

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Département : Génie Electrique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

THÈME

Etude des performances électriques de la cellule photovoltaïque à base du Carbure de Silicium, comme couche absorbante

Préparé par :

HABIS Kheira

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
A. ABDICHE	Pr.	Président
R. OTMANI	MAA	Examineur
A. GHELLAB	MCB	Examineur
Y. BELHADJI	MCA	Encadreur

Remerciement

Avant tout Louange à ALLAH qui m'a donné la force pour achever ce modeste travail.

Un grand merci s'adresse à mes parents, pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A mes frères et ma sœur pour leur aide et encouragement multiples, leur complicité et leur présence dans ma vie.

A mes Grands-parents pour toute l'affection qu'ils m'ont donnée et pour son précieux encouragement.

A toute ma famille proche, et lointaine. Particulièrement mon oncle maternel. Pour tout son soutien que je ne saurai nommer.

Je voudrais également remercier mon encadreur Monsieur Belhadji Youssef, pour tous ses précieux conseils, pour son écoute active, sa disponibilité.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury messieurs « A. ABDICHE », « R. OTMANI » et « A. GHALLEB » qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Finalement, je tiens à remercier toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'achèvement de mes objectifs, tant au niveau scientifique qu'au niveau humain.

Dédicace

A mes chers parents, qui m'ont donné le meilleur de ce qu'ils ont, qu'ALLAH nous les garde

A mes frères et ma sœur

Mes grands-pères qu'ALLAH me les garde

A mon encadreur Dr. BELHADJI Youssef

A tous les professeurs qui ont contribué à ma formation

A tous ceux que j'aime.

HABIS KHEIRA

TABLEAU DES ABREVIATIONS :

Paramètre	Définition
PN	Jonction à semiconducteur de type P et semiconducteur de type N
ZCE (m)	Zone de charge d'espace
E_v (eV)	Le niveau d'énergie maximal de la bande de valence
E_c (eV)	Le niveau d'énergie minimal de la bande conduction
E_g (eV)	Energie de gap
L_n , L_p	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires (électrons et trous)
D_n , D_p	Coefficient de diffusion
τ_n, τ_p	La durée de vie des porteurs
R_{sh} (Ω)	Résistance en shunt
R_s (Ω)	Résistance en série
P_m (mw/cm²)	Puissance maximal
I_m (A)	Le courant correspondant à la puissance maximale fournie
V_m (V)	La tension correspondant à la puissance maximale fournie
V_{co} (V)	Tension de circuit ouvert
I_{obs} (A)	Le courant d'obscurité
q (C)	La charge de l'électron
N	Facteur d'idéalité de la jonction
K	Constante de Boltzmann
T (K)	Température (K)
I_s (A)	Courant de saturation
η (%)	Le rendement de conversion
J_{sc} (mA/cm²)	Courant de court- circuit (short-circuit current)
FF (%)	Facteur de forme
IB	inter-bande
PVT	Le dépôt physique en phase vapeur
IPV	photovoltaïque impureté
χ (eV)	Affinité électronique (eV)
ε_r	Permittivité relative
CB (cm⁻³)	Densité effective d'état (cm ⁻³)
VB (cm⁻³)	Densité effective d'état (cm ⁻³)
V_{th} (cm/s)	Vitesse thermique des électrons (cm/s)
V_{th} (cm/s)	Vitesse thermique des trous (cm/s)
μ_n (cm²/Vs)	Mobilité des électrons (cm ² /Vs)
μ_p (cm²/Vs)	Mobilité des trous (cm ² /Vs)
N_D (1/cm³)	Concentration des dopants donneurs (1/cm ³)
N_A (1/cm³)	Concentration des dopants accepteurs (1/cm ³)
PCE	Efficacité de conversion de puissance
V_{MPP} (V)	Tension au point de la puissance maximale (maximum power point)
J_{MPP} (mA/cm²)	Courant au point de la puissance maximale (maximum power point).
SCAPS	Simulateur de capacité de la cellule solaire

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

Figure 1-1 : Représentation du principe fonctionnement de la cellule solaire.

Figure 1-2 : Mécanismes de génération et collecte des charges à travers la jonction PN.

Figure 1-3 : Modèle électrique de la cellule solaire.

Figure 1-4 : La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

Figure 1-5 : Chronologie des quatre GEN de cellules photovoltaïques avec les matériaux associés qui composent chaque génération.

Figure 1-6 : Crystal moissanite.

Figure 1-7 : Le polymorphisme du carbure de silicium.

Figure 1-8 : Représentation de la technique de croissance du SiC PVT.

CHAPITRE II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

Figure 2-1 :

a) Fonctionnement des cellules multi-jonctions

b) Absorption dans la cellule en fonction de la longueur d'onde.

Figure 2-2 :

a) Structure de la cellule solaire photovoltaïque à jonction p-i-n riche en Si : $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ (ITO/p-SiC /i-SiC/n-SiC/Al),

b) Cellule solaire photovoltaïque en tandem double jonction p-in $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ / a-Si riche en Si:H,

c) Diagramme de bandes d'énergie des deux cellules.

Figure 2-3 : Structures de cellules solaires à hétérojonction tandem à base de carbure de silicium cubique 3C-SiC.

Figure 2-4 : Structure et caractéristique de sortie de la cellule solaire à hétérojonction de type p-Si / n-3C-SiC.

Figure 2-5 : Caractéristiques J-V de la cellule avec le film a- $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$:H non dopé comme couche tampon entre la couche de type n μc -3C-SiC:H/a-Si:H.

Figure 2-6 : Structure de la cellule solaire en nc-3C- SiC:H.

Figure 2-7 : Variation de J_{sc} , V_{oc} , PCE et FF en fonction de l'intensité de la lumière solaire incidente et de la température.

CHAPITRE III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

Figure 3-1 : Présentation des cellules proposées.

Figure 3-2 : Variation de J_{sc} , V_{oc} , **FF** et **le rendement** en fonction de température.

Figure 3-3 : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de la température.

Figure 3-4 : Evolution des QE pour les trois cellules en fonction de la température.

Figure 3-5 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et **le rendement** en fonction de l'épaisseur de la couche émetteur de 10nm à 160nm.

Figure 3-6 : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante.

Figure 3-7 : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante allant de 200 nm à 1 μ m.

Figure 3-8 : Evolution des caractéristiques du rendement quantique des trois cellules en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante allant de 200 nm à 1 μ m.

Figure 3-9 : Variation de J_{sc} ainsi que **le rendement** en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante allant de 200nm à 1 μ m.

Figure 3-10 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et **le rendement** en fonction de l'épaisseur de la couche de base de 100nm à 2 μ m.

Figure 3-11 : Variation de J_{sc} , V_{MPP} et **le rendement** en fonction du dopage en atome accepteur N_A de $1.0E+17$ à $9.0E+17$.

Figure 3-12 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et **le rendement** en fonction du dopage en atome accepteur N_A de $1.0E+18$ à $9.0E+18$.

Figure 3-13 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et **le rendement** en fonction du dopage en atome accepteur N_A de $1.0E+19$ à $9.0E+19$.

Figure 3-14 : Variation de J_{sc} , V_{MPP} , J_{MPP} et **le rendement** en fonction de dopage en atomes donneurs N_D de $1.0E+17$ à $9.0E+17$.

Figure 3-15 : Variation de **rendement** en fonction de dopage en atomes donneur N_D de $1.0E+18$ à $9.0E+18$.

Figure 3-16 : Variation de J_{sc} et **le rendement** en fonction de dopage en atome donneur N_D de $1.0E+19$ à $9.0E+19$.

Figure 3-17 : Variation de V_{oc} , **rendement**, **FF**, V_{MPP} , J_{MPP} et J_{sc} en fonction de la résistance en série pour $R_{sh}=1.10^4\Omega.cm^2$.

Figure 3-18 : Variation de J_{sc} , V_{oc} , **FF** et **le rendement** en fonction de résistance en série pour $R_{sh}=3.10^4\Omega.cm^2$.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Paramètre de sortie de trois cellules.

Tableau 2.2 : Les paramètres physiques des couches actives de cellule.

Tableau 2.3 : Les paramètres physiques des couches actives de cellule.

Tableau 2.4 : Paramètres électriques de sortie des diverses études exposées.

Tableau 3.1 : Les paramètres physiques des couches actives de de la première cellule.

Tableau 3.2 : Les paramètres physiques des couches actives de de la deuxième cellule.

Tableau 3.3 : Les paramètres physiques des couches actives de de la troisième cellule.

Tableau 3.4 : Les paramètres physiques essentiels pour les trois cellules.

Tableau 3.5 : La tension et la densité de courant maximaux : V_{MPP} et J_{MPP} sous l'effet de la température.

Tableau 3.6 : Les paramètres électriques de sortie des trois cellules en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante allant de : 10nm à 160nm.

Tableau 3.7 : Les paramètres électriques de sortie de première et troisième cellules en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque allant de 200nm à 250nm.

Tableau 3.8 : Les paramètres électriques de sortie des trois cellules en fonction de la variation de la résistance en série pour $R_{sh}=3.10^4 \Omega.cm^2$.

Tableau 3.9 : Les paramètres de sortie optimaux de la première cellule.

Tableau 3.10 : Les paramètres de sortie optimaux de la deuxième cellule.

Tableau 3.10 : Les paramètres de sortie optimaux de la troisième cellule.

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Tableau des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

1.1. Introduction	3
1.2. Notion de collecte de charges	3
1.3. Matériaux pour la photovoltaïque	8
1.3.1. Les générations des cellules photovoltaïques.....	8
1.3.2. Le carbure de silicium pour les cellules photovoltaïques	9
a)-Propriété générale	10
b)-Liaison Si-C.....	11
d)-Le polymorphisme	12
1.3.3 Technique de croissance du SiC.....	12

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

2.1. Introduction	14
2.2. Les cellules multi-jonctions.....	14
2.2.1. Définition de l'hétérojonction	15
2.2.2. Modélisation de fonctionnement	16
2.3. Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC.....	18
a)- Travaux de Kabe Moyème et ses collaborateurs.....	19
b)-Travaux de M. Toure et ses collaborateurs.....	20

c)-Travaux de Shunsuke Ogawa et ses collaborateurs.....	22
d)- Travaux d'Y. Belhadji.....	23

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

3.1. Introduction	26
3.2. Résultats et Discussions	28
3.2.1. Effet de température.....	28
3.2.2. Effet de la variation de l'épaisseur des couches actives	30
a)- Effet de l'épaisseur de la couche absorbante ' X_p '.....	30
b)- Effet de l'épaisseur de la couche active ' X_n '.....	33
c)- Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque ' X_i '.....	34
3.2.3. Effet du dopage en atomes accepteurs N_A	34
3.2.4. Effet de dopage en atomes donneurs N_D	38
3.3.5 Effet de résistance en shunt (R_{sh}).....	40
Conclusion générale.	44
Références bibliographiques.....	46
Résumé	

Introduction générale

Introduction générale

Les consommateurs, les industries et les gouvernements prennent tous des mesures pour accroître leur utilisation des énergies renouvelables. Cela remodèle le système de production et de distribution d'électricité, passant d'une architecture à roues et rayons largement centralisée à une approche plus maillée de la production et de la consommation localisées, soutenue par l'inter-connectivité des réseaux intelligents pour lisser l'offre et la demande. Selon le rapport sur le carburant d'octobre 2019 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la capacité d'énergie renouvelable augmentera de 50 % d'ici 2024. Cela représente 1 200 GW supplémentaires de capacité électrique mondiale, ce qui équivaut à la capacité installée actuelle des États-Unis. Le rapport prévoit que 60 % de cette croissance se fera sous la forme d'installations solaires photovoltaïques (PV).

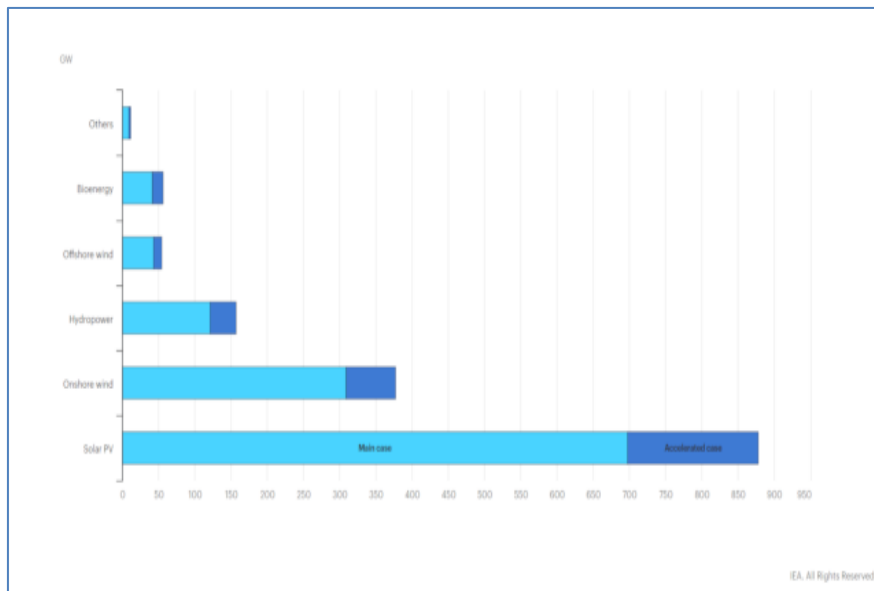


Figure 1. Croissance des capacités renouvelables par technologie, 2019 – 2024

La conversion PV transforme le kilowatt d'énergie solaire incident sur chaque mètre carré de la surface terrestre en 200 W à 300 W d'énergie électrique. Ceci, bien sûr, dans des conditions idéales. L'efficacité de conversion peut être réduite par la pluie, la neige et la poussière déposées à la surface de la cellule, les effets du vieillissement du matériau semi-conducteur et les changements environnementaux tels que l'augmentation de l'ombre due à la croissance de la végétation ou à la construction de nouveaux bâtiments.

En outre, le courant de sortie d'une cellule solaire (panneau solaire) est maximisé en augmentant le nombre total de photons d'énergie absorbés. Donc, de longueurs d'ondes

Introduction générale

différentes seront absorbées par le matériau semi-conducteur. Le spectre solaire couvre à peu près la région de longueur d'onde d'environ 300 nanomètres à environ 2200 nanomètres, ce qui correspond à environ 4,2 eV à environ 0,59 eV, respectivement. La partie du spectre solaire qui est absorbée par le dispositif photovoltaïque est déterminée par la valeur de l'énergie de bande interdite optique du matériau semi-conducteur. Le rayonnement solaire (lumière du soleil) ayant une énergie inférieure à l'énergie de la bande interdite optique n'est pas absorbé par le semi-conducteur matériau du conducteur et, par conséquent, ne contribue pas à la génération d'électricité, de courant, de tension et de puissance, du dispositif photovoltaïque. Au fil des ans, de nombreuses cellules solaires ont été développées qui ont rencontré plus ou moins de succès. Les cellules solaires à jonction unique sont utiles mais ne peuvent souvent pas atteindre la puissance et l'efficacité de conversion des cellules solaires à jonctions multiples. Malheureusement, les cellules solaires à jonctions multiples et les cellules solaires à jonction unique ont été construites à partir de divers matériaux capables de capturer et de convertir une partie seulement du spectre solaire en électricité. Des cellules solaires multi-jonctions ont été produites avec du silicium amorphe et ses alliages, tels que le carbure de silicium, avec des couches intrinsèques à bande interdite large et faible. Le carbure de silicium (SiC) présente de multiples avantages matériels par rapport au silicium dans la gestion de l'énergie solaire grâce à une bande interdite large. C'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour rendre un électron disponible pour conduire l'électricité, près de trois fois celle du silicium. Cela signifie qu'un dispositif en SiC supportera un champ électrique presque dix fois supérieur à celui du silicium avant de tomber en panne, permettant aux dispositifs SiC de fonctionner efficacement à des tensions beaucoup plus élevées que des structures similaires construites en silicium. Dans ce travail nous proposons une étude théorique suivie par des simulations numériques des performances de trois cellules solaire en carbure de silicium. Le plan adopté pour réaliser cette étude est le suivant :

- Un premier chapitre durant lequel nous discutons les aspects théorique lié au carbure de silicium et l'énergie photovoltaïque,
- Un deuxième chapitre consacré pour la discussion de quelques travaux sur les cellules solaires en carbure de silicium,
- Un dernier chapitre consacré à la présentation et la discussion des résultats de simulation,
- Conclusion générale.

CHAPITRE I

1.1. Introduction

Les dispositifs solaires, communément appelés cellules photovoltaïques, sont capables de générer de l'électricité directement à partir de la lumière du soleil. Dans le matériau semi-conducteur présent sur les panneaux solaires, les photons émis par le soleil provoquent la libération des électrons externes de leurs liaisons atomiques. Lorsque les électrons sont forcés dans une direction, ils créent un flux de courant électrique capable d'alimenter des appareils électriques ou d'envoyer de l'électricité au réseau. Initialement théorisée en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel, la technologie photovoltaïque reste un sujet de recherche scientifique. Aujourd'hui, l'industrie photovoltaïque continue de croître, alors que d'importants programmes aux États-Unis, au Japon et en Europe accélèrent rapidement leur propre mise en œuvre de systèmes d'énergie solaire.

1.2. Notion de collecte de charges

L'effet photovoltaïque est le processus physique permettant de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'absorption de la lumière par un matériau semi-conducteur excite les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction (création des paires électrons-trous) et donnant naissance par la suite à une tension et/ou un courant électrique. Pour que ces charges puissent être collectées par un circuit extérieur, il faut pouvoir les séparer au sein du matériau. Dans le cas d'une cellule solaire ordinaire, la structure adoptée est une jonction PN (ou hétérojonction). Le champ électrique créé à la jonction de la zone N et de la zone P autorise la séparation de la paire électron-trou, les porteurs diffusent ensuite vers les extrémités de la cellule entraînant l'apparition d'une tension aux bornes de cette dernière. Arrière (voir figure 1-1). [1]

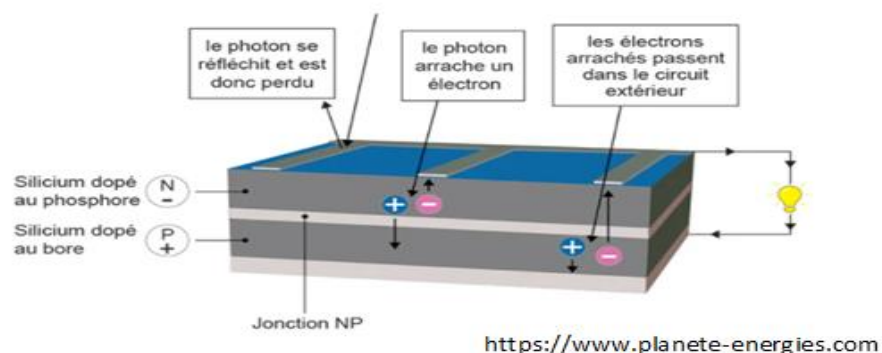


Figure 1-1 : Représentation du principe fonctionnement de la cellule solaire.

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

Comme déjà indiqué, le champ électrique crée dans la jonction PN assure la séparation des paires électrons-trous photo-générées dans la ZCE et leur transport vers les contacts de la cellule une. Dans le cas où la zone de pénétration des photons et la ZCE ne sont pas identiques, une partie des charges peuvent être générées avant et après la ZCE. Dans ce cas, les porteurs des deux types peuvent se recombiner entre eux, ou se déplacer par diffusion vers la ZCE. Dans une jonction PN, si les porteurs minoritaires atteignent la ZCE, ils sont propulsés vers la zone où ils sont majoritaires en créant par la suite le photo-courant. Ces mécanismes sont représentés dans la figure ci-dessous.

