

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique



Université Saad Dahlab, Blida-1

Faculté de Technologie

Département des Énergies Renouvelables

Par : CHEKHCHOUKH El-Hadi.

Pour l'obtention du diplôme :

Master en Énergies Renouvelables

Option : Photovoltaïque.

Thème :

**Etude comparative et modélisation des performances des
cellules photovoltaïques à hétérojonction de Silicium**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr Mazouz Halima	USDB	Présidente
Dr Bouzaki Mohammed Moustafa	USDB	Encadreur
Dr Ait-Sahed Oussama	USDB	Examineur
Dr Amrouche Badia	USDB	Examinatrice

Juin 2018

Remerciement

En préambule à ce mémoire je remercie **ALLAH** qui m'a aidé et m'a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude. Je remercie **Dieu** tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur **Mr. « BOUZAKI »**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants surtout **Mr T.DOUMAZ** et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques durant les recherches.

A titre plus personnel, je remercie chaleureusement mes très chers parents, qui ont toujours été là, toujours présents pour moi « Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Grand remerciement, à ma chère sœur « **Sanaa** » et mes frères « **Mahfoud et Salah** » aussi à ma chère fiancée « **Kawtar** ».

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

« À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mes respect et mes gratitude »

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que dieu me les garde.

Ma sœur : Sanaa ;

Mes très chérés frères : Mahfoud, Salah ;

Ma fiancée : Kawtar ;

A toutes la famille Chekhchoukh

Aux chers ami(e)s surtout : Ayoub, Youcef, Hamza, Amine Mokhtar et Imane ;

A tous mes collègues d'études ;

A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

EL- Hadi

Résumé :

Le principal objectif de ce travail est d'étudier des cellules solaires à hétérojonction de Silicium. Pour notre contribution, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur et la concentration de dopage sur les performances des cellules solaire à hétérojonction de silicium ainsi l'influence de l'insertion d'une couche a-Si(i) entre l'émetteur et l'absorbeur.

La structure de la cellule à hétérojonction avec couche intrinsèque donne les meilleures caractéristiques photovoltaïques suivantes : $J_{SC}=41.27 \text{ mA/cm}^2$; $V_{CO}=669.1 \text{ mV}$; $FF = 83.66\%$ et $(\text{Eff}) \eta = 24.03 \%$.

Les calculs sont traités à l'aide d'un programme AFORS-HET.

Mots clés : Cellule solaire, Hétérojonction de silicium, Simulation, AFORS-HET.

ملخص :

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة الخلايا الشمسية ذات الاتصال الغير متجانس للسليسيوم. من أجل مساهمتنا، قمنا بدراسة تأثير تركيز السماكة وتركيز التشبع على أداء الخلايا الشمسية بالإضافة إلى تأثير إدخال طبقة من السليسيوم الغير مشبع بين الطبقة المرسله والطبقة الماصة.

يعطي هيكل الخلية الشمسية ذات الاتصال الغير متجانس للسليسيوم مع الطبقة من السليسيوم الغير مشبع أفضل خصائص الخلايا الضوئية: $J_{SC} = 41.27 \text{ mA/cm}^2$ ، $V_{CO} = 669.1 \text{ mV}$ ، $FF = 83.66\%$ و $\eta = 24.03\%$.

تم معالجة الحسابات باستخدام برنامج AFORS-HET.

الكلمات الرئيسية: الخلايا الشمسية، السليسيوم، المحاكاة.

Abstract:

The main objective of this work is to study solar cells with heterojunction of silicon. For our contribution, we studied the effect of thickness and doping concentration on the performance of silicon heterojunction solar cells as well as the influence of the insertion of an a-Si (i) layer between the transmitter and the absorber.

The structure of the heterojunction cell with intrinsic layer gives the best photovoltaic characteristics: $J_{SC} = 41.27 \text{ mA / cm}^2$; $V_{CO} = 669.1 \text{ mV}$; $FF = 83.66\%$ and $(\text{Eff}) \eta = 24.03\%$.

Calculations are processed using an AFORS-HET program.

Key Words: Solar cell, Silicium heterojunction, Simulation.

Nomenclature - Symboles-Acronymes

Symbole	Signification	Unité
Eg	l'énergie de gap	ev (électro-volte)
Ev	l'énergie de couche de valence	ev (électro-volte)
Ec	l'énergie de couche de conductance	ev (électro-volte)
λ	longueur d'onde	μm (micromètre)
I	I_{cc} : le courant de court-circuit en	A (Ampère)
	I_m : Courant qui correspond à la puissance maximale	
	I_{ph} : le photo-courant	
V	V_{CO} : la tension de circuit ouvert	V(Volte)
	V_m : Tension qui correspond à la puissance maximale	
P	P_{max} : la puissance maximale produite PV	W (watt)
	P_{inc} : la puissance incidente ou bien lumineuse	W/m^2
FF	le facteur de forme la cellule	Pas d'unité (en %)
Eff= η	le rendement de la cellule .0..6	Pas d'unité (en %)
K	coefficient de Boltzmann (1.38.10-23)	J / K (joule / Kelvin)
T	Température de la cellule	$^{\circ}\text{C}$ (degré Sel suce)
L_n :	La longueur de diffusion des électrons	/
L_p :	La longueur de diffusion des trous	/
Q	la charge de l'électron = $1.6 \cdot 10^{-19}$ ev	Ev

G	La génération	/
S	la surface de la cellule	m ²
Np	Nombres des cellules en parallèle	/
Ns	Nombres des cellules en séries.	/

Acronyme	Signification
PV	Photovoltaïque
GES	Gaz à Effet de Serre
ENR	Energie Renouvelable
PN	Jonction créé par les électrons- trous
HET	Hétérojonction
UV	Ultraviolet
Al	Aluminium
ZnO	Oxyde de Zinc.
CdTe	Tellure de Cadmium.
CIGS	Le diséléniure de cuivre, indium et gallium
μc-Si	Silicium microcristallin.
a-Si	Silicium amorphe.
c-Si	Silicium cristallin.

Sommaire

Introduction Générale	01-03]
Chapitre 01 : Connaissance préliminaire sur les cellules photovoltaïques.....	[04-20]
Chapitre 02 :Cellule photovoltaïque à hétérojonction de Silicium.....	[21-28]
Chapitre 03 : Etude comparé et modelisation des performances des cellules photovoltaïque à heterojonction de silicium	[29- 42]
Chapitre 01 : Connaissance préliminaire sur les cellules photovoltaïque	
Introduction.....	04
1.1.Cellule photovoltaïque.....	04
1.2.Principe de fonctionnement.....	05-06
1.3. Rayonnement solaire.....	06
1.4. Paramètres fonctionnels d'une cellule photovoltaïque.....	09
a- courant de court-circuit.....	10
b- Tension de circuit ouvert.....	10
c- Point de fonctionnement	10
d- facteur de forme.....	10
e-Rendement de la conversion.....	11
1.5 Filières photovoltaïques	11
1.5.1 Cellules PV à base de Si en plaquettes	11
1.5.2 Cellules Photovoltaïque à base de Silicium monocristallin.....	12
1.5.3 Cellules Photovoltaïque à base de Silicium polycristallin.....	13
1.5.4 Cellules PV à base de Si amorphe.....	14
1.5.5 Cellules PV à hétérojonction	15
1.5.6 Cellules à base de CdTe	15

1.5.7 Cellules à base de CIGS.....	16
15.8 Autres filières photovoltaïque	16
a- Cellules à colorant.....	16
b- Les cellules organiques.....	17
c- Cellules à très haut rendement GaAs.....	17
Conclusion.....	20

Chapitre 2 : Cellule photovoltaïque à hétérojonction de Silicium

.Introduction.....	21
2.1.Définition d'une hétérojonction.....	21
2.2. Cellule à hétérojonctions de silicium.....	22
2.2.1 Structure des cellules à hétérojonctions de silicium.....	22
2.2.2 Les deux semi-conducteurs de base.....	23
2.2.3 Les composants principaux de la cellule à hétérojonction de silicium.....	24
2.2.4 Diagramme de bande.....	26
2.2.5 Développement et avantages de la technologie des cellules à hétérojonction de silicium.....	27
2.2.6 Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction silicium.....	28
Conclusion.....	28

Chapitre 3 : Etude comparée et modélisation des performances des cellules photovoltaïque à hétérojonction de silicium

.Introduction.....	29
3.1 Structure et paramètre de la cellule photovoltaïque à simuler	29
Résultats et discussion	30
3.1.1 Caractéristiques J-V (a-Si(n)/c-Si(p))	31

3.1.2 Influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule	31
a- L'effet de l'épaisseur (a-Si(n))	32
b- L'effet de l'épaisseur (c-Si(p))	33
3.1.3 Influence de la concentration de dopage sur les performances de la cellule	34
a- L'effet de dopage (a-Si(n))	34
b- L'effet de dopage(c-Si(p))	34
3.2 Structure et paramètre de la deuxième cellule photovoltaïque à simuler	35
Résultats et discussion	35
3.2.1 Caractéristiques J-V (a-Si(p)/c-Si(n))	36
a- L'effet de l'épaisseur (a-Si(p))	36
b- L'effet de l'épaisseur (c-Si(n))	37
c- L'effet de dopage (a-Si(p))	38
d- L'effet de dopage(c-Si(n))	38
3.3 Structure et paramètre de la troisième cellule photovoltaïque à simuler	40
Résultats et discussion	40
3.3.1 Caractéristiques J-V HIT avec couche intrinsèque	41
Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	43
ANNEXE.....	44

Liste des figures :

Introduction générale

Figure 1 : Structure du parc de la production nationale en MW[2].....03

Chapitre 1

Figure 1.1 : Structure basique d'une cellule photovoltaïque04

Figure 1.2 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....05

Figure 1.3: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....06

Figure 1.4 Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre.....07

Figure 1.5: Types de rayonnement solaire.....08

Figure 1.6: Description du nombre de masse d'air.....09

Figure 1.7: Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque en éclaircissement obscurité..... 09

Figure 1.8 : Évolution des rendements de conversion photovoltaïque de 1976 à 2017.....11

Figure 1.9: Plaque de silicium monocristallin.....13

Figure 1.11 : Plaque de silicium polycristallin14

Figure 1.12 : structure d'une cellule au silicium amorphe.....14

Figure 1.13 : cellule photovoltaïque au silicium amorphe.....14

Figure 1.14: Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction.....15

Figure 1.15 : Structure d'une cellule CdTe.....15

Figure 1.16: Structure d'une cellule à base de CIGS17

Figure 1.17 : Cellule solaire organique.17

Figure 1.18 : Structure d'une cellule à base de GaAs.18

Chapitre 2

Figure 2.1 : Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype, (a) avant contact, (b) après contact21

Figure 2.2 : Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotypes, (a) avant contact, (b) après contact.....	22
Figure 2.3 : Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium(Si:H / c-Si.)	23
Figure 2.4: diagramme des bandes type d'une hétérojonction (p)'a-Si:H/(n)c-Si à l'équilibre.....	26
Figure 2.5 : diagramme des bandes type d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si à l'équilibre.	26
Figure 2.6 :Structure d'une cellule HIT	27

Chapitre 3

Figure3.1 : Figure (3.1) : Structures de cellules solaires simulées -(HIT).....	29
Figure 3.2: Caractéristiques J-V- (HIT).....	30
Figure 3.3: l'effet de l'épaisseur de a-Si (n) sur les performances de la cellule-(HIT).....	32
Figure3.4: l'effet de l'épaisseur de c-Si(p) sur les performances de la cellule - HIT.....	34
Figure3.5: l'effet de dopage de a-Si(n) sur les performances de la cellule-HIT.....	35
Figure3.6: : l'effet de dopage de c-Si(p) sur les performances de la cellule - HIT.....	35
Figure 3.7 : Structures de cellules solaires simulées -(HIT).....	35
Figure 3.8 : Caractéristiques J-V- (HIT).....	36
Figure 3.9: l'effet de l'épaisseur de a-Si(p) sur les performances de la cellule - HIT.....	37
Figure 3.10 : l'effet de l'épaisseur de c-Si(n) sur les performances de la cellule - HIT.....	38
Figure3.11 : l'effet de dopage de a-Si(p) sur les performances de la cellule - HIT.....	39
Figure3.12 : l'effet de dopage de c-Si(n) sur les performances de la cellule - HIT.....	40
Figure3.13 : Structures de cellules solaires simulées -(HIT) avec couche intrinsèque.....	41
Figure 3.14 : Caractéristiques J-V- (HIT) avec couche intrinsèque.....	42

ANNEXE

Figure A1.1Interface graphique du logiciel de simulation 1D AFORS-HET.....	44
FigureA1.2: Définition de la structure et introduction des paramètres.....	46

Figure AI.3 : Choix de l'interface entre deux couches.....47

Figure AI.4 : Calcul des conditions d'équilibre thermodynamique et
d'illumination de la cellule.....48

Liste des tableaux :

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Paramètre de la cellule photovoltaïque à simuler	30
Tableau 3.2: les performances de structure de référence	31
Tableau 3.3: Les performances en utilisant une épaisseur de 3nm (a-Si(n)).....	32
Tableau 3.4: Les performances de notre cellule avec une épaisseur de 200µm c-Si(p).....	34
Tableau 3.5: les performances de structure de référence.....	42
Tableau 3.6: Comparaison entre les différentes structures.....	42

Introduction générale

Introduction Générale :

Les énergies renouvelables sont des énergies qui au contraire des énergies dites de stock (pétrole, gaz, charbon...) sont basées sur l'exploitation d'un flux (soleil, vent, eau) qui se renouvellera en permanence à l'échelle du passage de l'humanité sur terre. Parmi elles, l'énergie solaire offre un gigantesque gisement énergétique. Il paraît donc évident que si on en transforme une petite partie en énergie utilisable, son potentiel est énorme.

La technologie solaire permettant de transformer cette énergie en électricité (photovoltaïque (PV)) est une voie très intéressante pour remplacer en partie les moyens de production traditionnels. De plus, le PV permet une production plus propre que son équivalent pétrole et charbon. En effet, quand on produit un kWh avec un système PV on génère 10 à 20 fois moins de GES.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque. L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquence développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces derniers raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

Le programme des énergies renouvelables (EnR) pour notre pays est défini par le ministère de l'énergie et des mines (Avril 2011) pour les différentes phases [2] :

- ✓ D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW.
- ✓ D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12 000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW.

