

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Électrotechnique

Option : Énergie Renouvelable en Électrotechnique

Intitulé :

ÉTUDE THÉORIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE FABRIQUÉE DE MATÉRIAUX À BASE D'ARSÉNIQUE

Présenté par :

MORSO Aymen Abdelghafour

KERZAZI Ahmed

MORSO Abdelhakim

Soutenu le : ...21/06/2023..... devant le Jury :

M. Brahimi Mohamed	MCA	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BADAoui Abdelhamid	MCA	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. Amara Zeyneb	MCB	Centre Universitaire Naâma	Examinatrice

Naâma – Algérie - 2023

REMERCIEMENTS

*Nous tenons d'abord à remercier fortement
notre DIEU puissant qui nous a donné le
courage et la force pour mener à bout ce
modeste travail.*

*Je remercie du fond du coeur mon encadreur monsieur le
Professeur
badaoui abdelhamid*

*pour son assistance, son encouragement et surtout sa patience
durant la
réalisation de ce travail ; ainsi qu'à monsieur brahimi
mohammed et Amara Zayneb
qui ont accepté de le juger.*

*Nous remercions également tous Les enseignants et les
responsables*

*De département D'électrotechnique ,
Par la même occasion, nous remercions
vivement tous les étudiants, les amis sans
exception, et tous ceux qui nous ont aidées de
prés ou de loin à réaliser ce travail.*

Dédicace

*Je dédie ce travail A ma famille qui a fait de moi la personne
que je suis aujourd'hui Particulièrement ,*

*A ma mère qui a abandonné son succès pour le nôtre A mon père
qui a cru en moi A la source de mon bonheur mes sœurs,*

mes frères et A la source d'amour dans notre famille,

*ma grand-mère ma tante qui se réjouit de mon bonheur A tous
mes amies et mes collègues*

Et tous ceux qui m'aiment

Sommaire

I.1.	Introduction.....	12
I.2.	Définition d'énergie solaire.....	12
I.3.	Historique sur l'énergie solaire photovoltaïque	12
I.4.	Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV	14
I.5.	Variation de l'énergie solaire	15
I.6.	Le rayonnement solaire.....	15
I.7.	L'énergie solaire photovoltaïque.....	15
I.8.	Cellule solaire photovoltaïque.....	16
I.9	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	16
I.9.1	Caractéristique courant – tension (I-V).....	16
a.	Courant de court-circuit, I_{cc}	17
b.	Tension de circuit-ouvert, V_{co}	18
c.	Puissance maximale P_m :	18
d.	Facteur de forme FF :	18
e.	Le rendement η :	19
f.	Rendement quantique de la cellule QE.....	Error! Bookmark not defined.
I.10	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	19
II.	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
	Définition	9
II.1	La cellule photovoltaïque :	10
II.2.	Comportement de la jonction PN utilisée comme capteur PV :	11
II.3.	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	12
II.4.	Générateur photovoltaïque (GPV) :	14
II-4-1	La constitution d'un module photovoltaïque	14
II.5	Les problématiques photovoltaïques :	15
II.6	Rôle de la cellule photovoltaïque	16
II.7	Avantages de la technologie photovoltaïque	16
II.8	L'avenir des cellules photovoltaïques	16
II.9	Les avancées technologiques dans les cellules photovoltaïques	17

II.10 Technologie des cellules photovoltaïques	17
II.11 Principe de l'effet photovoltaïque	Error! Bookmark not defined.
III.1 Le Logiciel utilisé (SCAPS)	20
III.1.1 Notions de base	21
III.1.2 Lancer SCAPS.....	22
III.2 Les matériaux utilisés	23
III.3 Résultats et Discussion	24
III.3.1 Structures de bandes :	25
III.3.2 Propriétés optiques :	27
III.3.3 Architecture des cellules simulées.....	28
III.3.4 Paramètres des cellules simulées.....	29
III.3.5 Cellules de référence	30

Liste des figures :

Figure I 1 Image du soleil	12
Figure I 2 Rayonnement en fonction de la météo	15
Figure I 3 Synoptique d'une cellule solaire	16
Figure I 4 Caractéristique courant - tension (I-V)	17
Figure I 5 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	19
Figure II.1 Cellule solaire photovoltaïque	9
Figure II.2 Structure basique d'une cellule solaire.	10
Figure II.3 Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).	11
Figure II.4 schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	12
Figure II.5 Ruban métallique d'une cellule.	14
Figure II.6 Encapsulation des cellules.	14
Figure III 1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	21
Figure III 2: Panneau de définition d'une cellule solaire.	22
Figure III 3 : Structure cristalline zinc-blende de BAs et GaAs	24
Figure III 4 : Structure de bandes du Silicium calculée par la méthode mBJ	25
Figure III 5 : Structure de bandes du GaAs calculée par la méthode mBJ	25
Figure III 6 : Structure de bandes du BAs calculée par la méthode mBJ.	26
Figure III 7: Spectres d'Absorption de Si, GaAs et BAs	Error! Bookmark not defined.
Figure III 8 : Indices de Réfraction de Si, GaAs et BAs	27
Figure III 9 : Partie Réelle de la constante diélectrique pour Si, GaAs et BAs	27
Figure III 10 : Structure de la cellule simulée par SCAPS	28
Figure III 11: Caractéristiques J-V (a) et Puissance (b) de la cellule à base de Si	31
Figure III 12: Caractéristiques J-V (a) et Puissance (b) de la cellule à base de BAs	32
Figure III 13 : Caractéristiques J-V (a) et Puissance (b) de la cellule à base de GaAs	33
Figure III 14: Courbes IV de variation de l'épaisseur a base BAs	36
Figure III 15: Courbes IV de variation de l'épaisseur a base GaAs	37
Figure III 16 : Courbes IV de variation de l'épaisseur a base Si	38
Figure III 17 : Courbes IV de variation de température à base BAs	39
Figure III 18 : Courbes IV de variation de température à base GaAs	40
Figure III 19 : Courbes IV de variation de température à base Si	41

Liste de tableau :

tableau III 1: Propriétés des matériaux des différentes couches des cellules simulées.....	29
tableau III 2: Paramètres des cellules de référence	34
tableau III 3: caractéristique de variation de l'épaisseur à température 300k à base de BAs	36
tableau III 4: caractéristique de variation de l'épaisseur à température 300k à base de GaAs.....	37
tableau III 5: caractéristique de variation de l'épaisseur à température 300k à base de Si	38
tableau III 6: caractéristique de variation de température a base BAs	39
tableau III 7: caractéristique de variation de température à l'épaisseur à 1200 nm à base de GaAs	40
tableau III 8: caractéristique de variation de température à l'épaisseur à 1200 nm à base de Si	41

Listes des symboles et abréviations

K	la constante de Boltzmann
T	la température absolue du corps
Q	charge de l'électron
I_{ph}	photo- courant
I_s	courant de saturation de la diode
V_m	tension correspondante à la puissance maximale fournie
I_m	courant correspondant à la puissance maximale fournie
P_{pv}	la puissance disponible en sortie du GPV
V_{pv}	La tension à la sortie du GPV
I_{pv}	le courant de sortie du GPV

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

Ces dernières années, l'augmentation de la demande en ressources énergétiques durables et écologiques a donné lieu à une croissance considérable dans le domaine des cellules photovoltaïques. Afin d'exploiter pleinement l'énergie solaire, la technologie photovoltaïque doit satisfaire à trois critères essentiels : l'efficacité, la stabilité et le coût abordable.

La technologie photovoltaïque repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs spécifiques qui convertissent directement la lumière solaire en électricité. À l'heure actuelle, les technologies photovoltaïques à base de silicium cristallin (c-Si) sont prédominantes sur le marché. Le silicium cristallin se présente sous différentes formes, telles que le multi cristallin et le monocristallin. Les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin offrent une stabilité élevée, une durée de vie dépassant 20 ans et des rendements de conversion de puissance supérieurs à 25%.

Au fil des années, de nombreuses avancées ont été réalisées dans le domaine des cellules photovoltaïques, permettant ainsi d'exploiter de manière optimale la lumière du soleil à travers des panneaux solaires. Ces cellules solaires sont composées de matériaux semi-conducteurs qui convertissent l'énergie du rayonnement solaire en électricité. Différents matériaux tels que le silicium, les terres rares ou les plastiques sont utilisés dans ces technologies, chacun présentant des avantages et des limitations dans ce domaine prometteur.

