dans l'utilisation de l'ITO. Sachant que ce secteur d'activité est le plus grand consommateur d'ITO, rien ne suggère le développement de solutions sans ce matériau. Seuls de nouveaux développements chez les fabricants sont recherchés pour diminuer le coût de l'utilisation de l'indium comme le recyclage de vieux écrans plats.

Néanmoins, quelques signes de changement apparaissent. Nano Markets ne souligne que le développement de produits tels que les OLED (Organic LED) ou les cellules solaires photovoltaïques favorise la recherche d'une alternative sérieuse à l'utilisation de l'ITO. Récemment, l'oxyde de zinc (ZnO), non dopé et dopé, est intensivement étudié comme un matériau alternatif à l'ITO.

La figure I.2 montre l'évolution du nombre d'articles publiés par année portant l'oxyde de zinc, d'indium et d'étain depuis les années 70 jusqu'en 2008 [9]. Ces trois oxydes métalliques sont les plus étudiés car ils ont démontré les meilleures propriétés. Nous remarquons que l'oxyde de zinc est le plus étudié récemment. L'explication peut venir du fait que l'oxyde de zinc est aussi utilisé dans de nombreuses applications optoélectroniques telles que les diodes électroluminescentes (LED) émettant dans les UV. Les deux autres oxydes sont principalement étudiés comme électrodes transparentes. Néanmoins, de nombreux autres oxydes métalliques existent avec des propriétés plus ou moins similaires. les capteurs de gaz [10-11], l'isolation des fenêtres et l'isolation thermique, les cellules électrochimiques et le revêtement des satellites en orbite.



**Figure I.2:** Evolution du nombre de publications traitant de ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et SnO<sub>2</sub> depuis 1970 à 2008 (Recherche effectuée sur la base de données Scopus).

#### I.4 Critères de choix des oxydes transparent conducteurs (TCO)

Pour chaque application, le TCO le plus approprié est celui qui possède une bonne conductivité électrique avec une bonne transparence optique. Cependant une limite supérieure de conductivité  $\sigma$  et de transmission  $\alpha$  déterminée par la théorie de transport des électrons dans un métal selon l'équation (I-1) [12].

$$\frac{\sigma}{\lambda} = 4 \pi \varepsilon_0 c^3 n (m^* \mu)^2 \lambda^{-2} e^{-2} \quad (\text{I-1})$$

$\varepsilon_0$  : la permittivité du vide.

C : la vitesse de la lumière.

n : l'indice de réfraction de film.

$m^*$  : la masse effective des électrons de conduction.

$\mu$  : la mobilité.

$\lambda$  : la longueur d'onde.

e : la charge électronique.

Puisque les (TCOs) ont des indices proches de 2 dans le visible, le meilleur TCO présentera le plus grand produit de mobilité et de masse effective. Par ailleurs dans de nombreuses applications et en particulier dans les systèmes d'affichage, il est souhaitable et nécessaire que le film ait une épaisseur minimale afin de conserver une surface aussi lisse que possible. Le paramètre important devient alors la conductivité c'est à dire le produit de la mobilité par la concentration de porteurs. Le tableau I.1, représente la caractéristique minimale pour un TCO.

Paramètre	Matériaux conducteur transparent
Gap	>3.1ev (380 nm)
Transparence(550) nm	>90%type(n),>85%type(p)
Résistivité	>10 <sup>-4</sup> Ω.cm type(n),>10 <sup>-3</sup> Ω.cm type(p)
Concentration des porteurs	>10 <sup>20</sup> cm <sup>2</sup> type(n),>10 <sup>20</sup> cm <sup>2</sup> type(p)
Mobilité	>40cm <sup>2</sup> (vs) <sup>-1</sup> type(n),>40cm <sup>2</sup> (vs) <sup>-1</sup> type(p)
Resistance carrée	<10KΩ/carrée (pour20nmd'épaisseur)

**Tableau I.1 :** Caractéristique minimale pour un TCO [13].

Outre les facteurs susmentionnés, il ya quelques autres facteurs pertinents [14], par exemple: le travail de sortie (l'énergie minimale nécessaire pour arracher un électron à partir de la bande de conduction à vide), la stabilité thermique (une certaine plage de températures élevées dans laquelle le TCO montre une résistivité stable, cette température est légèrement au-dessus de la température de dépôt optimisées), la température de dépôt joue un rôle clé dans le cas de substrats flexibles et sensibles à la chaleur, la barrière de diffusion entre le film et le substrat (pour éviter la diffusion de matériaux de substrat dans les films et vice versa à températures de dépôt élevées et post-dépôt des procédés



thermiques), la gravure (gravure facile des films minces TCO est favorisée dans certaines applications), la durabilité chimique (la capacité du TCO pour résister à l'environnement chimique corrosif), la dureté mécanique (résistance aux rayures), le coût de production (y compris le coût des matières premières et le processus de préparation) et la toxicité (Supplémentaires doivent encapsuler comme un bouclier pour TCO utilisant élément toxique pour protéger la fuite de matières toxiques dans l'environnement), etc.

## **I.5Présentation des oxydes transparents conducteurs étudiés**

### **I.5.1 Oxyde de Zinc (ZnO)**

Le ZnO est un semi-conducteur de large gap, il est transparent dans le visible. Il présente un ensemble de propriétés qui permettent son utilisation dans un certain nombre d'applications comme par exemple des varistances employées pour limiter de grandes coupures de tension (dispositifs électroniques en céramique poly cristallins possédant des caractéristiques courant-tension non linéaires). Il peut également trouver des applications en optoélectronique, cathodoluminescence, photoluminescence, électroluminescence, comme capteur de produit chimique dans les couches minces [15]. Il possède aussi des propriétés électromécaniques très intéressantes, ce qui lui permet d'être utilisé, à grande échelle, comme conducteur transparent dans les dispositifs acoustiques et dans les lignes à retard micro-ondes ou encore comme matériel piézoélectrique. [16-17].

#### **I.5.1.1 Propriétés optiques**

Le ZnO est un matériau transparent dans le visible, il présente un intérêt considérable qui réside dans ses propriétés remarquables telles que la largeur de sa bande interdite ; qui permet d'émettre du visible à l'ultraviolet. D'autre part, son gap direct induit des recombinaisons radiatives très efficaces [18]. En couches minces, on peut distinguer trois zones, selon le spectre de la réflexion et de la transmission de ZnO : -Dans l'ultraviolet, il y a une absorption totale de la lumière par les électrons de la bande de valence, qui transitent vers la bande de conduction. La transmission décroît rapidement et s'annule. -Dans le visible, la transmission est élevée ; alors que l'absorption est très faible. Dans l'infrarouge, l'absorption par les porteurs libres est marquée par une transmission faible à nulle et une réflexion élevée [19]. L'indice de réfraction de l'oxyde de zinc sous la forme massive est égal à 2,0 [20]. En couches minces, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration des couches.

### I.5.1.2 Propriétés électriques du ZnO :

C'est un semi-conducteur dégénéré de type  $n$ , La grande conductivité des couches d'oxydes purs est due à la forte concentration en porteurs libres (électrons), étant donné que la mobilité dans ces couches est considérablement plus faible que celle en volume du matériau correspondant. La forte concentration en électrons est attribuée à la déviation par rapport à la stœchiométrie (ou défauts dans la structure).

Il y a une certaine anomalie dans la littérature concernant l'énergie du gap. Srikant et Clarke [21] annoncent que le gap d'énergie du ZnO à la température ambiante est de 3,3 eV, tandis qu'une bande de valence à la transition de niveau de donneur à 3,15 eV explique le fait qu'une plus petite valeur (typiquement 3,2 eV) est souvent rapportée. Ainsi, le gap à température ambiante du ZnO est compris entre 3,2 et 3,3 eV. Une conductivité élevée ( $> 5.10^3 \Omega^{-1}.cm^{-1}$ ) est possible dans le ZnO de type  $n$ , en raison des défauts intrinsèques, des dopants (Al, In, Ga, B, F) ou en combinaison [22]. Les mobilités des électrons dans des couches minces de ZnO rapportées, sont typiquement l'ordre de 20 à 30  $cm^2/V.S$ . En outre, la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est de l'ordre de  $\sim 200 cm^2/V.S$ .

### I.5.2 Oxyde d'indium dopé à l'étain ITO

L'ITO est l'un des oxydes transparents conducteurs "TCO" le plus utilisé dans les applications technologiques en raison de ces propriétés optiques et électriques remarquable: la transparence élevée, la bonne conductivité électrique, la bonne résistance mécanique, l'excellente adhérence au substrat en plus de la stabilité chimique [23-24]. L'ITO se forme à partir d'oxyde d'indium ( $In_2O_3$ ) et de quelques pourcentages atomiques en étain (Sn), généralement 10%, qui vont se substituer aux positions des atomes d'indium dans le cristal et si la concentration d'étain augmente, la conductivité électrique s'améliore mais la transparence sera altérée.

#### I.5.2.1 Propriétés électriques

L'ITO est un semi-conducteur de type  $n$  généralement dégénéré. Le niveau de fermi est situé au-dessous de la bande de conduction et le dopage d'oxyde d'indium par l'étain élève le niveau d'énergie à l'intérieure de la bande de condition, donc le comportement de l'ITO est quasi-métallique. L'ITO est caractérisé par une faible résistivité, qui peut atteindre 10-4  $\Omega cm$  [25, 26,27]. La conductivité élevée de l'ITO résulte de la formation de lacunes d'oxygène présente

dans la structure d'oxyde d'indium, en effet la structure non-stœchiométrique est à l'origine de l'existence d'électrons libres qui sont les porteurs permanents de la conductivité électrique. La deuxième raison de la conductivité est associée à des atomes d'étain qui jouent un rôle important pour augmenter la concentration de porteurs de charge. La concentration des porteurs de charge maximale est d'ordre de  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  [28, 29,30]. La Mobilité de Hall, généralement varié entre 2 et  $50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$  [31].

### **I.5.2.2 Propriétés optiques**

L'ITO est caractérisé par une large bande interdite, directe, qui varié entre 3,5- 4,3eV [28, 24, 29,32-33], possédant une absorption élevée dans le domaine de l'ultraviolet, une bonne transmission dans le visible, généralement supérieur à **85%**, et une réflexion importante dans le domaine infrarouge [34].

La valeur de l'indice de réfraction de l'ITO se situe entre 1,66 et 2,48 [35]. La transmission du film ITO est influencée par certains facteurs telles que la microstructure, la rugosité et

L'homogénéité de la surface.

Par ailleurs, les couches minces de l'oxyde d'indium dopé à l'étain sont, chimiquement, inertes et caractérisées par une bonne adhésion au substrat et par une dureté élevée. En générale les propriétés physiques de l'ITO ne dépendent pas de sa composition chimique mais de la méthode et les conditions d'élaboration, en plus de la nature, la température du substrat pendant le dépôt et sa structure et les traitements thermiques [23, 31, 36, 32, 33,37]. Les propriétés optiques et électriques sont aussi liées à la structure et la morphologie des couches minces ITO [32].

