

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**

**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electronique**



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Electronique

Option : Microélectronique

Présenté par

M^{elle} OUSSIDHOUM Samira

Thème :

**Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions
simple et multiple**

Devant le jury:

Mohamed Said BELKAID

Professeur UMMTO

Président

Mohamed MEGHERBI

Professeur UMMTO

Rapporteur

Mohand Ou Tahar BENSIDHOUM

MCA UMMTO

Examineur

Dalila HOCINE

MCB UMMTO

Examinatrice

Soutenu le 08/07/2015

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire à été effectué au Laboratoire des Technologies Avancées de la Faculté de Génie Electrique (LATAGE) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire, le professeur MEGHERBI Mohamed, Professeur de la Faculté de Génie Electrique et d'Informatique à l'UMMTO.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail : le président de jury, le professeur M^{ed} Said BELKAID, Doyen de la Faculté de Génie Electrique et d'Informatique à l'UMMTO ainsi que Monsieur BENSIDHOUM Mohand Ou Tahar, Maître de Conférences A à l'UMMTO et M^{elle} HOCINE Dalila, Maître de Conférences B à l'UMMTO en tant que examinateurs.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues du laboratoire LATAGE, en particulier Goudjil Tawous.

Sans oublier ma famille qui m'a était d'un grand soutien tout au long de mes années d'études.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail, tant au niveau humain qu'au niveau scientifique.

Dédicaces

À toute ma famille

À mes amis

À tous ceux et celles qui me sont chère(s)

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : La cellule solaire: structure, fonctionnement et performances	
I. Introduction	03
II. Rayonnement solaire	03
III. L'effet photovoltaïque.....	04
III.1 Définition.....	04
III.2Principe de l'effet photovoltaïque	04
IV. La cellule solaire au silicium.....	04
IV.1 Définition	04
IV.2 Le principe de fonctionnement.....	05
IV.3 Schéma électrique équivalent	06
IV.4 Caractéristique courant-tension.....	07
IV.5 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire	08
V. Structure des cellules solaires	09
V.1 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque	09
V.1.1 Le silicium monocristallin.....	09
V.1.2 Silicium multi cristallin.....	11
V.1.3 Le silicium amorphe.....	12
V.1.4 Le silicium amorphe hydrogéné	12
VI. Les oxydes semi-conducteurs	13
VII. Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL).....	13
VIII. Structure d'une cellule solaire industrielle	14

IX. Méthodes d'amélioration des performances des cellules solaires	15
IX.1 Texturation de la surface.....	16
IX.2 Couche anti reflet.....	16
IX.3 Réflecteur arrière(BSF).....	17
IX.4 Passivation de la face avant et de la face arrière	17
X. Conclusion.....	17
Chapitre II : Etude des cellules solaires a multi-jonctions	
I. Introduction.....	18
II. Les cellules solaires à multi-jonctions.....	18
II.1 Cellules solaires à multi jonctions à base de semi-conducteurs III-V....	18
III. Cellules solaire en couches minces	20
III.1 Définition d'une couche mince.....	20
III.2 Techniques de dépôt des couches minces	21
III.3 Les cellules solaires à base de CuInSe_2	21
III.4 Cellules salaires à base de Cu (In,Ga)Se_2 (cellules solaires CIGS)	24
III.5 Les cellules solaires en couches minces à base de CdTe	25
III.6 Cellules solaires à base de a-Si:H/c-Si (cellules solaires HIT)	26
IV. Conclusion	29
Chapitre III : Simulation des cellules solaires à hétérojonctions.....	
I. Introduction	30
II. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET	30
III. Etapes de simulations	31
IV. Présentation des cellules solaires simulées.....	34

IV.1 Présentation de la cellule à simple hétérojonction	35
IV.2 Présentation de la cellule à double hétérojonction	35
IV.3 Présentation de la cellule HIT.....	36
V. Les paramètres des cellules solaires à simuler	36
V.1 Paramètres de la couche ZnO et la couche Al	36
V.2 Paramètres des couches a-Si :H (p) ,c-Si(p) et a-Si :H (n) utilisées ...	37
V.3 Paramètres de la couche intrinsèque (i) a-Si :H.....	37
VI. Conclusion.....	38
Chapitre IV : Etude comparative entre les cellules à jonction simple et multiple	
I. Introduction	39
II. Etude comparative entre les cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellules HIT.....	39
II.1 Diagrammes des bandes d'énergies	39
II.2 Caractéristiques courant-tension	41
III. Effet de la variation de l'épaisseur du substrat c-Si sur les performances des cellules solaires simulées.....	43
III.1 Influence de l'épaisseur du substrat sur la tension du circuit ouvert V_{co}	43
III.2 Influence de l'épaisseur du substrat sur le courant de court circuit I_{cc} ...	44
III.3 Influence de l'épaisseur du substrat sur le facteur de forme FF.....	46
III.4 Influence de l'épaisseur du substrat sur le rendement η	47
IV. Influence du dopage du substrat sur les performances des cellules simulées...	49
IV.1 Influence du dopage du substrat sur la tension du circuit ouvert V_{co}	49
IV.2 Influence du dopage du substrat sur le courant de court circuit J_{cc}	50

IV.3 Influence du dopage du substrat sur le facteur de forme FF.....	51
IV.4 Influence du dopage du substrat sur le rendement η	53
V. Influence de l'épaisseur de l'émetteur : a-Si :H(n) sur les performances des cellules simulées.....	54
V.1 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension du circuit ouvert V_{co}	54
V.2 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court circuit J_{cc}	56
V.3 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF.....	57
V.4 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement η	58
VI. Influence du dopage de l'émetteur a-Si :H sur les performances des cellules simulées	60
VI.1 Influence du dopage de l'émetteur la tension du circuit ouvert V_{co}	60
VI.2 Influence du dopage de l'émetteur sur le courant de court circuit J_{cc} ..	61
VI.3 Influence du dopage de l'émetteur sur le facteur de forme FF.....	62
VI.4 Influence du dopage de l'émetteur sur le rendement η	63
VII. Influence du gap de l'émetteur sur les performances des cellules simulées...	65
VII.1 Influence du gap de l'émetteur sur la tension du circuit ouvert V_{co} ...	65
VII.2 Influence du gap de l'émetteur sur le courant de court circuit J_{cc}	66
VII.3 Influence du gap de l'émetteur sur le facteur de forme FF.....	68
VII.4 Influence du gap de l'émetteur sur le rendement η	69
VIII. Influence de la température sur les caractéristiques I(V) des cellules simulées	71
IX. Effet de la texturisation	72
X. Comparaison avec d'autres types de cellules solaires à homojonction et multijonctions.....	73
XI. Conclusion.....	74
Conclusion générale	75

Liste des figures :

Figure I.1	définition de l'Air Masse, spectre d'émission solaire sous AM0 et AM1.5	03
Figure I.2	Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque	04
Figure I.3	Structure d'une cellule solaire au silicium	05
Figure I.4	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	06
Figure I.5	caractéristique courant-tension et sous éclairage d'une cellule solaire	07
Figure I.6	Production de cellules par type de technologie en 2010	09
Figure I.7	Méthode de Czochralski	10
Figure I.8	Lingots de silicium monocristallin	10
Figure I.9	Zone flottante (fusion de zone)	11
Figure I.10	Substrat de silicium multicristallin	11
Figure I.11	Structure du silicium amorphe hydrogéné	12
Figure I.12	Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%).	13
Figure I.13	Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin	15
Figure I.14	Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium	16
Figure II.1	Cellules solaires à multijonctions à base de semiconducteurs III-V	18
Figure II.2	Extrait de la classification périodique des éléments	19
Figure II.3	Structure de cellule solaire à multijonctions	19
Figure II.4	Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une cellule solaire tri-jonction	20

Figure II.5	Classification des différentes techniques de dépôts des couches minces	21
Figure II.6	Vue en coupe transverse au microscope électronique à balayage d'une cellule à base de CuInSe_2 électro déposé, élaborée à l'IRDEP	22
Figure II.7	Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CuInSe_2	23
Figure II.8:	Diagramme de bandes d'une cellule CIS	23
Figure II.9	Structure standard d'une cellule à base de CIGS	24
Figure II.10	Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule CIGS	24
Figure II.11	Structure d'une cellule solaire à base de CdS/CdTe	25
Figure II .12	Schéma des bandes d'énergie dans l'hétérojonction CdS CdTe	26
Figure II 13	Structure d'une cellule solaire de type HIT	27
Figure II 14	Diagrammes des bandes pour des hétérojonctions de silicium (p) a-Si :H/(n) c-Si et (n) a-Si :H/(p) c-Si	28
Figure III.1	Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.	30
Figure III.2	Fenêtre correspondante à la définition de la structure	31
Figure III.3	Introduction des différents paramètres de la cellule	32
Figure III.4	Calcul des conditions thermodynamiques de la cellule	33
Figure III.5	Mode de calcul et illumination de la cellule	34
Figure III.6	Cellule solaire à simple hétérojonction	35
Figure III.7	Cellule solaire à double hétérojonction	35
Figure III.8	Cellule solaire a hétérojonction HIT	36

Figure IV.1	Diagrammes des bandes d'énergie des cellules solaires à l'équilibre thermodynamique : (a) Cellule à simple hétérojonction ; (b) Cellule à double hétérojonction ; (c) Cellule HIT	40
Figure IV.2	Caractéristiques I(V) des cellules solaires simulées, (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	42
Figure IV.3	Variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	44
Figure IV.4	Variation du courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	45
Figure IV.5	Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	47
Figure IV.6	Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la base: (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	48
Figure IV.7	Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de la base: (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction et (c) cellule HIT	50
Figure IV.8	Variation du courant du circuit ouvert en fonction du dopage de la base: (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction et (c) cellule HIT	51
Figure IV.9	Variation du facteur de forme FF en fonction du dopage de la base: (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction et (c) cellule HIT	52
FigureIV.10	Variation du rendement η en fonction du dopage de la base: (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction et (c) cellule HIT	54
FigureIV.11	Variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	55
FigureIV.12	Variation de courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.	57
FigureIV.13	Variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, cellule HIT.	58
FigureIV.14	Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.	59
FigureIV.15	Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.	61

FigureIV.16	Variation de courant de court circuit I_{cc} en fonction du dopage de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.	62
FigureIV.17	Variation du facteur de forme en fonction du dopage de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT	63
FigureIV.18	Variation du rendement η en fonction du dopage de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.	64
FigureIV.19	Variation de la tension du circuit ouvert en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction et (b) cellule double hétérojonction	66
FigureIV.20	Variation du courant de court circuit en fonction du gap de l'émetteur :(a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT	67
FigureIV.21	variation du facteur de forme FF en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT	68
FigureIV.22	Variation du rendement η en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.	70
FigureIV.23	Effet de la température sur la caractéristique I(V) des cellules simulées :(a) simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.	72
FigureIV.24	Effet de la texturisation sur la caractéristique I(V)	73

Liste des tableaux

Tableau III.1:	Les paramètres de la couche ZnO et la couche Al.....	37
Tableau III.2:	Les paramètres des différentes couches de la cellule.....	37
Tableau III.3:	Les paramètres de la couche intrinseque utilisée.....	38
Tableau IV.1 :	Paramètres électriques des cellules solaires simulées.....	42
Tableau IV.2 :	Valeurs de rendement de conversion des cellules solaires à jonctions simple et multiple.....	73

Introduction générale

L'énergie a toujours été le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. Cette énergie est principalement produite à partir de sources fossiles non renouvelables (pétrole, gaz, charbon). La raréfaction et la pollution provoquées par ces sources ainsi que la crise énergétique des années 70, ont amené les pays à grande consommation d'énergie à se recourir aux énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables se définissent selon l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) comme des énergies produites par un processus naturel (rayonnement solaire, vent, marée...), et qui contrairement aux énergies fossiles sont inépuisables et n'émettent pas de gaz à effet de serre. La palette des énergies renouvelables est variée. On peut citer l'énergie éolienne, géothermique, hydraulique, marémotrice ou encore l'énergie photovoltaïque (PV).

L'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est une transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en électricité au moyen de cellules solaires photovoltaïques.

L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaire est le silicium (plus de 95% du marché mondial). En effet c'est un élément très abondant sur terre bénéficiant d'une technologie de la microélectronique qui est bien maîtrisée, cette technologie permet de fabriquer des cellules avec un haut rendement (24%), mais avec un coût de production très élevé [60]. Ces techniques issues de la microélectronique utilisent du silicium cristallin de très bonne qualité et permettent d'approcher la limite théorique du rendement des cellules au silicium (29%) [13] mais sont loin d'être industrialisables vu leur coût extrêmement élevé. Dans le but de développer les technologies photovoltaïques à base de silicium à des coûts raisonnables, la société japonaise Sanyo, a fabriqué des cellules solaires à hétérojonction a-Si:H/c-Si ayant un rendement de 23.7% [61] avec un procédé qui peut être industriel. Récemment, un rendement record de 24.7% ($V_{co} = 0.750$ V ; $I_{cc} = 39.5$ mA/cm², FF = 0.832) est obtenu par Panasonic Corporation sur des substrats minces de 98 μ m [62]. Plusieurs chercheurs ont effectué des études de simulation dans le but d'améliorer le rendement de conversion des cellules HIT au-delà de 24% et ont pu obtenir des rendements de 25% [63], [50] et 25.6% [64] par une optimisation des paramètres de base de la structure.

Les recherches multiples dans ce domaine s'orientent sur deux axes essentiels : augmenter le rendement de conversion des cellules tout en diminuant les coûts de production. Dans ce sens, nous avons effectué une étude comparative entre les cellules solaires à simple et double hétérojonction de a-Si:H/c-Si à travers la simulation de leurs performances photovoltaïques en fonction de plusieurs paramètres. Cette étude est complétée par une comparaison avec d'autres types de cellules solaires à multijonctions afin d'obtenir la structure permettant le meilleur rapport rendement de conversion/coût de production.

Pour ce faire, notre travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte les différentes notions de base sur le fonctionnement et la structure des cellules solaires à homojonction silicium.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les cellules solaires à multijonctions incluant les cellules triple jonction à base de semiconducteur III-V, cellules CdS-CdTe, cellules CIGS, cellules CIS, ainsi que les cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Layer). Nous avons ensuite présenté un tableau récapitulatif qui résume les performances de ces cellules, rapportées dans la littérature.

Dans le troisième chapitre nous présentons notre contribution consistant en une simulation numérique des cellules solaires à hétérojonction à base du a-Si :H/c-Si en utilisant le logiciel AFORS-HET (version 2.4.1) développé par l'université de Berlin.

Dans le quatrième chapitre, nous avons effectué une étude comparative entre les résultats de simulation des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellules HIT, suivie d'une interprétation. Pour une étude plus complète, nous présentons un récapitulatif qui compare les résultats de simulation obtenus dans notre travail et ceux des cellules solaires à homojonction et multijonctions. Cette comparaison nous a permis d'évaluer les potentialités de la technologie HIT.

I. Introduction

Dans ce premier chapitre nous avons présenté les notions de base concernant le rayonnement solaire, le silicium, et la cellule solaire à homojonction que nous avons jugés utiles pour la compréhension du sujet.

II. Rayonnement solaire

Le principe des convertisseurs photovoltaïques consiste à transformer l'énergie solaire en une énergie électrique. La connaissance du spectre solaire qui arrive sur la terre est donc indispensable.

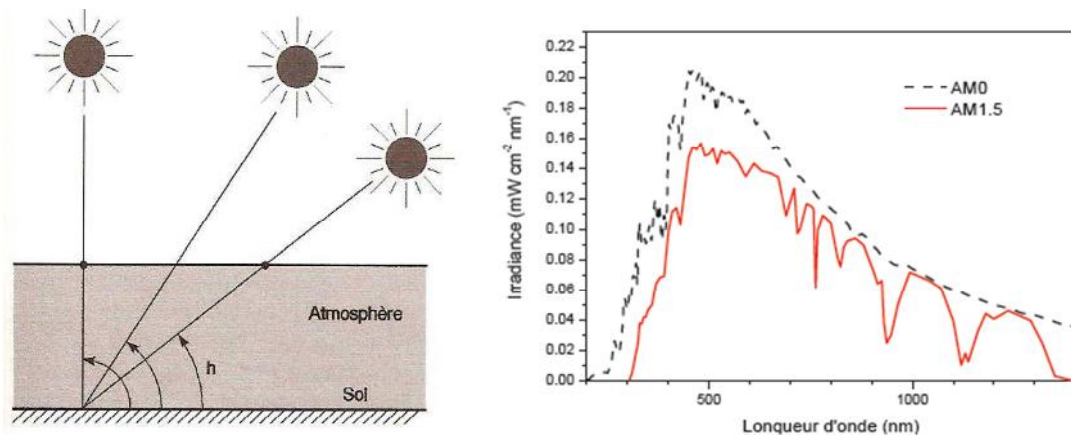


Figure I.1 : définition de l'Air Masse, spectre d'émission solaire sous AM0 et AM1,5 [3 ,4]

On appelle constante solaire, la densité d'énergie qui atteint la frontière externe de l'atmosphère. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m^2 [1 ,2 ,14]. Mais à la traversée de cette atmosphère, le spectre solaire subit une atténuation et une déformation. En effet, la couche d'ozone absorbe une grande partie du rayonnement ultraviolet. Le spectre solaire subit également l'influence d'autres molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , CO_2 , H_2O ...) [5 ,6]. Lorsqu'il arrive à la surface de la terre il dépend de la couche d'air qu'il a traversé et donc de l'angle d'incidence. Si on fait face au soleil, on le voit à une certaine hauteur qu'on appelle 'hauteur apparente'. Celle-ci est l'angle h que fait le plan horizontal avec une droite pointée vers le soleil (figure (I.1)). La quantité h permet de déterminer la distance parcourue par les rayons du soleil à travers l'atmosphère. On introduit alors un nombre m , qu'on appelle Air Masse (AMm) et qui représente cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu ($m=1/\sin(h)$).

AM0 : Hors atmosphère (applications spatiales)

AM1: Soleil au zénith du point d'observation.

AM1.5 : Soleil à 45° [5, 7].

On appelle STC (Standard Test Conditions), des conditions normalisées de test de panneaux solaires. Celles-ci sont caractérisées par un rayonnement de 1000W/m^2 , un spectre solaire AM1.5 et 25°C [6, 8,9].

III. L'effet photovoltaïque

III.1 Définition

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique permettant la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique, il consiste en l'apparition d'une force électromotrice aux bornes d'un dispositif, appelé cellule solaire, soumis à un éclairement.

III.2 Principe de l'effet photovoltaïque

Le principe de l'effet photovoltaïque consiste en la génération de paires (électron/trou) dans un semi conducteur soumis à un éclairement, et la séparation de ces porteurs photogénérés par le biais du champ interne de la jonction, ce dernier est entraîné par la barrière de potentiel qui provient soit :

- D'un gradient de dopage dans le même matériau semi-conducteur : homojonction PN.
- D'un contact métal- semi-conducteur : structure MS ou diode Schottky, structure M.I.S.
- D'une jonction entre deux semiconducteur différents: hétérojonction.

IV. La cellule solaire au silicium

IV.1 Définition

Une cellule solaire (Figure I-3) est un dispositif électronique capable de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, elle peut être conçue à base d'une homojonction ou d'une hétérojonction.

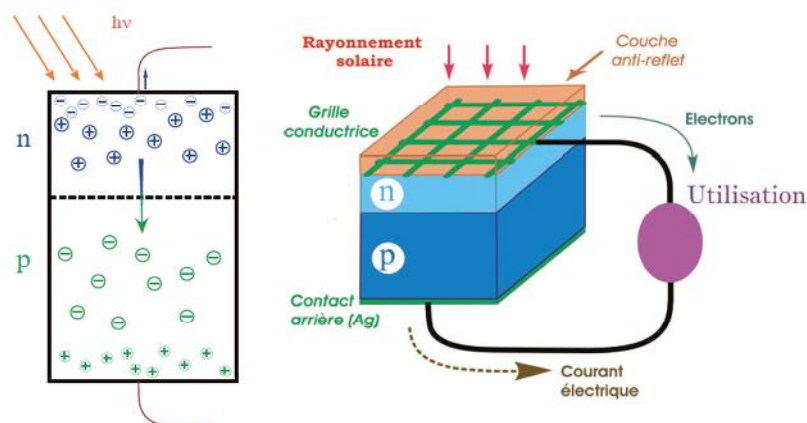


Figure I.2: Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque [10]

IV.2 Le principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque classique en silicium est constituée d'une jonction P/N (Figure I-4). Cette dernière est la juxtaposition de deux zones, l'une comportant un fort excès d'électrons libres : partie N, et l'autre comportant un fort défaut d'électrons libres (ou excès de trous), partie P. La jonction PN engendre un champ électrique dans la zone de charge d'espace, à l'interface des deux zones N et P. Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Ces porteurs ont un comportement différent suivant la région où ils sont générés :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

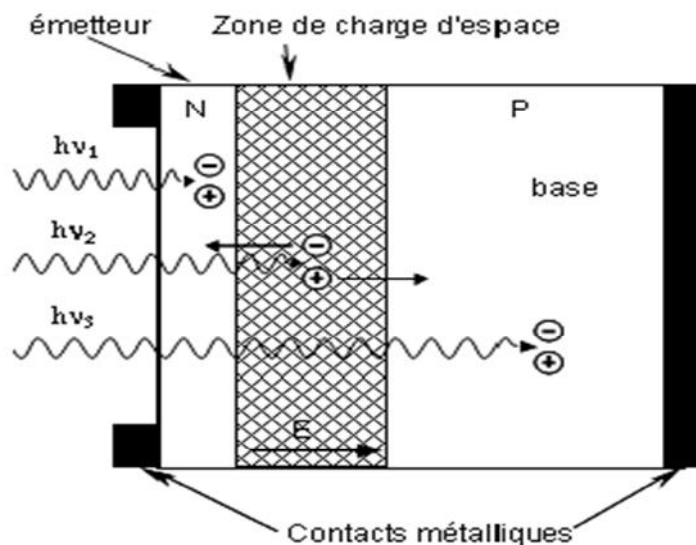


Figure I.3: Structure d'une cellule solaire au silicium [11]

La conversion photovoltaïque repose donc, sur trois principes :

- ✓ L'absorption de photons;
- ✓ La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres;
- ✓ La collecte de ces particules dans un circuit électrique.

Le courant délivré sur une charge par cellule solaire éclairée s'écrit :

$$J = J_{ph} - J_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \dots \dots \text{(I.1)}$$

Où :

q : charge de l'électron ;

J_{ph} : densité de courant photogénéré ;

J_s : densité du courant inverse de saturation ;

V : tension ;

K : constante de Boltzmann ;

T : température (en K) ;

n : facteur d'idéalité de la diode (égale a 1 si la diode est idéale et égale a 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération /recombinaison).

IV.3 Schéma électrique équivalent

La figure I.4 représente un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photogénéré ainsi que des résistances complémentaires, R_s et R_p , et deux diodes d_1 et d_2 . R_c est la résistance de charge.

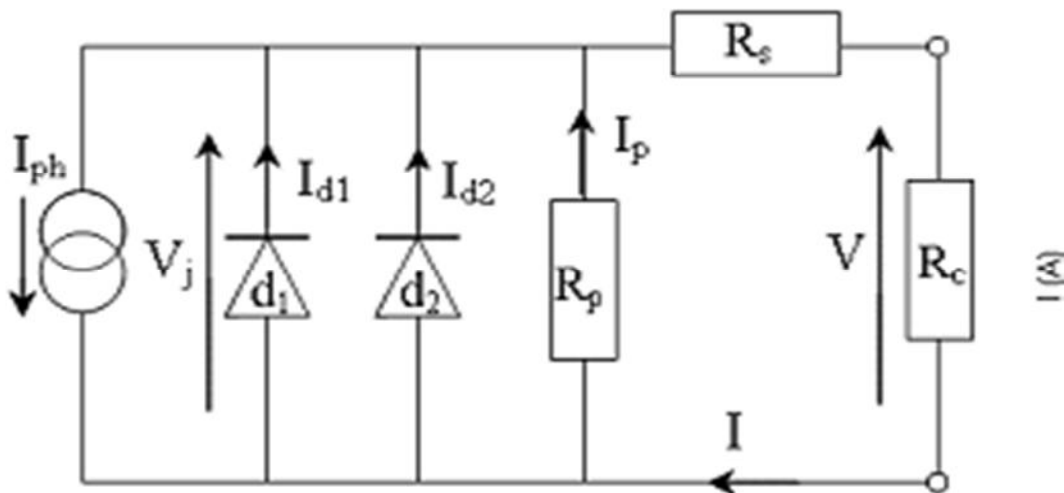


Figure I.4: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque[12]

La résistance série R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semiconducteur). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semiconducteur, et en

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

La résistance parallèle ou de court-circuit R_p 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 valeur devra être la plus élevée possible.

L'équation du courant (I.1) devient [13] :

$$J = J_{ph} - J_1 - J_2 - \frac{V+J.R_s}{R_{SH}} \dots\dots(\text{I.2})$$

$$J = J_{ph} - J_{S1} \left| \exp\left(\frac{q(V+J.R_s)}{n_1 K T}\right) - 1 \right| - J_{S2} \left| \exp\left(\frac{q(V+J.R_s)}{n_2 K T}\right) - 1 \right| - \frac{V+J.R_s}{R_{SH}} \dots\dots(\text{I.3})$$

Où :

J_1 : courant de génération –recombinaison ou d'effet tunnel dans la ZCE ;

J_2 : Courant de diffusion dans les zones neutres ;

R_{SH} : Résistance parallèle ;

R_s : Résistance série ;

J_{S1} : Courant de saturation de la 1^{ère} diode ;

J_{S2} : Courant de saturation de la 2^{ème} diode.

IV.4 Caractéristique courant-tension

La caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photogénéré (figure I-6).

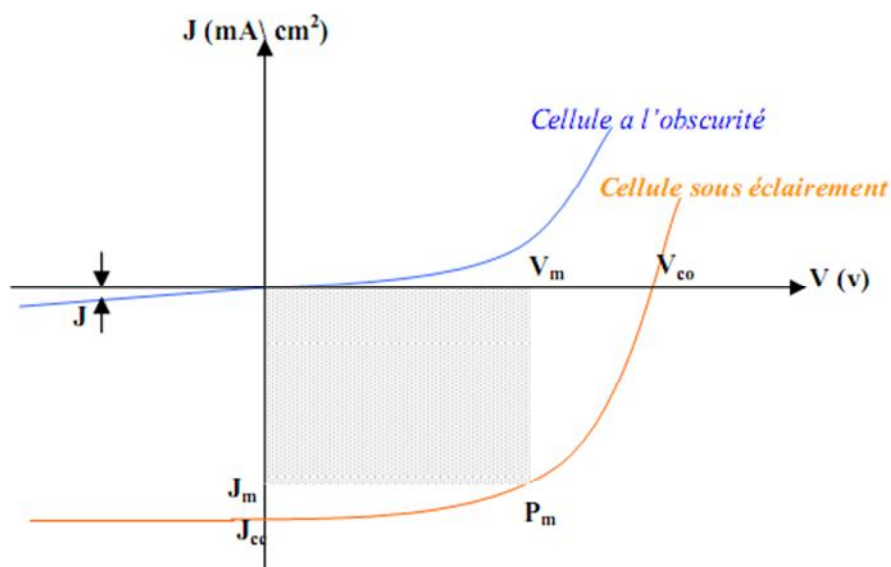


Figure I.5: caractéristique courant-tension et sous éclairement d'une cellule solaire

Pour la jonction PN à l'obscurité la caractéristique $I(V)$ passe par l'origine. Le produit $V.I > 0$ donc elle absorbe tout le temps de l'énergie.

Pour la cellule solaire sous éclairement, la caractéristique $I(V)$ ne passe pas par l'origine.

Dans la région hachurée le produit $V I < 0$ donc la cellule fournit de l'énergie.

IV.5 Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire

La caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire permet de déduire les paramètres photovoltaïques propres à la cellule :

- le courant du court-circuit I_{cc} (obtenu pour $V=0$)
- la tension du circuit-ouvert V_{co} (obtenu pour $J=0$)
- le facteur de forme FF
- le rendement de conversion (η)

a. Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit est celui qui circule dans une cellule soumise à un flux de photons sans application de tension ($V=0$). Il est proportionnel à l'éclairement. On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

b. Tension du circuit-ouvert V_{co}

Si on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit-ouvert (obtenue pour $I = 0$).

Cette tension est généralement de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour les cellules élémentaires (elle dépend du matériau, de la technologie et de l'éclairement). Elle exprime le nombre de porteurs créés par chaque photon incident.

c. La puissance maximale P_m

Suivant la formule $P=V I$, pour que P soit maximal, il faut être dans les conditions où le produit $V I$ est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile.

d. Le facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule ; il est défini par le rapport de la puissance maximale générée à la puissance optimisée.

$$FF = \frac{P_m}{J_{cc}V_{co}} = \frac{J_m V_m}{J_{cc}V_{co}} \dots\dots(I.4)$$

e. Le rendement de conversion η

Le rendement de conversion est un paramètre important pour comparer les performances des cellules solaires. Il est défini par le rapport de la puissance maximale fournie sur la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{J_m \cdot V_m}{P_i} = \frac{J_{cc} \cdot V_{co}}{P_i} FF \dots (1.5)$$

V. Structure des cellules solaires

V.1 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

Aujourd'hui, plus de 99 % des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base [14], cela revient à son abondance sur Terre, et au fait qu'il n'est pas toxique et chimiquement stable dans le temps, son seul inconvénient est son gap indirect de 1,1 eV qui entraîne une diminution de coefficient d'absorption.

Le silicium se présente sous différentes formes (Figure I.2), les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium multicristallin et le silicium amorphe. Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quelque soit sa forme.

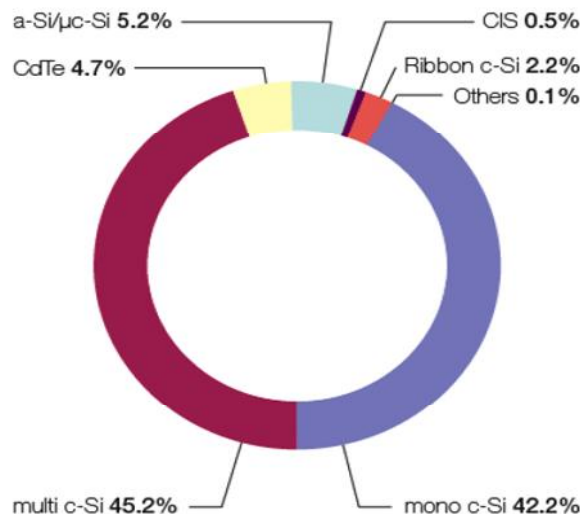


Figure I.6 : Production de cellules par type de technologie en 2010 [15]

V.1.1 Le silicium monocristallin

Le silicium monocristallin comporte des grains parfaitement ordonnés de taille supérieure à 10 cm [16], et permet d'obtenir de meilleurs rendements en cellules solaires [17]. La monocristallisation est obtenue soit par la méthode de zone flottante (voir figure I.9) [18] soit par la méthode de Czochralski(CZ) (figure I.7) [19,20]. Dans cette dernière, le silicium

est fondu dans un creuset en quartz chauffé par induction dans un gradient de température convenable, un germe monocristallin correctement orienté est déposé à la surface du silicium liquide, qui se solidifie sur ce germe en continuant à l'identique le réseau cristallin du germe et selon la même orientation cristallographique. Le dopage s'obtient évidemment en introduisant dans le bain liquide le dopant en concentration prédéfinie. Le diamètre ainsi obtenu est lié aux paramètres physiques au cours de tirage (Fig10).