Dans le but d'améliorer les performances des cellules solaires photovoltaïques, il est essentiel de prédire les paramètres optimaux qui contribuent à la conception de cellules offrant les meilleures performances. Dans cette perspective, l'utilisation d'outils de simulation informatique joue un rôle crucial dans le développement et l'optimisation des cellules solaires. L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'influence de divers paramètres physiques sur les performances photovoltaïques des cellules solaires à base d'Arséniures, à l'aide de l'outil de simulation SCAPS. Les paramètres étudiés comprennent l'épaisseur de la couche active, la température, et leur impact sur les caractéristiques de la cellule solaire sera analysé. L'objectif final est de prédire les paramètres optimaux qui contribuent à l'amélioration des performances des cellules solaires.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

- ✓ Dans le Chapitre I nous présentons des généralités sur l'énergie solaire.
- ✓ Le Chapitre II est consacré au principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.
- ✓ Les résultats obtenus lors de notre travail sont exposés et discutés dans le chapitre III.
- ✓ Enfin, notre travail est terminé avec une conclusion.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE

I.1. Introduction

Nous parlons dans ce chapitre d'une manière brève sur les énergies renouvelables, et spécifiquement sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous faisons une étude approfondie sur le rayonnement solaire, qui se transforme en énergie électrique. Nous aborderons également la technologie utilisée dans les panneaux solaires et toutes leurs propriétés électriques et l'étendue de leur influence sur des facteurs externes tels que la chaleur et l'humidité. Nous n'oublions pas à la fin de prendre connaissance de tous les défauts des panneaux solaires et de les identifier de manière exhaustive, et par cela nous aurons terminé ce chapitre.

I.2. Définition d'énergie solaire

C'est une énergie inépuisable, tellement présente qu'on a tendance à l'oublier. Pourtant, cette énergie incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale en énergie . Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable [01] . Malheureusement on ne peut pas l'exploiter directement car il faut la transformer en d'autres formes d'énergies plus utiles :

- ✓ en bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive)
- ✓ en utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique)
- ✓ en transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques (énergie photovoltaïque)

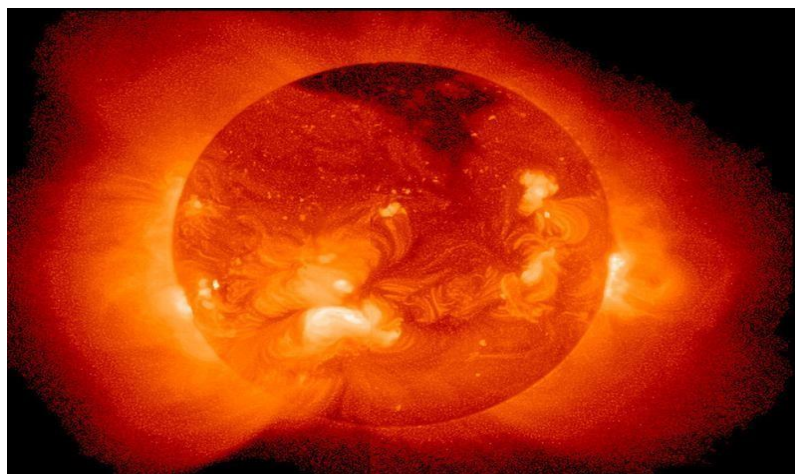


Figure I.1Image du soleil [02]

I.3. Historique sur l'énergie solaire photovoltaïque

En 1838, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît dans l'histoire de l'énergie solaire. Le français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque pour la première fois. Bequerel expérimentait une batterie électrolytique avec des électrodes de platine et réalisait que, lorsqu'il était exposé au soleil, le courant augmentait. C'était le début de l'énergie solaire photovoltaïque

L'étape suivante a été franchie en 1873 lorsque l'ingénieur électricien anglais Willoughby Smith a découvert l'effet photovoltaïque dans les solides. Dans ce cas à propos de sélénium.

Quelques années plus tard, en 1877, l'Anglais William Grylls Adams, professeur de philosophie naturelle au King's College de Londres et son élève Richard Evans Day, ont découvert qu'ils exposaient le sélénium à la lumière pour produire de l'électricité. Ils ont ainsi créé la première cellule photovoltaïque au sélénium.

En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson et Daryl Chaplin ont découvert la cellule solaire en silicium. Cette cellule produisait suffisamment d'électricité et était suffisamment efficace pour faire fonctionner de petits appareils électriques. Ces cellules photovoltaïques avaient une grande importance dans l'avenir de l'histoire de l'énergie solaire.

Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce ne sont apparues qu'en 1956, même si le coût était encore très élevé pour la plupart des gens jusqu'en 1970 environ, lorsque le prix des cellules solaires a chuté d'environ 80%.

Les cellules solaires ont été utilisées dans les satellites américains et soviétiques lancés depuis la fin des années 1950. [03]

I.4. Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV

I.4.1. Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque

- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.

I.4.2. Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.
- Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.
- Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau EDF).
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisés par les panneaux photovoltaïques sont composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement. [04]

I.5. Variation de l'énergie solaire

I.5.1. Effet de la nébulosité

En météorologie, un nuage est une masse visible constituée initialement d'une grande quantité de gouttelettes d'eau (parfois de cristaux de glace associés à des aérosols chimiques ou des minéraux) en suspension dans l'atmosphère au-dessus de la surface d'une planète. L'aspect d'un nuage dépend de la lumière qu'il reçoit, de la nature, de la dimension, du nombre et de la répartition des particules qui le constituent. Les gouttelettes d'eau d'un nuage proviennent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. La quantité maximale de vapeur d'eau (gaz invisible) qui peut être contenue dans une masse d'air est fonction de la température : plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau. [07]

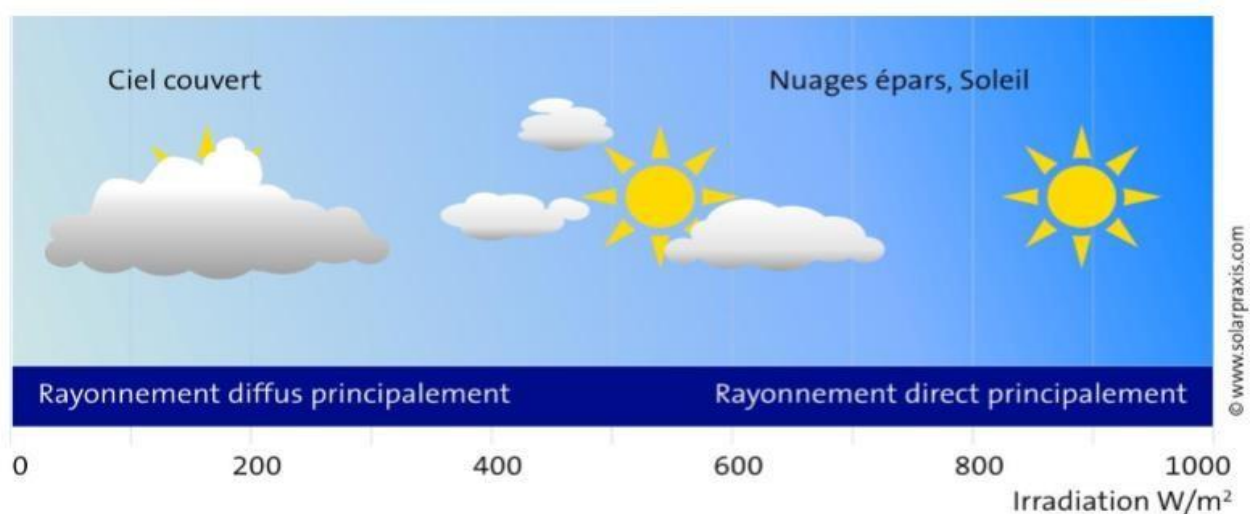


Figure I.2 Rayonnement en fonction de la météo [08]

I.6. Le rayonnement solaire

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaires (la fusion est la réunion de plusieurs noyaux atomiques légers en un seul (4 noyaux d'hydrogène) en un noyau d'hélium) . Le rayonnement solaire peut être décomposé en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment : rayonnement direct, diffus, l'albédo et global [08]

I.7. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme une source de lumière. Cette énergie peut être captée et transformée en électricité grâce à des panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Cette transformation est appelée « effet photovoltaïque ». Elle a été découverte en 1839 par Antoine-César Becquerel. Elle consiste à produire un courant lorsque la surface des panneaux est exposée à la lumière. Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots : « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière et « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro Volta, qui vient de « volt » et qui représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique. L'élément le plus important d'un système photovoltaïque est la cellule, élément de base de

l'unité qui collecte la lumière du soleil et les modules qui rassemblent un grand nombre de cellules. [09]