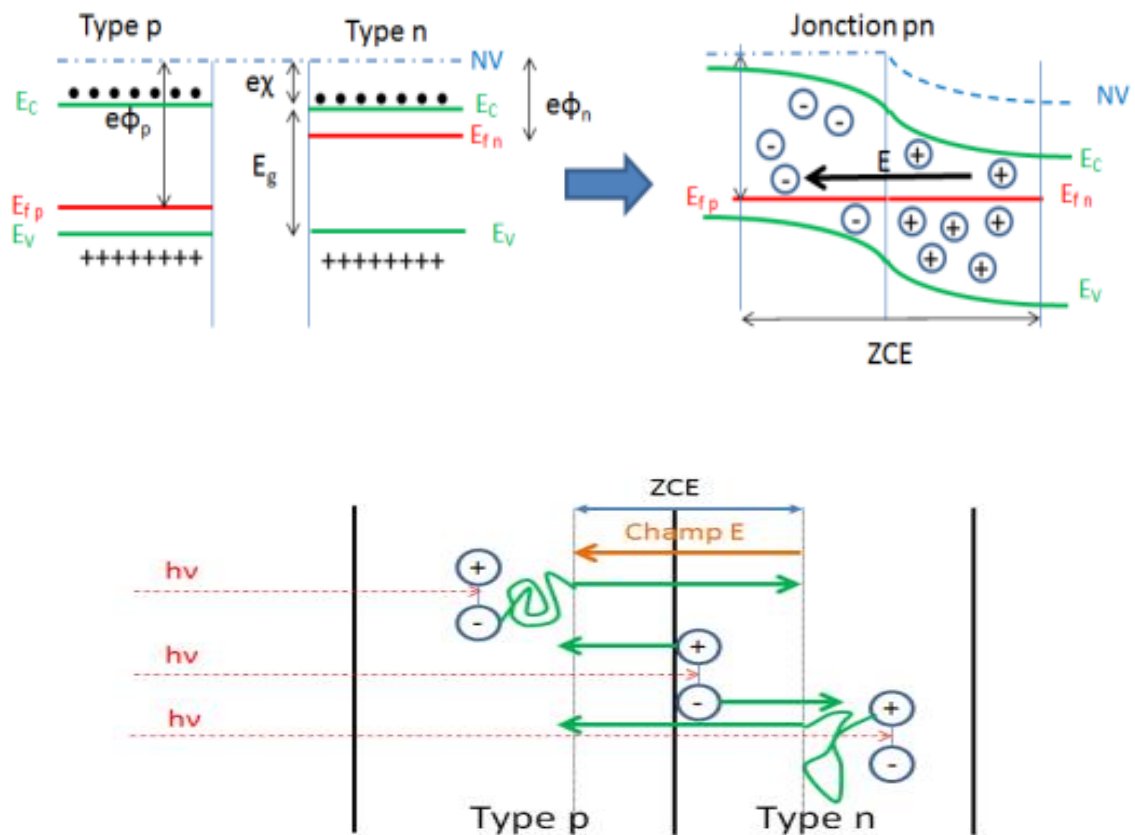


Figure 1-2 : Mécanismes de génération et collecte des charges à travers la jonction PN.

La balance entre les deux mécanismes, recombinaison et diffusion est représentée par la notion de longueur de diffusion des porteurs minoritaires : L_n pour les électrons dans la zone p, L_p pour les trous dans la zone n. Ces valeurs sont reliées à la durée de vie des porteurs τ_n et τ_p et aux coefficients de diffusion D_n et D_p par :

$$L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p} \tau_{n,p}} \quad (1.1)$$

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

De manière simplifiée, on considère que sont collectées les charges photo générées à une distance de la ZCE inférieure à L_n dans le milieu p, L_p dans le milieu n. Mais seule la résolution des équations de continuité que nous verrons plus loin permet un calcul précis de la collecte des porteurs et donc de la photo courant. [2]

Pour modéliser son fonctionnement, la cellule solaire est modélisée électriquement par le modèle de la figure 1-3. La source de courant modélise le courant photo-généré.

- R_{sh} : est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile (micro court-circuit dans le silicium en particulier).
- R_s : est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

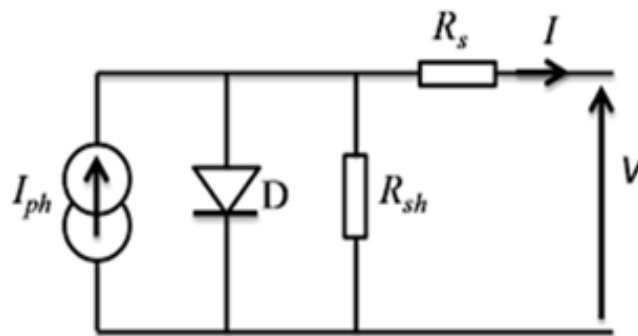


Figure 1-3 : Modèle électrique de la cellule solaire.

La source de courant est plutôt un générateur de courant qu'un générateur de tension, au moins dans la partie exploitable de sa caractéristique entre le courant de court-circuit et I_{CC} et le point maximal de puissance P_m . En effet, c'est le courant qui est constant et non la tension. Au-delà du P_m , la courbe n'est pas exploitable car la puissance chute très vite, et si l'éclairement baisse par exemple, on risque de ne plus avoir de puissance du tout.

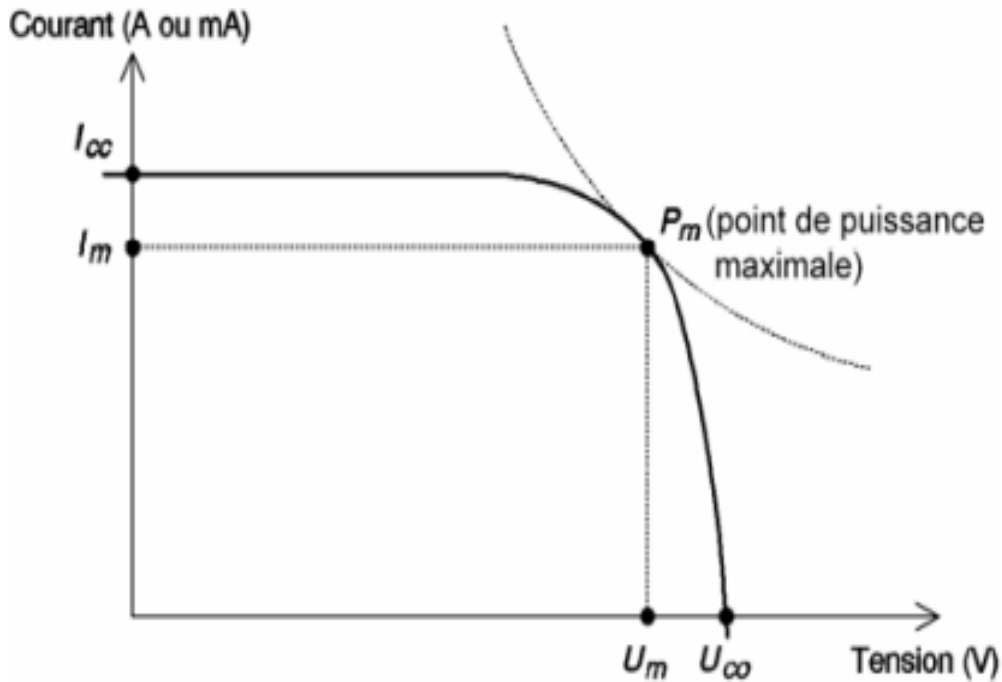


Figure 1-4 : La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

Sous obscurité, le courant dans une telle structure de type jonction P-N est appelé courant d'obscurité, exprimé par la formule suivante

$$I_{obs} = I_s \left[e^{\left(\frac{qv}{nKT}\right)} - 1 \right] \quad (1.2)$$

Avec :

q : La charge élémentaire = $1,6 \cdot 10^{19}$ (C)

v : Tension aux bornes de la jonction (V)

n : Coefficient d'idéalité de la jonction

k : Constante de Boltzmann = $1,380649 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹

T : Température (K)

I_s : Courant de saturation inverse de la jonction PN (A)

Le courant d'obscurité I_{obs} correspond au courant de la diode Id, il résulte de la polarisation de la jonction. Ainsi le courant délivré sur une charge par une cellule solaire photovoltaïque sous éclaircissement se traduit par la formule suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs} (V) \quad (1.3)$$

Soit :

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{qV}{nKT}\right)} - 1 \right] \quad (1.4)$$

Sous éclairement, la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque idéale est résultat de la superposition de la caractéristique d'un générateur de courant et de la caractéristique de la diode sous obscurité. Par convention on inverse l'axe des courants comme illustré dans la figure 1-4. À partir de la caractéristique $I(V)$, sous éclairement, on déduit les paramètres propres à la cellule et notamment [1] :

- **Courant de court-circuit**

C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct. On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit.

- **Tension de circuit ouvert**

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert V_{co} ou tension à vide.

- **Puissance maximale**

C'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m . On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point :

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (1.5)$$

La puissance maximale de l'éclairément incident. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1000 W/m², 25 °C, spectre solaire AM 1.5) on parle alors de watts-crête (WC) ou de puissance-crête.

- **Rendement** [3]

Le rendement de la cellule est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photo-générateur :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad (1.6)$$

Où S est la surface de la cellule

- **Facteur de forme** [4]

Le facteur de forme ou de remplissage (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{CC} \times V_{OC}$); d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} \times V_{OC}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{CC} \times V_{OC}} \quad (1.7)$$

1.3. Matériaux pour la photovoltaïque

1.3.1. Les générations des cellules photovoltaïques

La recherche et le développement de cellules solaires jouent un rôle pratique et de plus en plus important dans l'approvisionnement énergétique et la conservation écologique. De nombreux problèmes sont rencontrés dans le développement de cellules plus efficaces, moins coûteuses et plus stables. Les différentes technologies des cellules solaires développées jusqu'à présent peuvent être classées en 4 grandes catégories appelées générations [5] :

- **Première génération (1GEN)** : Elle repose sur les technologies du silicium cristallin, monocristallin et polycristallin, et sur l'arséniure de gallium (GaAs) ;
- **Deuxième génération (2GEN)** : elle comprend des cellules solaires à couches minces en silicium amorphe (a-Si) et en silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$), des cellules solaires en tellure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS) et en séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS) ;
- **Troisième génération (3GEN)** : il s'agit de technologies basées sur des composés plus récents, notamment des films nanocristallins, des points quantiques actifs, des multicouches en tandem ou empilées de matériaux inorganiques à base de matériaux III-V, tels que GaAs/GaInP, des cellules solaires à base organique (polymère), cellules solaires teintées, etc. ;
- **Quatrième génération (4GEN)** : également connu sous le nom de « inorganiques-inorganiques », il combine le faible coût/la flexibilité des films minces polymères avec la stabilité de nouvelles nanostructures inorganiques telles que les nanoparticules métalliques et les oxydes métalliques ou les nanomatériaux à base organique comme le carbone, nanotubes, graphène et ses dérivés.

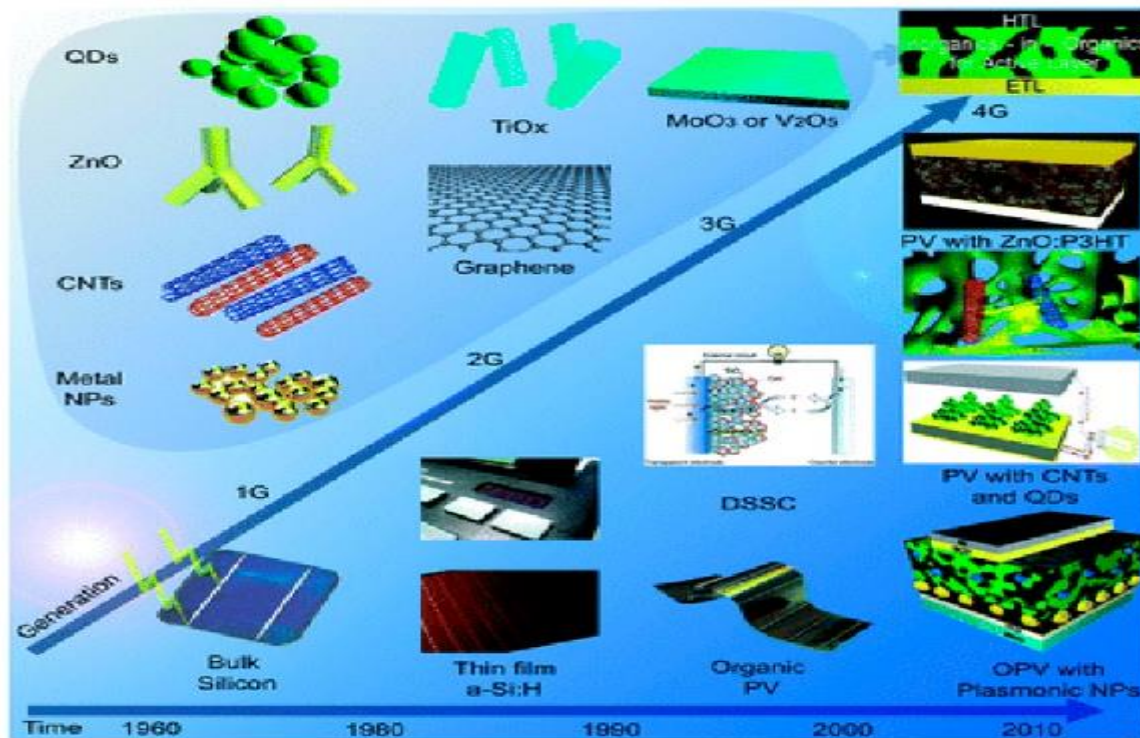


Figure 1-5 : Chronologie des quatre GEN de cellules photovoltaïques avec les matériaux associés qui composent chaque génération. [5].

Les matériaux semi-conducteurs dans un système photovoltaïque peuvent varier du silicium, des films minces poly-cristallins ou des films minces monocristallins. Pour le silicium on trouve le silicium monocristallin, le silicium multi-cristallin et le silicium amorphe. Le silicium monocristallin a une structure régulière, permettant un meilleur taux d'absorption par rapport à celui observé dans la structure multi-cristalline. D'autres matériaux ayant des propriétés potentielles par rapport au silicium sont actuellement sollicités notamment les matériaux à large gap comme le cas du carbure de silicium.

1.3.2. Le carbure de silicium pour les cellules photovoltaïques

Le marché des cellules solaires est aujourd'hui dominé par les cellules à jonction simple au silicium avec jusqu'à 91 % de la production mondiale par rapport à la puissance de sortie. La jonction simple implique que la cellule ne peut convertir qu'une fraction du spectre solaire en électricité limitant son efficacité théorique maximale à environ 29 % dans le cas du silicium. L'efficacité peut être augmentée en empilant plusieurs matériaux ayant des gaps croissants l'un sur l'autre afin de créer une cellule solaire à jonctions multiples. Les structures matérielles sont généralement trop chères pour la commercialisation à grande échelle et utilisées principalement sur des marchés discrets, comme l'exploration spatiale.

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

Un concept alternatif attrayant pour créer une inter-bande médiane (IB) dans la bande interdite (E_g) d'un semi-conducteur par des niveaux d'énergie qui forment une bande [6]. Cela permettrait d'absorber plus grande partie du spectre solaire pour contribuer au courant électrique puisque l'IB utiliserait des photons qui ont une énergie. Il existe plusieurs candidats matériels pour un tel comportement d'IB [7], mais la plupart ont encore du mal avec les conditions de croissance et/ou trouvent niveaux profonds appropriés qui pourraient créer un matériau photovoltaïque. Le SiC cubique (3C-SiC) est unique parmi d'autres candidats car il combine une bande interdite presque idéale pour une cellule solaire IB (par exemple 2,3 eV) avec d'excellentes propriétés électroniques et les centres de défauts profonds disponibles. En particulier, il peut être dopé au bore qui introduit un niveau d'énergie de 0,7 eV au-dessus de la bande de valence [8].

a)- Propriété générale

Le carbure de silicium est un matériau de grand intérêt sur le plan industriel. Le carbone (C) et le silicium (Si) sont les éléments les plus légers possédant quatre électrons de valence, et donc aptes à former des composés stables (C, Si et SiC) [9]. Le carbure de silicium (SiC) n'existe pas à l'état naturel sur terre. Le chimiste français Henri Moissan a découvert une météorite en Arizona en 1905 composée de petits cristaux naturels de SiC (cristaux appelés moissanite), Cette rareté interdit donc toute extraction industrielle et le carbure de silicium (SiC) reste donc un matériau purement synthétique. [10]

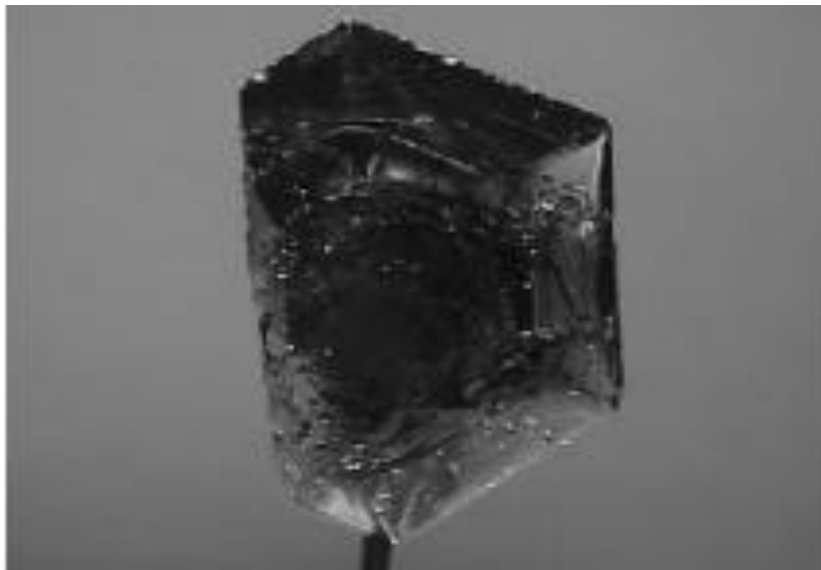


Figure 1-6 : Crystal moissanite.

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

Le SiC a des avantages en comparaison avec le silicium qu'on peut les résumer dans les points suivants:

- **Températures plus élevées** : les dispositifs d'électronique de puissance à base de SiC peuvent théoriquement supporter des températures allant jusqu'à 300° Celsius, tandis que les dispositifs au silicium sont généralement limités à 150°C.
- **Tension plus élevée** : par rapport aux dispositifs en silicium, les dispositifs SiC peuvent tolérer près de 10 fois la tension, absorber plus de courant et évacuer plus de chaleur du système énergétique.
- **Commutation plus rapide** : un appareil électronique de puissance a besoin d'un interrupteur qui s'allume pour convertir la basse tension en tension plus élevée. C'est le cas du SiC qui peut s'allumer et s'éteindre rapidement, et bien qu'une certaine quantité d'énergie soit perdue pendant la commutation, une commutation plus rapide limite cette perte et améliore l'efficacité de l'appareil.
- **Équipement moins coûteux** : SiC se traduit par des coûts de système inférieurs car il permet des équipements plus petits et plus abordables. Par exemple, le dissipateur thermique, qui protège le reste des composants en absorbant l'excès de chaleur, peut-être plus petit car avec moins de perte d'énergie, moins de chaleur est produite.

Une caractéristique importante est responsable de ces avantages à savoir sa large bande interdite. Cette dernière est une mesure de l'énergie qui signifie la distance entre deux états : le point de départ d'un électron à partir de la bande de valence, qui est l'état de non-conduction, et le niveau auquel il doit se déplacer pour que l'électricité circule. Aussi, c'est l'énergie entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence.

En outre, une large bande interdite permet une haute tension, ce qui signifie que le SiC peut mieux tolérer les pointes de tension et comme les appareils peuvent être plus fins, ils fonctionnent plus rapidement.

b)- Liaison Si-C [11]

L'une des exceptionnelles propriétés du carbure de silicium est la possibilité de se cristalliser sous différentes formes. La cellule de base est une structure tétraédrique formée par un atome de silicium entouré de quatre atomes de carbone et vice versa (par une rotation de 180° par rapport à la première on tombe sur la deuxième). La distance atomique entre le carbone et le silicium est de 1.89 Å et celle entre les atomes de carbone est de 3.09 Å.

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

Aussi, la découpe du matériau se fait au niveau de la liaison Si-C, le résultat obtenu est deux faces, l'une appelé « face Si » et l'autre « face C ».

c)- Le polymorphisme

Le carbure de silicium est marquant pour son polymorphisme particulièrement développé, comptant plus de 200 formes cristallines. Ce polymorphisme est caractérisé par des structures cristallines très proches appelées polytypes, identiques dans deux dimensions mais différentes selon la troisième dimension. Ceci permet de les décrire comme différentes les unes des autres par l'ordre d'empilement de couches atomiques d'une structure déterminée. Selon les séquences d'empilements, on distingue trois structures de base du SiC :

- **Structure cubique** : formée par un seul polytype de type zinc-blende qui est le β -SiC
- **Structures hexagonale et rhomboédrique** : regroupées sous le nom générique α -SiC.