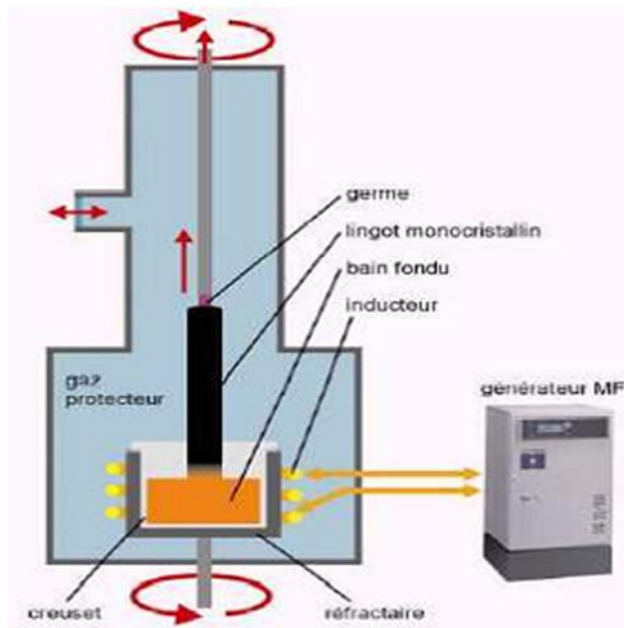


Figure I.7: Méthode de Czochralski [20]

La figure I.8 présente deux cristaux obtenus par la méthode Czochralski, le premier a un diamètre de 150 mm, le second a un diamètre de 200 mm



Figure I.8: Lingots de silicium monocristallin [20]

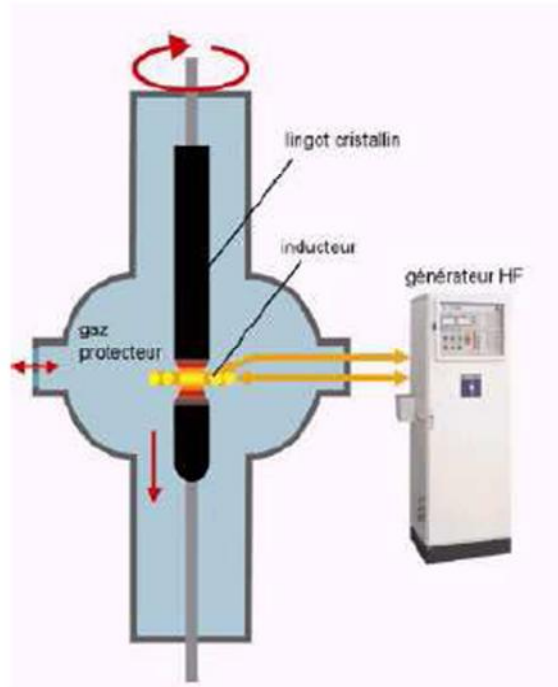


Figure I.9: zone flottante (fusion de zone) [21]

V.1.2 Silicium multicristallin

Pour le silicium multicristallin, les techniques d'élaboration sont moins onéreuses, mais sa qualité photovoltaïque est moins bonne, à cause de la présence des joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ceci a pour effet de réduire la durée de vie des porteurs minoritaires, et ils sont à l'origine des courants de fuite dans la cellule solaire. la figure ci-dessous représente une image du silicium multicristallin.



Figure I.10: image d'un substrat de silicium multicristallin [22]

V.1.3 Le silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 μm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [23,24]. Il est obtenu de façon simple par dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tels que le verre, le quartz, la céramique ou l'aluminium. La décomposition en phase vapeur du silane SiH_4 à basse température (200 à 400°C) permet de déposer du silicium amorphe hydrogéné avec une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètres par minute [25].

Cependant, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multicristalline) limite son rendement de conversion, entre 5 et 6 % et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures).

V.1.4 Le silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est un matériau issu de la famille des semi-conducteurs; cette forme de semi-conducteurs a été découverte vers le début des années soixante; dans un premier temps elle n'était pas utilisable car elle avait beaucoup trop de défauts, mais vers la fin des années soixante, Chittick et al [26] a observé qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de silane (SiH_4), plus de 99.9 % des défauts étaient saturés par l'hydrogène, ce qui rendait ce matériau utilisable comme semi-conducteur. Dès cette découverte, il était devenu l'objet de recherches intensifiées. La recherche de nouvelles ressources énergétiques, ainsi que de nouvelles applications en font un matériau actuellement encore en pleine évolution. La figure suivante représente la structure du silicium amorphe hydrogéné ;

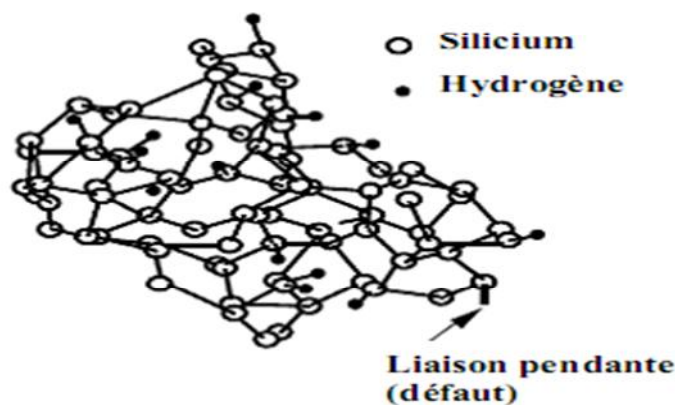


Figure I.11 : structure du silicium amorphe hydrogéné[15]

➤ Le rôle de l'hydrogène

C'est l'hydrogène qui, en saturant les liaisons pendantes, rend le silicium amorphe utilisable. Sans hydrogène, la densité des liaisons pendantes serait de l'ordre de $10^{19}/\text{cm}^3$, le gap optique de 1,2 eV environ et il est impossible de le doper. En effet, le niveau de Fermi reste inchangé lors du dopage et les atomes dopants sont inactifs. L'hydrogène permet de réduire les liaisons pendantes de 99,99%. Il n'y a donc presque plus d'états profonds qui agissent comme des centres recombinants. De plus, en se liant aux atomes de silicium (liaisons covalentes), il entraîne la disparition d'une partie des états localisés. Mais, une incorporation excessive de l'hydrogène peut entraîner la rupture des liaisons faibles et l'introduction de nouvelles liaisons pendantes. Un équilibre donc se met en place. La concentration d'hydrogène doit varier entre 6% et 35%, ce qui dépasse largement la densité nécessaire à la passivation des liaisons pendantes. Des travaux récents [27] ont montré que l'hydrogène atomique introduit d'autres effets que la passivation des liaisons pendantes. Le plus important concerne les hétérojonctions a-Si:H/c-Si. La concentration d'hydrogène dans le silicium amorphe a une influence sur les discontinuités de bande. Elle peut nettement les modifier et celles-ci ont une grande influence sur les caractéristiques de la cellule.

VI. Les oxydes semi-conducteurs

Les oxydes semi-conducteurs en couches minces envahissent de plus en plus le monde en raison de l'extraordinaire apport qu'ils procurent et la possibilité d'utiliser des matériaux en dimensionnalité nanométrique dont l'état majeur réside dans la modification de leurs propriétés d'origine par des effets de confinement quantique. Les TCO les plus couramment utilisés sont le SnO_2 , le TiO_2 , et le ZnO [28,29]. Un bon TCO est caractérisé par une résistivité électrique de l'ordre de $10^{-4} \Omega.\text{cm}$ combinée à une transmission optique de l'ordre de 90%.

VII. Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL)

La structure de la cellule photovoltaïque à haut rendement en silicium monocristallin est présentée sur la figure I.12. Cette cellule a été élaborée en laboratoire avec des procédés de la microélectronique en utilisant la technologie PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) [6,20].

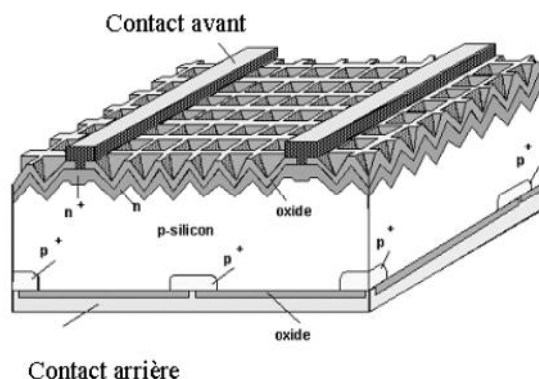


Figure I.12: Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%).

Cette cellule est réalisée sur un substrat de Si FZ (Float Zone) de type p. La face avant (face éclairée) de la cellule est texturée en «pyramides inversées». Ce type de texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule

Une jonction p-n peu profonde est réalisée sur toute la surface avant pour assurer la séparation des porteurs de charge. L'émetteur ainsi réalisé est peu dopé afin de limiter les recombinaisons. Le contact ohmique sur l'émetteur est déposé sous forme de grille. La géométrie de cette grille doit assurer une faible résistance série tout en limitant l'ombrage de la cellule. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est surdopée n⁺ (émetteur sélectif).

Une fine couche d'oxyde thermique (de haute qualité) est formée sur l'émetteur pour réduire la recombinaison sur la face avant de la cellule. Sur l'oxyde, une double couche anti-réfléchissante est déposée pour réduire les pertes par réflexion.

De même que la face avant, la face arrière de la cellule est passivée par de l'oxyde thermique avec des trous pour prendre le contact. Pour assurer un bon contact arrière, la région du contact est dopée p⁺. Néanmoins, le contact entre le métal et le silicium n'est pas continu afin de limiter la recombinaison sur le contact et dans la région fortement dopée p⁺. Par contre, la métallisation de la face arrière est continue : elle couvre les zones de contact et l'oxyde de passivation servant ainsi de réflecteur arrière.

Actuellement le rendement record obtenu pour une cellule PV à base de silicium est de 24.7% dans les conditions d'illumination AM 1.5G. Cette valeur est à comparer à la limite théorique du rendement de 28.8% pour les cellules PV en silicium d'épaisseur 80 µm dans les conditions d'illumination AM 1.5G et en l'absence de réflexion de la face avant, de recombinaison en surface et en volume.

VIII. Structure d'une cellule solaire industrielle

Le rendement des cellules PV industrielles est compris entre 15% et 17% pour les cellules conventionnelles en silicium monocristallin et 14 % environ pour les cellules en silicium multicristallin. La différence de rendement entre les cellules PV industrielles et les cellules PERL (élaborée en laboratoire et qui détient le record de rendement) peut être expliquée par les deux facteurs : le rendement et le prix. En effet, certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche antireflet, émetteur sélectif) utilisés dans la fabrication des cellules PERL ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie car ils sont trop chers.

La plupart des cellules photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur (la figure I.13), La structure de la cellule PV industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de «pyramides aléatoires» ou texturation acide et on dépose ensuite une simple couche anti-réfléchissante en SiN. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Al déposée par sérigraphie.

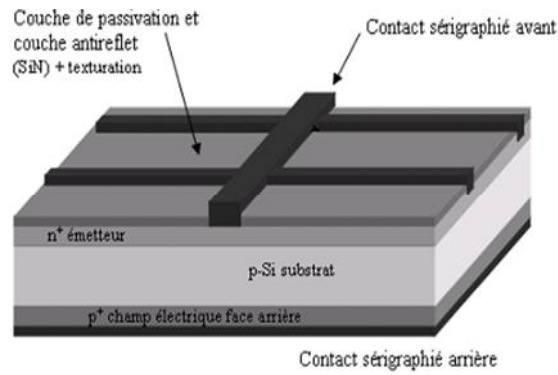


Figure I.13 Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin [30].

D'énormes progrès ont été réalisés ces dernières années pour améliorer la passivation du matériau et des surfaces, le piégeage de la lumière, la diminution résistance série et le coût de la cellule. En ce qui concerne la passivation, un progrès notable a été réalisé grâce au nitrure de silicium, utilisé comme couche antireflet. Il est particulièrement bien adapté au silicium multicristallin étant donné que le dépôt est accompagné d'une hydrogénation du substrat et il a largement supplanté le TiO_2 dans l'industrie photovoltaïque. Pour passiver la face arrière de la cellule, le BSF est utilisé. L'intérêt d'utiliser le nitrure de silicium et le BSF simultanément dans un procédé est lié à la cuisson commune des contacts avant et arrière.

Leur action combinée permet une meilleure passivation du matériau que lorsqu'ils sont appliqués séparément.

Pour les cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, de nombreuses études ont été menées afin de développer une attaque chimique acide du substrat qui soit isotrope (ce qui n'est pas le cas des solutions alcalines) et qui ne détériore pas la tenue mécanique des plaques de silicium. 4% d'augmentation du courant de court-circuit ont pu être obtenus sur du silicium multicristallin grâce à ce procédé.

Afin de diminuer la résistance série et d'augmenter le courant de court-circuit, une approche très intéressante est celle de l'émetteur sélectif. Elle consiste à surdoper la zone sous les contacts (afin d'assurer l'ohmicité) et à diminuer le dopage de la jonction entre les contacts (pour améliorer le courant de court-circuit). Différents procédés permettent d'obtenir une telle structure : la structure avec contacts enterrés déjà industrialisée ou une double sérigraphie (une pour la zone surdopée de l'émetteur, une pour la métallisation) avec l'alignement de la sérigraphie des contacts sur celle de la zone déjà dopée.

IX. Méthodes d'amélioration des performances des cellules solaires

La recherche et les techniques actuelles ont permis de réduire, parfois significativement, les pertes de rendement. La figure I.14 : représente la coupe d'une cellule photovoltaïque en silicium qui comprend les optimisations industrielles les plus courantes :

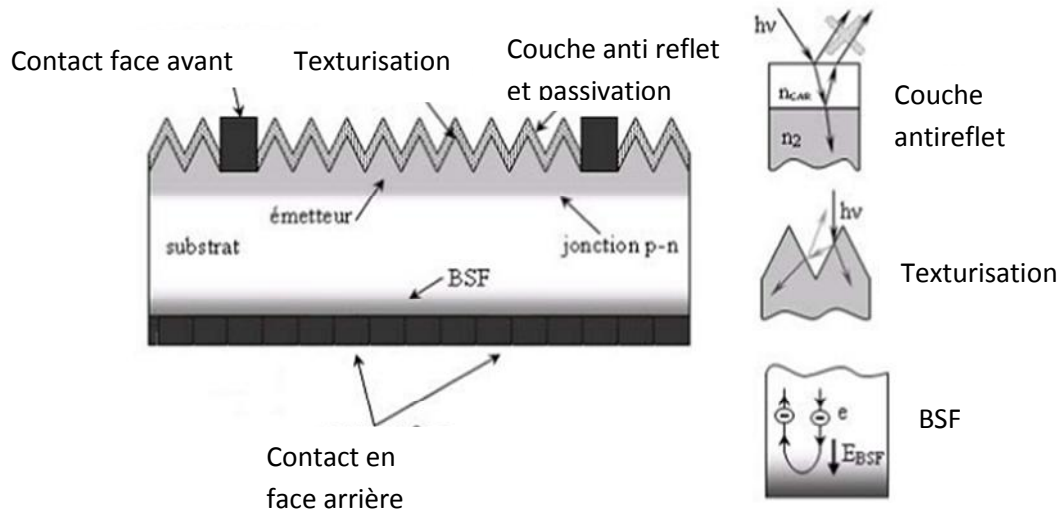


Figure I.14: Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [31]

IX.1 Texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale (figure 12). Le relief créé permet d'augmenter le parcours des rayons en induisant des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation: attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39% à moins de 10%.

IX.2 Couche anti reflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure I-8). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{car} = \frac{(2.N+1).\lambda}{4.n_{car}} \quad , N = 0, 1, 2, 3 \dots (I.6)$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semiconducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents).

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc [20]

IX.3 Réflecteur arrière(BSF)

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction $p^+ - p$) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure I-8). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première et le silicium multicristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées (environ 200 μm pour le Polix).

IX.4 Passivation de la face avant et de la face arrière

La surface des semiconducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x:\text{H}$).

X. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. Nous avons cité également quelques méthodes utilisées pour l'amélioration du rendement de conversion des cellules.

I. Introduction

Les technologies naissantes des couches minces représentent une alternative très prometteuse à la technologie cristalline. Elles ont surtout l'avantage du moindre coût par rapport à celle du silicium cristallin en raison de plusieurs facteurs, tels que les faibles consommations de matière et d'énergie lors de leurs fabrications. Bien que leur part du marché soit faible aujourd'hui les perspectives de croissance sont prometteuses. A l'heure actuelle, trois matériaux sont devenus la colonne vertébrale de la recherche dans ce domaine stimulée par la demande pressante des industries photovoltaïque et électronique : le silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H), le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium, ainsi que les semi-conducteurs III-V. Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les différentes technologies des cellules solaires à multijonctions.

II. Les cellules solaires à multijonctions

Le principe d'une cellule solaire a multijonction étant d'absorber plus de fréquence du spectre solaire, naturellement l'idée viendrait d'ajouter des photodiodes supplémentaires avec des matériaux à gap décroissant pour augmenter encore plus les rendements [32].

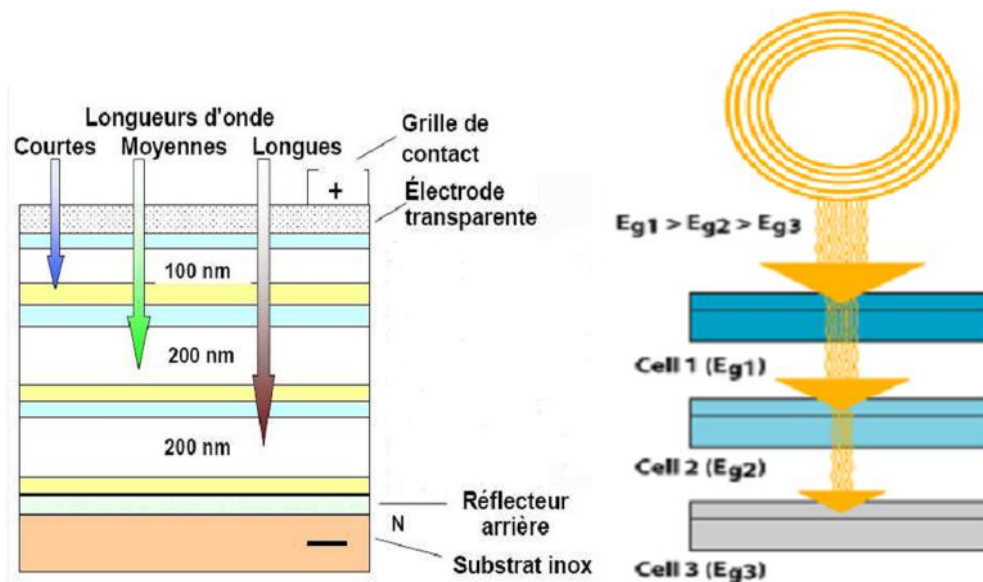


Figure II.1: cellule tandem ou multi-jonction [33]

II.1 Cellules solaires à multijonctions à base de semiconducteurs III-V

a. Structure des cellules solaires à multijonctions à base de semiconducteurs III-V

Cette technologie repose sur l'utilisation de plusieurs structures basées sur des empilements des composés III-V en épitaxie, ces cellules solaires sont généralement employées dans des applications spatiales, et ce grâce à leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [34].

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V de la classification périodique de Mendeliev [], le tableau II-1 regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

		III	IV	V	VI
	5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	
	13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	

III	IV	V
⁵ _{10,81} B	⁶ _{12,01} C	⁷ _{14,01} N
¹³ _{26,98} Al	¹⁴ _{28,09} Si	¹⁵ _{30,97} P
³¹ _{69,74} Ga	³² _{72,59} Ge	³³ _{74,92} As
⁴⁹ _{114,82} In	⁵⁰ _{118,69} Sn	⁵¹ _{121,75} Sb

Figure II.2 : Extrait de la classification périodique des éléments [35].

Les rendements les plus élevés (plus de 30%) sont obtenus avec des structures à triple jonction GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard [1,4 NEMAR], la figure suivante représente les structures des cellules solaires avec plus de trois jonctions.

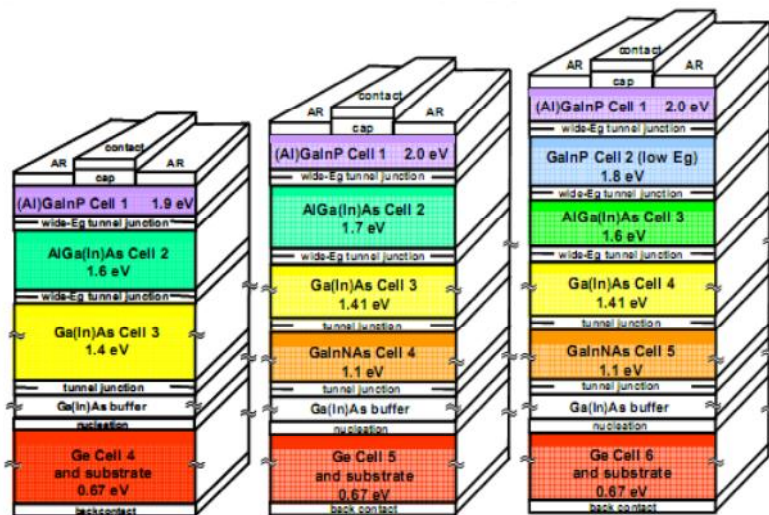


Figure II.3 : structure de cellule solaire à multijonctions [36]

b. Diagramme de bandes d'énergie de la cellule solaire à multijonction à base des semi-conducteurs III-V

Un schéma simplifié de la structure de bandes des différentes couches d'une structure cellule solaire tri-jonction est illustré dans la figure suivante.

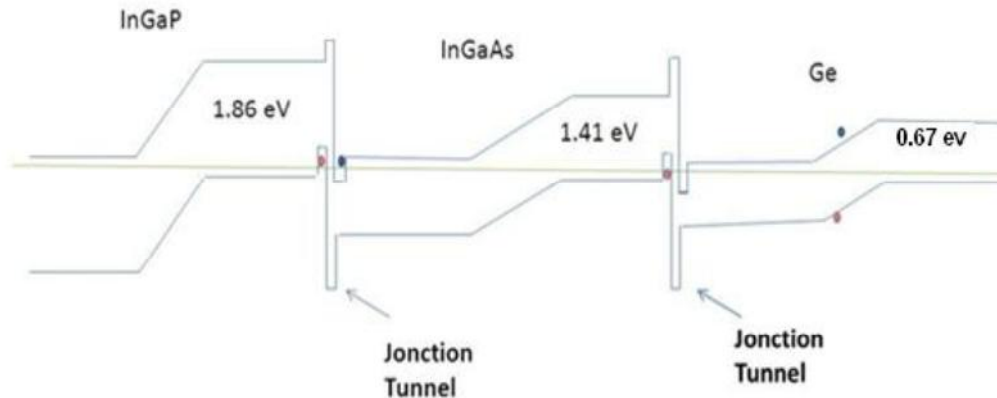


Figure II.4 : Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une cellule solaire tri-jonction [36]

Le niveau de Fermi à l'équilibre est constant dans toute la structure. Sous illumination, il faut bien comprendre que la jonction sera polarisée suite au courant traversant la résistance de charge. Les électrons passent par effet tunnel de la bande de conduction d'une photodiode à la bande de valence de la photodiode adjacente. Cependant, afin que ce transfert de charges soit assuré, des trous doivent être présents dans la bande de valence de la photodiode en dessous pour permettre aux électrons d'occuper les états libres de cette bande. Le nombre de photo porteurs (électrons et trous) traversant les différentes jonctions est dans ce cas le même, par conséquent le courant est constant à travers toute la structure.

III. Cellules solaire en couches minces

D'autres filières sont en cours de développement dans le secteur photovoltaïque comme les cellules dites de seconde génération, composées de couches minces pour des raisons économiques (utilisation d'une plus faible quantité de matériau). Les matériaux photo-actifs les plus utilisés en couche minces sont le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et le tellure de cadmium (CdTe).

III.1 Définition d'une couche mince

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm". Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes.

III.2 Techniques de dépôt des couches minces

Les méthodes utilisées pour le dépôt des couches minces sont divisées en deux groupes :

➤ **Les méthodes physiques**

Incluent le dépôt physique en phase vapeur dite "PVD" (Physical Vapor Deposition), l'ablation laser, l'évaporation thermique, et la pulvérisation cathodique "Sputtering".

➤ **Les méthodes chimiques**

Incluent les méthodes de dépôt en phase gazeuse et en phase liquide. Les méthodes en phase gazeuse sont : le dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Déposition CVD) et l'épitaixie à couche atomique (Atomic Layer Epitaxy ALE), tandis que les méthodes de spray pyrolyse, sol-gel, spin-coating et dip coating emploient des solutions comme précurseurs.

La figure suivante schématise les différentes méthodes de dépôt des couches minces.

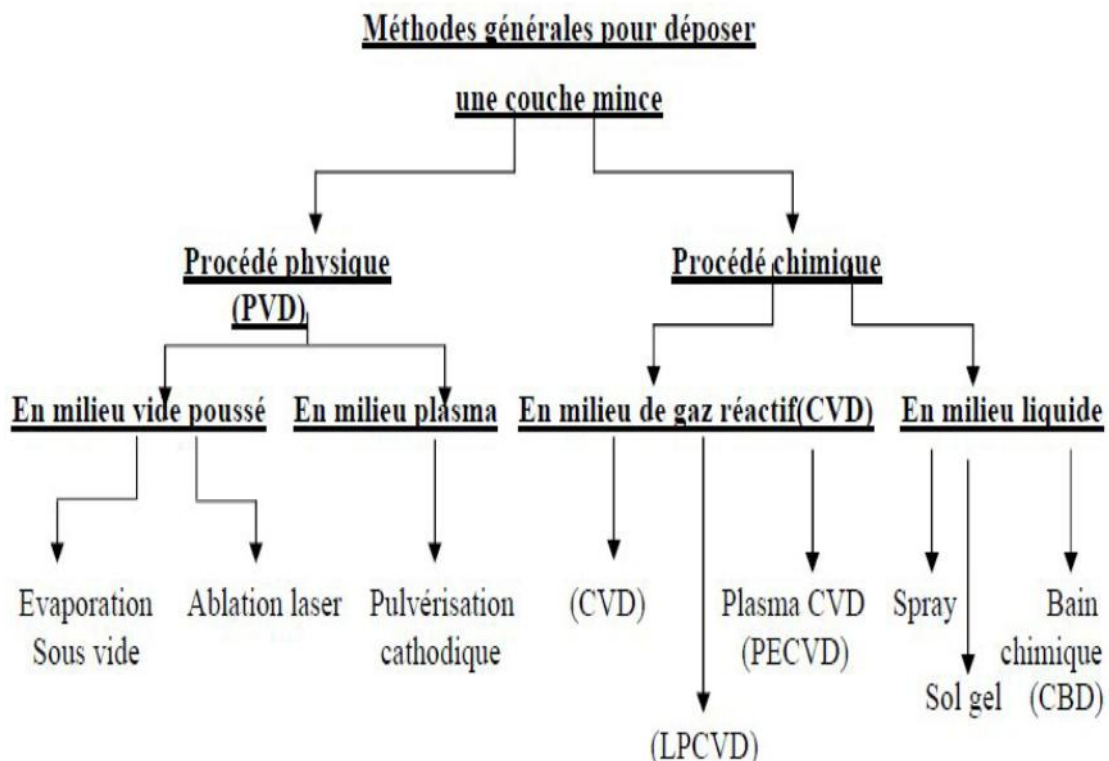


Figure II.5 : classification des différentes techniques de dépôts des couches minces [37]

III.3 Les cellules solaires à base de CuInSe_2

C'est en 1876 que le premier composant photovoltaïque à base de semiconducteur a été réalisé en élaborant mécaniquement une couche de sélénium entre deux électrodes. Mais l'introduction de cuivre et de l'indium n'a été effectuée qu'un siècle plus tard, en 1973, par Wagner et ses collaborateurs qui ont obtenus des rendements de 12% [38] à partir d'un monocristallin de CuInSe_2 . Les premières cellules en couches minces à base de CuInSe_2 ont été réalisées par (Boing).

Le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 dans sa structure chalcopyrite est un semiconducteur promoteur pour les applications photovoltaïques, ce qui est dû à ses caractéristiques, notamment son coefficient d'absorption qui est très élevé dans la gamme du spectre solaire et ses propriétés électrique et optique qui sont variables en fonction des conditions de préparation et des techniques d'élaboration. Ce matériau possède certaines caractéristique tel que :

- Gap optique direct de 1,04 eV ;
- Une absorptivité optique remarquable de 10^5 cm^{-1} entre 1,1 et 2,6 eV ;
- Des mobilités d'électron de $1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et de trou de $20 \text{ cm}^2/\text{V.s}$;

Enfin on peut dire que le CuInSe_2 serait excellent comme matériau actif dans la cellule à faible gap d'une structure tandem.

a. Structure d'une cellule solaire à base de CuInSe_2

Une cellule solaire à couches minces à base de CuInSe_2 est constituée de six couches principales (Figure II. 4) [6] :

Le substrat : Généralement en verre, mais on peut utiliser des substrats flexibles ou métalliques ;

Le contact inférieur : C'est un contact ohmique, dans la plupart des cas c'est du Mo ou de l'ITO ;

La couche absorbante : Avec une conduction type p, souvent en Si, CdTe, CuInSe_2 , $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$, etc. ;

La couche tampon : Avec une conduction de type n, souvent en CdS, ZnS, ou bien du CuInSe_2 pour la fabrication des homojonctions ;

Une couche d'oxyde transparent conducteur : En ITO (indium tin oxyde) ou ZnO ;

Le contact supérieur : Sous forme de grille métallique en Ni-Al.

Notons que, dans des cas particuliers, une couche dite anti-réfléchissante en MgF est ajoutée.

