

*République Algérienne Démocratique Populaire*  
*Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*



*Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel*

*Faculté des Sciences & de la Technologie*

*Département d'Électronique*

**Mémoire de Fin d'Études**

**En vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Électronique**

**Option : Électronique des Systèmes Embarqués**

**Thème**

*Étude de l'effet des  
caractéristiques de la couche TCO  
sur les propriétés de la cellule PV  
en silicium*

Encadré par :

Dr. Mohamed Ali LAHMER

Dr. Sofiane HADDAD

Réalise par :

M<sup>lle</sup> Bouchra BOULESBAA



**Promotion 2019**

*Surah L'ADHERENCE*

*Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très  
Miséricordieux*

*Lis, au nom de ton Seigneur qui a créé, (1) qui a créé  
l'homme d'une adhérence. (2) Lis! Ton Seigneur est le  
Très Noble, (3) qui a enseigné par la plume [le  
calame], (4) a enseigné à l'homme ce qu'il ne savait  
pas. (5) Prenez-garde! Vraiment l'homme devient  
rebelle, (6) dès qu'il estime qu'il peut se suffire à lui-  
même (à cause de sa richesse). (7) Mais, c'est vers ton  
Seigneur qu'est le retour. (8) As-tu vu celui qui  
interdit (9) à un serviteur d'Allah [Muḥammad] de  
célébrer la Ṣalāt? (10) Vois-tu s'il est sur la bonne  
voie, (11) ou s'il ordonne la piété? (12) Vois-tu s'il  
dément et tourne le dos? (13) Ne sait-il pas que  
vraiment Allah voit? (14) Mais non! S'il ne cesse pas,  
Nous le saisirons certes, par le toupet, (15) le toupet  
d'un menteur, d'un pécheur. (16) Qu'il appelle donc  
son assemblée. (17) Nous appellerons les gardiens [de  
l'Enfer]. (18) Non! Ne lui obéis pas; mais prosterne-  
toi et rapproche-toi(7). (19)*



*Au nom de Dieu le Miséricordieux*



### **Remercîment**

*Ce fut pour moi une grande chance que de pouvoir préparer cette mémoire, Ce travail a été effectué au sein de l'Université du Mohammed Sdik Ben Yahia de Jijel dans le cadre de la préparation du mémoire de master en Electronique Système Embarqués ESE, sous la direction du M<sup>r</sup> **MOHAMED Ali LAHMER** Docteur université de Jijel, et M<sup>r</sup> **SOFIANE HADDAD** Docteur université de Jijel*

*Je remercie **DIEU** tout-puissant pour la volonté et le pouvoir qui m'ont permis d'achever ce travail, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à mes directeurs de mémoire. Ils m'ont donné toutes les chances nécessaires pour finir les travaux de mémoire.*

*Nous applaudissons également l'esprit de responsabilité de **Dr M. A. LAHMER**. Il a travaillé dur avec moi et il m'a fourni des informations et des conseils précieuses pendant cette période. Je le remercie pour cette coopération car ce pas ouvrira de nombreux horizons.*

*Je remercie **Dr SOFIANE HADDAD**, qui a proposé ce travail, pour ses encouragements et pour ses orientations bénéfiques tout au long de ce travail.*

*Par ailleurs, j'exprime aussi mes vifs remerciements aux membres du jury **Dr AMMAR SOUKKOU** et **Dr MORAD GRIMES** pour avoir accepté d'examiner et corriger ce mémoire.*

*J'adresse également ma gratitude au chef du département, le **Dr T. BENKEDIDAH** qui a facilité nos recherches et un grand remerciement au chef d'option d'ESE **Dr MORAD GRIMES** pour ses efforts.*

*Enfin, je remercie tous Les enseignants du département électronique Surtouts Les enseignants d'ESE*

*Merci encore à tous...*

## *Dédicace*

*Une merci spéciale et sincère gratitude à mon cher père qui m'a accompagné tout au long de ma carrière avec un soutien moral et matériel. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

*À la paupière des yeux de ma mère qui m'affligeait de sa tendresse et m'accompagnait de ses appels, je la remercie beaucoup pour ses sacrifices. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. La prunelle de mes yeux*

*Un salut sincère à mes chers frères «Monsif et Taha » et mas chères sœurs " Amel ,Amira et Afaf"*

*Je remercie aussi beaucoup ma famille.*

*Je souhaite mes meilleurs vœux à tous mes chers amis, en particulier « Khalida, Lwiza, Khalida , Kaoula , Kondessa et Kawtar »». Dédicace à mas amie « Yousra et Madiha »».*

*Dédicace spéciale à tous mes camarades de la promo d'électronique  
Master II en 2018/2019*

*Bouchra*



# Sommaire

Remerciment .....	i
Dédicace.....	ii
Sommaire .....	iii
Liste des figures .....	vi
Abréviations.....	ix
Symboles.....	x
Introduction générale .....	01

## Chapitre I généralités sur la photovoltaïque

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>02</b>
<b>I.2 L'histoire de panneau photovoltaïque.....</b>	<b>02</b>
<b>I.3 Energie photovoltaïque .....</b>	<b>02</b>
I.3.1 Le système photovoltaïque.....	03
I.3.2 Panneau photovoltaïque .....	03
I.3.2.1 La différence entre le panneau solaire et le panneau pv.....	04
I.3.2.2 L'effet photovoltaïque .....	04
I.3.2.3 Cellule photovoltaïque.....	05
I.3.2.4 Schéma e électrique de de cellule photovoltaïque.....	06
I.3.2.5 La Jonction p-n .....	07
I.3.3 Les avantages de l'énergie photovoltaïque.....	08
I.3.4 Étude du l'évolution de la production, le marché de la puissance de panneau photovoltaïque .....	08
<b>I.4 Générations des cellules photovoltaïques.....</b>	<b>09</b>
I.4.1 Cellules de première génération .....	09
I.4.1.1 Cellule photovoltaïque au silicium monocristallin.....	10
I.4.1.2 La cellule photovoltaïque au silicium polycristallin.....	11
I.4.1.3 Les technologies dérivées de silicium cristal.....	12
I.4.1.3.a Cellule HIT.....	12
I.4.1.3.b Cellule ruban.....	12
I.4.1.3.C Cellules photovoltaïques à haut rendement (PERL).....	13
I.4.1.3.d Cellule MWT.....	13
I.4.1.3.e Cellule IBC .....	13
I.4.2 Cellules de deuxième génération .....	13
I.4.2.1 La cellule photovoltaïque au silicium amorphe.....	14
I.4.2.1.1 Cellule Double ou triple jonction de silicium amorphe.....	15
I.4.2.2 La cellule photovoltaïque tandem.....	16
I.4.2.3 La cellule photovoltaïque de CdTe.....	16
I.4.2.4 La cellule photovoltaïque de Le diséléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS).....	16

I.4.3 Cellules de troisième génération .....	17
I.4.3.1 Cellule organiques.....	17
I.4.3.2 La cellule à colorant (cellule Grätzel) .....	18
I.4.3.3 Cellule polymère .....	18
<b>I.5 conclusion .....</b>	<b>19</b>

## Chapitre II Le simulateur GPVDM de la cellule PV et la modélisation

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2 Le simulateur GPVDM.....</b>	<b>20</b>
II.2.1 Définition de GPVDM.....	20
II.2.2 Les avantages de simulateur GPVDM .....	21
II.2.3 Simulation des cellules photovoltaïque avec GPVDM.....	21
<b>II.3 La caractéristique courant-tension <math>I(V)</math>.....</b>	<b>24</b>
II.3.1 Les paramètres électriques de la cellule PV.....	26
II.3.1.1 Le point de puissance maximal MPP.....	26
II.3.1.2 Le courant de court-circuit $I_{CC}$ .....	26
II.3.1.3 La tension en circuit ouvert $V_{CO}$ .....	27
II.3.1.4 La puissance maximale idéale.....	27
II.3.1.5 Le rendement d'une cellule ( $\eta$ ).....	27
II.3.2 Paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule PV.....	28
II.3.2.1 La résistance série $R_s$ .....	28
II.3.2.2 La résistance shunt $R_{sh}$ .....	28
II.3.2.3 Le courant de saturation $I_s$ .....	29
II.3.2.4 L'éclairement $L$ .....	29
<b>II.4 Recombinaison .....</b>	<b>29</b>
<b>II.5 La diffusion .....</b>	<b>30</b>
<b>II.6 La densité de courant des trous et électrons.....</b>	<b>31</b>
II.6.1 Courant de diffusion (porteurs minoritaires).....	31
II.6.2 Le courant de conduction .....	31
II.6.3.a Près de la zone neutre de type N.....	31
II.6.3.b Près de la zone neutre de type P .....	32
<b>II.7 Le Photo-courant (<math>I_{ph}</math>) .....</b>	<b>33</b>
<b>II.8 Conclusion .....</b>	<b>33</b>

## Chapitre III L'effet de la couche TCO sur le rendement de la cellule PV à base de silicium

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>III.2. La cellule amorphe (N-I-P) .....</b>	<b>34</b>
III.2.1 Effet de la nature et l'épaisseur de la couche TCO sur la cellule	
a-Si (N-I-P).....	35
III.2.1.1 Caractéristique $I(V)$ pour chaque structure .....	37
III.2.1.1.a Caractéristique courant-tension de la cellule FTO/a-Si .....	38

III.2.1.1.b	Caractéristique courant-tension de la cellule ZnO/a-Si .....	38
III.2.1.1.c	Caractéristique courant-tension de la cellule ITO/a-Si .....	39
III.2.2	La cellule amorphe avec la couche de ZnO .....	40
III.2.2.1	L'effet de la résistance série $R_s$ sur le rendement de cellule ZnO/a-Si.....	41
III.2.2.2	L'effet de la résistance parallèle sur le rendement de cellule ZnO/a-Si.....	42
III.2.2.1.3	L'effet de dopage le silicium .....	43
<b>III.3</b>	<b>La cellule polycristallin (N-I-P) .....</b>	<b>44</b>
III.3.2	Effet de la nature et l'épaisseur de la couche TCO le rendement de la cellule de p-Si (N-I-P).....	45
III.3.3	L'effe de la résistance série $R_s$ sur le rendemant de la cellule ZnO/p-Si .....	46
III.3.4	L'effet de la résistance $R_{sh}$ sur le rendement de la cellule ZnO/p-Si.....	48
<b>III.4</b>	<b>la cellule hétérojonction (ITO/ZnO/p-Si).....</b>	<b>49</b>
III.4.1	L'effet de l'épaisseur D de la couche contacte ITO sur le rendement « $\eta$ de cellule hétérojonction (ITO/ZnO/p-Si) .....	50
III.4.2	L'effet de l'épaisseur D de la couche active de ZnO sur le rendement $\eta$ .....	51
III.4.3	L'effet de l'intensité d'éclairement sur le rendement de la cellule à hétérojonction .....	52
III.4.4	L'effet de dopage de la couche active ZnO .....	53
<b>III.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>54</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>
	Références .....	56

*Liste des figures*

**Chapitre I**

<b>Figure I.1</b>	Le principe l'effet photovoltaïque	05
<b>Figure I.2</b>	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	06
<b>Figure I.3</b>	La structure et le principe de fonctionnement de jonction P-N typique	07
<b>Figure I.4</b>	L'évolution de la puissance des panneaux photovoltaïques 2010 jusqu'à 2021	08
<b>Figure I.5</b>	Photo d'une cellule à base de Si monocristallin	10
<b>Figure I.6</b>	Photo d'une cellule à base de Si polycristallin	11
<b>Figure I.7</b>	Schéma de structure d' cellule PV à base de Si monocristallin à haut rendement	13
<b>Figure I.8</b>	Photo de la cellule amorphe	14
<b>Figure I.9</b>	La structure d'une cellule simple, double et triple jonction en Si amorphe	15
<b>Figure I.10</b>	La structure de la cellule CdTe	16
<b>Figure I.11</b>	Schéma de structure d'une cellule CIGS	17
<b>Figure I.12</b>	Cellule organique	17
<b>Figure I.13</b>	La structure et le principe de fonctionnement de Grätzel	18

**Chapitre II**

<b>Figure II.1</b>	créer un nouveau modèle	22
<b>Figure II.2</b>	(A) le matériau de base de la cellule et (B) Où sauvegarder les données	22
<b>Figure II.3</b>	L'éditeur de couche et les types des matériaux à droite	23
<b>Figure II.4</b>	La fenêtre principale de simulation de GPVDM	23
<b>Figure II.5</b>	Le courant et la tension dans une cellule photovoltaïque	24
<b>Figure II.6</b>	La caractéristique I(V) sous éclairement et sans éclairement	26



### Chapitre III

<b>Figure III.1</b>	La structure de la cellule silicium amorphe	34
<b>Figure III.2</b>	Caractéristique I-V d'une cellule silicium amorphe	34
<b>Figure III.3</b>	La structure de cellule amorphe avec la couche contacte (A) ZnO, (B) ITO, (C) FTO	36
<b>Figure III.4</b>	La variation de rendement de la cellule a-Si pour chaque structure en fonction de l'épaisseur de la couche TCO	36
<b>Figure III.5</b>	La variation de la caractéristique I(V) pour chaque épaisseur de FTO	38
<b>Figure III.6</b>	Evolution de la caractéristique I-V de la structure ZnO/Si pour différent épaisseur de la couche de ZnO	39
<b>Figure III.7</b>	Evolution de la caractéristique I-V de la structure ITO/Si pour différent épaisseur de la couche ITO	40
<b>Figure III.8</b>	La variation de rendement de la cellule amorphe en fonction de de la résistance série de la cellule et l'épaisseur de la couche ZnO	41
<b>Figure III.9</b>	La variation de rendement de la cellule amorphe en fonction de la résistance parallèle et l'épaisseur de la couche ZnO $\eta=f(R_{sh})$	42
<b>Figure III.10</b>	La variation du rendement de la cellule amorphe N -I- P en fonction de dopage de la région N, la région P et les deux simultanément	43
<b>Figure III.11</b>	la structure de la cellule à base de Si-poly	44
<b>Figure III.12</b>	La caractéristique I(V) de la cellule à base de Si-poly	44
<b>Figure III.13</b>	La structure de la cellule à base de Si-poly avec couche de : (A) ZnO, (B) ITO et (C) FTO.	45
<b>Figure III.14</b>	La variation du rendement de la cellule polycristallin (N-I-P) avec la couche TCO (ZnO, FTO, ITO) à fonction de l'épaisseur (D)	46
<b>Figure III.15</b>	Le changement de rendement de la cellule ZnO/Si-poly en fonction de la résistance série $R_s$ .	47
<b>Figure III.16</b>	La variation de rendement de la cellule polycristallin en	48

	fonction de la résistance $R_{sh}$ et l'épaisseur de ZnO	
<b>Figure III.17</b>	La structure de cellule hétérojonction (ITO/ZnO/p-Si/Al)	49
<b>Figure III.18</b>	La variation de rendement de la cellule à hétérojonction ITO/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de la couche ITO.	50
<b>Figure III.19</b>	Le rendement de la cellule à hétérojonction en fonction de l'épaisseur de la couche active ZnO.	51
<b>Figure III.20</b>	Le rendement en fonction de l'éclairement L	52
<b>Figure III.21</b>	La variation de rendement de la cellule à hétérojonction en fonction de dopage de la couche active ZnO	53

## *Les abréviations*

a-si	<b>Silicium Amorphe</b>
a-Si:H	<b>Silicium Amorphe Hydrogéné</b>
CdTe	<b>Tellurure de Cadmium</b>
CIS	disélélinium de cuivre indium
CuPc	phthalocyanine de cuivre
FTO	SnO <sub>2</sub> dopé Fluor
GPV	<b>Générateur Photovoltaïque</b>
GPVDM	Simulateur <b>General-purpose Photovoltaic Device Model</b>
HIT	<b>Heterojonction with Intrinsic Thin layer</b>
IBC	<b>Interdigitated Back Contact</b>
ITO	SnO <sub>2</sub> dopé Indium
MWT	<b>Metal Wrap Through</b>
PERL	<b>Passivated Emitter With Rear Locally diffused</b>
poly-Si	<b>Silicium Polycristallin</b>
PPM	<b>Point de Puissance Maximale</b>
PV	<b>Photovoltaïque</b>
Si	<b>Silicium est un atome possédant le symbole</b>
TCO	<b>Oxyde Conducteur Transparent</b>
ZCE	<b>Zone de Charge d'Espace</b>
ZnO	<b>Oxyde de Zinc</b>

## *Symboles*

$\mu_n$	la mobilité des trous dans le semiconducteur (n).
$\mu_p$	la mobilité des électrons dans le semiconducteur (p)
D	L'épaisseur ( cm)
$D_p$	La constante de diffusion des électrons dans le S-C (p)
$E_b$	Largeur de bande interdite fondamentale
$E_g$	L'énergie de gap du matériau (le silicium, $E_g = 1,12$ eV)
FF	Le Facteur de forme.
G	Le taux de génération
$I_{ph}$	photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A)
$I_s$	Courant de saturation de la diode (A)
$I_{opt}$	courant optimaux (A)
$J_{d(p,n)}$	Courant de diffusion des électrons et des trous (A cm <sup>-2</sup> )
$J_{C(p,n)}$	La densité de courant de conduction des électrons et des trous
$J_{n,p}$	Les densités de courant des électrons et des trous
k	Constante de Boltzmann ( $k = 1,38.10^{-23}$ )
L	L'éclairement
$L_{n,p}$	Longueurs de diffusion des électrons et des trous
$N_a$	La densité de dopants de type accepteurs (cm <sup>-3</sup> )

## Liste des symboles

$N_c$	La densité d'états dans la bande de conduction ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_d$	La densité de dopants de type donneurs ( $\text{cm}^{-3}$ )
$n_e, p_e$	La densité des porteurs à l'équilibre.
$N_i$	La concentration intrinsèque de porteurs ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_v$	La densité d'états dans la bande de valence ( $\text{cm}^{-3}$ )
$p, n$	Les densités de porteurs de charge
$P_L$	Puissance lumineuse par unité de surface ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ).
$P_{\max}$	Puissance maximal
$q$	Charge de l'électron ( $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )
$R$	Le taux de Recombinaison
$R_s$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance shunt ( $\Omega$ )
$R_{n,p}$	Les taux de recombinaison pour les électrons et les trous
$S$	La surface active de la cellule ( $\text{cm}^2$ ).
$T$	Température de la cellule ( $\text{K}^\circ$ )
$V_{\text{opt}}$	Tension optimaux ( $\text{V}$ )
$\tau_{n,p}$	La durée de vie de ces porteurs

### Introduction générale

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations.

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent pas d'augmenter.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire, une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type de façon dangereuse pour les futures générations.

Quelle que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire afin d'obtenir un bon rendement. Quelle est la méthode qui peut être utilisée pour améliorer le rendement de la cellule PV ? Et ce changement affecte-t-il les propriétés de la cellule solaire ?

L'objectif de notre travail est d'évaluer par simulation l'effet des propriétés de la couche TCO sur le rendement d'une cellule photovoltaïque à base de Silicium.

Ce travail sera organisé et structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons des notions générales sur les cellules PV.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le simulateur GPVDM qui sera notre outil de modélisation pour étudier les propriétés de différents types des cellules solaires.

Dans le dernier chapitre, nous allons étudier l'effet de la couche TCO sur le rendement de la cellule PV à base de Silicium et consacrer cette partie à la présentation des résultats obtenus et à la discussion du comportement et des performances de nos cellules.