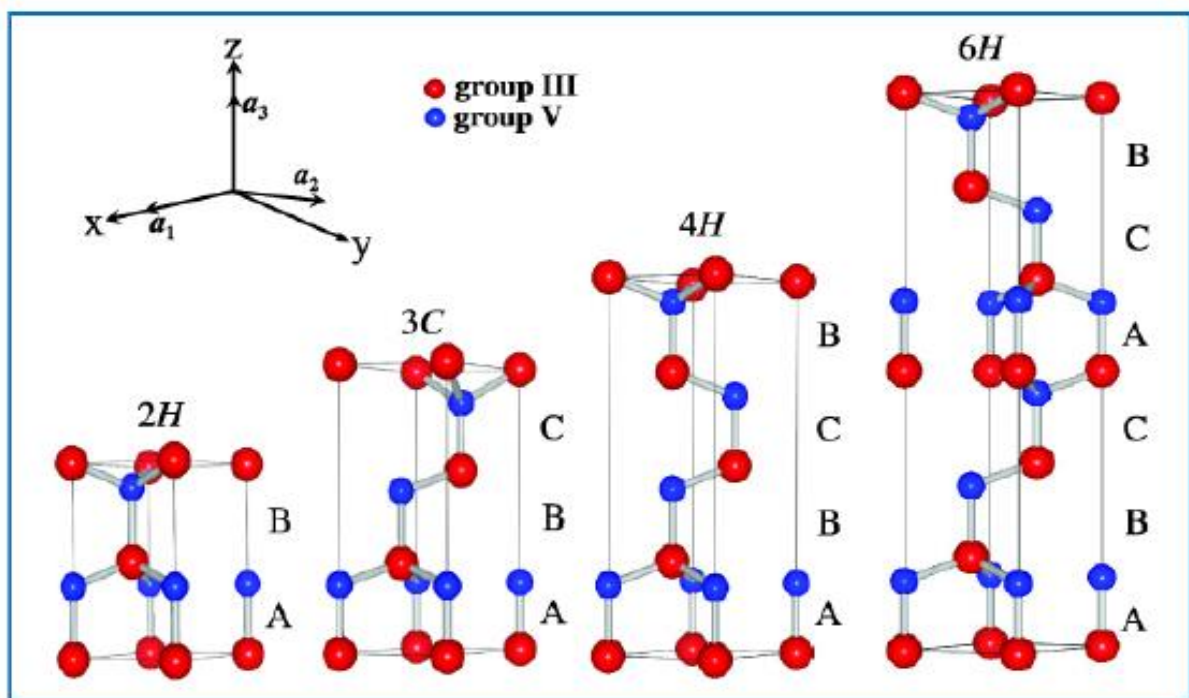


Figure 1-7 : Le polymorphisme du carbure de silicium.

1.3.3 Technique de croissance du SiC

Produire des substrats SiC de haute qualité était l'un des défis les plus rencontrés par les industriels des semi-conducteurs. Ceci est dû au fait que la croissance d'un substrat SiC monocristallin parfait s'attache directement à la nature physico-chimique de celui-ci. Le procédé de croissance du SiC est souvent connu sous le nom procédé par sublimation. Le SiC

Chapitre I : Le carbure de silicium pour la photovoltaïque

se sublime à une température environ de 1800C°. Lely [12] est celui qui a réussi, en 1955, la première croissance de cristal SiC monocristallin en sublimant le SiC poly -cristallin.

Une percée majeure est venue vers 1980 avec l'introduction du germe, au procédé de sublimation. Ce dernier est souvent connue sous le nom : méthode de transport en phase vapeur (PVT) ou la méthode Lely modifiée. Cette méthode a été affinée afin de produire des substrats SiC de grande surface [13], [14] Jusqu'à aujourd'hui, la PVT reste une technique dominante et considérée comme un standard pour la croissance du carbure de silicium. Les lingots SiC issus de cette méthode, sont de haute qualité et peuvent atteindre des dimensions allant jusqu'à 100 mm. Actuellement, des couches homo-épitaxiales de 4H-SiC et 6H-SiC (de haute qualité), avec différentes épaisseurs et différents niveaux de dopages, sont disponibles. Le 3C-SiC gagne également l'attention d'être croître par un procédé d'hétéro-épitaxie sur divers matériaux, spécifiquement sur le silicium.

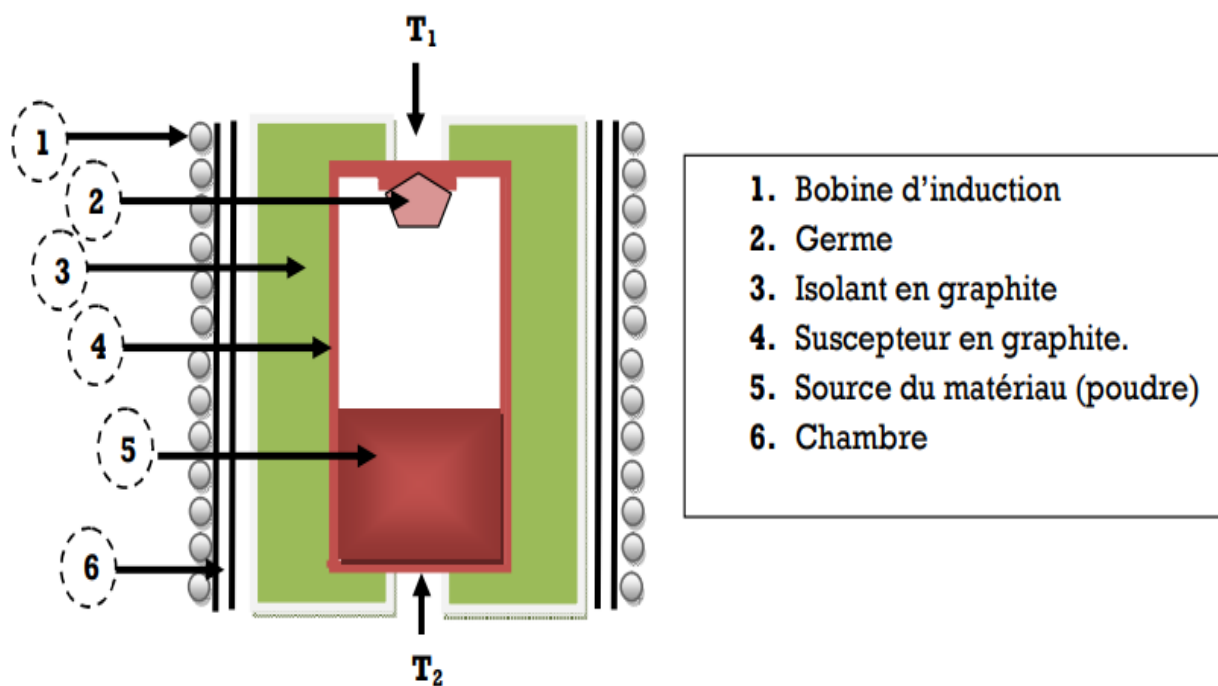


Figure 1-8 : Représentation de la technique de croissance du SiC PVT. [15]

CHAPITRE II

2.1. Introduction

Le marché des sources d'énergie renouvelables, et en particulier des cellules solaires, se développe d'année en année, ce qui suscite un grand intérêt pour la recherche de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies pour les applications de l'énergie solaire. Aussi, la durabilité est un facteur important dans de nombreux domaines de la vie quotidienne, et cela inclut la production d'électricité. La demande de technologie qui prend en charge l'utilisation des ressources renouvelables a augmenté, et donc que la façon dont nous transmettons et transformons cette énergie doit également être durable. Les composants de puissance en carbure de silicium (SiC) ont le potentiel d'augmenter considérablement la durabilité de l'énergie renouvelable et de la technologie qui la rend possible. Le carbure de silicium est devenu connu pour ce qu'il peut accomplir en termes d'efficacité supérieure, de génération réduite de chaleur et de densité de puissance supérieure par rapport au silicium (Si). L'utilisation de composants d'alimentation en carbure de silicium au lieu de silicium pour les onduleurs solaires peut économiser 10 mégawatts pour chaque gigawatt et 500 watts/sec en fonctionnement, ce qui représente des économies d'énergie importantes. Le carbure de silicium a une longue histoire d'utilisation comme semiconducteur. Le phénomène d'électroluminescence a été découvert pour la première fois en 1907 par le britannique Henry Joseph Round (1881-1966) par un cristal semi-conducteur : le carborundum, mieux connu aujourd'hui sous le nom « carbure de silicium (SiC) » [16]. Aujourd'hui, le SiC a trouvé beaucoup d'utilisation dans les appareils électroniques à haute puissance en raison de ses propriétés supérieures en tant que matériau à large bande interdite. Il est aussi suggéré comme matériau potentiel pour les dispositifs photovoltaïques à impuretés (IPV). Les cellules solaires IPV tirent parti des niveaux d'énergie supplémentaires des impuretés pour absorber un spectre plus large de la lumière du soleil. Cette technologie pourrait potentiellement produire des cellules solaires à très haut rendement.

2.2. Les cellules multi-jonctions

L'une des solutions adoptées actuellement dans la conception des cellules solaires est la technologie des cellules multi-jonctions. Elle consiste à empiler des matériaux de gap différents permet d'élargir l'intervalle d'absorption du spectre solaire et aussi d'améliorer le rendement des cellules.

La figure présente le cas d'une cellule triple jonction connectées en série grâce à des jonctions tunnel.

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

- La cellule supérieure est optimisée afin d'absorbée les faibles longueurs d'onde,
- La cellule intermédiaire possédant un gap dans le domaine du visible ou proche de l'infrarouge,
- La cellule inférieure est optimisée pour l'absorption des grandes longueurs d'ondes (faibles énergies).

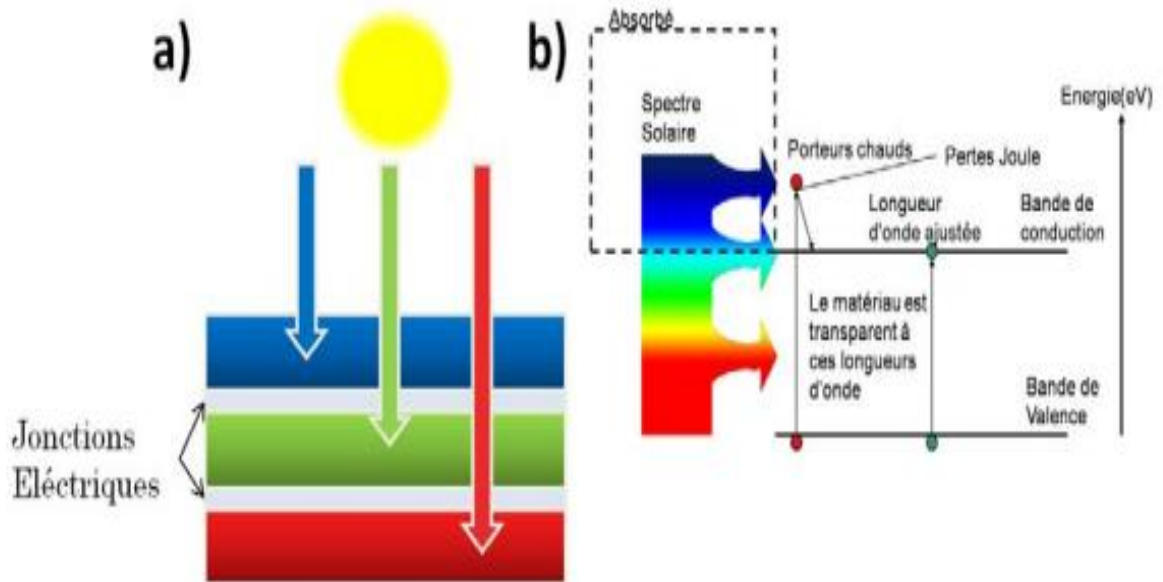


Figure 2-1 : a) Fonctionnement des cellules multi-jonctions.

b) absorption dans la cellule en fonction de la longueur d'onde. [17]

2.2.1. Définition de l'hétérojonction

Le terme hétérojonction désigne la jonction entre deux semi-conducteurs de gaps différents. Si les deux semi-conducteurs ont de même type de conductivité on dit que l'hétérojonction est isotype. S'ils sont différents on dit qu'elle est anisotype. C'est ce dernier type d'hétérojonction qui présente d'avantage d'intérêt. **Walter Fuhs et al.** Sont les premiers ayant l'idée de fabriquer des hétérojonctions de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) sur silicium cristallin (c-Si). L'aspect hétérojonction confère des propriétés intéressantes grâce à l'existence de discontinuité de bande. La propriété la plus importante est qu'une hétérojonction peut être utilisée pour contrôler la position des porteurs libres en les obligeant à se situer et/ou à se déplacer dans une région bien définie dite région de confinement [18].

La grande interface de l'hétérojonction permet d'augmenter le nombre d'excitons séparés par rapport à une structure Homojonction. Cependant, les charges libres créées après dissociation

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

de l'exciton ont moins de chance de se recombiner puisque la géométrie même du dispositif conduit à la séparation spatiale des électrons et des trous, qui migrent jusqu'aux électrodes.

2.2.2. Modélisation de fonctionnement [19], [20]

Dans l'approche générale, la modélisation du fonctionnement des cellules solaires est basée sur la résolution des équations de Poisson et de Boltzmann. Toute charge d'espace $\rho(x,y,z)$ est accompagnée d'un champ électrique donné par la loi de Poisson :

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho(x,y,z)}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Où ε est le constant diélectrique du semi-conducteur.

Le champ électrique est d'autre part relié au potentiel par la relation :

$$\vec{E} = -\text{grad } V \quad (2.2)$$

En explicitant le champ E on obtient :

$$\Delta V = - \frac{\rho(x,y,z)}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

C'est l'équation de Laplace, dont l'intégration permet de calculer la variation du potentiel dans un semi-conducteur à partir de la charge d'espace. La charge d'espace est calculée en tenant compte de toutes les charges qui existent en un point du semi-conducteur, c'est-à-dire d'une part des charges mobiles que sont les électrons et les trous, et d'autre part des charges fixes qui peuvent être localisées sur des donneurs ou accepteurs ionisés ou sur des centres profonds. En l'absence de centres profonds ionisés cette charge d'espace est donnée par :

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p - n) \quad (2.4)$$

À la température ambiante tous les donneurs et accepteurs sont ionisés de sorte que la charge d'espace s'écrit simplement :

$$\rho(x) = q(N_D - N_A + p - n) \quad (2.5)$$

Aussi l'équation de continuité ou de conservation des porteurs de charges traduit le bilan, par unité de temps, de la variation de la densité des porteurs dans un volume élémentaire de matériau semi-conducteur. Sa résolution permettra de définir les profils

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

des densités de porteurs excédentaires dans les semi-conducteurs et, par conséquence de calculer les différents courants dans les structures.

Ce bilan met en œuvre les trois éléments qui peuvent modifier la densité des porteurs:

- La génération,
- La recombinaison,
- Le passage d'un courant électrique.

La variation du nombre de porteurs par unité de temps dans un espace à une dimension s'écrit donc, pour les trous :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{-1}{q} \cdot \frac{dJp}{dx} + \mathbf{G} - \mathbf{R} \quad (2.6)$$

On obtient une équation similaire pour les électrons en remplaçant p par n et en changeant le signe de la dérivée.

Dans le cas d'un faible niveau d'injection, seuls les porteurs minoritaires seront perturbés.

Pour un matériau de type N par exemple, on pourra écrire : $\mathbf{R} = \frac{p}{\tau}$

L'équation de conservation s'écrit alors :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{-1}{q} \cdot \frac{dJp}{dx} + \mathbf{G} - \frac{p}{\tau} \quad (2.7)$$

Le courant peut être constitué de deux termes; un terme de diffusion et un terme de conduction. Soit respectivement pour les trous et pour les électrons :

$$\frac{dp}{dt} = D_p \frac{d^2p}{dx^2} - \mu_p \cdot \mathbf{E} \cdot \frac{dp}{dx} - \mathbf{p} \cdot \mu_p \cdot \frac{dE}{dx} + \mathbf{G} - \frac{\hat{p}}{\tau} \quad (2.8)$$

$$\frac{dn}{dt} = D_n \frac{d^2n}{dx^2} + \mu_p \cdot \mathbf{E} \cdot \frac{dn}{dx} + \mathbf{n} \cdot \mu_n \cdot \frac{dE}{dx} + \mathbf{G} - \frac{\hat{n}}{\tau} \quad (2.9)$$

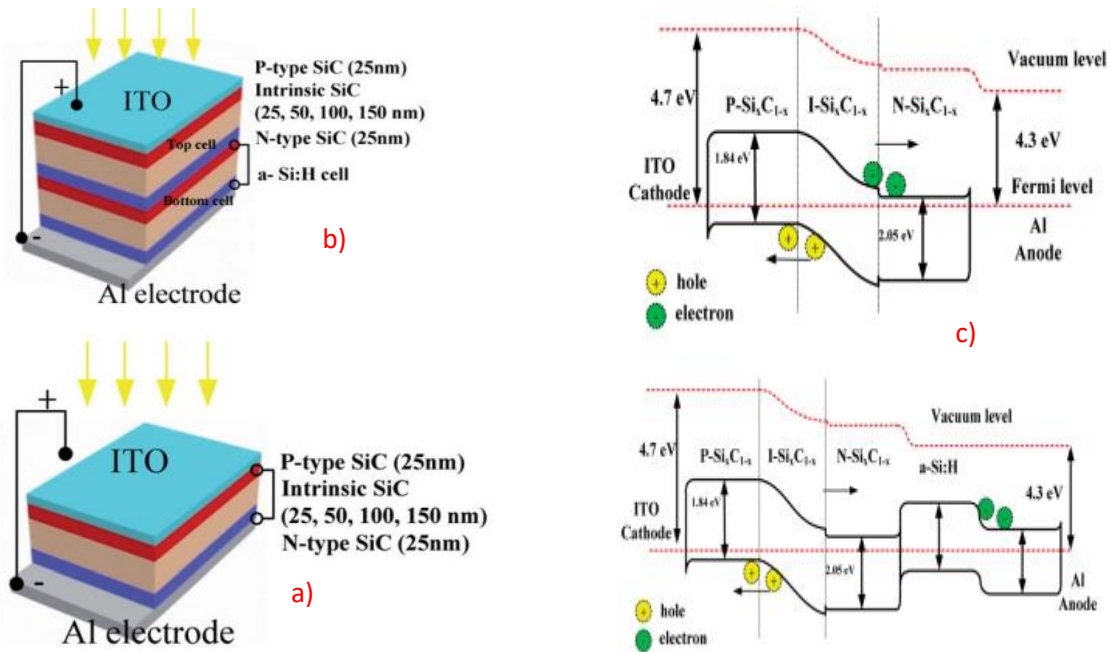


Figure 2-2 : a) Structure de la cellule solaire photovoltaïque à jonction p-i-n riche en Si : $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ (ITO/p-SiC /i-SiC/n-SiC/Al),

b) Cellule solaire photovoltaïque en tandem double jonction p-in $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ / a-Si riche en Si:H,

c) Diagramme de bandes d'énergie des deux cellules. [21]

2.3. Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

Plusieurs travaux théoriques et expérimentaux ont souligné l'excellente efficacité des cellules solaires à base de SiC où de nombreuses structures ont été étudiées [22, 23, 24, 25]. L'une de ces structures est basée sur le polytype cubique, communément appelé 3C-SiC ou β -SiC. Ce dernier est un matériau très attrayant pour les cellules solaires à bande intermédiaire qui ont le plus faible écart parmi tous les autres polytypes (2.2~ 2.36eV) et une impureté profonde donnée par le niveau d'accepteur de bore à ~0,7 eV au-dessus de la bande de valence [26]. M. Touré et al. ont étudié une structure à base de carbure de silicium cubique. Il s'agit d'une cellule solaire bicouche de 3C-SiC sur un substrat de silicium avec un rendement de conversion optimal de 19,98 % [24]. Les propriétés de la cellule solaire SiC/ $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ ont également été étudiées en contrôlant la teneur en silicium et en carbone (coefficient stœchiométrique) du SiC. Alors son écart de bande peut être contrôlée [27, 28, 29]. Lorsque la teneur en silicium et en carbone augmente la bande interdite augmente aussi. De plus, pour les alliages SiC amorphes, les liaisons C-H sont beaucoup plus stable que les liaisons Si-H ce qui devrait avoir des conséquences sur la stabilité thermique du film vis-à-vis

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

de l'effusion d'hydrogène [30]. La structure cristallographique et électronique ainsi que les propriétés du $\mu\text{-SiC:H}$ pour les applications photovoltaïques sont également attirées par de nombreux auteurs [31]. L'utilisation du SiC dans les cellules solaires, ce n'est pas nouveau, c'est étudié depuis des décennies. Les travaux de Yoshihisa et Masataka Kondo, en 1981, ont souligné l'utilisation de carbure de silicium hydrogéné : a-SiC:H comme matériau de fenêtre favorable pour un a-Si à haut rendement [32]. Ming et ses collaborateurs ont étudiés expérimentalement la croissance à basse température d'une cellule solaire à base de a-SiC:H pour augmenter l'efficacité de conversion dans un éclairage intérieur de 500 lx [33]. Le SiC amorphe peut être transformé en couches minces de SiC nanocristallin par HWCVD technique sans dilution hydrogène [34]. Pour le carbure de silicium cubique nanocristallin hydrogéné (nc-3C-SiC:H) est largement utilisé comme couche d'émetteur de type n ou d'absorbeur de type p. De plus, l'utilisation de a-SiC:H rend la capture de longueurs d'ondes courtes possible et donc augmenté la tension de circuit ouvert V_{oc} [35].