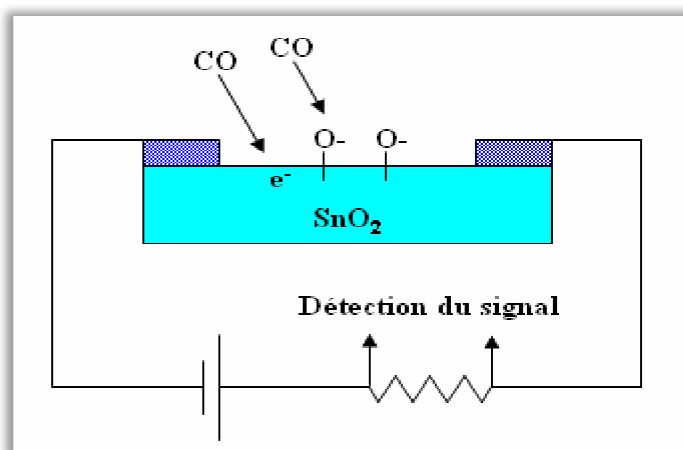
## **I.6 Applications des Oxydes transparent conducteurs**

Les propriétés des TCO démontrées précédemment permettent d'envisager leur emploi dans de nombreuses applications.

### **I.6.1 Capteurs à gaz**

En présence de certains gaz, les propriétés électriques des TCO peuvent changer. Le gaz considéré s'adsorbe à la surface de la couche mince ou des joints de grains de celui-ci. La molécule adsorbée peut capturer un électron libre. Il en résulte donc une réduction de la conductivité électrique. Le rapport entre les résistivités avant et après la mise en présence du gaz est appelé sensibilité du capteur. Le gaz à détecter ne doit pas nécessairement être adsorbé à la surface du capteur, il peut venir perturber les espèces oxygénées déjà présentes à la surface et

perturber indirectement la résistivité. Un exemple de capteur à gaz à base de  $\text{SnO}_2$  est présenté à la figure I.3 pour la détection du monoxyde de carbone CO. Parmi les différentes performances exigées des capteurs de gaz (coûts, facilité d'emploi, reproductibilité, ...), on insiste généralement sur la nécessité d'obtenir le meilleur compromis entre sensibilité, sélectivité et stabilité dans le temps. La recherche actuelle focalise ses efforts sur l'obtention du meilleur compromis [38].



**Figure I.3** Exemple de capteur à CO basé sur une couche mince de  $\text{SnO}_2$  [38].

## I.6.2 Cellules solaires

Les TCO dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes. Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photo générées. Ces deux propriétés sont liées à la concentration  $nV$ : la transmission est inversement proportionnelle et la conductivité est proportionnelle. Une concentration élevée, par exemple, augmente la conductivité électrique mais diminue aussi la transmission dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

Ceci est dû à une absorption et une réflexion des charges libres.

La valeur optimale de  $nV$  dépend du rendement quantique de la couche active.

La tenue du matériau est aussi un élément clé pour une cellule performante.

Concernant les cellules en silicium amorphe, par exemple, le TCO doit être inerte au flux d'hydrogène présent dans la phase de dépôt du silicium. En sa présence, l'ITO peut se brunir et perdre de sa transparence sous de telle condition, contrairement à une couche mince de ZnO qui reste stable [39]. De plus, la couche doit être stable dans le but de maintenir ces propriétés optique-électriques pendant au moins quinze ans.

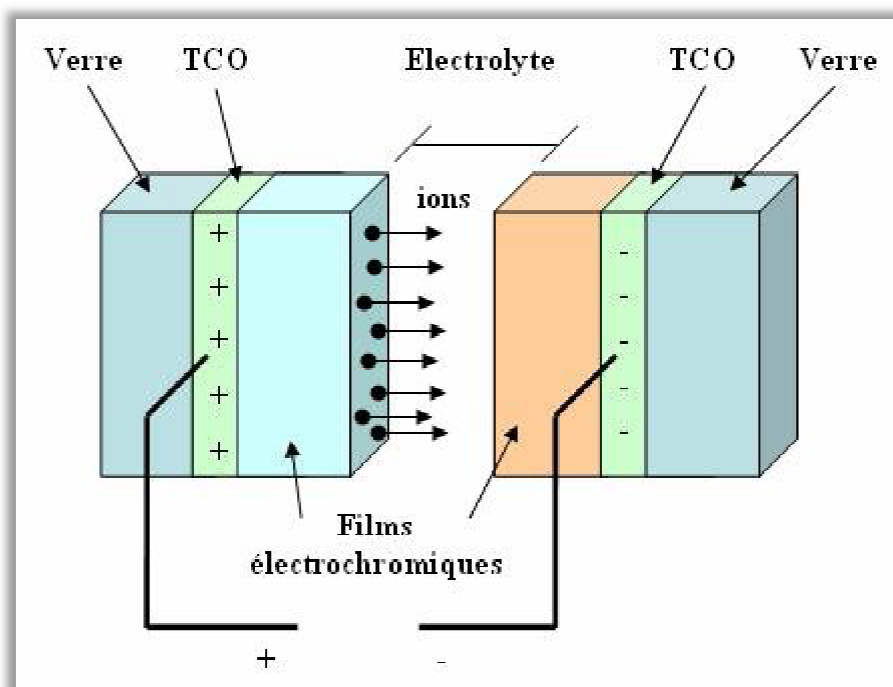
Les TCO se trouvent dans différents types de cellules solaires. Ils peuvent être utilisés dans tous les types de cellules telles que a-Si:H, poly-Si:H, CIGS, polymères, etc. Avec leurs propriétés qui diffèrent d'un TCO à l'autre, chacun sera plus ou moins efficace dans un type de cellules précises. Fortuna do et al. Dressent un panorama des différentes utilisations des TCO pour les cellules solaires transparentes [40]. Principalement deux types de structures sont déposés:

- L'homojonction : deux couches distinctes en contact.
- L'hétérojonction : un réseau interpénétré de donneurs et d'accepteurs.

### **I.6.3 Couches protectrices ou intelligentes**

Les TCO sont aussi utilisés en tant que revêtements de surface. La plus simple des applications est l'application directe d'une de leurs caractéristiques. En effet, les TCO réfléchissent les proches et lointains infrarouges à cause des charges libres. Cette réflexion peut être mise à profit pour réaliser des couches laissant passer la lumière visible mais réfléchissant les infrarouges. Ces matériaux sont utilisables pour réaliser des dispositifs tels que des miroirs chauffants (Heat Mirror films (HMF)). Chen Jie et Ge Xin-shi présentent leurs travaux sur une application de HMF avec des couches minces d'ITO [41]. Des multicouches à base de TiO<sub>2</sub> sont aussi étudiées pour réaliser la même fonction [42]. Le dioxyde de vanadium, quant à lui, est un matériau présentant une transition métal semi-conducteur à 68°C. Cette propriété est utilisée afin de créer des couches thermiquement actives. À basse température, la couche est un semi-conducteur avec une fenêtre optique étalant du visible aux infrarouges. Lorsque la température du film dépasse la température de transition, la couche a un comportement métallique et réfléchit les infrarouges. Des études sur le dopage comme pour le dopage au tungstène de cet oxyde permettrait de diminuer la température de transition pour atteindre la température ambiante [43]. Des couches de revêtements à faible émissivité peuvent également être réalisées. Différentes associations de couches permettent de réaliser des couches anti-réflexion qui augmentent le nombre de photons atteignant la couche active d'une cellule solaire.

Les applications décrites ci-dessus sont des couches dites passives car elles utilisent les propriétés intrinsèques des couches minces de TCO. Les applications dites actives sont enclenchées principalement par un courant électrique. Par exemple, l'ITO est aussi utilisé dans le monde de l'automobile comme revêtement chauffant de rétroviseurs extérieurs par l'effet Joule. Les oxydes métalliques sont utilisés dans le domaine des fenêtres électrochromiques. Ces films peuvent être de plusieurs types. Une fenêtre électrochromique est constituée de la superposition de plusieurs couches comprises entre deux plaques de verre. Deux couches de TCO y assurent les contacts électriques. Au centre, une solution d'électrolyte permet le passage des ions d'une électrode électrochromique à l'autre. Avec le passage d'un courant, la première couche électrochromique libère un ion qui se dirige vers l'autre couche par l'intermédiaire de l'électrolyte. Cet ion réagit avec la seconde couche électrochromique et le produit devient alors absorbant dans le domaine du visible. L'équipe de Granqvist a étudié l'ensemble oxyde de nickel NiO et trioxyde de tungstène WO<sub>3</sub> [44]. Un exemple de cellule est donné à la figure I.4 D'autres chercheurs étudient ce domaine d'application [45-46].



**Figure I.4** Exemple d'une fenêtre électrochromique avec les différentes couches la composant [47].

### I.6.4 Systèmes optoélectroniques

Des diodes électroluminescentes sont réalisées avec, entre autres, des couches de TCO. Par exemple, des LED sont fabriquées avec la jonction n-ZnO/p-GaN [48]. Grâce à l'émergence de TCO de type p, des systèmes basés sur des jonctions PN réalisées tout en TCO ont vu le jour. Ils ne sont qu'au stade expérimental mais la porte est ouverte pour l'électronique transparente. Des jonctions PN ont été réalisées avec les TCO de type n communs tels que la jonction p-SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/n-ZnO pour construire une LED [49]. L'oxyde de zinc, peut être un semi-conducteur de type p, par conséquent, des jonctions PN transparentes réalisées tout en ZnO sont envisageables. Avec un dopage à l'antimoine, le ZnO déposé par l'équipe de J.M. Bian montre un caractère de type *p* qui a permis de réaliser une jonction PN et d'avoir une émission du proche UV et du visible [50]. De nombreuses recherches sont menées sur *p*-ZnO pour des applications en tant que LED [51].

# **Chapitre II**

## **Cellules solaires à base de Silicium**



*L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie. Dans ce chapitre, nous débutons par donner les caractéristiques du rayonnement solaire et la description de la conversion photovoltaïque. Ensuite, nous donnons une étude sur les cellules solaires en général et les cellules HIT en particulier.*

## **II.1 Spectre solaire**

Notre planète reçoit continuellement des photons provenant des sources lumineuses présentes dans l'univers. La majorité de ces photons sont générés au cours des réactions nucléaires qui ont lieu au cœur des étoiles. Leur énergie varie en fonction de la source considérée, mais aussi des interactions possibles durant leur parcours jusqu'à la Terre. Bien que distant de près de 150 millions de kilomètres, le Soleil est l'émetteur principal de lumière dans les environs de la Terre. À une telle distance et avec un rayon de 6380 km, cette dernière ne reçoit en moyenne que  $4,52 \times 10^{-8}$  % de l'énergie émise par notre étoile. Il est donc tout à fait inutile de s'intéresser aux autres sources stellaires pour les applications photovoltaïques spatiales (aux alentours de la Terre) et terrestres. Dans ce contexte, et dans le but d'adapter les convertisseurs de lumière à la source principale, il est indispensable de bien connaître la répartition en énergie des photons en provenance du Soleil.

La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation (II.1).

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad \text{(II.1)}$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $C$  la vitesse de la lumière,  $\lambda$  la longueur d'onde.