## I-1 Introduction

L'un des enjeux majeurs de toutes Pays est l'accès à l'énergie. Dans ce contexte, beaucoup voient les énergies renouvelables jouer un rôle prépondérant dans le futur et cela pour trois principales raisons : la pénurie annoncée à moyen terme des énergies fossiles la demande mondiale croissante en énergie et la prise de conscience de la nécessité de préserver la planète. Les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles se forment dans la nature. Il est estimé que les réserves mondiales en pétrole et gaz seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas profondément modifiée.

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et elles sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, nous aborderons les généralités liées à l'énergie photovoltaïque, puis nous examinerons la structure de la cellule solaire, son fonctionnement et ses types.

## I-2 L'histoire de panneau photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Alexander Edmond Becquerel en 1839 en observant que certaines substances exposées à la lumière pouvaient produire de petites quantités d'électricité. Albert Einstein a poursuivi ses recherches sur ce travail en 1905 il a publié un article sur la possibilité de production de l'électricité à partir de la lumière solaire. Ce document explique l'effet photoélectrique, la technologie sur laquelle repose le panneau solaire. En 1954, les Laboratoires Bell ont arrivé à construire le premier panneau solaire. La batterie solaire s'appelait.

## I-3 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie lumineuse (énergie des photons) portée par un rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Cette opération est basée sur l'utilisation des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués à partir des matériaux

sensibles aux longueurs d'ondes du visible. Le rôle de ces modules PV est d'absorber le rayonnement lumineux, générer des porteurs de charges (électrons ou trous), et enfin, générer un courant électrique.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend de l'intensité de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [1]. La première technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque est basé sur le silicium monocristallin ou multi-cristallin découpés en plaquettes à partir de lingots. Elle constitue actuellement l'essentiel de l'industrie photovoltaïque, voire plus de 80% de la production mondiale [2].

### **I.3.1 Le système photovoltaïque**

Le système photovoltaïque est un système pour la production de l'énergie électrique constitué fondamentalement d'un projecteur, d'un ou plusieurs panneaux, d'un ensemble de piles pour stocker l'énergie électrique, et d'un adaptateur unique ou plusieurs convertisseur continue-continue fournissent des tensions d'alimentation suffisantes pour batteries. Il est possible d'utiliser aussi des convertisseurs continue-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif.

### **I.3.2 Panneau photovoltaïque**

Un panneau photovoltaïque est constitué d'une série de cellules photovoltaïques. Ces derniers sont généralement fabriqués à partir des couches semiconductrices (à base des matériaux semiconducteurs) sous forme d'une jonction p-n. en absorbant de la lumière, des paires électrons-trous se génèrent dans le matériau semiconducteur. Par la suite, l'électron et le trou s'échappent de part et d'autre de cette jonction p-n en créant une différence de potentiel (ce que l'on mesure en volts).



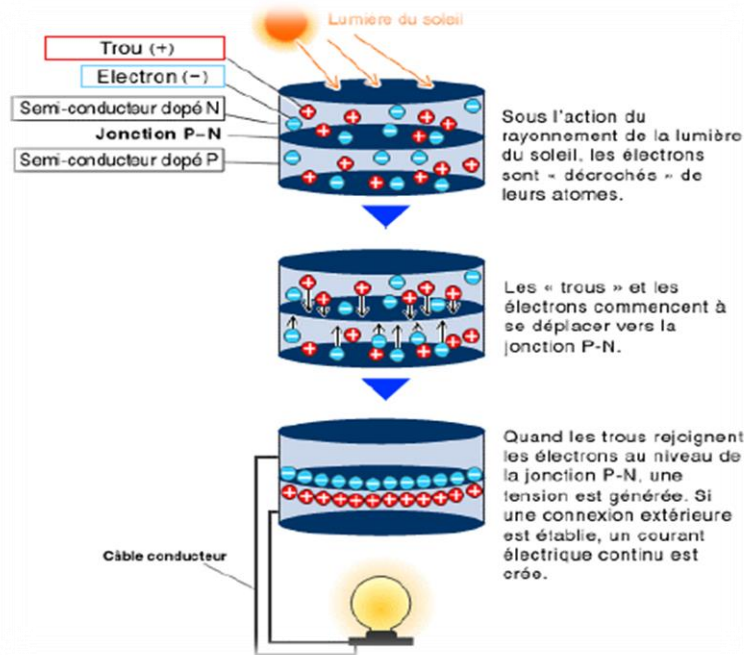
### I.3.2.1 La différence entre le panneau thermique et le panneau photovoltaïque

L'énergie du soleil peut être directement utilisée pour produire de la chaleur (énergie thermique) ou de l'électricité (énergie électrique). Dans les deux cas, pour capter cette énergie, on a besoin d'utiliser des capteurs solaires thermiques pour le premier processus ou des panneaux solaires photovoltaïques pour le deuxième. Les différences existantes entre ces deux types de capteurs peuvent être résumées dans les points suivants :

Le panneau photovoltaïque capte la lumière du rayonnement solaire pour produire de l'électricité. Le panneau solaire thermique capte la chaleur du rayonnement solaire pour produire de l'eau chaude sanitaire et de chauffage. Les panneaux thermiques sont couramment utilisés conjointement avec un chauffe-eau solaire. En revanche, en matière de longévité et de maintenance, l'avantage revient aux panneaux photovoltaïques. Une fois installés, ils nécessitent très peu d'entretien (seulement s'assurer que rien ne vient obstruer la surface des cellules photovoltaïques) et ne tombent quasiment jamais en panne. Les panneaux solaires thermiques devront subir un contrôle dès la dixième année d'utilisation.

### I.3.2.2 L'effet photovoltaïque (PV)

Lorsqu'un matériau semiconducteur est exposé à la lumière du soleil, Les électrons, initialement situés dans la bande de valence, peuvent subir des transitions vers la bande de conduction en absorbant des photons d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite (ou "gap" en anglais,  $E_g$ ). Sous l'action de ce bombardement, les électrons auront de l'énergie nécessaire pour franchir le gap. Ainsi, ils seront décrochés de la bande de valence pour se retrouver dans la bande de conduction. Les électrons "décrochés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement, transformée en énergie électrique c'est l'effet photovoltaïque



**Figure I.1 :** le principe de l'effet photovoltaïque [3].

### I.3.2.3 Cellule photovoltaïque

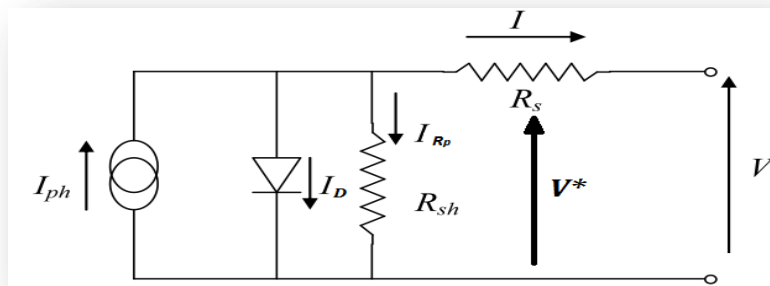
Une cellule photovoltaïque (PV) est un dispositif optoélectronique qui sert à produire de l'électricité à partir d'une source de lumière grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur et parfois une simple batterie électrique).

Une cellule PV est réalisée généralement à partir de deux couches semiconductrices, l'une dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Les couches P et N constituant la jonction P-N peuvent être du même matériau, on parle dans ce cas d'une homojonction P-N, ou de deux matériaux différents et nous parlerons dans ce cas d'une hétérojonction. Notons que le prix et le rendement pour chaque type de cellules PV dépendent de plusieurs paramètres.

### I.3.2.4 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter une cellule PV.

Le modèle électrique de la cellule photovoltaïque doit prendre en compte les différents facteurs limitatifs. Généralement, un tel modèle contient un générateur de courant  $I_{ph}$  pour représenter le courant photogénéré ainsi que des résistances complémentaires,  $R_s$  et  $R_{sh}$ , et aussi une diode.



**Figure I.2** : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [4].

Le modèle mathématique associé à une cellule peut être déduit à partir de celui d'une jonction P-N. On y ajoute le courant  $I_{ph}$ , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_{sh}}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Avec :

$I_{ph}, I_s$  : le photo-courant et le courant de saturation de la diode (A).

$R_s, R_{sh}$  : la résistance série et la résistance shunt ( $\Omega$ )

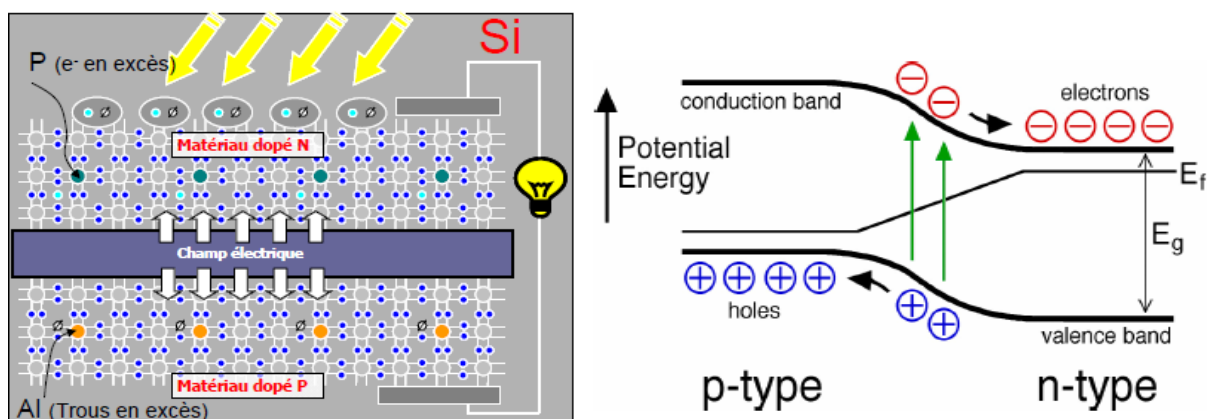
$k$  : constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ ).

$q$  : la charge de l'électron ( $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$  C).

$T$  : la température de la cellule ( $^{\circ}K$ ).

### I.3.2.5 La Jonction p-n

Une jonction P-N est la zone du semiconducteur où le dopage varie brusquement de type N au type P. Lorsque la zone N est mise en contact avec la zone P, les électrons libres de la région N rentrent dans la couche P et vont se recombiner avec les trous de la région P. Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge positive de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge négative dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; la totalité forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique entre les deux, de N vers P. Ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P. En fonctionnement, lorsque un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), alors que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif). Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE, où il n'y a quasiment plus de porteurs de charges (électrons ou trous) dans la mesure où ils se sont annihilés, ou à la proximité immédiate de la ZCE : quand un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, tandis que si la création a lieu plus loin de la jonction, l'électron (le trou) nouveau conserve une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone N (la zone P). Mais la ZCE est nécessairement particulièrement mince, aussi n'est-il pas utile de donner une grande épaisseur à la cellule.



**Figure I.3 :** La structure et le principe de fonctionnement d'une jonction P-N typique.

### I.3.3 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

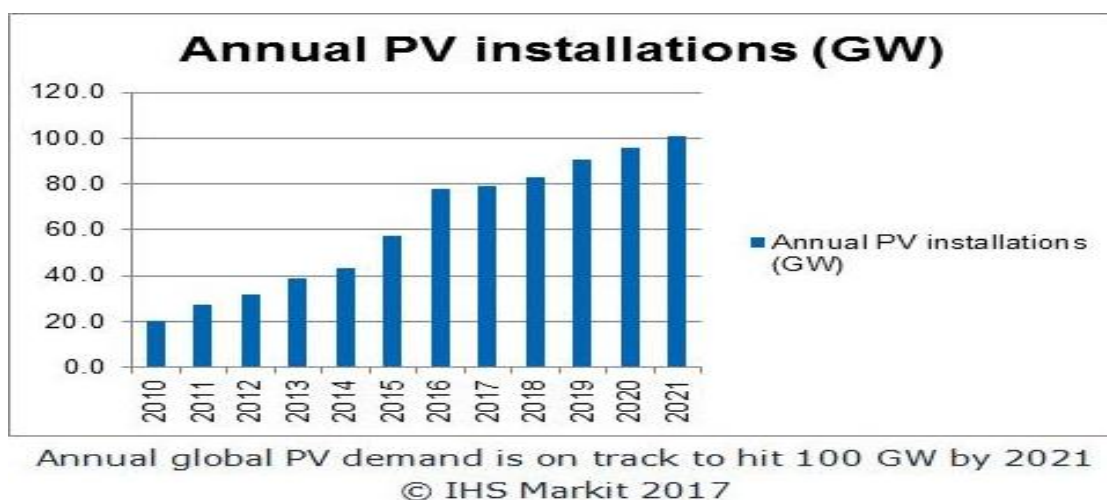
L'énergie photovoltaïque contribue de manière significative aux économies d'énergie électrique du monde et ceci grâce à ses avantages parmi lesquels nous pouvons citer les avantages suivants :

L'énergie PV est moins coûteuse que l'énergie nucléaire

L'énergie PV est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre ; Contrairement au cas des énergies fossiles, l'énergie photovoltaïque ne rejette pas de CO<sub>2</sub> et donc ne participe donc pas au réchauffement climatique. De plus, et grâce aux matériaux recyclables qui constituent les panneaux solaires, l'impact environnemental du photovoltaïque est minime. Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes. L'installation de panneaux photovoltaïques, vous permet de produire localement une électricité durable. Vous pouvez alors choisir de revendre la totalité de votre énergie ou opter pour l'autoconsommation et revendre le surplus de votre production. Dans les deux cas, votre production vous permettra d'obtenir un revenu supplémentaire, à un prix garanti.

### I.3.4 Étude de l'évolution de la puissance et production et le marché de photovoltaïque

L'étude l'évolution des panneaux photovoltaïques très important dans le domaine photovoltaïque pour cela nous étudierons la évolution de la puissance de panneau photovoltaïque.



**Figure I.4 :** L'évolution de la puissance des panneaux photovoltaïques 2010 jusqu'à 2021 [5].

La figure I.4 montre la variation de la puissance photovoltaïque produite dans la période 2010-2021. Il est clair que la puissance cumulée d'électricité photovoltaïque dans le monde a été augmentée d'une manière rapide avec le temps. Entre les années 2015 et 2016, la puissance PV produite fait un saut de 20 GW.

Les pays asiatiques étant l'un des pays les plus importants dans le domaine de l'énergie solaire, ils s'efforcent de produire la plus grande quantité d'électricité produite à partir de panneaux solaires. D'autre part en Europe, les sources des énergies classiques (pétrole + gaz) sont très limitées, les panneaux photovoltaïques sont largement utilisés en raison de leurs avantages.

### **I.4 Générations des cellules photovoltaïques**

Il existe plusieurs types ou générations des cellules photovoltaïques et chaque génération se distingue de l'autre par la structure de ses cellules et ses propriétés. Le rendement et la durée de vie des cellules solaires diffèrent .physiques et chimiques d'une génération à l'autre. Les plus importantes générations des cellules solaires sont :

#### **I.4.1 Cellules de La première génération**

Les premières cellules solaires sont celle des cellules à base du Silicium. Elle est basée sur l'utilisation d'une jonction P-N dont le matériau source est le silicium cristallin. Il s'agit d'un silicium de haute pureté qui est refroidi après la fusion, puis le cristal de Si est coupé en fines tranches appelés wafers. Pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production consomme beaucoup d'énergie et est donc très coûteuse. La cellule se distingue dans le Silicium monocristallin et le Silicium polycristallin.

##### **I.4.1.1 Cellule photovoltaïque au silicium monocristallin**

La cellule monocristalline provient d'un seul et même bloc cristal de Silicium. Le Silicium monocristallin est utilisé pour produire de cellule photovoltaïque en raison de sa capacité à absorber les radiations. Le Silicium monocristallin est constitué d'atomes de Silicium structurés de façon ordonnée. Le réseau cristallin de la totalité du solide est continu, ne se casse pas sur ses bords et est exempt de toute limite de grain. Il peut être préparé en tant que semiconducteur intrinsèques constitués uniquement de Silicium de haute pureté, comme il peut être dopé par l'ajout

d'autres éléments tels que le bore ou le phosphore pour faire de type P ou de silicium de type N. Pour fabriquer une cellule photovoltaïque à base de Si monocristallin, le monocristal est découpé en tranches très fines. L'aspect de ces cellule est uniforme et de couleur foncée. Avec cette technologie, la production de panneau photovoltaïque est optimale. La cellule monocristalline offrent le meilleur rendement (jusqu'à 20 %). Le panneau issus de cette technologie a une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans). Mais malheureusement, elle possède un inconvénient majeur qui est le coût de production élevé et le panneau est donc cher à la vente.



**Figure I.5 :** Photo d'une cellule à base de Si monocristallin [6].

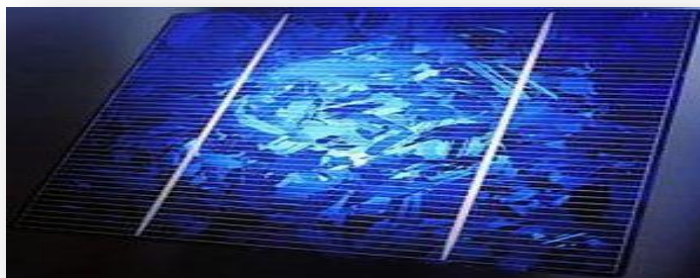
Un autre inconvénient est la croissance des monocristaux de Si. Le silicium monocristallin est obtenu à partir du silicium polycristallin de haute qualité en utilisant la méthode du Czochralski ou la méthode de la zone fondue. Ce processus est généralement effectué dans une atmosphère inerte et dans un creuset inerte, afin d'éviter les impuretés pouvant affecter l'unification des cristaux. Le procédé Czochralski consiste en un durcissement dirigé par de petits germes monocristallins. Le magma commence à une température légèrement supérieure au point de fusion, avec une température de gradient contrôlée. Le germe est placé dans une navette suspendue au-dessus du liquide par une tige. Le liquide est placé sur le germe dans le même sens et la structure cristalline où elle est extraite pendant la rotation. Les champs magnétiques peuvent également être utilisés pour contrôler et supprimer les écoulements turbulents, améliorant ainsi l'unification des cristaux.

L'autre technique (20% de la production) est celle de la zone fondue flottante (silicium FZ) qui permet d'obtenir du Silicium d'une plus grande pureté en évitant la contamination par le creuset. Le processus consiste à produire une zone liquéfiée en chauffant un bâton de silicium polycristallin. Le bâton est déplacé verticalement et

suivant une lente rotation. Un germe de cristal est utilisé pour initier la croissance. Cette méthode est cependant plus longue et plus chère.

### I.4.1.2 Les cellules photovoltaïques au silicium polycristallin

Ces cellules polycristallines sont faites de silicium polycristallin, aussi couramment appelé polysilicium ou poly-Si. C'est une forme particulière du silicium, qui se différencie du silicium monocristallin et du silicium amorphe par la présence des joints de grains. Lorsque le silicium fondu refroidi, on observe la formation de cristaux de tailles et formes différentes ce qui leur confère des propriétés différentes du premier type (composé d'un seul cristal) et du second (n'ayant aucune ou une très faible cohérence cristallographique). Les cellules photovoltaïques issues de cette technologie ne sont alors pas uniformes et sont de couleur bleu foncé dû à l'absence de l'absorption des photons de haute énergie. En fait, ces photons de haute énergie de la partie supérieure du spectre visible sont réfléchis et ne sont pas absorbés.



**Figure I.6:** Photo d'une cellule à base de Si polycristallin [6].

Les cellules à base du poly-Si ont certains avantages tels que le coût de production qui est moins élevé que celui des cellules à Si monocristallin. Ces panneaux ont également une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans) et ils sont dotés d'une bonne flexibilité d'irradiation qui donne un rendement correct, même par temps nuageux. Cependant, elles présentent des inconvénients. L'inconvénient majeur de ces panneaux est le rendement un peu faible par rapport à celui de la technologie monocristalline (de 11 à 15 %).