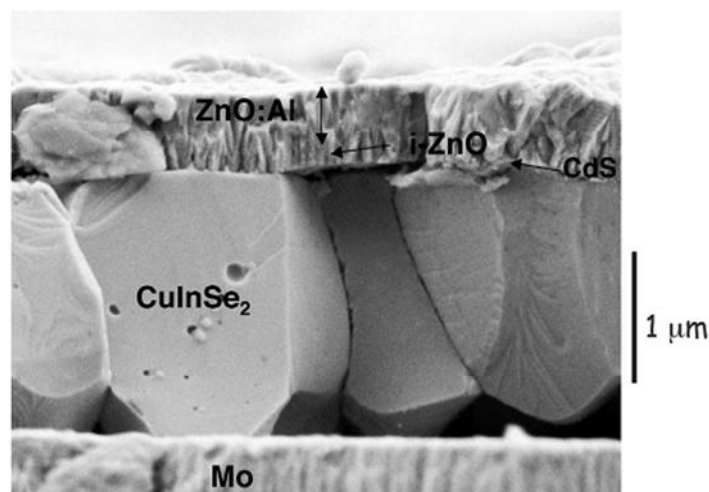


Figure II.6: Vue en coupe transverse au microscope électronique à balayage d'une cellule à base de CuInSe_2 électro déposé, élaborée à l'IRDEP [7]

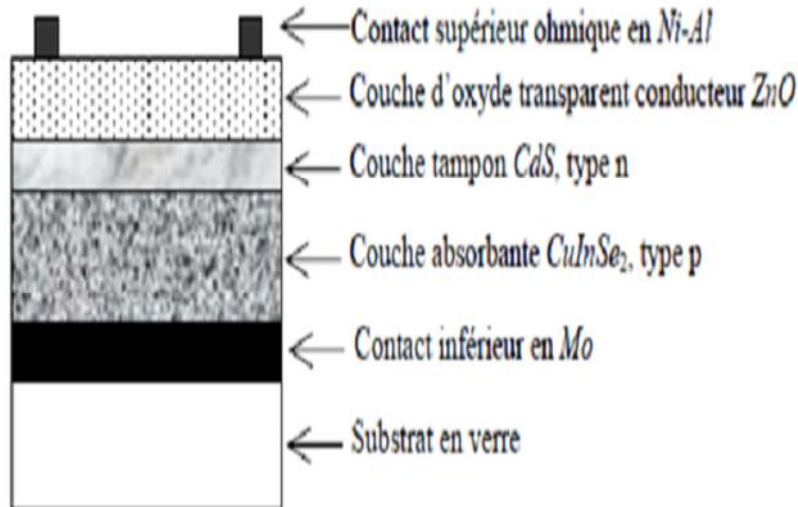


Figure II.7 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CuInSe₂.

b. Diagrammes des bandes d'énergies de la cellule CuInSe₂ :

La figure ci-dessous représente le diagramme de bande associé aux cellules CIS. Au voisinage de l'interface CIS /CdS, les bandes d'énergies sont courbées par la variation du potentiel électrostatique à travers la jonction p-n. l'interface entre CIS et la couche tampon présente une discontinuité d'énergie positive au niveau de la bande de conduction du CIGS.

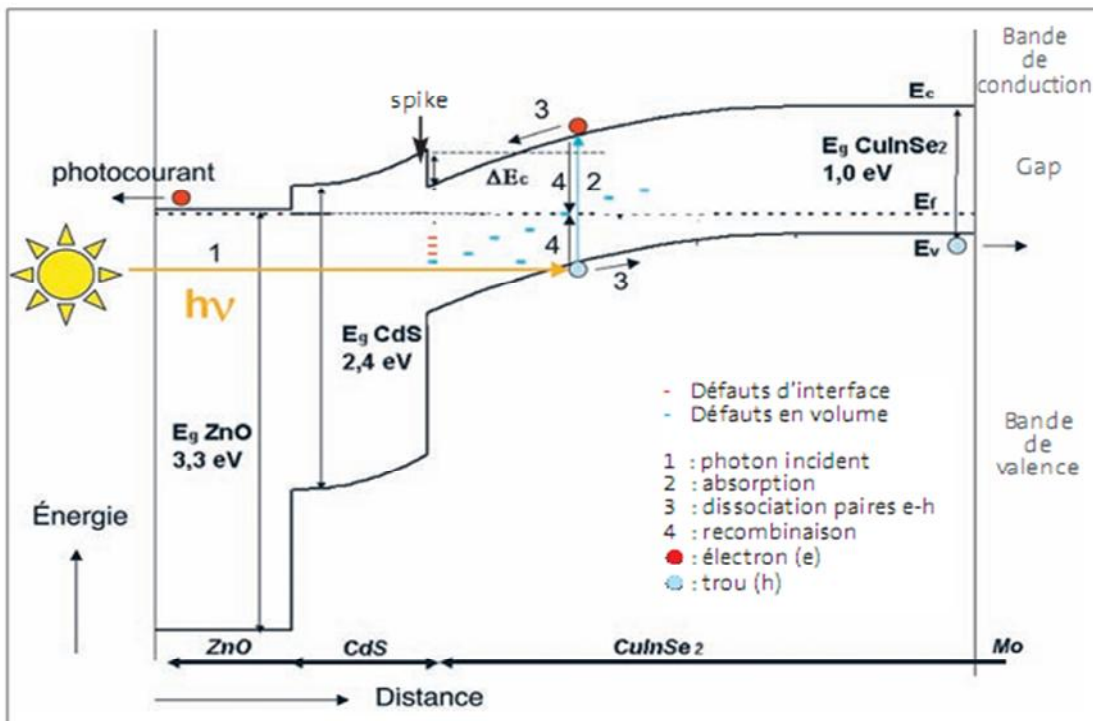


Figure II.8: diagramme de bandes d'une cellule CIS [39].

III.4 Cellules solaires à base de Cu (In,Ga)Se₂ (cellules solaires CIGS)

Durant ces dernières années, le développement des cellules solaires en couche minces et en particulier les cellules de type chalcopyrites telles que Cu (In,Ga) S, Se₂ a eu des progrès très significatifs. Un rendement supérieur à 19% a été obtenu par plusieurs groupes. [40,41]

a. Structure d'une cellule solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂

Dans sa configuration la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est généralement une plaque de verre sodocalcique (*Soda-Lime Glass*, SLG). La figure 2.1 présente la structure standard d'une cellule à base de CIGS [42].

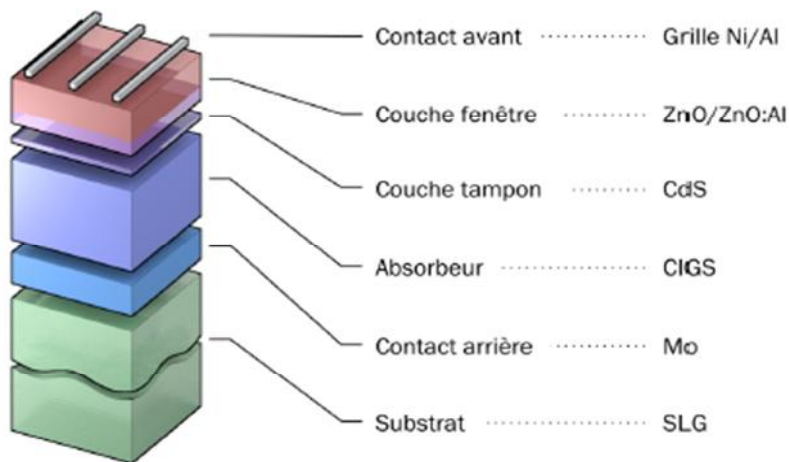


Figure II.9 : structure standard d'une cellule à base de CIGS [41,42]

b. Diagramme des bandes d'énergie de la cellule CIGS

Le diagramme des bandes d'énergie de la cellule CIGS est représenté dans la figure suivante :

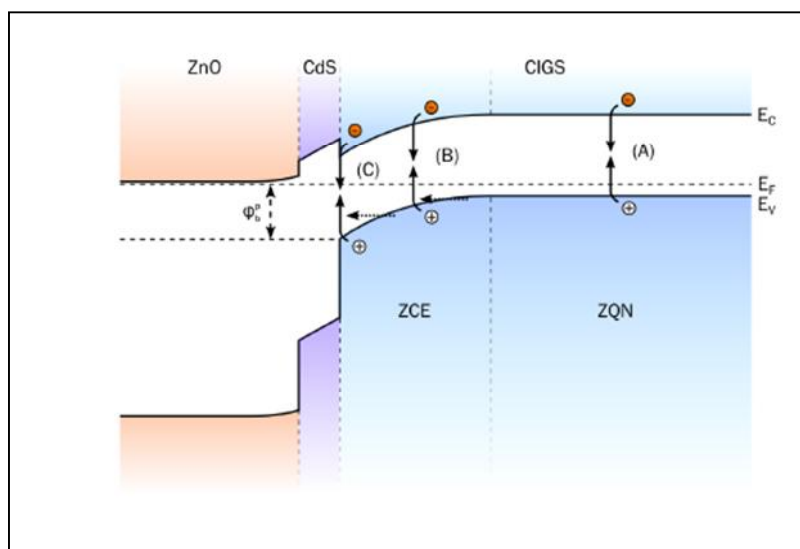


Figure II.10: diagramme des bandes d'énergie d'une cellule CIGS [42]

Le diagramme de bandes d'une structure ZnO/CdS/CIGS présente les trois principales zones de recombinaisons :

- A) dans la zone quasi-neutre (ZQN) du CIGS,
- B) dans la zone de charge d'espace (ZCE),
- C) à l'interface CdS/CIGS. Les flèches horizontales, en pointillés indiquent la possibilité de participation de l'effet tunnel aux recombinaisons

III.5 Les cellules solaires en couches minces à base de CdTe

Etudié de puis très longtemps surtout à l'état monocristallin, le CdTe permet d'obtenir des structures photovoltaïques d'une grande stabilité. En couches minces plusieurs équipes ont obtenu des rendements supérieurs à 10%. [43 ,44].

Le Tellure de Cadmium (CdTe) est un matériau à gap direct très proche de l'optimum pour une cellule unicolore 1,45 eV ; son affinité électronique est de 4,28 eV. Il offre des possibilités d'être dopé de type n ou de type p avec une tendance naturelle au type p, due a des lacunes de cadmium, les mobilités des porteurs peuvent atteindre, dans le monocristal 1200 cm²/Vs pour les électrons et 80 cm²/Vs pour les trous.

a. Structure de la cellule solaire à base de CdTe

La figure (II.11) montre la structure de la cellule solaire la plus courante. Elle est constituée d'une hétérojonction n-CdS/p-CdTe. Le CdS du type n est déposé sur le verre couvert d'une couche d'OTC (oxyde transparent conducteur) tel que In₂O₃ ou SnO₂.

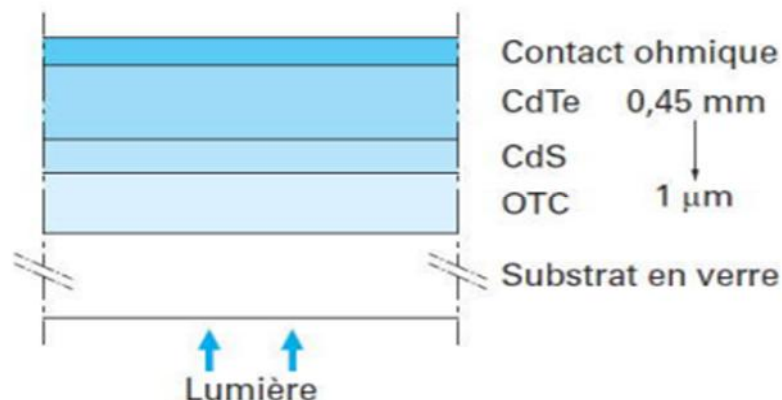


Figure II.11 : Structure d'une cellule solaire à base de CdS/CdTe

b. Diagramme des bandes d'énergie de l'hétérojonction CdS-CdTe

La figure ci-dessous illustre un diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire à base du CdS-CdTe.

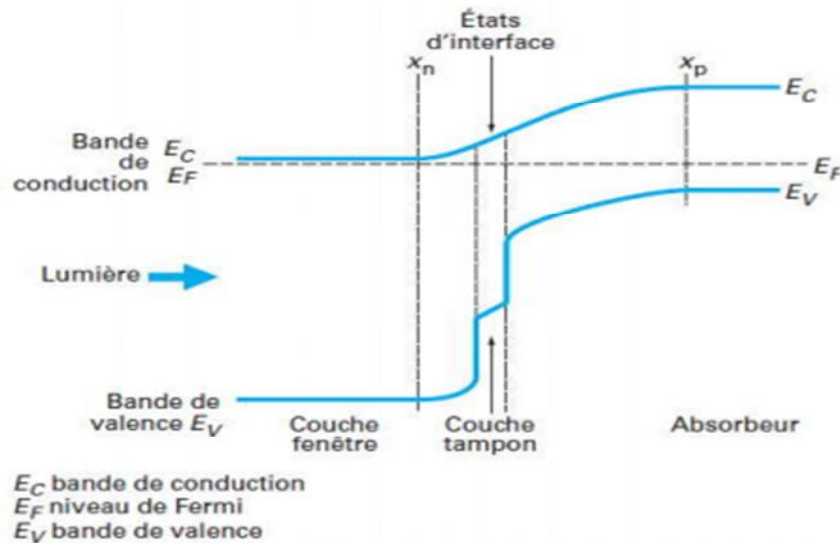


Figure II 12. : Schéma des bandes d'énergie dans l'hétérojonction CdS-CdTe[45]

Sous illumination, les porteurs sont surtout générés dans la zone de charge d'espace du CdTe de type p. Donc la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que par la diffusion. Comme il n'y a presque pas de zone de charge d'espace dans le CdS qui est fortement dopé et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en fait une couche morte du point de vue photovoltaïque. Il est souhaitable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

III.6 Cellules solaires à base de a-Si:H/c-Si (cellules solaires HIT)

Dans une cellule à hétérojonction, la diode est réalisée grâce à l'empilement de couches amorphe n et p de chaque côté du c-Si, d'énormes travaux de recherche en été effectués sur cette cellule depuis 1974 (de faible rendement) pour atteindre un rendement qui dépasse les 24% en 2013[46-49].

a. Structure d'une cellule solaire de type HIT

Plusieurs laboratoires ont entrepris des recherches en se basant sur le même type de structure, pour cela nous avons choisi une structure typique (voir figure II.13)

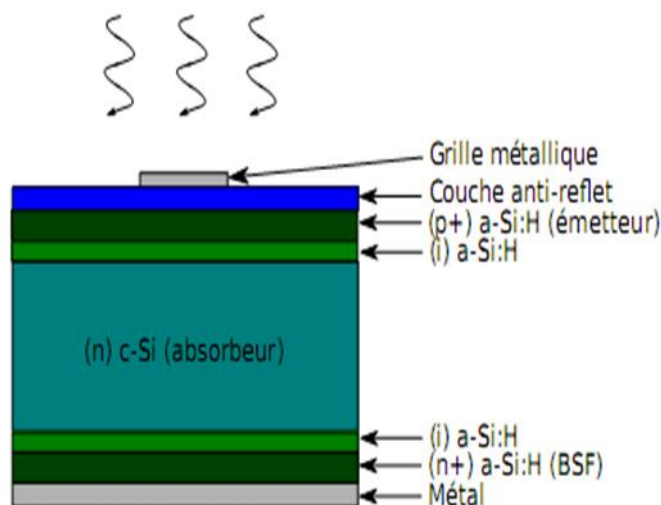


Figure II 13 : Structure d'une cellule solaire de type HIT [50]

La structure d'une cellule solaire à hétérojonction de Si conventionnelle de type HIT est représentée sur la figure II.13. Le wafer du silicium cristallin de type n est recouvert en face avant par une couche mince du silicium amorphe hydrogéné non dopée puis d'une couche dopée p formant l'émetteur. En face arrière nous retrouvons un empilement similaire ou la couche dopée est de type n+ afin de former le champ arrière BSF. Les couches supplémentaires sont l'ITO pour améliorer l'absorption des photons dans la structure, et des métallisations.

b. Diagramme des bandes d'énergies de la cellule solaire HIT

L'hétérojonction de silicium a-Si :H/c-Si résulte de la mise en contact de deux matériaux de gap différents, par dépôt de silicium amorphe hydrogéné sur le substrat cristallin.

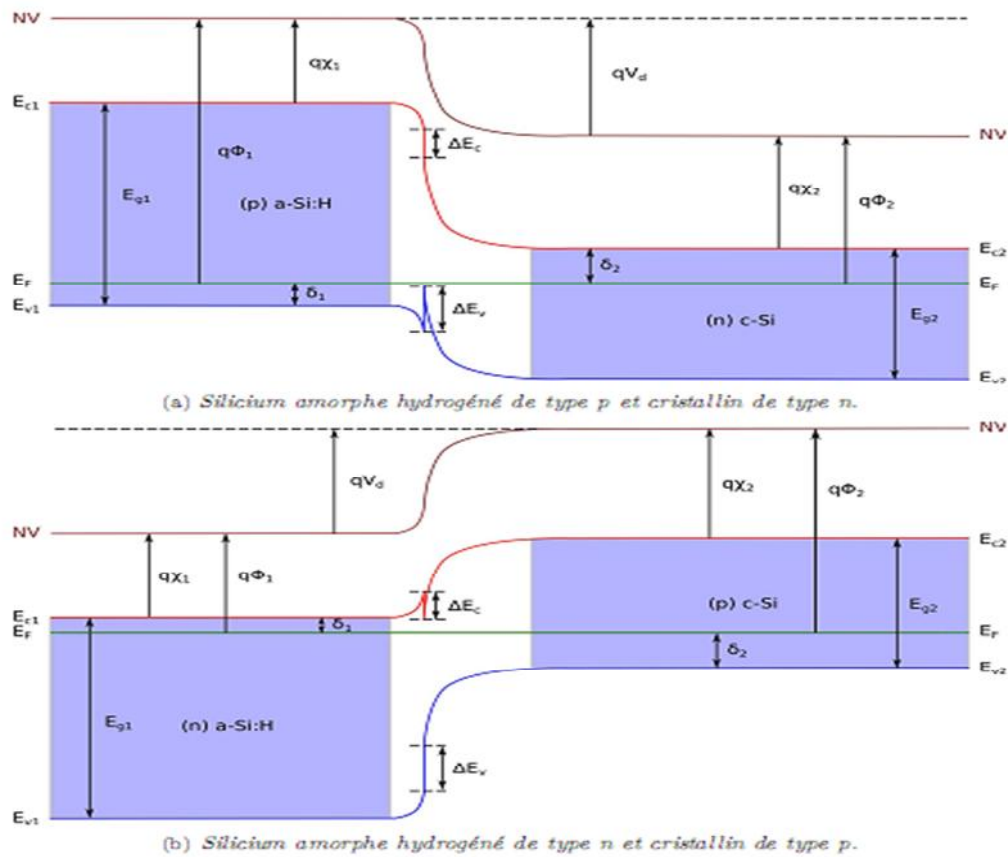


Figure II. 14: Diagrammes des bandes pour des hétérojonctions de silicium (p) a-Si :H/(n) c-Si et (n) a-Si :H/(p) c-Si.[50]

D'après ces diagrammes, la différence d'énergie de gap entre les matériaux c-Si ($E_g = 1.12$ eV) et a-Si ($E_g = 1.75$ eV), implique la présence de désaccords des bandes de conduction et de valence à la jonction. La présence de discontinuités à l'interface va jouer un rôle important dans les phénomènes de transport des charges. En effet, les porteurs minoritaires du silicium cristallin sont dans chaque cas (de type p comme de type n) confronté à une barrière à l'interface, favorisant leurs accumulation et pouvant être à l'origine de recombinaison. D'autre part, les porteurs majoritaires du Si cristallin sont eux aussi face à une barrière, qui tend à les éloigner du matériau amorphe et améliore leur collecte en face arrière. Enfin on constate la présence d'une région d'inversion forte du cristallin à l'interface pouvant favoriser le transport latéral. La hauteur de ces barrières peut donc favoriser autant de recombinaisons des porteurs que leur collecte, ce qui implique de développer une ingénierie des bandes afin de contrôler ces processus.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé les technologies des cellules solaires à multijonctions, en décrivant leurs structures et principe de fonctionnement. Les cellules solaires à hétérojonction présente de nombreux avantages par rapport aux homojonctions comme :

- Procédés d'élaboration à basses températures ;
- Possibilité de dépôt de grande surface ;
- Meilleur coefficient de température ;
- Possibilité d'utiliser des wafers de silicium plus minces.

Dans le chapitre III, nous nous sommes intéressés à la simulation de ces cellules à hétérojonction en fonction de plusieurs paramètres afin d'améliorer leurs caractéristiques électriques. Nous avons également présenté les résultats de simulation dans le chapitre IV.

I. Introduction

Durant les dernières années, à cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques de fabrication des cellules), les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Il existe principalement quatre type de simulateurs, nous citons à titre d'exemple les simulateurs fonctionnels ou logiques, les simulateurs électriques ou analogiques, les simulateurs technologiques et ceux de composants ou de dispositifs comme : AFORS HET, PC1D, SILVACO...etc.

Dans notre travail nous avons utilisé le simulateur des dispositifs AFORS HET.

II. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET

Le logiciel AFORS-HET (**A**utomate **F**or Simulation of **H**eterostructure) est un outil de simulation numérique à une dimension, développé en Allemagne par le laboratoire Helmholtz Zentrum Berlin (HZB), ce logiciel est adapté d'une manière particulière à la simulation des cellules solaires a hétérojonction à base de silicium.

AFORS HET possède une interface graphique qui nous permet de définir, de créer facilement des structures différentes, dont on peut contrôler la plupart des paramètres, tel que : l'affinité électronique, énergie du gap du materiau , la mobilité des électrons et trous... , cette interface est répartie en 3 zones (voir figure):

- Zone de contrôle : *program control* ;
- Zone de paramètres externes : *external parameters* ;
- Zone de mesure : *mesurment*.

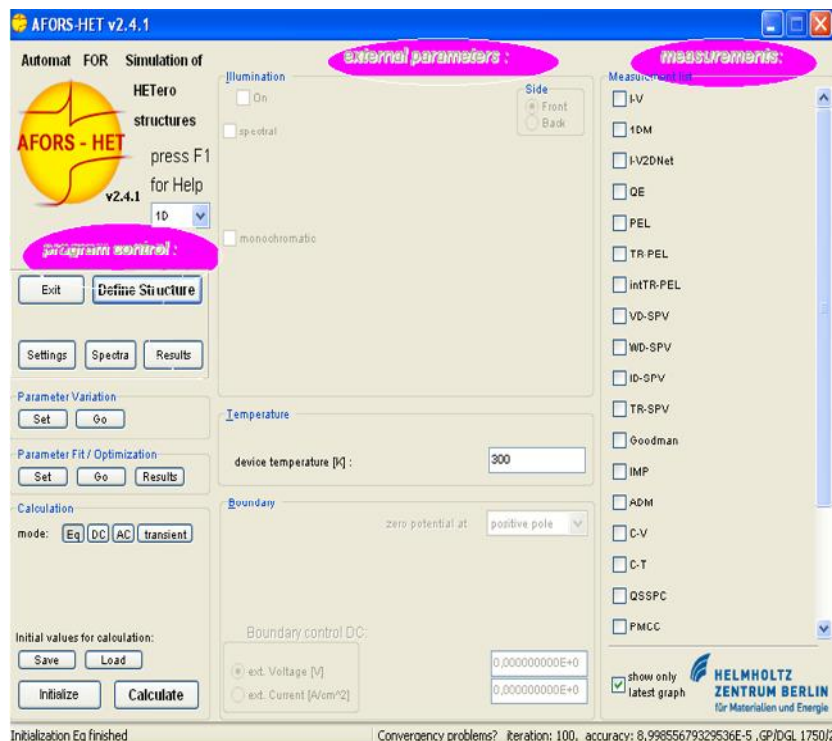


Figure III.1 : Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.

La zone de contrôle sert à définir la structure de la cellule à simuler, ainsi que les paramètres de chaque couche utilisée, les paramètres externes tels que la température externe, le spectre d'illumination ainsi que les conditions aux limites sont déclarés dans la deuxième zone (external parameters), La troisième zone où les mesures sont effectuées s'appelle measurements.

III. Etapes de simulations

La première étape de simulation avec AFORS-HET est habituellement de définir la structure que nous allons simuler. Une structure est composée toujours d'un contact avant et arrière et un nombre variable de couches entre les quelles existent des interfaces, on peut les définir en cliquant sur le bouton correspondant dans la fenêtre principale de AFORS-HET (figure III.2).

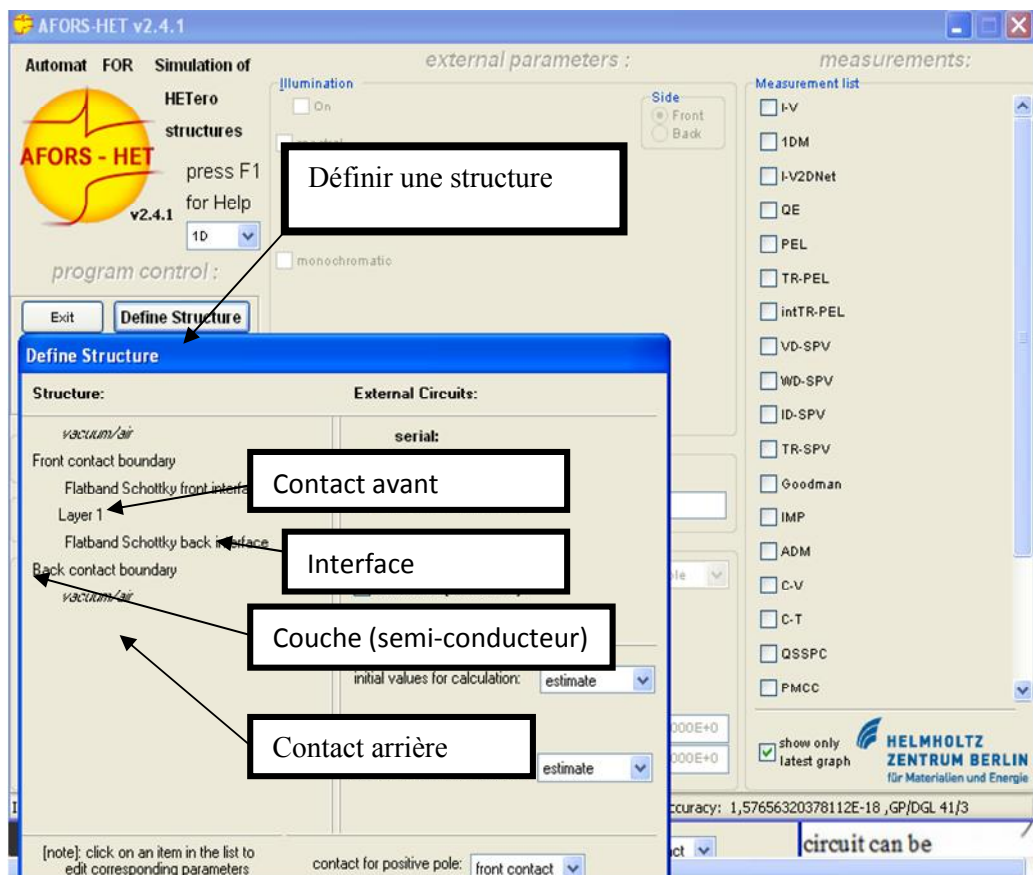


Figure III.2: Fenêtre correspondante à la définition de la structure.

Après la définition de la structure, nous introduisons les paramètres nécessaires tels que l'épaisseur et les propriétés électriques (le gap, le dopageetc.), voir figure III.3

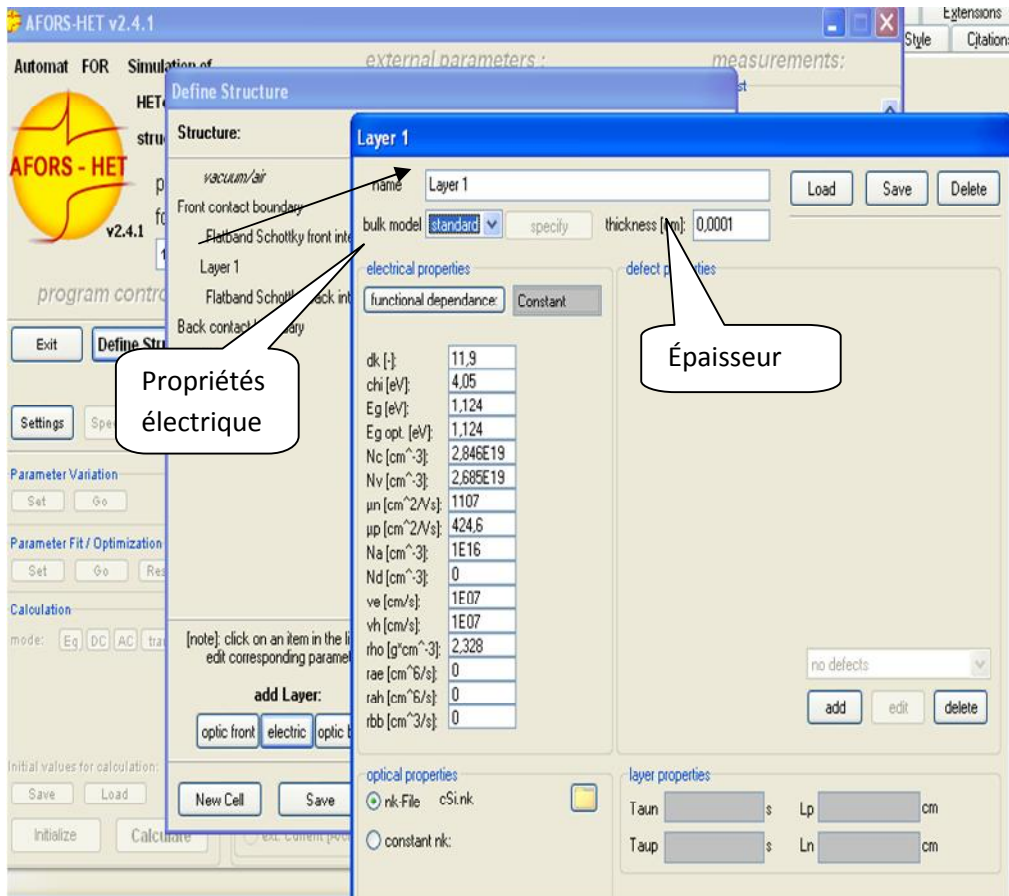


Figure III.3: Introduction des différents paramètres de la cellule.

Une fois la cellule est créée et enregistrée, le calcul des conditions d'équilibre thermodynamique est effectuée comme illustré sur la figure suivante.

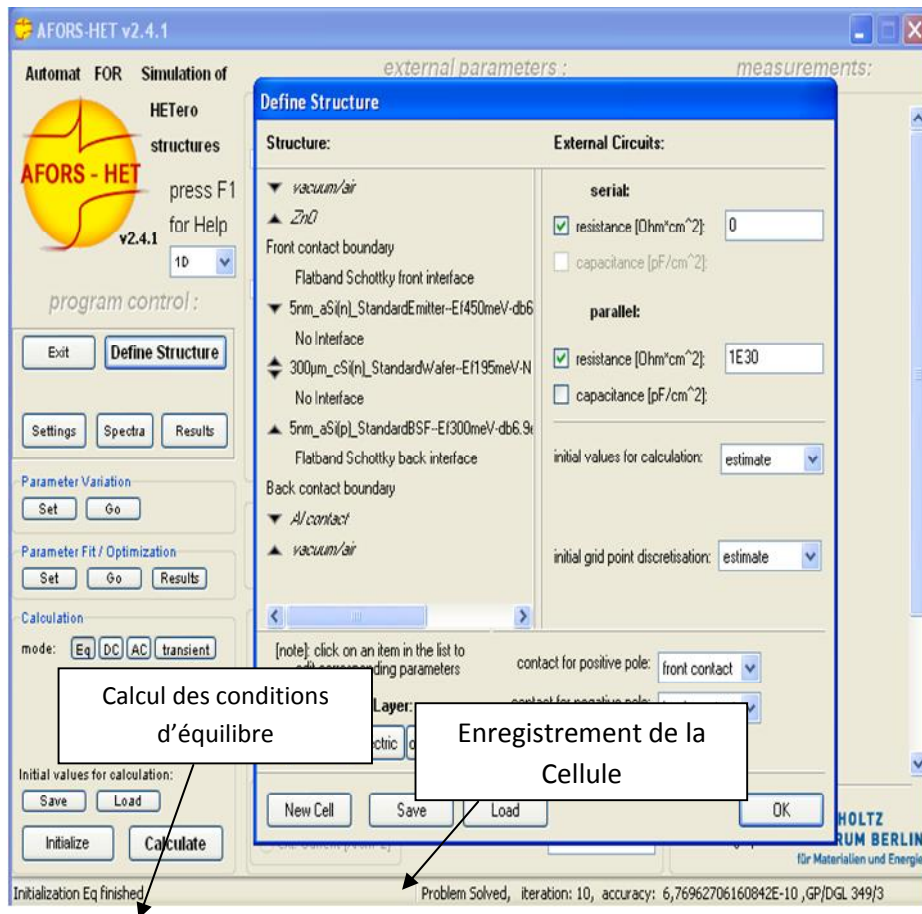


Figure III.4 : Calcul des conditions thermodynamiques de la cellule.