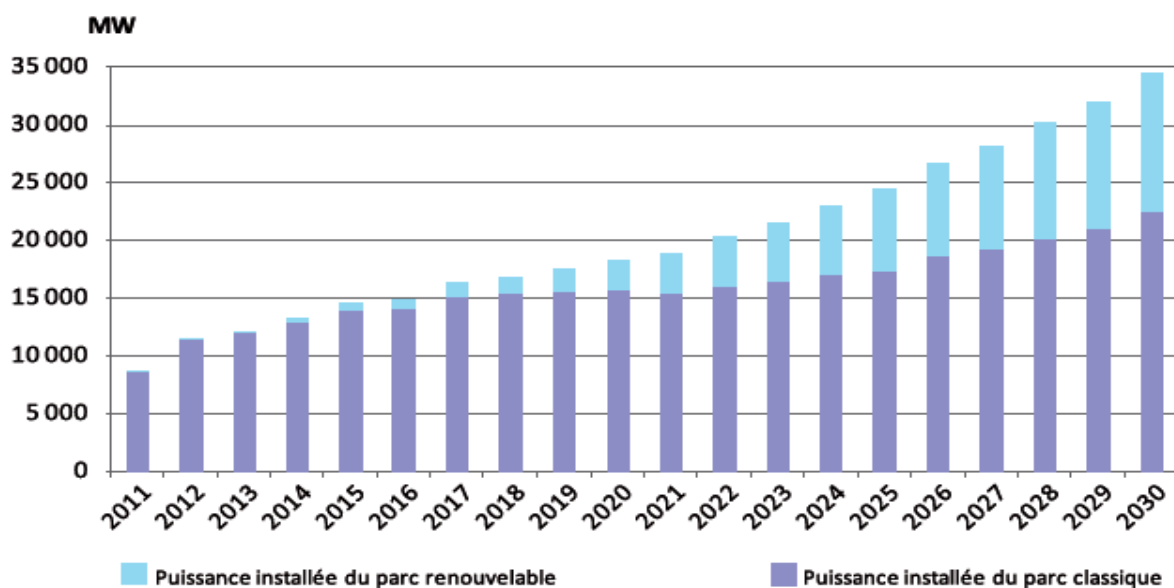


Figure1: Structure du parc de la production nationale en MW [2]

La stratégie énergétique de l’Algérie repose sur l’accélération du développement de l’énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d’une capacité totale d’environ 800 MWc d’ici 2020. D’autres projets d’une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030....[3]

Actuellement, la technologie de cellule dominant le marché est la technologie à base de

c-Si avec 87% des ventes au niveau mondial. C’est une technologie mature industriellement et fiable une fois installée ; la longévité des installations est de plusieurs dizaines d’années. De plus, elle démontre les meilleurs rendements de conversion, ce qui est un avantage quand on dispose d’une surface limitée. Si on regarde plus en détail la répartition des coûts pour la fabrication d’un module à base de c-Si, la fabrication du matériau plus sa mise en forme jusqu’à l’obtention de la cellule solaire est responsable de 60% du coût global du module soit 18% à 30% du coût global d’une installation PV.

L’objet principal de ce travail est de modaliser les performances des cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium on utilisant le logiciel AFORS-HET v2.5.

Le présent travail est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre, décrit le principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque, ses paramètres de fonctionnement et aussi ses différentes filières photovoltaïques.

- Le seconde chapitre, débute avec une définition d'une hétérojonction plus précisément on va parler des cellules à hétérojonctions à base de silicium et les différentes propriétés de ces hétérojonctions.
- Dans le dernier chapitre, on va faire une simulation des cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium pour modéliser et comparer ses performances.

Chapitre 01 :

Connaissances préliminaire sur les cellules photovoltaïques.

Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise pour cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Dans ce chapitre, nous allons faire une présentation de la cellule photovoltaïque (définition, le principe fonctionnement, les spectres solaire, les conditions d'illumination, les caractéristique d'une cellule photovoltaïque...).

1.1- Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est l'élément clé d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs afin de transformer directement l'énergie rayonnante à une énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement incident en puissance électrique. Le phénomène mis en jeu, l'effet photoélectrique, consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction. La cellule solaire est une jonction P-N dont le fonctionnement est basé sur l'absorption du flux lumineux solaire.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires. Il est basé sur les trois principes suivants :

- Absorption des photons (dont d'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans le matériau semi-conducteurs :
- Collecte des particules générées dans le dispositif ...[5]

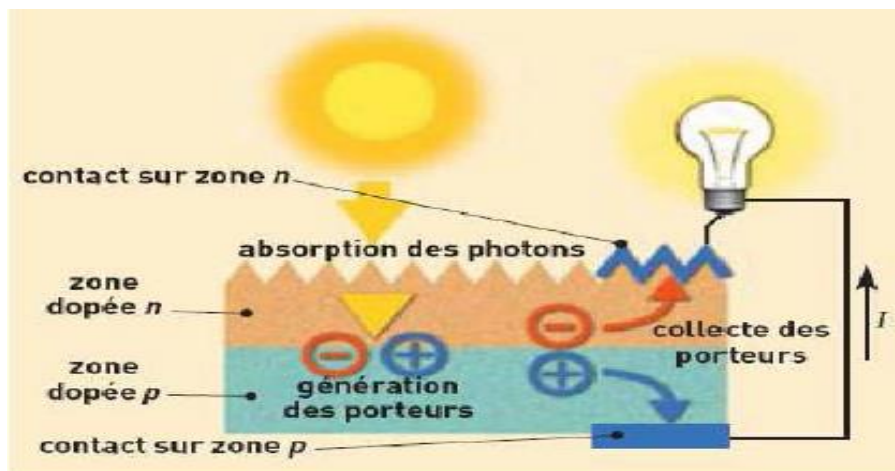


Figure1.2: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Cette dernière absorbe les photons de la lumière incidente à l'aide d'un matériau semi-conducteur appelé absorbeur. Un semi-conducteur est constitué d'une bande de conduction dans laquelle circulent les électrons chargés négativement et d'une bande de valence dans laquelle circulent les trous chargés positivement. Entre ces deux bandes se trouve une bande interdite (gap) dont la largeur (énergie) E_g est définie par la différence entre le bas de la bande de conduction E_c et le haut de la bande valence E_v .

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure 1.1. Les photons incidents créent des porteurs dans les régions N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P et N, les photos-porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Les porteurs donnent naissance à un photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode... [6]

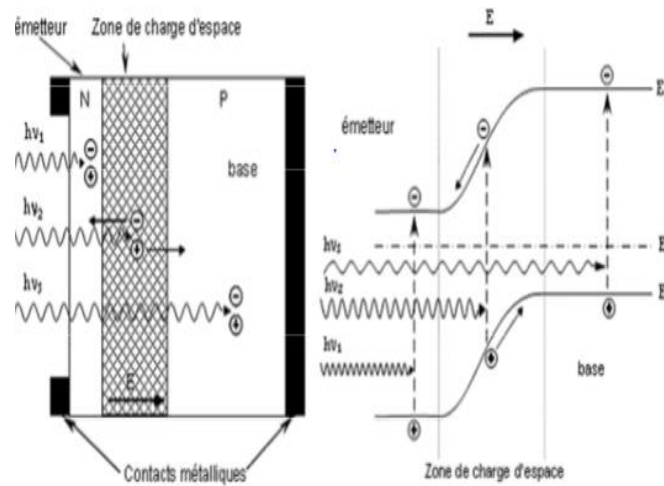


Figure 1.3 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque

1.2- Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui le sépare de la terre, quelque cent cinquante millions de kilomètres, le soleil fournit une énergie importante. A la limite de l'atmosphère, l'hémisphère éclairé de la terre reçoit une puissance de 1.81017 watts, sous la forme d'un rayonnement dont le spectre se répartit essentiellement entre les longueurs d'onde 0.3 μm et 4 μm . l'atmosphère terrestre perturbe cette répartition spectrale, modifie l'intensité du rayonnement solaire incident qui est réfléchi, diffusé et absorbé par les gaz, les aérosols et les nuages. Dans les conditions les plus favorables, cette puissance rayonnée atteint environ 1000 watts par mètre carré au sol. [7]

Cet apport énergétique est dispersé puisque la durée d'ensoleillement varie d'une région à l'autre du globe terrestre. Il change aussi selon les saisons, les caractéristiques climatiques du site. Ce caractère intermittent propre à l'énergie solaire constitue un handicap auquel on remédie au besoin, en stockant l'énergie obtenue sous sa forme utilisable, essentiellement électrique [8].

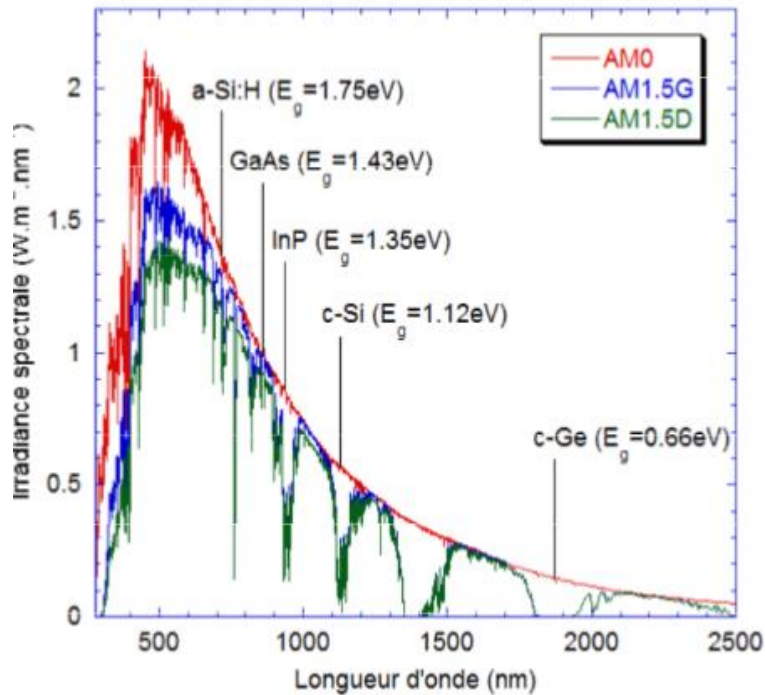


Figure 1.4: Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre [11]

Les rayonnements solaires concernés par le photovoltaïque sont des rayonnements électromagnétiques (ultraviolet, visible et infrarouge). Ils peuvent être divisés en trois types [9] :

- Rayonnement direct : c'est le rayonnement reçu directement du soleil au sol
- Rayonnement diffus provenant de l'atmosphère : c'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [3].
- Rayonnement réfléchi provenant du sol : C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). [3].

La figure schématise l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre :

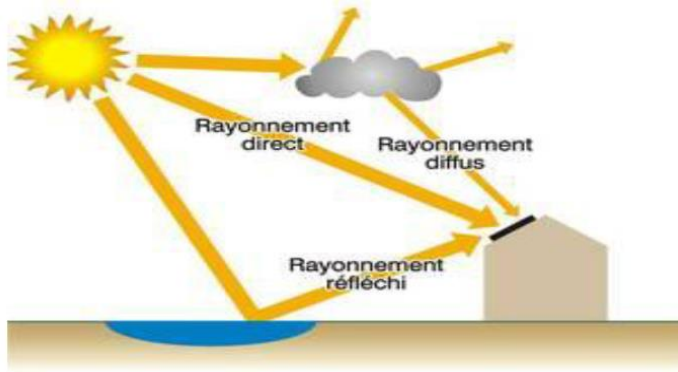


Figure 1.5 :Types de rayonnement solaire.

Note :Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [3].

Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse : c'est la distance parcourue par la lumière à travers l'atmosphère normalisée par la plus petite distance possible (le soleil est zénith), l'air masse donne la réduction de puissance due à la traversée de l'atmosphère :

$$AM=1/\cos\alpha \dots\dots\dots [I.1]$$

α : représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.

AM0 : Le spectre solaire correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale.

AM1.5D et AM1.5G : Les spectres qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct + diffus). Ces spectres sont donnés sur la figure 1.2.a, sur laquelle sont aussi indiqués les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés pour les applications photovoltaïques et leur énergie de gap E_g [7]

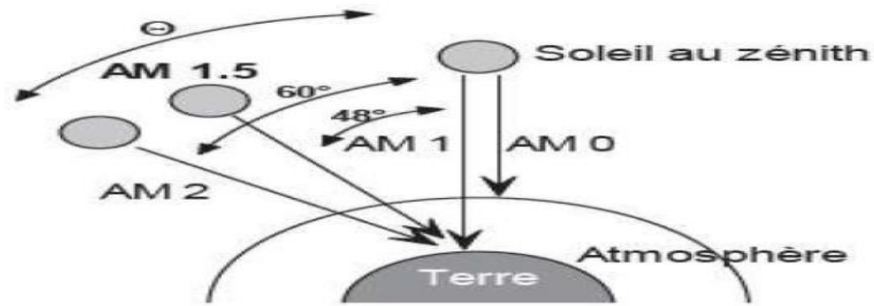


Figure 1.6 :Description du nombre de masse d'air

1.3- Paramètre fonctionnels d'une cellule photovoltaïque :

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont:

- Le courant de court-circuit I_{cc} .
- La tension en circuit ouvert V_{co} .
- Le facteur de forme FF.
- Le point de fonctionnement.
- Le rendement de conversion d'énergie η .

Nous avons représenté sur la figure 1.7 Les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire.

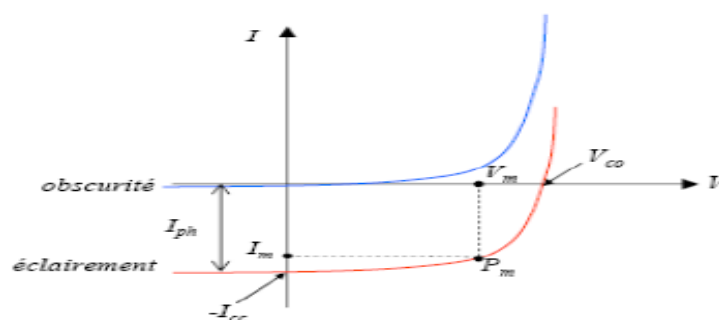


Figure 1.7 : Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque en éclairement en obscurité.

a- Courant de court-circuit, I_{cc} :

Ce courant est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il définit la quantité des paires électrons-trous créés G et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement [9] :

$$I_{CC} = qG (L_n + L_p) \dots\dots\dots[I.2]$$

Le courant de court-circuit croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.

b- Tension de circuit ouvert V_{co} :

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

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \dots\dots\dots [I.3]$$

c- Point du fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$:

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_{max} = V_m * I_m \dots\dots\dots[I.4]$$

Elle traduit sur la caractéristique $I-V$ le point du fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ qui est situé au coude de la caractéristique $I-V$ et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement [15].

d- Facteur de forme, FF :

Le facteur de forme (**FF**) « en anglais : Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{cc}, V_{co}); d'où il est donné par la relation :

$$F = \frac{P_m}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \dots\dots\dots[I.5]$$

e- Rendement de conversion η :

Le rendement η , des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \dots\dots\dots [1.6]$$

1.4- Filière photovoltaïque :

De nombreuses technologies de cellules photovoltaïques existent et sont regroupées en filières. Elles se distinguent par les matériaux utilisés, les procédés de fabrication et le nombre de jonctions utilisées au sein de la cellule. La figure 1.8 montre l'évolution des rendements dans les principales filières. On remarque l'apparition de nouvelles filières au cours du temps et l'augmentation progressive des rendements.