Concernant le procédé de la production de silicium polycristallin, il est très proche de celui du Si monocristallin. Les cellules Poly-Si sont fabriquées avec du Si fondu



pur dans un moule à boîte carrée. Le refroidissement est une partie importante car il détermine la taille des grains et la distribution des impuretés. Les lingots obtenus sont coupés en barres avec une section de 15,6 cm x 15,6 cm, ils sont finalement déployés pour obtenir des disques minces. Ce procédé de fabrication fournit une structure cristalline à grains multiples. Par rapport au mono-Si, la structure n'est pas idéale, ce qui entraîne une perte d'efficacité de conversion d'environ 10% par rapport au Si mono, mais elle permet de surmonter cet obstacle en réduisant les coûts de production. Un deuxième avantage est la disposition des cellules qui sont rectangulaires, par rapport à un Si monoclonal.

### **I.4.1.3 Les technologies dérivées**

Afin d'améliorer le rendement et les caractéristiques des panneaux solaires, des nouveaux types des cellules solaires ont été inventés. Ces nouveaux types ont été dérivés des cellules photovoltaïques à base de silicium. Les nouveaux types des cellules PV les plus importants sont :

#### **I.4.1.3.a la Cellule HIT**

HIT pour (Heterojonction with Intrinsic Thin layer), sont basées sur l'architecture standard. Les cellules à hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin (a-Si : H/Si), ou encore dites PIN. La zone intrinsèque (I) permet d'améliorer l'état de surface au niveau de la jonction. Du plus, une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) est déposée pour assurer un contact entre la couche amorphe et le métal. Généralement, une cellule HIT comporte une ou deux hétérojonctions a-Si:H/Si. L'Hétérojonction est technologiquement obtenue par dépôt d'une couche de quelques nanomètres de silicium amorphe hydrogéné, dopé ou non (a-Si:H). Le processus d'élaboration doit se faire à une température  $<T < 250$  °C, ce qui réduit l'incorporation des substrats de verre dans le processus. Le gap du Silicium amorphe (environ 1.8 eV) est supérieur à celui de silicium cristallin, ce qui convient mieux au rayonnement solaire. L'utilisation d'une température élevée et chaleur stable va permettre une excellente passivation de la surface.

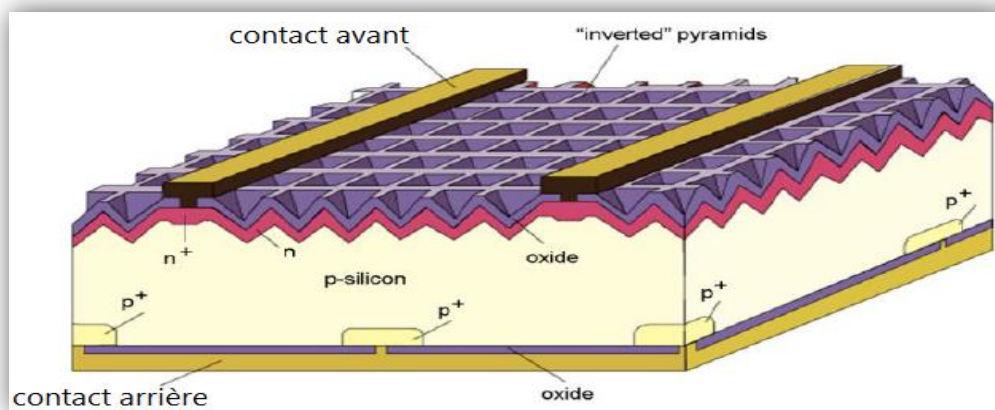
#### **I.4.1.3.b Cellule ruban**

La méthode de production de plaquettes a été étudiée directement à partir de Silicium fondu. La plupart d'entre elles sont basées sur l'effet poétique entre deux lèvres

en carbone, qui ont fait l'objet de nombreux progrès dans la recherche. « La meilleur rendement est 15% » [7].

### I.4.1.3.c Cellules photovoltaïques à haut rendement (PERL)

La cellule photovoltaïque à haut rendement en silicium monocristallin est une cellule qui a été élaborée en laboratoire avec des procédés de la microélectronique en utilisant la technologie PERL (Passivated Emitter With Rear Locally diffused). Le rendement de cette cellule est 24.7%.



**Figure I.7** : Schéma de structure d'une cellule PV à base de Si monocristallin à haut rendement

### I.4.1.3.d Cellule MWT

MWT en anglais est l'abréviation du Metal Wrap Through. Dans ce type de cellules, les électrodes de contact sont transférées en face arrière et un rendement de 16% a été obtenu.

### I.4.1.3.e la Cellule IBC

IBC signifie en anglais (Interdigitated Back Contact). Dans ce type des cellules, on utilise de silicium très pur dopé n avec des contacts déposés intégralement en face arrière. Le rendement de ces cellules est autour de 20 %.

## I.4.2 cellules de deuxième génération

Contrairement aux types précédents où les cellules sont fabriquées à partir du Si massif, ces cellules sont constituées des couches minces semiconductrices. Le matériau

le plus utilisé pour la fabrication de ce type de cellules depuis de longues années est le Silicium amorphe (a-Si). Récemment, des nouvelles cellules à base de CdTe et de  $\text{Cu}_2(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) ont été développées. Le rendement de ces cellules est meilleur que celui du a-Si, cependant le coût est un peu plus élevé. Notons que dans le cas des cellules à base des couches minces, la consommation des matériaux semi-conducteurs sources est très faible (l'épaisseur des couches minces est de 0.1-100 $\mu\text{m}$ ) et on n'a pas besoin de passer par des "wafers". Le matériau semi-conducteur est déposé directement sur le substrat (par exemple, verre, plastique, ...). Cela rend la production de ce type de cellule moins coûteuse que la première génération. De plus, ce processus permet la fabrication de panneaux souples et flexibles.

### I.4.2.1 Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe

La cellule amorphe a une structure de type P-I-N ou bien N-I-P qui se différencie de la structure P-N ou N-P trouvée dans les cellules cristallines par la présence d'une couche intrinsèque I [8]. Les cellules sont de couleur gris foncé.



**Figure I.8 :** photo de la cellule amorphe [9].

Ces cellules sont caractérisées par une bonne présence sur le marché parce qu'elles sont moins chères que celles à base de Si monocristallin ou Si-poly. Leur rendement est faible (7 à 8%) et ses performances diminuent avec le temps dans les premières 6 mois d'exposition à la lumière naturelle puis se stabilisent. La durée de vie de ce type de panneaux photovoltaïques est limitée pour dix ans.

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées avec 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, via un procédé de vaporisation sous vide.

Sur la base du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), de nombreux développements se sont succédés, liés à la flexibilité du procédé de dépôt. L'ajout de  $\text{GeH}_4$  ou de méthane au

silane dans la phase gazeuse a permis d'obtenir des alliages  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  ou  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  et donc de synthétiser des matériaux ayant des largeurs de bande interdite (gaps) différentes, situées entre 1 et 2,2 eV [10]. Cette cellule est réalisée, en premier lieu par le dépôt de la couche fenêtre de type P d'une dizaine de nanomètres sur l'oxyde conducteur transparent (TCO), le choix de ce dernier est généralement lié aux propriétés physiques et optoélectroniques des couches N et P, mais l'idéal est d'avoir un TCO avec une grande transparence optique et une faible résistance afin d'avoir moins de pertes résultantes du photocourant d'absorption dans la couche N. Ensuite, le dépôt d'une couche intrinsèque (I) de silicium amorphe hydrogéné d'épaisseur ne dépassant pas 300 nm qui constitue la région absorbeur de la cellule. Par la suite, une couche de type N sera déposée sur la couche I. Le rôle des couches P et N est de créer un champ électrique, ce qui va permettre à ces couches de collecter les porteurs photo générés dans la couche intrinsèque. Enfin, on dépose une couche métallique qui va être le contact électrique avec la couche N, cela se fait soit par pulvérisation cathodique ou évaporation thermique [9,10]. Afin d'obtenir de meilleures performances pour des cellules en Silicium amorphe, l'idée suggérée par les chercheurs est de superposer les jonctions grâce des architectures double et triple jonction dans une même cellule avec un gap légèrement différent pour pouvoir absorber une plus grande quantité du rayonnement solaire [8].

#### I.4.2.1.1 La Cellule double ou triple jonction de silicium amorphe

Elle est composée de deux à trois couches séparées en silicium amorphe de type P-I-N convertissent la lumière visible et certains rayonnements ultraviolets et infrarouges avec Efficacité optimale.

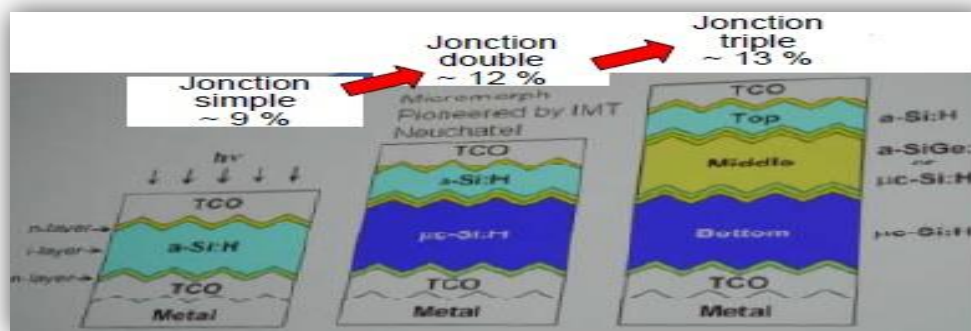


Figure I.9 : La structure d'une cellule simple, double et triple jonction en Si amorphe.

### I.4.2.2 Cellule photovoltaïque tandem

Une cellule photovoltaïque tandem est un empilement de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux différents, on améliore le rendement théorique par rapport aux cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. Ce type de cellule présente une sensibilité élevée sur une large gamme de longueurs d'ondes, en plus de ses excellentes performances. Malgré ses avantages mais elle est très chère à cause de la superposition de deux cellules.

### I.4.2.3 Les cellules photovoltaïques de CdTe

Elles sont aussi appelées hétéro jonction. Ce type de cellules photovoltaïques est fabriqué à partir de tellure de cadmium. Une couche d'absorption en tellure de cadmium est placée sur un support de verre puis couverte par une autre plaque de verre qui vient sceller hermétiquement le panneau. L'utilisation de CdTe augmente l'efficacité des panneaux solaires tout en réduisant leur coût, grâce à la possibilité d'absorber mieux la lumière et à un faible coefficient thermique, bien que le principal inconvénient réside dans la toxicité des produits utilisés dans la fabrication de ce type de panneaux solaires.

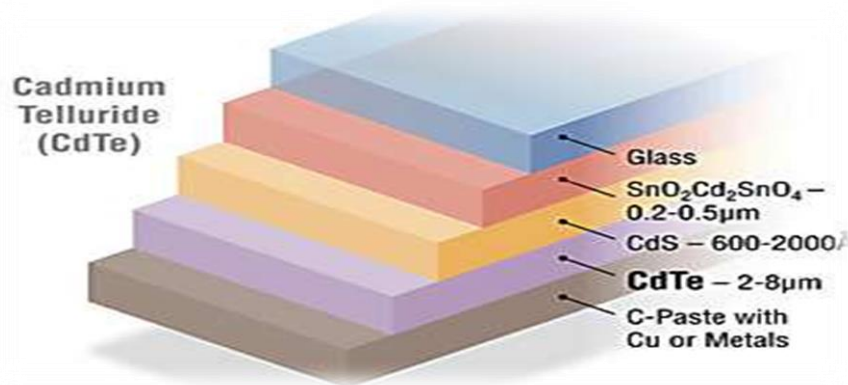
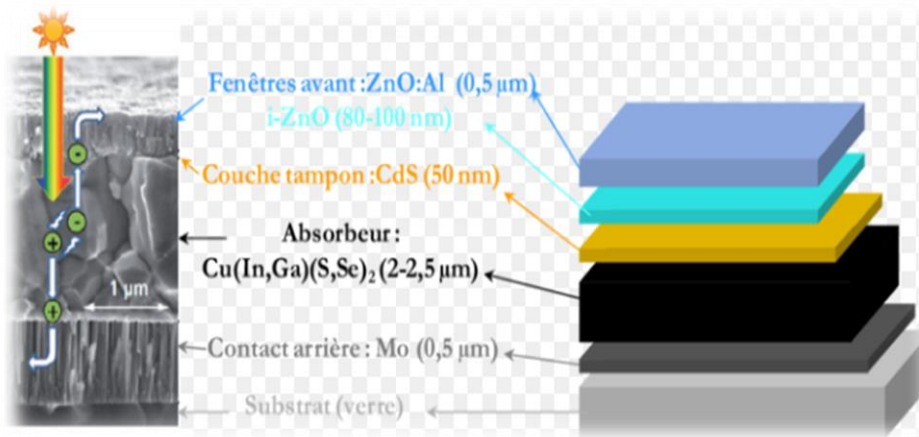


Figure I.10 : La structure de la cellule CdTe [12]

### I.4.2.4 La cellule photovoltaïque de diséléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)

La cellule photovoltaïque de CIGS est considérée comme très prometteuse. Les panneaux à base de diséléniure de cuivre indium (CIS), qui sont au stade de la

production industrielle, offrent un rendement de 10 à 12%. Pour ses modules commerciaux de ce type, ils ne présentent pas les problèmes de toxicité du cadmium.



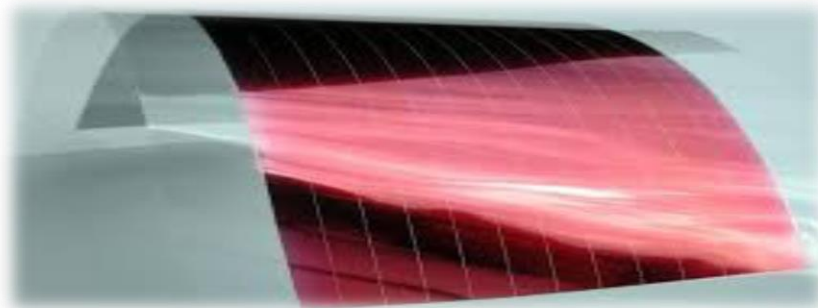
**Figure I.11** : Schéma de structure d'une cellule CIGS [13].

### I.4.3 Cellules de troisièmes générations

#### I.4.3.1 Cellule organique

Les cellules solaires organiques sont fabriquées à partir des matériaux semiconducteurs organiques. Une cellule photovoltaïque organique est un dispositif comprenant une couche active organique d'une épaisseur de l'ordre de la centaine de nm, insérée entre deux électrodes, l'une d'entre elle étant transparente afin de permettre la pénétration de la lumière dans la couche active. Ces cellules solaires organiques sont généralement légères, fines, et flexibles.

Les dernières avancées dans ce domaine indiquent la fabrication des cellules avec un rendement de 13,2 % (taille 1,1 cm<sup>2</sup>) Heliatek [14].



**Figure I.12** : Photo d'une cellule organique.

### I.4.3.2 Cellule à colorant (La cellule Grätzel)

Les cellules à colorant, aussi appelé sous le nom de cellules de Grätzel ou sous leur anagramme anglais DSSC (Dye Sensitized Solar Cells). Elles sont conçues autour de l'association d'une interface colorant/semiconducteur qui permet l'absorption et la séparation de charges et d'un semiconducteur qui permet le transport de ces charges. Les cellules à colorant présentent un intérêt particulier à cause de leurs propriétés uniques parmi lesquelles nous pouvons citer : leur légèreté, leur flexibilité, leur capacité à convertir efficacement la lumière ambiante mais aussi leur esthétique qui fait de ces cellules une vitrine technologique. Enfin, elles sont aussi pressenties pour réaliser efficacement la photolyse de l'eau.

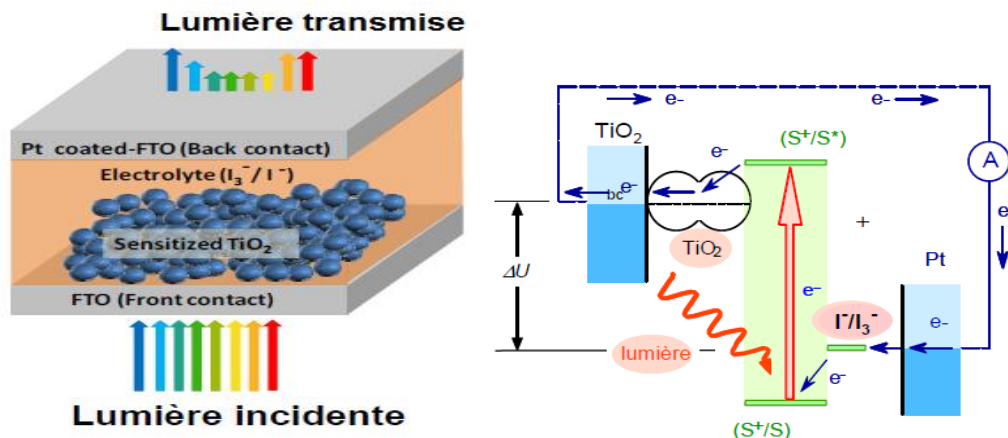


Figure I.13 : La structure et le principe de fonctionnement de Grätzel [16].

### I.4.3.3 La cellule polymère

La cellule photovoltaïque constituée de polymère est un type des cellules solaires organiques produisant de l'électricité à l'aide de polymère semiconducteur. Elle utilise des molécules chimiques dérivées de produits pétrochimiques et l'énergie utilisée lors de ses processus de fabrication n'est pas aussi élevée que celle des cellules qui utilisent des semi-conducteurs inorganiques, ce qui la rend beaucoup moins chère et elle a un faible poids et elle est moins fragile. Sa nature flexible la rend même approprié pour l'intégration avec des matériaux flexibles à base de polymères organiques et de silicium. Cependant, son principal inconvénient est sa durée de vie limitée en raison des dommages causés aux polymères par la lumière solaire.

### I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur la photovoltaïque. La caractéristique commune à toutes les générations des cellules photovoltaïques est la présence d'un matériau donneur et un autre accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu. Les cellules les plus employées sont les cellules à base de silicium que soit polycristallin, monocristallin, ou amorphe.

Les cellules amorphes et polycristallines ont un rendement surfacique moins important mais elles sont moins coûteuses. Les cellules à base de Si monocristallin ont le rendement le plus élevé, elles sont des cellules noires ce qui leur donne un cachet supplémentaire.



### II.1 Introduction

L'énergie solaire est récemment devenue la source d'énergie la moins chère dans de nombreux domaines et on s'attend à ce qu'elle concurrence (et remplace) la plupart des autres formes d'énergie. elle devient donc de plus en plus importants. La simulation apparait donc comme une étape très importante pour le développement des cellules solaires et elle est de plus en plus utilisée à travers le monde entier pour accélérer le développement de ce type d'énergie renouvelables. Par définition, la simulation est une expérience virtuelle ou expérience sur PC. Aujourd'hui, et avec le développement des outils informatiques (codes et ressources de calcul), Les simulations jouent un rôle de plus en plus important dans la recherche et le développement scientifique. Dans le domaine du photovoltaïque, la simulation nous aide à comprendre et à visualiser la structure de la cellule et ses propriétés physiques et électriques que nous ne pouvons pas vraiment voir, nous aide à gagner du temps, à éviter les pertes de matière, et elle nous épargne l'effort.

Il existe plusieurs types de simulateurs, notamment MATLAB, PC1D, AMPS, PSE AG et GPVDM. Dans ce chapitre, on donne une description brève du principe de fonctionnement du simulateur GPVDM. Nous étudions également les propriétés de tension et le rendement, La modélisation mathématique des phénomènes physiques d'origine photovoltaïque est primordiale permet de décrire le comportement du système photovoltaïque.