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de

**AM0**. Sa distribution en énergie est répartie comme suit [52]:

**Ultraviolet UV**  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$  6.4%

**Visible**  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  48.0%

**Infrarouge IR**  $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$  45.6%

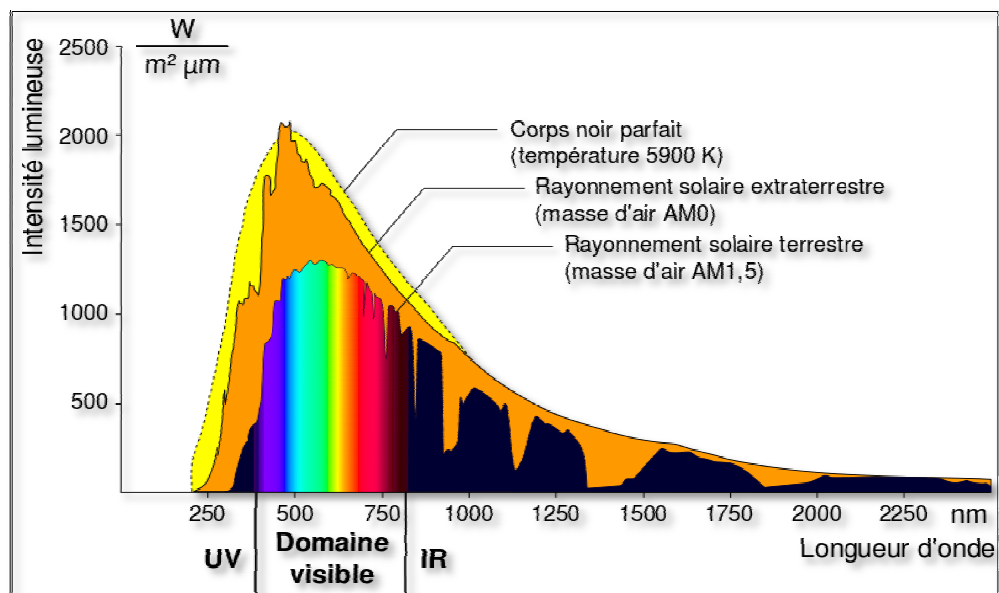


Figure II.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [52].

## II.2 Conversion photovoltaïque

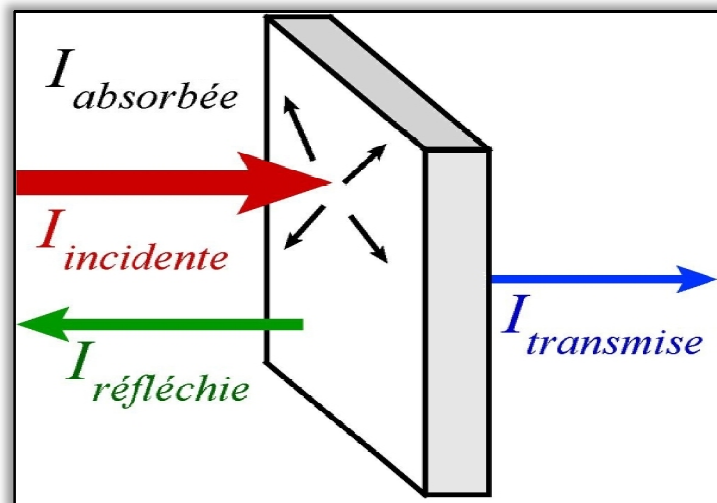
La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le savant français Antoine Becquerel en 1839, cette conversion particulière de l'énergie dépend de la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial aussi dans les appareils photo que les premières « cellules » furent utilisées, pour mesurer le taux de lumière.

### II.2.1 Absorption de la lumière

La lumière se compose de photons, « grains de lumière », chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans

certaines matières, et même passer au travers : les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques (figure II.2):

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



**Figure II.2:** Réflexion, transmission et absorption.

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir : lumière du soleil ou des autres sources artificielles. On prendra soin également de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission. Quant à la réflexion, elle dépend avant tout des indices de réfraction des matériaux traversés. Plus la différence d'indice est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante.

Le taux de réflexion s'écrit :

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (\text{II.2})$$

Si les matériaux en contact sont d'indices  $n_1$  et  $n_2$ .

Donc du silicium brut ( $n = 3.75$  à  $\lambda=0.6 \mu\text{m}$ ) en contact avec l'air ( $n = 1$ ) réfléchit 33% de la lumière qu'il reçoit.

### II.2.2 Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) et un ensemble d'électrons gravitant autour. Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur. En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

Ce phénomène physique, dit de photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car ils comportent des électrons libres; contrairement à un isolant, où tous les électrons sont fortement liés ; et à un conducteur électrique, dans lequel il existe une forte densité d'électrons totalement libres. On comprend qu'il existe, dépendant du matériau, un seuil d'énergie minimum nécessaire à cette libération des électrons par les photons. Si ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes (nombre d'orbites et quantité d'électrons par atome) et donc les énergies mises en jeu également. On appelle ce seuil le gap optique du matériau ou la largeur de bande interdite. En effet, si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électron-trou et ne sera pas absorbé. Les propriétés optiques et électroniques sont donc intimement liées.

### II.2.3 Collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les attirer hors du matériau semi-conducteur dans un circuit

électrique. Sinon, elles se recombinent : l'électron, chargé négativement, neutralisant le trou, chargé positivement. Autrement dit, les retrouveraient leur état initial à la périphérie de leur atome : cela libérerait de l'énergie thermique (chaleur) mais aucune énergie électrique.

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

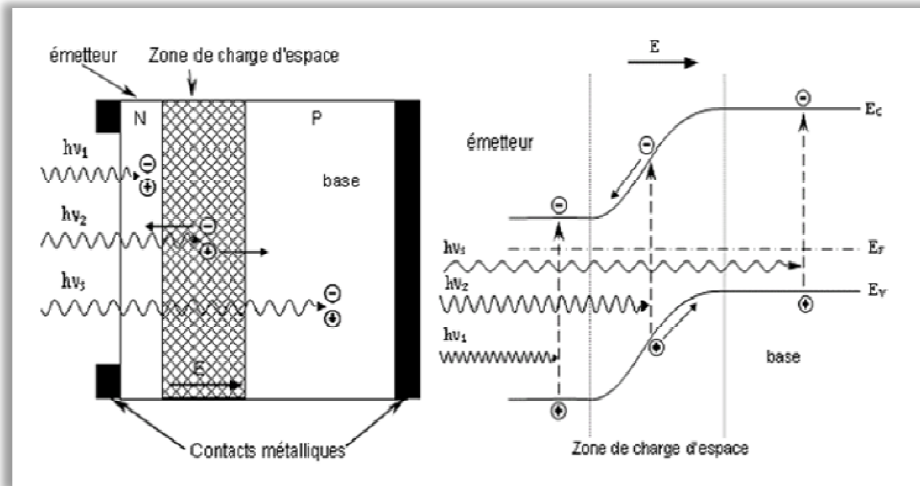
C'est possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constituée d'une partie dopée au phosphore (P), dite de type n, accolée à une partie dopée au bore (B), dite de type p. C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives.

### **II.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN est donc formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite cèdent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule [53].



**Figure II.3:** Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [54].

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure (II.3). Les photons incidents créent des porteurs dans les régions N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P et N, les photos porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Cette photo porteur contribue donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociés par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Les porteurs donnent naissance à un photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo courant résultant  $I_{ph}$  qui contribue au courant inverse de la diode.

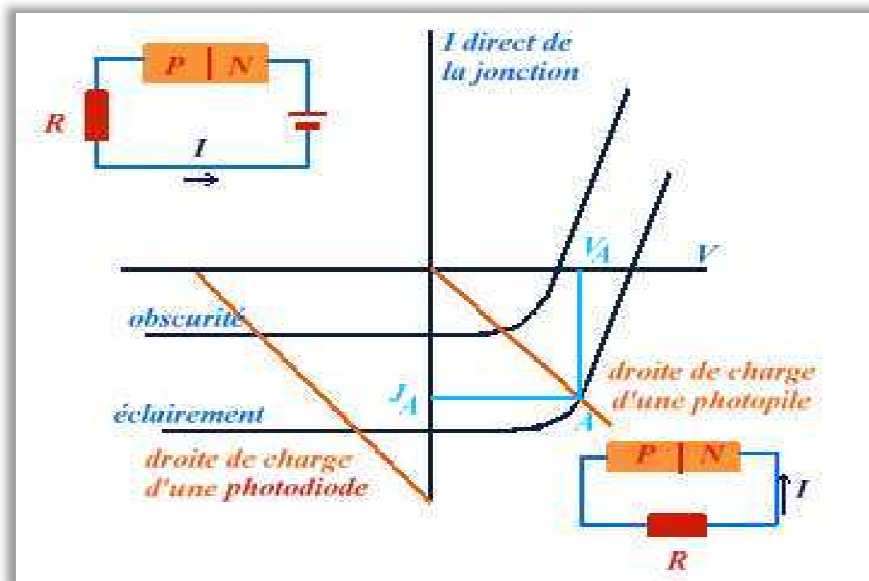
### II.4 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique  $I(V)$  correspond à la soustraction de la photo courant et du courant de la diode à l'obscurité par [55] :

$$I(V) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s \exp\left(\frac{qV}{KT} - 1\right) - I_{ph} \quad (II.3)$$

Avec  $I_{ph}$  la densité de courant photogénéré,  $I_{obs}$  la densité de courant d'obscurité,  $I_s$  le courant de saturation de la diode,  $q$  la charge élémentaire,  $K$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la figure (II.4) les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité, et sous illumination. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur  $I_{cc}$ , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur  $V_{co}$ , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité.



**Figure II.4:** Caractéristiques  $I(V)$  à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule Photovoltaïque [56].

## II.5 Paramètres d'une cellule solaire

### II.5.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par le champ interne de la jonction vont donner naissance à un « courant de court-circuit »  $I_{cc}$  qui correspond à la photo courant  $I_{PH}$  généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo courant est proportionnel à l'irradiante du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron-trou générée  $G$  qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion  $L_n$  et  $L_p$  .donné par la relation :

$$I_{cc}=I_{PH}=qG (L_n+L_p) \quad (II.4)$$

Ou  $q$  est la charge électrique.

### II.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

### II.5.3 Facteur de forme $FF$

Le facteur de forme est défini par la relation suivante [55]:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co}I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co}I_{cc}} \quad (II.5)$$

FF: facteur de forme

$V_m$ : tension au point maximale

$I_m$ : courant au point maximal

$V_{co}$ : tension de circuit ouvert

$I_{cc}$ : courant de court-circuit

$P_m$  : puissance maximale



### II.5.4 Rendement de conversion $\eta$

Le rendement  $\eta$ , des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  [55].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad (II.6)$$

$P_{in}$  : la puissance incidente est égale à la puissance solaire  $P_{solaire}$  ( $P_{solaire} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ).

### II.5.5 Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque

La réponse spectrale  $RS$  d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale  $RS$  est donnée par la relation suivante [55]:

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (II.7)$$

## II.6 Etat de l'art de la structure HIT

Panasonic est une entreprise japonaise ayant une vision très claire de la nature, l'environnement et l'énergie renouvelable. Déjà presque 100 ans. La mission de Panasonic est le développement des solutions qui augmentent la qualité de vie de l'homme et de la nature. Depuis 1975 Panasonic (jusqu'au 2012 Sanyo) fait des études d'énergie solaire et produit déjà pendant 30 ans des cellules solaires. Ces premières petites cellules solaires, connues dans le monde entier se trouvaient déjà dans les années 80 dans les calculateurs, des montres ....etc. Depuis ce là, Sanyo développe, améliore et innove la technologie des panneaux solaires pour la production d'électricité [57]. En misant sur les technologies des énergies renouvelables, Panasonic contribue de manière significative à ce que les besoins en énergie croissants de par le monde soient assurés aussi pour l'avenir. La possibilité d'utiliser le silicium amorphe avec un substrat cristallin pour former une hétérojonction fut pour la première fois envisagé par W.Fuhs en 1972. Sanyo a mis en œuvre en octobre 1997 une production de masse de modules photovoltaïques à partir de

structures HIT (Hétérojonction with Intrinsic Thin layers). Après plusieurs années de recherche, des divers verrous technologiques ont été levés pour optimiser cette structure innovante.