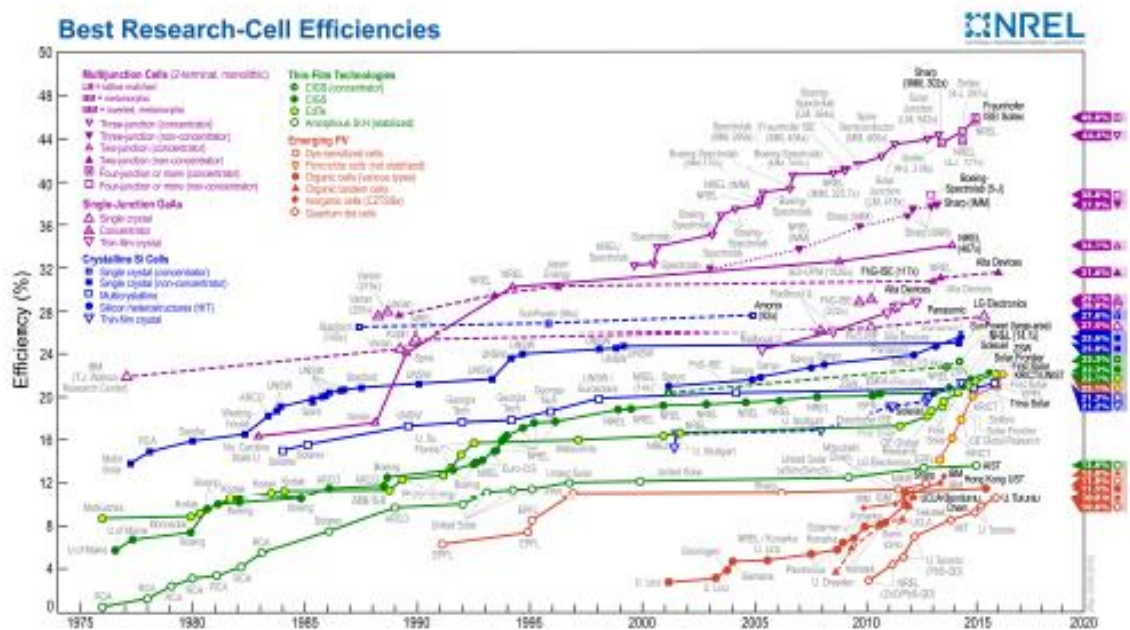


Figure 1.8 : Évolution des rendements de conversion photovoltaïque de 1976 à 2017[3]

1.5.1- Cellules PV à base de Si en plaquettes :

Les cellules PV à base de Si en plaquettes sont des cellules de 1^{ère} génération. On peut distinguer deux cellules photovoltaïques dans cette filière : monocristallin et poly-cristallin.

1.5.2- Cellules Photovoltaïque à base de Silicium monocristallin :

Le matériau de base des 80% cellules photovoltaïque fabriquer dans le monde est le silicium monocristallin.

Les cellules PV au silicium monocristallin proviennent d'un seul même bloc cristal de silicium. Le processus de fabrication consiste à fondre des lingots de silicium puis de les refroidir, lentement pour conserver un cristal homogène (**monocristallin**). Ces lingots sont ensuite découpés en cellules photovoltaïques, d'une épaisseur d'environ de 300µm. [22]



Figure :1.9: Plaque de silicium monocristallin.

Avantage :

- + Production des panneaux solaires est optimale.
- + Un meilleur rendement (jusqu'à 20%).
- + Une bonne durée de vie de panneau (jusqu'à 30 ans) .

Inconvénient :

- Le coût de production est élevé.
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

1.5.3- Cellules Photovoltaïque à base de Silicium polycristallin:

Les cellules photovoltaïques au silicium poly cristallin sont aisément reconnaissables grâce aux motifs qu'elles affichent.

Lorsque le silicium fondu se refroidi rapidement, on observe la formation de cristaux, de tailles et formes différentes. Les cellules issues de cette technologie ne sont alors pas uniformes et sont de couleur bleu foncé.

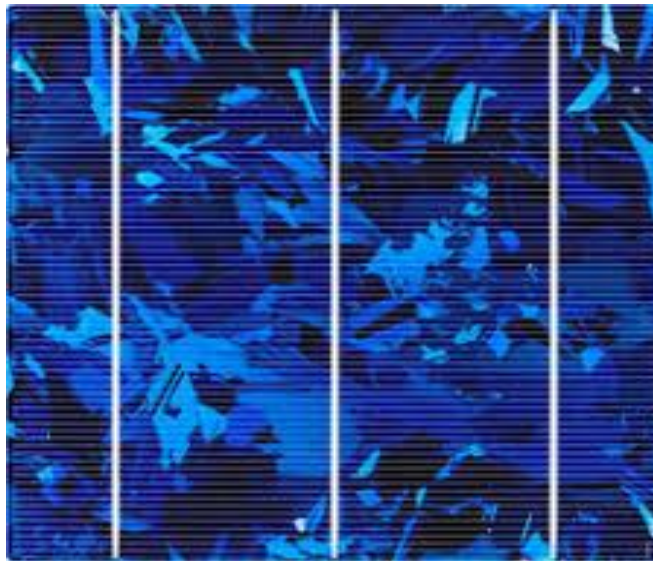


Figure 1.10: Plaque de silicium polycristallin

Avantage :

- + Le cout de production est moins élevé que pour les cellules monocristallines.
- + Bonne' duré de vie des panneaux (jusqu'à 30 ans).
- + Meilleur marché que le monocristallin.

Inconvénient :

- Rendement faible sous n faible éclairement.

1.5.4- Cellules PV à base de Si amorphe :

Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe sont inscrites dans la filière des couches minces.

Elles 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. Les cellules sont de couleurs gris foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». [10]

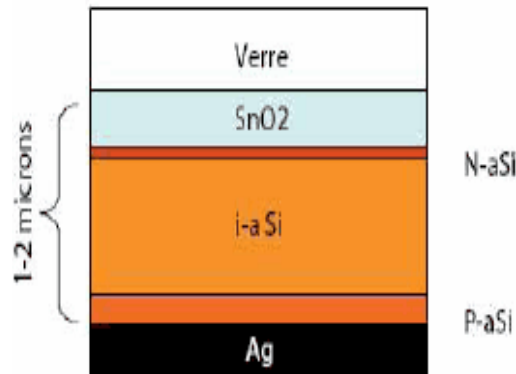


Figure 1.11: structure d'une cellule au silicium amorphe



Figure 5.12 : cellule photovoltaïque au silicium amorphe

Avantage :

- + Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux),
- + Un peu moins chère que les autres techniques,
- + Intégration sur supports souples ou rigides.
- + Rendement de 10 %

Inconvénient :

- Rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7 %
- Nécessite de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m² plus faible, environ 60 Wc/m²)

- Performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite.

1.5.5- Cellules PV à hétérojonction :

Les cellules à hétérojonctions de silicium, basées sur un substrat de silicium cristallin, mettent à profit la très bonne passivation des interfaces par le silicium amorphe.

Le substrat en silicium cristallin c-Si dopé, d'une épaisseur d'une centaine de microns, joue le rôle d'absorbeur. Bien qu'il soit possible de réaliser des cellules HET sur substrat de type P, l'industrie et la recherche se sont essentiellement concentrées sur les cellules HET sur substrat de type N car elles permettent de meilleurs rendements.

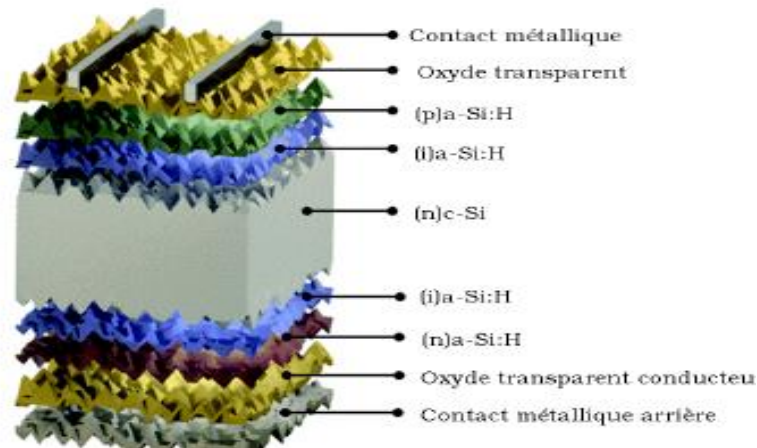


Figure 1.13: Structure d'une cellules photovoltaïque à hétérojonction.

Avantage :

- + L'énergie nécessaire pour la fabrication de la cellule est moins importante que pour une cellule à homojonctions ce qui réduit également le coût de la cellule.
- + La température peu élevée permet de réduire les risques de dégradation du substrat au cours du procédé.
- + Peu coûteuse.

1.5.6- Cellules à base de CdTe :

Le tellure de cadmium (CdTe) est un matériau cristallin à structure cubique composé de cadmium et de tellure. C'est un produit très stable qui accroît le rendement des panneaux, tout en diminuant leur coût, grâce à une meilleure capacité d'absorption de la lumière (maintien d'une bonne performance en cas de faible luminosité, le matin et en

soirée notamment) et à un coefficient thermique bas. Une couche d'absorption en tellure de cadmium est ainsi placée sur un support de verre puis couverte par une autre plaque de verre qui scelle hermétiquement le panneau. Les modes de production et d'utilisation du CdTe ont permis de réduire l'empreinte carbone des technologies de production de cellules et panneaux photovoltaïques. Dans le domaine des panneaux photovoltaïques, c'est la technique qui a l'empreinte carbone la plus basse pour le cycle de vie. Ce produit, en tant que dérivé du cadmium, est toxique.

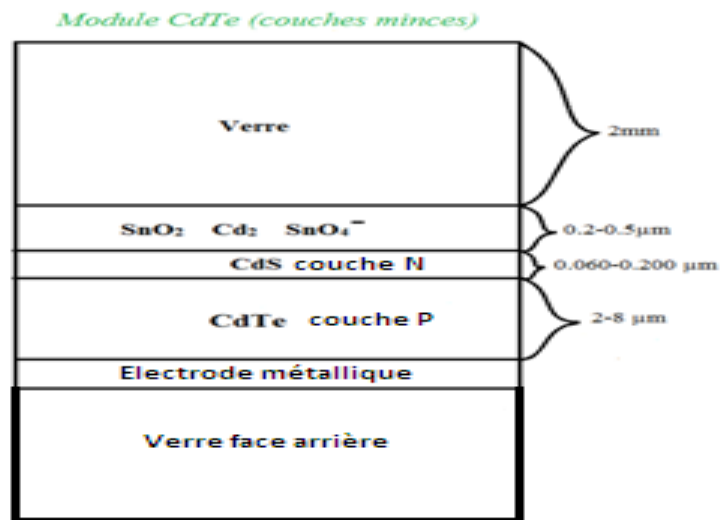


Figure 1.14 : Structure d'une cellule CdTe

Avantage :

- Rendement de 15% à 18%
- Récupérable et recyclable.

Inconvénient :

- Très polluant à cause du Cadmium.
- Utilisation de CdS (Toxique)

1.5.7- Cellules à base de CIGS :

Dans l'alliage CIGS, la concentration d'indium et de gallium peut varier entre du sélénure de cuivre et d'indium pur, et du sélénure de cuivre et de gallium pur. L'alliage CIGS entre principalement dans la fabrication d'une cellule solaire utilisée sous forme d'une couche mince polycristallin, comme dans les cellules de première génération issues du silicium, elles utilisent le principe de la jonction PN. La structure du CIGS forme une jonction complexe constituée de matériaux de natures différentes (hétérojonction) de type CIGS(p)/CdS(n)/ZnO(n) dans les dispositifs à plus haut rendement.....[23]

Ces nouvelles techniques utilisent des métaux rares comme l'indium, le gallium et le germanium.



Figure 1.15: Structure d'une cellule à base de CIGS [4]

1.5.8- Autres filières photovoltaïque :

a- Cellules à colorant :

Les cellules photovoltaïques à colorant sont différentes des cellules photovoltaïques en silicium utilisées à usage domestique, non pas par leur principe de fonctionnement (similaire), mais par les rendements obtenus et les coûts de production. Cette structure offre des coûts de production intéressants mais nécessite l'utilisation d'additifs sous la forme de colorant. Le colorant va avoir un but très précis: celui de produire des électrons d'énergie au moins égale à celle de la bande de conduction du récepteur d'électron qui est un matériau semi-conducteur (oxyde de titane).

Avantage :

- + Le cout de production est très faible
- + La cellule à colorant à une dette énergétique beaucoup plus basse que les cellules classique.

+ La cellule à un rendement pouvant atteindre 11% en laboratoire, ce qui n'est pas négligeable

- + On peut l'utiliser sous une faible luminosité grâce à son utilisation bifaciale
- + Son efficacité est indépendante de la température contrairement à celle en silicium.