### II.2 Le simulateur GPVDM

#### II.2.1 Définition de GPVDM

GPVDM est un outil gratuit à usage général pour la simulation de dispositifs optoélectroniques. GPVDM était auparavant connu sous le nom de OPVDM parce qu'il a été initialement conçu pour simuler des cellules solaires organiques seulement, mais il a maintenant été étendu pour simuler d'autres classes de dispositifs, notamment les OLED, les OFET et de nombreux autres types de cellules solaires de première, deuxième et troisième générations.

Actuellement, le logiciel GPVDM peut simuler les dispositifs suivants :

- Cellules solaires organiques (appareils OPV).
- LED organiques (OLED).
- Transistors organiques à effet de champ (OFET).
- Cellules solaires au silicium cristallin.
- Cellules solaires a-Si.
- Cellules solaires CIGS.

### II.2.2 Les avantages de simulateur GPVDM

Le GPVDM facilite l'étude de l'influence des paramètres liés aux matériaux tels que la mobilité, le désordre énergétique, les sections efficaces de dopage et de recombinaison sur les performances du dispositif. Tous les paramètres internes de dispositif simulé tels que ; la densité de courant, la densité de charge, la caractéristique courant-tension, ainsi que la répartition des porteurs piégés en position et l'espace d'énergie, sont accessibles via l'interface graphique du logiciel ou directement via les fichiers de sortie. D'autre part, La technologie des cellules solaires ne s'améliorera que si arrive à comprendre le principe de fonctionnement de leurs appareils et la manière avec laquelle on peut les améliorer. Dans ce contexte, La simulation est considérée comme un bon moyen pour obtenir ces informations.

### II.2.3 Simulation des cellules photovoltaïque avec GPVDM

L'utilisation du simulateur GPVDM est très facile grâce à son interface graphique. Après l'installation du logiciel, en cliquant sur son icône, le simulateur se lance et une fenêtre s'ouvre (Figure.II.1). Pour créer un nouveau modèle ou lancer une nouvelle simulation, il suffit de cliquer sur l'icône NEW SIMULATION.

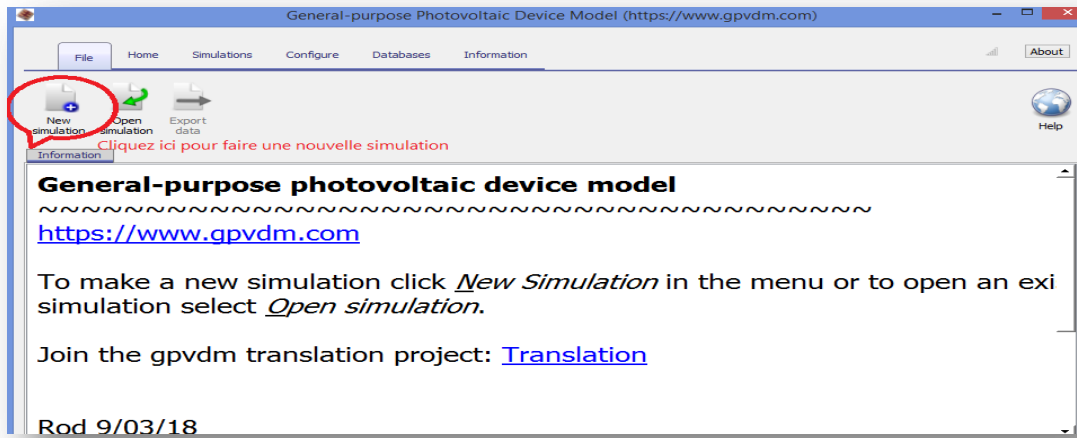
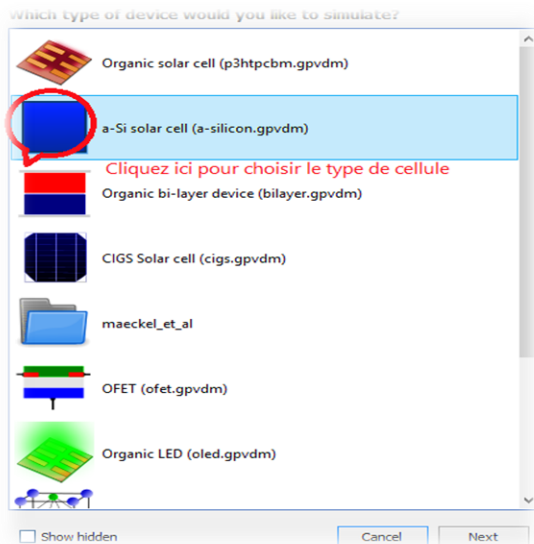
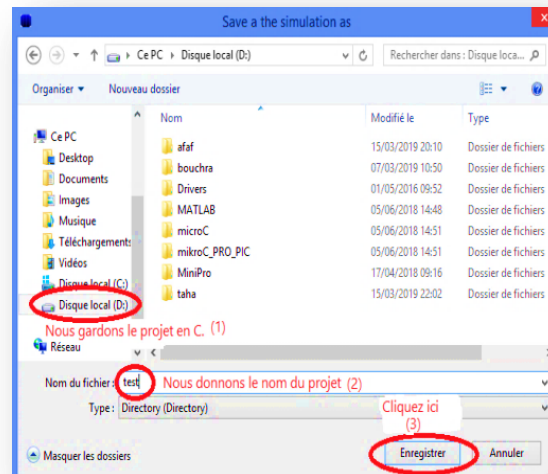


Figure II.1 : créer un nouveau modèle.

La deuxième étape est le choix de type de dispositif. Une liste des dispositifs est disponible (Figure.II.2). Après ça, nous créons un dossier pour sauvegarder les fichiers des données et les résultats de la simulation.



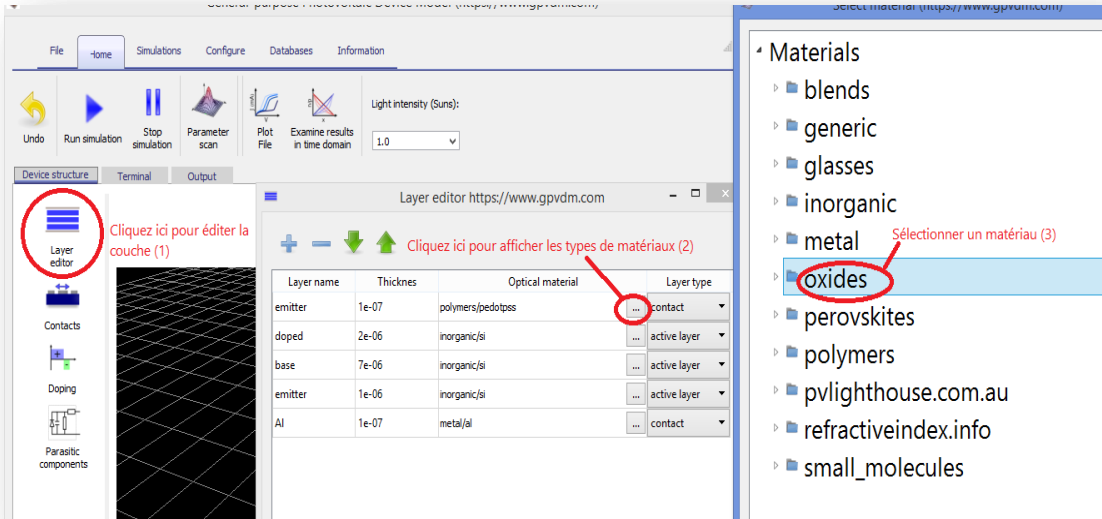
(A)



(B)

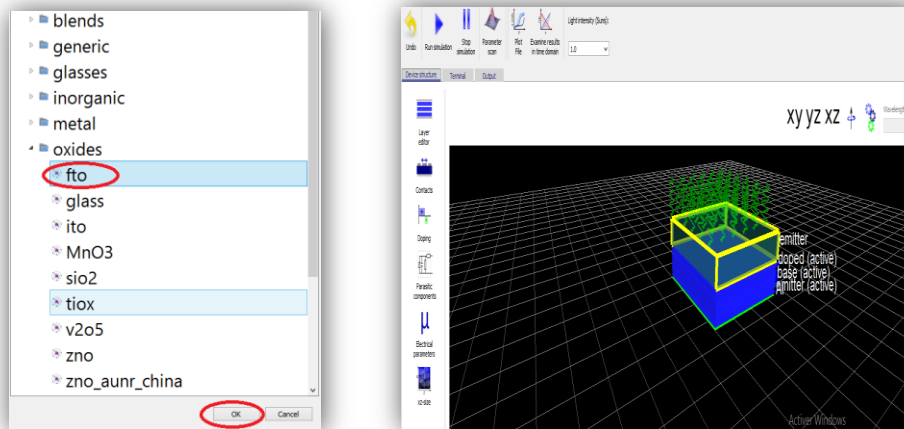
Figure.II.2 (A) le matériau de base de la cellule et (B) Où sauvegarder les données.

Les paramètres décrivant la structure de la cellule tels que le nombre de différents couches ainsi que le type de matériau constituant la couche peuvent être sélectionnés et réglés selon nos besoins (Figure.II.3).



**Figure. II.3 :** L'éditeur de couche et les types des matériaux à droite.

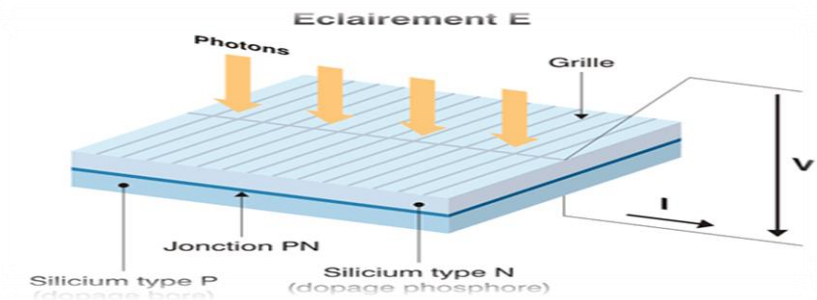
L'éditeur de couche utilisé pour changer l'épaisseurs, le type et le matériau utilisé de couches dans une cellule.



**Figure. II.4 :** La fenêtre principale de simulation de GPVDM.

### II.3 La caractéristique courant-tension I(V)

La modélisation de l'unité de base du système de conversion photovoltaïque, c'est-à-dire la cellule solaire, est présentée par sa caractéristique I-V. La principale caractéristique d'une cellule solaire est celle de la variation de la densité de courant débité par la cellule en fonction de la tension à ses bornes, communément appelée caractéristique I(V). A partir de cette caractéristique l'utilisateur peut déduire aisément la densité de courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, ainsi que la puissance maximale qui peut être délivrée par la cellule.



**Figure II.5 :** Le courant et la tension dans une cellule photovoltaïque [17].

Lorsqu'une cellule photovoltaïque est exposée à une lumière particulière, et sous une tension externe, elle présente une courbe courant-tension (I-V) qui est identique à celle d'une diode.

Selon la figure (I.2) dans première chapitre et en plus de l'application des lois sur ce circuit nous extrayons les équations suivantes jusqu'à ce que nous obtenions le courant en fonction de la tension.

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{qV^*}{AKT}} - 1 \right) \tag{II.1}$$

Suivant le schéma et la loi de Kirchhoff

$$I = -I_D - I_{Rp} + I_{ph} \tag{II.2}$$

La loi de tension de Kirchhoff et la loi d'Ohm donnent

$$V^* = V + IR_s \quad (II.3)$$

Les équations (II.1) et (II.3) donnent

$$I_D = I_s \left( e^{\left(\frac{qV^*}{AKT}\right)} - 1 \right) = I_s \left( e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{AKT}\right)} - 1 \right) \quad (II.4)$$

Selon La loi d'Ohm et l'équation (II.3)

$$I_{Rp} = \frac{V^*}{R_{sh}} = \frac{V + IR_{sh}}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

Remplacer (II.4) et (II.5) dans (II.2) donc nous obtenons l'équation (II.6) caractéristique de la cellule solaire

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{AKT}\right)} - 1 \right) - \frac{V + IR_{sh}}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Avec :

K : Constante de Boltzmann ( $J.K^{-1}$ ).

T : Température absolue (K).

A : Le facteur de qualité de la diode.

$I_s$  : Le courant de saturation (A).

$I_{ph}$  : Le courant généré par l'éclairement (A).

$R_{sh}$  : La résistance parallèle ( $\Omega$ ).

$R_s$  : La résistance série ( $\Omega$ ).

### II.3.1 Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres, extraits de la caractéristique courant-tension figure II.7

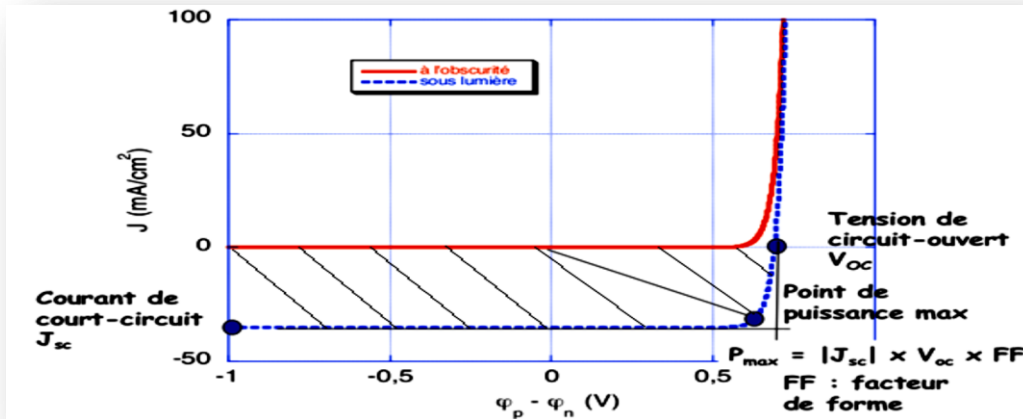


Figure.II.6 : La caractéristique I(V) sous éclairement et sans éclairement.

#### II.3.1.1 Le point de puissance maximal MPP

Le point de puissance maximal MPP (en anglais : maximal power point) est obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$  et  $I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ ).

La puissance maximale fournie par la cellule s'écrit :

$$P_{max} = (V \cdot I)_{mpp} \quad (II.7)$$

#### II.3.1.2 Le courant de court-circuit $I_{CC}$

Le courant de court-circuit  $I_{CC}$  qui est par définition le courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension à ses bornes est alors nulle) peut être exprimé par la relation suivante :

$$I_{CC} = qG(L_n + L_p) \quad (II.8)$$

G est le taux de génération des paires électron-trous.  $L_n$  et  $L_p$  sont les longueurs de diffusion des électrons et trous. Le courant  $I_{CC}$  caractérise donc la quantité des paires électrons trous créés (G) qui traverse la jonction sans être recombinées.

### II.3.1.3 La tension en circuit ouvert $V_{co}$

La tension en circuit ouvert notée  $V_{co}$  représente la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ( $P = U \times I$ ) est nulle et  $V_{co}$  s'écrit :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{CC}}{I_s} + 1\right) \quad (II.9)$$

### II.3.1.4 La puissance maximale idéale

La puissance maximale idéale est donc:

$$P_{\max \text{ idéale}} = V_{co} * I_{CC} \quad (II.10)$$

### II.3.1.5 Le rendement d'une cellule ( $\eta$ )

Le rendement est défini comme une grandeur sans dimension qui caractérise l'efficacité d'une transformation, physique ou autre grandeur. En physique, cette grandeur caractérise généralement la conversion d'une forme d'énergie en une autre.

Le rendement énergétique d'une cellule solaire est défini par le rapport entre la puissance maximale et la puissance lumineuse incidente.

Le rendement d'une cellule comme suivent :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{(P_L S)} 100\% = \frac{FF V_{co} I_{CC}}{P_L} \quad (II.11)$$

$P_{\max}$  : La puissance maximale (W)

$P_L$  : Puissance lumineuse par unité de surface (W/cm<sup>2</sup>).

S : La surface active de la cellule (cm<sup>2</sup>).

FF : Le Facteur de forme.



### II.3.2 Paramètres influents sur le comportement électrique d'une cellule PV

Il existe plusieurs paramètres influent sur la cellule PV les plus importants sont :

#### II.3.2.1 La résistance série $R_s$

La résistance série  $R_s$  tient compte de la mobilité des porteurs de charges dans le matériau, qui est régie par les impuretés et les barrières telles que la zone de charge d'espace résultante d'une jonction P-N ou d'une hétérojonction. Elle dépend donc de l'épaisseur du matériau utilisé. Comme le risque de ralentissement des porteurs de charge augmentant avec l'augmentation du parcours vers les électrodes, cette résistance doit donc être la plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en diminuant la résistivité du matériau utilisé.

La résistance série ( $R_s$ ) est définie comme :

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{A K T}{I_s e^{((V I R_s)/(A K T))}} \quad (II.12)$$

En circuit ouvert, la tension est  $V = V_{co}$  et l'équation précédente s'écrit :

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{co}} - \frac{A K T}{I_s e^{((V_{co})/(A k T))}} \quad (II.13)$$

$\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{co}}$  : Est la pente de la courbe  $I(V)$  dans le point  $V = V_{co}$ .

#### II.3.2.2 La résistance shunt $R_{sh}$

La résistance parallèle, dite « Shunt » traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette résistance devra être la plus élevée que possible. D'autre part, la résistance Shunt ( $R_{sh}$ ) est l'inverse de la pente de la courbe courant-tension à un point. En simulation, la résistance parallèle simule les pertes en

courant de la cellule solaire. Notons que dans le cas idéal,  $R_s$  est égale à zéro tandis que  $R_{sh}$  tend vers l'infini.

### II.3.2.3 Le courant de saturation $I_s$

Le courant de saturation  $I_s$  est une grandeur propre à la jonction. L'effet de sa variation sur la courbe I-V est comme suivant ; une diminution du courant de saturation conduit à une légère augmentation de la tension du circuit ouvert, alors que l'augmentation du courant de saturation provoque une diminution de la tension du circuit ouvert. Par contre, dans les deux cas, le courant de court-circuit n'est pas affecté.

### II.3.2.4 L'éclairement L

Comme le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur la conversion de l'énergie lumineuse à une énergie électrique à travers un processus de photogénération des porteurs de charge. Le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement, par contre la tension de circuit ouvert n'est pas très dégradée lorsque l'éclairement baisse.

## II.4 Recombinaison

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu par plusieurs mécanismes. Lors d'une génération des paires électrons-trous, il faut aussi considérer le processus inverse qui est la recombinaison des paires électrons-trous. D'autre part, ce processus a un effet important sur le fonctionnement des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Les taux de recombinaison  $R_n$  (pour les électrons) et  $R_p$  (pour les trous) représentent donc la probabilité de recombinaison de ces porteurs de charge et ils sont donnés par :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (\text{II.14})$$

$\Delta n, p = n, p - n_e, p_e$  : La densité des porteurs générés.

$n_e, p_e$  : La densité des porteurs à l'équilibre.

$\tau_n, \tau_p$  : La durée de vie de ces porteurs.

## II.5 La diffusion

Après la génération d'une paire électron-trou, généralement les deux porteurs de charge se séparent et chaque type se déplace indépendamment de l'autre dans le matériau. Nous parlerons dans ce cas de la diffusion des porteurs de charge. Plusieurs mécanismes de diffusion peuvent opérer simultanément. L'impact d'un mécanisme de diffusion sur la mobilité globale à l'échelle du matériau peut s'additionner à celui des autres mécanismes où  $\mu_i$  représente la mobilité limitée par chacun des mécanismes de diffusion (interactions avec le réseau, impuretés ionisées, ...).