I.8. Cellule solaire photovoltaïque

I.8.1 Description de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est l'élément fondamental de la conversion photovoltaïque. En effet, cette cellule qui est exposée à la lumière (photons), transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La photopile délivre une tension variable entre 0V et 0.7V, elle dépend des propriétés des matériaux utilisés et de la température. Nous allons ici présenter la structure et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [10]

I.8.2 Structure d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est réalisée en suivant les étapes suivantes :

- ✓ La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopée N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.
- ✓ La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur. Les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P), comme illustré sur la figure suivante. [11]

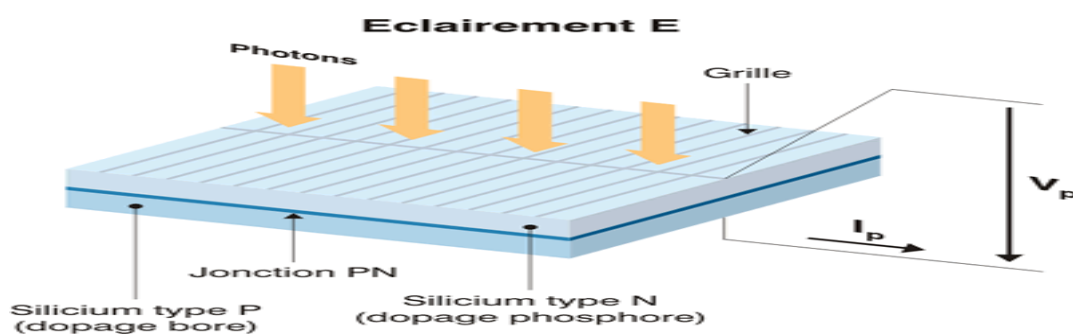


Figure I.3 Synoptique d'une cellule solaire [11]

I.9 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

I.9.1 Caractéristique courant – tension (I-V)

La Figure I.4 montre la caractéristique I-V pour une cellule photovoltaïque. Si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule avec la courbe de la charge.

Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite de pente $1/R$. Par conséquent, si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région MB de la courbe. Dans cette région le courant I varie peu en fonction de la tension, il est presque égal au courant de court-circuit. La cellule se comporte alors comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CN. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide.

Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie par la cellule est maximale dans des conditions fixes d'éclairement et de température. [12]

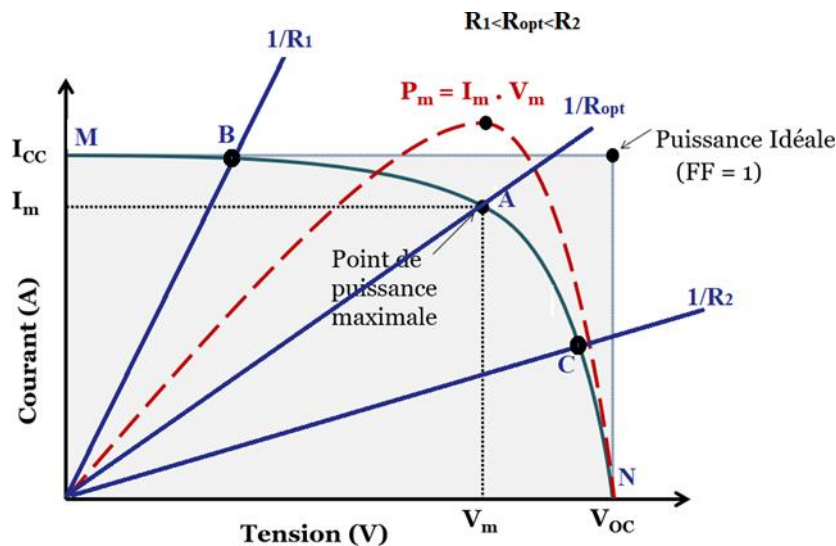


Figure I.4 Caractéristique courant - tension (I-V) [13]

I.10 Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension ($I=f(V)$). Ces paramètres permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. [14]

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

Le courant de court-circuit I_{cc} est la valeur maximale du courant obtenue en court-circuit ant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$). Ce courant croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [14]

b. Tension de circuit-ouvert, V_{oc}

La tension à circuit ouvert est définie comme la tension maximale générée par la cellule photovoltaïque. Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairage sans circuit de charge c'est-à-dire lorsque le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et du matériau de la couche active. [14]

La tension V est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{KT_c}{q} \text{Log} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I.1})$$

K : la constante de Boltzmann

T : la température absolue du corps

q : charge de l'électron

I_{ph} : photo- courant

I_s : courant de saturation de la diode

c. Puissance maximale P_m :

Le point de fonctionnement de la cellule est imposé par la résistance de charge. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra d'obtenir la puissance maximale. [14]

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (\text{I.2})$$

V_m : tension correspondante à la puissance maximale fournie.

I_m : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

d. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule, il représente le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit de $V_{oc} \times I_{cc}$. Ce rapport doit avoir une valeur la plus proche possible de 1 (100%).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{I.3})$$

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension. [14]

e. Le rendement η :

C'est le paramètre le plus important d'une cellule car il permet d'évaluer ces performances. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse du rayonnement lumineux. [14]

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad (I.4)$$

a. Rendement quantique de la cellule QE

Le rendement quantique définit la probabilité d'un transfert énergétique à partir d'un photon incident à un électron du cristal, ce paramètre décrit la qualité et la quantité de la conversion photovoltaïque dans la cellule solaire.

I.10 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule idéale à jonction soumise à un flux lumineux, fonctionne comme un générateur de courant. Sa caractéristique est comparable à celle d'une jonction. Le schéma équivalent de la cellule solaire est alors représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant. Les résistances séries et shunt modélisent les pertes engendrées par la résistivité des couches et la présence de courants de fuite [15].

La première est la résistance série, cette résistance est liée à l'impédance des électrodes, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La deuxième est la résistance shunt qui correspond aux pertes dans la surface et aux pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant sera drainée par cette résistance.

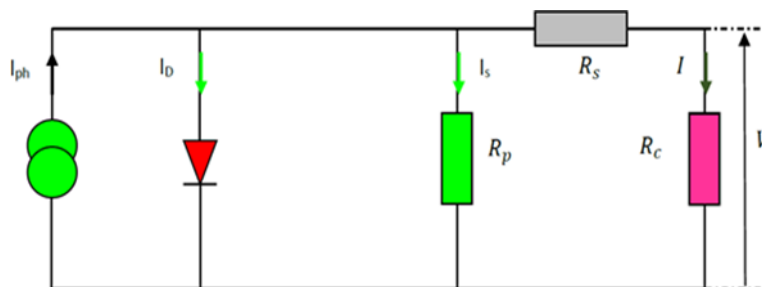


Figure I.5 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [15]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un survol sur l'historique de l'énergie photovoltaïque, des notions sur le rayonnement solaire et l'exploitation de la caractéristique courant tension de la cellule pour calculer ses différents paramètres physiques et électriques tel que le courant en Court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, le rendement de conversion Électrique et le rendement quantique

Références

- [01] - <https://opera-energie.com/energie-solaire/>
- [02] https://www.sciencesetavenir.fr/espace/systeme-solaire/quelle-est-la-temperature-du-soleil_136085
- [03] <https://www.europe-energie.com>
- [04] <https://blog.ecoflow.com/fr/energie-solaire>
- [05] - <https://total.direct-energie.com/>
- [06] - <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/histoire>
- [07] Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010
- [08] <https://slideplayer.fr/slide/13335152/>
- [09] <https://laboutique.edpsciences.fr/produit>
- [10] Hellali Kamelia : « Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012
- [11] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [12] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingénieur, UMMTO, 2012.
- [13] http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques
- [14] <http://www.foad.uadb.edu.sn>
- [15] Anne Labouret, Michel Viloz : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006

CHAPITRE II

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction

L'effet photovoltaïque correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux côtés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse. Quand cette cellule est exposée aux radiations, les photons créent les paires d'électron-trou avec l'énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur ($h\nu > E_g$). Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique. Aux cours de ces dernières années, des améliorations considérables concernant les performances des cellules solaires ont permis d'aboutir à des rendements de conversion photovoltaïque respectivement de 24.8 % et de 23 % pour des cellules solaires à base d'arsenic de gallium et de silicium, sous la condition d'éclairement normal. Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de la conversion photovoltaïque et le principe de fonctionnement des cellules solaires.

II. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Définition

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.



Figure II.1 Cellule solaire photovoltaïque

II.1 La cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [1]. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

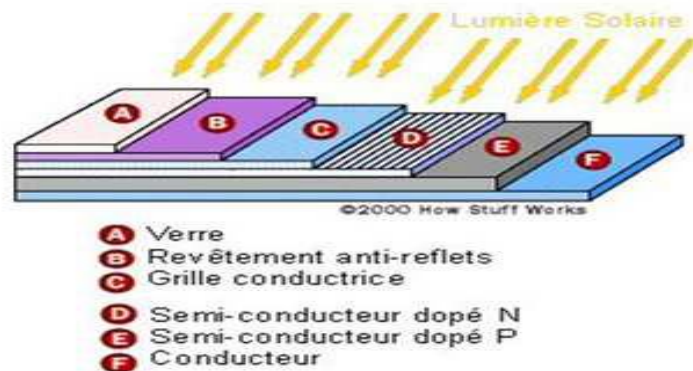


Figure II.2 Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [2].

II.2. Comportement de la jonction PN utilisée comme capteur PV :

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure II-3.

Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction [3].

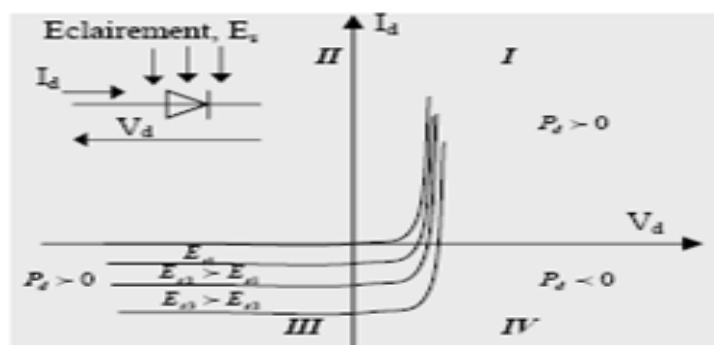


Figure II.3 Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairages (E).

II.3.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Nous allons ici exposer les principes de fonctionnement principaux de cette technique. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Les électrons ne circulent que de la zone p à n et inversement pour les trous. Ceci est dû à l'utilisation de semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.

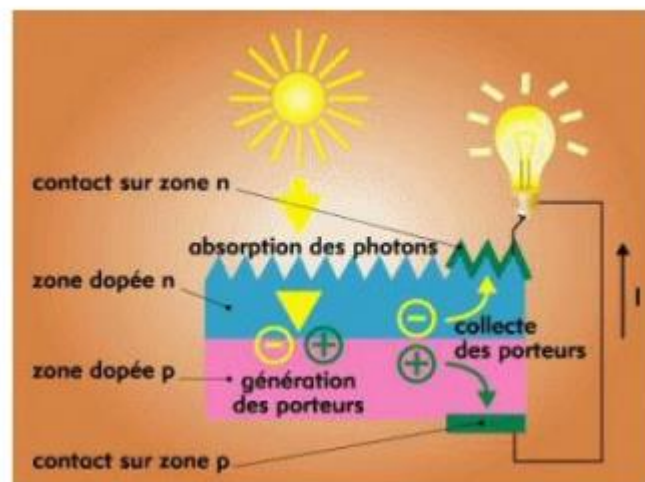


Figure II.4 schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace.

Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- 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 une photo courant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, le pair 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 une photo courant de génération [4].

II.4. Générateur photovoltaïque (GPV) :

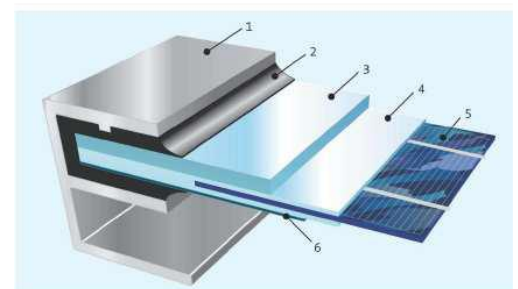
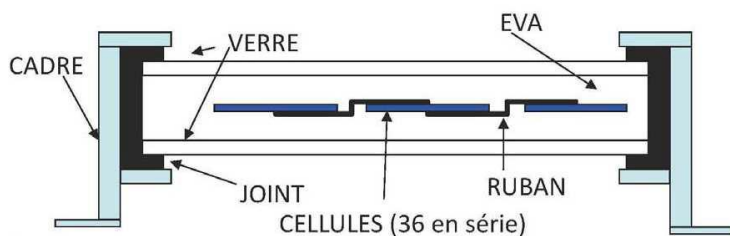
II-4-1 La constitution d'un module photovoltaïque

- Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) [5]



Figure II.5 Ruban métallique d'une cellule.

- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR
-



1. Cadre en aluminium
2. Joint d'étanchéité
3. Verre
4. Support EVA
5. Cellule cristalline
6. Film Tedlar

Figure II.6 Encapsulation des cellules.

- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par : [6]

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

P_{pv} : P_{pv} la puissance disponible en sortie du GPV

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV

II.5 Les problématiques photovoltaïques :

Le principal problème des panneaux solaires est le coût : en effet, pour installer 1m² de panneaux solaires il faut compter 1000 euros (installation + achat du panneau). Pour des productions importantes d'énergie, ce système n'est pas rentable. Il faut environ 3ans pour que le panneau produise l'énergie qui a été nécessaire à sa construction, or un panneau a une durée de vie moyenne de seulement 25ans.

- ✓ D'autre part, les quantités d'énergie produites sont liées au temps. Pour qu'un panneau solaire fonctionne il faut du soleil. ainsi pendant les jours de mauvais temps et la nuit ceux-ci ne produisent pas ; on a ici une perte de temps conséquente. De plus, c'est en été que les panneaux solaires produisent le plus (longues journées) or nos besoins d'énergie sont plus faibles en été qu'en hiver... ceci amènerait à devoir stocker l'énergie non utilisée, ce qui est compliqué et cher
- ✓ Enfin, de grandes superficies sont nécessaires pour pouvoir placer des panneaux solaires. Elles doivent, de plus, être placées stratégiquement (sur longitudes de la terre) pour recevoir un maximum d'énergie du soleil. Ainsi, les zones équatoriales seraient les plus adéquates mais ne sont pas forcément favorables à de telles installations (ex : la forêt amazonienne, qui reçoit de

grandes quantités de soleil mais présente aussi une végétation abondante qu'on ne peut envisager de détruire). [7]

II.6 Rôle de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque sert capter le rayonnement solaire et le transformer en électricité. La cellule solaire, ou photovoltaïque, peut fonctionner seule, lorsque les besoins sont moindres, pour une calculatrice solaire par exemple. Pour répondre à des besoins plus importants, elle est assemblée en modules solaires photovoltaïques, appelés panneaux solaires [8]

II.7 Avantages de la technologie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages. Elle est "propre", fiable et nécessite peu d'entretien. Elle ne comporte pas de pièces mobiles. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt. Le système photovoltaïque présente toutefois quelques inconvénients. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%). Les générateurs photovoltaïques restent encore moins compétitifs par rapport aux générateurs Diesel. Enfin, le caractère variable du rayonnement solaire est aussi un handicap et nécessite le stockage de l'énergie électrique produite dans des batteries assez chères.

II.8 L'avenir des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques devraient jouer un rôle important dans l'avenir de l'énergie propre. Avec l'augmentation de la demande d'énergie verte, les cellules photovoltaïques deviendront de plus en plus populaires et abordables.

Des projets ambitieux ont été lancés pour développer des centrales solaires géantes dans le monde entier. Des initiatives ont également été prises pour encourager l'utilisation de l'énergie solaire dans les zones rurales et les pays en développement, où l'accès à l'électricité est limité. [9]

II.9 Les avancées technologiques dans les cellules photovoltaïques

Au fil des ans, les chercheurs ont travaillé à améliorer l'efficacité énergétique des cellules photovoltaïques. Des avancées technologiques ont été réalisées en utilisant des matériaux semi-conducteurs plus efficaces, en développant des cellules multi-jonctions et en utilisant des techniques de fabrication plus avancées.