Il existe plusieurs type on structure de cellule solaire en SiC et notamment le SiC cubique. Les hétérojonctions 3C-SiC/Si ont déjà été étudiées dans le domaine des diodes de puissance, comme couche fenêtre ou comme émetteur pour des cellules photovoltaïques dans plusieurs configurations. Dans cette partie nous allons présenter une synthèse de quelques structures déjà étudiées tout en indiquant les performances de chacune de ces structures.

a)-Travaux de Kabe Moyème et ses collaborateurs [36]

Afin d'améliorer l'efficacité des cellules solaires à base de carbure de silicium cubique (3C-SiC), une cellule solaire à hétérojonction et deux structures tandem ont été simulées sous un spectre solaire AM1.5 à l'aide du logiciel SCAPS.

Les performances des cellules ont été étudiées en fonction de l'épaisseur des couches de carbure de silicium. Les résultats de la simulation ont permis d'atteindre un rendement de 22,03% avec une structure à jonction tandem utilisant une épaisseur optimale de la couche 3C-SiC . Ces structures sont données dans la figure ci-dessous

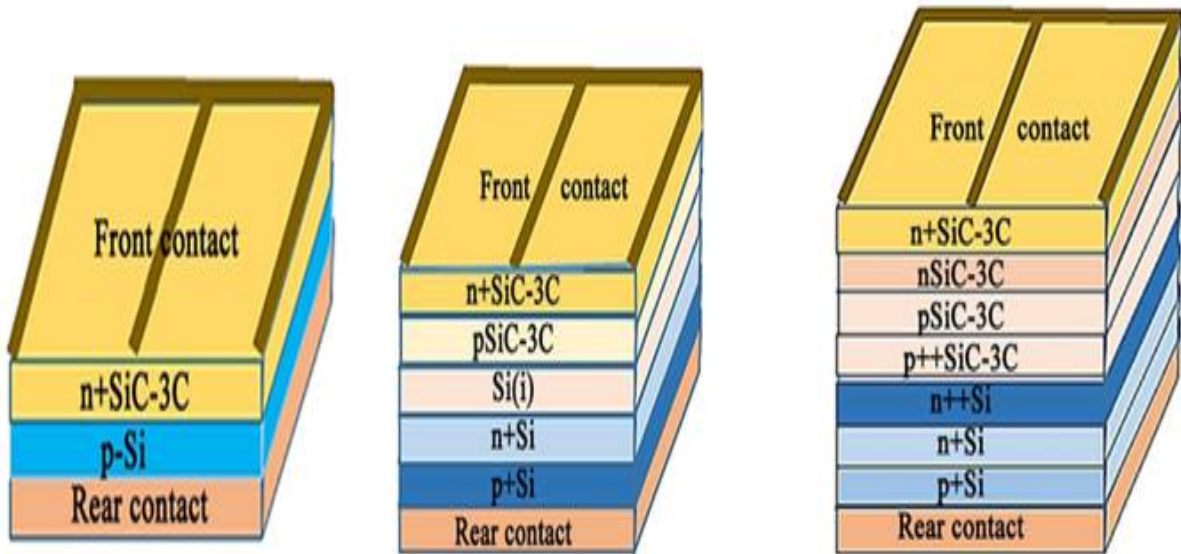


Figure 2-3 : Structures de cellules solaires à hétérojonction tandem à base de carbure de silicium cubique 3C-SiC. [36]

Les caractéristiques de sorties des trois cellules sont données dans le tableau ci-dessous.

Cellule/paramètre de sortie	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF (%)	η (%)
Cellule 1	26.53	565.55	81.58	17.49
Cellule 2	37.44	688.2	83.27	21.68
Cellule 3	37.81	689.7	84.4	22.03

Tableau 2.1 : Paramètre de sortie de trois cellules.

A travers cette étude kabe Moyème et al. Ont confirmés d’une part, l’importance de l’optimisation de l’épaisseur dans la conception des cellules solaires, et d’autre part, l’avantage du 3C-SiC d’être utilisé comme matériau capital pour obtenir des cellules solaires plus performantes.

b)-Travaux de M. Toure et ses collaborateurs

La deuxième étude présentée est celle de M. Toure et al. D’une cellule solaire 3C-SiC / Si comme c’est présenté dans la figure 2-4.

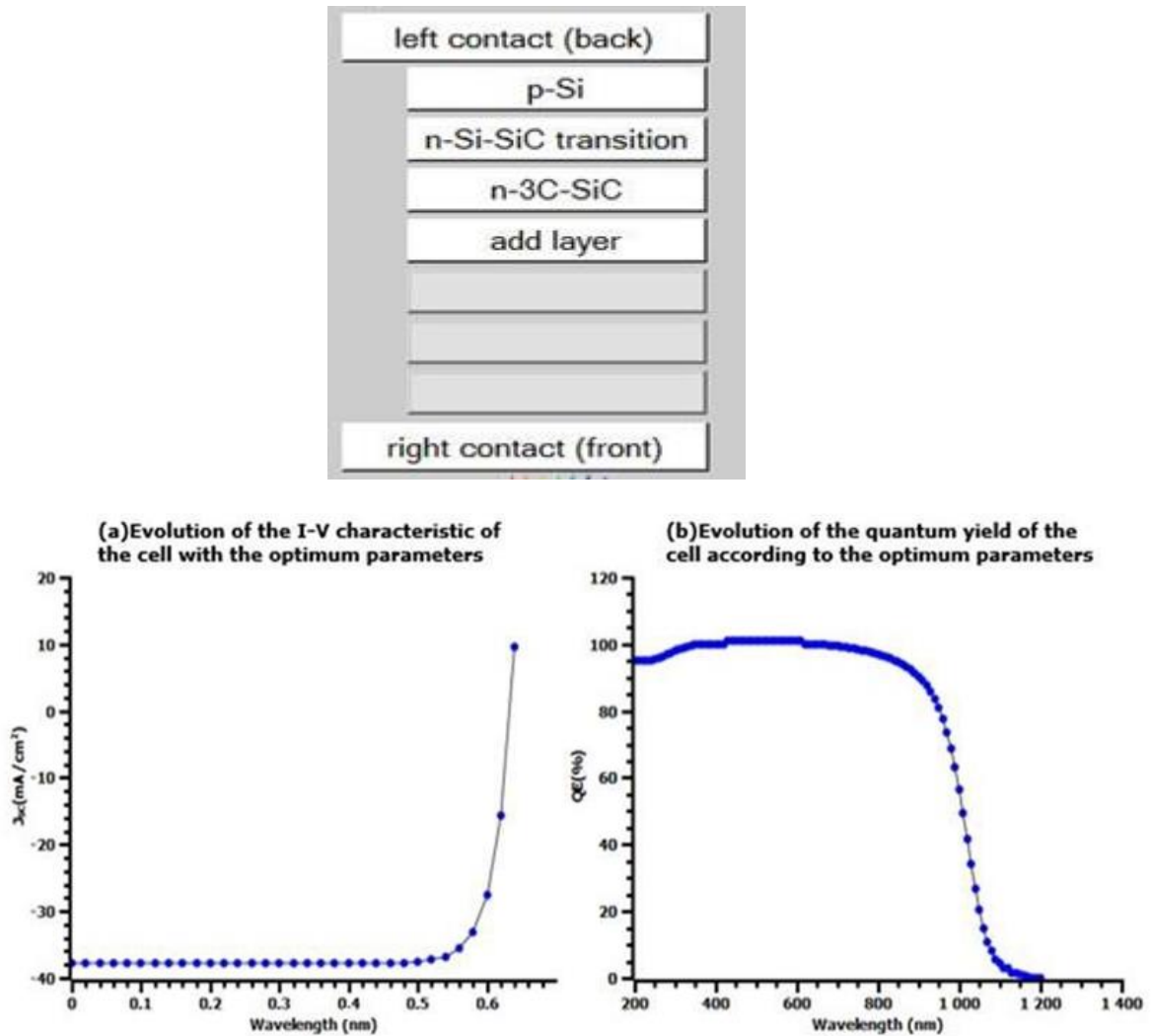


Figure 2-4 : Structure et caractéristique de sortie de la cellule solaire à hétérojonction de type p-Si / n-3C-SiC. [22]

Dans ce travail la cellule présentée à une structure formé d'une couche fenêtre en carbure de silicium cubique dopé N ayant un $gap=2.36$ eV et le silicium ($E_g Si = 1.12$ eV). Afin d'obtenir une structure conduisant aux meilleures performances, les auteurs ont analysé l'influence de certains paramètres tels que l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts ainsi que le confinement optique sur le rendement.

Les paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau substrat (durée de vie, mobilité), de la qualité des contacts ohmiques, de la vitesse de recombinaison, etc. Les sources de recombinaison les plus importantes sont les recombinaisons Shockley-Read-Hall dans le substrat, les recombinaisons Auger et les recombinaisons sur la face avant de la cellule. Pour étudier l'influence des différents paramètres, Sur les caractéristiques de la cellule solaire, nous avons obtenu un V_{oc} égale à

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

0.6336 V, un courant de court-circuit de 37.82 mA/cm², un facteur de forme de 83.38%, ce qui nous donne un rendement de 19.98%. [22]

c)-Travaux de Shunsuke Ogawa et ses collaborateurs

La troisième étude est celle de Shunsuke Ogawa et al. Basée sur l'utilisation du carbure de silicium cubique hydrogéné microcristallin pour les cellules solaires en couches mince en silicium amorphe.

n-type material (P-doped)	Conductivity σ_d [S/cm]	Activation energy E_a [eV]	Band gap E_0 [eV]
a-SiC _x	4.7×10^{-8}	0.64	2.0
$\mu\text{c-Si:H}$	1.1×10^1	0.01	1.1
$\mu\text{c-3C-SiC:H}$	5.0×10^{-2}	0.03	2.2

Tableau 2.2 : Les paramètres physiques des couches actives de cellule.

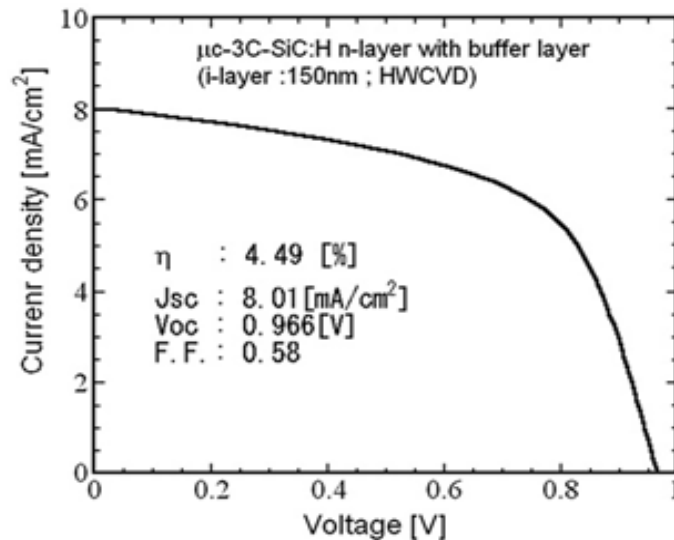


Figure 2-5 : Caractéristiques J-V de la cellule avec le film a-Si_xC_{1-x}:H non dopé comme couche tampon entre la couche de type n $\mu\text{c-3C-SiC:H/a-Si:H}$. [37]

Cette étude indique que la fabrication de cellules solaires à film mince a-Si:H et utilisant des films $\mu\text{c-3C-SiC:H}$ de type N dopés au phosphore comme couche fenêtre. La capacité de protection du TiO₂ contre la réduction du TCO pendant le dépôt des films $\mu\text{c-3C-SiC:H}$ a été clairement démontrée. Pour la première fois, la technique proposée pour le recouvrement de TiO₂ sur TCO a permis de réaliser la formation d'une hétérojonction à l'aide de films $\mu\text{c-3C-SiC:H}$. La configuration de la cellule est TCO/TiO/n-type- $\mu\text{c-3C-SiC:H/a-Si:H/p-type } \mu\text{c-SiC}_x$ intrinsèque (a-SiC_x:H incluant la phase $\mu\text{c-Si:H}$)/Al. Une efficacité de 4,5 % avec un V_{oc} de 0,953 V a été obtenue pour une irradiation lumineuse AM1.5 appliquée depuis le côté de la couche N. Également, Shunsuke Ogawa et al. ont présenté une cellule solaire préparée avec

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

le film $a\text{-SiC}_{1-x}\text{H}_x$ non dopé comme couche tampon entre l'interface N/I. Une efficacité de 4,49% avec 0.966 V pour V_{oc} a été obtenue. Ces résultats ont montré que l'utilisation de $\mu\text{c-3C-SiC:H}$ comme couche fenêtre permet d'atteindre une performance de cellule plus élevée avec une tension de circuit ouvert V_{oc} plus élevée [36].

d)-Travaux d'Y. Belhadji [37]

Dans ce travail une étude de l'effet de l'intensité de la lumière et l'effet de la température sur les paramètres en régime continu d'une cellule solaire optimisée à base de nc-3C- SiC:H. la structure de cette cellule est la suivante :



Figure 2-6 : Structure de la cellule solaire en nc-3C- SiC:H [37].

Les paramètres physiques importants liés à chaque couche rapportés dans la littérature sont présentés dans le tableau 2.3.

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

Paramètre	Couche active	Type P nc-3C-SiC :H	Non dopé a-Si : H	Type N a-Si :H	N- μ -Si
E_g : Gap d'énergie (eV)		2.2	1.8	1.8	1.2
χ : Affinity des électrons (eV)		3.51	3.9	3.9	4.5
ϵ_r : Permittivité relative		9.7	11.9	11.9	10
CB : densité effective d'état(cm^{-3})		4.0E+20	1.0E+20	1.0E+20	1.0E+19
VB : densité effective d'état(cm^{-3})		4.0E+20	1.0E+20	1.0E+20	1.0E+19
V_{th} :Vitesse thermique des électrons (cm/s)		2.0E+7	1.0E+6	1.0E+6	1.0E+7
V_{th} :Vitesse thermique des trous (cm/s)		1.5E+7	1.0E+6	1.0E+6	1.0E+7
μ_n : Mobilité des electrons(cm^2/Vs)		3.0E-1	20	20	50
μ_p :Mobilité des trous(cm^2/Vs)		3.0E-3	5.0	5.0	50
N_D : Concentration des dopants donneurs (cm^{-3})		1.0E+19	1.0E+10	1.0E+17	1.0E+18
N_A : Concentration des dopants accepteurs (cm^{-3})		10	1.0E+10	1.0E+6	10

Tableau2.3 : Les paramètres physiques des couches actives de cellule.

Au regard des nombreux travaux récents disponibles dans la littérature, le matériau SiC attire d'avantage l'attention pour l'application photovoltaïque. Dans cet article, nous avons réalisé La cellule solaire à base de carbure de silicium cubique nanocristallin hydrogéné (nc-3C-Si:H), au rendement intéressant.

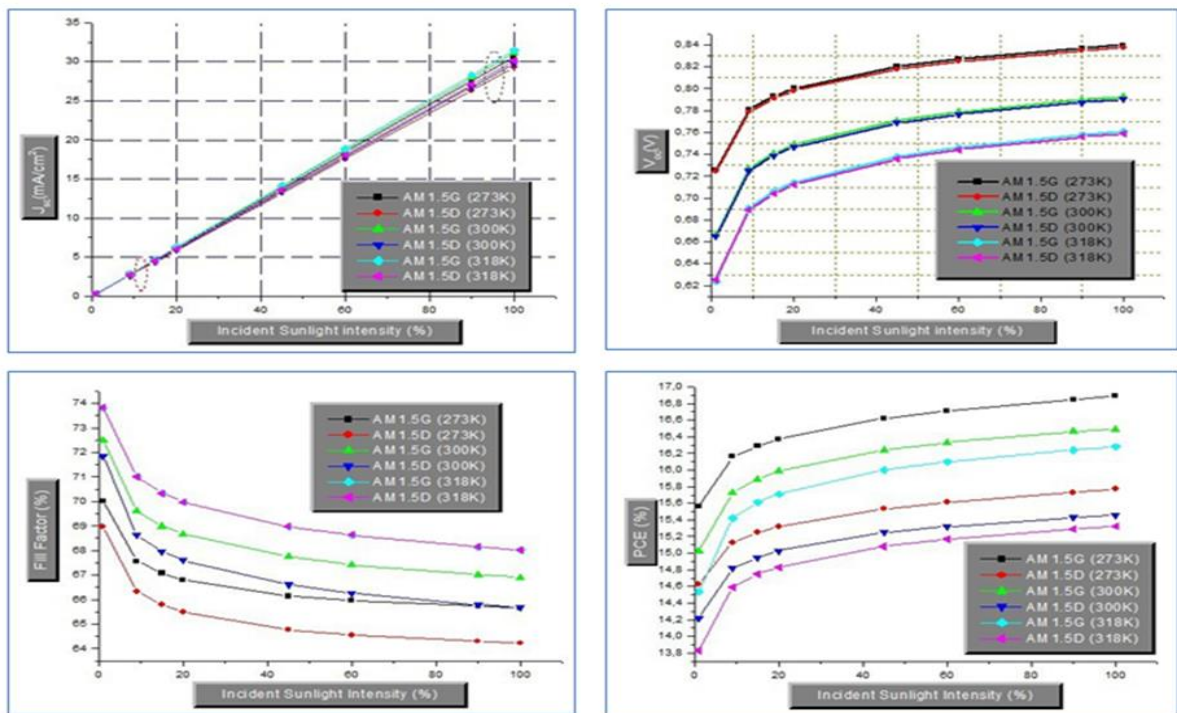


Figure 2-7 : Variation de J_{sc} , V_{oc} , PCE et FF en fonction de l'intensité de la lumière solaire incidente et de la température. [37]

Chapitre II : Revue de littérature sur les cellules solaires en SiC

Pour améliorer l'absorption de la lumière solaire et ses performances électriques, la structure de la cellule solaire peut être optimisée, en combinant de nouveaux matériaux pour former des cellules solaires multicouches. Le nc-3C-SiC:H, ayant une large bande interdite, 'excellentes propriétés optiques, électriques et structurelles lui favorisant d'être utilisé comme couche absorbante à large bande interdite. Dans ce travail l'auteur rapporte une étude théorique d'une nouvelle cellule solaire optimisée nc-3C-SiC:H/i-a-Si:H/a-Si:H/ μ c-Si en utilisant le programme unidimensionnel SCAPS. Pour la structure proposée, une efficacité de conversion de puissance (PCE) optimale de 16,89% est enregistrée sous le spectre AM1.5G à température ambiante [37]. Le tableau 2.4 donne un récapitulatif des paramètres électriques enregistrés pour chacune des 4 études discutées ci-dessus.

	J_{sc} (mA/cm²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	η (%)
Kabe Moyème	37.81	689.7	48.4	22.03
M. Toure	37.82	633	83.38	19.98
ShunsukeOgawa	8.01	966	0.58	4.49
Dr. Belhadji	30	840	70	16.89

Tableau 2.4 : Paramètres électriques de sortie des diverses études exposées.

CHAPITRE III

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

3.1. Introduction

Dans ce chapitre nous proposons d'étudier les performances électriques de trois structures de cellules solaires en carbure de silicium cubique 3C-SiC et cubique hydrogéné 3C-SiC:H. Pour cela nous avons effectué diverses analyses des effets afin d'extraire les paramètres optimaux pour chaque cellule notamment le courant de court-circuit (J_{sc}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le rendement de conversion (η), le facteur de forme (FF) ainsi que les valeurs maximales de tension (V_{MPP}) et de courant (J_{MPP}), équivalents au point de la puissance maximale. Les trois structures des cellules proposées sont présentées dans la figure 3-1. Les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel SCAPS-1D et les différents résultats obtenus avec des discussions détaillées seront évoquée dans ce qui suit.