D'une manière générale, la mobilité des électrons est plus élevée que celle des trous (la mobilité des premiers étant supérieure d'un facteur 2 à 3 par rapport à celle des seconds à T ambiante). Cela est lié au fait que le mouvement d'un trou est indirect, et passe par le déplacement d'un grand nombre d'électrons.

Dans le silicium (Si) par exemple, les principaux mécanismes limitant la diffusion des porteurs de charge sont :

- ❖ L'interaction avec le réseau cristallin (diffusion par les phonons)
- ❖ L'interaction avec les impuretés ionisées
- ❖ La diffusion par les défauts cristallins

La valeur de la tension de diffusion  $V_d$  peut s'exprimer en fonction des densités de dopants dans l'émetteur et la base du matériau par la relation suivante:

$$V_d = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)\right) = \left(\frac{E_g}{q}\right) + \ln\left(\frac{N_a N_d}{N_c N_v}\right) \quad (\text{II.15})$$

Avec :

K : La constante de Boltzmann

T : La température (en K)

q : La charge élémentaire

$E_g$  : L'énergie de gap du matériau (par exemple, pour le silicium,  $E_g = 1,12$  eV)

$N_a$  : La densité de dopants de type accepteurs ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_d$  : La densité de dopants de type donneurs ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_c$  : La densité d'états dans la bande de conduction ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_v$  : La densité d'états dans la bande de valence ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_i$  : La concentration intrinsèque de porteurs ( $\text{cm}^{-3}$ ).

Si les densités de dopage étaient égales aux densités d'états du matériau, la tension de diffusion de la jonction serait égale à  $E_g/q$  (1120 mV dans le cas du silicium). Mais les recombinaisons de porteurs et la diminution de la valeur de  $E_g$  pour les matériaux très dopés à cause du phénomène du « Band Gap Narrowing » [18] limitent la valeur de  $V_d$ .

## II.6 La densité de courant des trous et électrons

### II.6.1 Courant de diffusion (porteurs minoritaires)

Les courants de trous dans la région de type n et d'électrons dans la région de type p sont des courants de diffusion. Ils sont par conséquent donnés par :

$$J_{d,p} = -qD_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (\text{II.16.a})$$

$$J_{d,n} = qD_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (\text{II.16.b})$$

### II.6.2 Le courant de conduction

La densité de courant de conduction créé sous l'action d'un champ électrique pour chaque type de porteurs:

$$J_{c,n} = q\mu_n n E \quad (\text{II.17})$$

$$J_{c,p} = q\mu_p p E \quad (\text{II.18})$$

#### II.6.3.a Près de la zone neutre de type N

La densité de courant des trous est

$$J_p = J_{c,p} + J_{d,p} \quad (\text{II.19})$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (\text{II.20})$$

$E = 0$

$$J_p = -qD_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\Delta p = p_n - p_{n0}$$

L'équation de continuité est :

$$\frac{1}{q} \left( \frac{dJ_p}{dx} \right) - \left( \frac{\Delta p}{\tau_p} \right) + G = 0 \quad (\text{II.22})$$

### II.6.3.b Près de la zone neutre de type P

L'équation de densité de courant des électrons est donnée par :

$$J_n = J_{c,n} + J_{d,n} \quad (\text{II.23})$$

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \left( \frac{d\Delta n}{dx} \right) \quad (\text{II.24})$$

La densité de courant des électrons devient uniquement du courant de diffusion puisque le champ électrique est nul dans cette zone.

$$J_n = qD_n \left( \frac{d\Delta n}{dx} \right) \quad (\text{II.25})$$

Avec :  $\Delta n = n_p - n_{p0}$

L'équation de continuité s'applique donc aux porteurs minoritaires (régime de faible injection) dont les durées de vie sont déterminées par les mécanismes de recombinaison.

L'équation de continuité est:

$$\frac{1}{q} \left( \frac{dJ_n}{dx} \right) - \left( \frac{\Delta n}{\tau_n} \right) + G = 0 \quad (\text{II.26})$$

$q$  : Charge élémentaire  $1,602 \times 10^{-19}$  C

$E$  : Le champ électrique

$D_n$  : La constante de diffusion des trous dans le semiconducteur (N).

$D_p$  : La constante de diffusion des électrons dans le semiconducteur (P).

$\mu_n$  : La mobilité des trous dans le semiconducteur (N).

$\mu_p$  : La mobilité des électrons dans le semiconducteur (P).

p et n : Les densités de porteurs de charge.

## II.7 Le photo-courant ( $I_{ph}$ )

Le photo-courant est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type P, le courant de photo-génération dans la zone de charge d'espace et le courant de diffusion des photo-trous de la région de type N. On obtient, le photo-courant total en ajoutant ces trois composantes calculées en un même point  $x_j$  [19, 20]. Si une génération de photo-courant prend origine, à l'intérieur de la région de déplétion, le champ électrique dans cette région est assez élevé pour que les porteurs photo-générés soient accélérés à l'extérieur des zones de charge d'espace avant qu'ils se recombinent.

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} + G = 0 \quad (II.27)$$

$$J_n = -e \int G dx \quad (II.28)$$

$$\nabla J_n = -q (G - R_n) \quad (II.29)$$

$$\nabla J_p = -q (G - R_p) \quad (II.30)$$

$J_n$  et  $J_p$  sont les densités de courant des électrons et des trous, respectivement, tandis que G et R sont le taux de génération et le taux de recombinaison.

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous expliquons comment utiliser GPVDM pour simuler des cellules photovoltaïques ainsi que pour modéliser des cellules solaires et en extraire les paramètres qui les caractérisent.

### III.1 Introduction

Aujourd'hui, nous sommes intéressés par la production de grandes quantités d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque pour répondre aux besoins des consommateurs à cet égard. Les scientifiques ont travaillé dans ce domaine pour modifier les cellules solaires afin d'améliorer le rendement de panneau solaire.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet d'utilisation d'une couche TCO sur le rendement des cellules photovoltaïques de type N-I-P à l'aide du simulateur GPVDM. Nous avons testé le cas des cellules solaires à base de Si polycristalline et amorphe. Nous avons concentré nos travaux sur la simulation de cellules solaires à base Si (amorphe et polycristallin) avec des structures de type TCO/Si et cellule hétérojonction ITO/ZnO/Si(P-I-N). L'objectif est l'optimisation des paramètres affectant le rendement de ces cellules afin d'améliorer leur rendement. Pour cela, nous avons considéré dans notre étude les points suivants:

- Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur  $D$  de la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO).
- Effet des valeurs des résistances en série ( $R_s$ ) et parallèles ( $R_{sh}$ ).
- Effet de dopage ainsi que de l'éclairement  $L$ .

Enfin, nous devons mentionner que l'effet des défauts et des états de surfaces N a pas été inclus dans cette étude.

### III.2 La cellule amorphe (N-I-P)

Dans cette partie, nous utilisons le simulateur GPVDM pour étudier les propriétés et les caractéristiques de la cellule à base de Si amorphe.

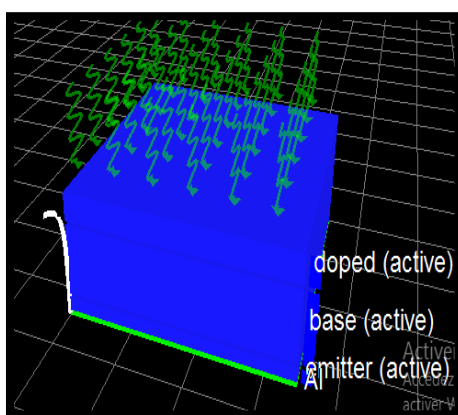


Figure III.1 : La structure de la cellule a-Si .

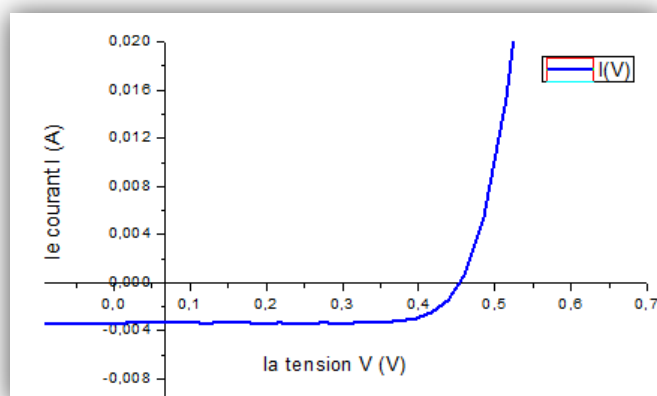


Figure III.2 : Caractéristique I-V d'une cellule silicium amorphe.

La figure III.2 montre la caractéristique  $I(V)$  de la cellule N-I-P à base de Si amorphe. Cette cellule est caractérisée par un rendement de 9.921145 %. Cette valeur est un peu faible par rapport au cas de Si cristallin à cause des défauts existants dans le silicium amorphe comme (impuretés métalliques et la recombinaison ...etc.) et aussi la faible absorption de ce matériau (bande interdite supérieure à celle de Si cristallin). Dans le but d'améliorer le rendement de ce type des cellules, nous avons effectué une passivation, c.-à-d. ajoutons une couche d'oxyde (par exemple le ZnO, ITO, FTO pour Si) en surface pour limiter les recombinaisons en surface et combler les liaisons cassées (en surface) lors de la découpe du semi-conducteur.

### III.2.1 Effet de la nature et l'épaisseur de la couche TCO sur la cellule a-Si (N-I-P)

Les technologies classiques de piégeage de la lumière pour les cellules photovoltaïques de silicium utilisent des couches antireflets en face avant qui sont généralement combinées à des texturations aux dimensions caractéristiques. Ces techniques permettent à la fois de diminuer la réflexion du rayonnement incident sur la cellule par effet d'interférences.

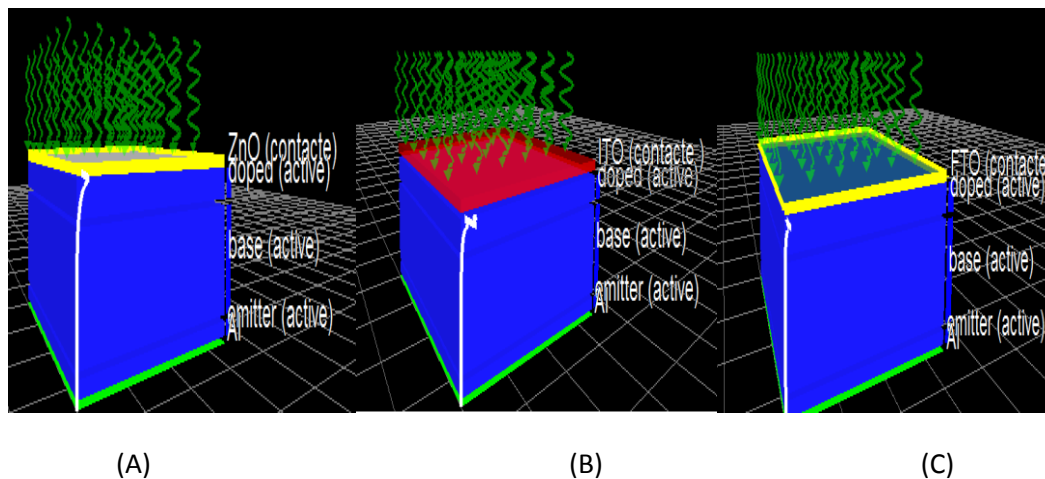
Une deuxième approche qui est largement utilisée pour réduire la réflexion optique en surface consiste à utiliser une couche TCO. En effet, l'utilisation d'une couche TCO assure une faible réflexion optique en surface et en même temps cette couche peut être remplacée par le contact métallique car elle peut être utilisée comme contact ohmique.

Dans notre travail, nous avons construit une cellule solaire de structure N-I-P avec une couche TCO en surface avant. De plus, trois matériaux différents (ZnO, ITO, FTO) ont été testés comme matériaux. La cellule simulée est composée d'un empilement de couches déposées l'ordre suivant figure III.3 :

- La couche oxyde transparent conducteur TCO (ZnO, ITO, FTO), utilisée comme contact avant est déposée sur la jonction N-I-P (a-Si).
- Une couche a-Si(N) d'épaisseur  $D = 7 \mu\text{m}$
- Une couche a-Si(I) d'épaisseur  $D = 2 \mu\text{m}$
- Une couche a-Si(P) d'épaisseur  $D = 1 \mu\text{m}$

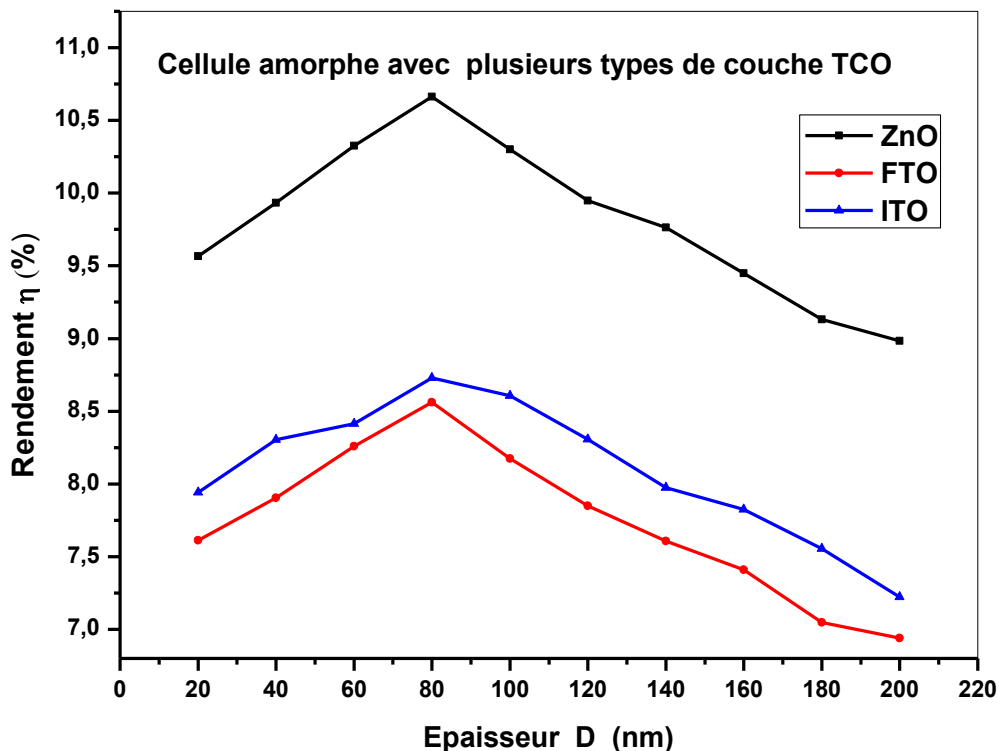
Les structures sont données dans la figure III.3 ci-dessous.





**Figure III.3 :** La structure de cellule amorphe avec la couche contacte (A) ZnO, (B) ITO, (C) FTO.

La figure III.4 montre la variation de rendement  $\eta$  de la cellule amorphe pour différents types et différentes épaisseurs de la couche TCO.



**Figure III.4 :** la variation de rendement de la cellule a-Si pour chaque structure en fonction de l'épaisseur de la couche TCO.

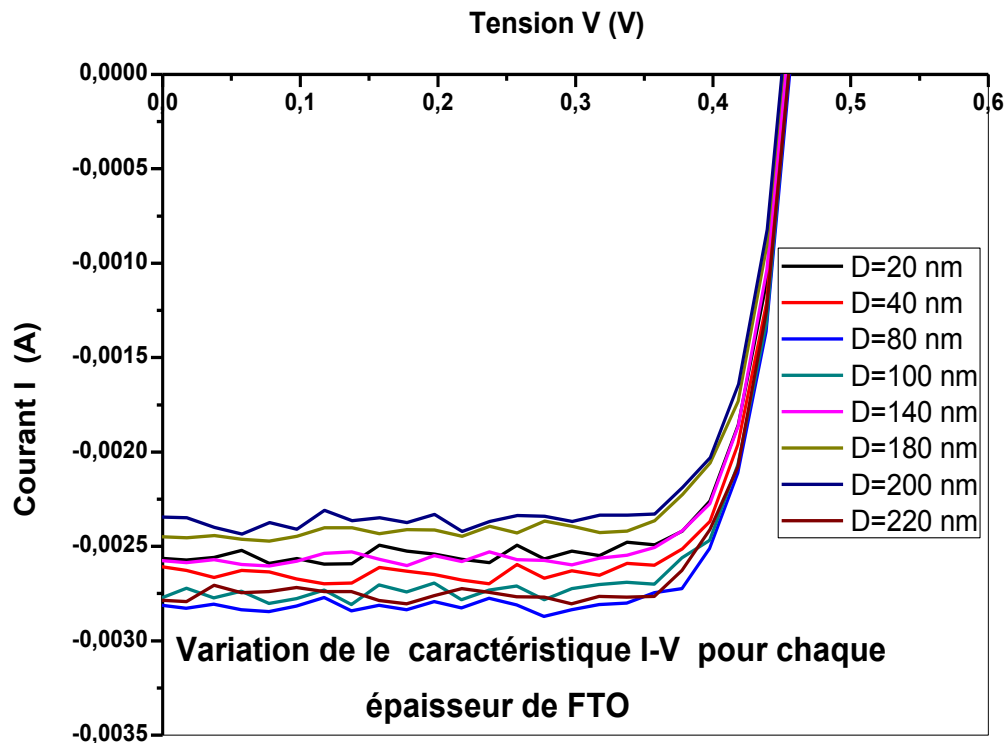
Comme nous pouvons le voir sur cette figure, le rendement de la cellule est très sensible au type de matériau constituant la couche TCO ainsi qu'à son épaisseur. Nos résultats montrent que pour les trois cellules TCO/N-I-P, le meilleur rendement est obtenu pour une épaisseur de la couche TCO entre 80 et 100 nm. D'autre part, Nos résultats montrent que les performances de la cellule avec une couche ZnO sont meilleurs que celle avec une couche ITO ou FTO. Une valeur du rendement de 10.67% est obtenue lorsque l'épaisseur D de la couche ZnO est autour de 80 nm. Comparée au cas de la cellule sans couche TCO, cette valeur représente une amélioration d'environ 7% du rendement. Lorsque l'épaisseur est inférieure ou supérieure à la gamme mentionnée précédemment, nous remarquons une réduction significative du rendement. L'amélioration des performances de la cellule a-Si (N-I-P) après l'addition d'une couche ZnO comme couche TCO est due aux propriétés électroniques et optiques de ce matériau. L'oxyde de zinc est un matériau transparent dont l'indice de réfraction sous la forme massive est égal à 2 (Sous forme de couche mince, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration) [21]. La structure électronique de bandes montre que le ZnO est un semi-conducteur à gap direct, le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés au point. Sa largeur de bande interdite fondamentale  $E_b$  est d'environ 3,33 eV à température ambiante. Cette valeur correspond à l'énergie nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction [22]. De plus, le ZnO lorsqu'il est exposé à un plasma d'hydrogène est beaucoup plus stable que le FTO et l'ITO.

### III.2.1.1 Caractéristique I(V) pour chaque structure

Pour déterminer le rendement et les performances de cellules TCO/a-Si (N-I-P), nous avons fait une série de simulations pour obtenir la caractéristique courant-tension pour chaque type de la couche TCO et pour des valeurs de l'épaisseur D allons de 20 nm jusqu'à 220 nm.