D'autres recherches ont été menées pour développer des cellules photovoltaïques organiques, qui sont fabriquées à partir de matériaux organiques plutôt que de semi-conducteurs inorganiques. Ces cellules ont le potentiel d'être moins chères et plus faciles à produire que les cellules traditionnelles.

[10]

II.10 Technologie des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant quel que soit le type, le rendement reste assez faible entre : 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. [12]

Conclusion

Dans le deuxième chapitre nous avons fait un survol sur le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, les types des cellules utilisées, les modélisations les plus utilisées ainsi que les avancées technologiques

References

[1] [Photovoltaics Reports, Fraunhofer ISE, novembre 2016](#)

[2] <https://www.connaissancedesenergies.org>

[3] Alonso Corinne ,« Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

[4] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

[5] <https://www.domomat.com>

[6] <http://elearning.univ-biskra.dz> S.M. Sze, [Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.](#)

[7] <https://mypower.engie.fr>

[8] <https://www.totalenergies.fr>

[9] <https://fr.euronews.com>

[10] <https://www.futura-sciences.com>

[11] <https://www.connaissancedesenergies.org>

[12] <https://www.ecosources.org>

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1 Le Logiciel utilisé (SCAPS)

SCAPS-1D (SolarCell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve[1].

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

Avec le SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre défini de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire. La majorité des paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule).

III.1.1 Notions de base

Le programme SCAPS-1D comprend plusieurs panneaux (ou fenêtres). Le panneau principal est « le panneau d'action ». Il autorise de mettre le problème, permet de choisir les calculs exigés, exécuter les calculs, naviguer aux autres panneaux, sauvegarder et mettre en graphique les résultats et plusieurs d'autres caractéristiques, plus détaillées dans le manuel du logiciel [2].

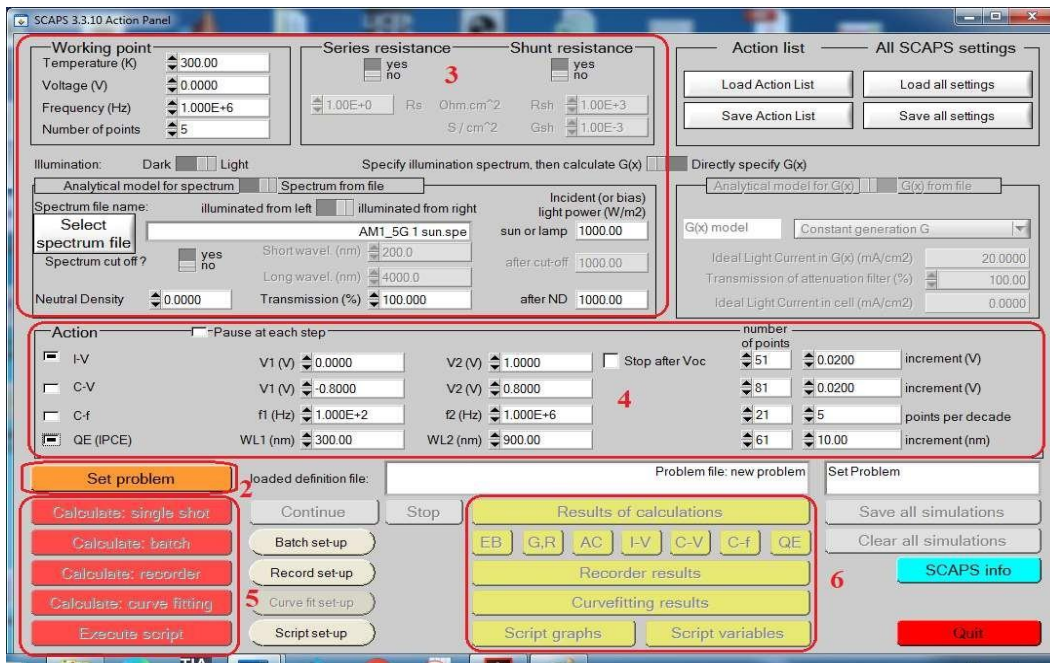


Figure III.1 Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

La signification des blocs nommés de 1 à 6 est expliquée comme suivant:

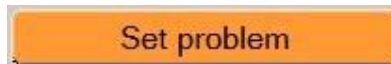
1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation. Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

III.1.2 Lancer SCAPS



On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3310.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

3.3.1 Définir le problème



On clique sur le bouton (Set Problème) dans le panneau d'action pour ouvrir la fenêtre de définition du problème (Solarcell définition panel).

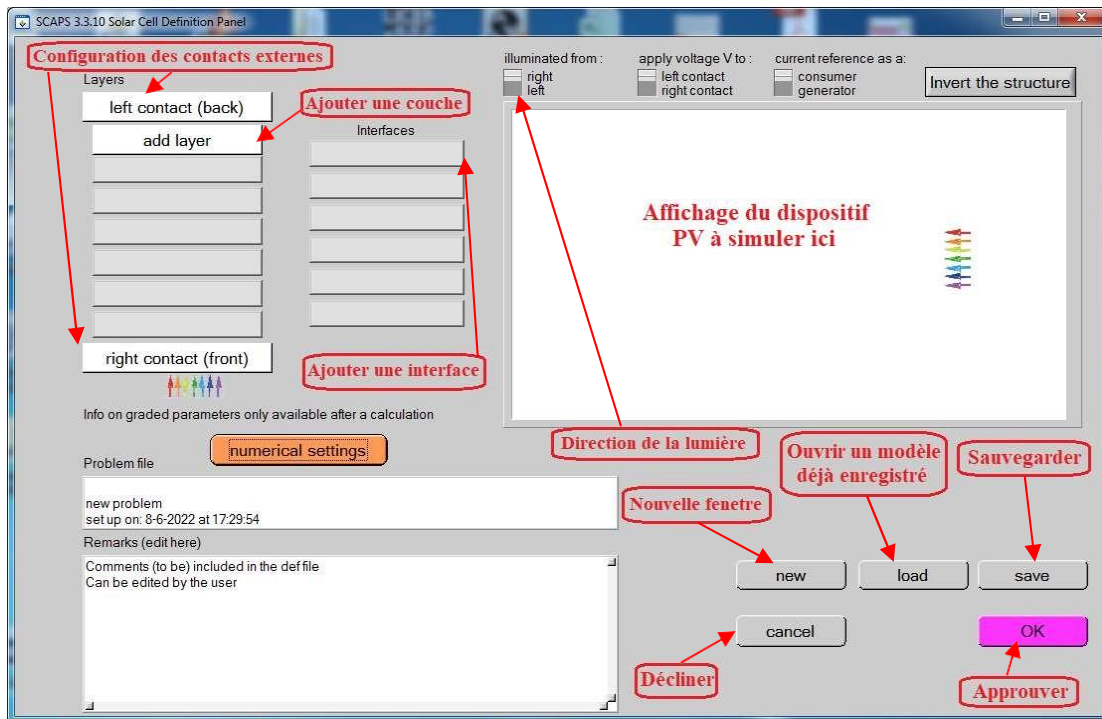


Figure III.2 Panneau de définition d'une cellule solaire.

III.2 Les matériaux utilisés

Il est bien connu que le silicium est un semi-conducteur omniprésent surtout dans le domaine de l'électronique et du photovoltaïque ayant des propriétés excellentes telles que sa stabilité à long terme qui restent encore à tester.

Dans ce travail nous avons choisi d'étudier les caractéristiques des cellules photovoltaïques fabriquées de matériaux à base d'Arsénique en particulier le BAAs et le GaAs comme alternative au silicium.

Notre choix du BAAs repose sur les dernières découvertes et expérimentations sur ce matériau [3-5]. En effet, des chercheurs se sont penchés ces dernières années sur ce matériau et ont découvert que le BAAs cubique avait une conductivité thermique 10 fois supérieure à celle du silicium. Grâce à cette propriété, il décharge la chaleur beaucoup plus rapidement et ne la collecte pas. L'arséniure de bord cubique offre une grande mobilité des porteurs d'électrons et des trous, élargissant ainsi son utilisation potentielle pour des applications commerciales telles que le remplacement des puces de certains Smartphones ou ordinateurs. Les chercheurs ont obtenu leurs résultats expérimentaux en travaillant avec des lasers très complexes et de très petites quantités de ce matériau, il faut maintenant trouver des solutions pour pouvoir réaliser une production qui pourrait permettre d'approfondir les tests.