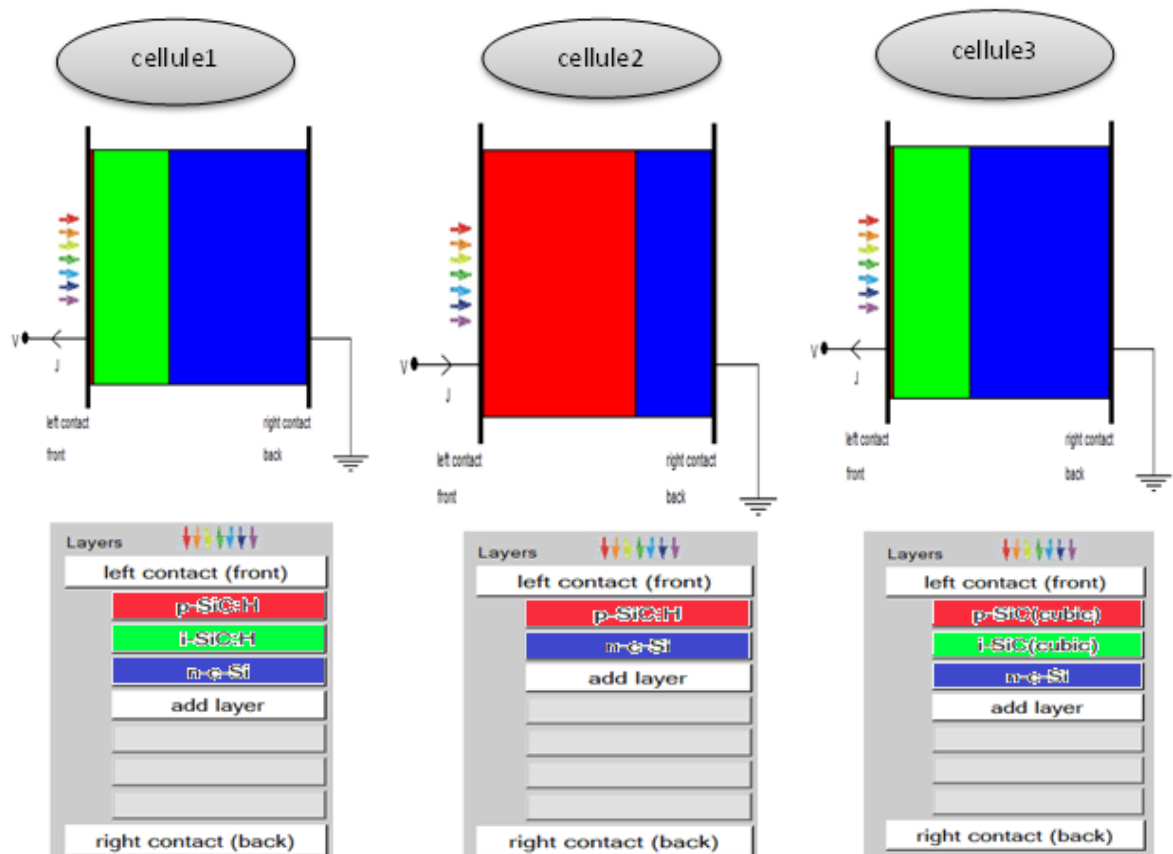


Figure 3-1 : Présentation des cellules proposées.

Dans les tableaux ci-dessous nous regroupons les différents paramètres physiques de chaque couches active pour les trois cellules étudiées.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

Paramètre	p-SiC:H	i-SiC:H	n-c-Si
Couche active			
E_g : Gap d'énergie (eV)	2.2	2.2	1.2
χ : Affinity des électrons (eV)	3.51	3.51	4.05
ε_r : Permittivité relative	9.7	9.7	10
CB : densité effective d'état (cm ⁻³)	4.0E+20	4.0E+20	1.0E+19
VB : densité effective d'état (cm ⁻³)	4.0E+20	4.0E+20	1.0E+19
V_{th} :Vitesse thermique des électrons (cm/s)	2.0E+7	2.0E+7	1.0E+7
V_{th} :Vitesse thermique des trous (cm/s)	1.5E+7	1.5E+7	1.0E+7
μ_n : Mobilité des electrons (cm ² /Vs)	3.0E-1	3.0E-1	5.0E+1
μ_p :Mobilité des trous (cm ² /Vs)	3.0E-3	3.0E-3	5.0E+1
N_D : Concentration des dopants donneurs (cm ⁻³)	1.0E+6	1.0E+6	1.0E+17
N_A : Concentration des dopants accepteurs (cm ⁻³)	1.0E+18	1.0E+6	1.0E+10

Tableau 3.1 : Les paramètres physiques des couches actives de de la première cellule.

Paramètre	p-SiC:H	n-c-Si
Couche active		
E_g : Gap d'énergie (eV)	2.2	1.2
χ : Affinity des électrons (eV)	3.50	4.05
ε_r : Permittivité relative	10	10
CB : densité effective d'état (cm ⁻³)	1.0E+20	1.0E+19
VB : densité effective d'état (cm ⁻³)	1.0E+20	1.0E+19
V_{th} :Vitesse thermique des électrons (cm/s)	1.0E+7	1.0E+7
V_{th} :Vitesse thermique des trous (cm/s)	1.0E+7	1.0E+7
μ_n : Mobilité des electrons(cm ² /Vs)	5.0E+1	5.0E+1
μ_p :Mobilité des trous(cm ² /Vs)	5.0E+1	5.0E+1
N_D : Concentration des dopants donneurs (cm ⁻³)	1.0E+6	1.0E+17
N_A : Concentration des dopants accepteurs (cm ⁻³)	1.0E+19	1.0E+10

Tableau 3.2 : Les paramètres physiques des couches actives de de la deuxième cellule.

Paramètre	p-3C-SiC	i-3C-SiC	n-c-Si
Couche active			
E_g : Gap d'énergie (eV)	2.360	2.360	1.2
χ : Affinity des électrons (eV)	3.830	3.830	4.050
ε_r : Permittivité relative	9.720	9.720	10
CB : densité effective d'état (cm ⁻³)	1.5E+19	1.5E+19	1.0E+19
VB : densité effective d'état (cm ⁻³)	1.2E+19	1.2E+19	1.0E+19
V_{th} :Vitesse thermique des électrons (cm/s)	2.0E+7	2.0E+7	1.0E+7
V_{th} :Vitesse thermique des trous (cm/s)	1.5E+7	1.5E+7	1.0E+7
μ_n : Mobilité des electrons (cm ² /Vs)	4.0E+2	4.0E+2	5.0E+1
μ_p :Mobilité des trous (cm ² /Vs)	5.0E+1	5.0E+1	5.0E+1
N_D : Concentration des dopants donneurs (cm ⁻³)	1.0E+0	1.0E+6	1.0E+17
N_A : Concentration des dopants accepteurs (cm ⁻³)	1.0E+16	1.0E+6	1.0E+10

Tableau 3.3 : Les paramètres physiques des couches actives de de la troisième cellule.

3.2. Résultats et Discussions

Dans cette section, nous présentons les résultats d'analyse et d'optimisation des performances électriques des trois cellules en carbure de silicium. Les résultats sont enregistrés sous l'effet de la variation de température, de dopage, d'épaisseur ainsi que d'autres effets.

3.2.1. Effet de température

L'effet de la température a été analysé pour des températures allant de 298k jusqu'à 498k tout en fixant les autres paramètres à savoir les épaisseurs des couches : X_p , X_n , X_i ainsi que les concentrations des dopants : N_A et N_D . Dans le tableau ci-dessous nous regroupant les résultats extraits de cette analyse où nous indiquons le meilleur rendement pour chaque cellule. Les résultats de simulation sont obtenus pour un spectre de lumière AM1_5G sun.spe (1000W/m²):

	N_A (cm ⁻³)	N_D (cm ⁻³)	X_n (nm)	X_i (nm)	X_p (nm)
Cellule1	1.0E+18	1.0E+17	400	220	10
Cellule2	1.0E+18	1.0E+17	500	0	1000
Cellule3	1.0E+16	1.0E+17	400	220	10

Tableau 3.4 : Les paramètres physiques essentiels pour les trois cellules.

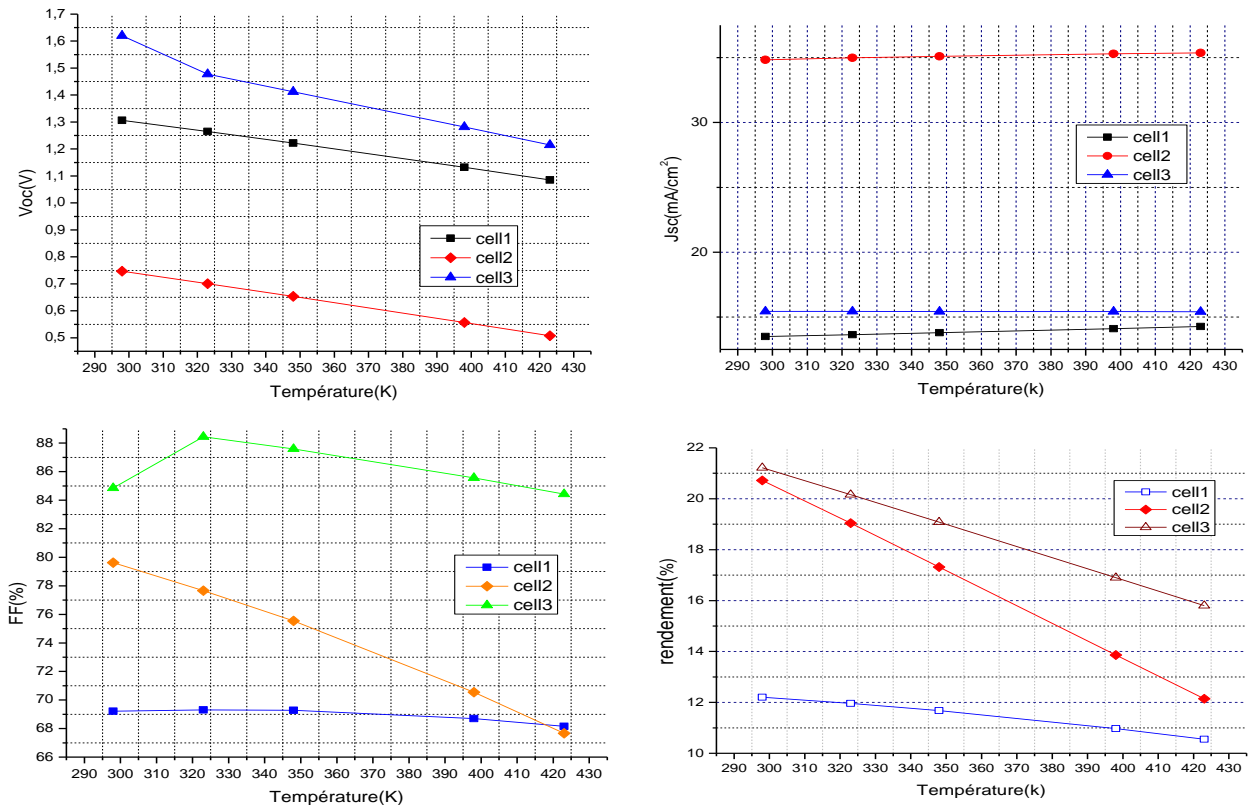


Figure 3-2 : Variation de J_{sc} , V_{oc} , FF et le rendement en fonction de température.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

D'après les résultats du tableau 3.5 et les courbes données dans la figure 3-2, nous remarquons que l'augmentation de température affecte fortement le courant de court-circuit J_{sc} , tension V_{oc} , rendement ce qui induira une diminution remarquable. Un meilleur rendement de **21.22%** est enregistré pour la 3^{ème} structure.

		Température (K)				
Paramètre	Cellule	298	323	348	398	423
V_{MPP} (V)	Cellule1	1.082	1.042	1.001	0.913	0.867
	Cellule2	0.641	0.592	0.542	0.444	0.396
	Cellule3	1.423	1.354	1.285	1.145	1.075
J_{MPP} (mA/cm ²)	Cellule1	11.281	11.477	11.667	12.001	12.174
	Cellule2	32.308	32.168	31.941	31.185	30.648
	Cellule3	14.907	14.884	14.853	14.763	14.704

Tableau 3.5 : La tension et la densité de courant maximaux : V_{MPP} et J_{MPP} sous l'effet de la température.

De plus, la densité de courant est fortement affectée par la quantité de lumière absorbée, qui est en corrélation avec l'épaisseur de la cellule solaire, puis avec l'efficacité quantique de la cellule solaire, indiquant combien de porteurs de charge minoritaires générés. Les courbes ci-dessous donnent la variation des caractéristiques J-V et celle du rendement quantique : QE sous l'effet du changement de la température.

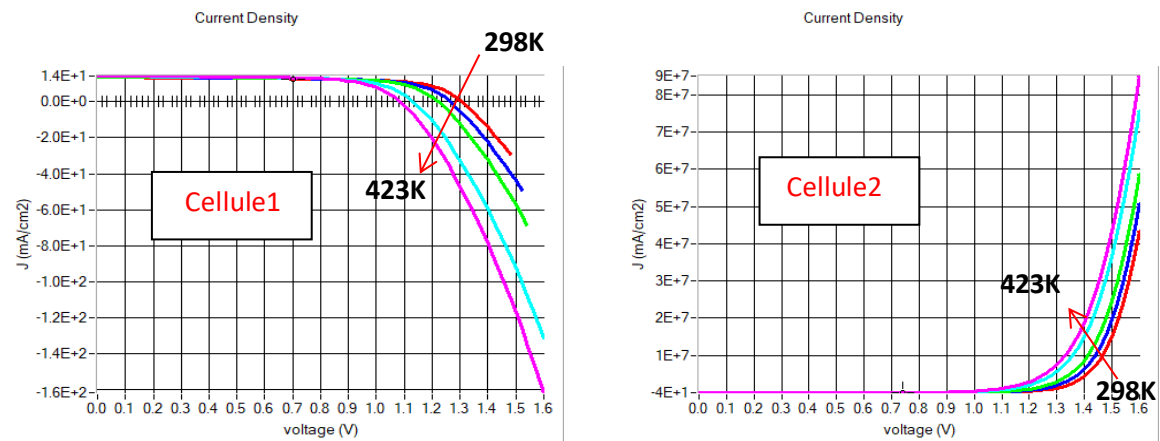


Figure 3-3-a : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de la température.

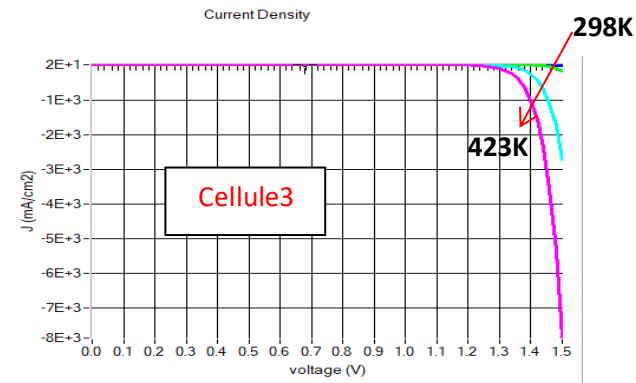


Figure 3-3-b : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de la température.

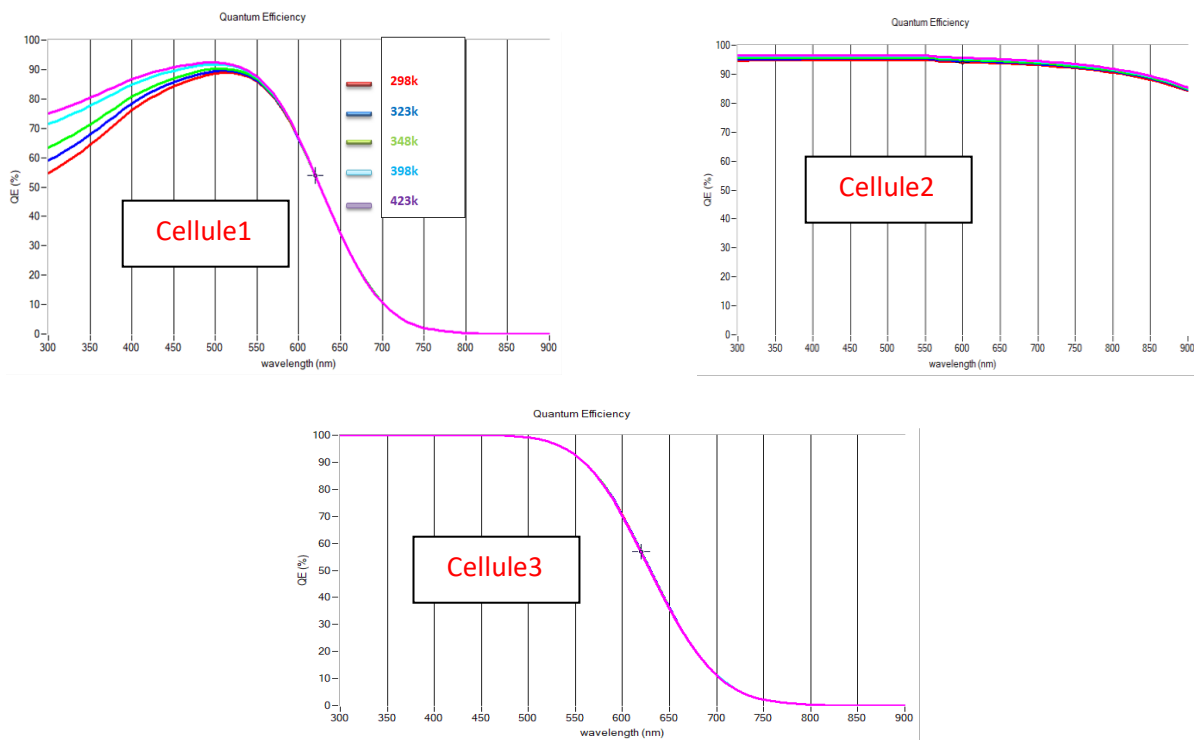


Figure 3-4 : Evolution des QE pour les trois cellules en fonction de la température.

3.2.2. Effet de la variation de l'épaisseur des couches actives

Dans cette partie nous avons étudié l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante (X_p), de la couche intrinsèque (X_i) et de la couche de base (X_n) afin d'extraire les paramètres optimaux pour chaque cellule.

a)-Effet de l'épaisseur de la couche absorbante ' X_p '

En fixant les paramètres : X_n , X_i , N_A et N_D nous avons analysé l'effet de la variation de l'épaisseur X_p de 10nm à 160nm. Le tableau regroupe les valeurs des paramètres de sortie enregistrés à la température ambiante pour différents épaisseurs X_p pour chaque cellule

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

considérée. On remarque que pour la structure 01 le rendement a été diminué en fonction de l'augmentation de l'épaisseur à l'inverse pour la troisième structure où le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur puisque l'absorption augmente. Cette augmentation à l'augmentation du nombre des paires électrons-trous photo-généré. Pour la deuxième cellule le rendement reste faiblement affecté et presque constant. Un meilleur rendement de **22.89%** est enregistré pour la cellule 03 pour une épaisseur $X_p=160\text{nm}$.

Paramètre	Cellule	Epaisseur (nm)					
		10	20	40	80	120	160
V_{MPP} (V)	Cellule1	1.079	1.082	1.083	1.082	1.080	1.079
	Cellule2	0.638	0.638	0.638	0.638	0.638	0.639
	Cellule3	1.418	1.411	1.423	1.426	1.426	1.425
J_{MPP} (mA/cm ²)	Cellule1	11.297	10.618	9.324	7.598	6.503	5.709
	Cellule2	33.700	33.699	33.706	33.711	33.732	33.757
	Cellule3	14.904	15.045	15.305	15.719	15.972	16.061

Tableau 3.6 : Les paramètres électriques de sortie des trois cellules en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante allant de : 10nm à 160nm.