### III.2.1.1.a Caractéristique courant-tension de la cellule FTO/a-Si

Afin de connaître la meilleure épaisseur nous devons mener un ensemble de tests. La figure III.5 montre l'influence de l'épaisseur FTO sur les caractéristiques  $I=f(V)$  d'une cellule FTO/ Si (N-I-P).

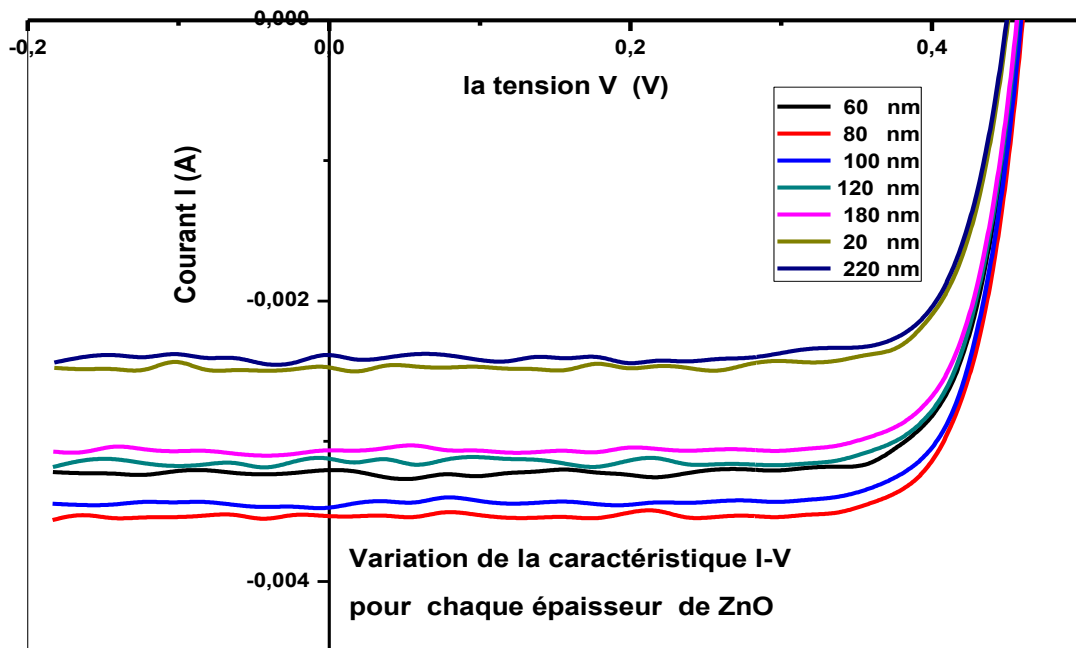


**Figure III.5** : la variation de la caractéristique  $I(V)$  pour chaque épaisseur de FTO.

Comme nous pouvons le voir sur cette figure, la valeur du courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) est très sensible à l'épaisseur  $D$  de la couche FTO tandis que la valeur de la tension de circuit-ouvert ( $V_{OC}$ ) est légèrement affectée par la variation de l'épaisseur  $D$  de la couche FTO. La valeur la plus élevée du courant  $I_{CC}$  est obtenus pour une épaisseur  $D=80$  nm.

### III.2.1.1 .b Caractéristique courant-tension de la cellule ZnO/a-Si

Dans cette partie, on va étudier l'impact de l'épaisseur de la couche antireflet de type ZnO sur les caractéristiques d'une cellule solaire a-Si (N-I-P) . Pour réaliser cette objective, la caractéristique  $I(V)$  de celle-ci est changeons des épaisseurs de la couche ZnO entre 20 nm et 200 nm les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III.6 .



**Figure III.6 :** Evolution de la caractéristique I-V de la structure ZnO/Si pour différent épaisseur de la couche de ZnO.

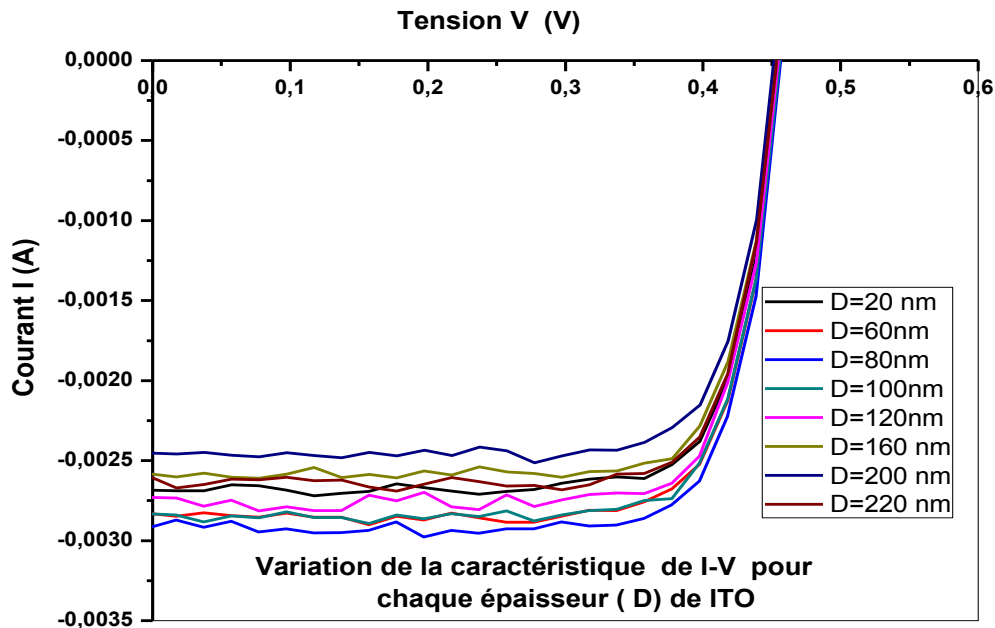
Comme dans le cas de la couche FTO, nous pouvons voir clairement que la caractéristique I(V) de cette cellule dépend fortement de l'épaisseur de la couche ZnO. Après des simulations, ces résultats ont été représentés dans la figure III.6

La valeur du courant  $I_{cc}$  augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche ZnO lorsque D est inférieur à 100 nm, puis elle diminue lorsque D est supérieur à 100 nm. La meilleure valeur de  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  est obtenu pour une épaisseur d'environ 80 nm.

### III.2.1.1.c Caractéristique courant-tension de la cellule ITO/a-Si

Sous un éclairage donné toute cellule photovoltaïque est caractéristique par un courbe courant –tension représentant l'ensemble des configurations électrique que peut prendre la cellule .

Notons ici que nous avons étudié la variation du caractéristique courant-tension de la cellule amorphe en fonction de l'épaisseur de la couche de ITO.



**Figure III.7 :** Evolution de la caractéristique I-V de la structure ITO/Si pour différent épaisseur de la couche ITO.

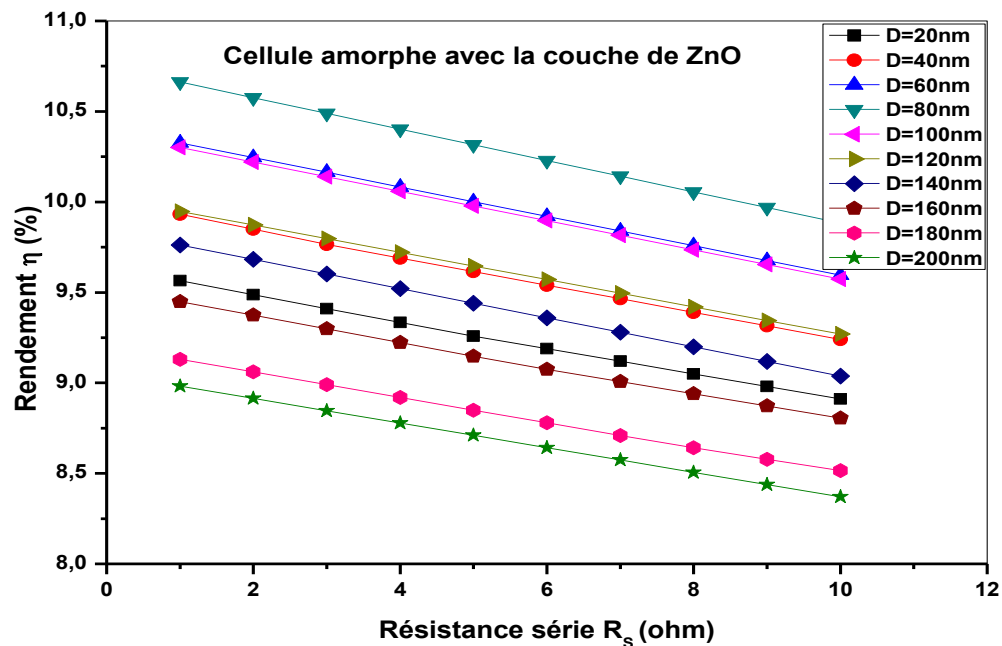
La figure III.7 montre l'influence de l'épaisseur de la couche ITO sur les caractéristiques  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet du changement de l'épaisseur la couche ITO d'une cellule solaire sur ces caractéristiques afin de tirer des informations conséquentes. L'effet d'une couche ITO sur la caractéristique  $I(V)$  de notre cellule solaire est identique à celui de la couche FTO. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, la valeur du courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) est très sensible à l'épaisseur  $D$  de la couche ITO tandis que la valeur de la tension de circuit-ouvert ( $V_{OC}$ ) est légèrement affectée par la variation de l'épaisseur  $D$  de la couche ITO. La valeur la plus élevée du courant  $I_{CC}$  est obtenus pour une épaisseur  $D=80$  nm.

### III.2.2 La cellule amorphe avec la couche de ZnO

D'après les résultats de la section précédente, ZnO donne le meilleur rendement. Pour ce raison, on va limiter notre étude aux propriétés de la cellule ZnO/ Si (N-I-P). Dans cette partie, on va étudier les effets d'autres paramètres sur les performances de la cellule amorphe avec une couche antireflet de ZnO.

### III.2.2.1 L'effet de la résistance série $R_s$ sur le rendement de cellule ZnO/a-Si

La résistance série  $R_s$  est un paramètre très important dans l'étude des performances d'une cellule photovoltaïque. La résistance  $R_s$  est due à la résistivité des différentes couches de la cellule: émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur).



**Figure III.8 :** La variation de rendement de la cellule amorphe en fonction de de la résistance série de la cellule et l'épaisseur de la couche ZnO.

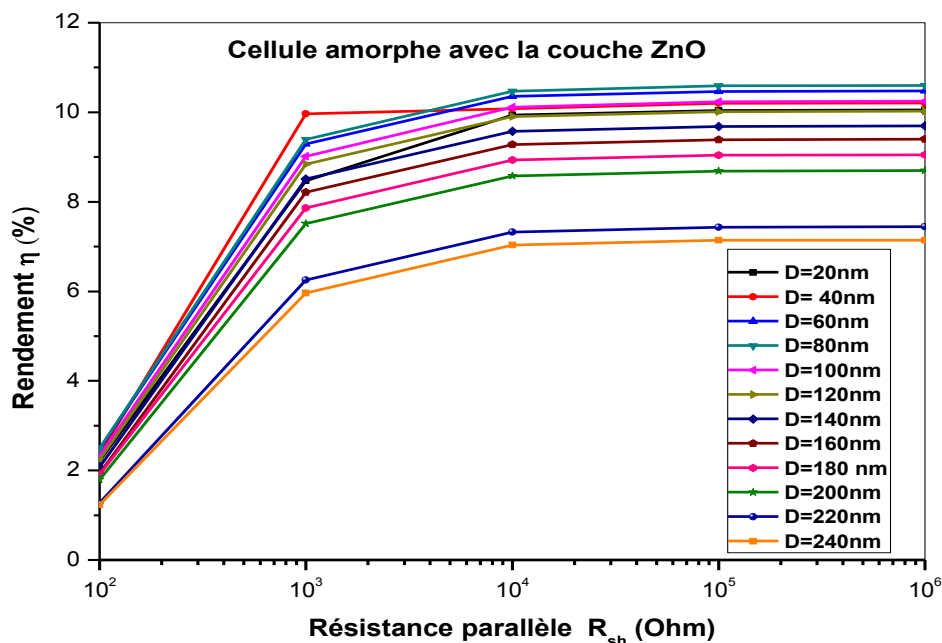
La figure III.8 montre La variation de rendement d'une cellule ZnO/Si (N-I-P) à base de Si amorphe en fonction de la valeur de la résistance série de la cellule pour différente épaisseur de la couche ZnO. Nous pouvons voir clairement que le rendement de la cellule solaire diminue linéairement avec l'augmentation de la valeur de la résistance série  $R_s$ . Lorsque  $R_s$  varie de 1 à 10Ω, le rendement de la cellule diminue d'environ 0.6%. D'autre part, nous remarquons qu'une valeur de la résistance  $R_s=1\Omega$  et une épaisseur de la couche ZnO de 80nm donnent le meilleur le rendement (10.67%).

Une résistance série  $R_s$  modélise les pertes par effet joule, qui sont dues à une série de résistances causée par la résistivité du matériau semiconducteur, par les résistances de contact des électrodes et par la résistance de la grille collectrice. La valeur

habituelle de cette résistance est très petite. De plus, la résistance série contrôle la forme de la caractéristique de rendement comme elle reflète aussi d'une manière directe la qualité de fabrication des cellules PV.

### III.2.2.2 L'effet de la résistance parallèle sur le rendement de cellule ZnO/a-Si

Comme la résistance série, la résistance parallèle est un élément très important dans l'étude d'une cellule photovoltaïque. Donc, il est très important d'étudier l'effet de  $R_{sh}$  sur les performances de notre cellule. Pour cela, nous avons réalisé une série de simulations pour mettre en évidence l'effet de la résistance  $R_{sh}$  sur le rendement de la cellule.



**Figure III.9** : La variation de rendement de la cellule amorphe en fonction de la résistance parallèle et l'épaisseur de la couche ZnO,  $\eta=f(R_{sh})$ .

La figure III.9 montre la variation de rendement  $\eta$  de la cellule amorphe en fonction de la résistance parallèle  $R_{sh}$  pour différentes épaisseurs  $D$  de la couche ZnO. D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que la valeur de rendement augmente avec la valeur de résistance parallèle. Nous avons noté une augmentation significative de rendement de la cellule pour des valeurs de la résistance  $R_{sh}$  entre  $10^2$  et  $10^4\Omega$ . Pour des valeurs de  $R_{sh}$  supérieures à  $10^4\Omega$ , le rendement est presque constant. Le meilleur

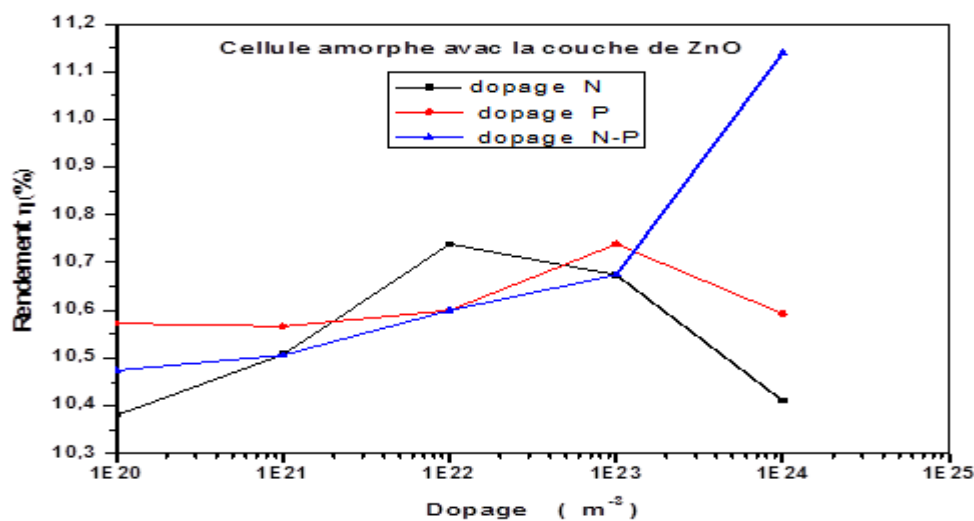
rendement de la cellule a-Si (N-I-P ) avec une couche ZnO est obtenu pour une valeur de la résistance shunt  $R_{sh}$  de  $10^6 \Omega$  et une épaisseur de la couche ZnO de 80 nm.

La résistance parallèle  $R_{sh}$  représente les pertes internes, ou le courant de fuite à travers la diode. En d'autres termes, il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photo-courant, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension appliquée.

A cette première limitation, nous pouvons ajouter également l'influence de la résistance série et de la résistance parallèle qui vont consommer une partie du courant photogénéré et donc affecter le facteur de forme. La résistance série est due à la résistivité du matériau, à la résistance de contact entre le silicium et les connexions métalliques et à la résistance des lignes de connexion. La résistance parallèle quant à elle représente les courants de fuite dans la cellule, les fuites par les bords de la cellule photovoltaïque, les fuites locales au niveau de la jonction.

### III.2.2.1.3 L'effet de dopage le silicium

Maintenant nous allons étudier l'effet du dopage sur le rendement de notre cellule solaire. Dans cette section, la valeur de l'épaisseur de la couche a-Si (N) est prise égale à  $7\mu\text{m}$  tandis que l'épaisseur de la couche a-Si(P) est fixée égale à  $1\mu\text{m}$ . Pour mettre en évidence l'effet de dopage sur les performances de notre cellule solaire, des concentrations de dopants entre  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  et  $10^{24} \text{ m}^{-3}$  ont été considéré et les résultats obtenus sont illustrés sur la Figure III.10.



**Figure III.10 :** La variation du rendement de la cellule amorphe N -I- P en fonction de dopage de la région N, la région P et les deux simultanément.

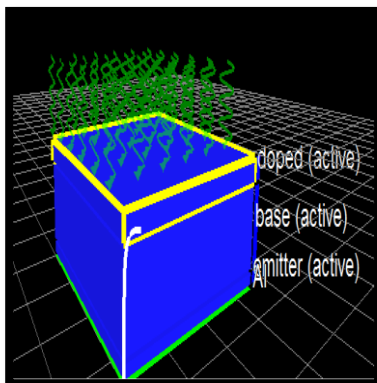


Notons ici que nous avons étudié la variation du rendement de la cellule amorphe N-I-P en fonction de dopage de la région N seule, la région P seule, et les deux régions simultanément. Comme nous pouvons le voir, le rendement de la cellule  $\eta$  augmente significativement lorsque le dopage de la région N augmente de  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  à  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ . Pour des concentrations supérieures à  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ , le rendement diminue et il est inversement proportionnel à la concentration des dopants. Un comportement similaire peut être observé dans le cas du dopage de la région P seulement la concentration critique dans ce cas est  $10^{23} \text{ m}^{-3}$ .

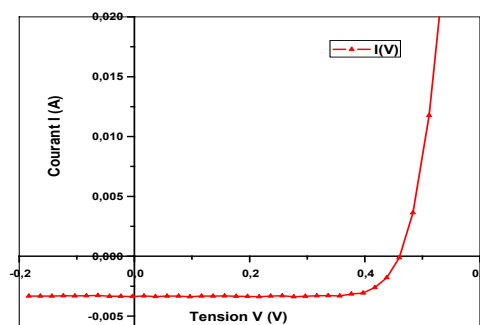
D'autre part, nos résultats montrent qu'un meilleur rendement peut être obtenu si les 2 régions N et P formant la structure N-I-P sont dopés simultanément avec la même concentration des dopants. Dans ce cas, nous pouvons voir clairement que le rendement de la cellule augmente avec la croissance de la concentration des dopants. Cela peut être expliqué comme suivant : lorsque la concentration des dopants augmente, la distance inter-dopant diminue, ainsi le recouvrement d'orbitales atomiques entre dopants est favorisé. Ce recouvrement d'orbitales favorise le saut de porteurs entre atomes dopants ionisés. Ainsi, la conduction par le mécanisme appelé "hopping" semble être activé avec un seuil critique de dopage.