Pour l'illumination de la cellule, on choisit d'abord le mode de polarisation AC ou DC, on sélectionne ensuite la lumière spectrale ou monochromatique avec laquelle on veut travailler (figure III.4). On pourra ensuite effectuer de nombreuses simulations.

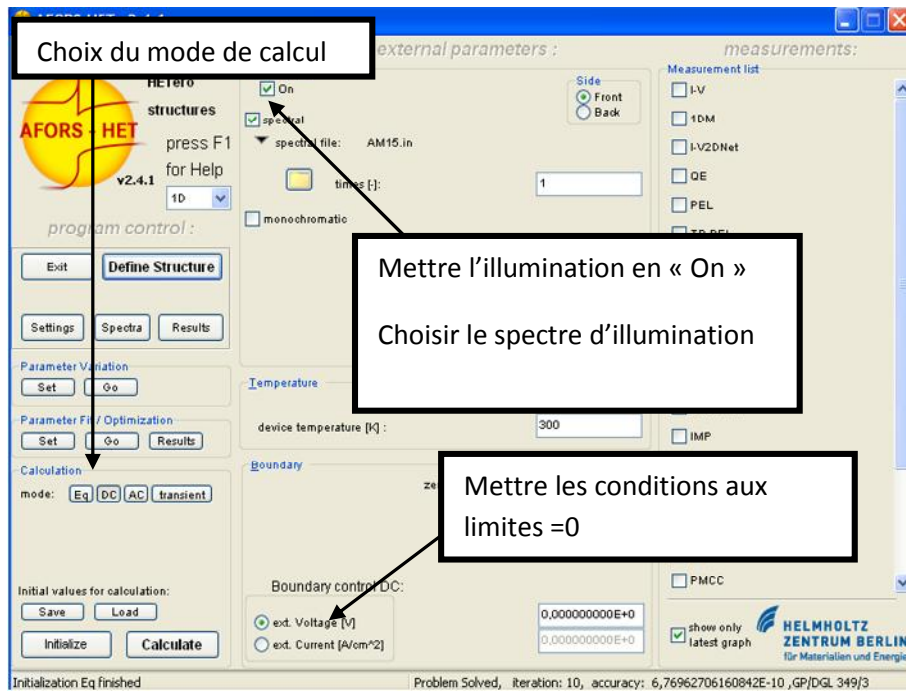


Figure III.5: Mode de calcul et illumination de la cellule.

Ce logiciel AFORS-HET est utilisé par de nombreux chercheurs [17,47, 51, 52] dans la simulation des cellules solaires à hétérojonction et HIT.

Présentation des cellules solaires simulées

Notre étude a concerné en premier lieu les cellules solaires à simple hétérojonction de $\text{ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al}$, c'est-à-dire que l'émetteur seulement est constitué d'un film a-Si:H . Puis nous nous sommes intéressés aux cellules à double hétérojonctions de $\text{ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p)/Al}$ où l'émetteur et le BSF sont réalisés à la fois à base de a-Si:H . Nous avons ensuite étudié l'effet de l'insertion d'une couche intrinsèque à travers la simulation de la structure $\text{ZnO/a-Si:H(n)/(i) a-Si:H/c-Si(p)/(i) a-Si:H/a-Si:H(p)/Al}$ appelée aussi cellule HIT (Heterojunction with Intrinsic Layer).

Dans toutes les simulations, nous avons choisi le ZnO comme un bon TCO qui joue un double rôle : celui d'une couche conductrice permettant de conduire les porteurs de charges jusqu'à l'électrode de collecte et de couche antireflet permettant de diminuer les pertes optiques dans la cellule.

IV.1 Présentation de la cellule à simple hétérojonction

La figure suivante présente la structure de la cellule à simple hétérojonction (ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al) où l'émetteur seulement est constitué d'une couche de silicium amorphe hydrogéné.

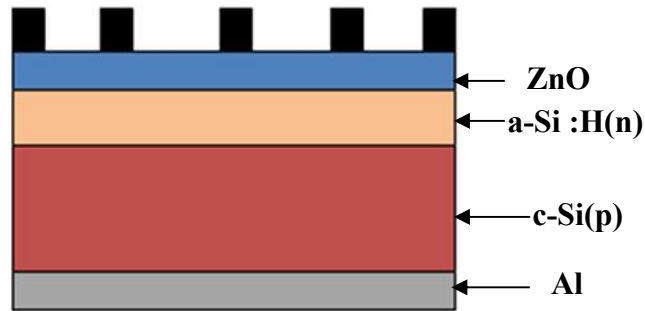


Figure III.6 : Cellule solaire à simple hétérojonction

IV.2 Présentation de la cellule à double hétérojonction

La figure suivante illustre la structure de la cellule à double hétérojonction (ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p)/Al) où l'émetteur et le BSF sont à base de silicium amorphe hydrogéné créant ainsi deux jonctions.

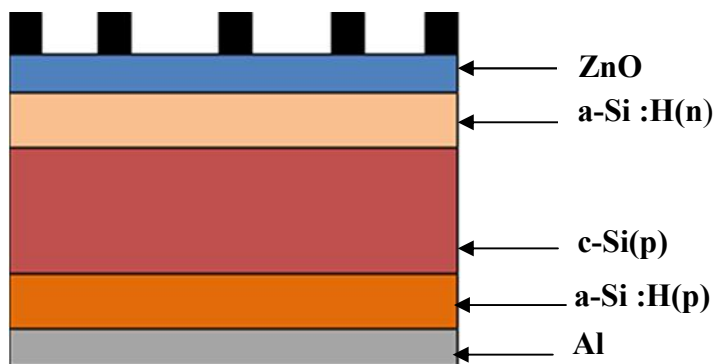


Figure III.7: Cellule solaire à double hétérojonction

IV.3 Présentation de la cellule HIT

L'amélioration du rendement de conversion de la cellule, nécessite l'insertion d'une couche intrinsèque à base du silicium amorphe hydrogéné entre l'émetteur et le substrat et entre le substrat et le BSF. Cette couche intrinsèque a pour rôle de diminuer le taux de recombinaison à l'interface a-Si:H/c-Si par une passivation efficace de la surface de la base. La structure de la cellule devient donc ZnO/a-Si:H(n)/(i) a-Si:H/ c-Si(p)/ (i) a-Si:H / a-Si:H(p) /Al (Figure III.8).

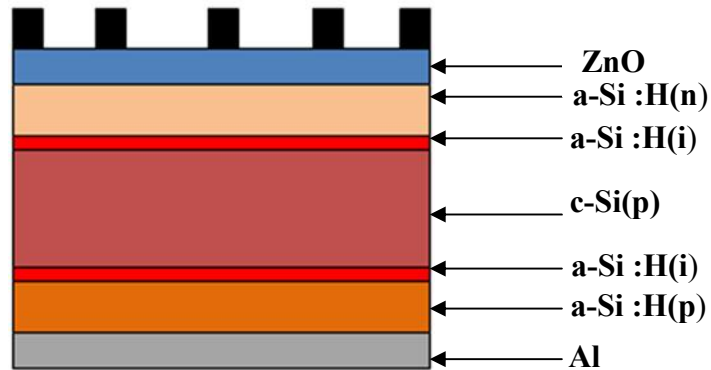


Figure III.8: Cellule solaire a hétérojonction HIT

Les simulations de ces structures sont effectués sous un spectre solaire AM 1,5 avec une puissance $P=1000 \text{ w/m}^2$ et une température de la cellule de 25°C . Dans toutes les simulations, la résistance parallèle est considérée infiniment grande et la résistance série nulle.

IV. Les paramètres de la cellule solaire à simuler

V.1 Paramètres de la couche ZnO et la couche Al

Comme nous l'avons cité précédemment, la couche ZnO est utilisée comme couche anti reflet et l'Aluminium comme contact métallique arrière. Les épaisseurs de ces couches sont représentées dans le tableau suivant :

couche	épaisseur	référence
ZnO	$8 \cdot 10^{-6}$ cm	[26,59]
Al	0.001cm	[27]

Tableau III-1: Les paramètres de la couche ZnO et la couche Al.

V.2 Paramètres des couches a-Si :H (p) ,c-Si(p), a-Si :H (n) et (i)a-Si :H utilisées

L'ensemble des paramètres des couches utilisées dans la simulation sont donnés dans le tableau ci-dessous

Paramètres	a-Si :H(n)	Réf	c-Si(p)	Réf	a-Si :H(p)	Réf
Epaisseur	5- 10 nm	[46]	300 μ m	[26]	20 nm	[46]
Gap (eV)	1,75	[52]	1,124	[52]	1,75	[52]
Dopage (cm ⁻³)	$6,892 \cdot 10^{19}$	[49]	$2 \cdot 10^{15}$	[53]	$9 \cdot 10^{19}$	[49]
Concentration en porteurs de charges Nc /Nv (cm ⁻³)	$2,86 \cdot 10^{19}/$ $3 \cdot 10^{19}$	[46]	$2,846 \cdot 10^{19}/$ $2,685 \cdot 10^{19}$	[46]	$2,86 \cdot 10^{19}/$ $3 \cdot 10^{19}$	[46]

Tableau III-2: Les paramètres des différentes couches de la cellule

V.3 Paramètres de la couche intrinsèque

les paramètres de la couche intrinsèque utilisées dans la simulation sont donnés dans le tableau ci-dessous

Paramètres	a-Si : H(i)	Réf
Epaisseur (nm)	10	[54]
Gap (eV)	1,75	[52]
Dopage (cm ⁻³)	0	[46]
Concentration en porteurs de charges Nc /Nv (cm ⁻³)	1.10 ²⁰	[52]

Tableau III-2: Les paramètres de la couche intrinsèque utilisée.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel de simulation AFORS HET qui peut être considéré comme l'un des simulateurs les plus efficaces pour la simulation des cellules à hétérojonction. Nous avons présenté trois types de cellules solaires à hétérojonctions qui feront l'objet de notre étude en variant plusieurs paramètres à savoir :

- L'épaisseur de la base ;
- La conductivité de la base ;
- L'épaisseur de l'émetteur ;
- Le dopage de l'émetteur ;
- Le gap de l'émetteur ;
- L'effet de la température ;
- L'effet de la texturisation ;
- L'effet de l'insertion d'une couche intrinsèque.

Les résultats de ces simulations sont présentés dans le chapitre suivant.

I. Introduction

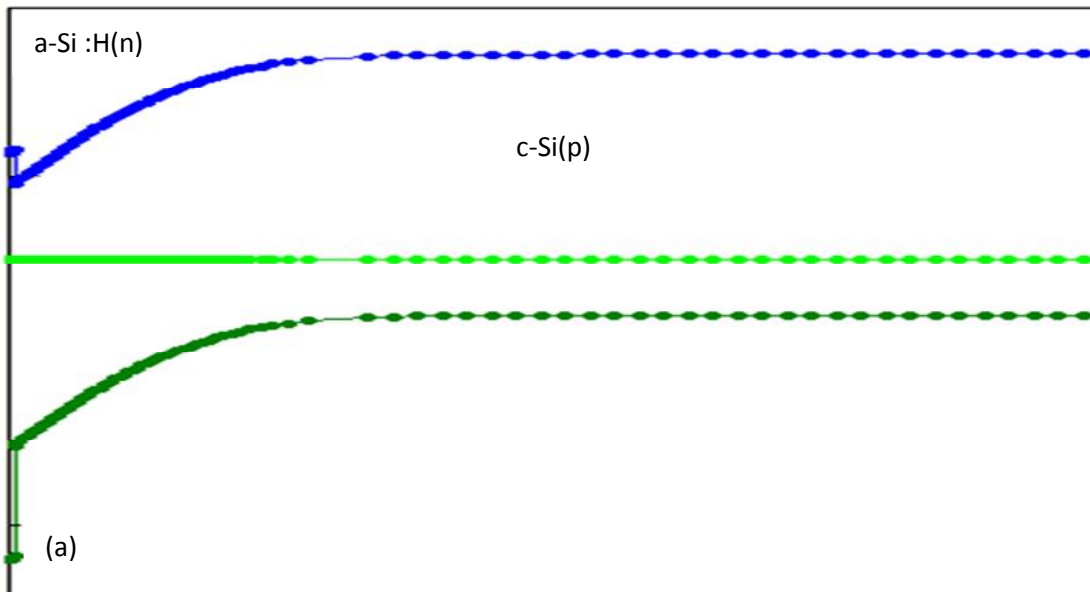
Dans ce chapitre, nous présentons une étude comparative entre les résultats de simulation des cellules solaires à simple hétérojonction de type $ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al$, double hétérojonction de type $ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p)/Al$ et cellules HIT de type $ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p)/Al$. Cette étude est complétée par une comparaison avec d'autres types de cellules solaires à multijonctions.

Nous présentons également une interprétation des résultats de simulation que nous avons obtenus, en vue d'une optimisation de la structure permettant les meilleures performances photovoltaïques.

II. Etude comparative entre les cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellules HIT

II.1 Diagrammes des bandes d'énergies

A l'équilibre thermodynamique, les niveaux de fermi sont alignés, ce qui implique une courbure de bandes de conduction et de valence ; la figure (IV-1) représente les diagrammes des bandes d'énergie des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et la cellule HIT.



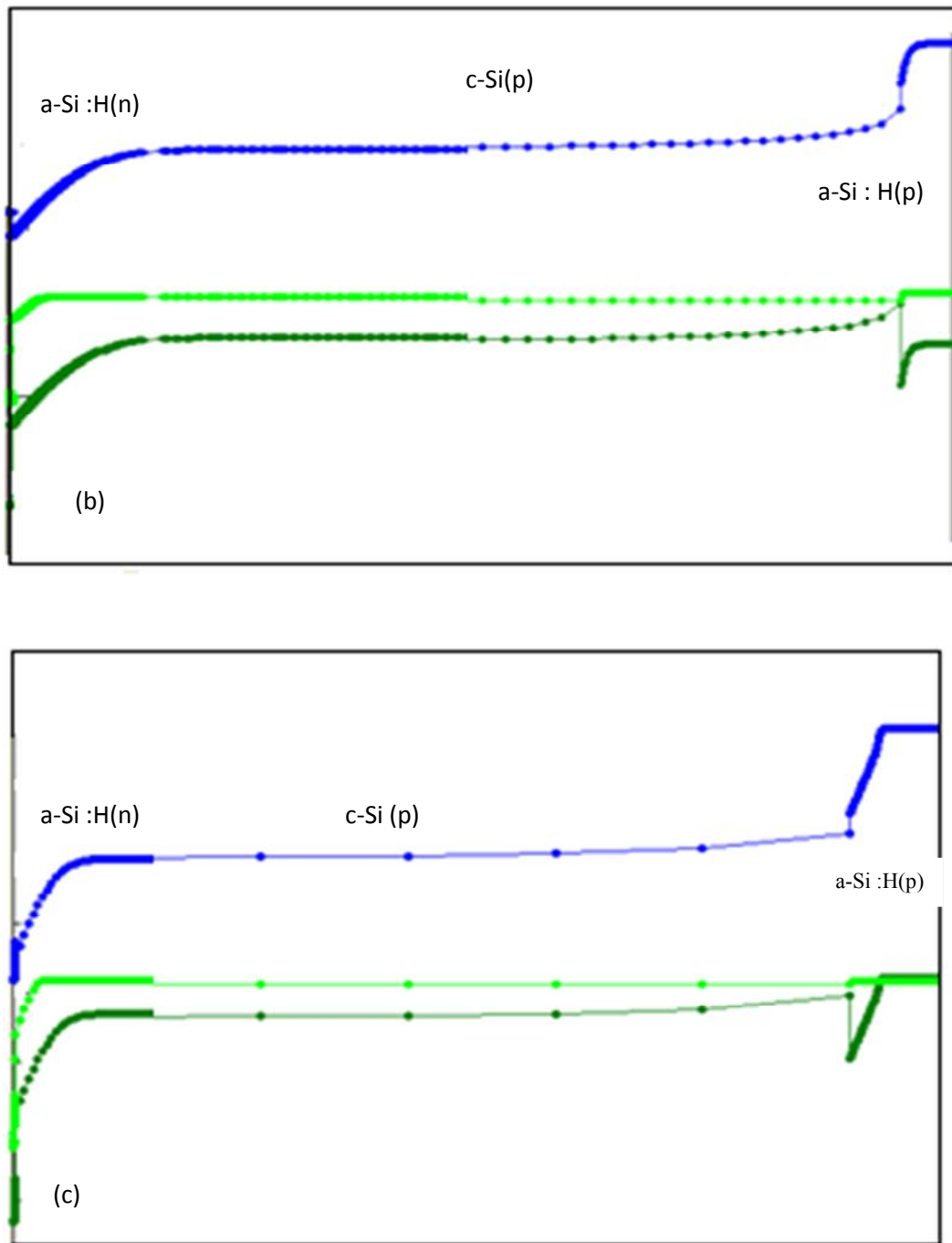
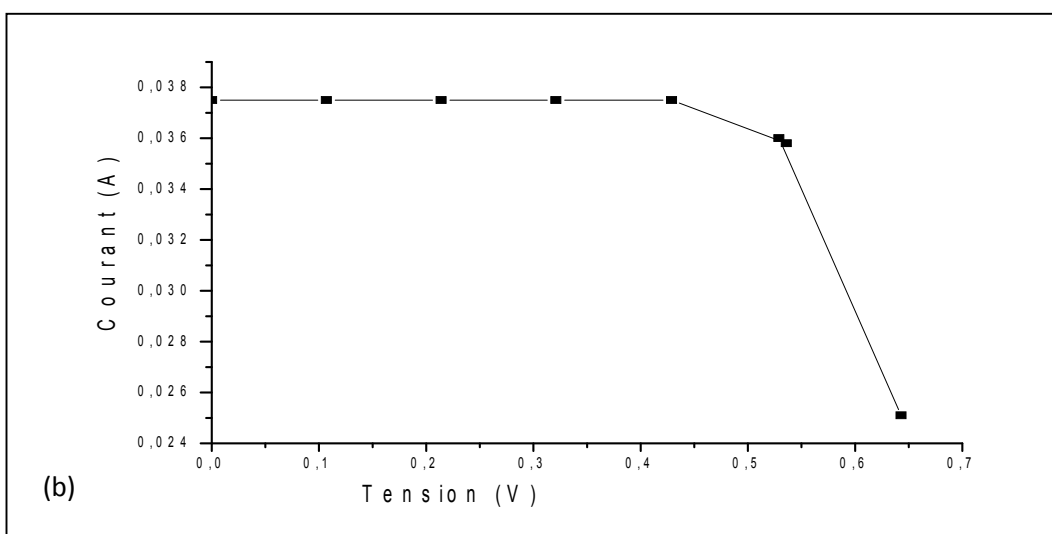
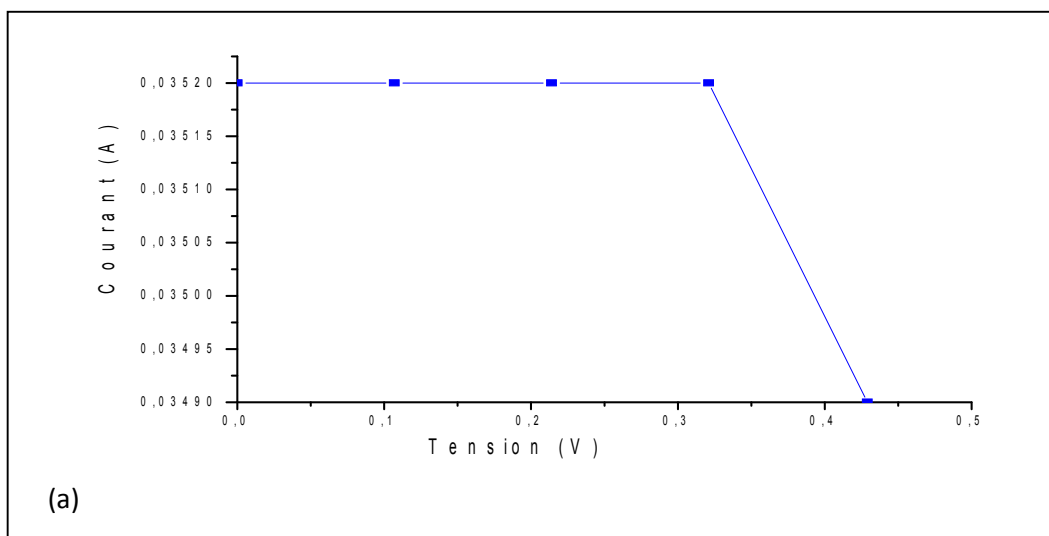


Figure IV.1 Diagrammes des bandes d'énergie des cellules solaires à l'équilibre thermodynamique : (a) Cellule à simple hétérojonction ; (b) Cellule à double hétérojonction ; (c) Cellule HIT.

II.2 Caractéristiques courant-tension

La figure (IV-2) représente les caractéristiques courant-tension des cellules à simple hétérojonction ($ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al$), double hétérojonction ($ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p)/Al$) et cellule HIT ($ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p)/Al$) que nous avons simulées sous AFORS-HET, elles sont déterminées sur la base des paramètres que nous avons cités dans le troisième chapitre. Les paramètres électriques correspondants sont représentés sur le tableau IV-1.



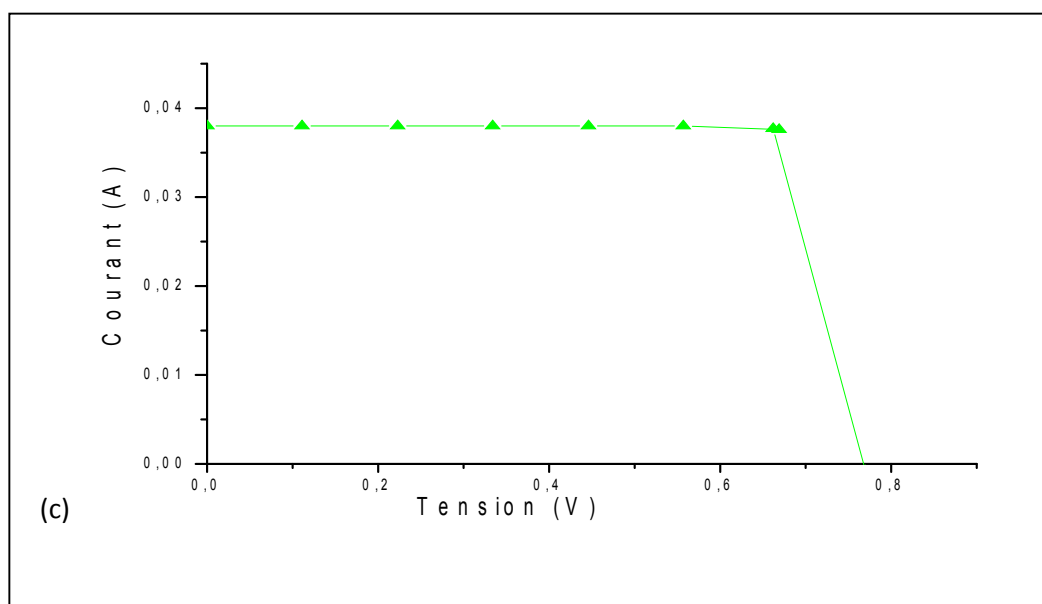


Figure IV.2 : caractéristiques I(V) des cellules solaires simulées, (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT

Tableau (IV-1) : Paramètres électriques des cellules solaires simulées.

performances cellule	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA /cm ²)	FF (%)	η (%)
Simple hétérojonction	571,7	35,7	73,28	14,77
Double hétérojonction	727,4	37,59	69,85	19,07
HIT	769,1	37,94	84,58	23,69

Les résultats de simulation que nous avons obtenus montrent que les cellules solaires à double hétérojonction présentent de meilleures caractéristiques courant-tension (Figure IV-2) combinées à de meilleurs paramètres photovoltaïques (Tableau IV-1) comparativement aux cellules solaires à simple hétérojonction, en raison de la présence de la couche amorphe *a-Si:H(p)* entre le silicium cristallin (base) et le contact arrière (Al), formant ainsi un champ de surface arrière répulsif (BSF : Back Surface Field) dans les cellules à double hétérojonction. Comme nous pouvons le constater sur la figure (IV-1), le BSF permet de créer une courbure de bandes qui permet de repousser les électrons de la surface arrière très recombinaison et de les confiner dans la base, augmentant ainsi leur statistique de collection par le contact de face avant de la cellule. Ceci permet de réduire les pertes par recombinaison sur la surface arrière du silicium cristallin.

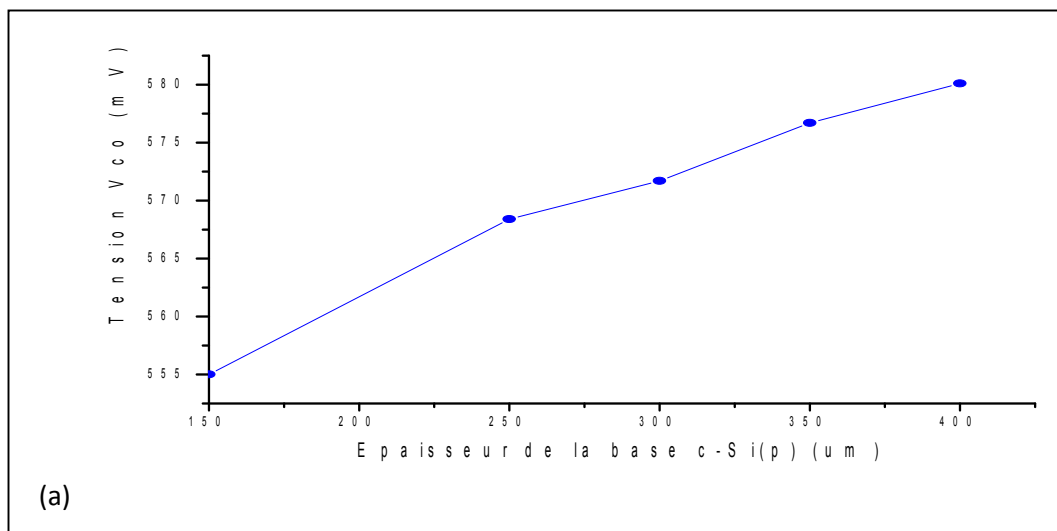
L'insertion d'une couche de silicium amorphe intrinsèque $a\text{-Si:H}(i)$ en face avant (c'est-à-dire entre l'émetteur et la base) et en face arrière (c'est-à-dire, entre la base et le BSF) donnant lieu à la structure HIT, permet de mieux passiver la surface du silicium cristallin. Ceci explique les meilleures valeurs de J_{cc} , V_{co} , FF et η , des cellules solaires HIT (Tableau IV-1). Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont conformes à ceux obtenus par d'autres chercheurs [55,56]

Dans la suite de ce travail, nous étudions par simulation l'influence de différents paramètres sur les performances photovoltaïques des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellules HIT, afin d'améliorer leurs caractéristiques électriques.

III. Effet de la variation de l'épaisseur du substrat c-Si sur les performances des cellules solaires simulées

III.1 Influence de l'épaisseur du substrat sur la tension du circuit ouvert V_{co}

La figure suivante représente la variation de la tension du circuit ouvert des cellules solaires simulées en fonction de la variation de l'épaisseur de la base c-Si(p).



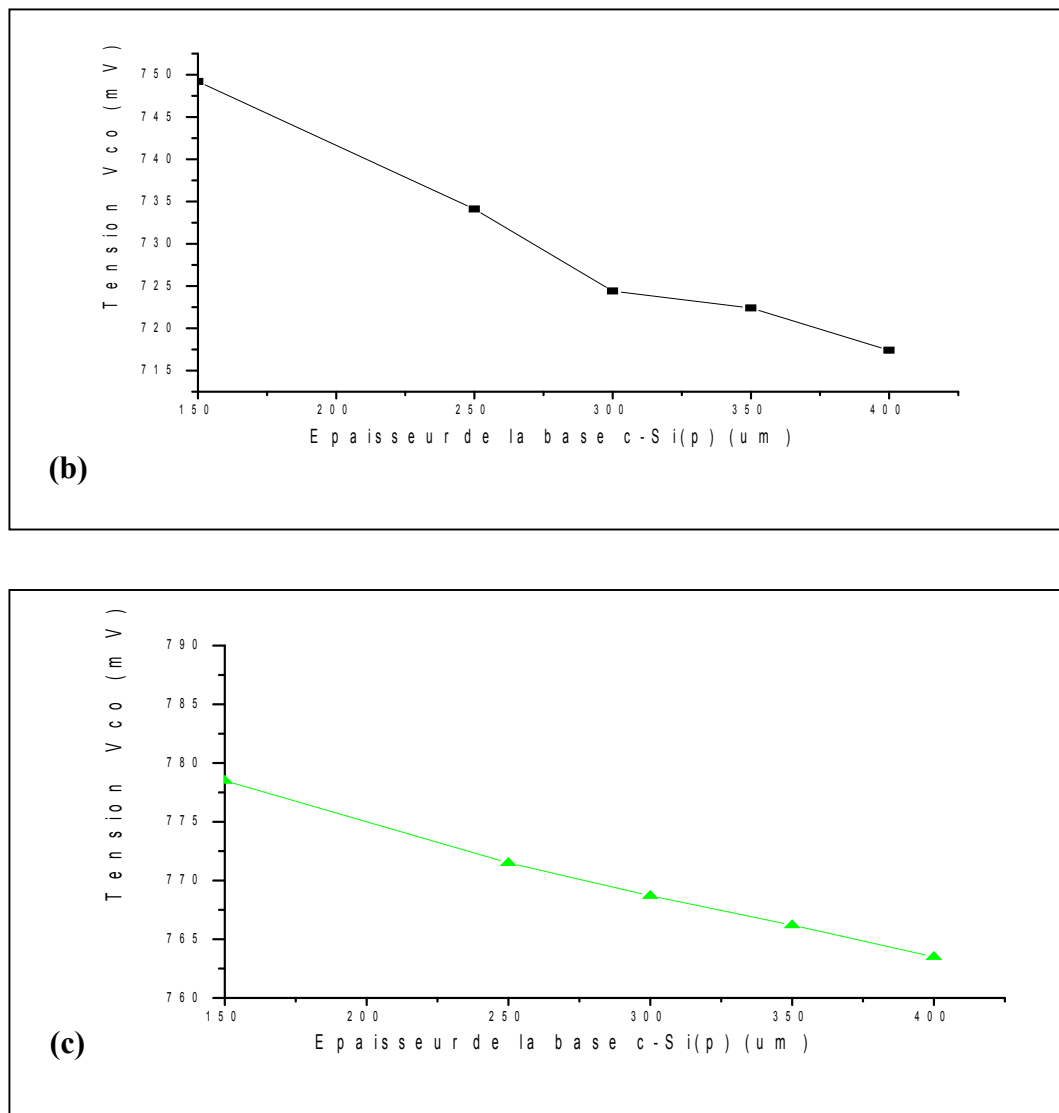


Figure IV.3: Variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base :

(a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT

III.2 Influence de l'épaisseur du substrat sur le courant de court circuit J_{cc}

La variation du courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de la base des cellules simulées est représentée dans la figure ci-dessous.