L'arséniure de gallium (GaAs) est un matériau attrayant pour le photovoltaïque grâce à son fort coefficient d'absorption lui permettant de réaliser des cellules solaires ultra-minces pouvant absorber jusqu'à 90% des photons dans une épaisseur de $3\mu\text{m}$ [6], une forte mobilité des électrons [7, 8], une forte résistance aux radiations solaires et une bonne stabilité face aux températures élevées. De plus, la possibilité de transformer facilement l'arséniure de gallium en un semi-conducteur ternaire [8], a favorisé aussi son utilisation dans les cellules solaires multi-jonctions.

Ces matériaux possèdent une structure cubique zinc-blende similaire à celle du silicium avec des paramètres de mailles différentes.

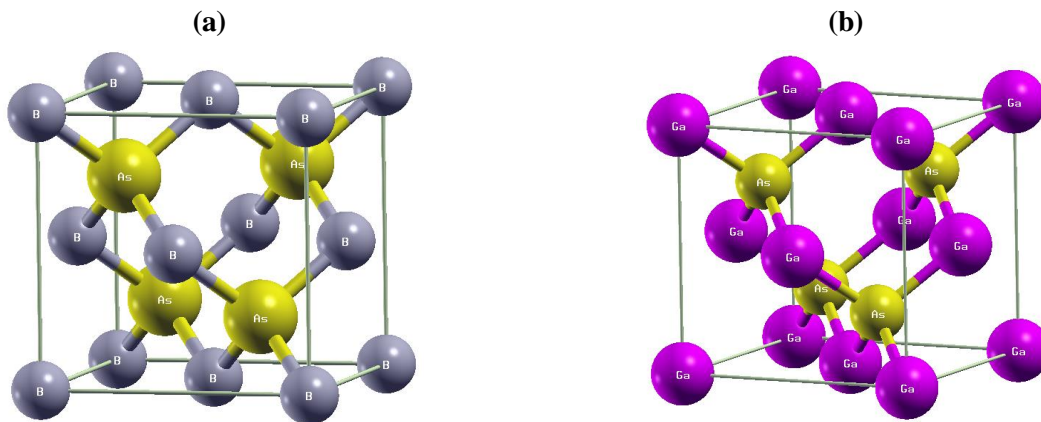


Figure III.3 Structure cristalline zinc-blende de BA₅ et GaAs

III.3 Résultats et Discussion

Dans cette partie nous avons étudié, par la méthode de premiers principes (ab-initio) les propriétés structurales, électroniques et optiques de deux matériaux binaires à base d'Arsenic à savoir le GaAs et le BA₅, et pour comparaison le Silicium dans la phase zinc-blende. Nous avons utilisé la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (*DFT*) [9] à travers la méthode des Ondes Planes Augmentées Linéarisée (*FP-LAPW*) [10] implémentée dans le code de calcul *Wien2k* [11].

Et à partir des résultats obtenus, nous avons déterminé les paramètres nécessaires pour le logiciel *SCAPS-1D* comme le gap (énergie de la bande interdite), l'indice de réfraction, la permittivité diélectrique...

III.3.1 Structures de bandes :

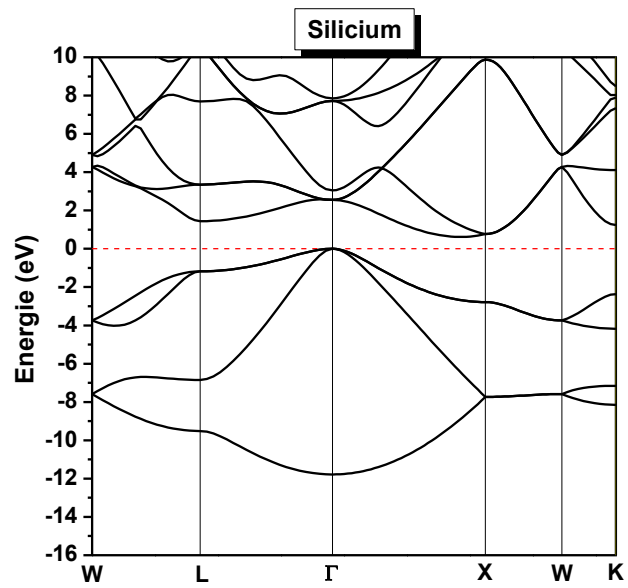


Figure III.4 Structure de bandes du Silicium calculée par la méthode mBJ

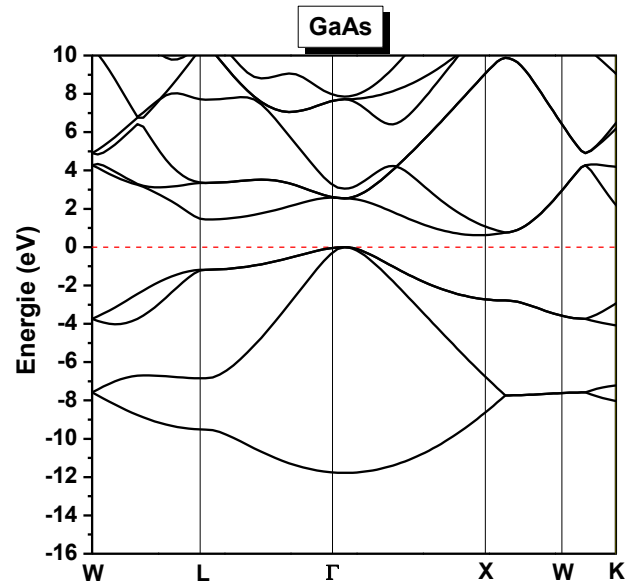


Figure III.5 Structure de bandes du GaAs calculée par la méthode mBJ

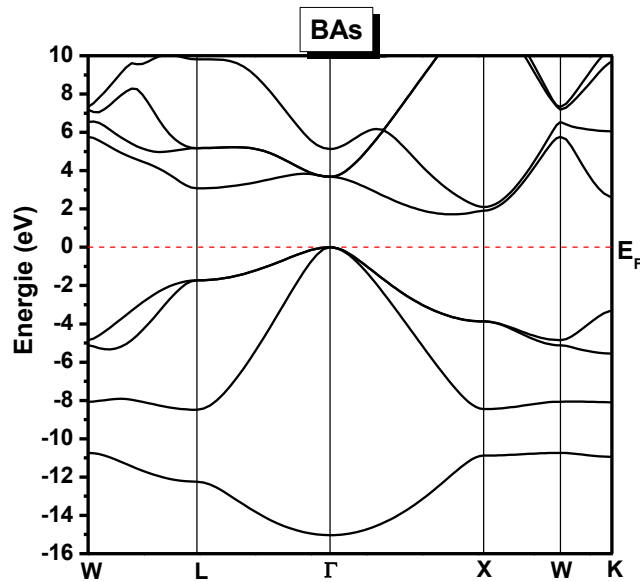


Figure III.6 Structure de bandes du BAs calculée par la méthode mBJ

Les structures de bandes nous indiquent que les trois matériaux sont des semi-conducteurs à gap indirect étant donné que le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction ne sont pas situés au point Gamma. On peut également tirer les valeurs des énergies des bandes interdites ou gaps notées E_g .

III.3.2 Propriétés optiques :

Les propriétés optiques calculées pour les trois matériaux sont principalement le coefficient d'absorption, la constante diélectrique Epsilon (ϵ) avec les deux parties réelle et imaginaire ainsi que l'indice de réfraction noté n . les résultats obtenus sont présentés dans les **Figures III.4 et III.6**