Les premières études ont porté sur l'optimisation de l'hétérojonction amorphe/cristallin en utilisant un substrat monocristallin de type Czochralski (CZ) dopé n sur lequel une fine couche (quelques nm) de silicium amorphe hydrogéné [a-Si : H(p)] est déposée de part et d'autre par PECVD. Une couche d'oxyde conducteur transparent TCO déposée par pulvérisation cathodique est nécessaire pour assurer un contact entre la couche amorphe et le métal. Elle sert aussi de couche antireflet. Les contacts sont ensuite déposés par sérigraphie à l'aide d'une pâte basse température adaptée. Les performances des dispositifs furent au début limitées par une mauvaise qualité de l'interface amorphe/cristallin, donnant des valeurs de tensions en circuit ouvert et de facteur de forme largement inférieure aux cellules conventionnelles. Ce phénomène fut diminué par l'insertion d'une couche intermédiaire de silicium amorphe hydrogénée intrinsèque (a-Si :H) moins défectueuse et permettant de réduire les recombinaisons à l'interface amorphe/cristallin. Cette technique apparaît comme le point décisif qui a permis le développement de la structure HIT car le courant de saturation est réduit de deux ordres de grandeurs. Sanyo explique que la détérioration des propriétés de la jonction semble provenir des défauts d'interface liés aux dopants qui adhèrent à la surface du substrat de silicium amorphe lors du dépôt de la couche dopée. Le dépôt préalable d'une fine couche de silicium amorphe intrinsèque permet donc d'éviter ce phénomène [56].

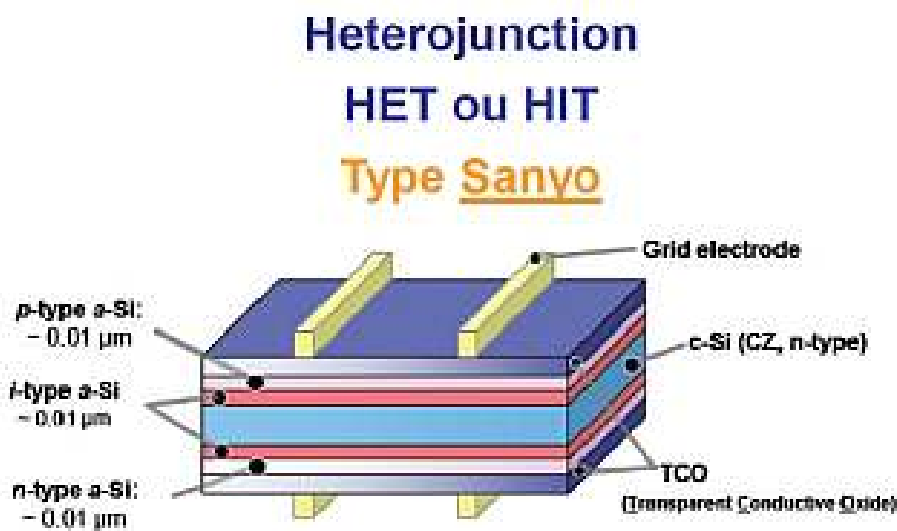


Figure II.5 : la structure de la cellule solaire à hétérojonction de silicium HIT [57].

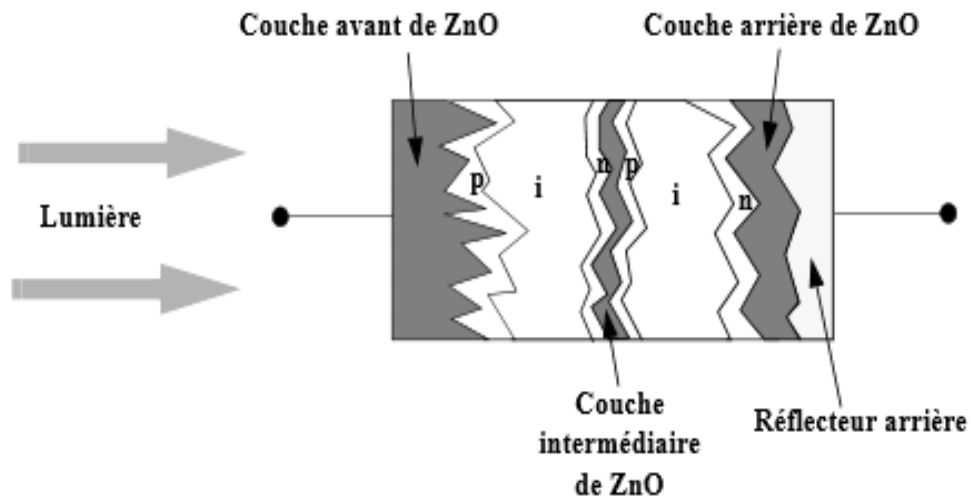
La structure d'une cellule solaire à hétérojonction de Si conventionnelle de type HIT est représentée sur la figure II.5. Le wafer du silicium cristallin de type n est recouvert en face avant par une couche mince du silicium amorphe hydrogéné non dopée puis d'une couche dopée p formant l'émetteur. En face arrière nous retrouvons un empilement similaire où la couche dopée est de type n+ afin de former le champ arrière BSF. Les couches supplémentaires sont les TCOs pour améliorer l'absorption des photons dans la structure, et des métallisations.

## II.7 Avantages de la structure HIT

- L'ensemble du procédé de fabrication est réalisé à une température inférieure à 200°C. Cela mène à un budget thermique considérablement réduit. De plus, la durée de vie des porteurs minoritaires dans des matériaux très sensibles aux variations de température n'est pas dégradée et la fabrication des cellules HIT a moins d'impact sur l'environnement.
- Le procédé de fabrication est relativement simple. Il ne nécessite pas un nombre important d'étapes et exige moins de temps que le procédé standard, qui comporte une étape de diffusion à partir de POCl<sub>3</sub>.
- L'effet Staebler-Wronski portant sur l'instabilité du silicium amorphe dopé n'est pas observé pour les cellules HIT.
- Les cellules HIT présentent une meilleure tenue en température. Ce point constitue un avantage considérable car la puissance annuelle délivrée est plus importante.
- Enfin, la structure HIT répond aux problèmes de manque de matière première. Le fait que la structure soit symétrique et que le procédé s'effectue entièrement à basse température diminue les phénomènes de stress mécanique et thermique. Une utilisation de substrat mince est donc possible [58].

## II. Principes généraux d'utilisation de couches TCO dans la cellule solaire de silicium HIT

Le schéma de la figure II.6 récapitule les différentes places que peut prendre une couche de TCO dans une cellule solaire en couches minces de silicium.



**Figure II.6** : Schéma général présentant les trois places qu'une couche de TCO peut occuper dans une cellule solaire de Silicium

La couche de TCO peut donc être placée à 3 endroits :

- La couche avant: c'est à travers celle-ci que la lumière du soleil passe pour entrer dans la cellule solaire.
- La couche arrière: cette couche n'est pas tout le temps nécessaire. Elle agit cependant dans certains cas comme barrière de diffusion pour les atomes de métal du réflecteur, et peut également agir comme diffuseur supplémentaire de lumière.
- La couche intermédiaire, située entre la cellule amorphe et la cellule microcristalline d'une cellule micro morphe : cette couche intermédiaire permet de faciliter la recombinaison des trous venant de la cellule microcristalline avec les électrons venant de la cellule amorphe. Cette recombinaison est primordiale pour obtenir de bonnes performances de la cellule micro morphe.

# **Chapitre III**

## **Simulation numérique par SCAPS**

### III.1 Introduction

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [59,60].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est développé pour les cellules de la famille  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CdTe}$ . Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex :  $\chi$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $N_c$ ,  $N_v$ ,  $v_{thn}$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $N_D$ ,  $N_A$ , tous les pièges (défauts  $N_t$ ).
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.

- Contacts : travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; propriété optique (réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier g(x) fourni par l'utilisateur.
- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- Illumination: du côté p ou n.

### III.2 Notions de base

SCAPS s'ouvre avec l'icone 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure III.1.



Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

La signification des blocs est expliquée comme suivant:

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.

### III.2.1 Lancer SCAPS

On clique sur l'icône « SCAPS » sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

### III.2.2 Définir le problème

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.

### III.2.3 Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. On trouve la température  $T$ , le voltage  $V$  de la polarisation, la fréquence  $f$  et les illuminations (l'obscurité ou la lumière).

### III.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler

Dans la partie Action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-f et QE ( $\lambda$ ). On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

### III.2.5 Commencer le calcul

#### A- Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.2. On peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres et la densité du courant. On peut faire apparaître les résultats par les commandes SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données.



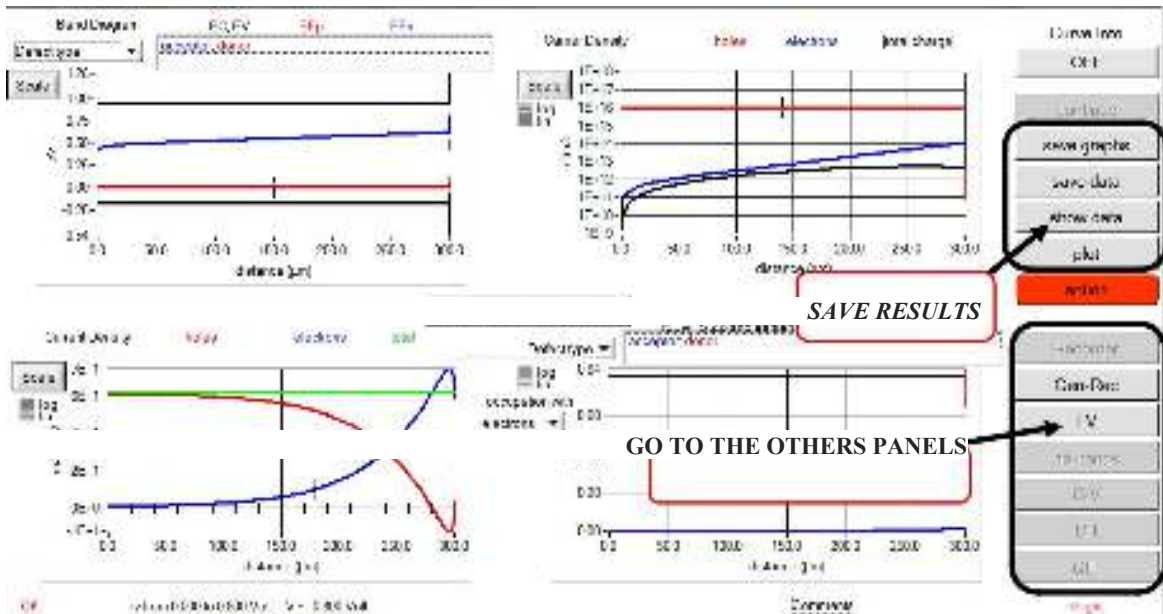


Figure III.2 : Panneau des bandes d'énergie.

**B- Les courbes I-V**

La figure III.3 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe. Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué. Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l'échelle des axes.