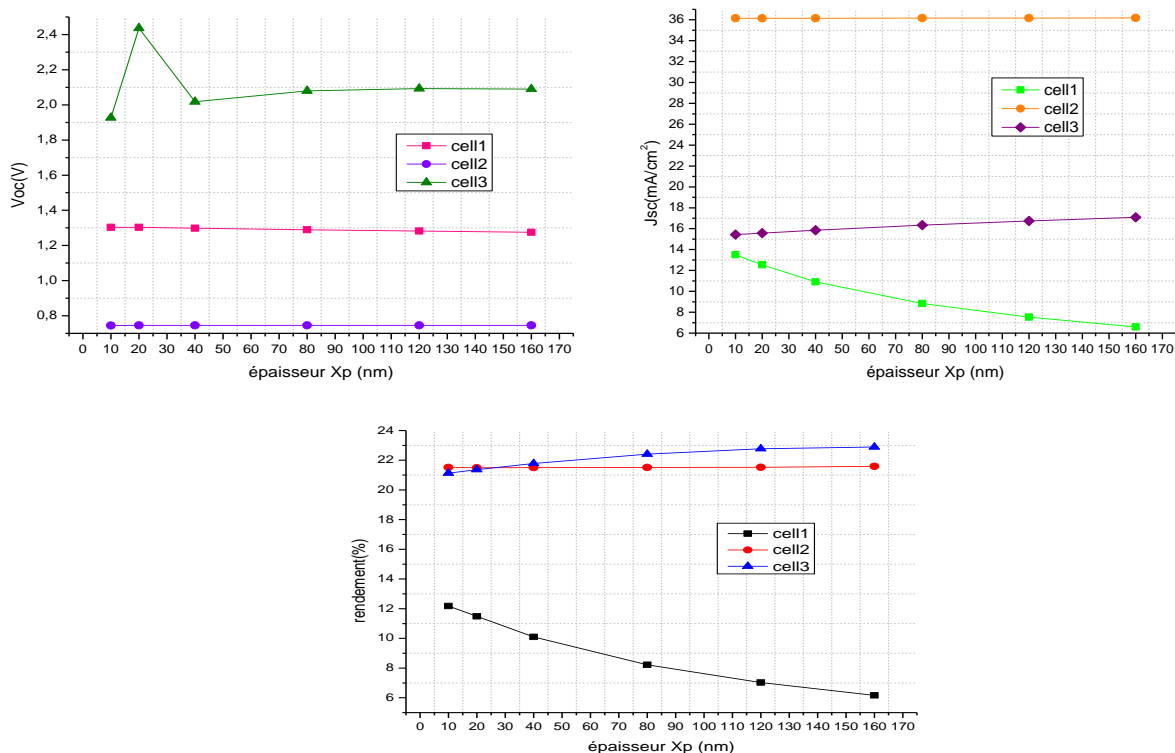


Figure 3-5 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche émetteur de 10nm a 160nm.

Aussi, l'augmentation de l'épaisseur X_p a un impact direct sur la profondeur de la zone des charges d'espace : ZCE. L'augmentation de la profondeur rend la diffusion des porteurs

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbone de Silicium

photo-générés très lente (longueur de diffusion faible) et limitera par la suite le photo-courant se diminue.

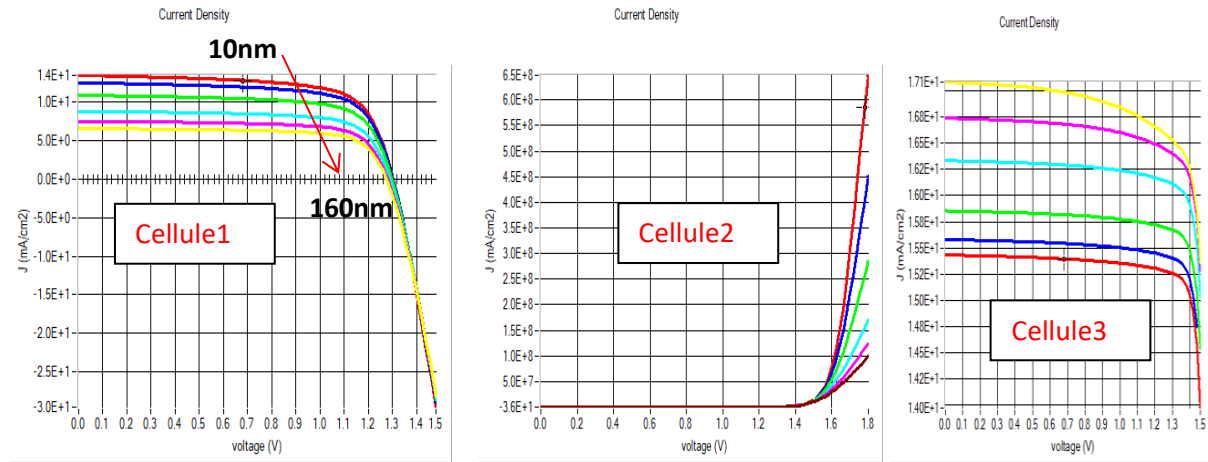


Figure 3-6 : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante.

Pour des variations plus grandes de X_p de 200nm à 1 μ m, nous avons remarqué que l'effet est remarquable. En outre, on peut affirmer que l'épaisseur a une influence négative sur les performances de la cellule. Donc une couche peu profonde est toujours préférable, quel que soit les vitesses de recombinaison en face avant. De même, diminuer au maximum les recombinaisons Auger, à cause du dopage élevé de cette couche, est toujours conseillé.

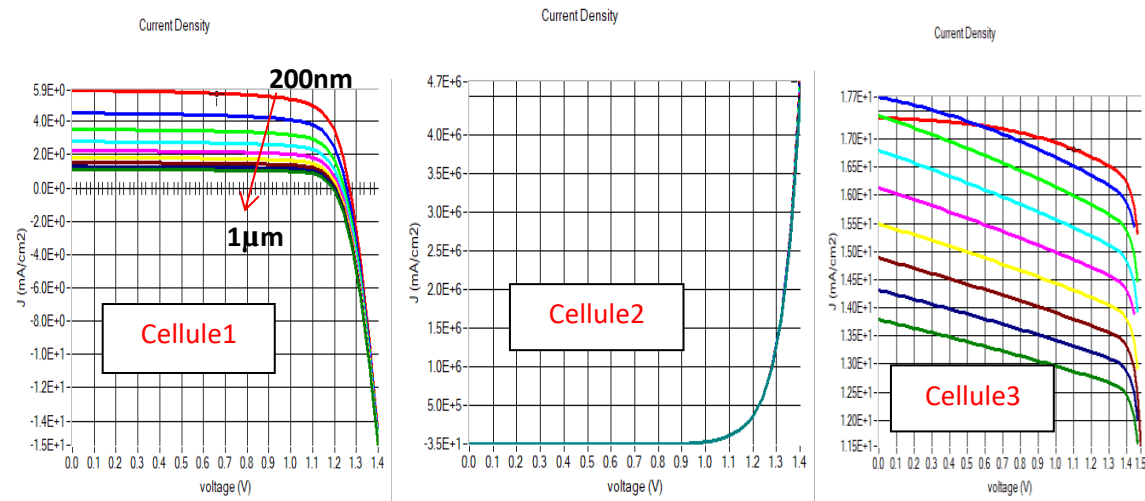


Figure 3-7 : Evolution des caractéristiques J-V des trois cellules en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante allant de 200 nm à 1 μ m.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

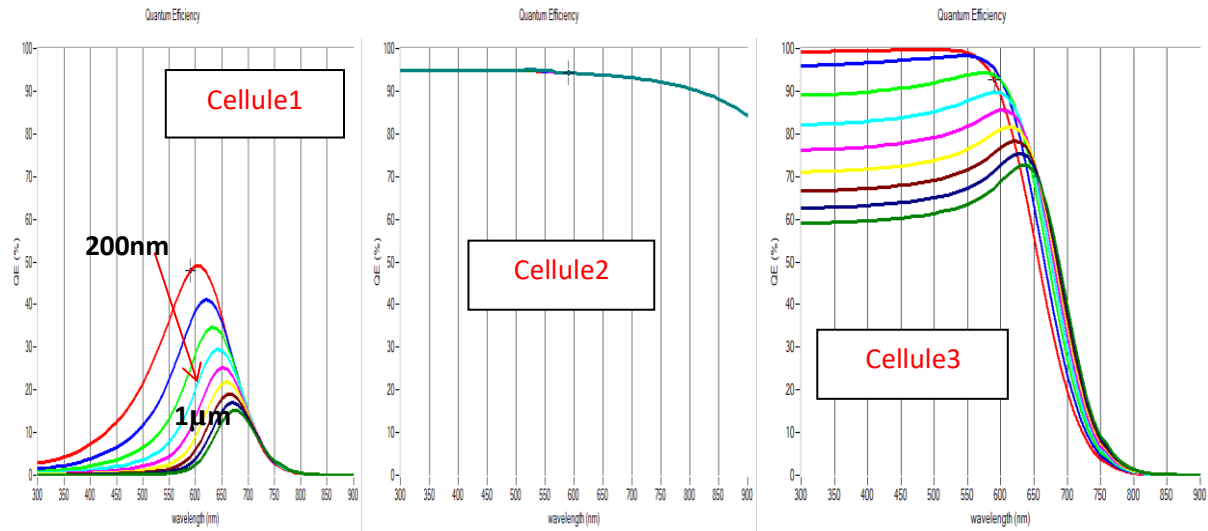


Figure 3-8 : Evolution des caractéristiques du rendement quantique des trois cellules en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante allant de 200 nm à 1 µm.

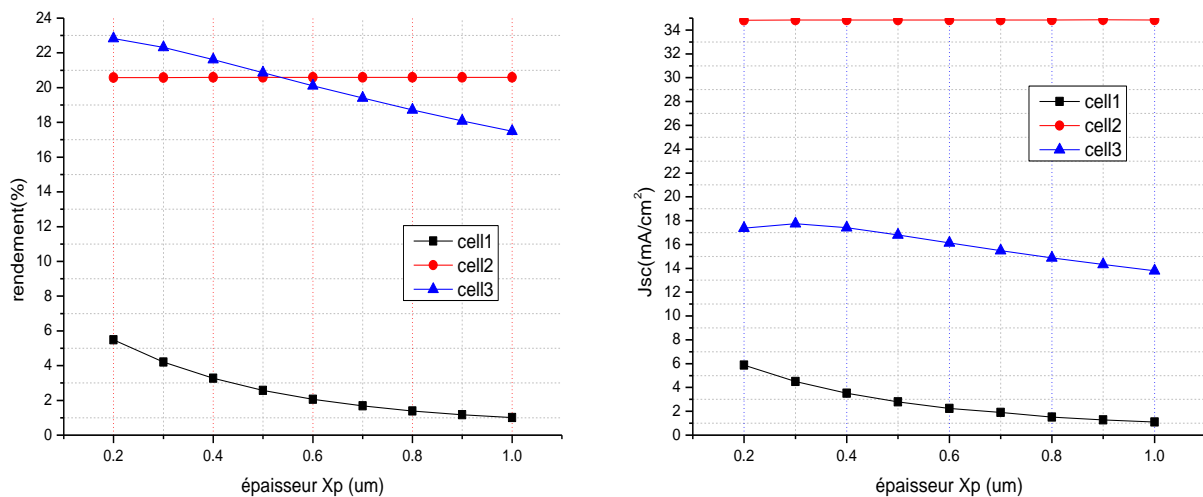


Figure 3-9 : Variation de J_{sc} ainsi que le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante allant de 200 nm à 1 µm.

b)-Effet de l'épaisseur de la couche active 'X_n'

Dans cette partie nous avons étudié l'effet de la variation de l'épaisseur X_n de 100 nm à 2 µm avec les mêmes paramètres précédents. On remarque une augmentation du rendement et du courant de court-circuit proportionnel dans la cellule 02 à l'inverse des cellules 01 et 03 ou l'augmentation de l'épaisseur reste sans effet. La tension en circuit ouvert reste inchangée pour les trois cellules.

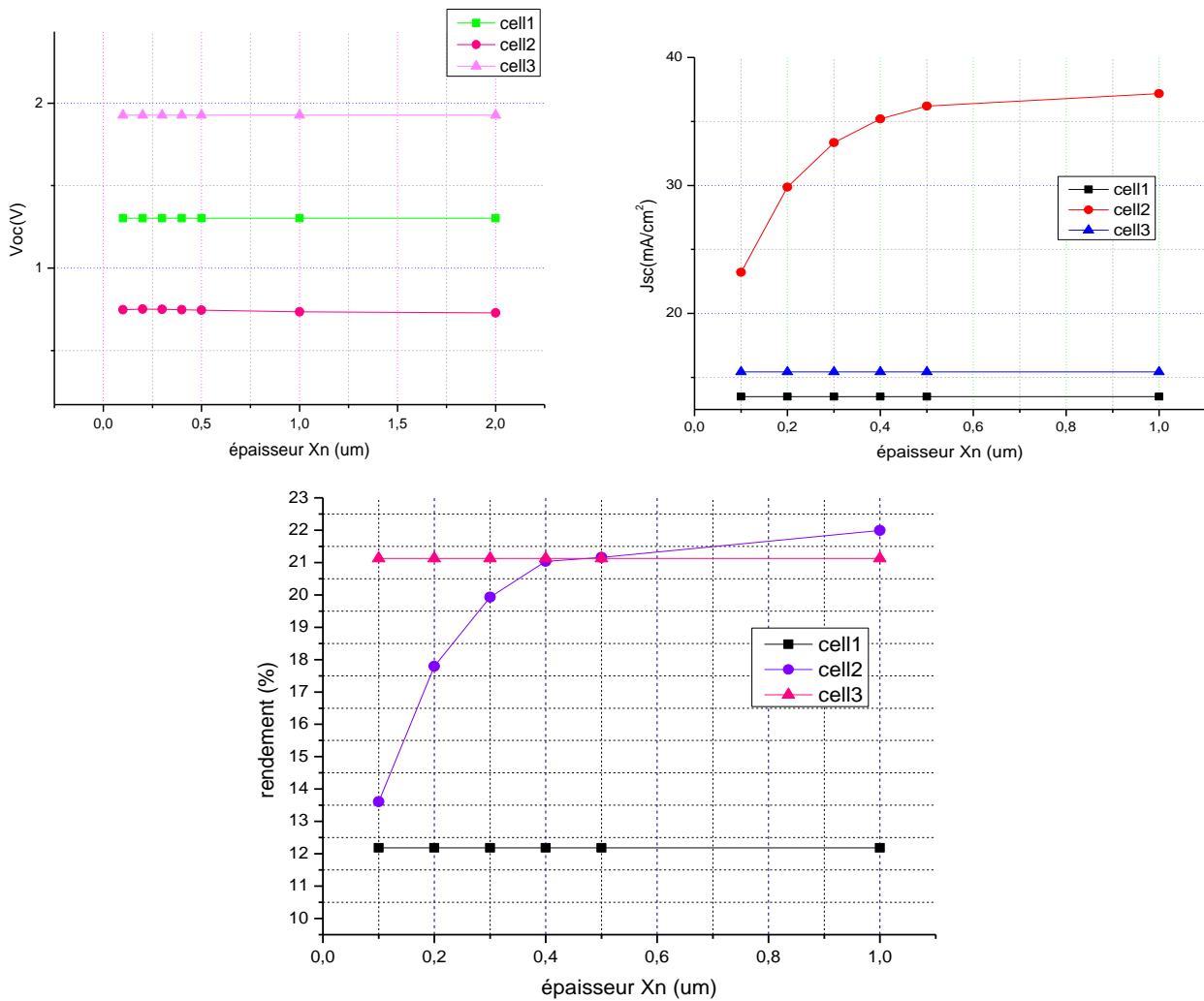


Figure 3-10 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche de base de 100nm à 2 μm .

c)-Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque ' X_i '

Les résultats de la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de sortie deux cellules sont regroupés dans le tableau 3.7. De même, et à partir du tableau le rendement de cellule 1 reste constant même si l'épaisseur diffère l'opposé de cellule 3 que le rendement augmente avec une épaisseur accrue. L'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque induira l'élargissement de la ZCE et donc l'augmentation des paires électrons-trous photo-générés.

3.2.3. Effet du dopage en atomes accepteurs ' N_A '

L'effet du dopage en accepteur c'est-à-dire dans la couche absorbante est étudié selon les paramètres précédents tout en variant de la concentration N_A de $1.0E+17$ jusqu'à $9.0E+17$

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

at/cm³. Le meilleur rendement enregistré dans ce cas est de 21.56% pour la cellule 3 et pour une concentration égale à 9.0E+17. Pour un dopage plus élevé (N_A vari de 1.0E+18 à 9.0E+18 et plus) le rendement, le courant de court-circuit ainsi que la tension en circuit ouverte atteindre leurs valeur de saturation. Dans ce cas rendement optimal a été enregistré pour cellule 2 avec une valeur de 21.61%.

Epaisseur (nm)	Cellule	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	FF(%)	η (%)	V _{MPP} (V)	J _{MPP} (mA/cm ²)
200	Cellule1	1.29	13.27	70.51	12.11	1.08	11.19
	Cellule3	1.66	15.11	82.10	20.61	1.41	14.59
210	Cellule1	1.30	13.40	69.87	12.16	1.08	11.25
	Cellule3	1.68	15.27	81.27	20.88	1.42	14.75
220	Cellule1	1.30	13.51	69.22	12.18	1.08	11.30
	Cellule3	1.93	15.43	71.06	21.13	1.42	14.90
230	Cellule1	1.31	13.61	68.57	12.20	1.08	11.34
	Cellule3	1.97	15.58	69.71	21.37	1.42	15.05
240	Cellule1	1.31	13.71	67.91	12.20	1.07	11.37
	Cellule3	2.01	15.72	68.39	21.60	1.42	15.19
250	Cellule1	1.31	13.79	67.25	12.19	1.08	11.40
	Cellule3	1.77	15.86	77.90	21.82	1.42	15.32

Tableau 3.7 : Les paramètres électriques de sortie de première et troisième cellules en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque allant de 200nm à 250nm.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

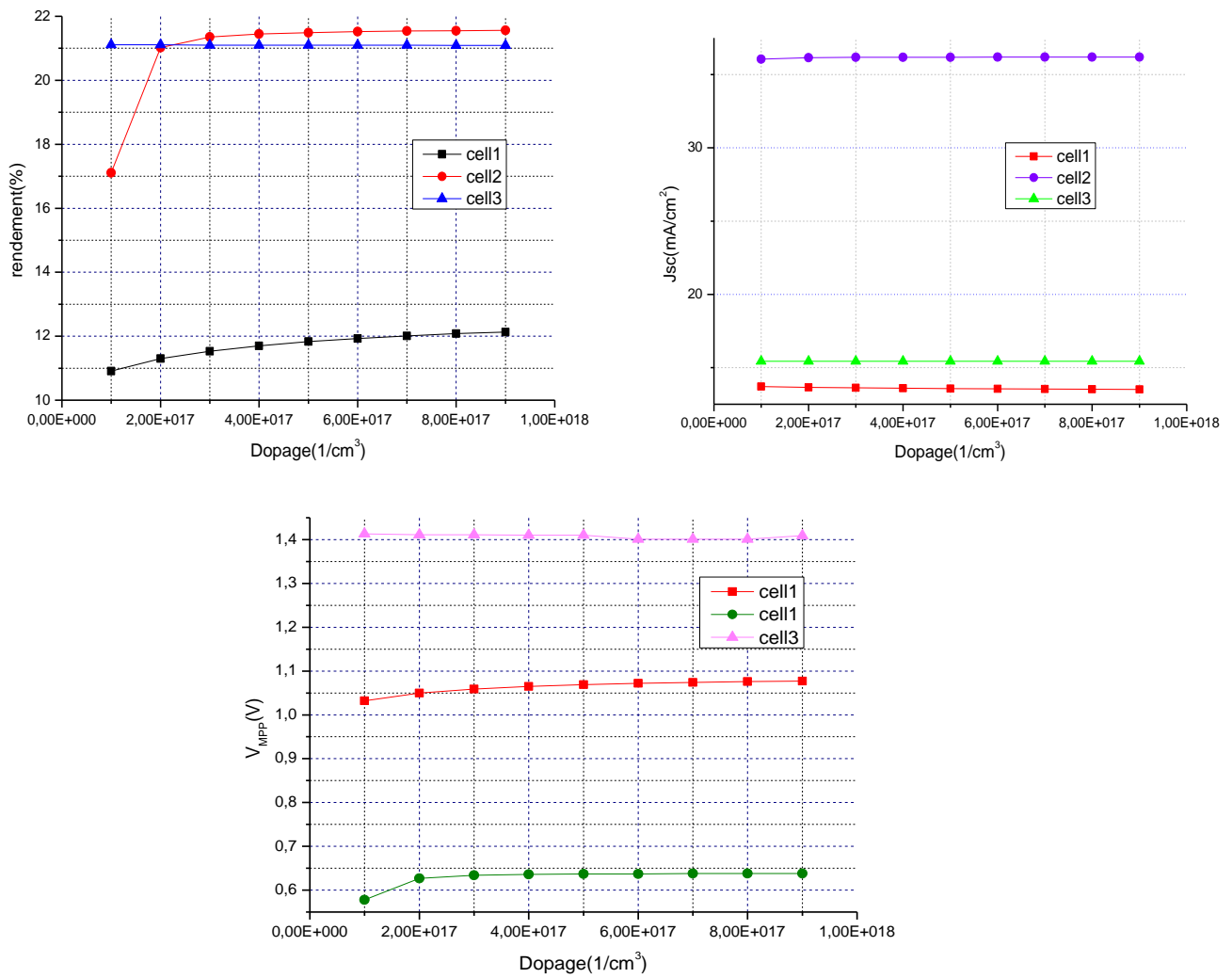


Figure 3-11 : Variation de J_{sc} , V_{MPP} et le rendement en fonction du dopage en atome accepteur N_A de $1.0E+17$ à $9.0E+17$.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