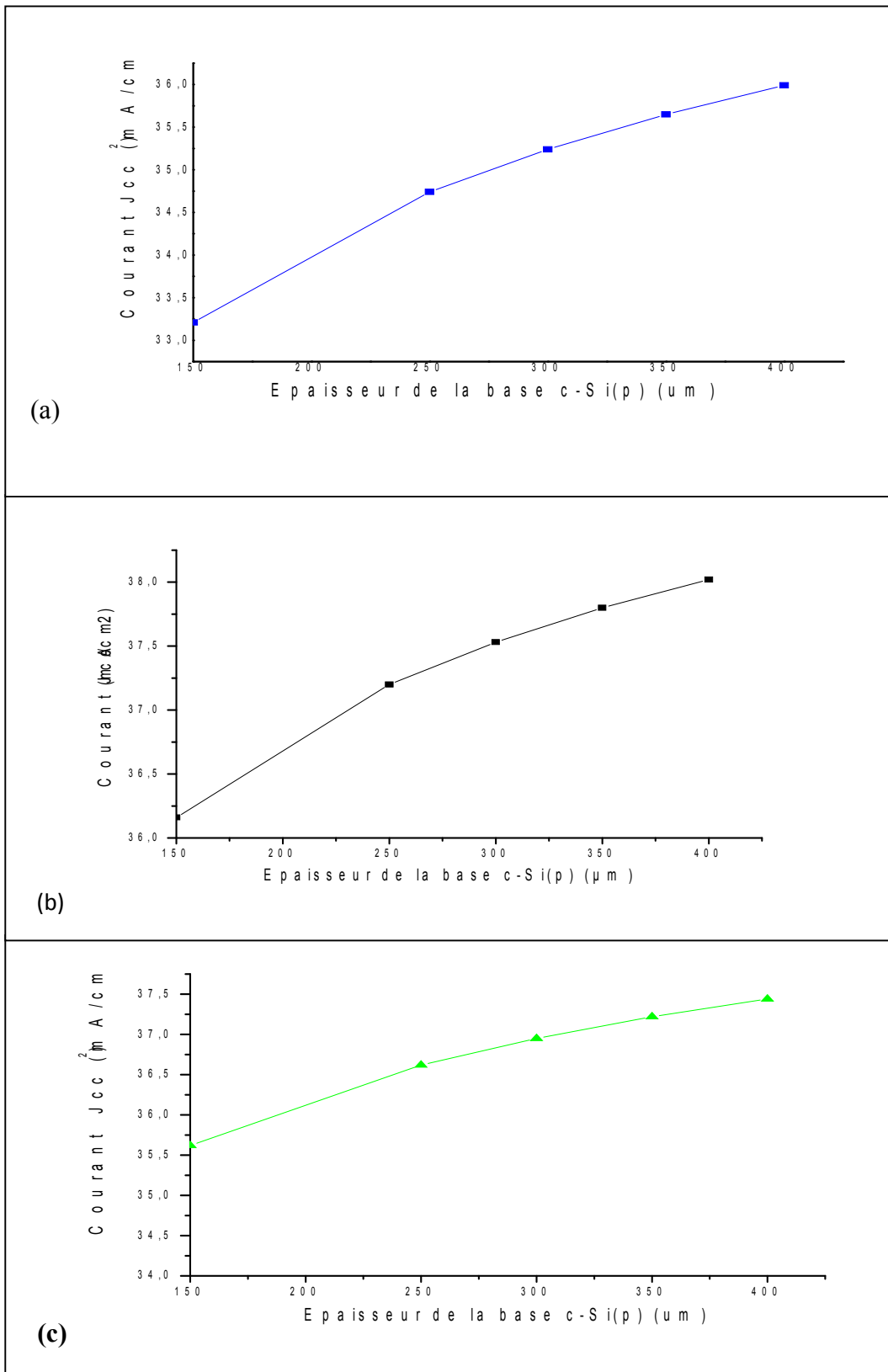
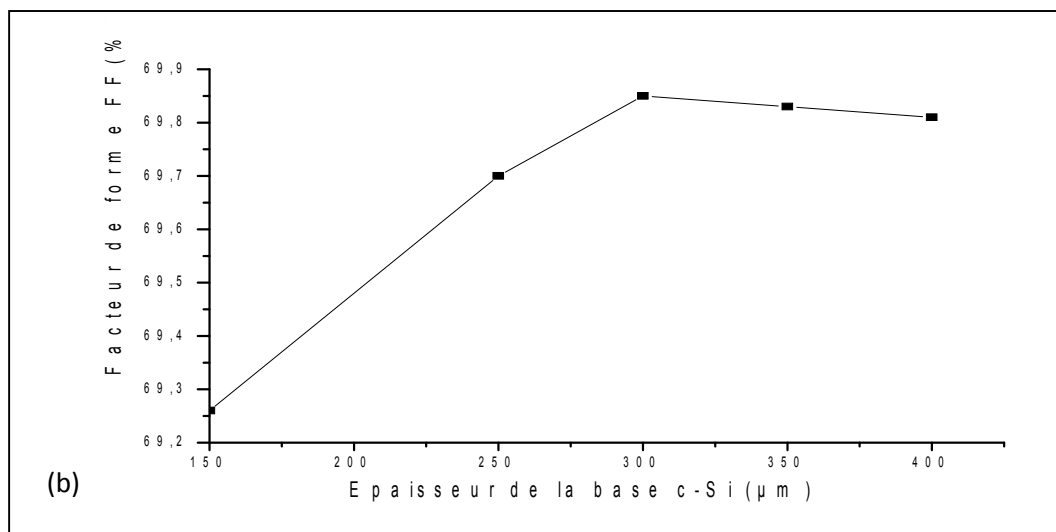
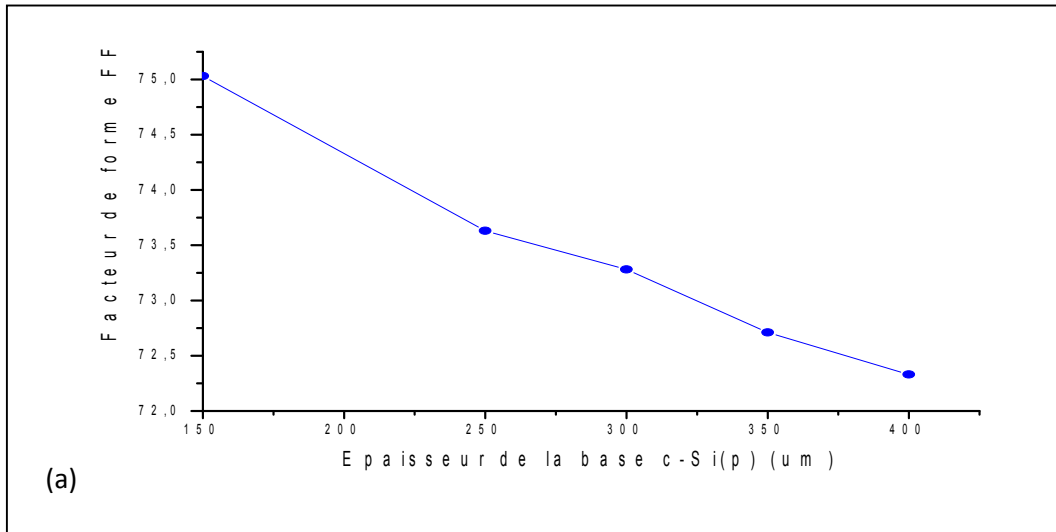


Figure IV.4: Variation du courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de la base :
 (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

III.3 Influence de l'épaisseur du substrat sur le facteur de forme FF

La figure (IV-5) représente la variation du facteur de forme des cellules étudiées en fonction de l'épaisseur de la base c-Si (p).



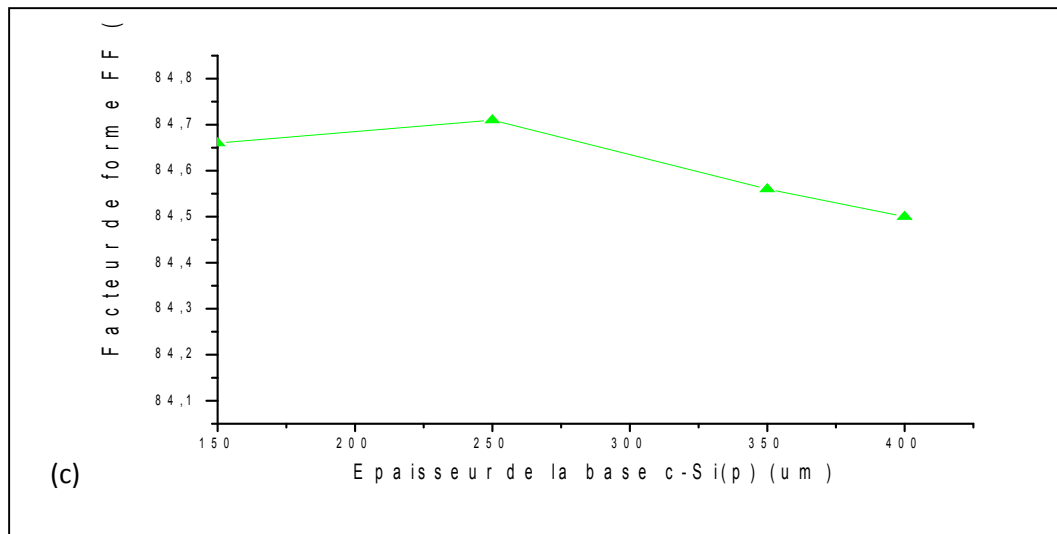
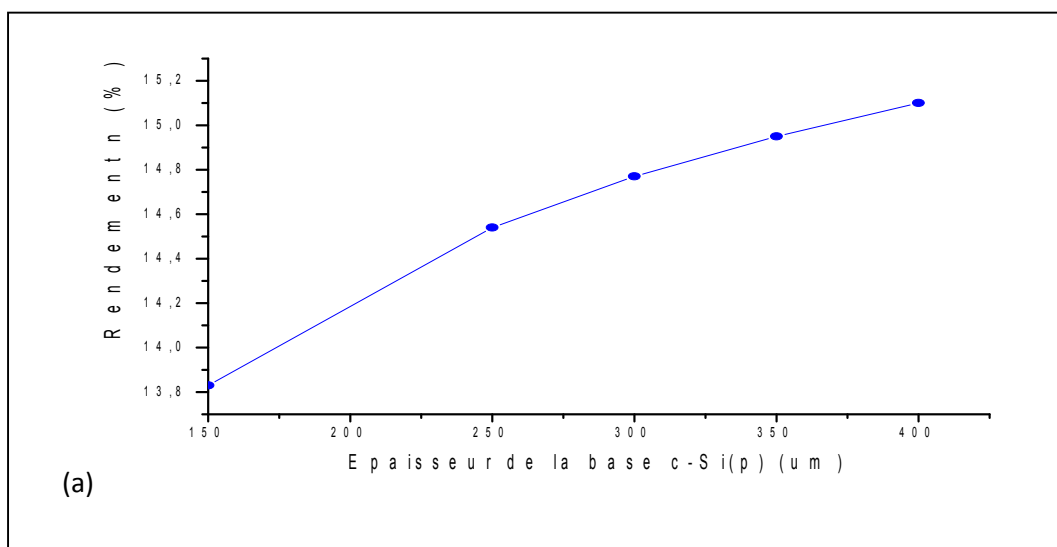


Figure IV.5: Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT

II.4 Influence de l'épaisseur du substrat sur le rendement η

La variation du rendement en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si(p) des cellules simple hétérojonction, double hétérojonction et la cellule HIT est représentée dans la figure (IV-6).



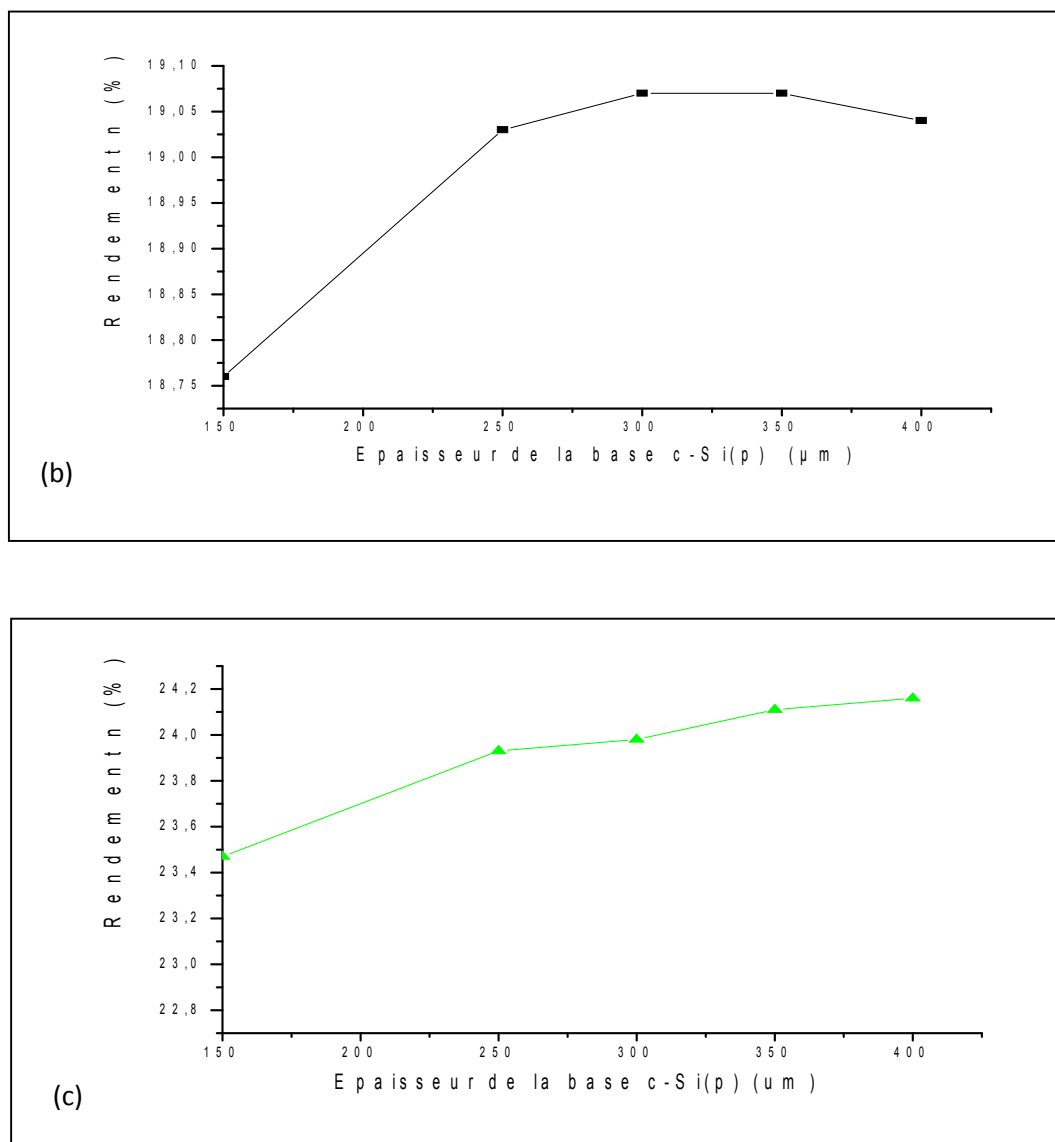


Figure IV.6: Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

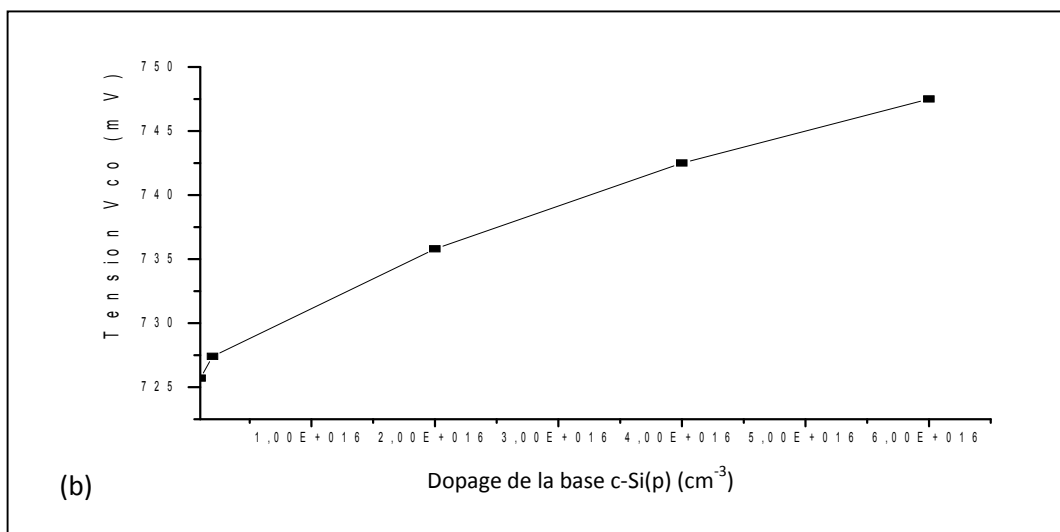
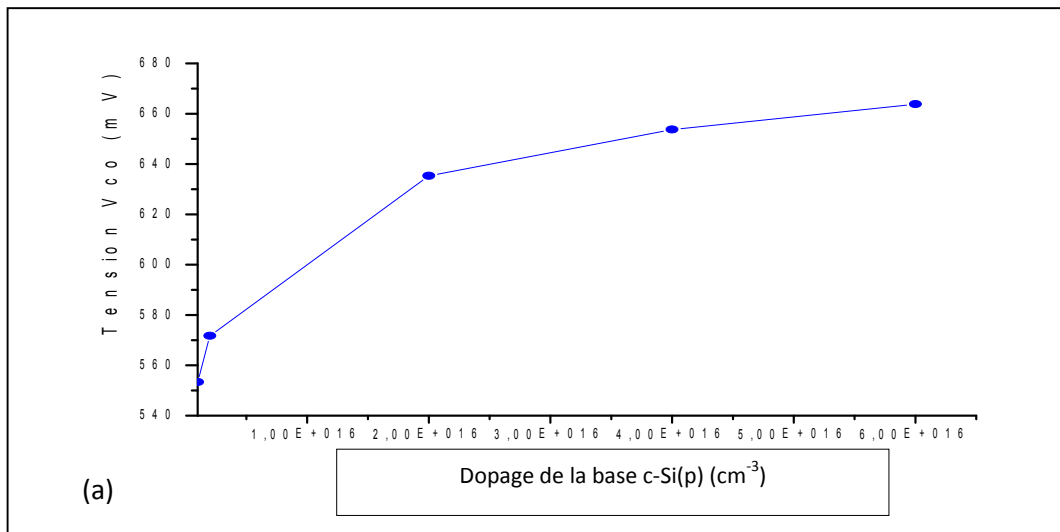
Les paramètres électriques des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT correspondant à différentes valeurs d'épaisseur de la base, sont donnés en annexe A.

Comme nous pouvons l'observer sur les figure (IV-3,4,5,6), l'utilisation d'un substrat de 150 μm ($< 200 \mu\text{m}$) donne une meilleure valeur de tension de circuit ouvert mais entraîne une diminution du I_{CC} , FF et η par rapport au substrat plus épais. Ceci peut être expliqué par la réduction de l'absorption des photons dans le substrat fin. L'épaisseur du substrat est donc optimisée à 350 μm pour les cellules solaires à double hétérojonction et à 400 μm pour les cellules solaires à simple hétérojonction et cellule HIT.

IV. Influence du dopage du substrat c-Si sur les performances des cellules simulées

IV.1 Influence du dopage du substrat sur la tension du circuit ouvert V_{co}

La variation de la tension du circuit ouvert en fonction de la conductivité de la base c-Si(p) est représentée sur la figure (IV-7).



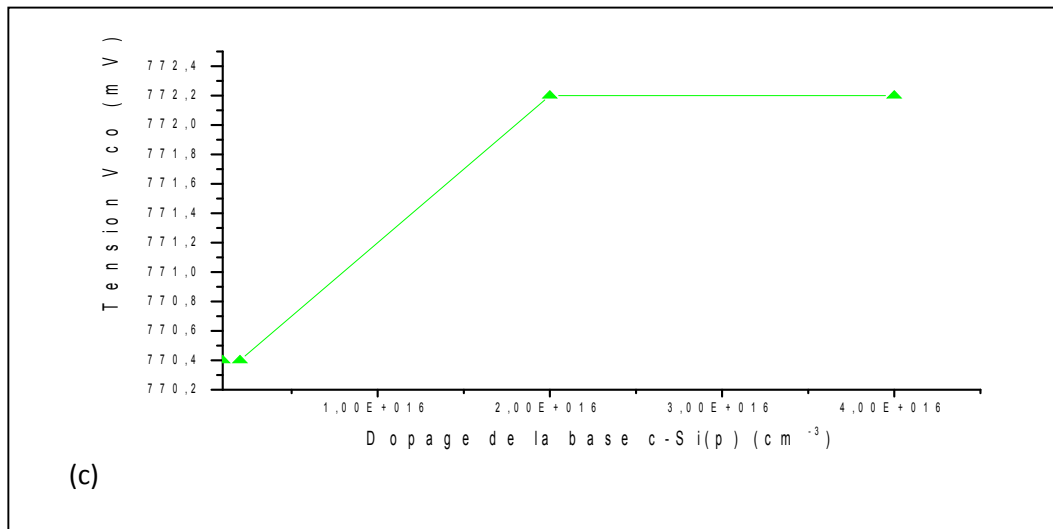
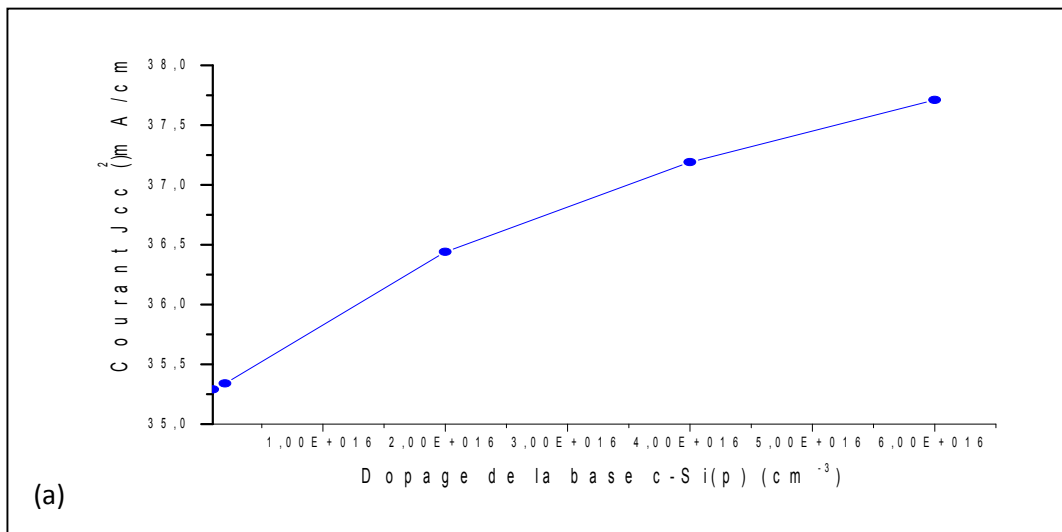


Figure IV.7: Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de la base: (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction et (c) cellule HIT.

IV.2 Influence du dopage du substrat sur le courant de court circuit J_{cc}

Sur la figure suivante, est représentée la variation du courant de court circuit des cellules simulées en fonction du dopage de la base c-Si(p).



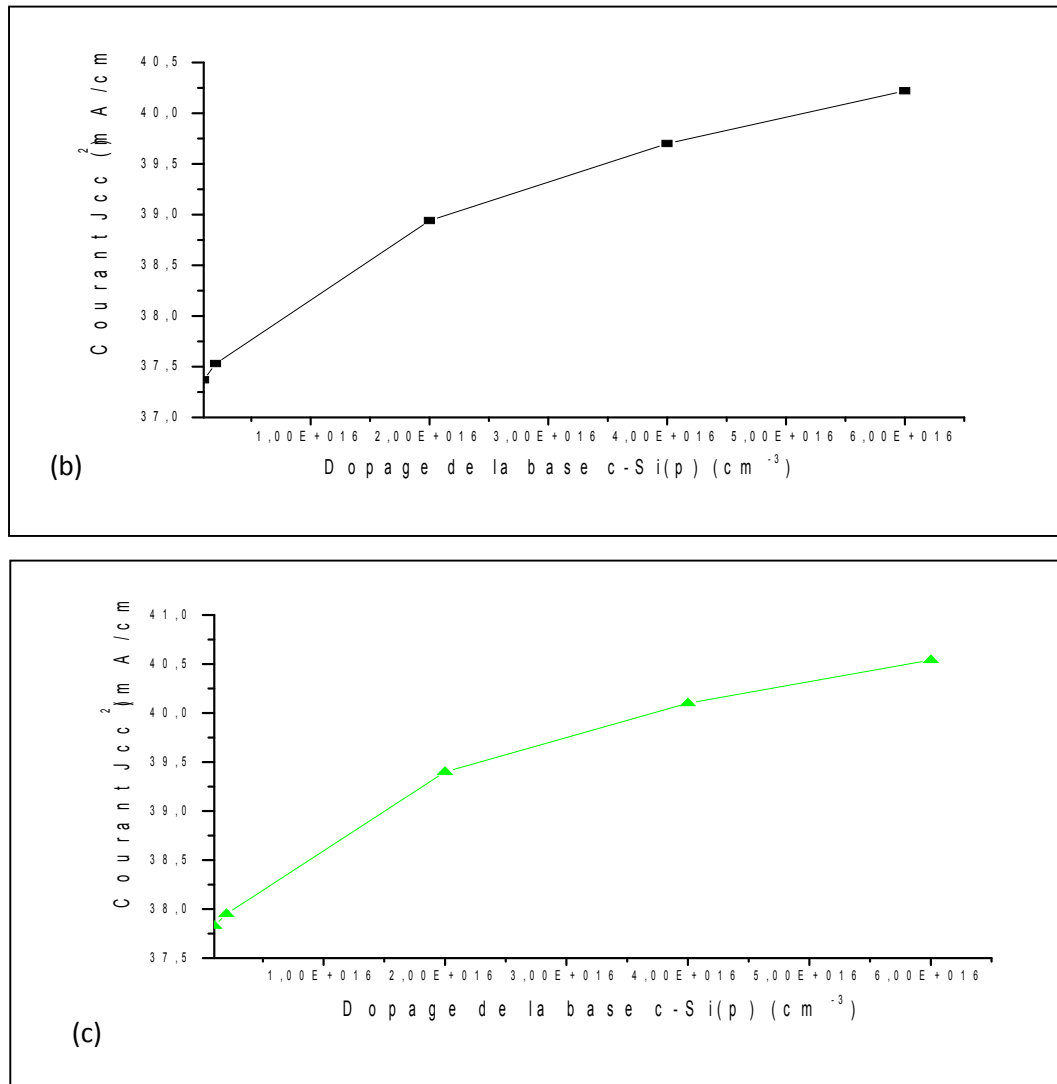


Figure IV.8: Variation du courant de court circuit I_{cc} en fonction du dopage de la base :
 (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT

IV.3 Influence du dopage du substrat sur le facteur de forme FF

La figure (IV.9) représente la variation du facteur de forme en fonction de la variation de la conductivité de la base.

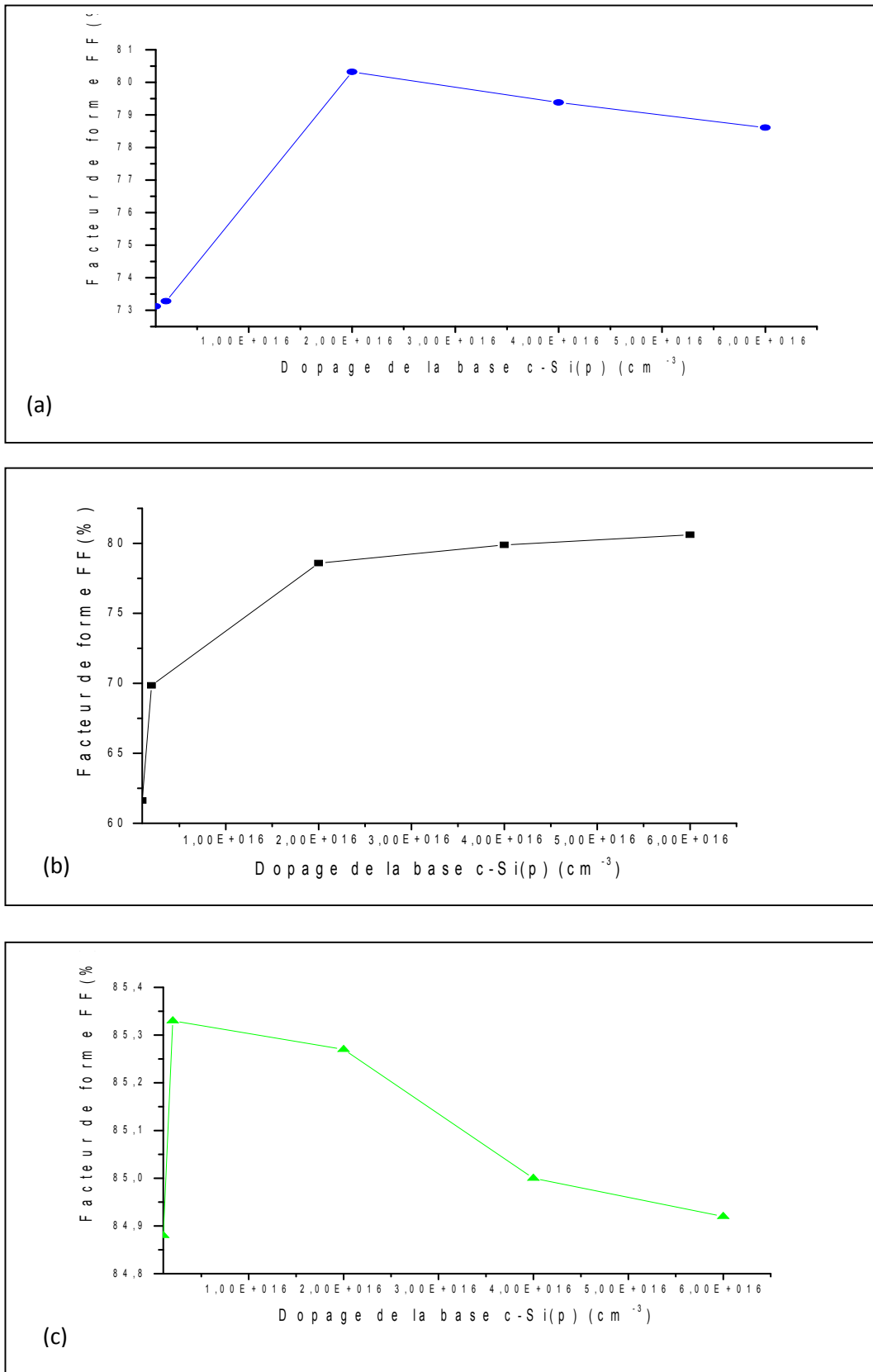
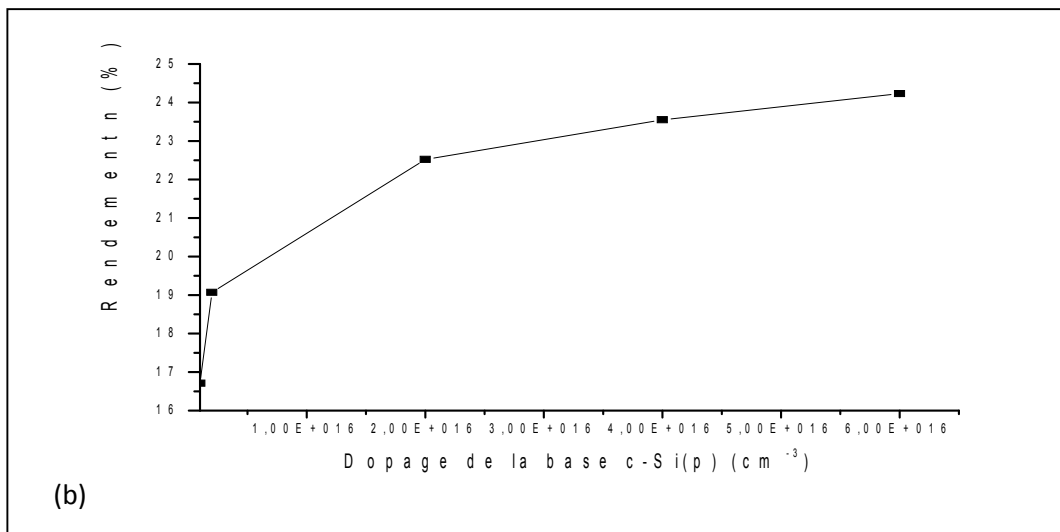
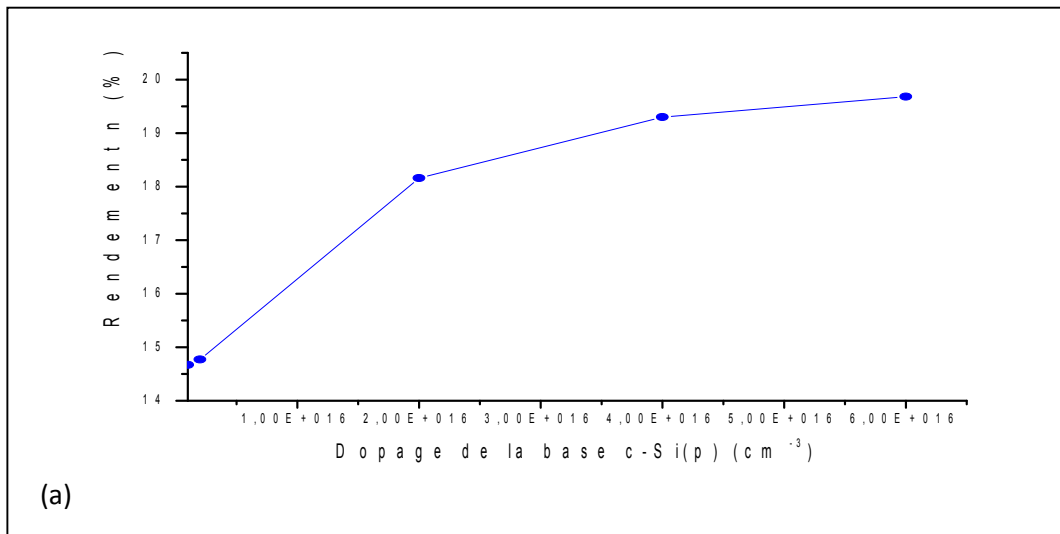


Figure IV.9: Variation du facteur de forme FF en fonction du dopage de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

IV.4 Influence du dopage du substrat sur le rendement η

La figure (IV.10) représente la variation du facteur de forme en fonction de la variation de la conductivité de la base.