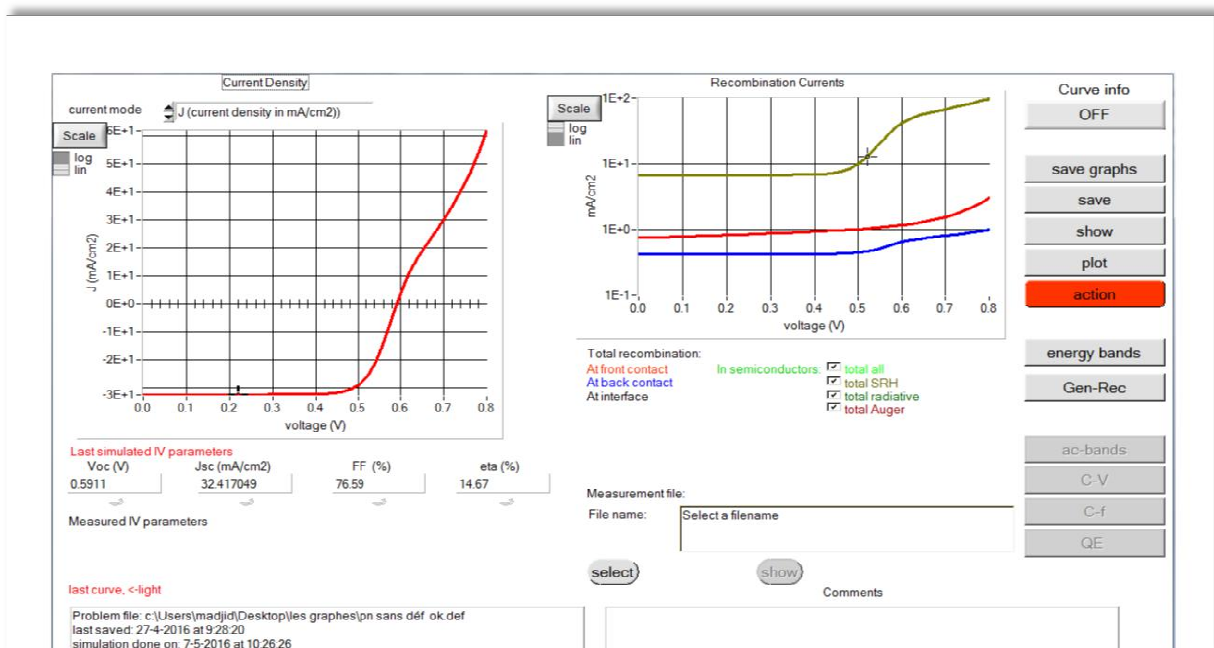


Figure III.3 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage.

### III.3 Définition des différentes couches de la cellule solaire

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

#### III.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension *.def* qui peut s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordbad.exe. Les propriétés des couches, contacts et de l'interface peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

#### III.3.2 Contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre. Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données dans le SCAPS.

### III.3.3 Définition des couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage).

Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profil.

Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous.

Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, on introduit le dopage (uniforme ou des variations graduelles).

L'absorption de la couche peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS. Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droit du panneau des propriétés de la couche. Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges. Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

### III.4 Simulation de l'hétérojonction TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p)

### III.4.1 Le choix des paramètres et la structure simulée

Pour simuler le fonctionnement d'une structure de la cellule à hétérojonction de type TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p), il faut préciser les paramètres d'entrée de cette structure tel que les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, le gap d'énergie du Si, les densités effectives des électrons et des trous, la température ambiante, les mobilités des électrons et des trous,

les vitesses thermiques des électrons et des trous, ainsi que les conditions au limites et le spectre du soleil. Le spectre solaire utilisé pour l'éclairage est l'AM1.5G. Les propriétés optiques du semi conducteur sont prises en compte en introduisant un fichier texte data dans SCAPS.

Paramètre	c-Si (p)	$\mu\text{c-Si:H(n)}$
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Variable	0.001
Constante diélectrique	11.9	11.9
Affinité électronique (eV)	4.05	4
Énergie de gap (eV)	1.12	1.16
La densité de la bande de conduction efficace ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.8 \times 10^{19}$	$10^{19}$
La densité de la bande de valence efficace ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.8 \times 10^{19}$	$10^{19}$
Mobilité des électrons ( $\text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	1140	50
Mobilité des trous ( $\text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	420	5
La concentration de l'accepteur ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{16}$	0
La concentration de donneur ( $\text{cm}^{-3}$ )	0	$10^{20}$
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	$10^7$	$10^7$
Vitesse thermique des trous (cm /s)	$10^7$	$10^7$
Auger coefficient de recombinaison pour électron ( $\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$ )	$2.2 \times 10^{-31}$	0
Auger coefficient de recombinaison pour le trou ( $\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$ )	$9.9 \times 10^{-32}$	0
Coefficient de bande à bande directe recombinaison ( $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ )	$9.5 \times 10^{-15}$	0

**Tableau III.1** Les paramètres de la cellule de référence [61].

Les contacts métalliques sont pris sur deux faces de la cellule. Nous savons que les contacts peuvent être à l'origine de pertes résistives. On considère que les contacts sont parfaits : conditions de bandes plates, pas de résistances de contacts, les deux surfaces sont entièrement couvertes par le métal. Le choix de nos paramètres repose sur les données générales que l'on peut trouver dans la référence [61].

Le tableau III.1 représente les valeurs des différents paramètres de la cellule de référence utilisée pendant la simulation.

Tous ces paramètres sont introduits dans le logiciel de simulation numérique SCAPS pour extraire la caractéristique courant-tension de la cellule.

La structure la plus simple permettant de simuler l'hétérojonction TCO/  $\mu\text{c-Si:H(n)}$  / c-Si (p) est schématisée sur la figure III.4. Il s'agit d'une seule hétérojonction n-p sur la face avant. Sur le substrat c-Si d'épaisseur 50  $\mu\text{m}$ , on place un émetteur  $\mu\text{c-Si:H}$  d'épaisseur 10 nm. Une couche antireflet de 80 nm reproduisant les propriétés optiques de TCO est simulée sur la face avant au-dessus de l'émetteur. Les contacts ohmiques sont placés aussi bien sur la face avant que sur la face arrière.

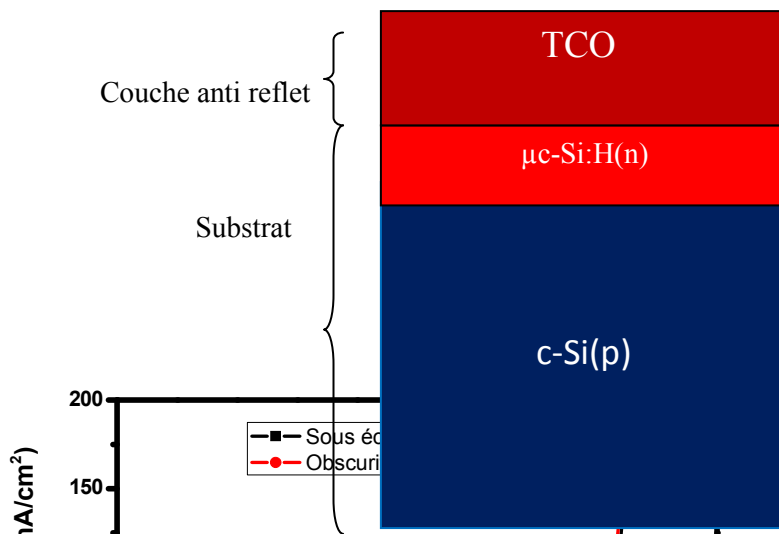
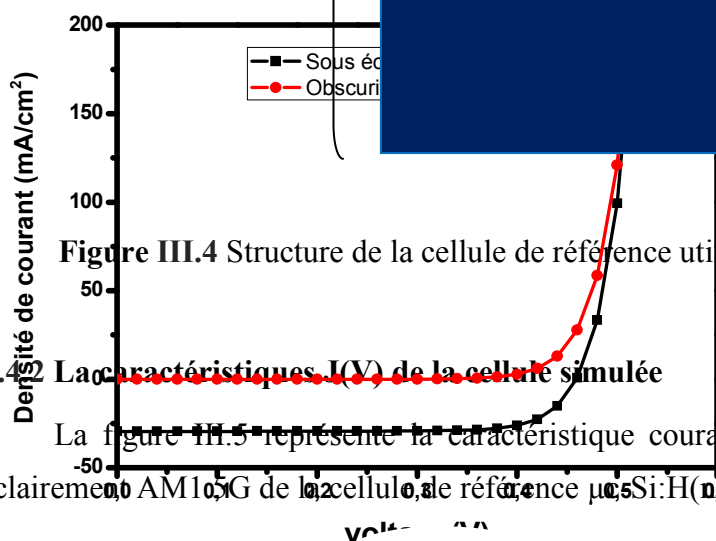
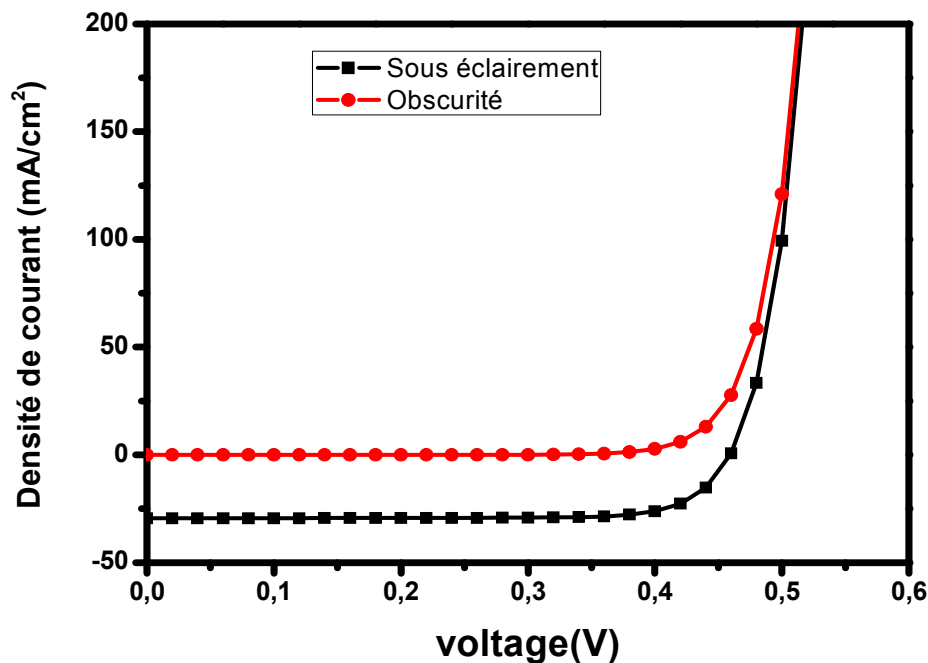


Figure III.4 Structure de la cellule de référence utilisée pendant la simulation.

III.5 La caractéristique J(V) de la cellule simulée

La figure III.5 représente la caractéristique courant-tension J(V) en obscurité et sous l'éclairement AM1.5G de la cellule de référence  $\mu\text{c-Si:H(n)}$  / c-Si (p).





**Figure III.5** Caractéristiques I(V) en obscurité et sous l'éclairage AM1.5G de la structure de référence.

Les résultats de simulation obtenus avec la cellule de référence avec un substrat c-Si(p) de l'épaisseur de 50  $\mu\text{m}$ , sont donnés comme suit: la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  est 500 mV, la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  est de 29.89  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , le facteur de forme FF est de 80.8% et un rendement  $\eta$  de 12.1%. Les résultats sont en bon accord avec les résultats de A. Rawat et al. [106]. Ils ont trouvé pour la même cellule solaire à hétérojonction HJ  $\mu\text{c-Si:H(n)} / \text{c-Si (p)}$  les paramètres suivants :  $J_{cc} = 27 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc} = 578 \text{ V}$ ,  $FF = 81.4\%$  et le rendement  $\eta = 12.55\%$ .

### III.5 Optimisation de la structure $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si (p)}$

Dans l'optimisation on fait varier un paramètre et en fixant les autres. Ces paramètres liés aux matériaux utilisés et à la géométrie de la cellule. Cette démarche sera suivie pour étudier l'influence de chacun des paramètres sur les performances de la cellule solaire à hétérojonction HJ  $\mu\text{c-Si:H(n)} / \text{c-Si (p)}$ .