### III.3 La cellule polycristallin (N-I-P)

Dans cette partie nous utilisons le simulateur GPVDM pour étudier les propriétés et les caractéristiques d'une cellule N-I-P à base de Si polycristallin. La structure de la cellule est similaire à celle déjà étudiée dans la section précédente. La seule différence est l'utilisation de Si poly à la place de a-Si.



**Figure III.11** : la structure de la cellule de Si-poly.



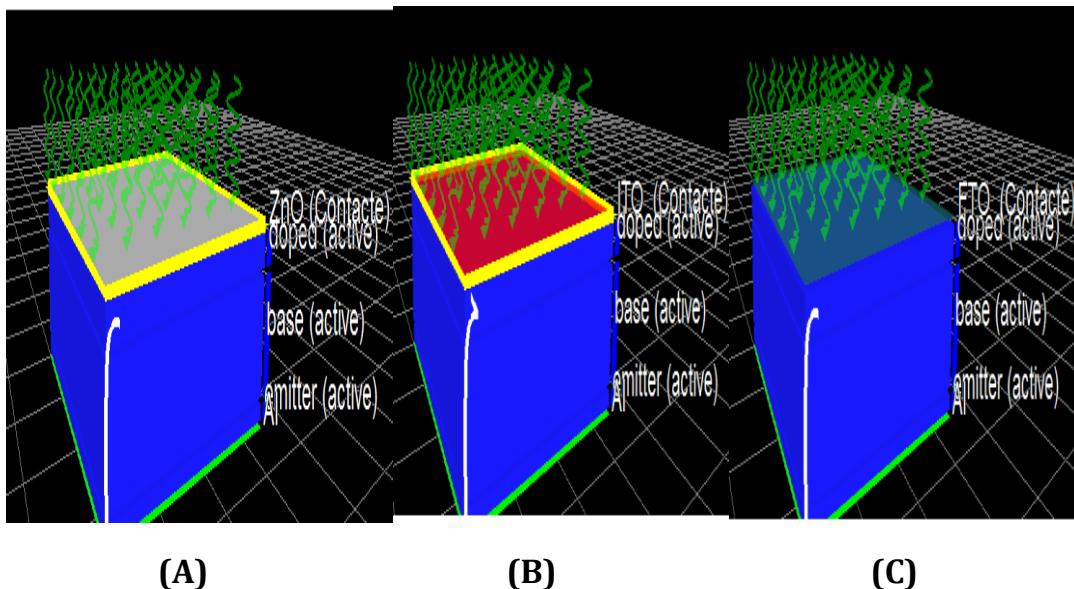
**Figure III.12** : la caractéristique I(V) de la cellule Si-poly.

Le rendement de la cellule à base de Si polycristallin est 10.176% ce qui est mieux que celui de la cellule à base de Si amorphe.

### III.3.2 Effet de la nature et l'épaisseur de la couche TCO le rendement de la cellule de p-Si (N-I-P)

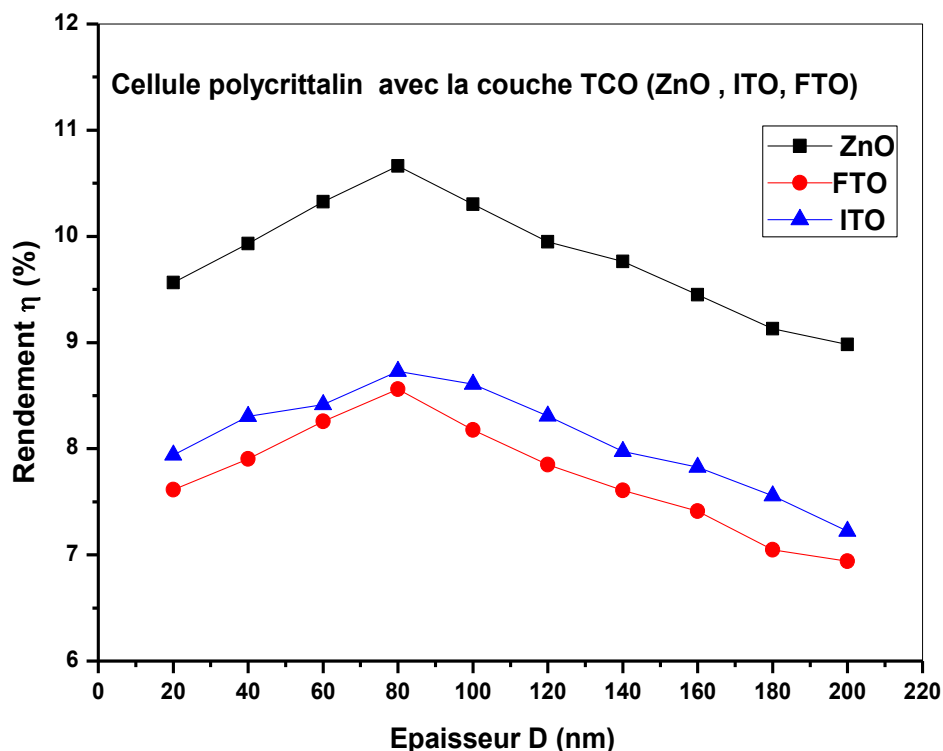
La cellule à base de Si-poly est composée d'un empilement de couches déposées suivant l'ordre suivant Figure III.13 :

- La couche oxyde transparent conducteur TCO (ZnO, ITO, FTO), utilisée comme contact avant est déposée sur la jonction P-I-N (Si-poly).
- Une couche de Si-poly de type (N) d'épaisseur  $D=7\mu\text{m}$
- Une couche de Si-poly de type (i) d'épaisseur  $D=2\mu\text{m}$
- Une couche de Si-poly de type (P) d'épaisseur  $D=1\mu\text{m}$



**Figure III.13** : La structure de la cellule à base de Si-poly avec couche de : (A) ZnO,(B) ITO et (C)FTO.

Nous avons utilisé le simulateur GPVDM pour étudier de l'effet de la présence d'une couche TCO et l'effet de l'épaisseur de cette couche sur le rendement de la cellule. Pour ce faire, nous allons changer la valeur de la couche TCO de 20 à 200 nm.



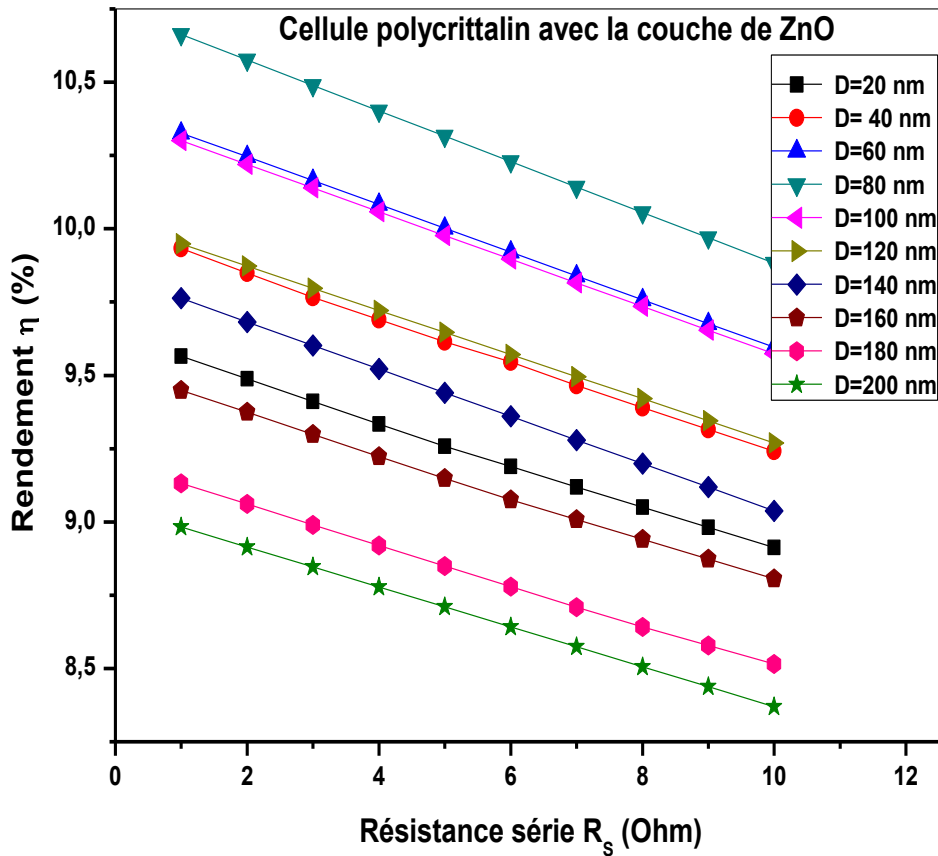
**Figure III.14 :** La variation du rendement de la cellule polycristalline (N-I-P) avec la couche TCO (ZnO, FTO, ITO) à fonction de l'épaisseur (D).

A partir des valeurs fournis par le logiciel GPVDM nous avons pu tracer les courbes qui décrivent l'effet de l'épaisseur de la couche TCO (ZnO, ITO, FTO) sur le rendement de conversion de notre cellule figure(III.14). Nous remarquons que le meilleur rendement de la cellule à base de Si-poly est celui de la cellule avec une couche ZnO d'épaisseur de 80 nm, Grâce à propriétés optique de matériau ZnO.

### III.3.3 L'effe de la résistance série $R_s$ sur le rendemant de la cellule ZnO/p-Si

La résistance série de la cellule solaire est un paramètre parasite qui dégrade l'efficacité d'une bonne cellule, elle effectue non seulement les caractéristiques lumineuses mais le courant dans les sombres caractéristiques est également considérablement réduit.

Nous devons faire une étude sur l'impact de la résistance série sur le rendement de la cellule polycristalline.



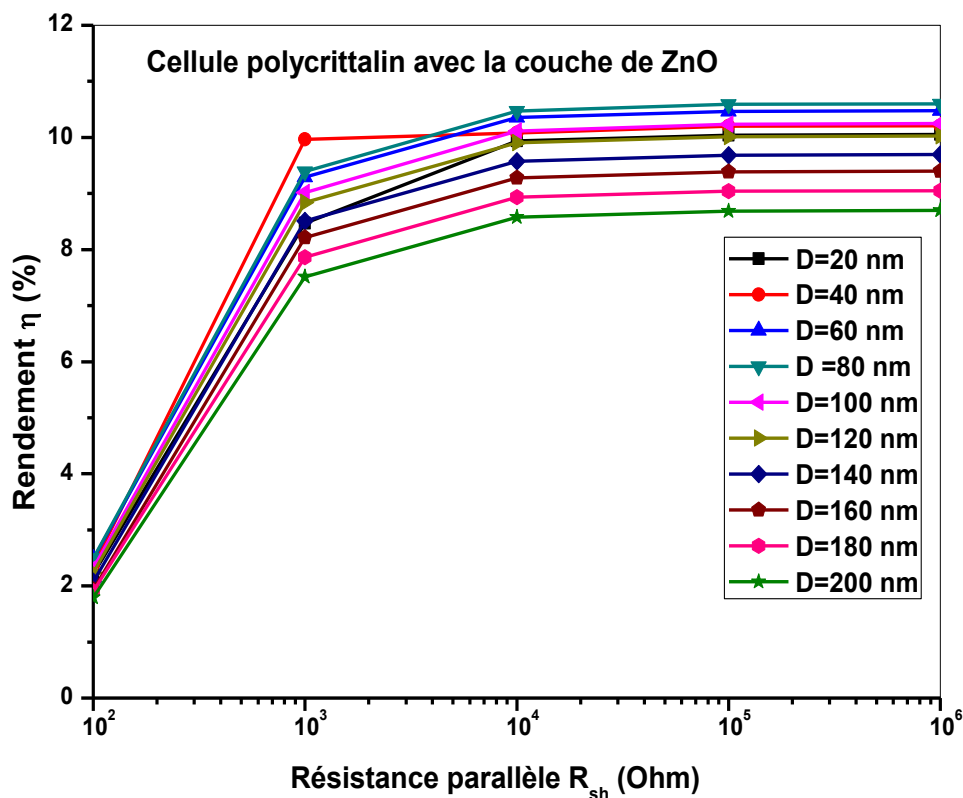
**Figure III.15 :** Le changement de rendement de la cellule ZnO/Si-poly en fonction de la résistance série  $R_s$ .

La figure III.15 montre l'effet de la résistance  $R_s$  sur le rendement de notre cellule. Nous remarquons que le rendement de la cellule diminue linéairement avec la croissance de la valeur de la résistance série. Le meilleur rendement ( 10.60) est obtenu quand la valeur de la résistance  $R_s$  est égale à 1  $\Omega$  et l'épaisseur de ZnO est 80nm. Ce resultat est identique à celui obtenu dans le cas de la cellule à base a-Si.

Notons que dans le pratique, la valeur de la resistance  $R_s$  doit idéalement être la plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semiconducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé.

### III.3.4 L'effet de la résistance $R_{sh}$ sur le rendement de la cellule ZnO/p-Si

Les performances des cellules photovoltaïques limitées pour différentes pertes d'énergies, ces pertes sont liées aux paramètres physique et technologique de la cellule. Notre travail consiste à l'étude de l'influence de la résistance parallèle  $R_{sh}$  sur la caractéristique de rendement  $\eta$ .



**Figure III.16 :** La variation de rendement de la cellule polycristallin en fonction de la résistance  $R_{sh}$  et l'épaisseur de ZnO.

Les courbes de la figure III.16 représentent la variation du rendement de la cellule à base de Si polycristallin en fonction de la valeur de la résistance  $R_{sh}$  et l'épaisseur de la couche ZnO. La courbe  $\eta = f(R_{sh})$  est divisée en deux parties: la première partie montre une augmentation très rapide du rendement lorsque la valeur résistance parallèle  $R_{sh}$  passe de  $10^2 \Omega$  et  $10^4 \Omega$ , tandis que la seconde montre une variation moins importante du rendement lorsque la valeur de  $R_{sh}$  est entre  $10^4 \Omega$  et  $10^6 \Omega$ .

Nous concluons donc qu'il existe une relation proportionnelle entre la résistance parallèle  $R_{sh}$  et le rendement  $\eta$ , chose complètement différente à la relation qui existe

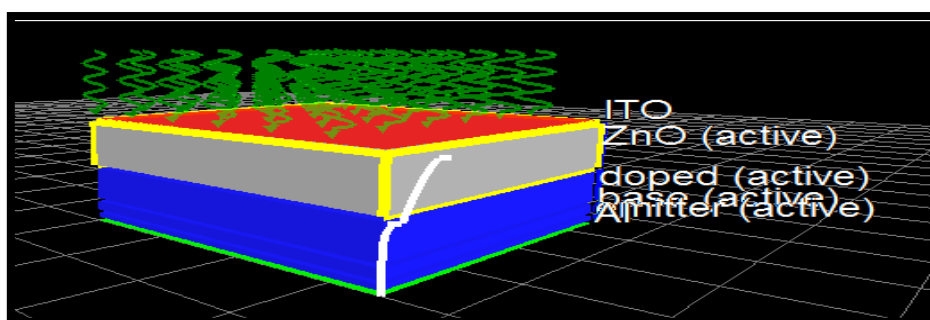
entre la résistance série  $R_s$  et le rendement  $\eta$ . Donc, pour bon rendement de la cellule, la valeur de  $R_{sh}$  doit être la plus élevée que possible.

### III.4 la cellule hétérojonction (ITO/ZnO/p-Si)

Nous avons vu précédemment que l'addition d'une couche ZnO antireflet améliore le rendement de la cellule P-I-N à base de silicium. Dans cette partie, on va tester l'effet de l'utilisation d'une couche ZnO comme une couche active accompagnée d'une couche ITO sur les performances de la nôtre cellule P-I-N.

La figure (III.17) montre la structure de notre nouvelle cellule. Elle est composée d'un empilement de couches déposées l'ordre suivant :

- Une couche ITO
- Une couche active de ZnO de type (P).
- Une couche de Si-poly ou amorphe de type (P).
- Une couche de Si-poly ou amorphe de type (I).
- Une couche de Si-poly ou amorphe de type (N).
- Une couche d'Al comme contact métallique.



**Figure III.17** : la structure de cellule hétérojonction (ITO/ZnO/p-Si/Al).

Sachant que la valeur de la résistance  $R_s$  est fixé à  $1 \Omega$  et  $R_{sh}$  est  $10^6 \Omega$ .

Le tableau ci-dessous illustre les paramètres de simulation que nous avons utilisés.

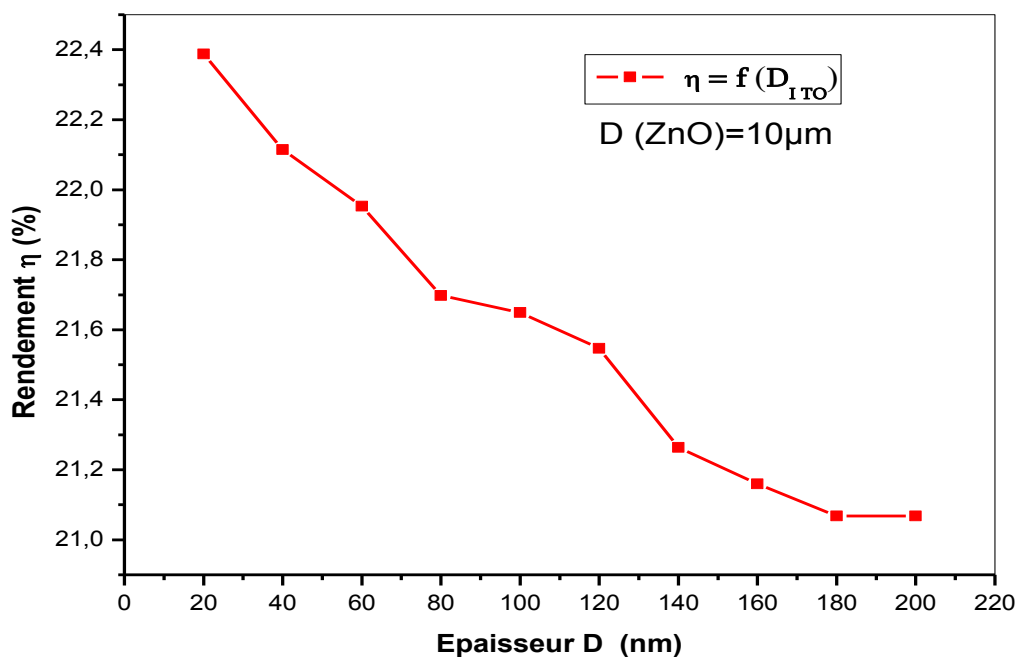
Couche	Type de couche	Epaisseur D ( $\mu\text{m}$ )	Dopage $N_D$ ( $\text{m}^{-3}$ )	Densité des pièges ( $\text{m}^{-3}\text{eV}^{-1}$ )
ZnO	Active	10	$10^{24}$	(e) $10^{18}$ , (p) $10^{18}$
P	Active	7	$10^{23}$	(e) $10^{18}$ , (p) $10^{18}$
I	Active	2	$10^{16}$	(e) $10^{18}$ , (p) $10^{18}$
N	Active	1	$10^{23}$	(e) $10^{18}$ , (p) $10^{18}$
Al	Contact	0.1	/	/

**Tableau III.1:** les paramètre et la structure de la cellule à hétérojonction.

Le premier contact entre les photons et la cellule solaire, est la couche fenêtre ITO. Dans cette partie, nous examinerons l'effet de l'épaisseur de la couche ITO sur le rendement de la cellule à hétérojonction.