Inconvénient :

- L'électrolyte de la cellule est instable.
- Rendement plus faible que celle de silicium, mais largement compensé par son très faible coût.

b- Les cellules organiques :

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. La conversion de l'effet photovoltaïque est plus complexe dans ces cellules à cause de la faible conductivité électrique, la faible constante diélectrique et la morphologie complexe qui empêchent un dopage contrôlé, et qui diminuent l'écrantage. Ainsi, dans ces matériaux, une charge est généralement confinée à une molécule ou au mieux quelques-unes. Les électrons excités restent ainsi liés aux trous, formant un exciton, et ne peuvent se séparer aux interfaces des dispositifs. L'exciton peut également se recombiner après un certain temps, de façon radiative (en émettant de la lumière) ou non, détruisant ainsi les porteurs de charges.....[24]

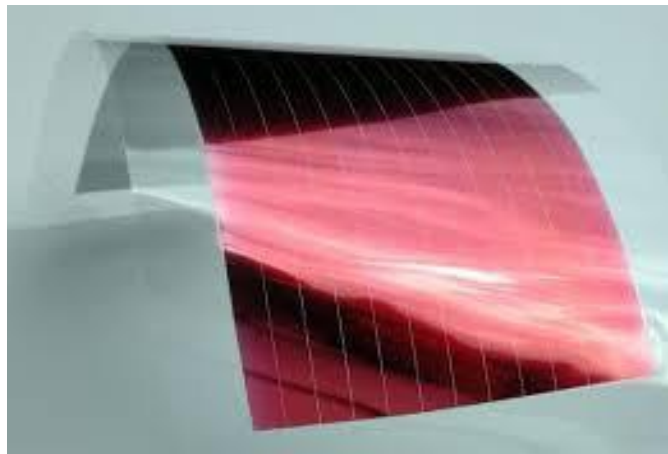


Figure 1.16 : Cellule solaire organique.

c- Cellules à très haut rendement GaAs :

Ce sont des cellules qui utilisent actuellement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs associé ou non à la technologie des cellules solaires à concentration :

- Une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation ;

- Une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction ;
- Une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges.....[3]

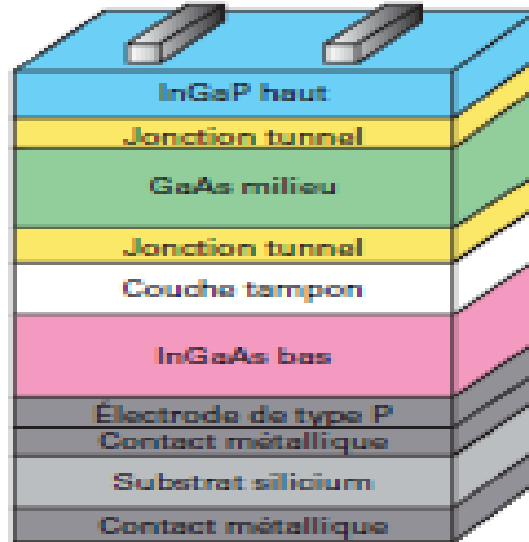


Figure 1.17 :Structure d'une cellule à base de GaAs

Conclusion :

De nombreuses innovations ont été nécessaires depuis la découverte de l'effet photovoltaïque pour obtenir les cellules actuellement sur la marché.

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une petite introduction d'énergie solaire en globale et des cellules solaire en spéciale. Après nous avons donné le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, ses caractéristiques électriques et aussi on a parlé de rayon solaire. Nous avons aussi parlé sur les cellules photovoltaïques à base de silicium, en précisant leurs avantages et inconvénients.

Chapitre 02 :

*Cellule photovoltaïque à hétérojonction de
Silicium*

Introduction :

En 1951, William Shockley a proposé d'utiliser une hétérojonction abrupte comme injecteur base-émetteur efficace dans un transistor bipolaire. La même année, Gubanov a publié un article théorique sur les hétérojonctions. Depuis, les hétérojonctions ont été largement étudiées, et de nombreuses applications (existant bien souvent avec des homojonctions) ont pu être améliorées ou être opérationnelles à température ambiante. On cite notamment les diodes électroluminescentes, les diodes lasers, les photos détecteurs, les cellules solaires, etc.

2.1- Définition de hétérojonction :

Une hétérojonction est une jonction entre deux semi-conducteurs dont le gap (la bande interdite) est différent. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être notamment assez proche). Les hétérojonctions ont une importance considérable en physique des semi-conducteurs et en optique.[19]

Il existe deux hétérojonctions, selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs qui constituent cette hétérojonction :[21]

- les hétérojonctions isotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage.
- les hétérojonctions anisotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment.

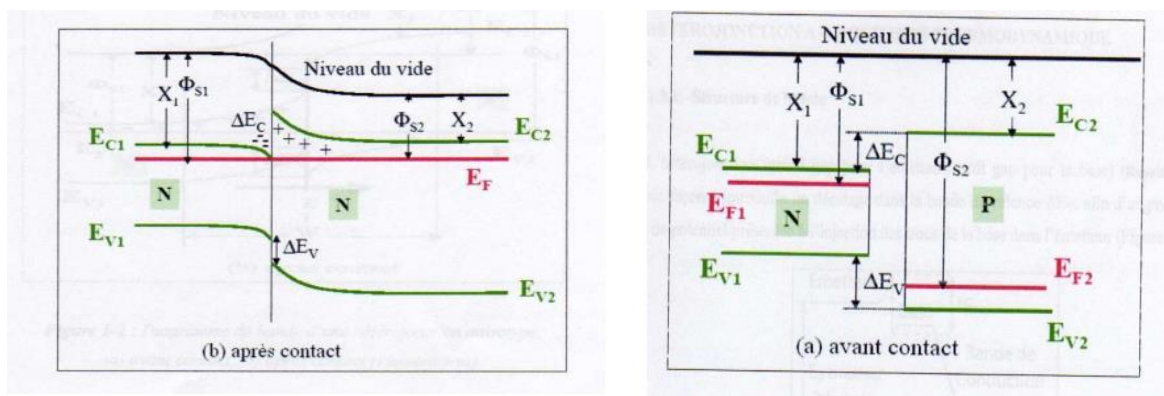


Figure 2.1: Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype, (a) avant contact, (b) après contact.[21]

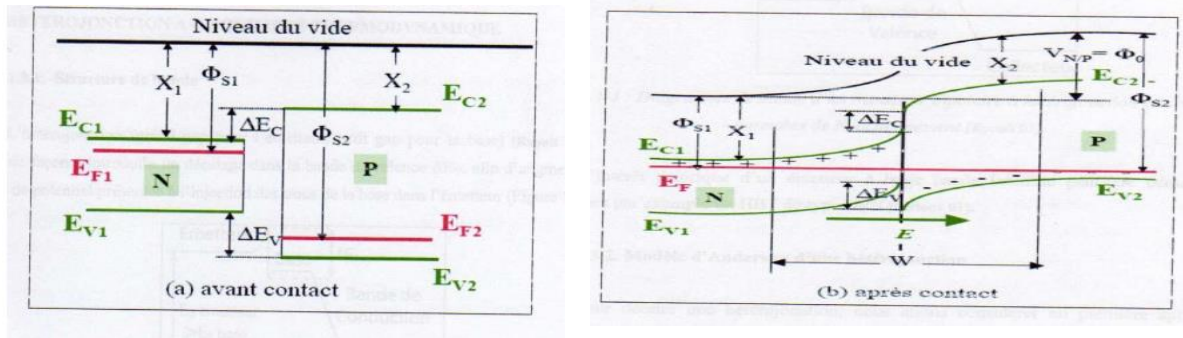


Figure 2.2 : Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotypes, (a) avant contact, (b) après contact.[21]

2.2- Cellule à hétérojonction de silicium :

Les cellules à hétérojonctions de silicium, basées sur un substrat de silicium cristallin, mettent à profit la très bonne passivation des interfaces par le silicium amorphe hydrogéné. Nous détaillerons dans cette partie la structure des cellules HET, leurs avantages et le diagramme des bandes de ces cellules.

2.2.1- Structure des cellules à hétérojonctions de silicium :

Le substrat en silicium cristallin c-Si dopé, d'une épaisseur d'une centaine de microns, joue le rôle d'absorbeur. Bien qu'il soit possible de réaliser des cellules HIT sur substrat de type P, l'industrie et la recherche se sont essentiellement concentrées sur les cellules HIT sur substrat de type N car elles permettent de meilleurs rendements..... [20]

La figure présente les différentes couches de matériaux d'une structure standard d'une cellule HIT. Après l'attaque chimique réalisée sur les deux faces de c-Si pour créer la texturation et diminuer la réflectivité, les couches de silicium amorph

e hydrogéné a-Si: d'une dizaine de nanomètres sont déposées. En face avant, la couche de a-Si: est composée de deux parties :

- une couche intrinsèque (i) a-Si: utilisée pour passiver la surface du c-Si.
- une couche fortement dopée de type P qui joue le rôle d'émetteur de la jonction P/N

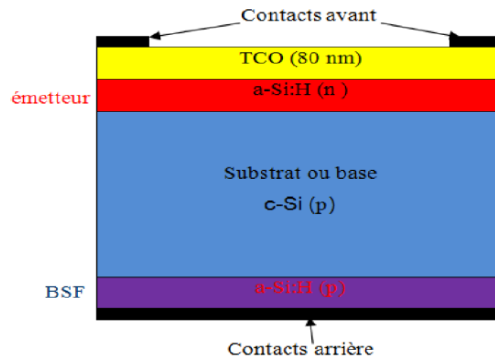


Figure 2.3 : Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium (a-Si :H / c-Si.).

2.2.2- Les deux semi-conducteurs de base :

a- Le silicium cristallin :

On distingue deux catégories selon la technologie employée.

- Le silicium monocristallin : C'est le matériau le plus abondant. Il présente un bon rendement à fort et moyen éclairement. Il est constitué d'un seul cristal ordonné. Les photopiles à base de silicium monocristallin sont parmi les plus performantes (après celles à l'arséniure de gallium).
- Le silicium multi cristallin : Il est constitué de cristaux assemblés appelé grains. Il est un peu moins performant que le précédent et aussi moins onéreux. Les atomes du silicium cristallin sont régulièrement disposés et fermement liés les uns aux autres. Chacun est lié à 4 atomes voisins avec lesquels il partage les quatre électrons de sa couche M. La répartition étant régulière on peut considérer qu'un atome est au centre d'un tétraèdre et que ses 4 voisins sont placés au sommet de ce tétraèdre. On dit que le silicium a une structure tétraédrique.

b- Le silicium amorphe :

Le silicium amorphe (a-Si), à la différence du silicium cristallin (c-Si), ne possède pas d'organisation atomique régulière, du moins à longue distance. En fait, un ordre local est préservé dans le silicium amorphe, les liaisons chimiques entre un atome Si et ses plus proches voisins satisfont la configuration tétraédrique où chaque atome est lié à ses 4 voisins (distants de 0.23 nm) par une liaison covalente.

2.2.3- Les composants principaux de la cellule à hétérojonction de silicium :

1- L'oxyde transparent conducteur (OTC) :

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. L'OTC doit avoir certaines propriétés :

- Il doit être avoir une excellente transparence optique. Etant placé sur la face avant, cette condition est nécessaire pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule pour générer des paires électron-trou ;
- Il doit avoir une bonne conductivité pour assurer la collecte des porteurs ;
- Il doit aussi avoir une bonne adhérence sur une variété de substrats.

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possible tel que les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn).

2- La couche tampon :

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) afin d'optimiser les performances de la cellule.

Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- une bande interdite intermédiaire permettant une transition "*souple*" entre celle du semi-conducteur et celle de l'OTC, soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains.

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction de silicium, la couche tampon est une couche de silicium amorphe hydrogéné d'une épaisseur de quelques nm qui est déposées grâce à la technique de CVD assistée par plasma ou par filament chaud (Plasma Enhanced CVD et Hot Wire CVD).
[19]

3- La couche absorbante :

La couche absorbante est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en

paires électrons-trous, une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, autrement dit la valeur de sa bande interdite directe (gap), soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV.

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction de silicium l'absorbeur est le silicium cristallin.

4-L'émetteur

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au substrat ou du c-Si fortement dopé dans le cas d'une homojonction. L'émetteur permet d'avoir une jonction (p-n) afin de séparer les paires électron-trou photo générés. Il doit être pris très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. Toute fois, c'est une couche qui a une résistance carrée importante d'où la nécessité de la couvrir d'un excellent conducteur (métal ou oxyde transparent conducteur) pour assurer la collecte des porteurs. [13]

4- Le Back Surface Field: BSF

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui permet également de passiver la face arrière de la cellule. Le BSF est une couche fortement dopé (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat. Avec une jonction p+-p ou n+-n, une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre le substrat et le BSF.

Cette barrière de potentiel sur la face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires dans le substrat et ainsi d'éviter qu'ils ne se recombinent sur la face arrière de la cellule. La structure BSF permet de réduire les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires. [23]

5- Les contacts :

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards représentées sur (la figure2.2). Ces contacts permettent de collecter la courante photo générée. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact. Outre un choix de métal donnant des contacts ohmiques, il est aussi important d'avoir des résistances de contact le plus faible possible. [13]

2.2.4- Diagramme des bandes :

À partir des énergies de bord de bande de conduction E_C et de valence E_V associées à l'énergie du niveau de Fermi E_F , il est possible de construire le diagramme des bandes d'un semi-conducteur. Ce diagramme est défini à partir d'un niveau de référence $E_{vac} = 0$ appelé niveau d'énergie du vide.

À l'équilibre, le schéma ci-dessous représente la position des bandes de conduction et de valence par rapport au niveau de fermi.

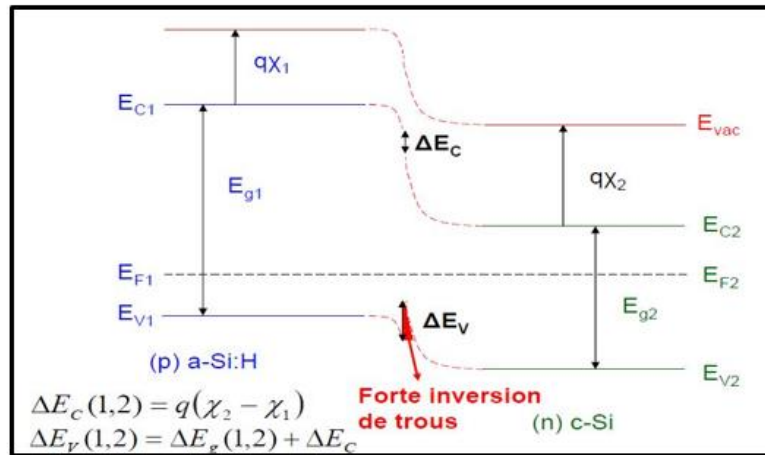


Figure 2.4: diagramme des bandes type d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si à l'équilibre.

Le niveau de Fermi varie en fonction de la température mais surtout du dopage. À l'équilibre, le niveau de Fermi est le même dans toute la structure. L'affinité électronique (qx) est l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la bande de conduction vers le niveau du vide. Elle vaut 4.05 eV pour le silicium cristallin et 3.87 eV pour le silicium amorphe.