### III.5.1 L'effet du contact

La figure III.6 montre l'évolution des paramètres de sortie de la cellule solaire à hétérojonction HJ en fonction de travail de sortie  $\phi$  du métal pour le contact avec c-Si(p).

On a fixé la valeur du travail de sortie du contact avant ( $\phi=4.4$  eV), et on a varié celle du contact arrière (sur la cellule référence). Dans ces calculs, nous n'avons pas pris en compte les effets tunnel. La figure III.6 montre que tous les paramètres augmentent avec le travail de sortie de contact arrière. Pour des valeurs de dopages supérieurs à 5.4 eV, les paramètres commencent à diminuer légèrement. On constate que la valeur optimale du travail de sortie du contact est de 5.4 eV, correspond au maximum de rendement de la cellule de l'ordre 22,51 %. Le choix du métal de contact joue donc un rôle important sur la collecte des porteurs.

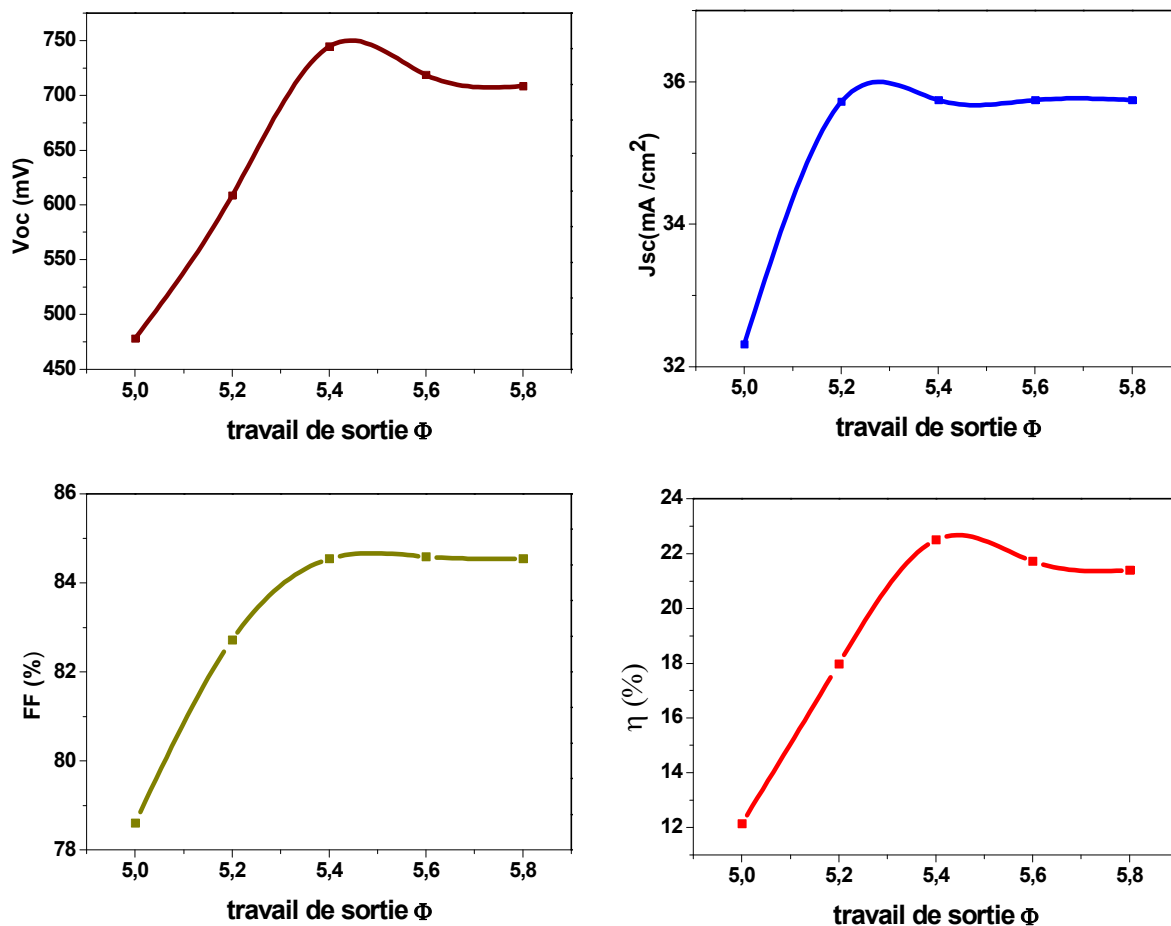


Figure III.6 : Variation du  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  de la cellule silicium à hétérojonction HJ avec travail de sortie  $\phi$  du substrat c-Si(p).

### III.5.2 L'effet de l'épaisseur de c-Si

L'augmentation de la couche c-Si possédera une quantité d'électrons libres, ces derniers sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous.

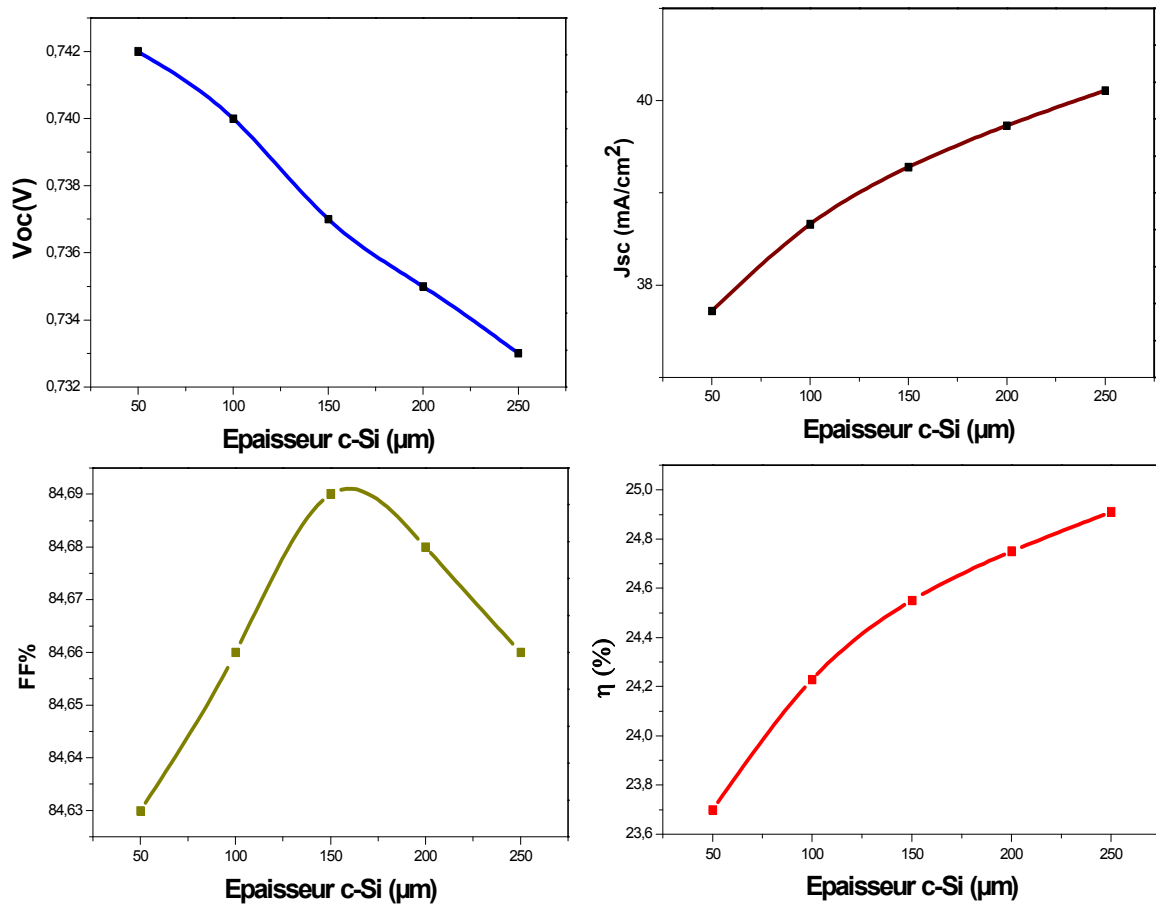


Figure III.7 : Variation du Voc, Icc, FF et  $\eta$  de la cellule silicium à hétérojonction HJ avec l'épaisseur du substrat c-Si(p).

La variation du Vco, Icc, FF et de la cellule silicium à hétérojonction HJ avec l'épaisseur du substrat c-Si(p) sont présentées dans la figure III.7.



Avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat c-Si(p), on observe une amélioration des caractéristiques de la cellule (pour une épaisseur de du substrat c-Si(p) comprise entre 50 $\mu$ m et 250 $\mu$ m). L'amélioration du rendement correspond à l'augmentation de  $J_{sc}$ . On peut constater également, que la dépendance avec  $V_{oc}$  et FF de l'épaisseur substrat est assez faible.

### III.5.3 L'effet de la couche antireflet TCO sur la cellule solaire HJ

Le rendement d'une cellule solaire est limité par des multiples pertes qui s'y produisent, ces pertes peuvent être dues à une mauvaise absorption, généralement liée au gap du matériau utilisé ou à une réflexion due au fait que le matériau possède un indice de réfraction élevé. Pour améliorer l'efficacité de ces cellules, on utilise des couches antireflets TCO qui permettent de réduire les pertes par réflexion. Les paramètres électriques du TCO utilisés sont représentés dans le tableau III.2. Les simulations ont été réalisées pour deux types du TCO (ZnO, ITO).

Paramètre	ZnO	ITO
Epaisseur ( $\mu$ m)	Variable	Variable
Constante diélectrique	9	8.9
Affinité électronique (eV)	4.45	4.8
Écart de bande (eV)	3.3	3.65
La densité de la bande de conduction efficace ( $cm^{-3}$ )	$2 \times 10^{19}$	$5.2 \times 10^{18}$
La densité de la bande de valence efficace ( $cm^{-3}$ )	$1.8 \times 10^{19}$	$10^{18}$
Mobilité des électrons ( $cm^2 v^{-1} s^{-1}$ )	100	10
Mobilité des trous ( $cm^2 v^{-1} s^{-1}$ )	25	10
La concentration de l'accepteur ( $cm^{-3}$ )	0	0
La concentration de donneur ( $cm^{-3}$ )	$10^{18}$	$10^{18}$
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	$2.2 \times 10^7$	$2 \times 10^7$
Vitesse thermique des trous (cm /s)	$1.5 \times 10^7$	$10^7$

Tableau III.2 : Les paramètres électriques du TCO [62].

### III.5.3.1 L'influence de l'épaisseur du TCO (ZnO/ITO) sur la cellule solaire HJ

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la couche des TCO sur les paramètres photovoltaïques de l'hétérojonction TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p), nous avons pris la même structure HJ avec les épaisseurs du TCO comprise entre 10 nm et 100nm. La figure III.8 montre l'évolution du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  et du rendement  $\eta$  ainsi que le facteur de forme FF, en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet TCO pour la couche ZnO et la couche ITO.