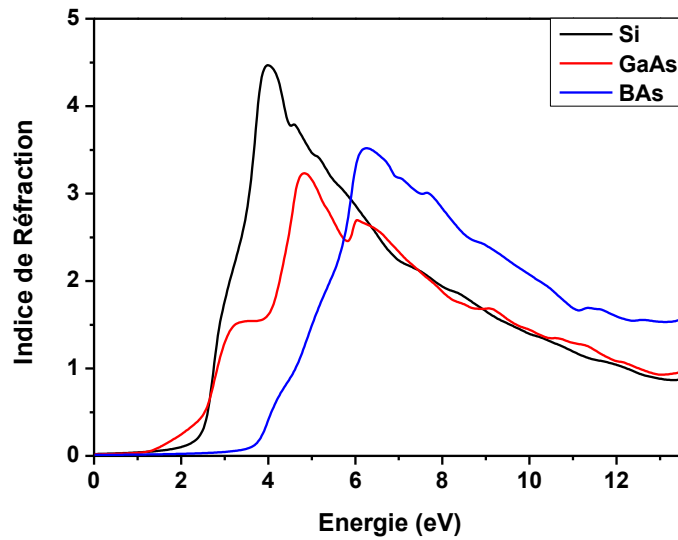


Figure III.7 Indices de Réfraction de Si, GaAs et BAs

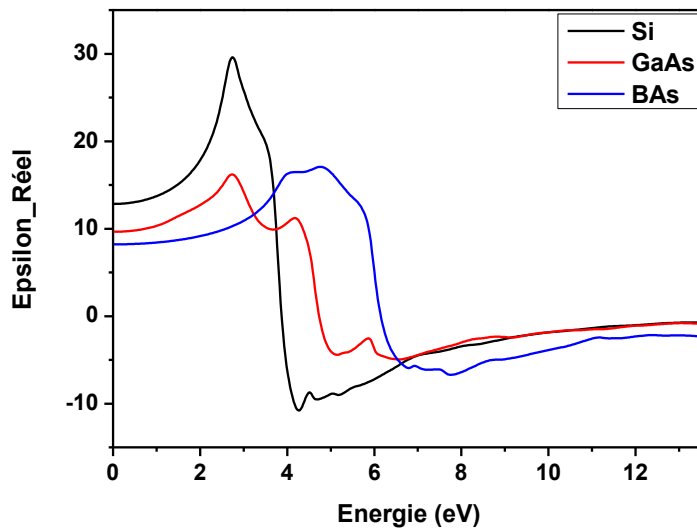


Figure III.8 Partie Réelle de la constante diélectrique pour Si, GaAs et BAs

III.3.3 Architecture des cellules simulées

Pour la modélisation et la simulation numérique, il serait préférable d'utiliser la configuration d'une cellule solaire à couche mince type *p-i-n* ou *n-i-p* planaire à hétérojonction.

La structure *p-i-n* de la cellule solaire proposée et générée par SCAPS est donnée sur la Figure III.7, où la couche active intrinsèque ou absorbante du matériau est prise en sandwich entre un matériau de transport d'électrons supérieur (*ETM*) et un matériau de transport de trou inférieur (*HTM*).

La couche HTM est le *p-Si* alors que la couche ETM est le *n-Si* associé au *n-TiO₂*. Ces couches nous ont donné de meilleurs résultats par rapport à d'autres matériaux de transport de trous et d'électrons.

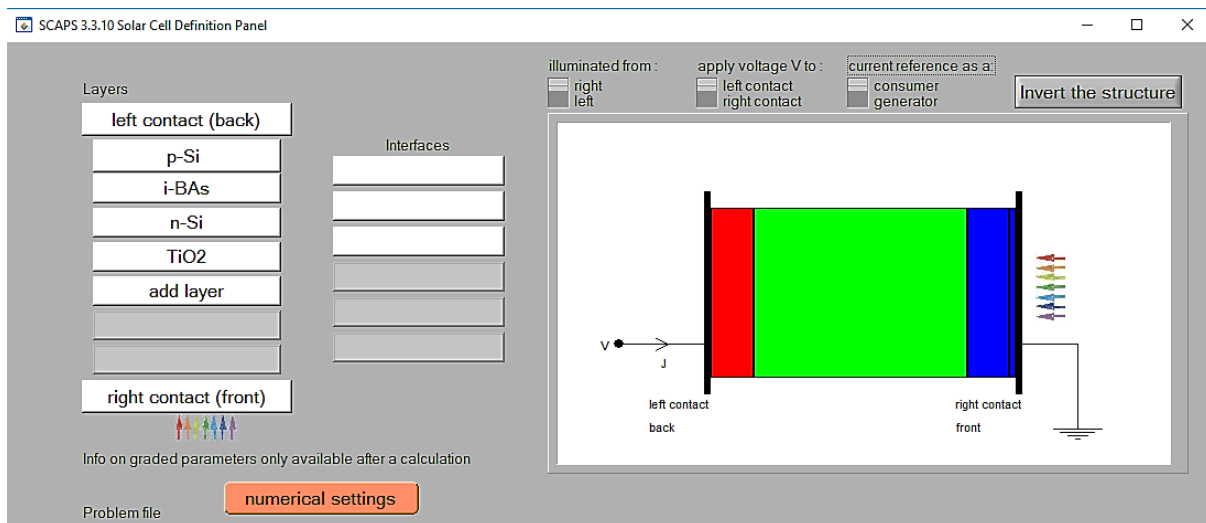


Figure III.9 Structure de la cellule simulée par SCAPS

III.3.4 Paramètres des cellules simulées

Les paramètres électriques et optiques des différents matériaux utilisés dans la simulation des cellules photovoltaïques sont tirés de la première étude, et sont exposés dans le Tableau III.1.

Notons que nos simulations sont réalisées sous le spectre solaire AM 1.5 à une intensité lumineuse de 100 mW/cm^2

Tableau III.1 Propriétés des matériaux des différentes couches des cellules simulées.

Propriété	p-Si	n-Si	n-TiO ₂	BAs	Si	GaAs
Epaisseur (nm)	75	75	75	500	500	500
Gap (eV)	1.120	1.120	3.200	1.720	1.120	1,223
Affinité électronique (Ev)	4.500	4.500	4.260	4.495	4.500	4,0700
Permittivité diélectrique (relative)	11.900	11.900	40.000	8.200	11.900	9,6500
CB densité effective d'états ($1/\text{cm}^3$)	2.80E+19	2.80E+19	2.0E+18	6.23E+18	2.8E+19	2,075 E+17
VB densité effective d'états ($1/\text{cm}^3$)	1.040E+19	1.04E+19	2.0E+18	1.68E+18	1.04E+19	2,630 E+18
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	1.000E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.5E+7	1.0E+7	4,4 E+7
Vitesse thermique du trou (cm/s)	1.00E+7	1.00E+7	1.00E+7	3.3E+7	1.0E+7	2.0 E+7
Mobilité électronique (cm^2/vs)	1.50E+3	1.50E+3	2.00E+4	3.00E+3	1.50E+3	8.50 E+3
Mobilité des trous ($\frac{\text{cm}^2}{\text{vs}}$)	4.50E+2	4.50E+2	1.00E+3	1.60E+3	4.50E+2	4.00 E+2
Densité de donneurs ND ($1/\text{cm}^3$)	0.00E+0	1.00E+19	1.0E+15	0.00E+0	0.00E+0	0.00 E+0
Densité d'accepteurs NA ($1/\text{cm}^3$)	1.00E+19	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00 E+0

III.3.5 Cellules de référence

On éclaire la cellule d'une seule face (face avant du côté HTL), et on calcule à chaque fois la caractéristique densité du courant-tension (J-V). A partir des caractéristiques J-V fournies par SCAPS-1D, on peut déterminer les valeurs des paramètres photovoltaïques tels que : la densité du courant de court-circuit, J_{CC} , la tension de circuit-ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF, et le rendement η (éta).

Les caractéristiques courant- tension (J-V) des cellule étudiées sous un éclairage par le spectre solaire AM 1.5 et une densité de puissance de 1000w/m^2 sont représentées dans les Figures III.11 à III.13.

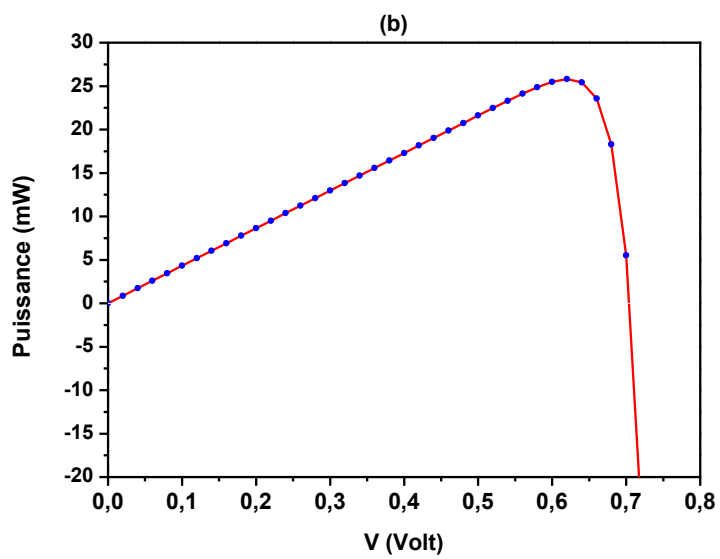
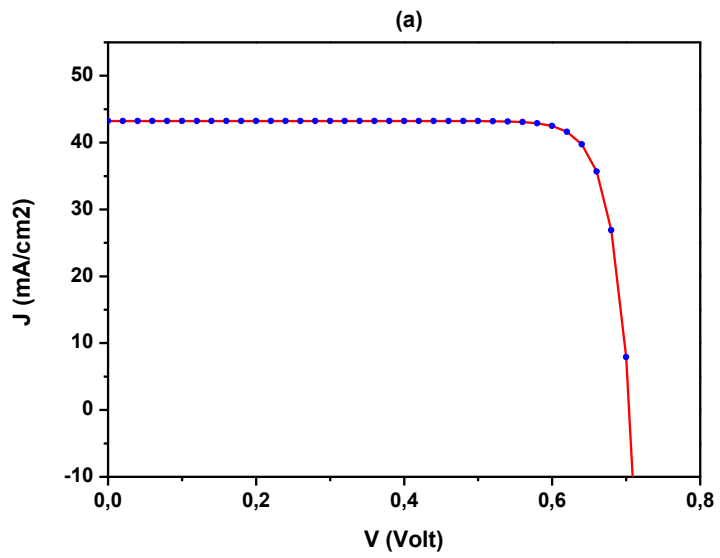