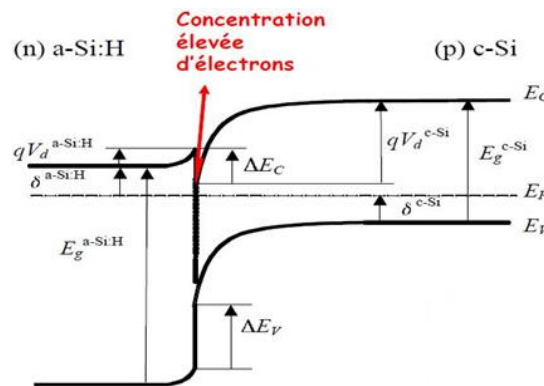


Figure 2.5 : diagramme des bandes type d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si à l'équilibre.

2.2.5- Développement et avantages de la technologie des cellules à hétérojonction de silicium :

Les premiers composants à base d'hétérojonctions a-Si:H/c-Si (diode) ont été réalisés par l'équipe de Walter FUHS. Cette découverte fut exploitée par l'entreprise japonaise

SANYO pour réaliser des cellules solaires. SANYO a commencé ces premiers travaux sur les cellules silicium à hétérojonctions a-Si:H/c-Si vers la fin des années 1980 et la première

publication a été faite en 1991 [14]. SANYO domine actuellement le marché de la production des cellules silicium à hétérojonctions avec ses cellules HIT (**H**eterojunction with **I**ntrinsic **T**hin film) dont l'originalité est d'utiliser une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (non dopé) entre le silicium amorphe hydrogéné dopé et le silicium cristallin (Voir la Figure.2.6). Cette couche de silicium amorphe intrinsèque joue un rôle primordial dans les valeurs élevées de V_{co} obtenues avec la technologie HIT.

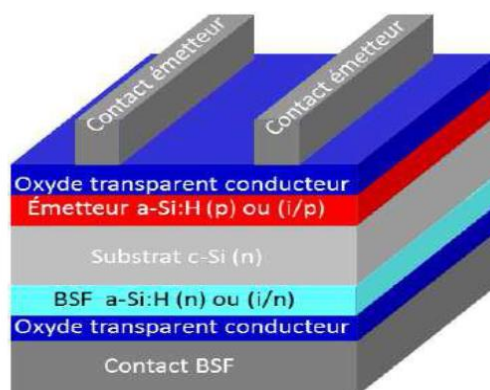


Figure 2.6: Structure d'une cellule HIT.

La technologie des cellules silicium à hétérojonctions possède plusieurs avantages :

- Elle possède un grand potentiel d'amélioration du rendement avec l'optimisation du dépôt du silicium amorphe (passivation du silicium cristallin).
- L'intégralité du procédé de fabrication est à basse température (autour de 200 °C) ce qui permet de baisser considérablement le budget thermique.
- Les cellules silicium à hétérojonctions possèdent aussi une meilleure constance du rendement avec la température.

2.2.6- Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction silicium :

Il est possible de définir différents critères permettant la fabrication de cellules Si-HJ à hauts rendements. Ces dispositifs doivent être optimisés en fonction de plusieurs exigences [15] :

- Une densité d'états d'interface minimale est nécessaire. Pour cela, le nettoyage de la surface est une étape cruciale afin d'éviter toute contamination avant le dépôt des couches a-Si:H.
- Le dopage des couches a-Si:H (n) et (p) doit être suffisant pour assurer un champ électrique élevé ainsi qu'un bon contact.

- Dans la mesure où les couches dopées sont très défectueuses, il est nécessaire d'insérer une couche de passivation à l'interface. Cette couche tampon doit permettre la diminution des recombinaisons de surface, tout en ne gênant pas la conduction des charges ;
- Les valeurs des discontinuités de bandes doivent être contrôlées dans la mesure du possible pour trouver un compromis entre propriétés de passivation (faible discontinuité).
- Les couches d'OTC ainsi que les électrodes métalliques sont soumises à un compromis entre propriétés optiques (réflectivité, absorption, ombrage) et propriétés électriques (conductivité discontinuité) et de conduction.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a abordé le fonctionnement et les caractéristiques d'une hétérojonction plus précisément hétérojonction de silicium qui a un rôle primordiale dans la cellule solaire et qui réside dans l'obtention de très faibles recombinaisons en surface donc réduction des pertes optiques et la résistance série et par suite avoir un bon rendement.

Chapitre 03 :

Modélisation des performances de trois structures photovoltaïque à heterojonction de silicium.

Introduction :

Chaque matériau a ses propres caractéristiques et propriétés qui le rendent meilleur à un autre pour une application donnée.

Dans ce chapitre, On va comparer le comportement de différentes cellules photovoltaïques à base de la hétérojonction de silicium, en utilisant le logiciel AFORS-HET (Vois Annexe I).

Dans une première partie, nous présenterons les deux structures: a-Si(n)/c-Si(p) et a-Si(p)/c-Si(n) ainsi leurs caractéristiques J-V et l'optimisation de différentes paramètres.

Dans une autre étape, l'effet de l'insertion la couche intrinsèque sur les performances des cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium sera étudiée, analysée et discutée.

3.1- Structure et Paramètre de la première cellule photovoltaïque à simuler:

Dans cette section on va présenter la structure de la cellule étudiée.

La structure initiale définie dans AFORS-HET est constituée des couches suivantes (Fig.3.1) :

- Une couche de silicium amorphe de type n (a-Si: (n)) « L'émetteur ».
- Une couche de silicium cristallin de type p (c-Si (p)) « L'absorbeur ».

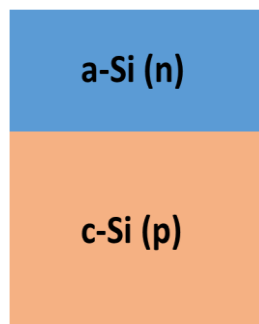


Figure (3.1) : Structure de cellule solaire simulée.

Les différents paramètres pour les différentes couches sont donnés dans le tableau III.1.

Tableau 3.1 : Paramètres utilisée en la simulation.

Paramètre	a-Si(n)	c-Si(p)
Epaisseur (nm)	5	300.000
Permittivité diélectrique	11.9	11.9
Affinité électronique (eV)	3.9	4.05
Energie de gap (eV)	1.72	1.12
Densité efficace de la bande de conduction (cm ⁻³)	10 ²⁰	2.8 10 ¹⁹
Densité efficace de la bande de valence (cm ⁻³)	10 ²⁰	2.6 10 ¹⁹
Mobilité électronique (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	20	1041
Mobilité des trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5	412.9
Concentration des accepteurs (cm ⁻³)	0	1.5 10 ¹⁶
Concentration des donneurs (cm ⁻³)	6,892 10 ¹⁹	0
Vitesse thermique des électrons (cm.s ⁻¹)	10 ⁷	10 ⁷
Vitesse thermique des trous (cm.s ⁻¹)	10 ⁷	10 ⁷
Densité de la couche (g.cm ⁻³)	2.328	2.328
Coefficient de recombinaison Auger pour les électrons (cm ⁶ s ⁻¹)	0	2.2 10 ⁻³¹
Coefficient de recombinaison Auger pour les trous (cm ⁶ s ⁻¹)	0	9.9 10 ⁻³²
Coefficient de recombinaison de bande à bande (cm ³ s ⁻¹)	0	1.1 10 ⁻¹⁴

Résultats et discussion :

3.1.1- Caractéristique J-V (a-Si (n)/ c-Si (p)):

La caractéristique J-V de a-Si(n)/c-Si(p), la structure (Figuer3.1), est calculée dans les conditions standard et elle est représenté dans la (Figuer3.2).

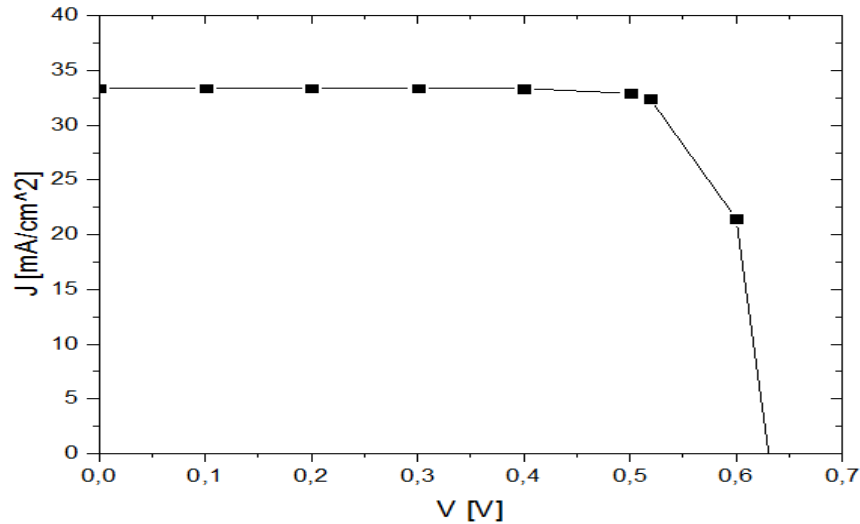


Figure (3.2) : Caractéristiques J-V– (HIT)

Les paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et η sont résumé dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 : les performances de structure de référence

Paramètre	V_{CO} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF%	$\eta\%$
Valeur	627,3	34,52	78,06	16.73

3.1.2- Influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule :

a- L'effet de l'épaisseur a-Si(n) :

Dans cette partie on va étudier dans la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche émettrice (a-Si (n)) pour la cellule :

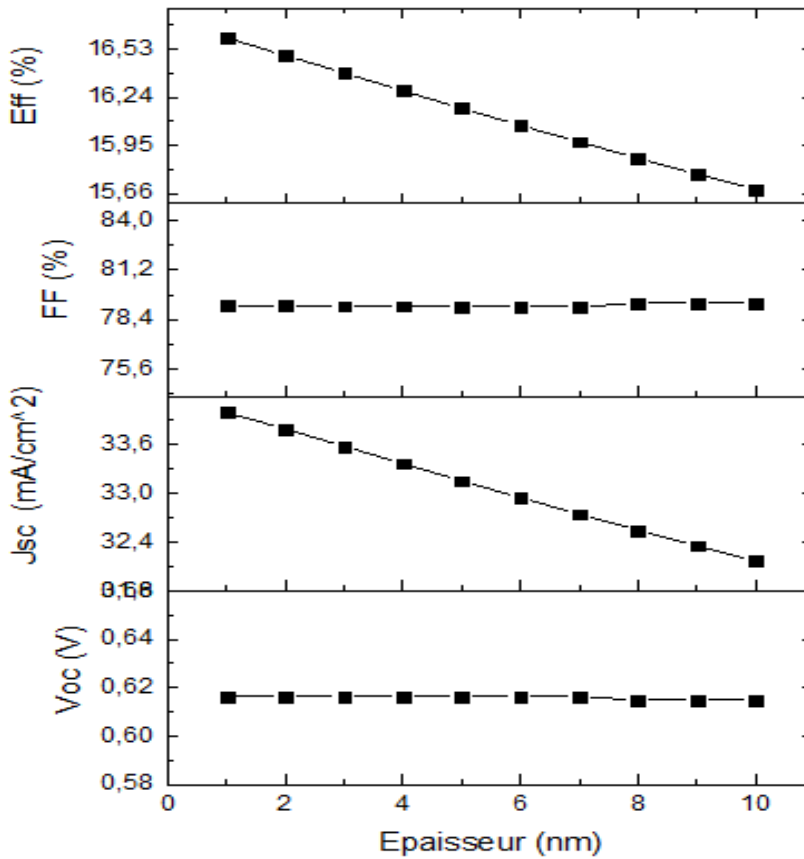


Figure (3.3) : l'effet de l'épaisseur de a-Si (n) sur les performances de la cellule.

D'après la figure (3.3), on remarque que l'augmentation de l'épaisseur conduit à une diminution de J_{sc} de (34.52 mA/cm² à 31.76 mA/cm²) et η de (16.73% à 15.66 %) de la cellule photovoltaïque. Pour le FF et V_{oc} ils restent presque constants.

Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant une couche très mince de a-Si(n), pour cela on a choisi une épaisseur de 3nm comme une épaisseur optimale de notre couche émettrice.

Les résultats sont résumés dans le tableau 3.2

Tableau 3.3 : Les performances en utilisant une épaisseur de 3nm (a-Si(n))

V_{co} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
627,3	34,52	78,06	16.73

b- L'effet de l'épaisseur c-Si(p) :

Dans cette partie on va représenter dans figure (3.4) la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante (c- Si(p)) de notre la cellule :

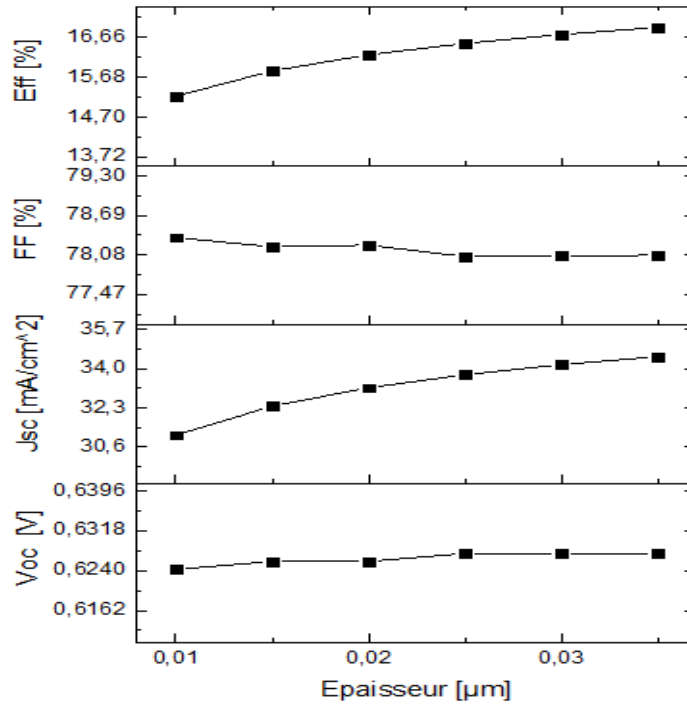


Figure 3.4 : l'effet de l'épaisseur de c-Si(p) sur les performances de la cellule HJ (n-p)

D'après la figure précédente, on remarque qu'il y'a une augmentation de η et J_{sc} (15.02 % à 16.91% et 31.02mA/cm² à 35.25 mA/cm², respectivement).