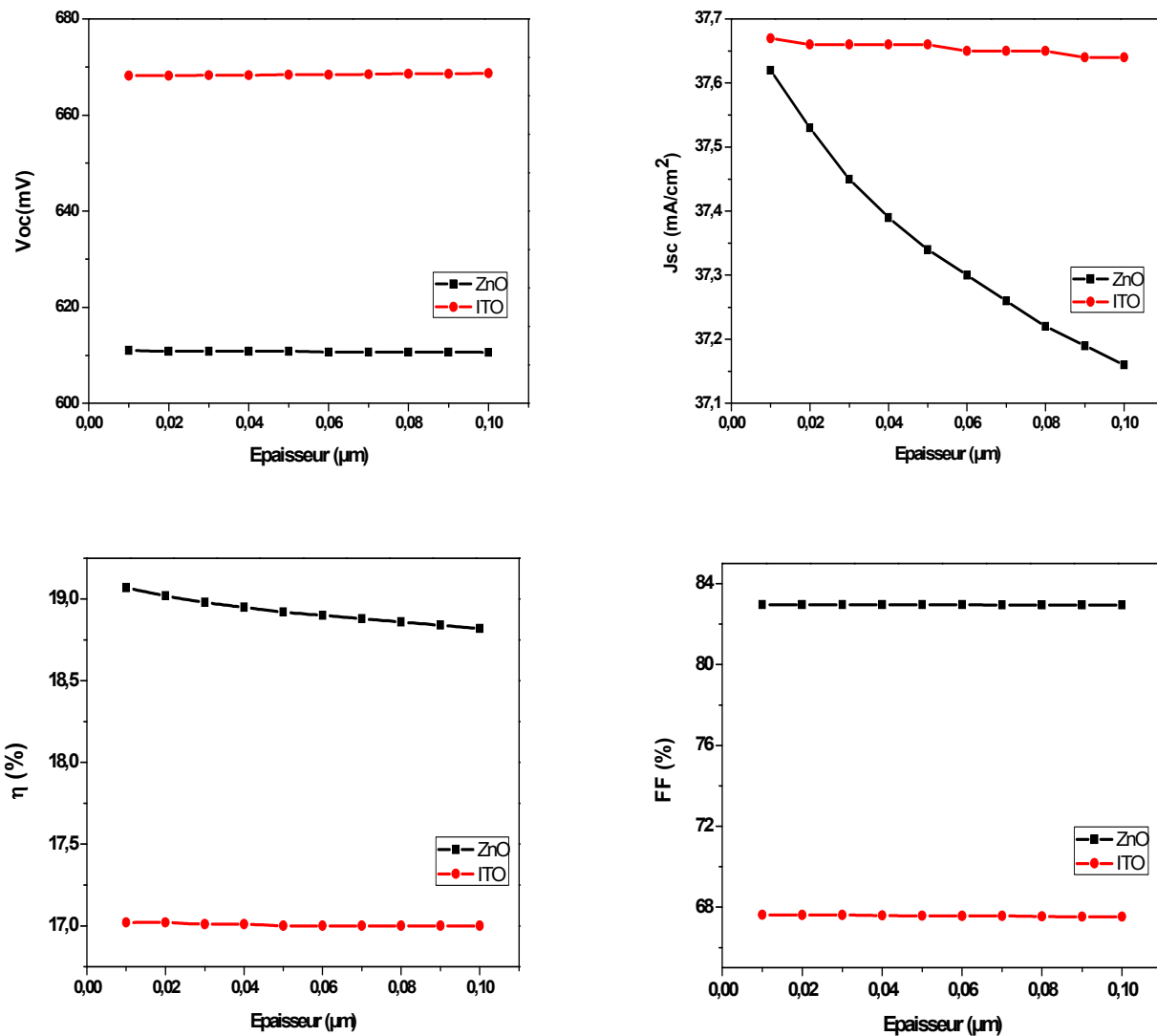


Figure III.8 : Variation du  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ , FF et le rendement  $\eta$  de la cellule silicium à hétérojonction HJ avec l'épaisseur de la couche TCO (ZnO et ITO).

L'augmentation de l'épaisseur de la couche antireflet TCO influence légèrement sur les paramètres de la cellule solaire de silicium à hétérojonction HJ. On observe que la cellule HJ avec la couche du ZnO donne un rendement autour de ~19% et avec la couche ITO autour ~17%. Par conséquent, les performances obtenues par la couche ZnO sont importantes par rapport à celles de la couche ITO quel que soit l'épaisseur du TCO. Cela est dû que le ZnO présente des propriétés électriques et optiques intéressantes pour le photovoltaïque.

### III.5.3.2 L'influence du dopage du TCO (ZnO/ITO) sur la cellule solaire HJ

Nous avons fait varier la concentration du dopage du TCO (ZnO et ITO) entre  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  et  $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  afin d'analyser l'influence du TCO sur les caractéristiques de la cellule solaire HJ. La figure III.9 présente la variation du  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  de la cellule à hétérojonctions HJ avec le dopage du TCO pour la couche du ZnO et la couche de l'ITO.

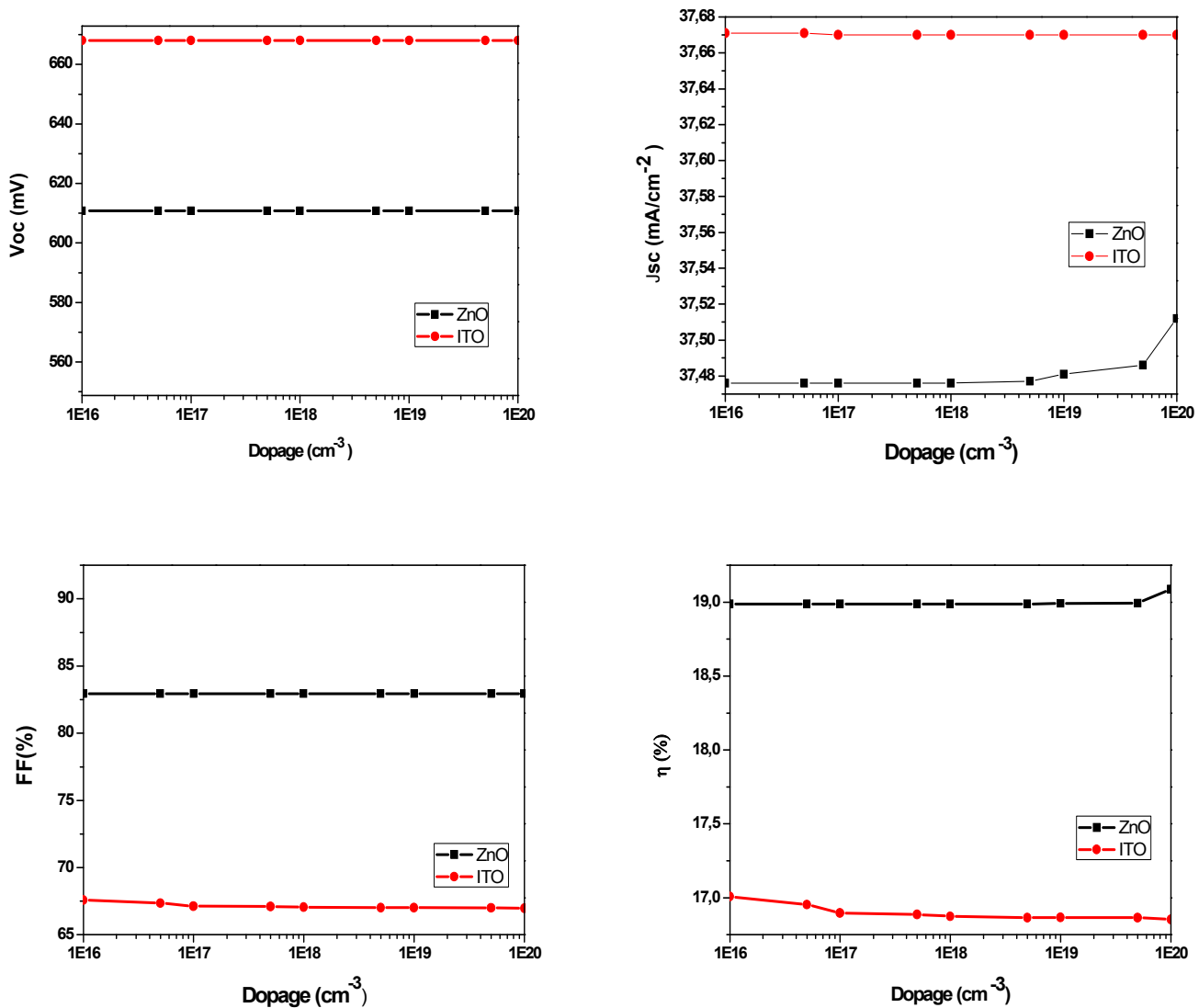


Figure III.9 : Variation du Voc, Jcc, FF et le rendement  $\eta$  de la cellule silicium à hétérojonction HJ avec le dopage du TCO pour ZnO et ITO.

La figure montre que les performances obtenues par la couche ZnO sont importantes par rapport à celles de la couche ITO avec le dopage. De plus, un TCO à base du ZnO fortement dopé  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  permet d'améliorer les performances de la cellule. Cela est dû qu'avec l'augmentation du dopage, la conductivité de la couche ZnO devient importante.

### III.3 Conclusion

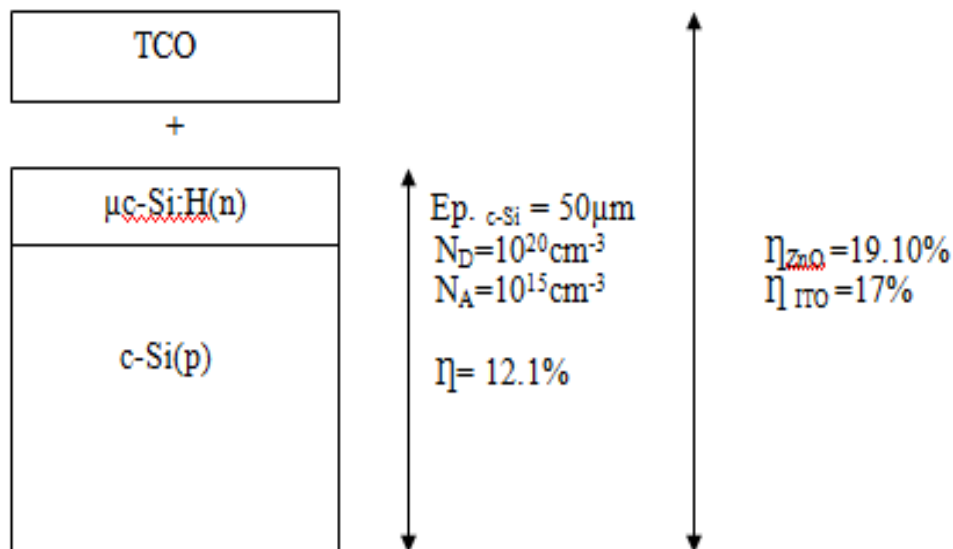
Ce chapitre a pour but de présenter les résultats de la simulation numérique par SCAPS de la cellule solaire HJ de type TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p).

Dans un premier temps, nous avons simulé la caractéristique (J-V) de cellule solaire HJ.

Ensuite, une étude sur l'influence des différentes couches des oxydes transparents conducteurs TCO à base du ZnO et ITO sur les performances de la cellule a été faite.

Les résultats obtenus montrent que la cellule solaire TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p) peuvent avoir un rendement de conversion photovoltaïque de l'ordre de 19.10% pour la couche de ZnO et 17% pour la couche de ITO.

Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats de simulation dans la littérature [62]. Les résultats de la simulation sous SCAPS est comme suit :





# Conclusion générale

Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension d'une cellule solaire  $\mu\text{c-Si:H(n)} / \text{c-Si(p)}$

On a fait également une étude de l'effet de l'épaisseur, du contacts sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert  $V$ , le courant de court circuit  $J_{sc}$ , le facteur de forme  $FF$ , le rendement de conversion  $\eta$  et le rendement quantique.