#### III.4.1 L'effet de l'épaisseur $D$ de la couche contacte ITO sur le rendement « $\eta$ de cellule hétérojonction (ITO/ZnO/p-Si)

Dans ce partie, nous avons changé l'épaisseur de la couche ITO entre 20 nm et 200 nm puis et nous avons calculé le rendement correspondant à chaque épaisseur.



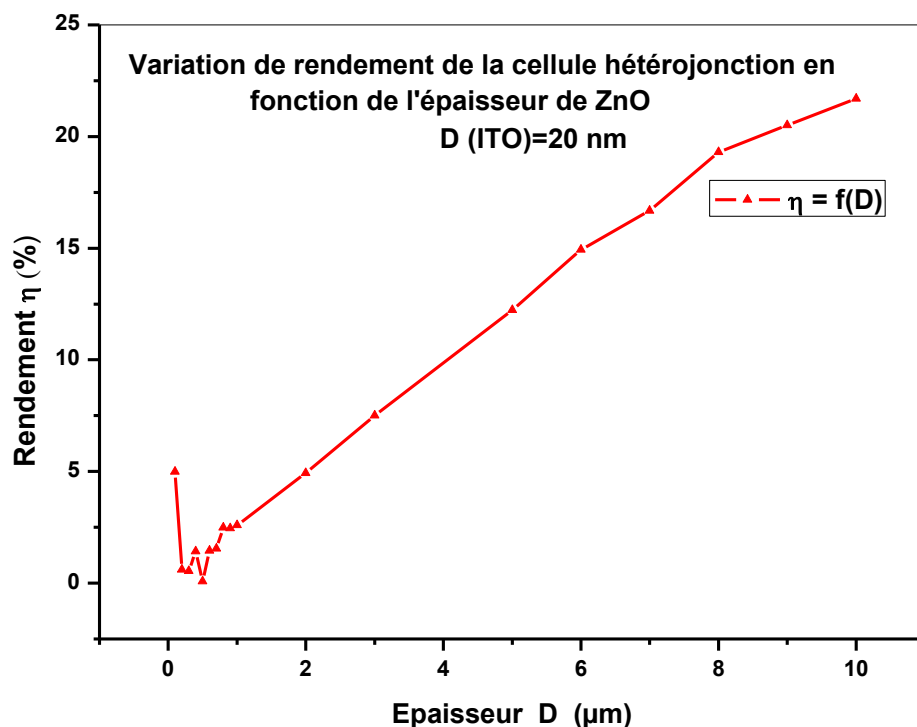
**Figure III.18 :** La variation de rendement de la cellule à hétérojonction ITO/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de la couche ITO.

La figure III.18 montre l'effet de l'épaisseur de la couche ITO sur le rendement de la cellule ITO/ZnO/p-Si(P-I-N). La première remarque est que le rendement de notre nouvelle cellule est presque 100% plus grand que celle de la cellule P-I-N ou ZnO/P-I-N étudiées précédemment. D'autre part, comme nous pouvons le voir sur cette figure, le rendement de notre cellule diminue avec l'augmentation de la l'épaisseur de la couche ITO. Le meilleur rendement (22,37 %) est obtenu pour une valeur de l'épaisseur de la couche ITO de 20 nm. En outre, quand la couche ITO est très épaisse, les performances de cellules se dégradent. Ce comportement est lié directement aux propriétés

électroniques des deux hétérostructures (ITO/ZnO et ZnO/Si) existantes dans la cellule. D'autre part, à cause de phénomène de confinement quantique, le gap des nanofilms semiconducteurs diminue avec l'augmentation de leurs épaisseurs. Donc, les couches ITO de faibles épaisseurs auront une transmission optique supérieure à celle de couches plus épaisse. Une couche ITO de faible épaisseur va transmettre le maximum de rayonnement lumineux à travers la couche de l'ITO vers la couche active de ZnO, et donc réduire la réflexion de l'ITO. Et par conséquent, le rendement de la cellule ITO/ZnO/p-Si augmente avec la diminution de l'épaisseur de la couche ITO.

### III.4.2 L'effet de l'épaisseur D de la couche active de ZnO sur le rendement $\eta$

Le but de cette simulation est de mettre en évidence l'effet de l'épaisseur D de la couche active de ZnO sur les performances de notre cellule. Pour ce faire, nous avons changé l'épaisseur de cette couche de  $0.1\mu\text{m}$  à un maximum de  $10\mu\text{m}$  et les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III.19.



**Figure III.19** : Le rendement de la cellule à hétérojonction en fonction de l'épaisseur de la couche active ZnO.

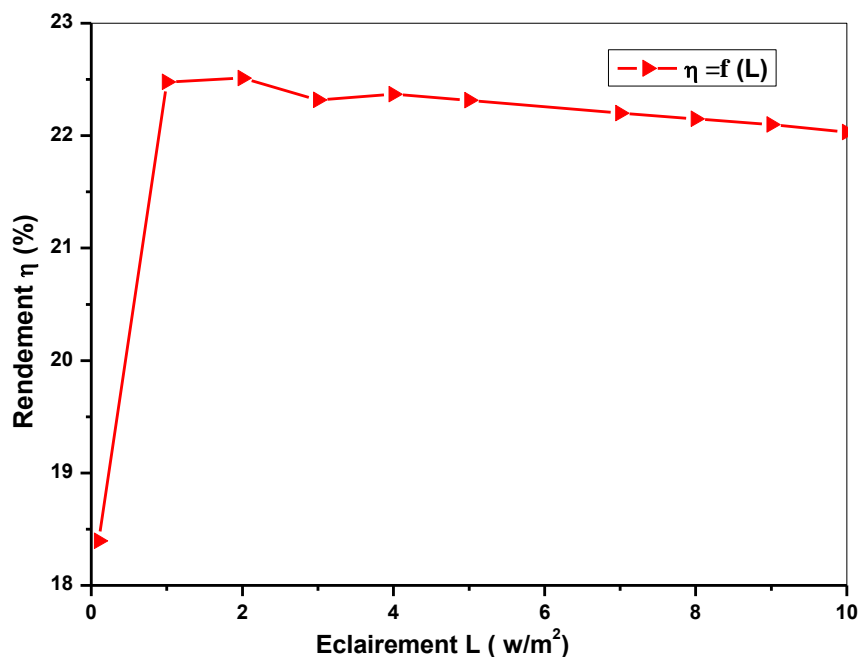
À partir de cette figure III.19, nous pouvons voir clairement que



Le rendement de la cellule est très sensible à la valeur de l'épaisseur de la couche ZnO. A partir d'une valeur de l'épaisseur  $D$  de la couche ZnO de  $1 \mu\text{m}$ , la relation entre le rendement et l'épaisseur  $D$  deviendra presque linéaire. Les valeurs du rendement de conversion augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active et cela est dû principalement à la meilleure absorption des couches ZnO les plus épaisses, puisque l'absorption de la lumière est un des facteurs déterminants de l'efficacité du rendement de la cellule photovoltaïque.

### III.4.3 L'effet de l'intensité d'éclairement sur le rendement de la cellule à hétérojonction

Il est bien connu que l'énergie électrique produite par une cellule dépende fortement de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.



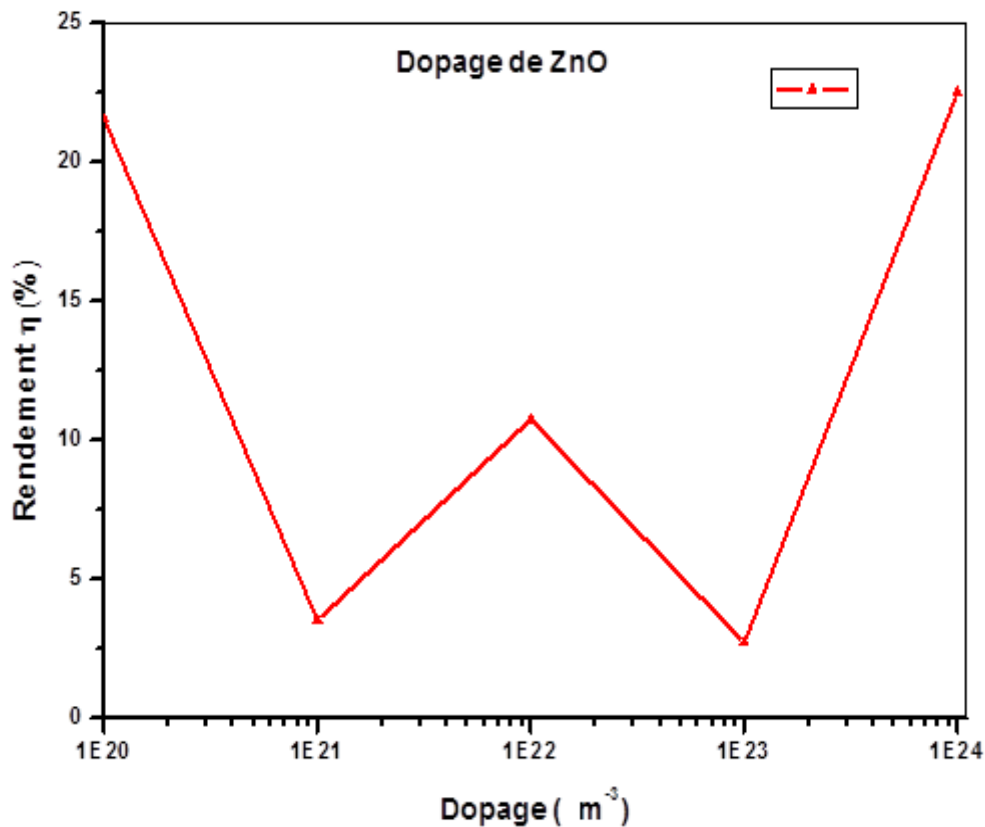
**Figure III.20** : Le rendement en fonction de l'éclairement  $L$ .

D'après la courbe ci-dessus, nous remarquons que l'intensité d'éclairement a un impact très remarquable sur le rendement de la cellule solaire. Lorsque l'intensité d'éclairement passe de  $0,1 \text{w/m}^2$  à  $1 \text{w/m}^2$ , le rendement augmente de 18% à 22,5%. Pour des intensités supérieures à  $1 \text{w/m}^2$ , le rendement reste presque constant.

### III.4.4 L'effet de dopage de la couche active ZnO

Les propriétés électroniques et optiques d'un matériau semiconducteur sont très sensibles à la nature et à la concentration des dopants. Donc on s'attend que le dopage aura un effet important sur les performances des cellules solaires.

Dans cette partie, on va étudier l'effet de la concentration des dopants dans la couche active de ZnO sur le rendement de la cellule ITO/ZnO/P-I-N.



**Figure III.21 :** la variation de rendement de la cellule à hétérojonction en fonction de dopage de la couche active ZnO.

La figure III.21 montre la variation du rendement de notre cellule en fonction du dopage de la couche ZnO. Nous remarquons que le rendement dépend fortement du dopage  $N_D$  dans la couche ZnO. Lorsque la concentration des dopants augmente de  $10^{20}$  à  $10^{23} m^{-3}$ , le rendement de la cellule diminue puis il recouvre sa valeur lorsque la concentration atteindra  $10^{24} m^{-3}$ .

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations concernant différents types de cellules solaires à base de silicium.

Nous avons étudié trois types de structures ; le premier type est celui des cellules N-I-P simple à base de Si amorphe et Si-poly. Le deuxième type est celui des cellules N-I-P avec une couche de TCO (ZnO, ITO, FTO) comme couche antireflet. Enfin, nous avons étudié des cellules solaires à hétérojonction de type ITO/ZnO/ Si.

Plusieurs paramètres ont été pris en compte tels que ; les valeurs de la résistance série  $R_s$  et la résistance parallèle  $R_{sh}$ , l'épaisseur de la couche TCO, l'épaisseur de la couche active de ZnO, le dopage de la couche de silicium ainsi que celui de la couche ZnO. Les résultats obtenus étaient cohérents et ils sont en accord avec la littérature [23].

### Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, nous nous sommes intéressés à l'énergie pv

Au cours de ce travail nous avons utilisé la simulation afin d'optimiser les paramètres des cellules solaires de type TCO/Si. Nous avons étudié l'optimisation de la structure d'une cellule solaire à base de silicium notamment l'effet de l'addition d'une couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) sur une cellule N-I-P à base de Si amorphe ou polycristallin. Dans ce type de cellules, les TCO (Oxyde Transparents Conducteur) utilisés présentent un bon compromis entre transparence optique et bonne conductivité électrique. L'oxyde de zinc (ZnO), l'ITO et le FTO ont été utilisés comme électrodes transparentes dans les cellules solaires pour leur bonne conductivité électrique combinée à une transparence élevée. Nos résultats montrent que le meilleur matériau est le ZnO. D'autre part, nos résultats indiquent que la couche d'oxyde transparent TCO joue un rôle très important dans la contribution au courant de court-circuit, à la tension de circuit ouvert, et donc au rendement de conversion des cellules solaires de structure TCO/Si. Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur, de dopage, ainsi que de la réflexion de la couche de TCO sur les performances des cellules solaires à l'aide de la simulation et les résultats de notre simulation montrent que ce type de cellules solaires peut avoir un rendement théorique mieux à une valeur estimé à 8% qu'une cellule N-I-P simple à base de Silicium. Le meilleur rendement de ce type de cellules ont été obtenue pour une valeur de l'épaisseur de la couche TCO d'environ 80 nm, un dopage des couches Si(P) et Si (N) de l'ordre de  $10^{24} \text{ m}^{-3}$ , et les valeurs deux résistances, série et parallèle de l'ordre de  $1 \Omega$  et  $10^6 \Omega$  respectivement.

Dans le cas d'une cellule hétérojonction ITO/ZnO/Si-poly (P-I-N), la couche ZnO améliore considérablement les performances de ces cellules. Le meilleure rendement de ce type de cellules ont été obtenu pour une épaisseur la couche contacte ITO de 20 nm, une épaisseur de la couche active de ZnO de l'ordre de  $10 \mu\text{m}$  et un dopage de la couche active de ZnO d'une valeur estimé de l'ordre de  $10^{24} \text{ m}^{-3}$ . Pour ces valeurs optimisées, un rendement de l'ordre de 22.49 % a été obtenu. Compte tenu de ces résultats, les cellules solaires de type ITO/ ZnO/Si présentent un bon compromis rendement de conversion et peuvent ainsi permettre des applications potentielles en grandes surfaces. Ce travail ouvre la voie à de riches perspectives de recherche dans le domaine photovoltaïque par l'étude et l'utilisation d'autres TCO en hétérojonction avec le Silicium.



### Les références

- [1] **C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF**, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », *Revue énergies renouvelables*, Vol.6, pp.69-76, 2003.
- [2] **G. MASSON**, et al.' *Global Market Outlook for photovoltaics'*, Technical report, EPIA, 2013.
- [3] <http://www.viridiselec.com/> [Consulté: 27/2/2019].
- [4] <http://www.em.ucv.ro/> [Consulté: 27/2/2019].
- [5] <https://www.lechodusolaire.fr/> [Consulté: 26/07/2019].
- [6] <http://www.panneaux-solaires-france.com> [Consulté: 3/3/2019].
- [7] **A. GOETZBERGER, V U. HOFFMANN**, *Photovoltaic Solar Energy generation*, /Atlanta Press, 2005.
- [8] <https://www.techniques-ingenieur.fr> [Consulté: 1/3/2019].
- [9] <http://www.pv-pro.fr> [Consulté: 5/3/2019].
- [10] **S. MIYAJIMA, A.YAMADA et M. KONAGAI**, *Jpn. J. Appl. Phys.***43** (2004) L1190.
- [11] **A. V. SHAH**, et al, "Basic efficiency limits, recent experimental results and novel light-trapping schemes in a-Si:H, IIC-Si: H and micromorph tandem' solar cells," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 338, pp. 639-645, 2004.
- [12] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com) [Consulté: 11/3/2019].
- [13] [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) [Consulté: 11/3/2019].
- [14] <https://www.prnewswire.com/> [Consulté: 12/3/2019].
- [15] **R. HEZEL, A. GOETZBERGER**, *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics*, William T.Rhodes, Atlanta USA, 2009.



- [16] <https://www.physique.unice.fr/> [Consulté: 25/7/2019]
- [17] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>[Consulté: 24/5/2019]
- [18] **A. SCHENK**, "Finite-temperature full random-phase approximation model of band gap narrowing for silicon device simulation," *J. Appl. Phys.*, vol. 84, no. 7, pp. 3684–3695, 1998
- [19] **G. ADOLF; K. JOACHIM et V. BERNHARD** ' Crystalline Silicon Solar Cells ', the Principles of Photovoltaics, book, 2014.
- [20] **S.M. SZE et K. N. KWOK**, « *Physics of semi-conductors devices* », Third Edition. Wiley – Inter science publication, Jhon Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [21] Handbook of Chemistry and Physics, 56th Edition, Ed. R.C. Weast, CRS Press,1975.
- [22]<http://physique.unice.fr/sem6/2016.2017/PagesWeb/PT/Surfaces/nusemi.html> [Consulté: 7/7/2019].
- [23] **N. ZIANI** , 'Effet de l'épaisseur de la couche antireflet à base d'un TCO sur les cellules solaires à hétérojonction à bas silicium', Mémoire de Magister, Département d'Electronique, université mouloud mammeri, tizi-ouzou, 2013.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons utilisé la simulation afin d'optimiser les paramètres des cellules solaires de type N-I-P et TCO/ N-I-P à base de Si amorphe et polycristallin ainsi que celles de type TCO/ZnO/P-I-N. Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur, le dopage, l'éclairement ainsi que celle des résistances série et parallèle sur les performances des cellules solaires à l'aide du simulateur GPVDM. Les résultats obtenus en simulation montrent que les cellules N-I-P avec une couche TCO peuvent avoir un rendement théorique mieux à une valeur estimée à 8% qu'une cellule N-I-P simple à base de silicium. Nous avons trouvé que le rendement de ces cellules est sensible à la nature et à l'épaisseur de la couche TCO. Parmi les trois matériaux considérés dans cette étude comme TCO (FTO, ITO, et ZnO), le ZnO apparaît comme le meilleur choix. La valeur optimale de l'épaisseur de la couche TCO est 80 nm. D'autre part, nos résultats montrent que les cellules de type TCO/ZnO/P-I-N ont un rendement de 22.49%, ce qu'est 2 fois supérieure à celui des cellules N-I-P simples. Compte tenu de ces résultats, les cellules solaires à hétérojonction de type ITO/ZnO/Si présentent un bon rendement de conversion.

**Mots clés:** TCO, photovoltaïque, silicium, cellule solaire.

## Abstract

In this work, we used simulation to optimize the parameters of the N-I-P and TCO/ N-I-P type solar cells based on amorphous and polycrystalline Si as well as those of the TCO/ZnO/P-I-N type. We analyzed the influence of the thickness, the doping, the illumination as well as that of series and parallel resistances on the performances of the solar cells using the GPVDM simulator. The obtained results show that N-I-P cells with a TCO layer can have a theoretical efficiency which is 8% higher than that of a simple N-I-P Si-based cell. We have found that the efficiency of these cells is sensitive to the nature and thickness of the TCO layer. Among the three TCO materials considered in this study (FTO, ITO, and ZnO), ZnO appears to be the best choice. The optimum value of the thickness of the TCO layer is 80 nm. On the other hand, our results show that TCO/ZnO/P-I-N cells have an efficiency of 22.49%, which is 2 times higher than that of simple N-I-P cells. In view of these results, the ITO/ZnO/Si heterojunction solar cells have a good conversion efficiency.

**Key words:** TCO, photovoltaic, silicon, solar cell.