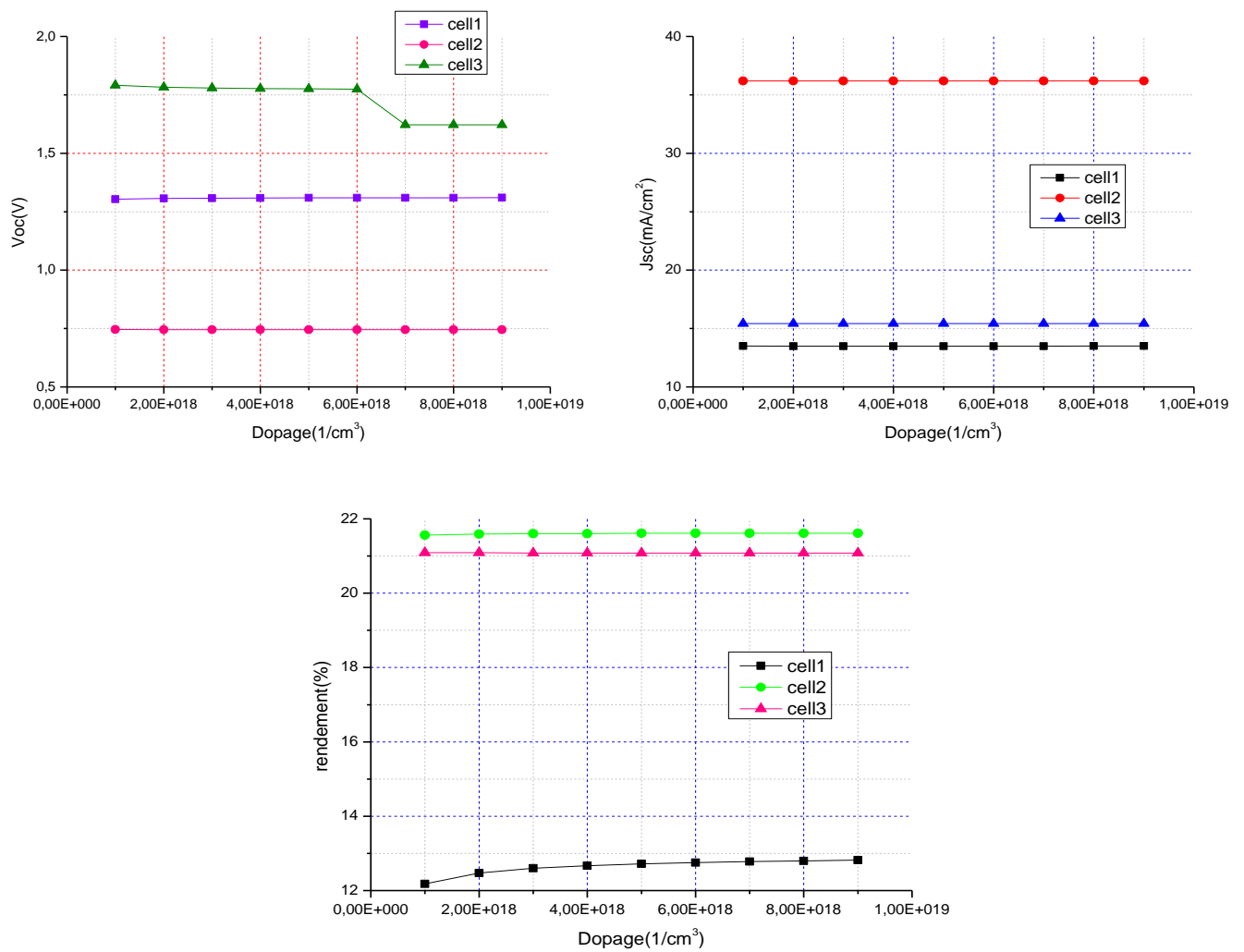


Figure 3-12 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et le rendement en fonction du dopage en atome accepteur N_A de $1.0\text{E}+18$ à $9.0\text{E}+18$.

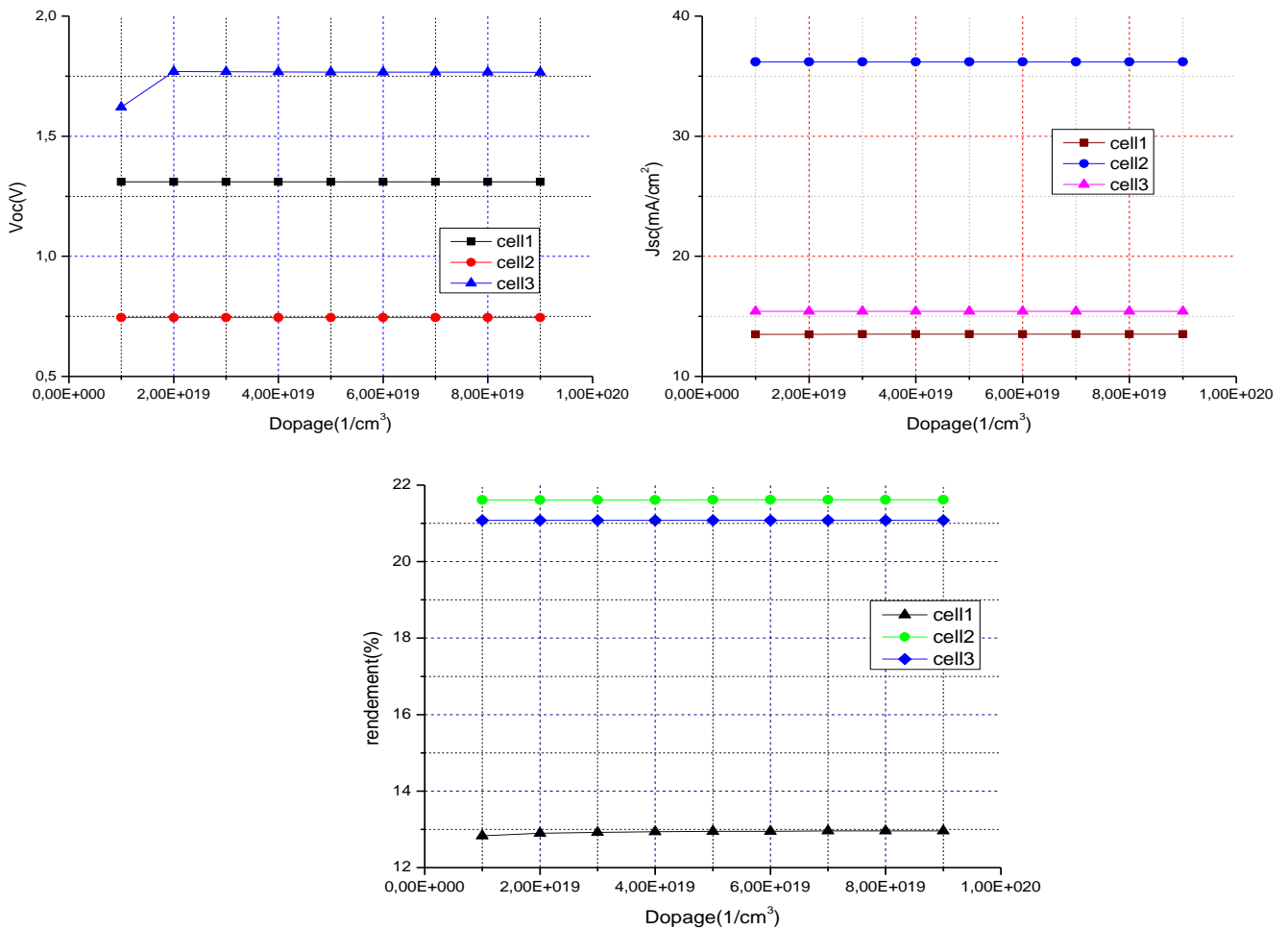


Figure 3-13 : Variation de J_{sc} , V_{oc} et le rendement en fonction du dopage en atome accepteur N_A de $1.0E+19$ à $9.0E+19$.

3.2.4. Effet de dopage en atomes donneurs ' N_D '

Dernièrement on a Effet de dopage de type donneur de la couche de base (X_n) on fixant les paramètres. D'après le tableau les figures ci-dessous le rendement pour les trois cellules augmente avec l'augmentation de dopage et un rendement de **23.47%** est enregistré pour la cellule 2. La densité de dopage joue un rôle important sur l'efficacité de la cellule. Il est bien connu que la durée de vie radioactive diminue avec l'augmentation du niveau de dopage. Par conséquent, la recombinaison radioactive devient dominante par rapport à la recombinaison non radioactive. La variation des paramètres de sortie avec les concentrations de dopage en atome donneur est illustrée sur la figure 3-14 où le rendement augmente avec l'augmentation de la concentration en porteur. Si la concentration de dopage est augmentée, la tension maximale V_{MPP} augmente également. En conséquence, le rendement est augmentée en raison de l'augmentation de de la tension.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

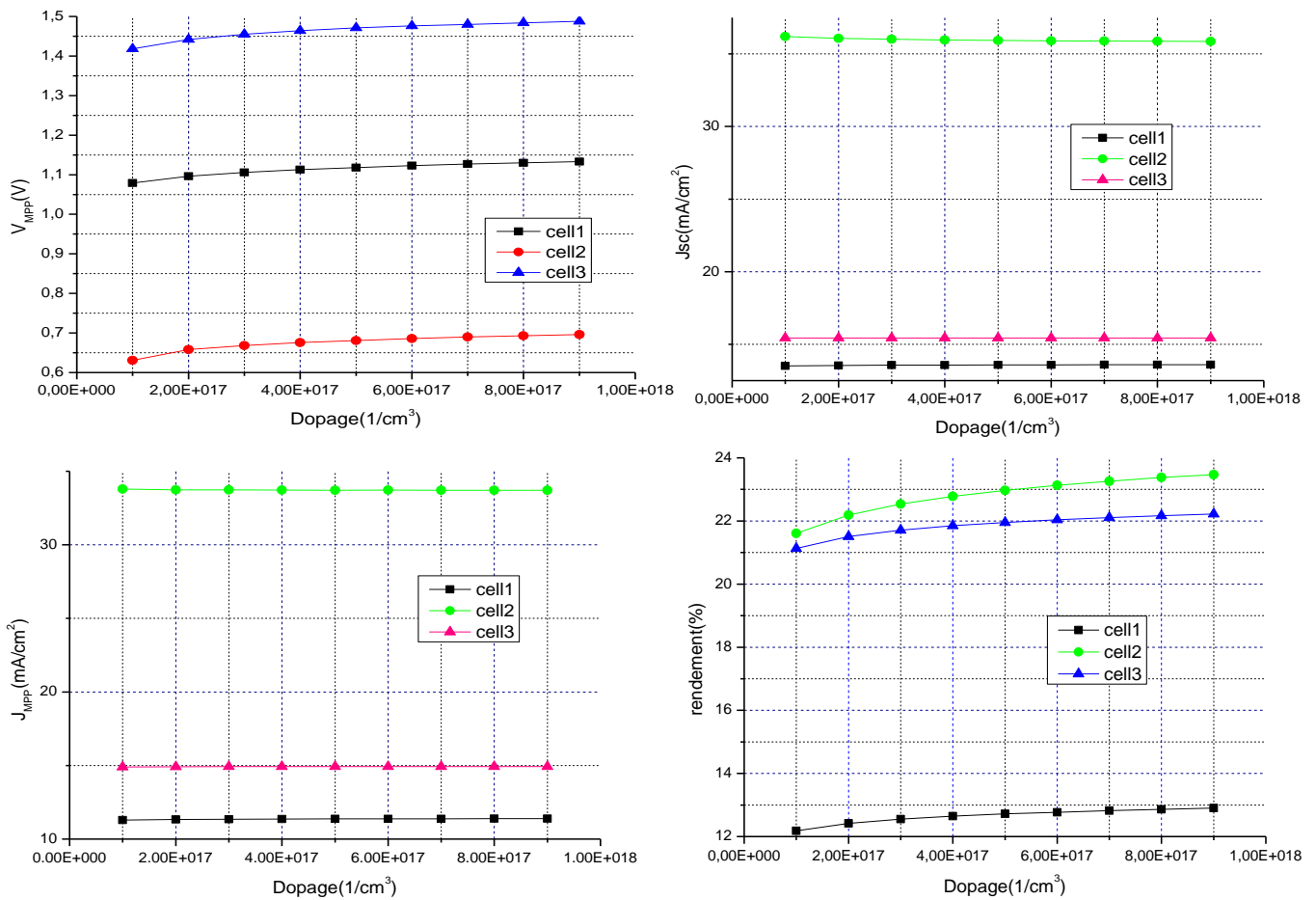


Figure 3-14 : Variation de J_{sc} , V_{MPP} , J_{MPP} et le rendement en fonction de dopage en atomes donneurs N_D de 1.0×10^{17} à 9.0×10^{17} .

Pour des dopages allant de 1.0×10^{18} à 9.0×10^{18} un rendement de **25.42%** est enregistré pour la deuxième cellule.

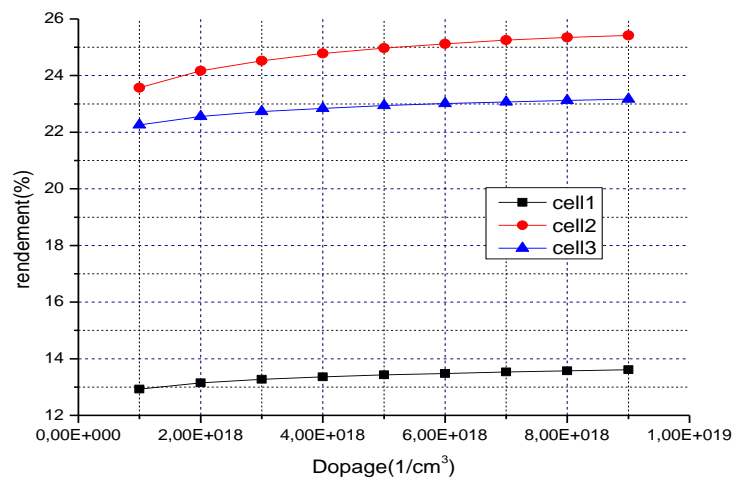


Figure 3-15 : Variation de rendement en fonction de dopage en atomes donneur N_D de 1.0×10^{18} à 9.0×10^{18} .

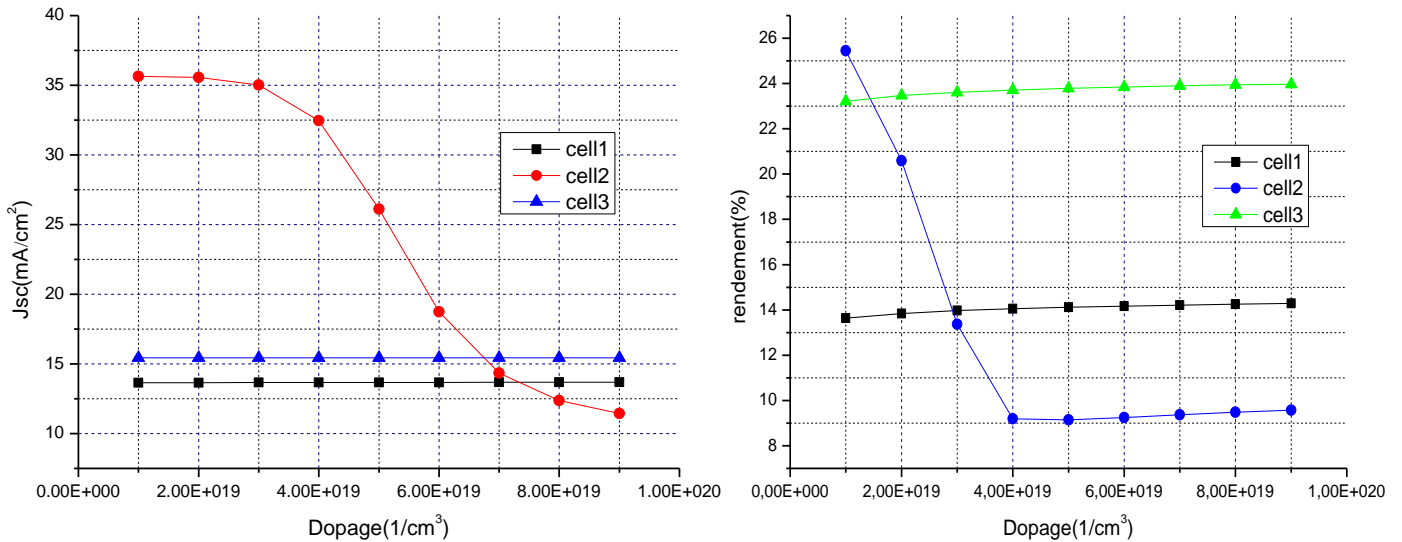


Figure 3-16 : Variation de J_{sc} et le rendement en fonction de dopage en atome donneur N_D de $1.0E+19$ à $9.0E+19$.

3.3.5 Effet de résistance en shunt (R_{sh})

Les pertes de puissance importantes causées par la présence d'une résistance shunt, sont généralement dues à des défauts de fabrication plutôt qu'à une mauvaise conception des cellules solaires. Donc la résistance shunt a un impact important sur les performances d'une cellule solaire [38]. La résistance au courant de fuite absorbe plus de courant, car le courant qui traverse le circuit de charge est considérablement réduit.

Ci-après nous présentons les résultats d'analyse de l'effet de la résistance shunt pour différentes valeurs de la résistance série sur les paramètres électriques de sortie des trois cellules.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

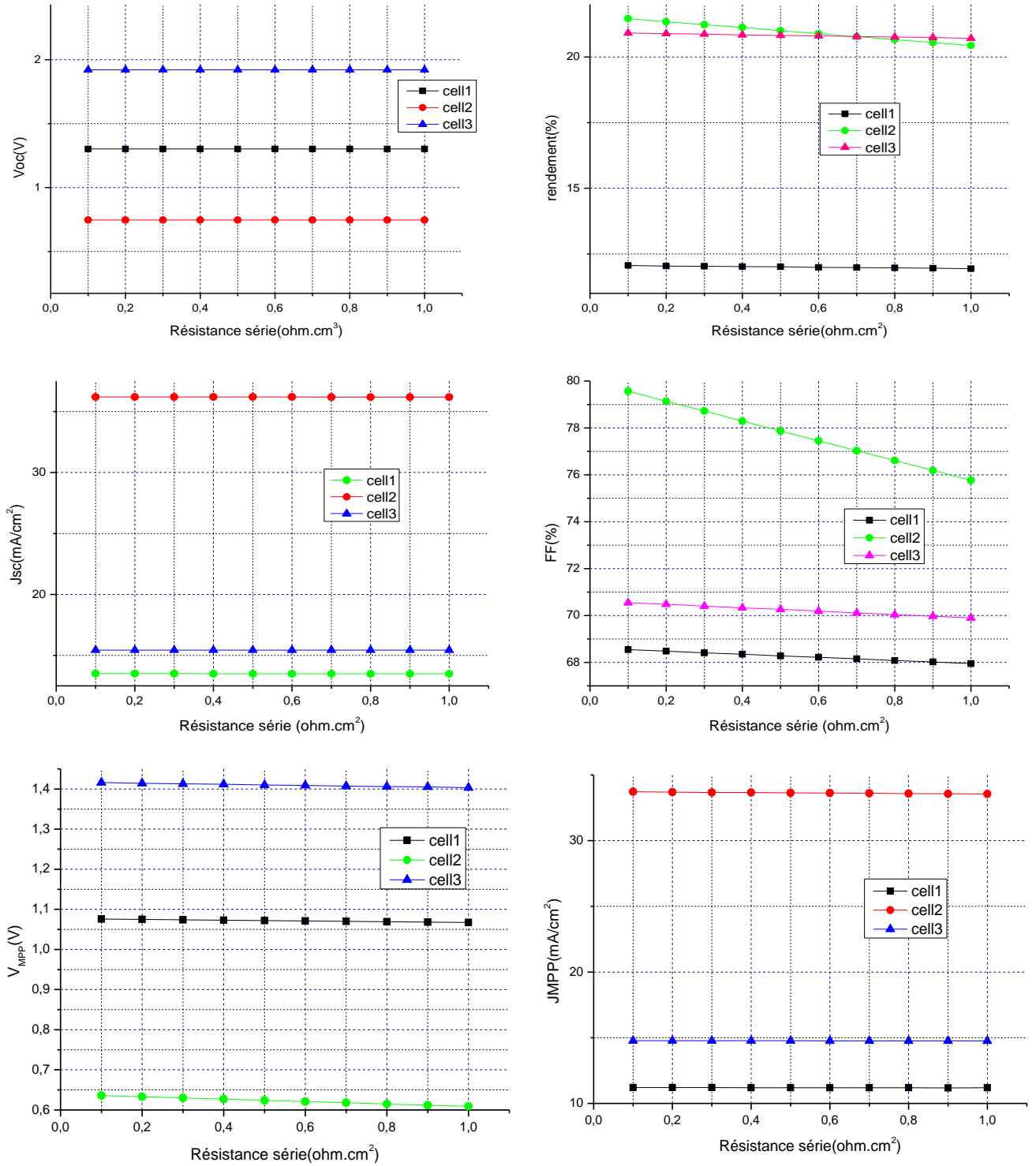


Figure 3-17 : Variation de V_{oc} , rendement, FF, V_{MPP} , J_{MPP} et J_{sc} en fonction de la résistance en série pour $R_{sh}=1.10^4 \Omega.cm^2$.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