Notre étude a porté aussi sur la disposition des couches minces TCO sur la cellule car ces dernies présentent un bon compromis entre transparence optique et la conductivité électrique.

Les oxydes (ZnO, ITO) ont été utilisés comme électrodes transparents dans les cellules solaires pour leur bonne conductivité électrique combinée a une transparence élevée sur toutes l'étendue du spectre visible et du proche infrarouge.

En effet, les propriétés de la couche antireflet (épaisseur, dopage) jouent un rôle primordial dans les performances de la cellule a fin de les optimiser nous avons étudié leur influence sur les grandeurs photovoltaïques de cellule solaire.

Les résultats obtenus de la simulation sous SCAPS montrent que la cellule solaire TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ /c-Si(p) peuvent avoir un rendement de conversion photovoltaïque de l'ordre de 19.10% pour la couche de ZnO et 17% pour la couche de ITO.

## Bibliographies:

- [1] T.L. Chu and S.S. Chu, 'Thin Film II-VI Photovoltaics», *Solid-State Electronics*, Vol. 38, N°3, pp. 533- 549, 1995
- [2] De La Torre Y Ramos J, "Etudes des propriétés optoélectroniques de structures et de composants à base de nanostructures de Si". *Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France* (2003)
- [3] G. Gordon Criteria for Choosing Transparent Conductors », *MRS Bulletin*, 25, p. 52-57, (2000).
- [4] M. Matsuoka, "Nonohmic properties of zinc oxide ceramics», *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 736–746, 1971
- [5] K. Numera" Fabrication of Hybrid Diamond and Transparent Conducting Metal Oxide Electrode for Spectro électro chemistry » *Nature*, 432, p. 488-491, (2004).
- [6] J. Garnier, « Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray cvd assisté par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques», *Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris*, (2009).
- [7] P.F. Gerhardinger and R.J. McCurdy, « Thin Films for Photovoltaic and Related Device Applications *Materials Research Society Symposium Proceedings*» 426, Pittsburg, p. 399, (1996).
- [8] K. Daoudi « Élaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dopé à l'étain obtenus par voie Sol-Gel », *Thèse de doctorat, université Claude Bernard-Lyon 1*, (2002).
- [9] J. Garnier, « Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray CVD assiste par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques », *Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*, (2009).
- [10] H. Bo et al, *Superlattices and Microstructures*, 46, p. 664-671, (2009).



- [11] K.D. Schierbaum, «Ordered ultrathin cerium oxide overlayers on Pt(111) single crystal surfaces studied with LEED and XPS », *Surface Science* 399 29-38 (1998).
- [12] S. Fay et al «Low pressure chemical vapour deposition of ZnO layers for thin-film solar cells :temperature-induced morphological changes », *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 86, p. 385-397, (2005).
- [13] A.KHAN « le comportement de consommation d'énergie domestique », thèse de doctorat, université de Grenoble, (2006).
- [14] Y. Saadeddin, thèse université Bordeaux I, (2009).
- [15] I. Saadeddin, «Preparation and characterization of new transparent conducting oxides based on SnO<sub>2</sub> and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: ceramics and thin films», thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, (2007).
- [16] N. Ito, Y. Sato, P.K. Song, A. Kaijio, K. Inoue, Y. Shigesato, « The Transparent Conductive Properties of Manganese-Doped Zinc Oxide Films Deposited by Chemical Bath Deposition Thin Solid Films », 99-496 (2006).
- [17] M. G. McDowell, R. J. Sanderson, and I. G. Hill « Combinatorial study of zinc tin oxide thin-film transistors », *Applied Physics Letters* 92, 013502 (2008)
- [18] *MRS Bulletin*, « Transparent Conducting Oxides », Volume 25, Issue 8 August 2000, pp.45-51
- [19] P. T. Erslev, H. Q. Chiang, D. Hong, J. F. Wager, and J. D. Cohen, « Electronic properties of amorphous zinc tin oxide films by junction capacitance methods » *J. Non-Crystalline Solids*, 354, 2801-2804 (2008).
- [20] J. Ye, S. Gu, S. Zhu, S. Liu, W. Liu, X. Zhou, L. Hu, R. Zhang, Y. Shi, and Y. Zheng, «Comparative study of diethylzinc and dimethylzinc for the growth of ZnO, *Journal of Crystal Growth*», 274(3-4), p. 489-494, (2005).
- [21] M.E. Fragala and G. Malandrino, « Characterization of ZnO and ZnO:Al films deposited by MOCVD on oriented and amorphous substrates, *Microelectronics Journal*», 40(2), p. 381-384, (2009).

- [22] K.I. Chopra, S. Major and D.K. Pandya, «Optical Properties of Aluminum Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering »,Thin solid films 1, 102 (1986).
- [23] J.C. Manifacier, J. Gasiot, J.P. Fillard, « A simple method for the determination of the optical constants n, k and the thickness of a weakly absorbing thin film ». J. Phys. E **9**, 1002–1004 (1976).
- [24] K. Laga, «Etude et réalisation du semi conducteur Transparent SnO<sub>2</sub> par APCVD. Application Photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2003).
- [25]K. BADEKER, «Electrical Conductivity and Thermo-Electromotive Force of Some Metallic Compounds», Ann. Phys, p22, 749, (1997).
- [26] J. GARNIER, Thèse de Doctorat « école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers », Paris, (2009).
- [27] D. VAUFREY, « Réalisation d'OLED à émission par la surface : Optimisation de structures », université de Lyon (2003).
- [28] G. Jérôme, « Elaboration de couches minces d'oxyde transparents conducteurs par spray CVD assisté par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, (2009).
- [29] K. Afzal, « Synthèse de Cuprates de Strontium (SrCu<sub>2</sub>O) par MOCVD comme couche mince d'oxyde transparent conducteur de type P ». Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, (2011).
- [30] O. Boussoum, « Etude de l'effet d'une couche mince de TiO<sub>2</sub> sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011). *Chapitre III [Préparation et caractérisation des couches minces de(ZnO)]*
- [31] M. Madani, «réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces ». Mémoire de Magister, Université Abou-Baker Belkaid de Tlemcen, (2006).
- [32]A.Moustaghfir « Élaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc. Application à la photoprotection du polycarbonate », Thèse de doctorat, université Blaise Pascal, (2004).

- [33] D. Kalhor, S.A. Ketabi, A. Ebrahimzad, M. MoosaRezaei, «Effects of CW CO<sub>2</sub> Laser Annealing on Indium Tin Oxide Thin Films Characteristics »World Applied Sciences Journal 6 (1) (2009) 83-87.
- [34] Y. Hu, X. Diao, C. Wang, W. Hao, T. Wang« Effects of heat treatment on properties of ITO films prepared by rf magnetron sputtering. »Vacuum 75 (2004) 183–188.
- [35] L. Kerkache, A. Layadi, E. Dogheche, D. Rémiens, Eur. Phys. J « Annealing effect in DC and RF sputtered ITO thin films. » Appl. Phys. 39 (2007) 1-5.
- [36] V. Malathy, S. Sivaranjani, V.S. Vidhya, J. Joseph Prince, T. Balasubramanian, C. Sanjeeviraja, M. Jayachandran, « Amorphous to crystalline transition and optoelectronic properties of nanocrystalline indium tin oxide (ITO) films sputtered with high rf power at room temperature » Journal of Non-Crystalline Solids 355 (2009) 1508–1516.
- [37] Tien-Chai Lin, Shang-Chou Chang, Chin-Fu Chiu, «Carbothermal synthesis of ZnO nanocomb structure »Materials Science and Engineering B 129 (2006) 39–42.
- [38] J. Garnier « Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray CVD assiste par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2009).
- [39] T.K. Subramanyam, B. Srinivasulu Naidu, S. Uthanna, « Crystyl Research Technologic» 35, 1193 (2000).
- [40] E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D. C.Paine, « Transparent *Conducting Oxides* for *Photovoltaics* » MRS Bulletin, vol. 32, (2007).
- [41] Jie, C., Xin-shi, G., & Xing-Fang, H. « Single-layer heat mirror films and an improved method for evaluation of its optical and radiative properties in infrared » 55 (4), 323-329 (1998)
- [42] P. Jin, L. Miao, «Formation and characterization of TiO<sub>2</sub> thin films with application to a multifunctional heat mirror, » *Applied Surface Science*, 212-213, p. 775-781,(2003)

- [43] J. Z. Yan, Y. Zhang, W. X. Huang, and M. J. Tu, « Effect of Mo-W Co-doping on semiconductor-metal phase transition temperature of vanadium dioxide film » *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 23, pp. 8554–8558, 2008
- [44] I. Saadeddin, «Preparation and characterization of now transparent conducting oxides based on SnO<sub>2</sub> and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: ceramics and thin films, these de doctorat, Université d Bordeaux I, (2007).
- [45] T. Aoki, Y. Shimizu, A. Miyake, A. Nakamura, Y. Nakanishi, Y. Hatanaka « p-Type ZnO Layer Formation by Excimer Laser Doping », *physica status solidi b*, 229, 2, 911 (2001).
- [46] G. Heiland, « Homogeneous semiconducting gas sensors, *Sensors and Actuators*, 2 (1982) 343-361
- [47] Seiyama, T., Kato, A., Fukiishi, K., Nagatani, M., “A New Detector for gaseous components using Semiconductive Thin Films», *Anal. Chem.* 34 (1962) 1502-1503
- [48] K. Takahata, « chemical sensors technology » edited by T. Sci. Kodansha, Tokyo. 1, 39, 1988.
- [49] M. Gaidi « Films minces de SnO<sub>2</sub> dopés au platine ou au palladium et utilisés pour la détection des gaz polluants : analyses *in-situ* des corrélations entre la réponse électrique et le comportement des agrégats métalliques », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, (1999).
- [50] KOHNKE, E.E., 1962. Electrical and Optical properties of natural stannic oxide crystals. *J. Phys. Chem. Solids* 23, 1557—1562 [51] K. Reimann and M. Steube: Experimental determination of the electronic band structure of ITO *Solid State Commun.* 105(10), 649–652 (1998)
- [52] J. Maier, W. Goepel, « Investigations of bulk defect chemistry of polycrystalline Tin (IV) Oxide », *Journal of Solid State Chemistry*, 72, 293-302 (1988)
- [53] M. Nagasawa, S. Shionoya, and S. Makishima, Japan. J. « Electrical properties of single crystals of antimony-doped stannic oxide », *Appl. Phys.*, 4, 195-202, (1965).
- [54] K. Kessairi « Etude physique et technologie des capteurs à gaz à base d'oxyde d'étain », Thèse de magister, université d'Oran, (2003).
- [55] E. Dupuy, DEA Energétique Physique Rapport de stage, INP Grenoble et ENSPG, 2003.

[56] Yannick Veschetti "Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince", thèse de doctorat, université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005.

[57] [www.panasonic.com](http://www.panasonic.com)

[58] MansourHayette « simulation numérique d'une cellule solaire Hétérojonction, HIT », Univ biskra (2015).

[59] Lakhdari Rahma « Etude par simulation numérique de l'effet des défauts dans une cellule solaire N/P en silicium cristallin », Université Med Khider Biskra (2014).

[60] Hfayed Massika « Simulation numérique d'une Cellule solaire (p/n) en GaAs », Université Med Khider Biskra (2014).

[61] Arti Rawat « Numerical simulations for high efficiency HIT solar cells using microcrystalline silicon as emitter and back surface field (BSF) layers », Solar Energy 110 (2014) 691–703 (2014).

[62] Kahina LAGHA-MENOUER « Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches du type Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>-ZnO par APCVD », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU (2011).