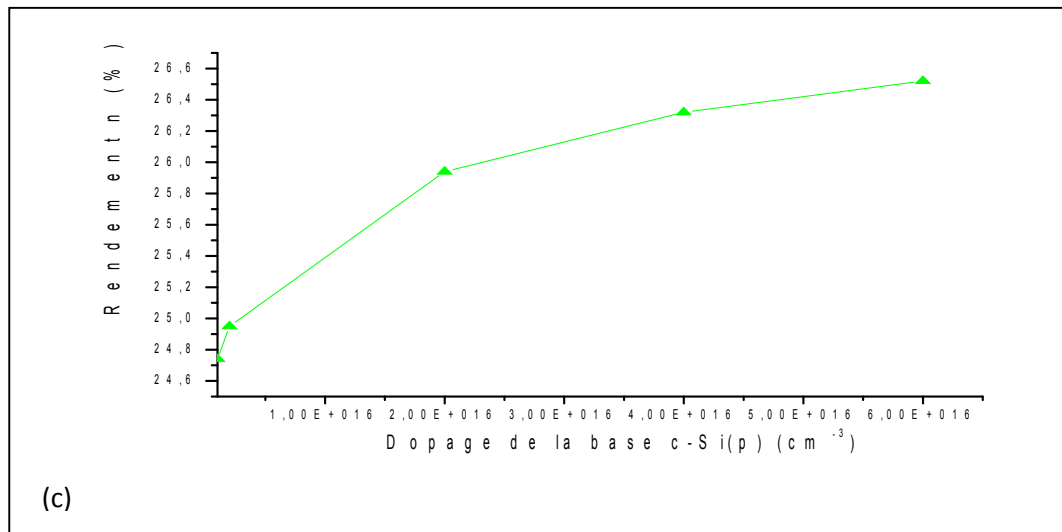


Figure IV.10: Variation du rendement η en fonction du dopage de la base : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT

Les paramètres électriques des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT en fonction de la conductivité de la base sont donnés en annexe B.

L'augmentation du dopage de la base c-Si entraîne une amélioration des paramètres électriques des cellules simulées par la diminution des pertes résistives. En effet, l'augmentation de la concentration des atomes dopants dans le substrat induit une augmentation de sa conductivité et donc une amélioration de ses propriétés électriques qui se reflètent par l'amélioration des performances photovoltaïques de la cellule (Figure IV-10).

V. Influence de l'épaisseur de l'émetteur : a-Si:H(n) sur les performances des cellules simulées

VI. V.1 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension du circuit ouvert V_{co}

La figure ci-dessous représente la variation de la tension du circuit ouvert des différentes cellules étudiées en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

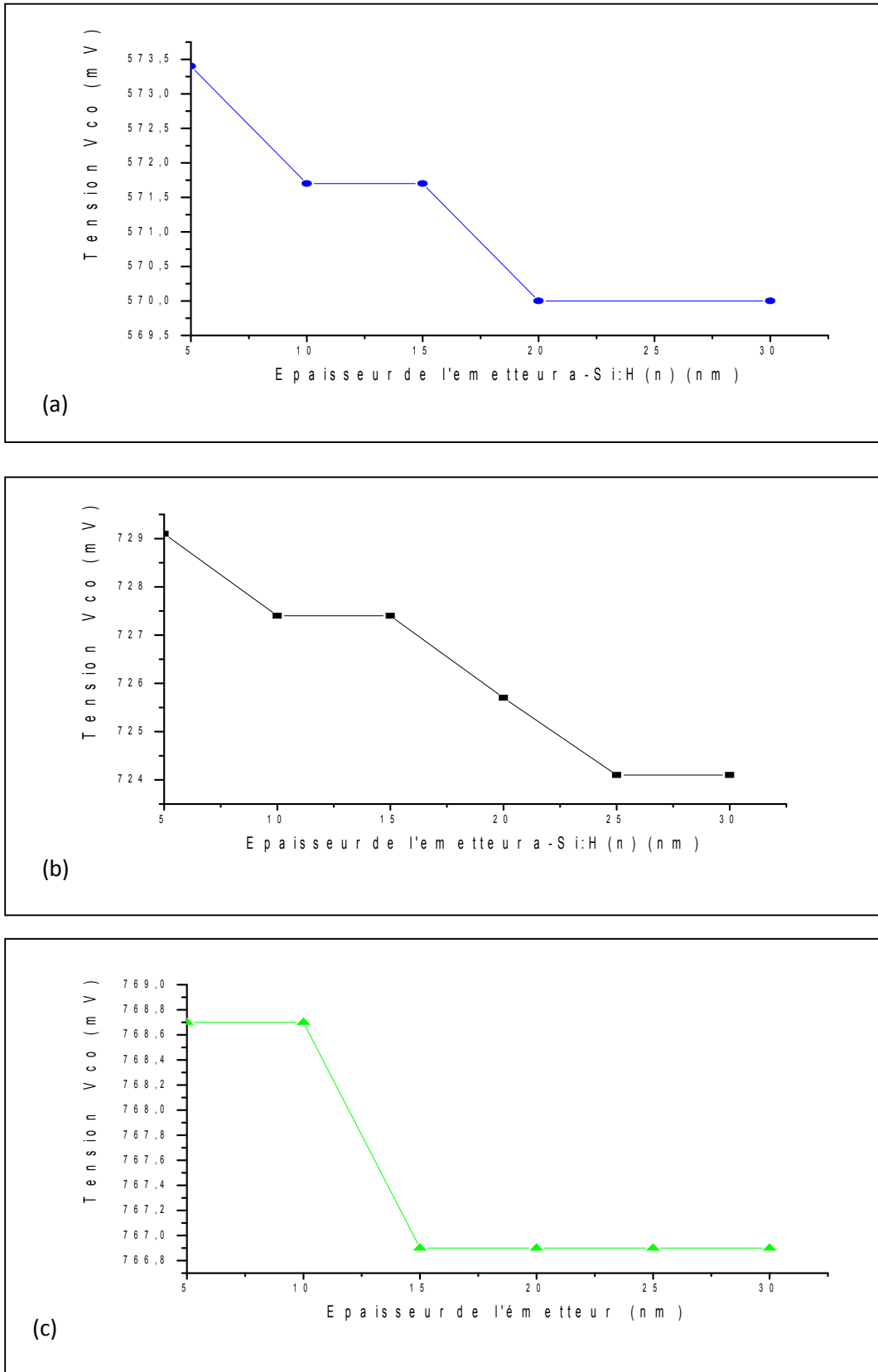
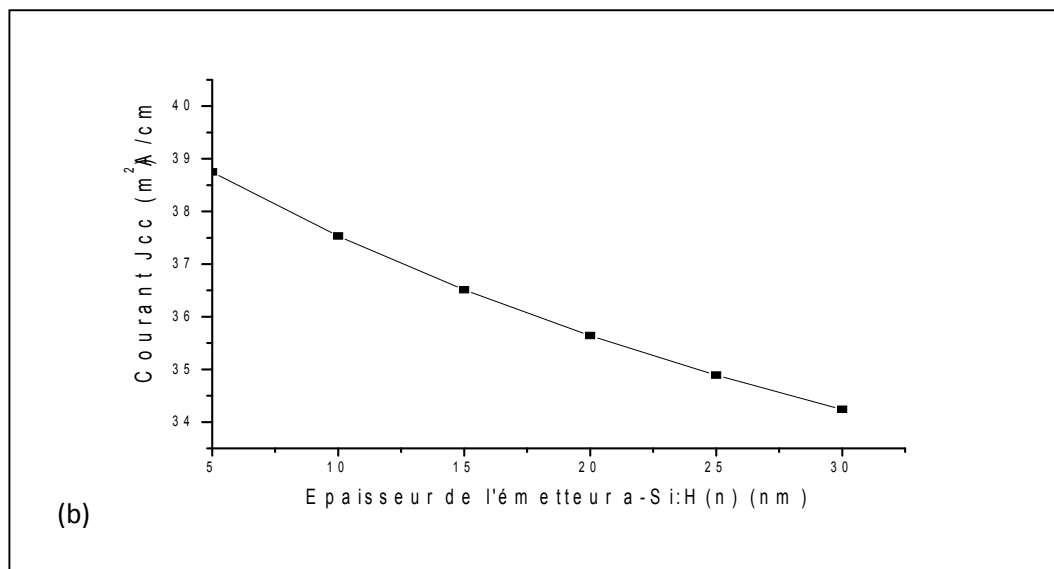
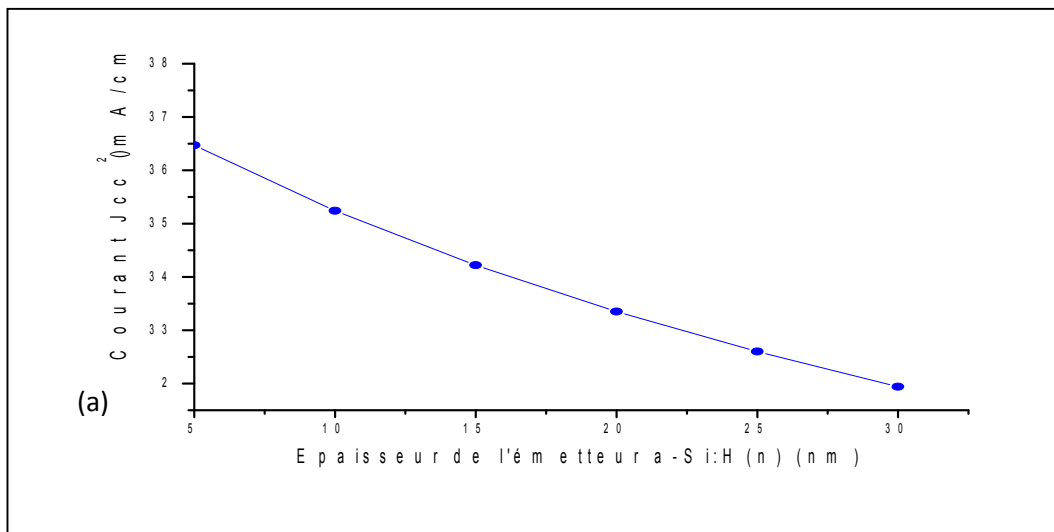


Figure IV.11 : Variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT

V.2 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court circuit J_{cc}

La figure IV-12 représente la variation de la densité du courant de court circuit des différentes cellules étudiées en fonction de l'épaisseur de l'émetteur



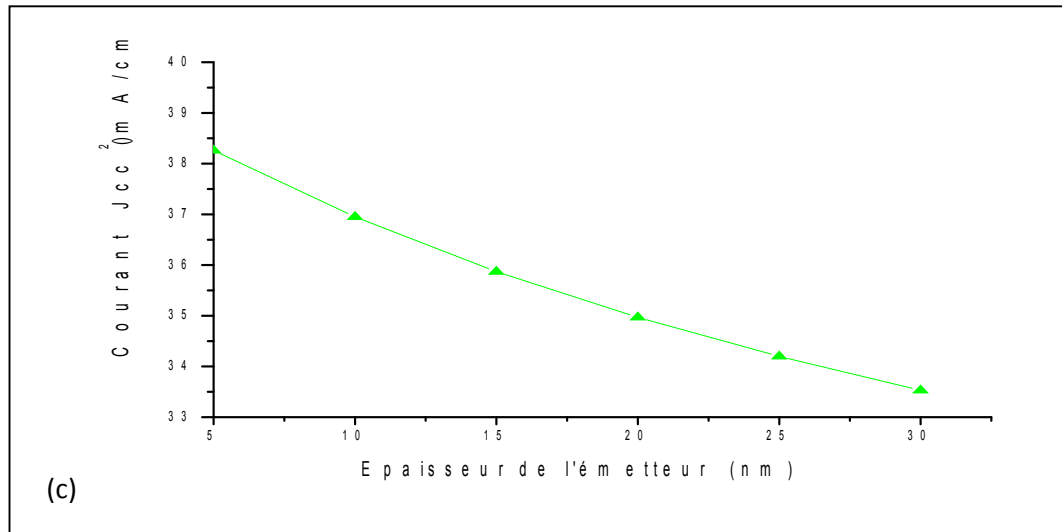
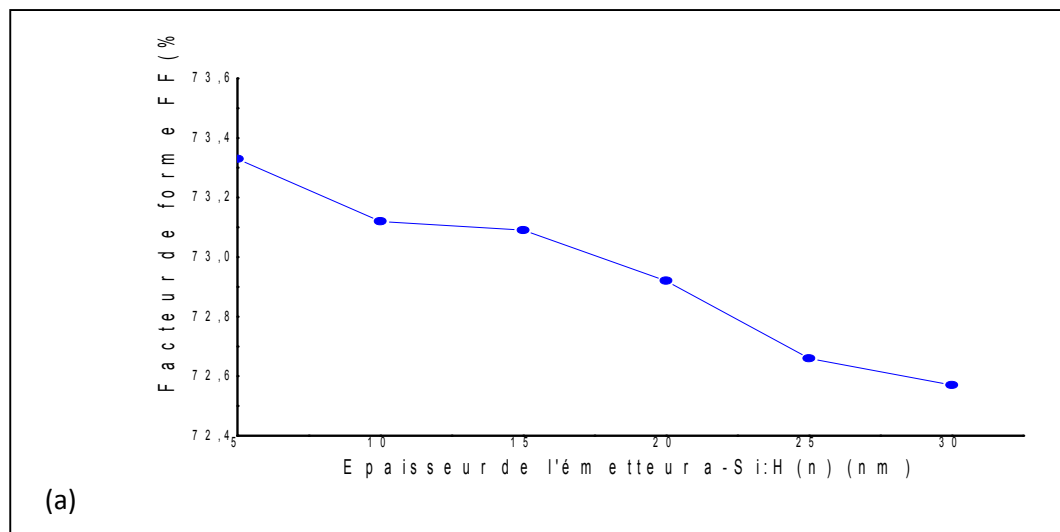


Figure IV.12: Variation de courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

V.3 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme FF

La figure ci-dessous montre l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme des différentes cellules étudiées.



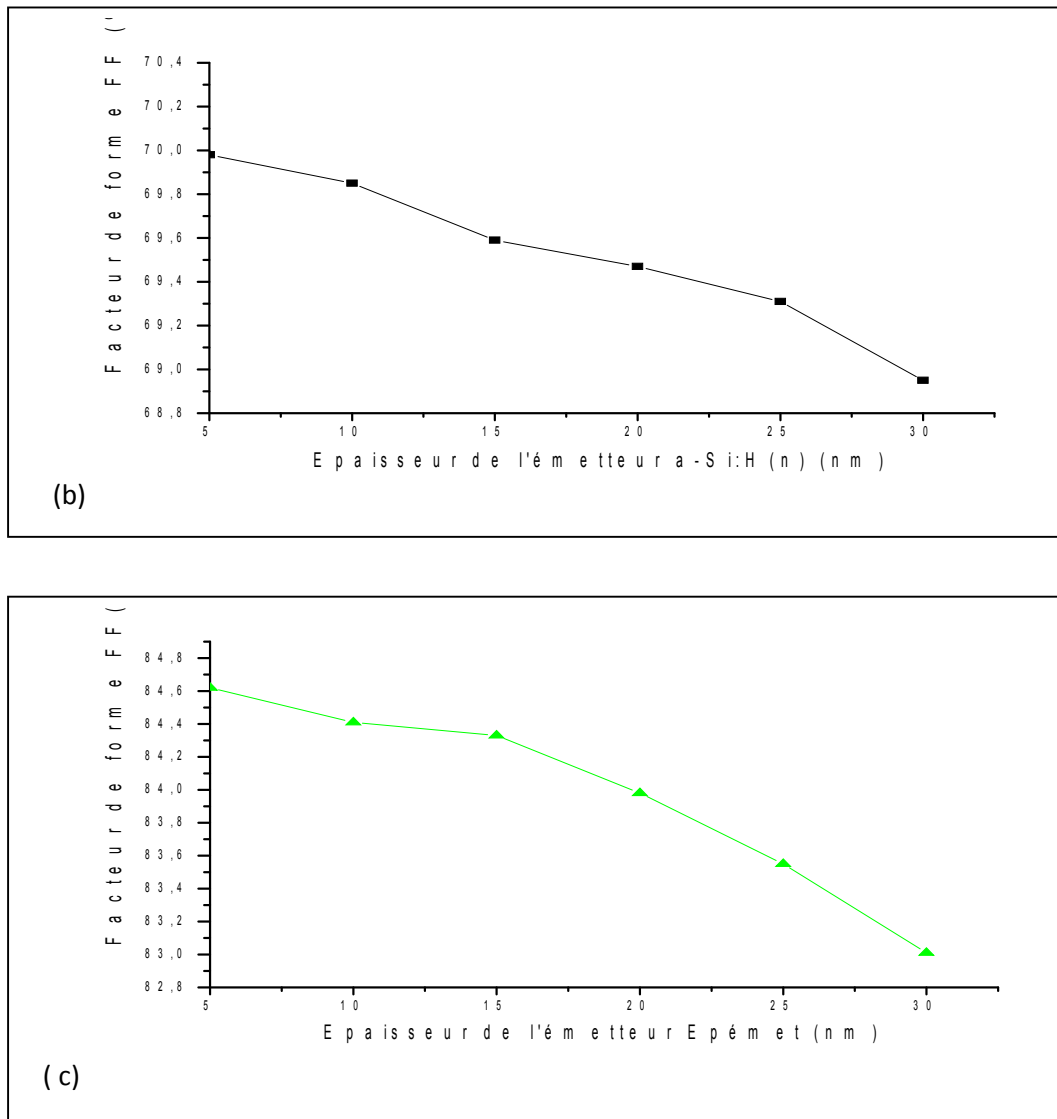


Figure IV.13 : Variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, cellule HIT.

V.4 Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement

Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement est représenté sur la figure ci-dessous.

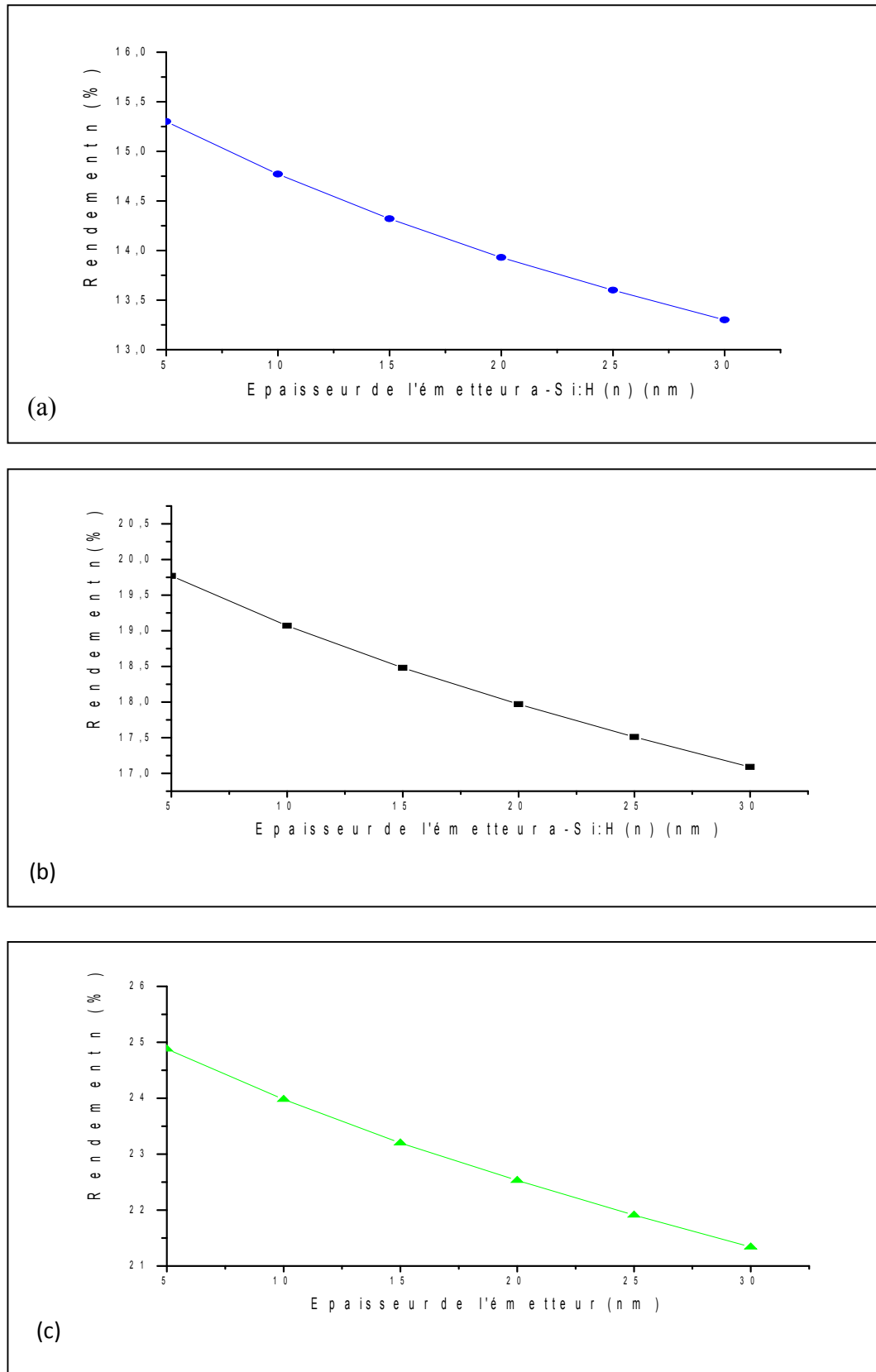


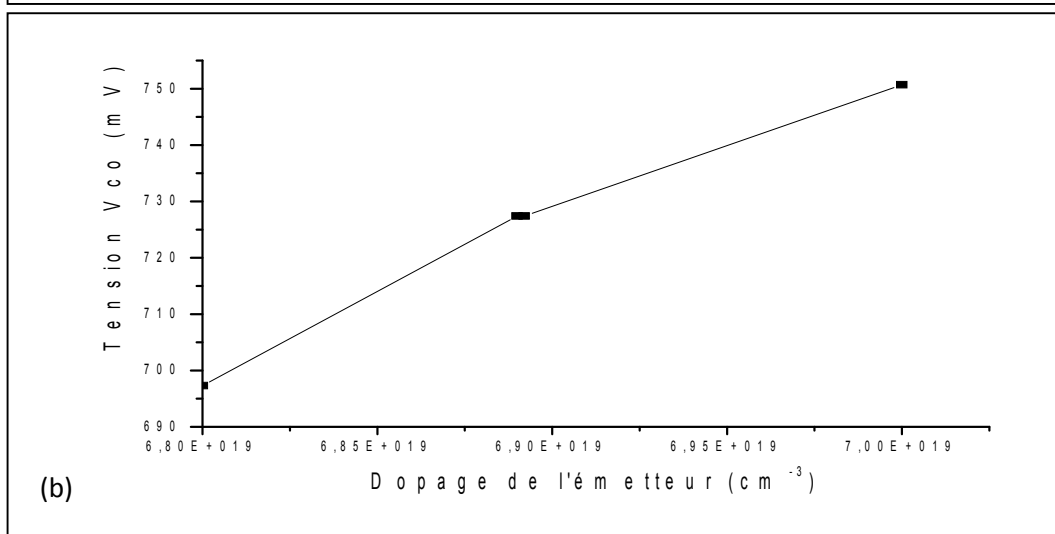
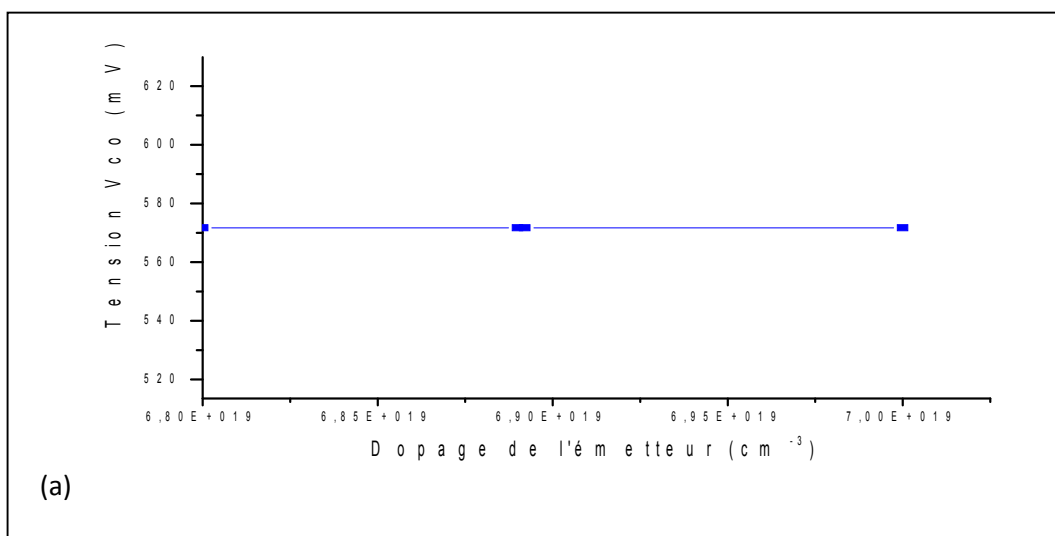
Figure IV.14: Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

Les paramètres électriques des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT en fonction de l'épaisseur de l'émetteur sont donnés en annexe C.

Nous avons étudié l'effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur de 5 à 30 nm, sur les paramètres électriques des cellules. Les figures (IV-11,12 ,13 et 14) montrent que l'épaisseur de 5 nm permet d'atteindre les meilleures valeurs de V_{CO} , I_{CC} , FF et η . L'augmentation de la largeur de l'émetteur au-delà de 5 nm provoque une chute de ces paramètres, ce qui peut être expliqué par le fait que la distance latérale parcourue par les porteurs de charge augmente avec l'augmentation de la largeur de l'émetteur réduisant ainsi la probabilité de leur collection. Un effet similaire de comportement est également visible pour les cellules solaires HIT.