Concernant le FF et V_{co} , ils restent presque constants.

D'après les résultats et pour les deux cas, les meilleures performances sont obtenues avec une épaisseur de c-Si 350µm.

Concernant notre contribution, on va fixer une valeur de 200µm comme un épaisseur de la couche absorbante afin de réduire la quantité de silicium cristallin utilisé qui a une grande importance dans le prix finale de la cellule photovoltaïque.

Tableau 3.4: les performances de notre cellule avec une épaisseur de la couche c-Si (p) de 200µm

V _{co} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
627,3	34,17	78,07 %	16,91 %

3.1.3- Influence de la concentration dopage sur les performances de la cellule :

Dans cette partie on va traiter un autre paramètre qui a une influence sur le comportement de la cellule PV : la concentration de dopage de différentes couches de la cellule PV.

a- L'effet de dopage a-Si(n) :

Dans cette partie on va représenter dans la figure (3.5) la variation du V_{oc}, J_{sc}, FF et η en fonction de dopage de la couche émettrice (a-Si(n)) pour la cellule :

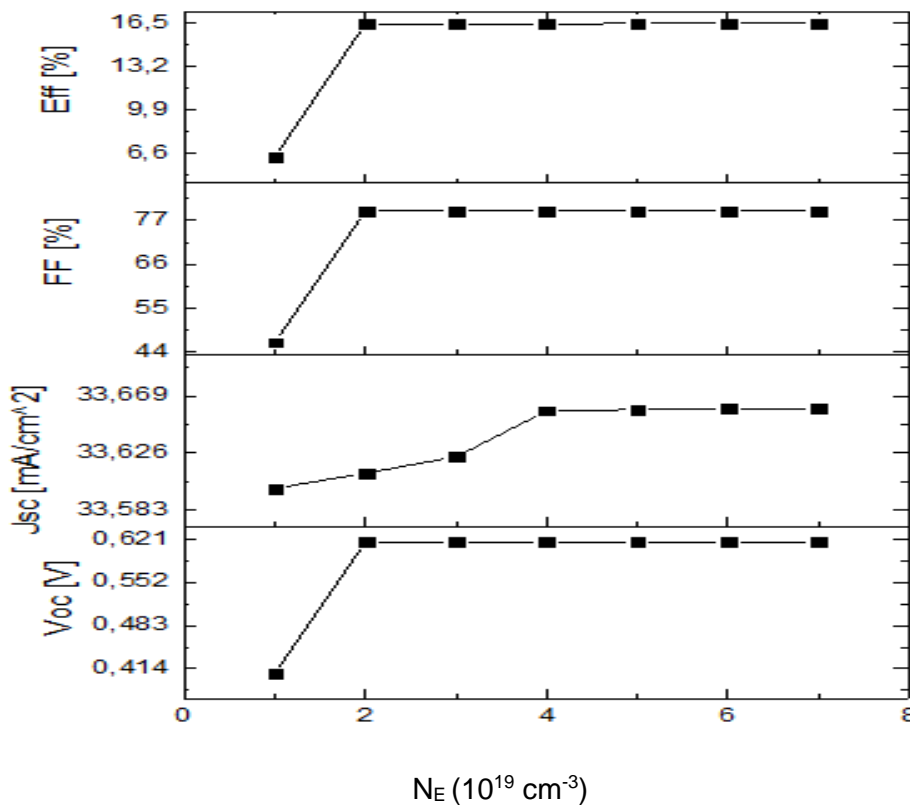


Figure 3. 5 : l'effet de dopage de a-Si(n) sur les performances de la cellule .

Dans la figure (3.5) nous remarquons que les performances V_{co} , FF et η augmentent quand NE augmente (V_{co} de 0.414mV à 0.621 mV, FF de 44 % à 77% ; η de 6.6% à 16.5%), mais au-dessus de la valeur $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ils deviennent constant.

Concernant de J_{sc} , il reste presque constant (faible variation).

Note : D'après ces résultats on a choisi $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ comme une valeur optimale.

b- L'effet de dopage c-Si (p) :

Dans cette partie on va représenter dans la figure (3.6) la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de dopage de la couche absorbant (c-Si(p)) pour la cellule étudiée.

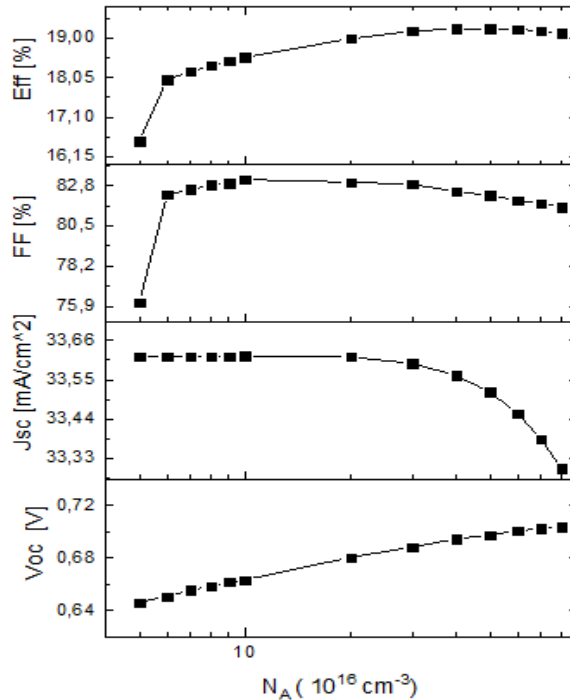


Figure (3. 6) : l'effet de dopage de c-Si(p) sur les performances de la cellule .

Cette figure indique que la concentration de dopage influe principalement sur V_{co} , FF et η , d'autre part, J_{sc} reste presque constante (faible variation).

D'après les résultats obtenus nous considérons que N_A sera $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ puisqu'elle nous donne une bonne performance.

3.2 - Structures et paramètres de la deuxième cellule à simuler :

Dans cette section on va présenter notre deuxième structure. Elle est constituée des couches suivantes (Fig.3.7) :

Une couche de silicium amorphe de type n (a-Si(p)) « L'émetteur ».

Une couche de silicium cristallin de type p (c-Si (n)) « L'absorbeur ».

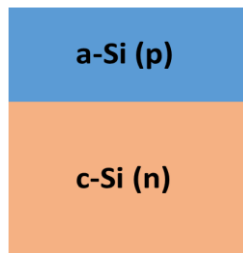


Figure (3.7) : Structures de cellules solaires simulées .

➤ Résultats et discussion :

3.2.1- Caractéristique J-V (a-Si (n)/c-Si (p)) :

La caractéristique J-V de a-Si (n)/c-Si (p), la structure (Figure 3.7), est calculée dans les conditions standard, et elle est représentée dans la (Figure 3.8).

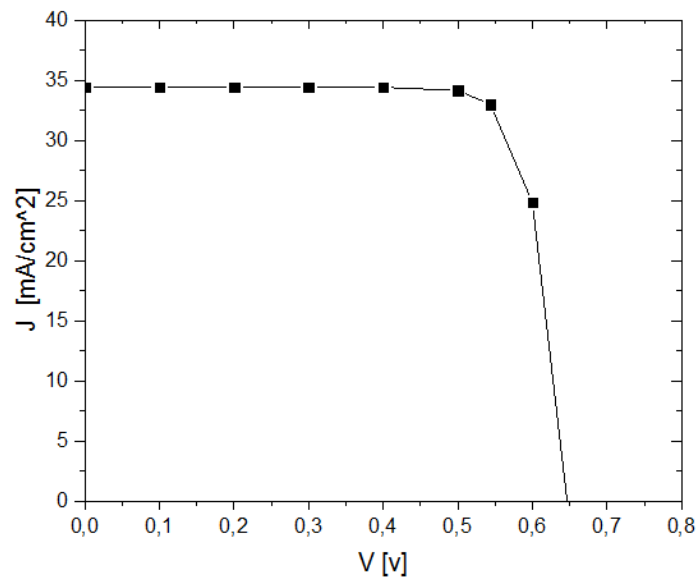


Figure (3.8) : Caractéristiques J-V.

D'après cette caractéristiques J-V (Figure 3.8), on retire une tension de circuit ouvert, $V_{oc} = 0,647$ V ; une densité de courant de court-circuit ; $J_{sc} = 34,45$ mA/cm² ; un facteur de forme, $FF = 80,46\%$ et un rendement $\eta = 17,95\%$.

a- L'effet de l'épaisseur a-Si(p) :

Dans cette partie on va représenter dans la figure (3.9) la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche émettrice (a-Si) pour la cellule :

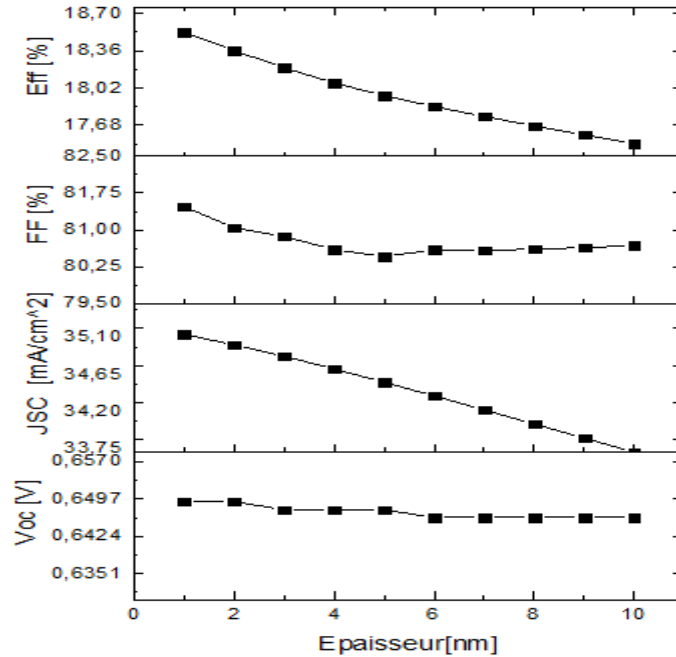


Figure (3.9) : l'effet de l'épaisseur de a-Si(p) sur les performances de la cellule.

Pour a-Si (p), l'augmentation de l'épaisseur conduit à une diminution de J_{sc} de 35,01 mA/cm² à 31,76 mA/cm² et de η de 18,70% à 16,25% de la cellule solaire. Pour le FF et V_{oc} ils restent presque constants.

b- L'effet de l'épaisseur c-Si(n) :

Dans cette partie on va représenter figure (3.10) la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η l'effet de l'épaisseur de a-Si(p) sur les performances de la cellule .

Pour a-Si (p), l'augmentation de l'épaisseur conduit à une diminution de J_{sc} de 35,01 mA/cm² à 31,76 mA/cm² et de η de 18,70% à 16,25% de la cellule solaire. Pour le FF et V_{oc} ils restent presque constants.

en fonction de l'épaisseur de la couche abs(c- Si) pour la cellule :

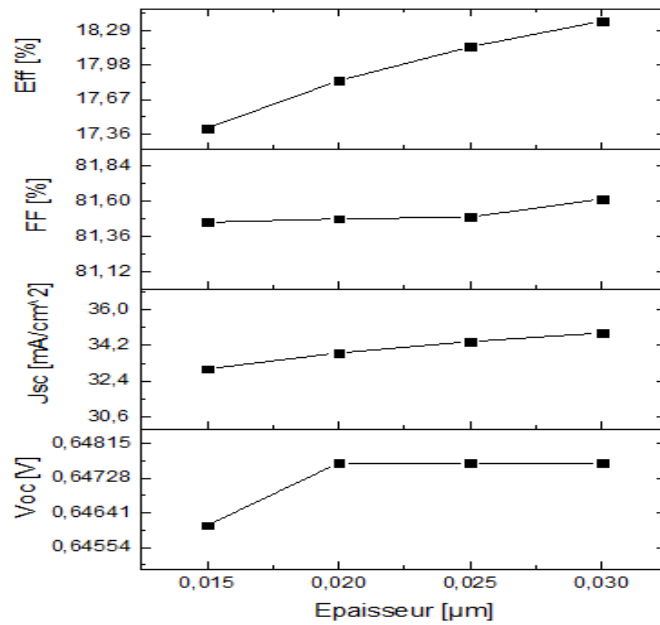
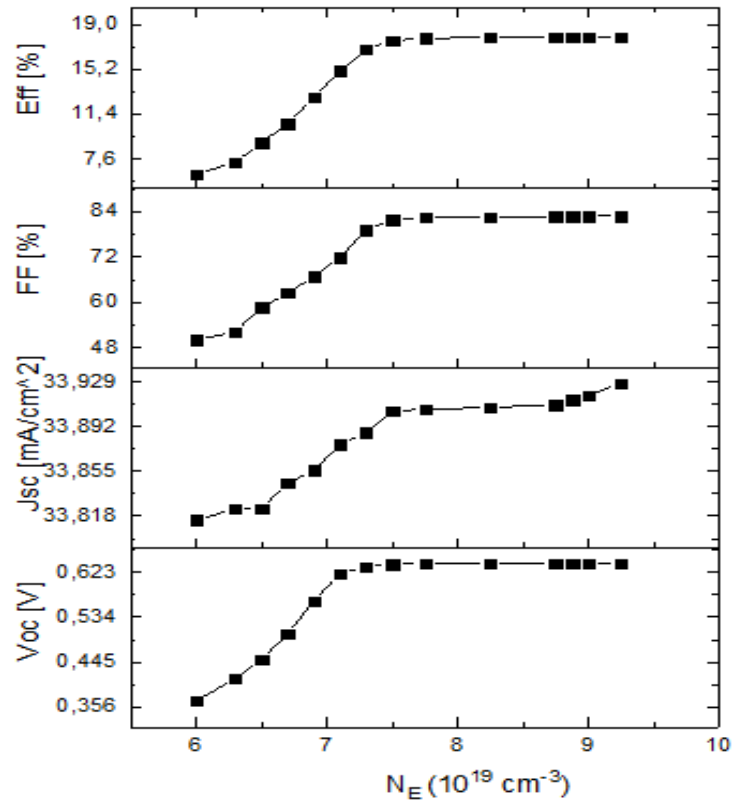


Figure (3.10): l'effet de l'épaisseur de c-Si(n) sur les performances de la cellule .