		Résistance série ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)									
Paramètre	cellule	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
V_{MPP} (V)	Cellule1	1.071	1.076	1.075	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068
	Cellule2	0.636	0.633	0.630	0.627	0.624	0.621	0.618	0.615	0.612	0.609
	Cellule3	1.416	1.415	1.413	1.412	1.411	1.409	1.408	1.406	1.406	1.403
J_{MPP} (mA/cm^2)	Cellule1	11.297	11.264	11.261	11.251	11.257	11.256	11.254	11.252	11.250	11.248
	Cellule2	33.752	33.735	33.716	33.699	33.679	33.662	33.644	33.623	33.605	33.586
	Cellule3	14.858	14.858	14.857	14.856	14.856	14.855	14.855	14.854	14.854	14.853

Tableau 3.8 : Les paramètres électriques de sortie des trois cellules en fonction de la variation de la résistance en série pour $R_{sh}=3.10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

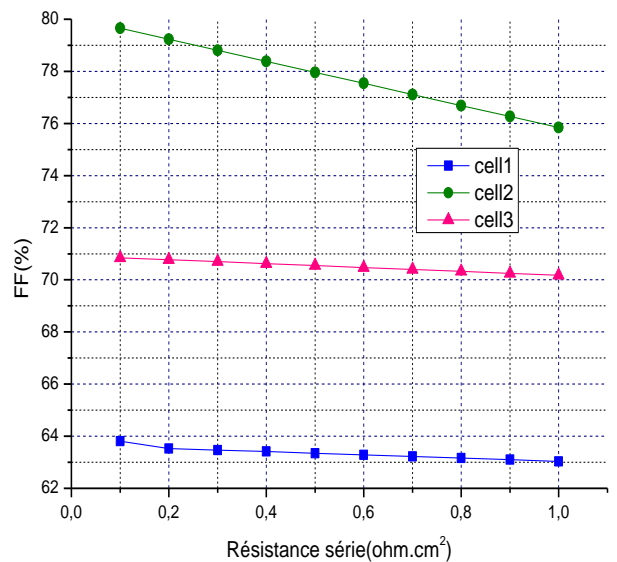
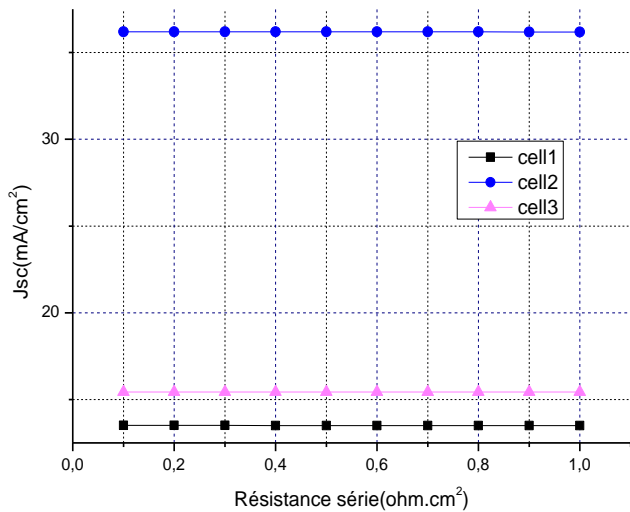
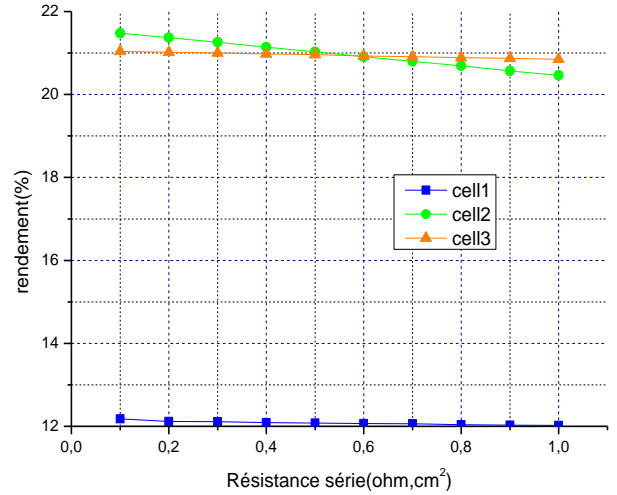
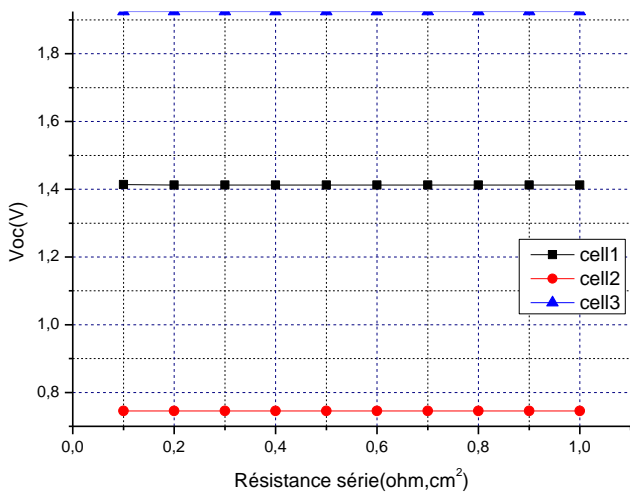


Figure 3-18 : Variation de J_{sc} , V_{oc} , FF et le rendement en fonction de résistance en série pour $R_{sh}=3.10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Chapitre III : Etude comparative de trois cellules en Carbure de Silicium

Les effets de la résistance série consistent à des niveaux d'éclairage élevés en un aplatissement de la caractéristique de sortie et une chute associée de la tension maximale du point de puissance [39]. La diminution du rendement qui en résulte doit être surmontée par une réduction de la résistance en série pour les applications de cellules solaires avec des concentrateurs optiques ou pour les missions spatiales à proximité du soleil.

Aussi, une faible R_{sh} provoque des pertes de puissance dans les cellules solaires en fournissant un chemin de courant alternatif pour le courant généré par la lumière. Une telle déviation réduit la quantité de courant circulant à travers la jonction de la cellule solaire et réduit la tension de la cellule solaire ce qui provoque une dégradation des paramètres de sortie notamment le rendement. L'effet d'une résistance shunt est particulièrement sévère à de faibles niveaux de lumière, car il y aura moins de courant généré par la lumière. La perte de ce courant vers le shunt a donc un impact plus important. De plus, à des tensions plus basses où la résistance effective de la cellule solaire est élevée, l'impact d'une résistance en parallèle serait important.

Ci-dessous nous résumons les caractéristiques électriques extraites pour les paramètres physiques optimaux (N_A , N_D , X_n , X_p , X_i et la température) obtenus suite aux différents essais de simulations.

- **Première cellule (structure p-i-n en SiC:H)**

	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	FF(%)	η (%)	V _{MPP} (V)	J _{MPP} (mA/cm ²)
X_p=10nm	1.48	13.72	74.66	15.20	1.26	12.07

Tableau 3.9 : Les paramètres de sortie optimaux de la première cellule.

- **Deuxième cellule (structure pn en SiC:H)**

	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	FF(%)	η (%)	V _{MPP} (V)	J _{MPP} (mA/cm ²)
X_p=400nm	0.86	36.09	83.33	25.88	0.76	34.22

Tableau 3.10 : Les paramètres de sortie optimaux de la deuxième cellule.

- **Troisième cellule (structure p-i-n en 3C-SiC)**

	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	FF(%)	η (%)	V _{MPP} (V)	J _{MPP} (mA/cm ²)
X_p=160nm	3.36	16.42	45.98	25.35	1.62	15.65

Tableau 3.10 : Les paramètres de sortie optimaux de la troisième cellule.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons effectué une étude théorique d'une cellule solaire à base du carbure de silicium utilisé comme couche absorbante. Cette étude a été renforcée par des simulations numériques à base du logiciel SCAPS-1D. Dans le premier chapitre du mémoire, nous avons donné une étude générale sur le carbure de silicium pour la photovoltaïque. Tout en donnant des explications du principe de fonctionnement et des différents générations des cellules solaires ainsi le les propriétés générales de SiC.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la cellule en SiC dans sa structure générale suivie par une synthèse de quelques structures déjà étudiées dans la littérature dans le but de montré l'intérêt grandissant de ce matériaux dans le domaine de la photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé les différents résultats de simulation en considérant trois structures différentes de cellules a base le carbure de silicium afin d'extraire les meilleures performances pour chacune d'elles.

- Au premier lieu, nous avons étudié l'effet de la température sur les trois cellules où le meilleur rendement égal à **21.22%** a été enregistré pour la 3^{ème} cellule.
- En deuxième lieu nous analysé l'effet de la variation de l'épaisseur des couches actives. Un rendement optimal de **22.89%** est enregistré pour la cellule 03 pour une épaisseur $X_p=160\text{nm}$.

Pour des variations plus grandes de X_p allant de **200nm à 1 μm** on a pu affirmer que l'épaisseur a une influence négative sur les performances des cellules. Donc une couche peu profonde est toujours préférable, quel que soit les vitesses de recombinaison en face avant.

- Dans le cas de la variation de l'épaisseur de la couche active ' X_n ', leur augmentation a provoqué a une accroissement proportionnelle du rendement et du courant de court-circuit pour la cellule 02 à l'inverse des cellules 01 et 03 ou l'augmentation de l'épaisseur reste sans effet
- Pour l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque : X_i , le rendement de cellule 01 reste inaffecté à l'opposé de la cellule 3 où le rendement a été amélioré avec une épaisseur x_i accrue.
- Egalement nous avons analysé l'effet du dopage en atomes accepteurs N_A et donneur N_D sur les paramètres de sortie des trois cellules. L'augmentation du dopage entraine

Conclusion générale

une amélioration des paramètres de sortie notamment le rendement. Dans le cas de la variation de la concentration N_A un rendement de **21.61%** a été enregistré pour cellule 2. Pour des concentrations N_D allant de **1.0E+18 à 9.0E+18 cm⁻³** le rendement optimal de **25.42%** est obtenu pour la deuxième cellule

- Pareillement, l'effet des résistances parasites en shunt (R_{sh}) et en série (R_s) a été considéré. l'effet de la résistance shunt été particulièrement sévère à de faibles niveaux de lumière, car il y aura moins de courant photo-généré.

D'après les simulations effectuées et les résultats obtenus dans cette étude, le rendement de la troisième cellule a été bien amélioré en présence de la couche intrinsèque en comparaison à la première cellule. Les caractéristiques électriques extraites pour les paramètres physiques optimaux (N_A , N_D , X_n , X_p , X_i et la température) obtenus suite aux différents essais de simulations sont les suivants:

- Rendement **25.35%**
- Tension de court-circuit **$V_{co}=3.36$ (V)**
- Densité de courant de court-circuit **$J_{cc}=16.42$ (mA/cm²)**
- Facteur de forme **FF=45.98%**.

Finalement suite aux différents résultats enregistrés, la deuxième cellule à structure PN offre le bon rendement de **25.88%** par rapport au deux autre cellule à structure PIN.

Références bibliographiques

- [1] Youssouf Boye «Réalisation de cellules solaires intégrées par oxydation localisée d'un substrat de silicium fritté poreux » Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2016.
- [2] Baptiste Berenguier « Mesures des propriétés opto-électriques du carbure de silicium par déphasage micro-onde et sensibilité spectrale » Thèse de doctorat, université AIX marseille, 2015.
- [3] Anne Labouret, Pascal, Jean-Paul et Benjamin « Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque 5e édition » page 38.
- [4] Salah eddine Bensalem «Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2018.
- [5] B.S.Richards, A.Lambertz, R.P.Corkish, C.A.Zorman, M.Mehregany, M. Ionescu, M.A.Green, "3C-SiC as a future photovoltaic material", In: Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Arisumi Printing Inc. Osaka,Japan,vol.3,2003,pp.2738–2741.
- [6] A. Luque, A. Martí, Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels, Phys. Rev. Lett. 78(1997) 5014–5017.
- [7] A. Martí ,E. Antolín, P. García Linares, I et al., Six not-so-easypiecesinintermediatebandsolarcellresearch,J. PhotonicsEnergy3(2013)031299.
- [8] H. Kuwabara, S. Yamada, S. Tsunekawa, Radiative recombination in β -SiC doped with boron, J.Lumin.12/13 (1976)531.
- [9] Mahdjoub Saadia « Elaboration et Etude des Couches Minces du Carbure de Silicium » mémoire magister, Université Mentouri Constantine, 2017.
- [10] Madyan Amer « Carbure de silicium 4H et 3C : microstructures de déformation dans le domaine fragile », Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [11] Youcef Belhadji « Analyse et modélisation des mécanismes de transport électronique dans les dispositifs à effet de champ à l'aide des techniques Monte Carlo : Application au MESFET à base de carbure de silicium, GaSb, et ternaires », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [12] J. A. Lely, " Darstellung von Einkristallen von Silizium Karbid und Beherrschung von Art und Menge der Eingebauten Verunreinigungen" , Ber, Deur, Keram, Ges, Vol. 32, pp. 229-236, (1955).
- [13] R. A. Stein et P. Lanig, "Influence of surface-energy on the growth of 6H-SiC and 4H-SiC polytypes by sublimation", Materials Science and Engineering B, Vol.11(1-4):pp. 69–71, (1992).

- [14] D. L. Barrett, J. P. McHugh, H. M. Hobgood, R. H. Hopkins, P. G. McMullin, et R. C. Clarke, "Growth of large SiC single crystals", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 128(1), pp. 358, (1993).
- [15] B. J. M. Wijensundara et R. G. Azevedo, "Silicon carbide microsystems for harsh environments", Springer, (2011).
- [16] Round, Henry J. "A note on carborundum". *Electrical World*. 49 (6): 309, (1907).
- [17] El Gmimi Youssef, « Etude et caractérisations par cathodo-luminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque » Thèse de doctorat, Université de Lorraine & Sidi Mohamed Ben Abdellah–Fes, (2013).
- [18] Maati Hocine, Bahlouli Kamle, Etude des performances d'une cellule photovoltaïques à base d'InGaN, mémoire de master, Université de Saida, (2018).
- [19] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod, page 97, (2009).
- [20] pedagotech.inp-toulouse.fr/200922/co/3III1-conservation.html.
- [21] Kabe Moyème et al , « Simulations de cellules solaires à hétérojonction et en tandem à base de carbure de silicium 3C » *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2402-2415, (2020).
- [22] Toure M, Berenguier B, Kobor D, Ottaviani L, Pasquinelli M. *AJAST*, 12, (2018), 532-537.
- [23] Miyajima S, Irikawa J, Yamada A, Konagai M. *J. Appl. Phys.*,109, 2011, 054507.
- [24] Toure M, Berenguier B, Ottaviani L, Pasquinelli M, Palais O et al. *MRS Online Proc Libr Arch*. doi2014,1693, : 10.23647/Ca.md20193103.
- [25] Richards B S, Lambertz A, Corkish R P, Zorman C A, Mehregany M et al. 3C-SiC as a future photovoltaic material, in *Proc. of 3rd World Conf. on photovoltaic energy conversion 3C*, 2738-27412003.
- [26] Sun J., Jokubavicius V., Gao L., Booker I., Jansson M. et al. Solar driven energy conversion applications based on 3C-SiC, *materials science forum*, 1028-1031.858, 2016.
- [27] Glunz S W, Janz S, Hofmann M, Roth T, Willeke G. in *Proc. of IEE 4th WCPEC*, 1016- 10192006,, doi : 10.1109/WCPEC.2006.279291.
- [28] Janz S, Reber S, Glunz S W. Amorphous SiC : applications for silicon solar cells 21st *European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 660-6632006.
- [29] de Oliveira M L, Camargo S S, Freire F L. *J. Appl. Phys.* (713), (1992),1531-1533,
- [30] Bullo J,Schmidt MP., *Phys.Stat.Sol B*,143,(1987),345.
- [31] Heidt A, Chen T, Carius R, Finger F, Rau U. *Jde Phy : Conference Series* doi326,(2011),012019,
- [32] Tawada Y., Kondo M., *Solar Energy Materials*, 6, (1982), 299-315.

- [33] Ming H. K., Shen C H, P. C. Yu, W. H. Huang, Y. L. Chueh, J. M. Shieh, Sci Reports 7,(2017),12706.
- [34] Tehrani F S., Transformation de films minces de SiC amorphes en films minces nanocristallins préparés par la technique HWCVD sans dilution d'hydrogène Bull, Mater. Sci, 38(5), 1333-13382015.
- [35] Lai L H, Huang K F, Hsieh W S, Lai L W. Cellule solaire en cascade avec cellule solaire à base de silicium amorphe, US20080135083, 2008.
- [36] Shunsuke Ogawa , Masaaki Okabea, Yuusuke Ikedaa, Takashi Itohb, Norimitsu Yoshidaa,c , Shuichi Nonomura a,c « Applications du carbure de silicium cubique hydrogéné microcristallin pour les cellules solaires à couche mince en silicium amorphe », Thin Solid Films (5162008) 740- 742.
- [37] Belhadji Y. Light intensity and temperature effect on the dc parameters of optimized nc-3c-sic:h based solar cell. J. Fundam. Appl. Sci., 2022, 14(1), 107-115.
- [38] A. D. Dhass, E. Natarajan and L. Ponnusamy, "Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell," 2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM), 2012, pp. 382-386.
- [39] Martin Wolf, Hans Rauschenbach, Series resistance effects on solar cell measurements, Advanced Energy Conversion, Volume 3, Issue 2, 1963, pp. 455-479.

ملخص

إن الغرض من الخلية الكهروضوئية هو تحويل تدفق الضوء الساقط إلى طاقة كهربائية. تحدث عملية التحويل في طبقات أشباه الموصلات التي تشكل الخلية الشمسية. أيضًا ، تعتمد كفاءة هذه الأخيرة بشدة على كمية الفوتونات الممتصة. لذلك من أجل توسيع الطيف الممتص، يعد استخدام مواد أشباه الموصلات ذات فجوة الطاقة أحد أكثر الحلول تطلبًا. في هذا العمل ، نقترح دراسة نظرية لخلية شمسية تعتمد على كربيد السيليكون حيث يتم استخدام الأخير كطبقة ماصة. من خلال المحاكاة الرقمية نقترح استخراج الأداء الكهربائي للخلية.

الكلمات المفتاحية: كربيد السيليكون ، SCAPS-1D ، الطبقة الماصة ، خلية SiC

Résumé

Le but de la cellule photovoltaïque est de convertir le flux lumineux incident en énergie électrique. Le processus de conversion se produit au niveau des couches semi-conductrices formant la cellule solaire. Aussi, le rendement de cette dernière dépend fortement de la quantité de photons absorbés. Donc afin d'élargir le spectre absorbé, l'utilisation de matériaux semiconducteurs à large bande interdite est l'une des solutions les plus sollicitées. Dans ce travail, nous proposons une étude théorique d'une cellule solaire à base du carbure de silicium où ce dernier est utilisé comme couche absorbante. A travers des simulations numériques nous proposons d'extraire les performances électriques de la cellule.

Mots clés : le carbure de silicium, SCAPS-1D, couche absorbante, cellule SiC.

Abstract

The purpose of the photovoltaic cell is to convert the incident light flux into electrical energy. The conversion process occurs at the semiconductor layers forming the solar cell. Also, the efficiency of the latter strongly depends on the quantity of photons absorbed. So in order to broaden the absorbed spectrum, the use of wide band gap semiconductor materials is one of the most demanding solutions. In this work, we propose a theoretical study of a solar cell based on silicon carbide where the latter is used as an absorbent layer. Through numerical simulations we propose to extract the electrical performance of the cell.

Keywords: silicon carbide, SCAPS-1D, absorber layer, SiC cell.