VII. Influence du dopage de l'émetteur a-Si : H(n) sur les performances des cellules simulées

VI.1 Influence du dopage de l'émetteur la tension du circuit ouvert V_{co}



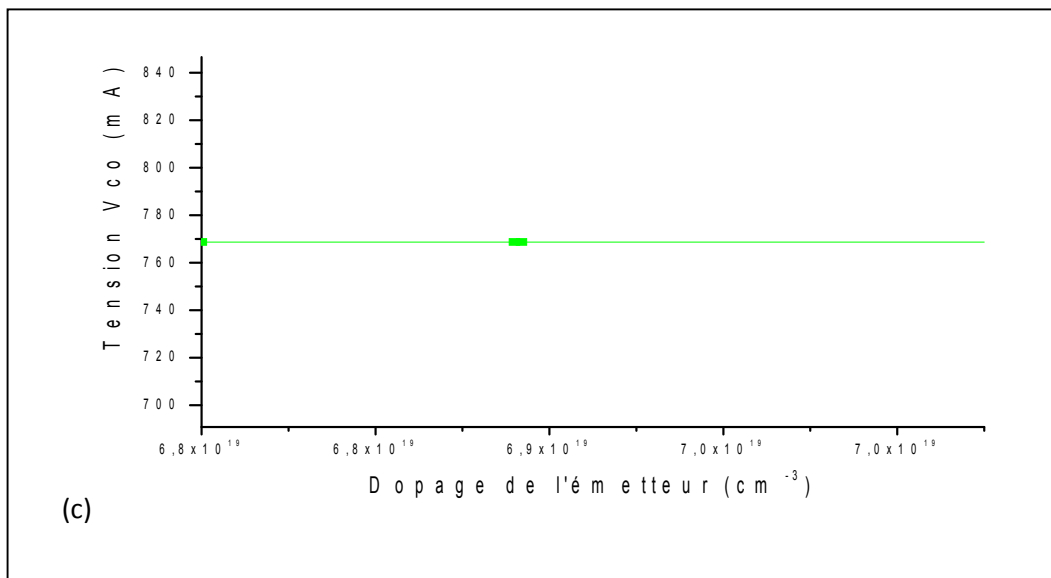
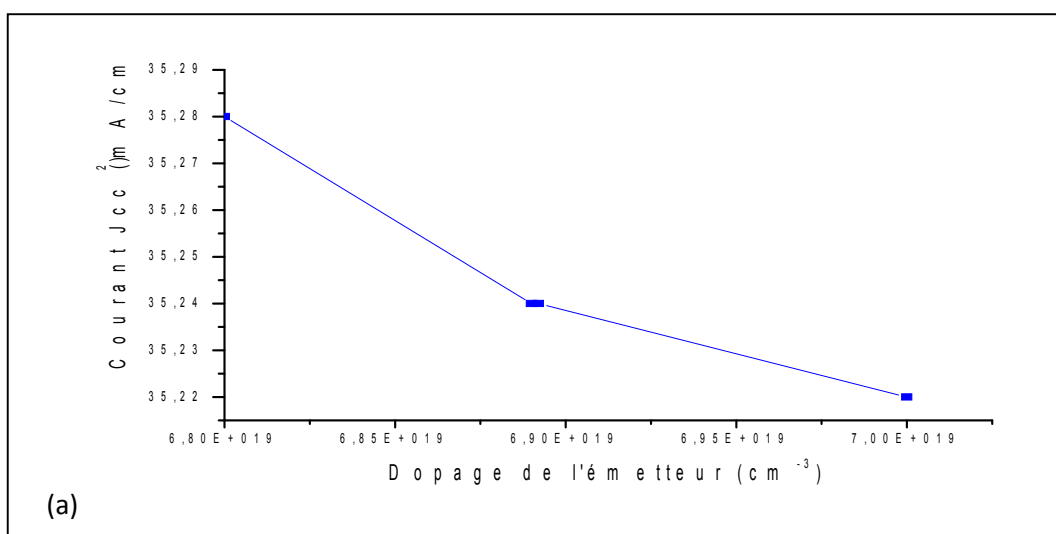


Figure IV.15: Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

VI.2 Influence du dopage de l'émetteur sur le courant de court circuit J_{cc}

La figure ci-dessous représente la variation du courant de court circuit des trois cellules simulées en fonction du dopage de l'émetteur.



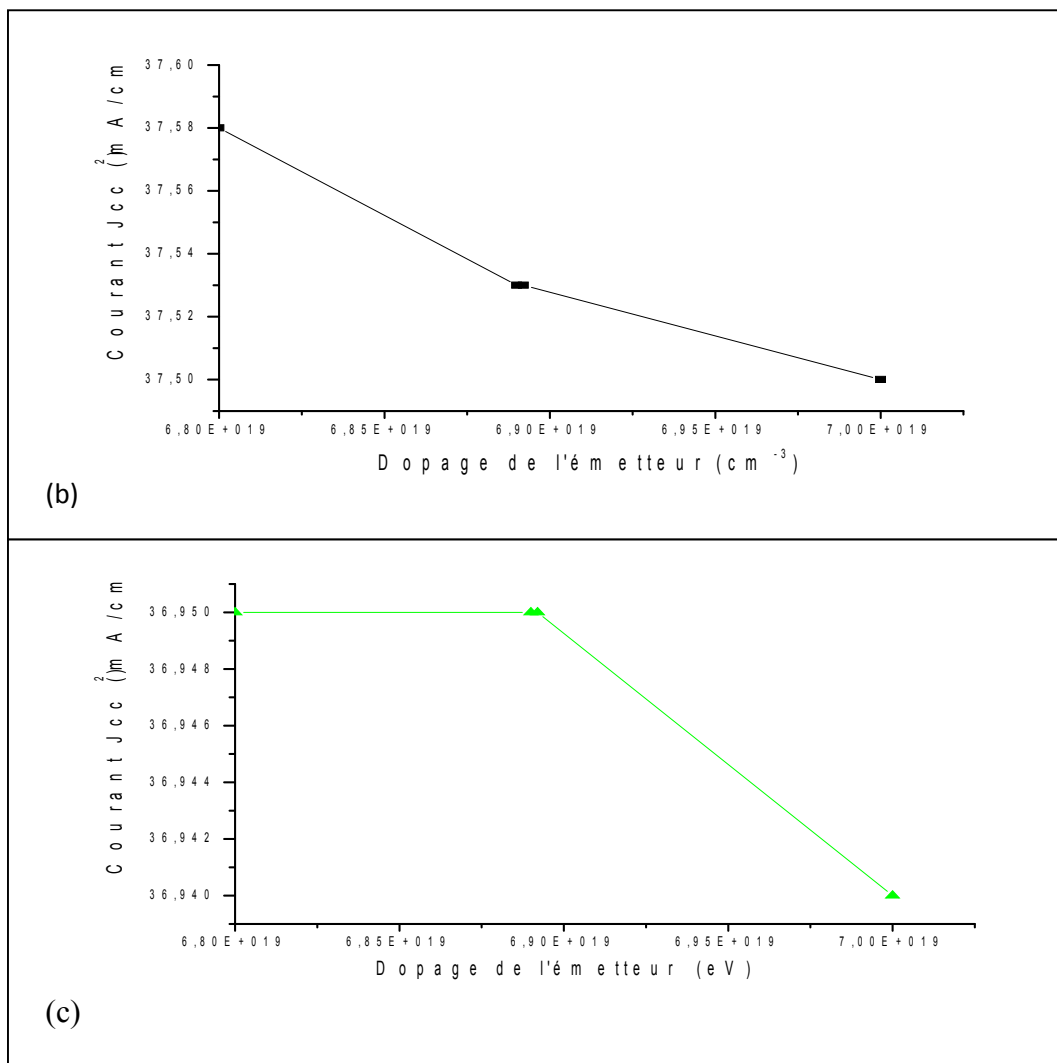
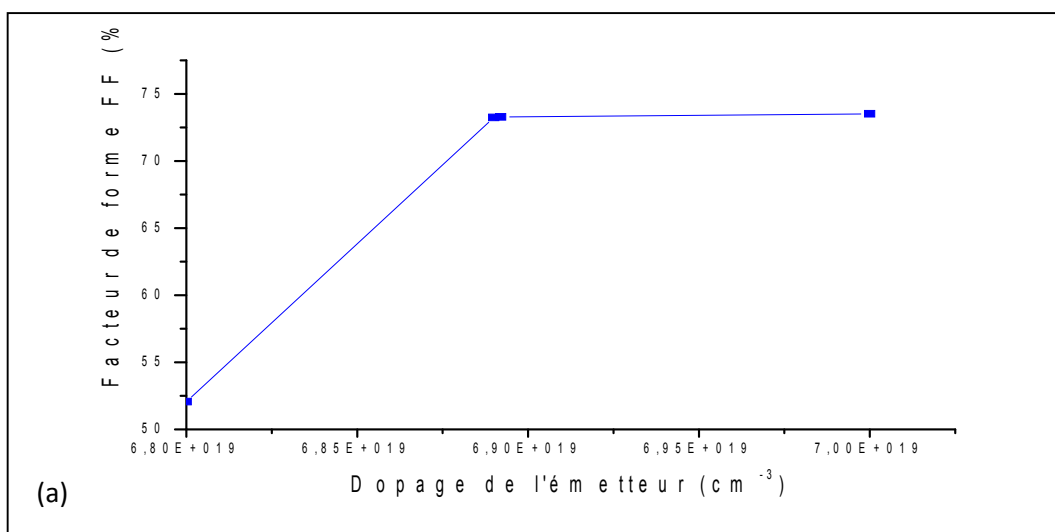


Figure IV.16 : Variation de courant de court circuit I_{cc} en fonction du dopage de l'émetteur : (a) simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

VI.3 Influence du dopage de l'émetteur sur le facteur de forme FF



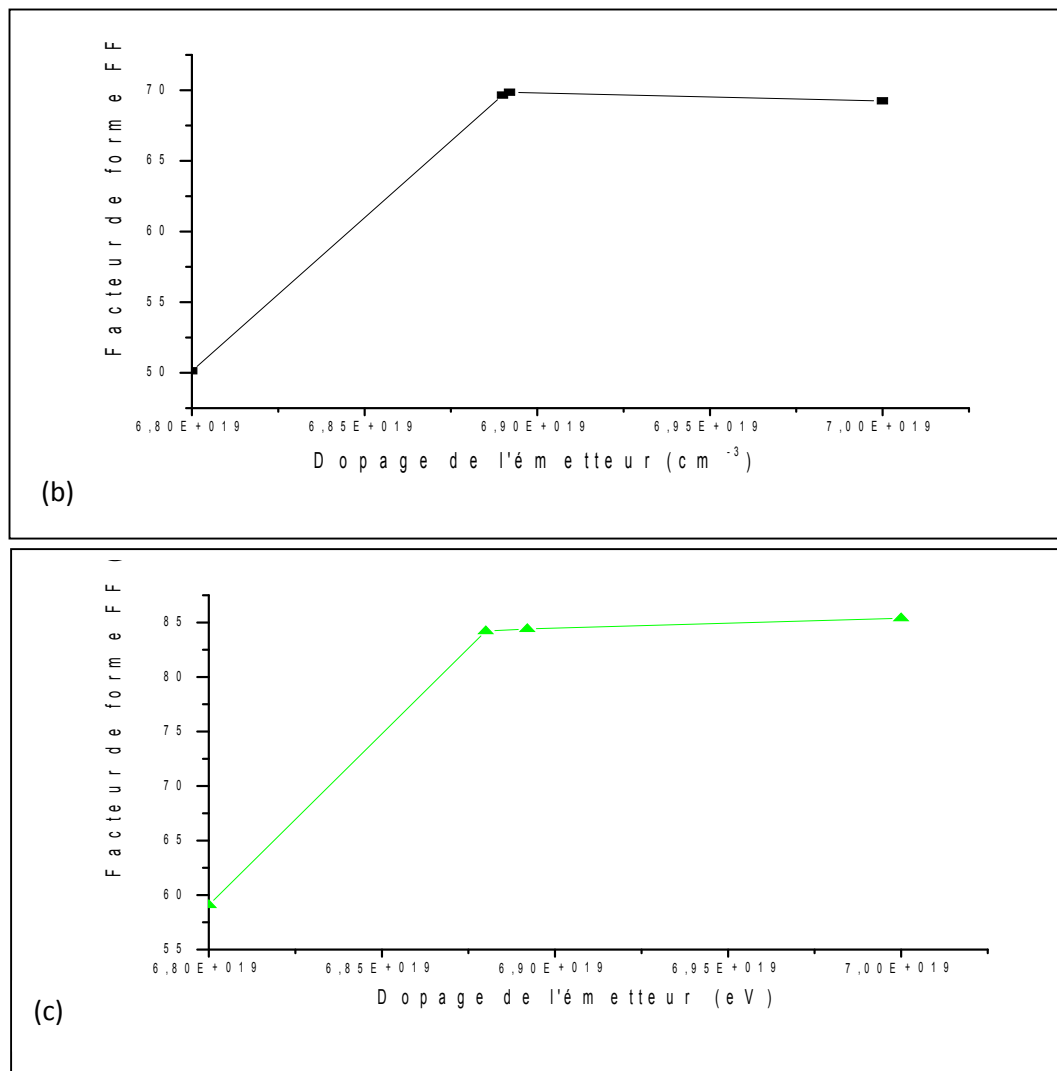
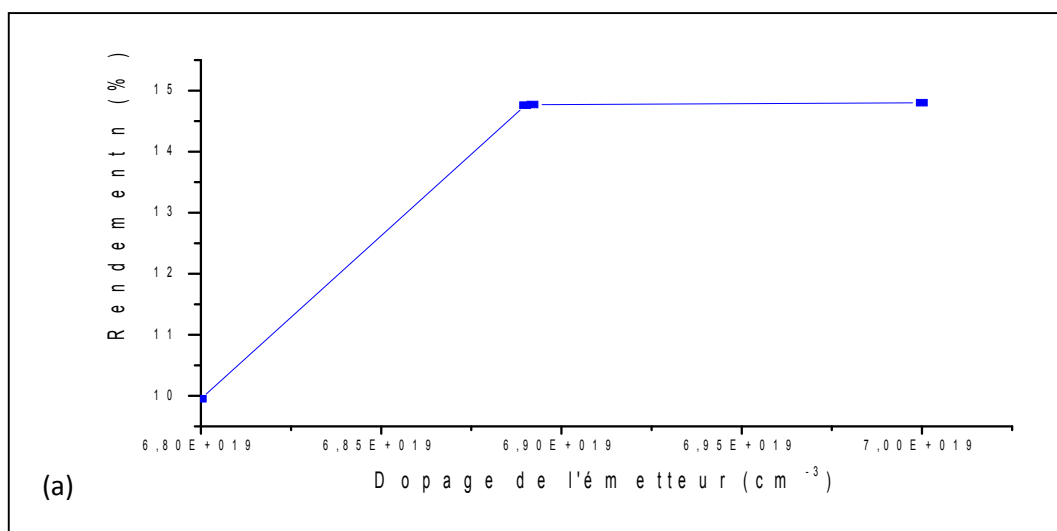


Figure IV.17: Variation du facteur de forme en fonction du dopage de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) double hétérojonction, (c) cellule HIT.

VI.4 Influence du dopage de l'émetteur sur le rendement η



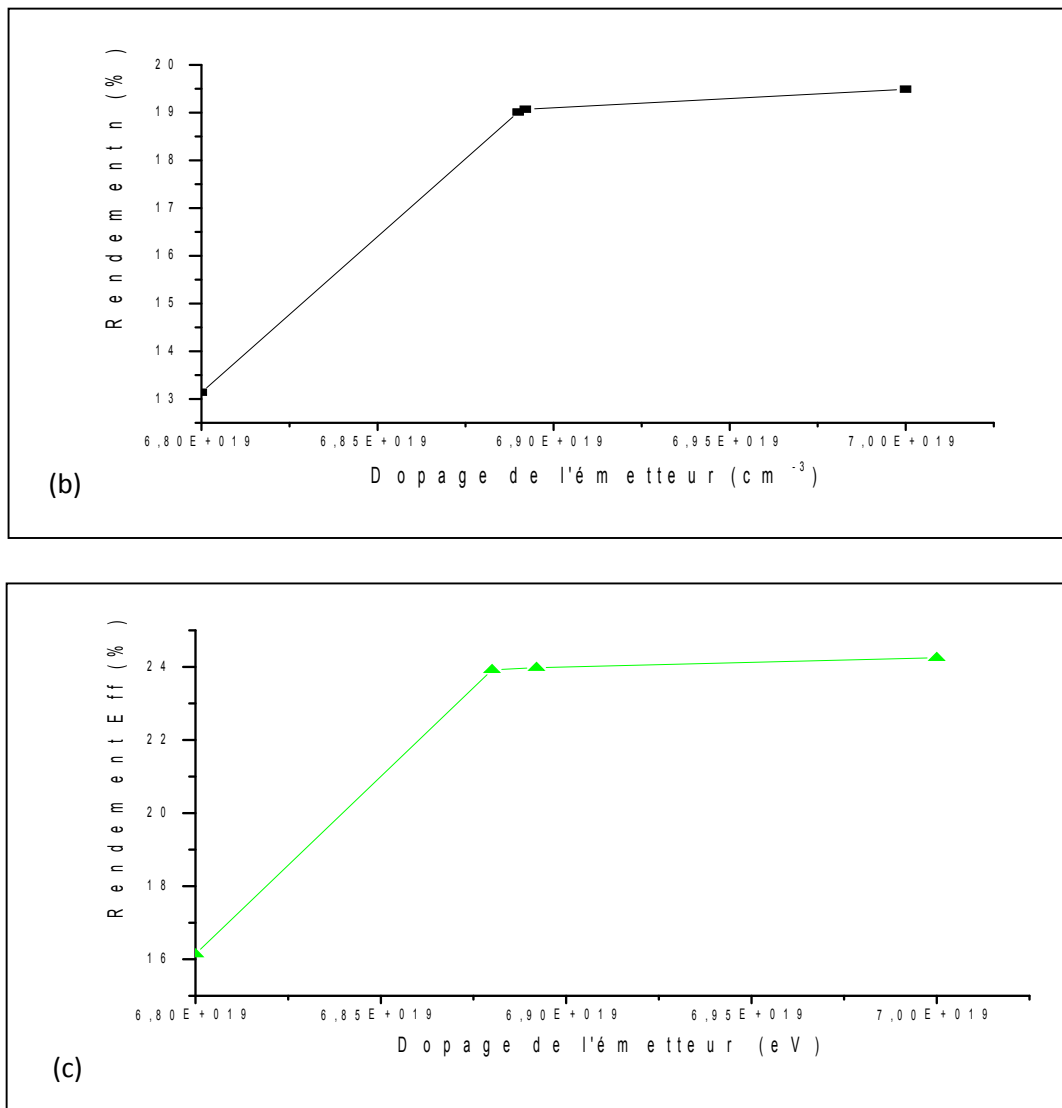


Figure IV.18: Variation du rendement η en fonction du dopage de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.

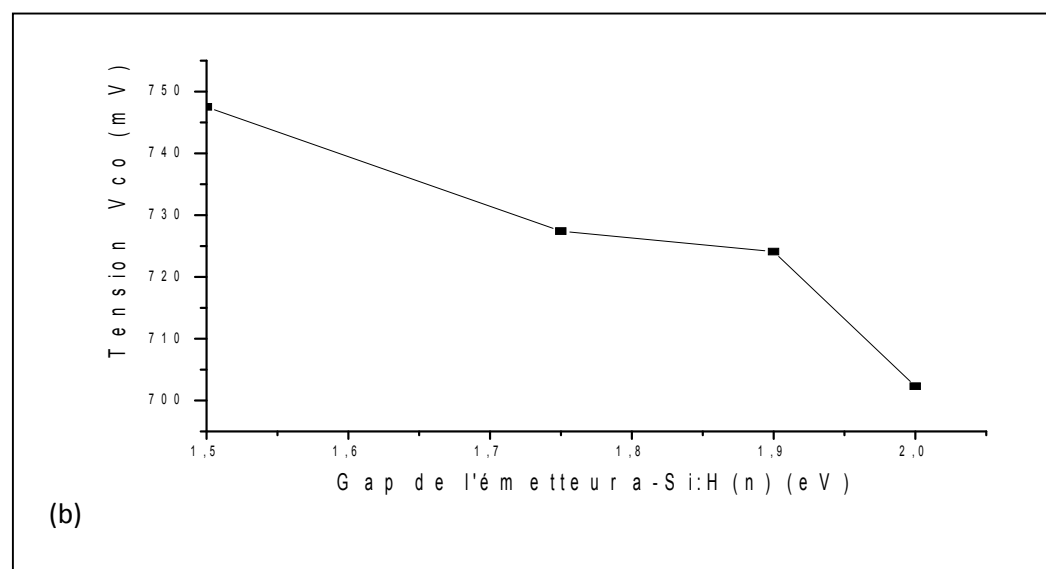
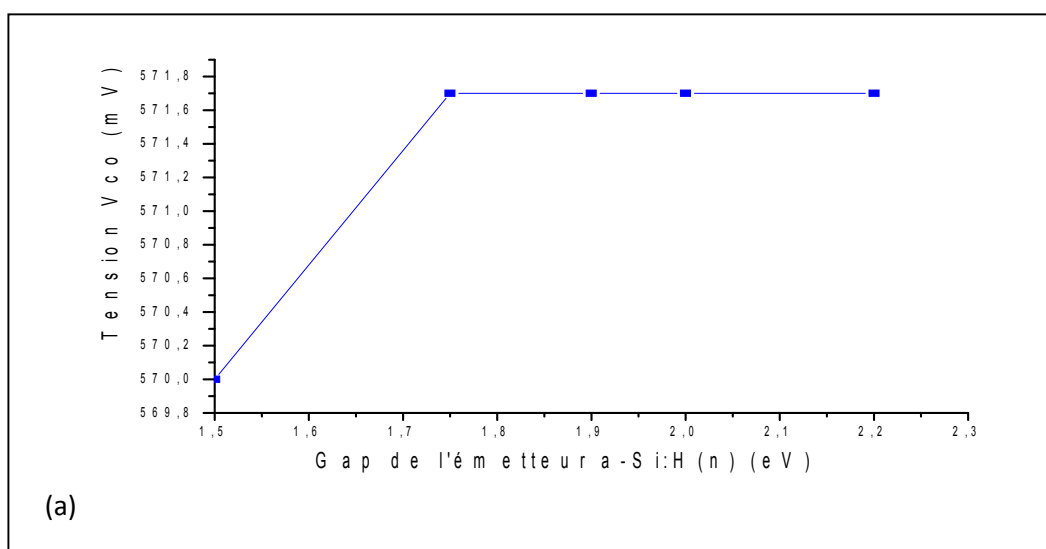
Les paramètres électriques des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT en fonction de la conductivité de l'émetteur sont donnés en annexe D.

Un dopage de l'émetteur de $7 \cdot 10^{19}$ permet d'atteindre un meilleur rendement de conversion des cellules solaires simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT (Figure IV-18). Au-delà de cette valeur, la tension de circuit ouvert de la cellule diminue et le facteur de forme augmente (sachant que $FF = \frac{P_m}{J_{cc}V_{co}}$). En effet, Des couches plus conductrices limitent la résistance série améliorant ainsi le facteur de forme, mais diminuent leur V_{co} . L'insertion d'une couche intrinsèque (i) a-Si :H entre l'émetteur et la base permet de stabiliser

la V_{CO} comme illustré sur la figure (IV-15) tout en augmentant le rendement de conversion. Cette amélioration du rendement peut être expliquée par la diminution des recombinaisons des porteurs à l'interface a-Si:H/c-Si suite à l'insertion de la couche intrinsèque. En effet, cette couche intrinsèque permet de passiver très efficacement la surface du silicium cristallin réduisant ainsi les vitesses de recombinaisons.

VIII. Influence du gap de l'émetteur sur les performances des cellules simulées

VII.1 Influence du gap de l'émetteur sur la tension du circuit ouvert V_{co}



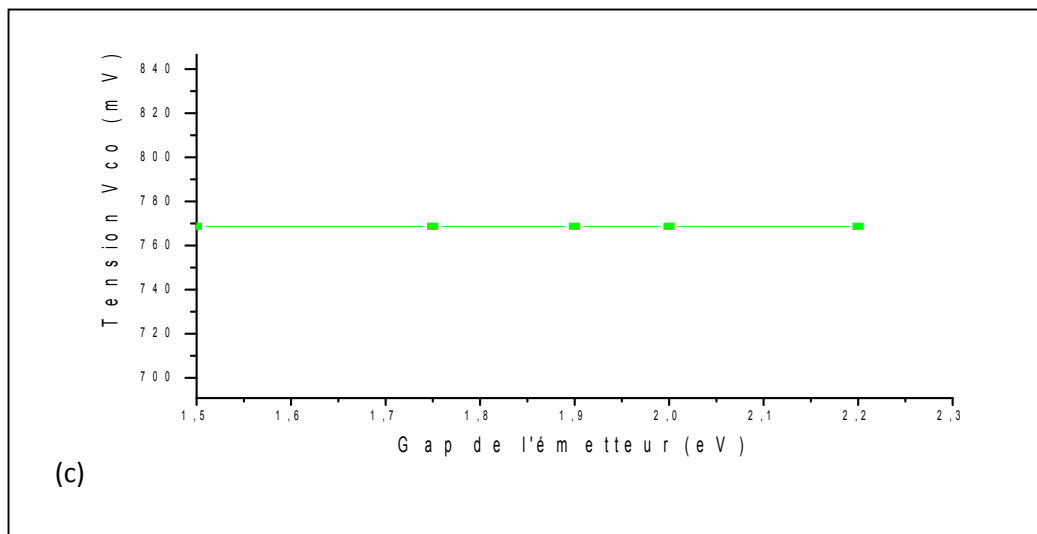
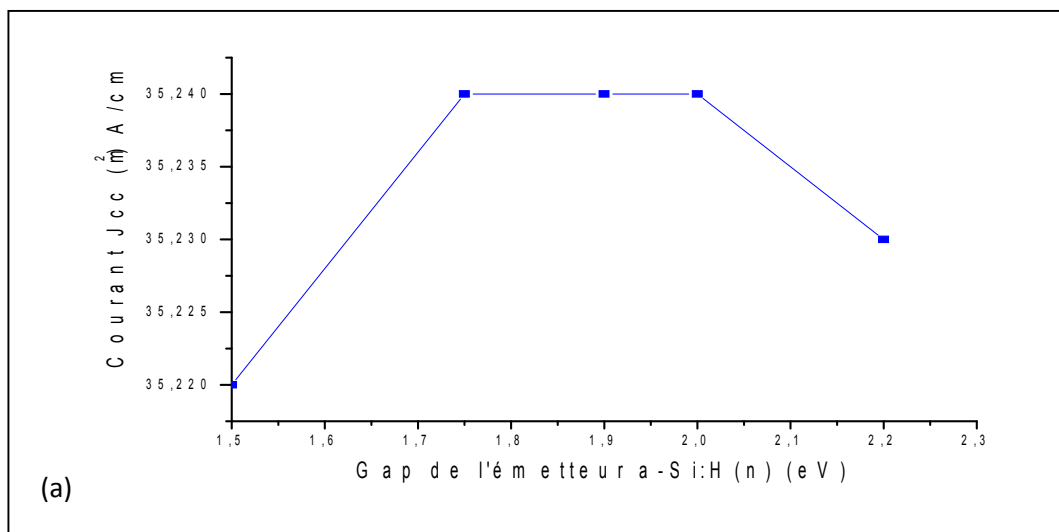


Figure IV.19: Variation de la tension du circuit ouvert en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction et (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.

II.2 Influence du gap de l'émetteur sur le courant de court circuit J_{cc}

la figure IV-20 représente la variation du courant de circuit circuit des cellules simulées en fonction du gap de l'émetteur



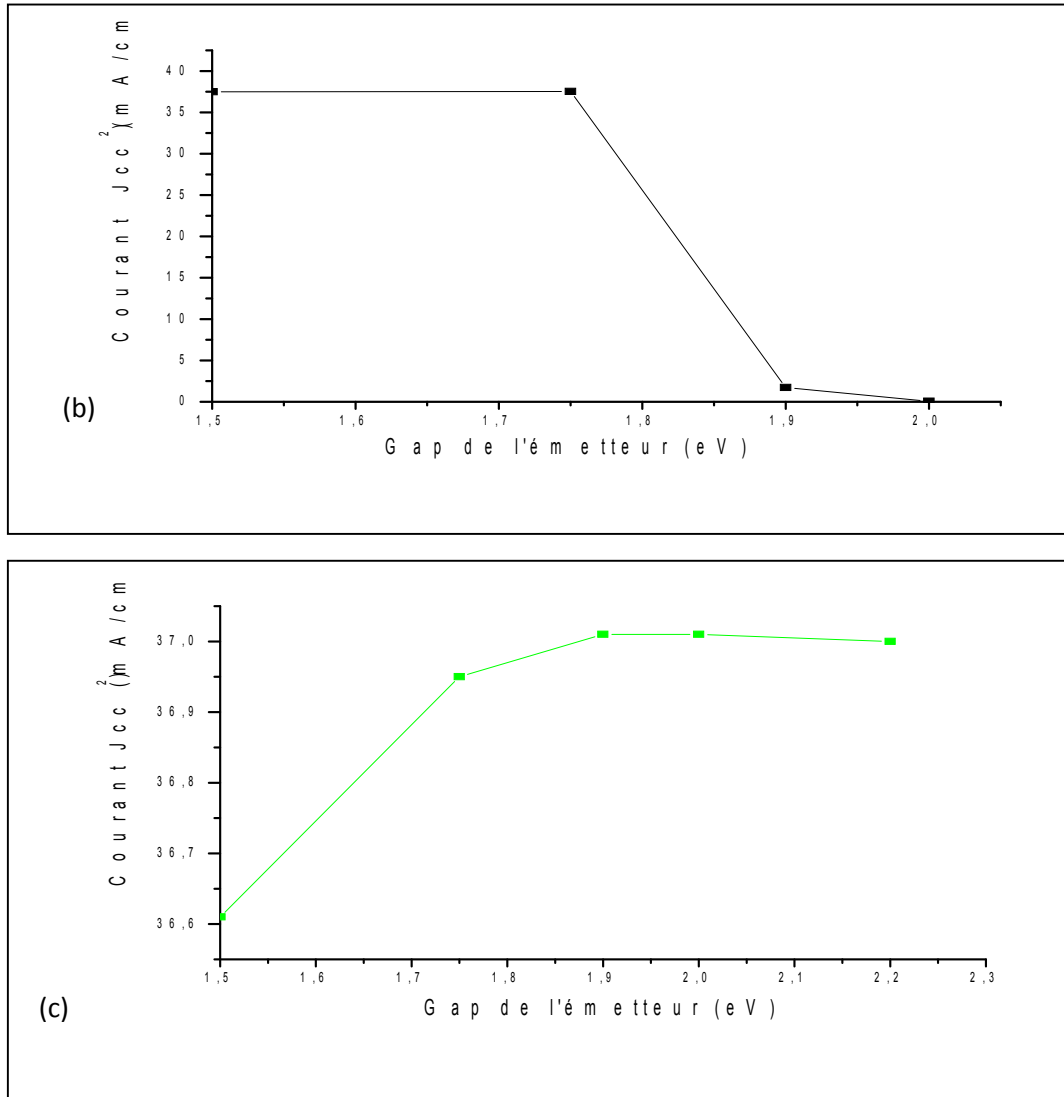


Figure IV.20: Variation du courant de court circuit en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT

VII.3 Influence du gap de l'émetteur sur le facteur de forme FF

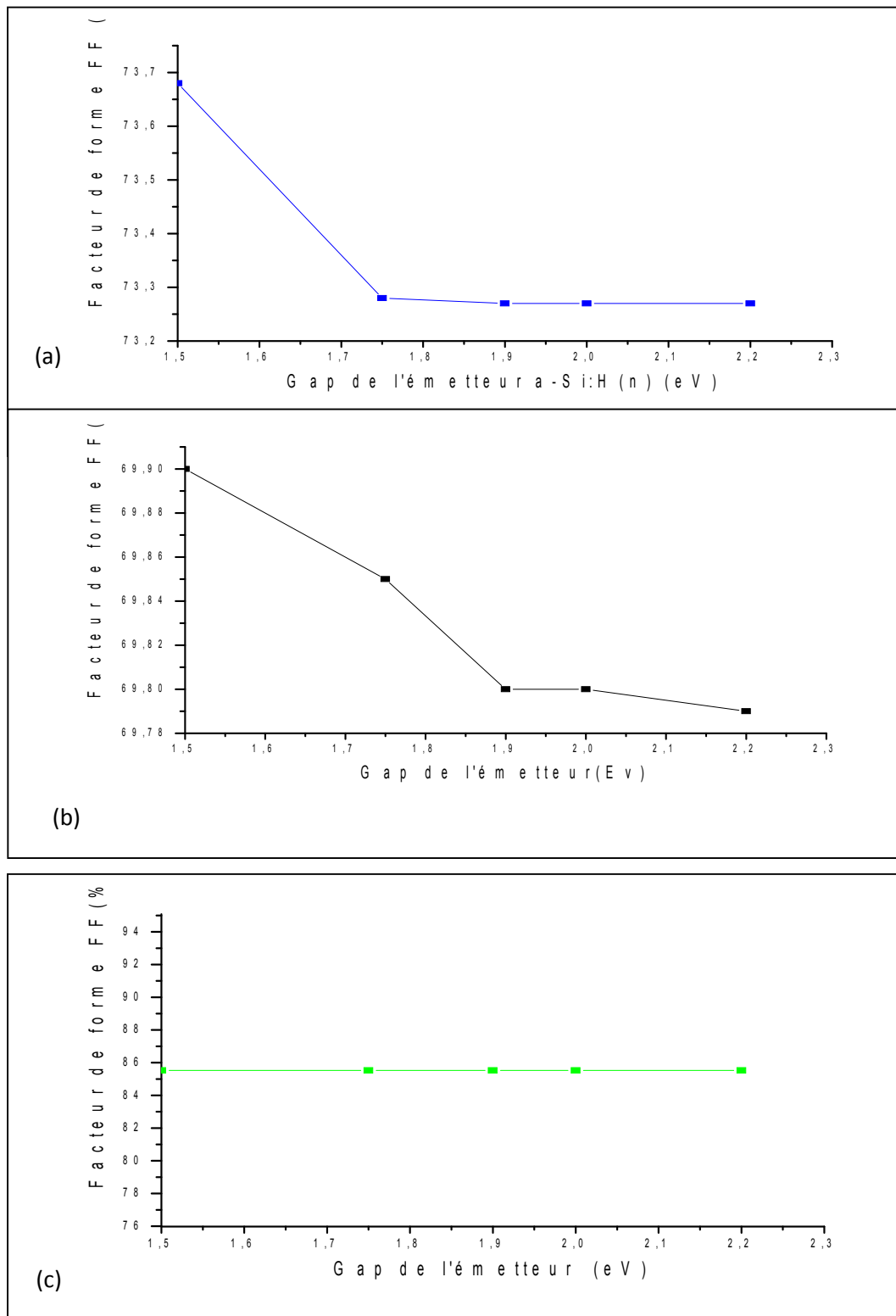
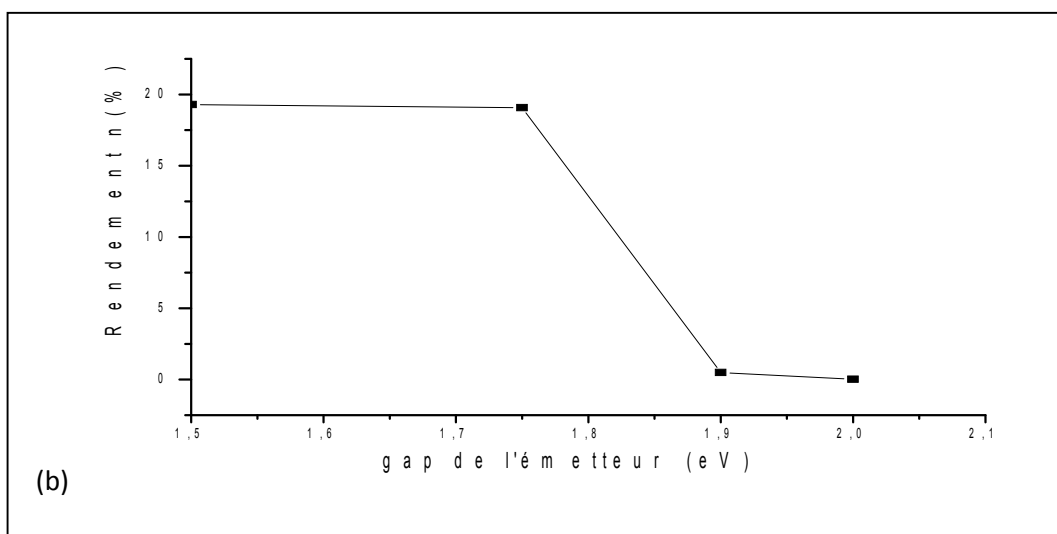
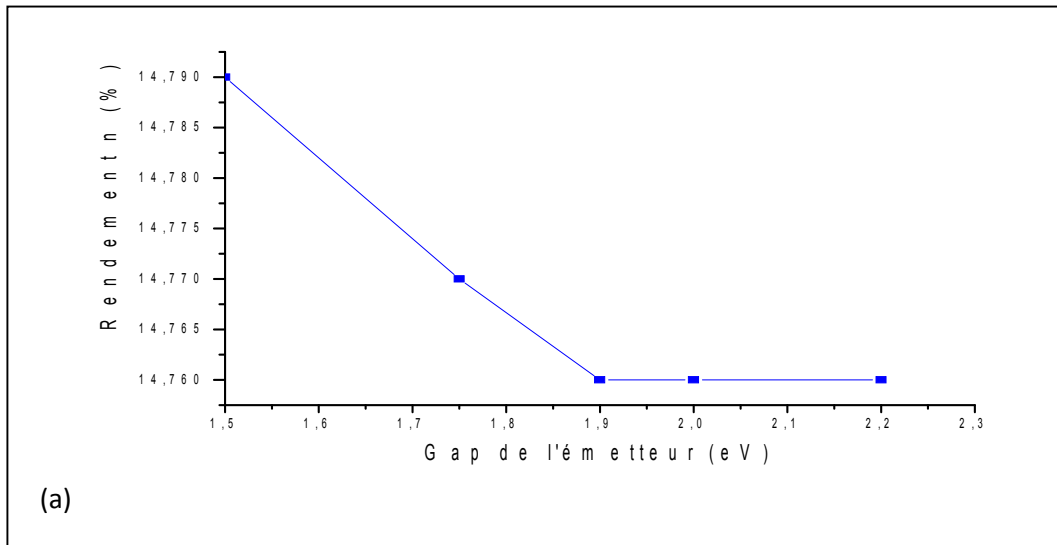


Figure IV-21: variation du facteur de forme FF en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.

VII.4 Influence du gap de l'émetteur sur le rendement η

La variation du rendement photovoltaïque des cellules simulées sont représentés dans la figure ci-dessous



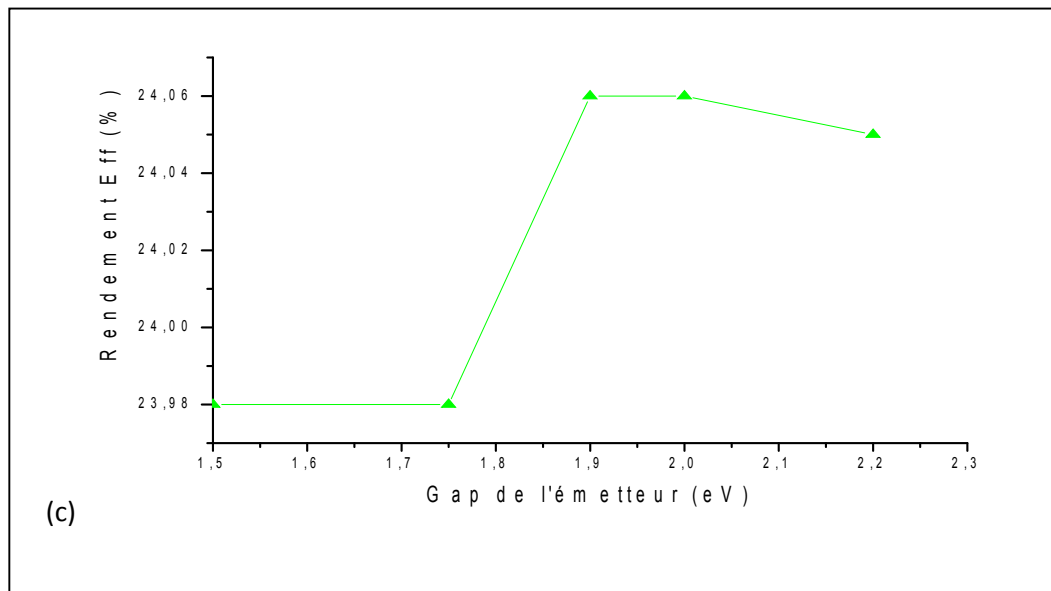


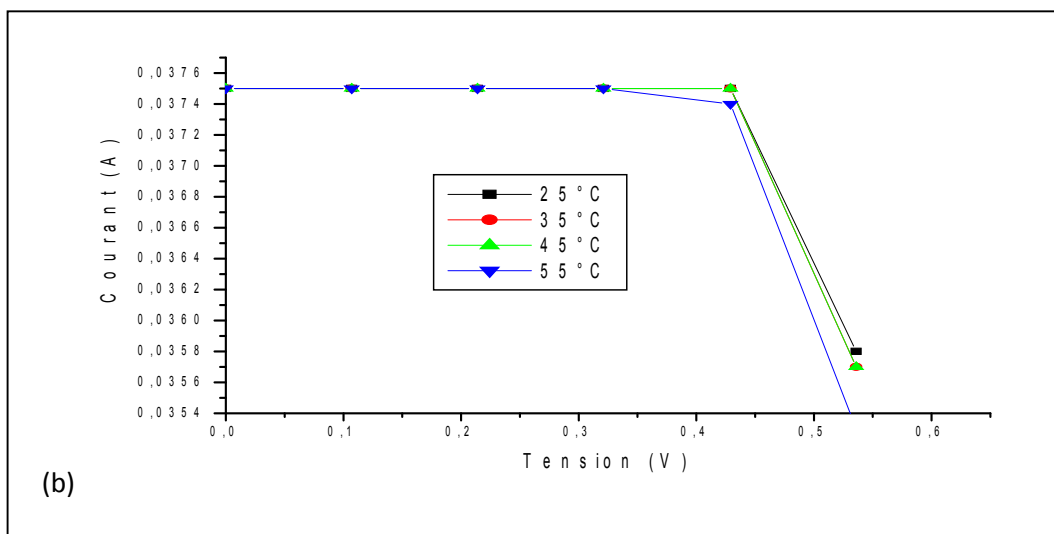
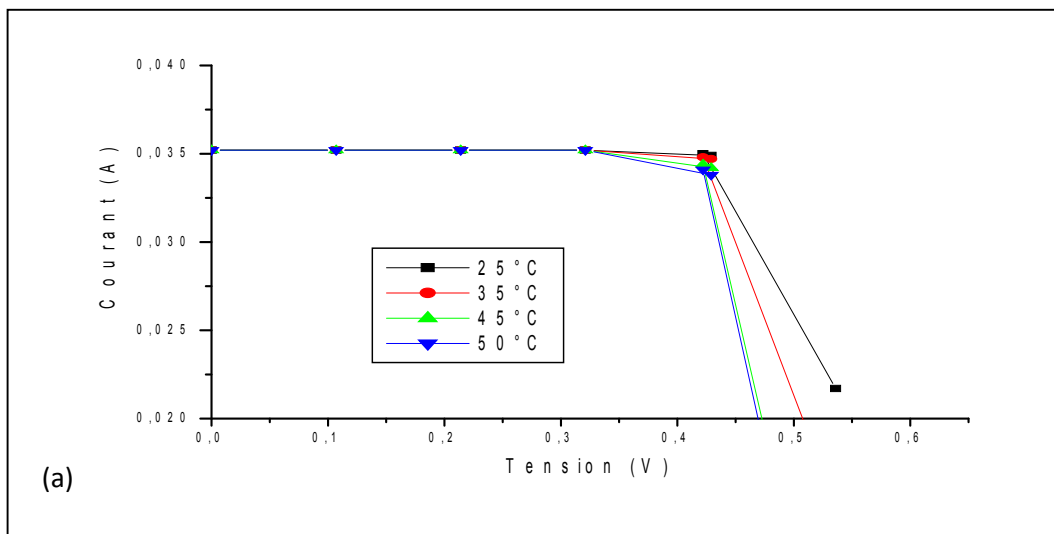
Figure IV.22 : Variation du rendement η en fonction du gap de l'émetteur : (a) cellule simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.

Les paramètres électriques des cellules solaires à simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT en fonction du gap de l'émetteur sont donnés en annexe E.

Le gap du silicium amorphe constituant l'émetteur de la cellule varie selon les conditions de son élaboration. Nous avons alors étudié l'influence de cette variation sur les performances de la cellule. Les variations de la V_{co} et de I_{cc} présentées respectivement sur les figures IV-19 et IV-20, suivent les mêmes tendances que celles publiées dans l'article [57]. L'énergie du gap est alors optimisée à 1.7 eV pour les cellules sans couche intrinsèque (simple et double hétérojonction) et 1.9 eV pour les cellules avec couches intrinsèque (HIT) comme le montrent les figures (IV-21c). En effet, un large gap augmente le coefficient d'absorption du matériau, ce qui est avantageux pour la conversion photovoltaïque.

IX. Influence de la température sur les caractéristiques I(V) des cellules simulées

La figure (VI-22) représente l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension des cellules simulées.



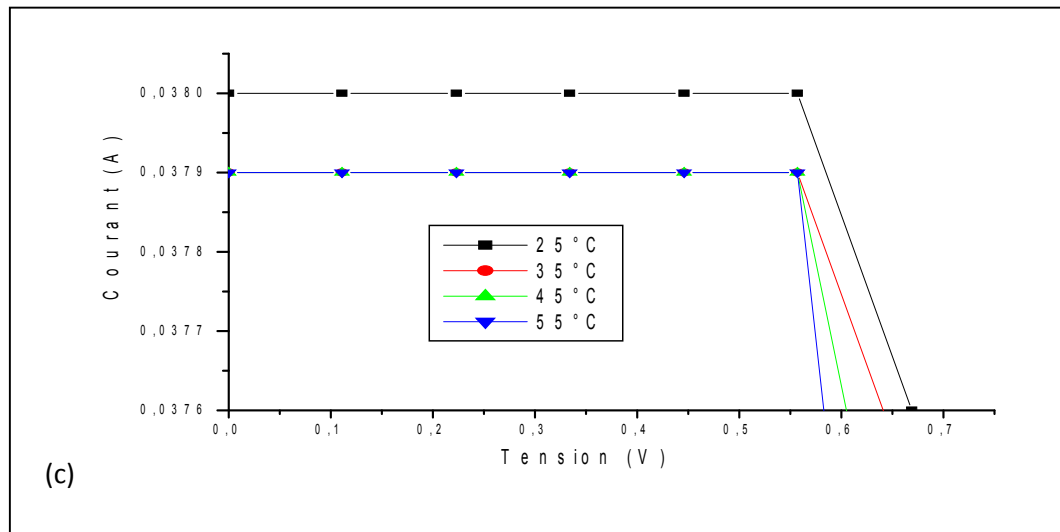


Figure VI.22 : Effet de la température sur la caractéristique I(V) des cellules simulées : (a) simple hétérojonction, (b) cellule double hétérojonction, (c) cellule HIT.

La figure (IV-22) montre l'effet de la température sur la caractéristique I(V) des cellules solaires simulées. Les meilleures performances sont obtenues à la température ambiante. Au-delà de cette valeur, nous observons une décroissance des paramètres électriques et une dégradation consécutive de la caractéristique I(V) avec l'augmentation de la température de la cellule, ceci peut être dû à une chute de mobilités des porteurs avec l'augmentation de la température.

X. Effet de la texturisation

La texturisation de la surface de silicium permet de diminuer la réflectivité de la cellule solaire [3].

La figure suivante représente la caractéristique courante tension I (V) de la cellule solaire HIT avec et sans texturisation.

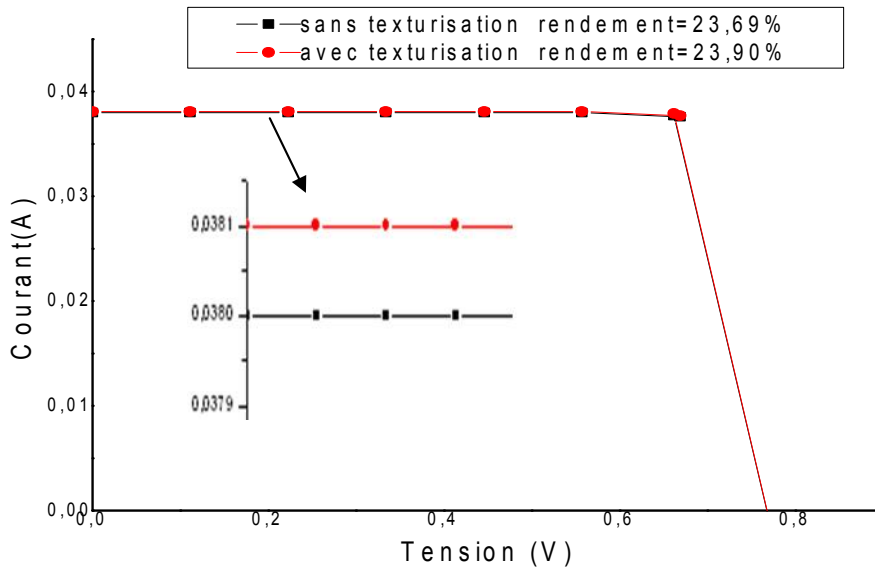


Figure IV.47: Effet de la texturisation sur la caractéristique I(V)

La caractéristique courant-tension de la cellule est légèrement améliorée avec la texturisation du substrat suite à la réduction de la réflectivité et l'amélioration du confinement optique dans le substrat.

XI. Comparaison avec d'autres types de cellules solaires à homojonction et multijonctions

Le tableau suivant donne les meilleures valeurs de rendement des cellules solaires à jonctions simple et multiples obtenues dans notre travail et d'autres rapportées dans la littérature.

Tableau IV-2. Valeurs de rendement de conversion des cellules solaires à jonctions simple et multiple.

Cellule solaire	Rendement (%)	Référence
Simple homojonction silicium	25.0	[55]
Simple hétérojonction GaAs	26.4	[55]
Simple hétérojonction CdTe	16.7	[55]
Simple hétérojonction a-Si :H/c-Si	14.8	Obtenu dans notre travail
Double hétérojonction <i>a-Si :H(n) /c-Si(p)/ a-Si:H(p)</i>	19.1	Obtenu dans notre travail
Cellule HIT	23.7	Obtenu dans notre travail
Triple jonction GaInP/GaInAs/Ge	41.6	[55]

Selon le tableau IV-2, les cellules solaires à triple jonction offrent un meilleur rendement de conversion mais cette technologie est très coûteuse.

Les cellules solaires à homojonction au silicium cristallin peuvent atteindre un rendement maximum de 25% (proche de la limite théorique de 29%) mais avec une technologie PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused structure) utilisant des procédés issus de la microélectronique (émetteur sélectif, BSF localisé, double passivation par oxyde thermique, photolithographie,...), cependant ce processus long et très coûteux est loin d'être industrialisable.

Parmi les cellules solaires à base de silicium, les cellules HIT présentent un fort potentiel d'amélioration du rendement de conversion, tout en réduisant les coûts de production. En effet, les cellules HIT présentent plusieurs avantages par rapport aux cellules à homojonction, incluant notamment :

- Possibilité de développement des cellules sur substrats minces ;
- Les cellules HIT présentent un meilleur coefficient de température comparativement aux cellules à homojonction standard ;
- Réduction du nombre d'étapes dans le processus de fabrication ;
- Possibilité de fabrication à basses températures réduisant ainsi le budget thermique ;
- Bonne passivation de surface permettant d'atteindre de hauts rendements.

XII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons regroupé les résultats obtenus au cours de la simulation des cellules solaires à hétérojonction de type a-Si :H/c-Si. Les cellules solaires à double hétérojonction ont montré de meilleures performances photovoltaïques et cela revient au rôle important qu'apporte le BSF (a-Si :H) ainsi que l'insertion de la couche interfaciale ((i) a-Si :H). Une étude comparative avec d'autres types de cellules solaires à jonction simple et multiple permet de déduire que les cellules solaires HIT offre un meilleur compromis rendement de conversion/coût de production.

Conclusion générale

Améliorer la compétitivité de l'électricité solaire vis-à-vis des autres sources d'énergie traditionnelles, c'est augmenter le rendement de conversion des cellules solaires tout en réduisant leur coûts de production. Les chercheurs ont donc besoin de miser sur la recherche et le développement de nouvelles structures permettant d'atteindre un meilleur rapport rendement de conversion/coût de production. Au cours de ce travail, nous avons effectué une étude comparative entre les performances de différentes structures de cellules solaires avec jonctions simple et multiple.

Les cellules solaires à multijonctions à base de semiconducteurs III-V offrent les meilleurs rendements de conversion (41.6 %) mais cette technologie est très coûteuse.

Dans la technologie silicium, les cellules solaires à homojonction peuvent atteindre un rendement maximum de 25% (proche de la limite théorique de 29%) mais avec un procédé issu de la microélectronique, qui est loin d'être industrialisable à cause de son coût très élevé.

Parmi les cellules solaires à base de silicium, les hétérojonctions a-Si :H/c-Si montrent un fort potentiel d'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de fabrication. Selon nos résultats de simulation utilisant le logiciel AFORS-HET, les cellules solaires à double hétérojonction présentent les meilleures performances photovoltaïques avec un rendement maximal de 19%, comparativement aux cellules à simple hétérojonction ayant un rendement de 14.7%. Cette différence du rendement est liée à la présence de la couche amorphe *a-Si:H(p)* entre le silicium cristallin (base) et le contact arrière (Al), formant ainsi un champ de surface arrière répulsif (BSF) qui améliore la collecte des porteurs et réduit les pertes par recombinaison sur la face arrière du silicium cristallin.

Le rendement des cellules solaires à double hétérojonction est amélioré après l'insertion d'une couche amorphe intrinsèque *a-Si:H(i)* sur les faces avant et arrière, donnant ainsi lieu à la structure HIT. Nous avons obtenu, par simulation des cellules HIT, un rendement de 23.69%, qui est proche du rendement expérimental de 23.7% atteint par la société japonaise Sanyo sur ce type de cellules.

Afin d'améliorer davantage les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et les cellules HIT en particulier, nous avons effectué plusieurs simulations en variant les paramètres liés à :

- L'épaisseur et la conductivité du substrat ;
- Epaisseur et conductivité de l'émetteur ;
- Gap de l'émetteur ;
- Texturisation ;
- Température de la cellule.

Nous pouvons déduire, qu'il est possible d'améliorer encore le rendement de conversion des cellules HIT à 25% en misant sur les paramètres optimaux à savoir : un émetteur ayant un gap de 1,75 eV et une épaisseur de 5 nm dopé à $7,89.10^{19} \text{cm}^{-3}$, une épaisseur du substrat de 250 nm dopé à 2.10^{15}cm^{-3} et une épaisseur de la couche intrinsèque (i) de 5nm.

Reférences

- [1] B.EQEUR, « Energie solaire photovoltaïque», volume 1, UNESCO, (1999).
- [2] www.NREL.com
- [3] Y. Ali, mémoire magister, « Optimisation des cellules solaires conventionnelles à base du silicium de type N», Université de Tlemcen,(2011).
- [4] R. De Bettighies, thèse doctorat, «Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués », Université d'Auger, (2003).
- [5] T. Destrus, thèse doctorat, «Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », INSA Lyon, (2009).
- [6] M. Navaro, thèse doctorat, « Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible», Université Toulouse, (2008).
- [7] L. Remache, thèse doctorat, « Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti réfléchissants », Université de Constantine, (2011).
- [8] T. schutz-kuchly, thèse doctorat,« investigation du silicium de qualité solaire de type n pour la fabrication de cellules photovoltaïques », Université Aix-Marseille,(2011).
- [9] DJ. Diouf, thèse doctorat, «Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », Université Paris Sud11, (2010).
- [10] www.pvresources.com
- [11] A.Rothwarf and K.Boer, «Direct conversion of solar energy through photovoltaic cells », Process solide-state chemistry, (1975),71-102.
- [12] www.industrie des énergies décarbonées.com
- [13] D. Hocine, thèse magister « Simulation et analyse des cellules solaires a hétérojonction de type SnO₂/SiO₂», Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou,(2008)
- [14] M.A.Green, « Silicon solar cells: Operating principals technology and system applications», Sydney, Australia: centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, (1992), 274.
- [15] www.dspace.univ-tlemcen.com
- [16] B. Loic, thèse doctorat, « Cellules photovoltaïques organiques souples à grandes surfaces», Université Bordeaux I, (2008).

-
- [17] U.Gangopadhyay, S. Roy et al, « Comparative simulation study between n- type and p- type Silicon Solar Cells and the variation of efficiency of n- type Solar Cell by the application of passivation layer with different thickness using AFORS HET and PC1D », IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) ISSN: 2250-3021, (2012), 41-48.
- [18] S. Lamine, thèse doctorat, « Etude expérimentale et thermodynamique du procédé de démoulage appliqué aux semi-conducteurs », Institut national polytechnique de Grenoble, (2008).
- [19] A. Mihoub, « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin », Revue des énergies renouvelables, (2001),11-22.
- [20] S. Gall et al, « Semiconductors for solar cell applications », Progression materials science, (1991), 205-418.
- [21] W .Favre, thèse doctorat, « Silicium de type n pour les cellules à hétérojonction : caractérisations et modélisations », Université Paris Sud, (2011).
- [22] T.M. Bruton et al, « Towards 20% efficient silicon solar cell manufactured at 50MWp per annum », Proceeding of the 3rd world conference on photovoltaic energy conversion, Osaka, Japan, (2003),899-902.
- [23] F.Bougenna, mémoire magister, « Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe », Université Mohamed Boudiaf, Oran, (2009).
- [24] K . Amira, mémoire magister, « Elaboration de nouvelles phases du silicium en couche mince », Université Mantouri de Constantine, (2008).
- [25] A .Bencherat, mémoire master, « Étude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellules solaires à faible budget thermique », Université Abou de Tlemcen, (2012).
- [26] W. Jianqiang, G. Hua, « Investigation of an a-Si/c-Si interface on a c-Si(P) substrate by simulation », Journal of Semiconductors, No. 3, (2012).
- [27] Y.Veschitti, thèse doctorat, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université Louis Pasteur Strasbourg I, (2005).
- [28] S.Fay, thèse doctorat, « L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (2003).
- [29] R. Valaski et al « Polythiophène thin films electrochemically deposited on sol-gel based TiO₂ for photovoltaic application », Thin Solid Film, (2010). 1514-1515.

-
- [30] A.Rohatgi,V .Yelundur et al, « Aluminium-enhanced PECVD SiNx hydrogenation in silicon ribbons»,16thE.C photovoltaic solar energy conference ,Glasgow,(1984), 671-678.
- [31] M. Boussaid, mémoire magister, «Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques », Université de Tlemcen, (2012).
- [32] H. Moler « Semiconductors for solar cell applications», Progress in Materials Science, (1999), 205-418.
- [33] www.cellulesolairesencouchesminces .
- [34] H. Ben-slimane et A. Helmaoui, « Etude analytique d'une cellule solaire à hétérojonction p+ (GaAs)/n (AlxGa1-xAs)/N (Al0.4Ga0.6As) », Revue des Energies Renouvelables, (2008), 259 – 266.
- [35] www.biblio.alloprof.com . Tableau périodique des éléments.
- [36] N. Grandjem, J. Massiers, thèse doctorat, « Les nitrures d'éléments III : des semiconducteurs III-V singuliers », Université de Montpellier II, (2010).
- [37] A. Diallo, thèse doctorat, « Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonction », Université de Sherbrooke, (2011).
- [38] F.Ynineb, Mémoire magister, « Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO)», Université Mentouri Constantine, (2010).
- [39] J. L. Shay et al, «CuInSe/CdS heterojunction photovoltaic detectors » Solar Energy. (2001), 89-90.
- [40] B.Eqeur,C .Novion, « Un dossier photovoltaïque dans le reflet de la physique », Press (2008) .
- [41] S. Shirakata et T.Nakada, « Near-band-edge photoluminescence in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells», Solar Energy Materials & Solar Cells 95, (2011), 219–222.
- [42] S. Saji, et al « Progress in electrodeposited absorber layer for CIGS solar cells», Solar Energy 85 (2011), 2666–2678.
- [43] C.Roger, thèse doctorat, « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques», Université de Grenoble,(2013).
- [44] D. Compaan, A. Gupta et al, «High efficiency, magnetron sputtered CdS/CdTe solar cells» Solar Energy 77, (2004),815–822.
- [45] S. Chun et al «The analysis of CdS thin film at the processes of manufacturing CdS/CdTe solar cells », Journal of Crystal Growth 326, (2011), 152–156.
- [46] F.L. Castillo-Alvarado et al «C–V calculations in CdS/CdTe thin films solar cells », Thin Solid Films 518, (2010), 1796–1798.

-
- [47] M. Rahmouni, thèse doctorat, «Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement», Université d'Oran-Mohamed Boudiaf, (2010).
- [48] S. de Nicolas, thèse doctorat, «a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells , Back side assessment and improvement » , Université de Paris Sud, (2012).
- [49] X. Wen, X. Zeng et al, «An approach for improving the carriers transport properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with efficiency of more than 27% », Solar Energy 96, (2013), 168 –176.
- [50] L. Shen, F. Meng et al, «Roles of the Fermi level of doped a-Si:H and band offsets at a-Si:H/c-Si interfaces in n-type HIT solar cells», Solar Energy 97, (2013), 168–175.
- [51] I. Martin, thèse doctorat, «silicon surface passivation by PECVD amorphous silicon carbide films», Université Polytechnique de Catalogne, (2002).
- [52] C. Leendertz and R. Stangl, «Modeling an a-Si:H/c-Si Solar Cell with AFORS-HET», ISBN 978-3-642-2275,(2012).
- [53] R. Varache, thèse doctorat, « Development, characterization and modeling of interfaces for high efficiency silicon heterojunction solar cells», Université Paris Sud, (2012).
- [54] A. Datta, M. Rahmouni et al «Insights gained from computer modeling of heterojunction with intrinsic thin layer “HIT” solar cells », Solar Energy Materials & Solar Cells 94, 1457–1462,(2010) .
- [55] T. Mishima et al, « Development status of high-efficiency HIT solar cells», Solar Energy Materials & Solar Cells, (2011), 18–21.
- [56] Takahiro Mishima, et al., "Development status of high-efficiency HIT solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells, (2011), 18 – 21.
- [57] A. Datta et al. « Dominant role of interfaces in solar cells with N-a-Si:H/P-c-Si heterojunction with intrinsic thin layer», Materials Science and Engineering, (2009), 159–160.
- [58] R. Jeyakumar et al « Influence of emitter bandgap on interdigitated point contact back heterojunction (a-Si:H/c-Si) solar cell performance», Solar Energy Materials & Solar Cells, (2013), 199–203.
- [59] A.A. Boussettine , B. Rezgui et al., «Optimization of the performance of micromorph tandem solar cell a-Si/ μ c-Si », Revue des Energies Renouvelables N°1, (2010), 179 – 186.
- [60] J.M. Marshall and D. Dimova-Malinovska, «Photovoltaic and Photoactive Materials Properties, Technology and Applications», London, 2002. ISBN: 1-4020-0823-6.

- [61] T. Kinoshita et al, «The approaches for high efficiency HIT solar cells with very thin silicon wafer over 23%», In: Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 5 – 9, (2011), 871 – 874.
- [62] M.A. Green et al, «Solar cell efficiency tables (version 42) », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21, (2013), 827 – 837.
- [63] M. Acevedo, N.H. Como, in press, «Modeling solar cells: a method for improving their efficienc» y. Mater.Sci.Eng.B.
- [64] N.H. Como, A.M. Acevedo, "Simulation of heterojunction solar cells with AMPS-1D», Sol. Energy Mater. Sol. Cell 94, (2010), 62 – 67.
- [65] N. Dwivedi et al, « Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve ~27% efficiency», Solar Energy 88, (2013), 31 – 41.