Pour **c-Si(n)** : on remarque que l'augmentation de l'épaisseur conduit à une augmentation de J_{sc} de (32.4 mA/cm² à 35.76 mA/cm²) et de η de (17.36% à 18.61 %) de la cellule solaire. Pour le FF et V_{oc} ils restent presque constants.

c- L'effet de dopage a-Si(p) :

Dans cette partie on va représenter dans la figure (3.11) la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de dopage de la couche émettrice (a-Si) pour la deuxième structure étudiée :



Figure(3.11) : l'effet de dopage de a-Si(p) sur comme une valeur optimale.

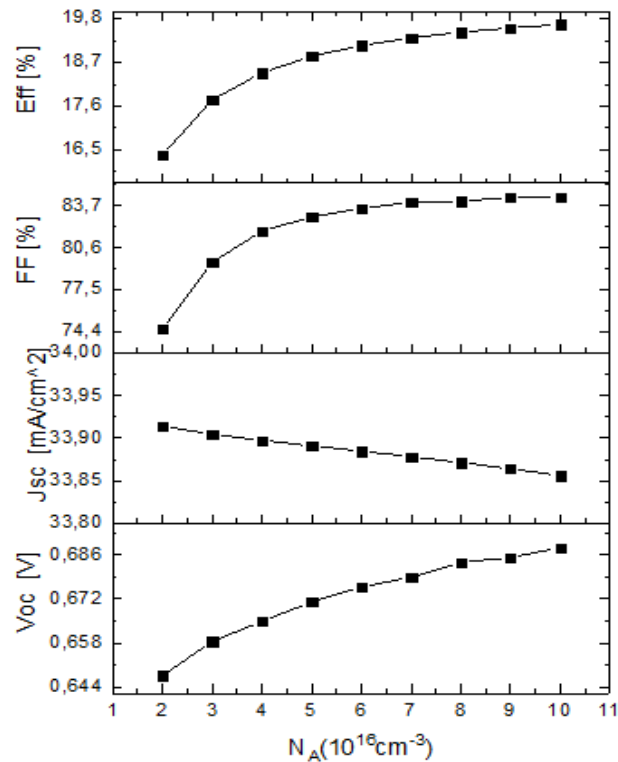
Dans la figure (3.11) nous remarquons que les performances V_{co} , FF et η augmentent quand N_E augmente (V_{co} de 0.356mV à 0.623 mV, FF de 50 % à 80% ; η de 6.6% à 18.5%), mais au-dessus de la valeur $7,51 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ils deviennent constant.

Concernant de J_{sc} , il reste presque constant (faible variation).

D'après ces résultats on a choisi $7,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ comme une valeur optimale.

d- L'effet de dopage c-Si(n) :

Dans cette partie on va représenter dans la figure (3.12) la variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de dopage de la couche absorbant (c-Si) pour la cellule :



Figure(3.12): l'effet de dopage de c-Si(n) sur les performances de la cellule.

D'après cette figure de l'effet de la concentration de dopage de la couche de c-Si(n) nous remarquons que V_{oc} , FF et Eff augmentons quand N_A augmente autant que J_{sc} reste presque constante (V_{oc} de 0.664 à 0.686V, FF de 74.4 à 83.7%, η de 15.85 à 19.34 %, $J_{sc} \approx 33.90 \text{mA/cm}^2$). Pour cela on a choisi 10^{17} comme une valeur optimale.

➤ Interprétation des résultats obtenus :

Concernant l'influence de l'épaisseur de la couche émettrice : l'augmentation de l'épaisseur conduit à l'augmentation de la longueur de diffusion ce qui veut dire qu'on a une augmentation des pertes d'absorption dans la couche émettrice qui explique la diminution de J_{sc} , et puisque cette dernière est en relation avec le rendement on a remarqué qu'il a diminué aussi.

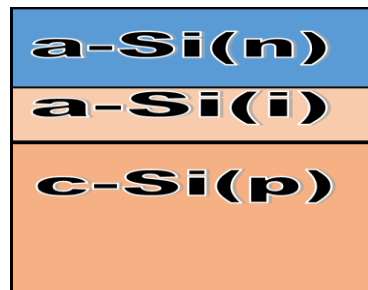
Contrairement, l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur conduit à une augmentation du nombre des porteurs de charge libre donc une amélioration de la densité du courant de court-circuit sera observée.

D'autre part, la variation de la concentration de dopage conduit à une variation dans la largeur de la zone de charge d'espace et aussi de sa hauteur, par conséquent une variation dans les performances de la cellule photovoltaïque.

3.3-Structures et paramètres de la cellule avec couche intrinsèque à simuler :

Dans cette section on va présenter la structure de la troisième cellule étudiée. La structure est constituée des couches suivantes (Figure 3.13) :

- Une couche de silicium amorphe de type n (a-Si (n)) « L'émetteur ».
- Une couche intrinsèque de silicium amorphe (a-Si (i)).
- Une couche de silicium cristallin de type p (c-Si (p)) « L'absorbeur ».



Figure(3.13) : : Structures de cellules solaires simulées –(HIT)

➤ Résultats et discussion :

a- Caractéristique J-V (a-Si (n)/a-Si (i)/c-Si (p)) :

La caractéristique J-V de a-Si (n)/a-Si (i)/c-Si (p), la structure (Figure 3.13), est calculée dans les conditions standard, et elle est représentée dans la figure (3.13)

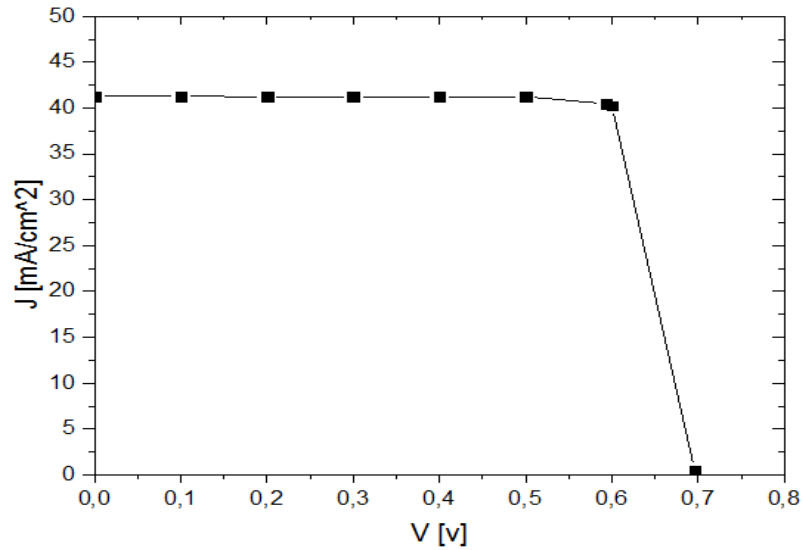


Figure (3.14) : Caractéristiques J-V- (HIT) avec couche intrinsèque

Les paramètres V_{CO} , J_{sc} , FF et η sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 : les performances de structure de référence

Paramètre	V_{CO} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Valeur	669,1	41,27	83,66	24,03

3.4- Comparaison entre les trois structures :

Dans le tableau suivant, on illustre les différentes structures avec leurs performances.

Tableau 3.6: Comparaison entre les différentes structures

Paramètre	a-Si (n)/c-Si (p)	a-Si (p)/c-Si (n)	a-Si (n)/a-Si(i)/c-Si (p)
V_{CO} (mV)	627.3	647.7	669.1
J_{sc} (mA/cm ²)	34.52	34.45	41.27
FF (%)	78.06	80.46	83.66
Eff (%)	16.73	17.95	24.03

D'après ce tableau, nous remarquons que les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la cellule photovoltaïque avec une couche intrinsèque.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié, analysé et discuté les performances des cellules photovoltaïques à base des structures : a-Si (n)/c-Si (p), a-Si (p)/c-Si (n) et a-Si (n)/a-Si(i)/c(p).

Comme résultat, on a remarqué que la cellule PV avec un dopage de type p, pour la couche absorbante, fournit des performances plus importantes que celle de cellule avec un dopage de type(n).

D'autre part, l'insertion d'une couche de silicium amorphe type intrinsèque améliore les performances d'une façon considérable.

Conclusion générale

Dans ce travail de mémoire, nous avons étudié par simulation numérique une cellule solaire à hétérojonction de silicium.

Dans le premier chapitre, nous avons donné les notions fondamentales sur le rayonnement solaire nécessaires à la compréhension du fonctionnement de la cellule solaire, les caractéristiques électriques, les différents types des cellules solaires. Dans le deuxième chapitre on a parlé des hétérojonctions de silicium.

le troisième chapitre c'était la base de notre travail. Où nous avons étudié, analysé et discuté les performances des cellules photovoltaïques à base des structures : a-Si (n)/c-Si (p), a-Si (p)/c-Si (n) et a-Si (n)/a-Si(i)/c-Si (p).

Les performances étudiées sont : la tension de circuit ouvert V_{CO} , le courant de court-circuit J_{SC} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η qui sont à leur tour calculer numériquement à partir de la caractéristique courant-tension (J-V) à l'aide de logiciel AFORS-HET.

Les résultats obtenus montrent que :

- Plus l'épaisseur de la couche émetteur est faible, plus que le rendement sera grand.
- Le rendement sera plus grand si l'épaisseur de la couche absorbeur est grande.
- La cellule PV avec un dopage de type p, pour la couche absorbante, fournit des performances plus importantes que celle de cellule avec un dopage de type n.
- L'insertion d'une couche de silicium amorphe de type intrinsèque entre l'émetteur et l'absorbeur améliore les performances d'une façon considérable.

Enfin, la structure de la cellule à hétérojonction avec couche intrinsèque donne les meilleures caractéristiques photovoltaïques suivantes : $J_{SC}=41.27 \text{ mA/cm}^2$; $V_{CO}=669.1 \text{ mV}$; $FF = 83.66\%$ et $(\text{Eff}) \eta = 24.03 \%$

Comme perspective, on souhaite fabriquer et caractériser cette cellule avec ces paramètres optimaux

ANNEXE

1- Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET :

Le logiciel AFORS-HET (Automate FOR Simulation of HETero structures) est un outil de simulation numérique à une dimension (1D), développé en Allemagne par le laboratoire Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) [25]. Ce logiciel est particulièrement adapté aux simulations des cellules solaires à hétérojonctions à base de silicium [17]. AFORS-HET possède une interface graphique intuitive qui permet de définir aisément des structures (assemblage de couches) dont on peut contrôler la plupart des paramètres physiques (affinité électronique, énergie de gap, mobilité, dopage, etc.). Cette interface est divisée principalement en trois zones, figure (A1.1) :

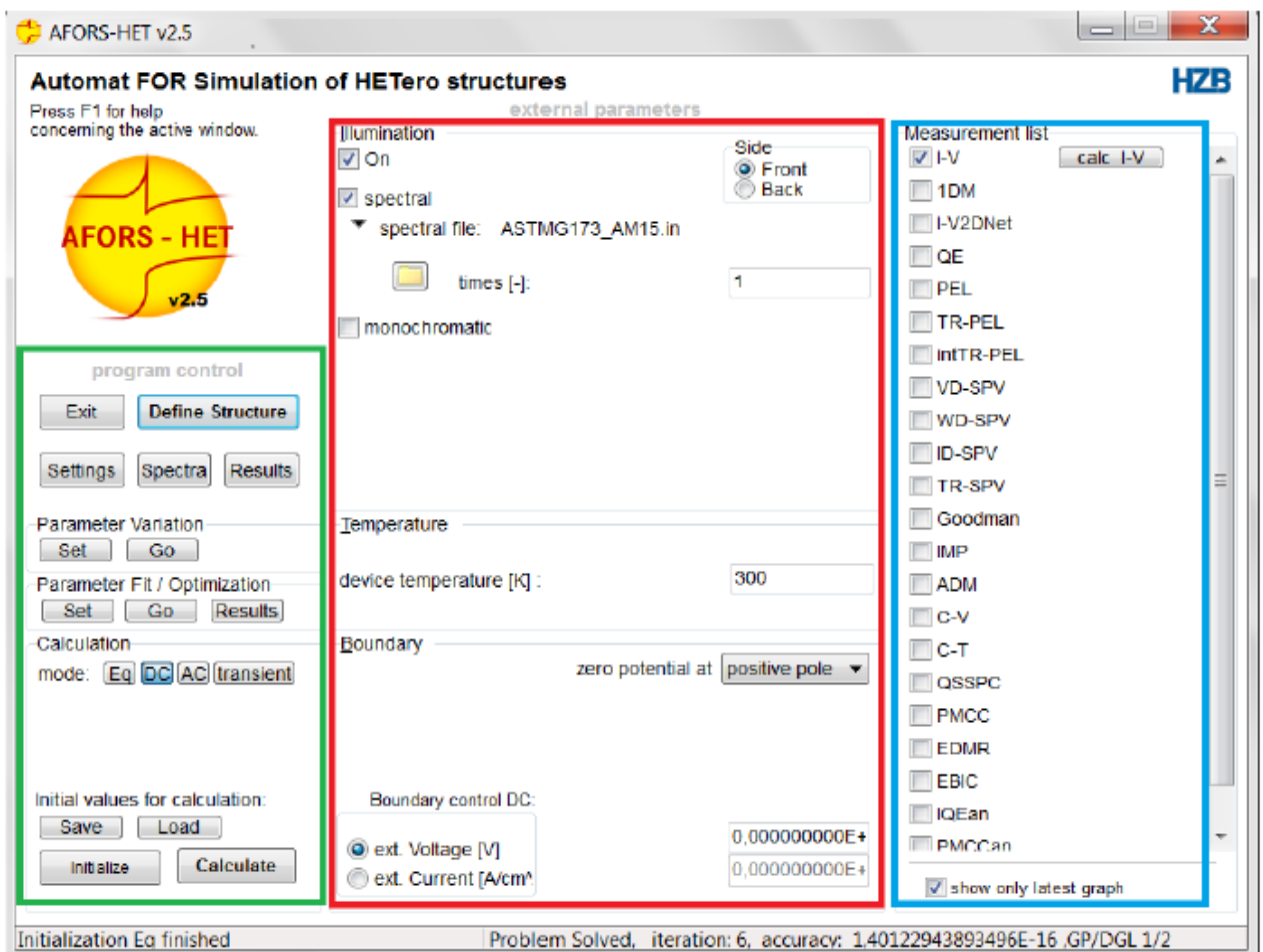


Figure A1.1 :Interface graphique du logiciel de simulation 1D AFORS-HIT

a- Première zone : Zone de contrôle

C'est la zone où on peut définir la structure à simuler, ainsi que les paramètres de chaque matériau utilisé. Dans une structure on peut trouver : un contact avant, contact arrière et un certain nombre de couches entre lesquelles existent des interfaces.

a- Deuxième zone : External paramètres

Les paramètres externes sont divisés en trois groupes : la température externe, le spectre d'illumination et les conditions aux limites.

b- Troisième zone : Measurements

C'est là où on peut choisir la mesure à effectuer.

2- Etapes de simulation :

La structure initiale définie dans AFORS-HET est donc constituée des couches suivantes (classées de l'avant à l'arrière de la cellule), figure (AI-2):

1. Contact avant ;
2. Interface (Idéal-Electron-Contact) ;
3. couche de silicium amorphe type (n) a-Si (n) ;
4. Interface (drift-diffusion);
5. couche de silicium cristallin type (p) c-Si(p) ;
6. Interface (MS-Schottky-Contact) ;
7. Un contact arrière.

Il est à noter que les modèles numériques à l'interface des couches seront spécifiés lors de la définition de la structure.

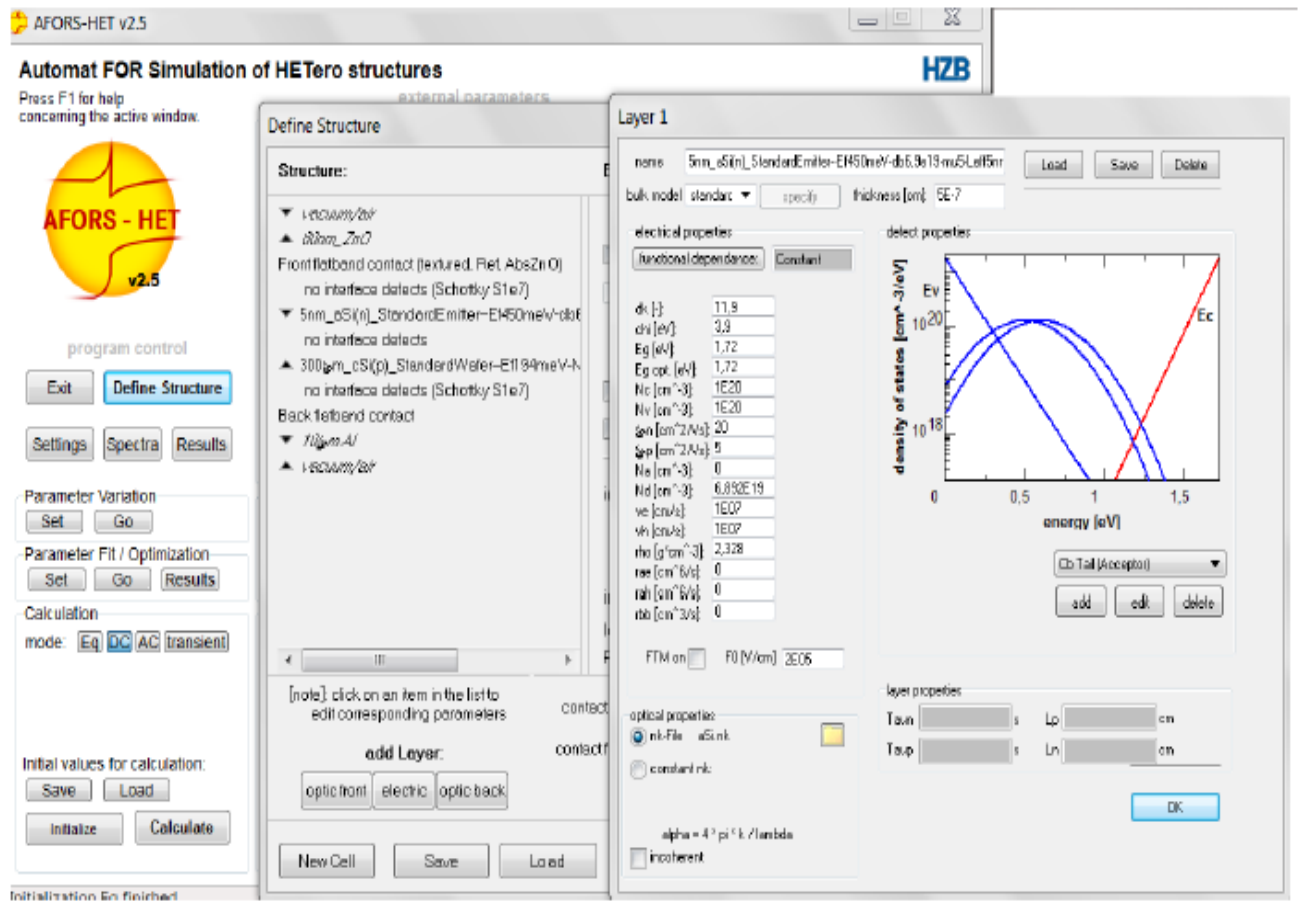


Figure A1.2 : Définition de la structure et introduction des paramètres.

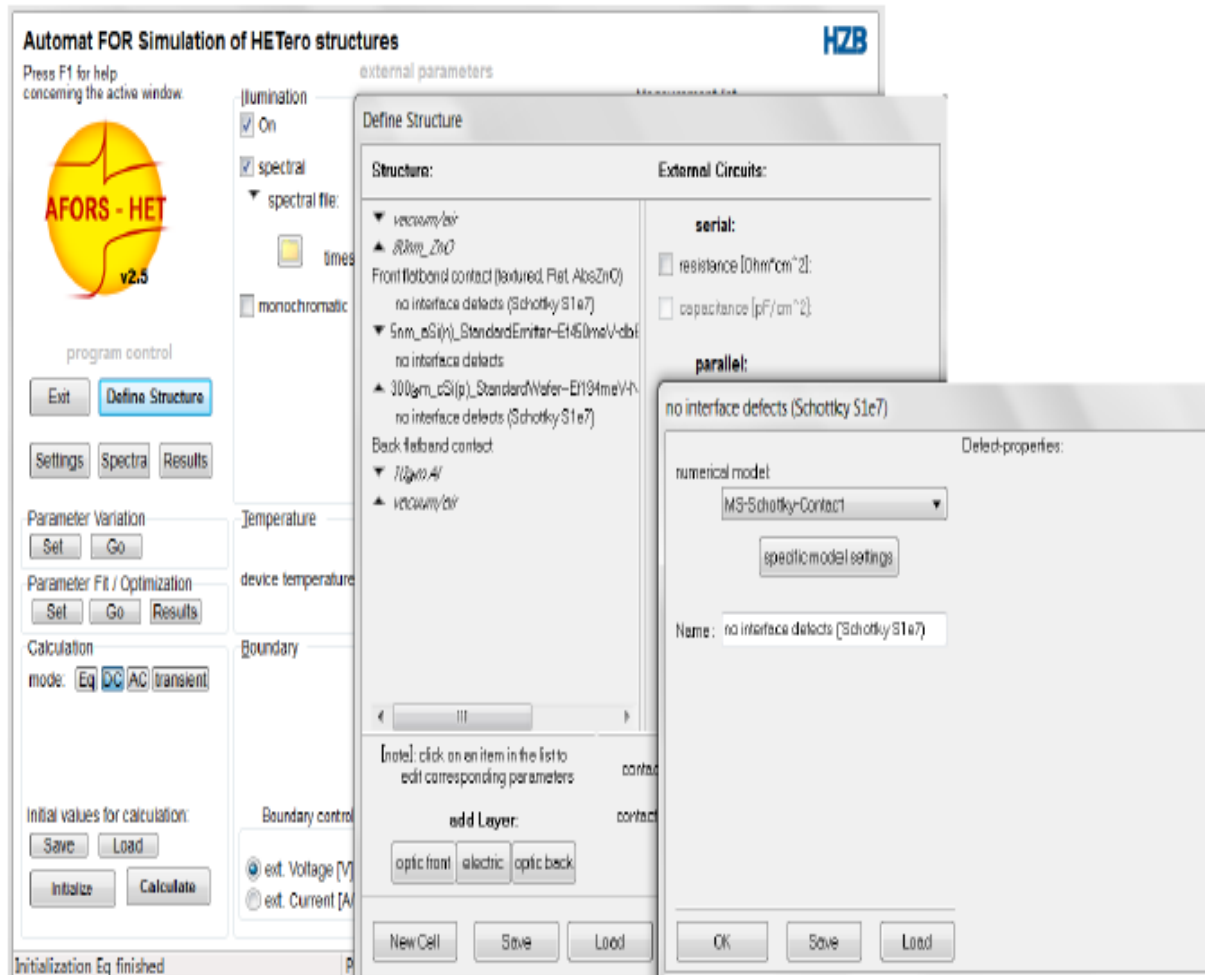
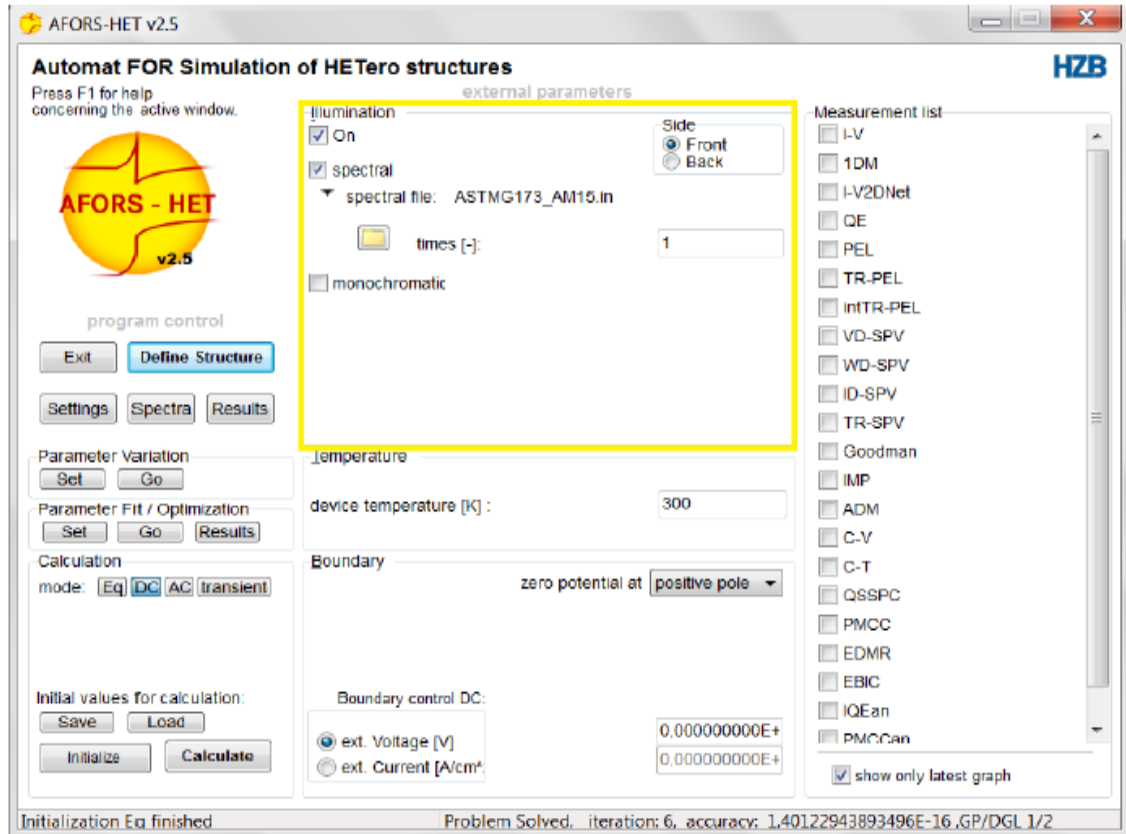


Figure A1. 3 : Choix de l'interface entre deux couches.

Lorsque la structure est enregistrée, le calcul des conditions d'équilibre thermodynamique est effectué. Il est ensuite possible d'ajouter une excitation via une polarisation (DC ou AC) et/ou de la lumière (monochromatique ou polychromatique). On pourra donc reproduire de nombreuses techniques de caractérisation expérimentales (I-V, réponse spectrale, spectre de photoluminescence, C-V, etc.).



. *Figure A1.4 : Calcul des conditions d'équilibre thermodynamique et d'illumination de la cellule.*

Bibliographique :

- [1] Thomas Mambrini « Mémoire sur la Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies » Mémoire de master, 2015.
- [2] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, le ministère de l'énergie et des mines, mars 2011.
- [3] BOUZAKI Mohammed Moustafa « Etudes comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du dimensionnement des systèmes et installations photovoltaïques » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2017.
- [4] Cour de l'énergie photovoltaïque et les cellules solaires (chapitre 01) université de Tlemcen.
- [5] BERREZZOUG Hanane « Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule caractéristiques d'une cellule photovoltaïque » Mémoire de : MASTER filière PHYSIQUE le 09 / 06 /2016
- [6] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.
- [7] Dhuibi Yassine "Cellule solaire en silicium cristallin de type n et effet des paramètres technologiques sur ses performances " Mémoire de master, université Biskra, 2012.
- [8] M. Orgeret, F. D'allest. "les piles solaires, le composant et ses applications", Masson, Paris New York Barcelone Milan Mexico Sao Paulo 1985.
- [9] Belhadj Mohammed, «éléments de physique des semi-conducteurs ».Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [10] Elsa Corrofer et Sophie Huguet Mémoire sur« impression des cellules solaires photovoltaïques» en Mai 2009 .
- [13] Gilles Poulain, «Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement», Thèse doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2012.
- [14] Djicknoum Diouf, «Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à Structure inter digitée en face arrière», thèse doctorat, Université de Paris, France, en 2010
- [15] Fellahi Ouarda, « Elaboration de nano fils de silicium par gravure chimique assistée par un métal: caractérisation et application en photo catalyse hétérogène de l'oxyde de graphène, du chrome (vi) et de la rhodamine b», Thèse doctorat, Université Sétif, Algérie, 2014.
- [16] Bernard BASSEMEL «Les énergies renouvelables. Cas de l'énergie solaire» doc Expert Ingénierie Energie et Environnement Consultant Individuel.
- [17] 2] Soltane Zaghina, « Simulation et analyse d'une cellule solaire organique», mémoire Magister, Université de Batna, Algérie, 2013.

[18] Frédéric Fossard «Spectroscopie infrarouge des fils et boîtes quantique » thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en science physique ; université Paris XII Orsay; 2002 ;

[19] David Réaux. « Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface ». Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Paris-Saclay , Français.2017

[20] M. Tao, « Photovoltaic for the 21st century 5», the electrochemical society, USA, 2010.

Webographie :

[22] http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am_1.5/

[23] Un article de www.solar.com

[24] cellules_photovoltaïques.odt

[25] http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/index_en.html