Figure III.10 Caractéristiques J-V (a) et Puissance (b) de la cellule à base de Si

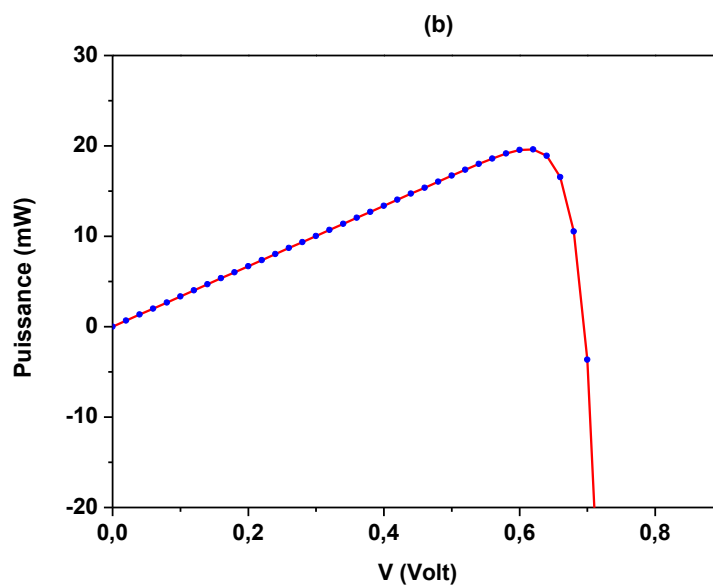
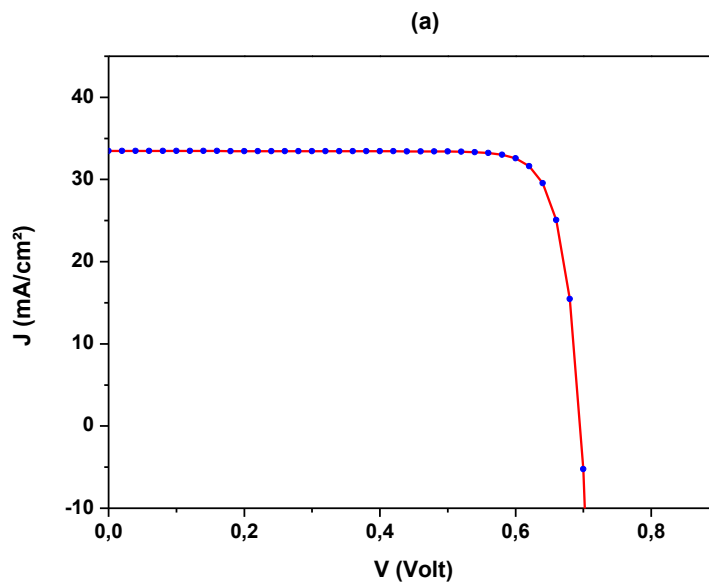


Figure III.11 Caractéristiques J-V (a) et Puissance (b) de la cellule à base de BAs

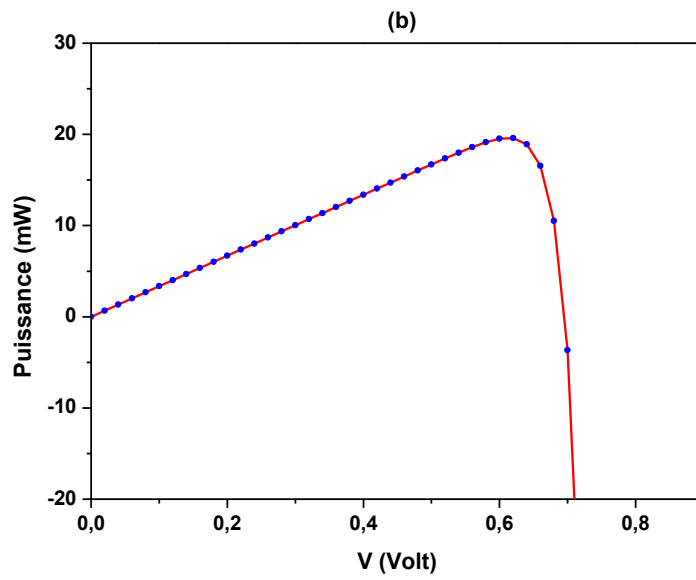
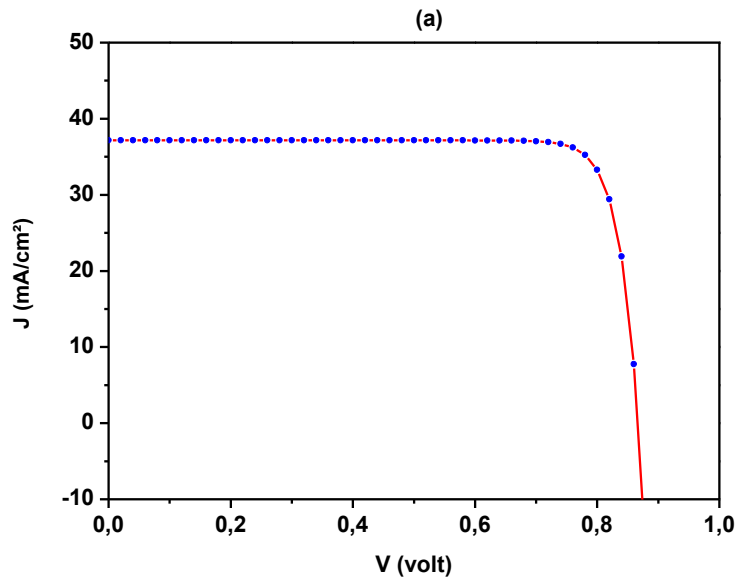


Figure III.12 Caractéristiques J-V (a) et Puissance (b) de la cellule à base de GaAs

Tableau III.2 Paramètres des cellules de référence

Matériaux	V_{oc} (V)	J_{cc} (mA/cm²)	FF (%)	η (%)	P_{Max}
Si	0.69	41.24	84.64	24.44	25.70
BAs	0.69	33.47	84.43	19.66	19.97
GaAs	1.13	37.15	65.09	27.55	19.74

III.3.6 Influence de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de As

L'épaisseur de la couche absorbante est un paramètre important et joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances de la cellule solaire. Il devrait être optimal afin d'augmenter la densité des électrons et des trous photo-générés et de minimiser leur recombinaison [3].

Dans notre travail, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres de performance de la cellule solaire à base d'Arsenic pour trois matériaux (GaAs, BAs et Si). L'épaisseur de la couche active a été modifiée de 400-1200 nm en fixant l'épaisseur de la couche HTM à ... nm et ceci à la température ambiante (300 K).

Dans une cellule solaire, plus la couche absorbante est plus épaisse plus l'absorption de photons est plus importante et plus la concentration des porteurs photo générés est plus grandes. En effet une couche absorbante plus épaisse absorbe plus de photons, ce qui favorise la génération de paires électron-trou qui à son tour augmente l'efficacité de la cellule. Mais lorsque l'épaisseur augmente au-delà de ... nm, l'efficacité diminue lentement en raison de l'augmentation du taux de recombinaison des paires électrons et trous. En effet dans les cellules épaisses, le champ électrique est plus faible en raison de la grande distance entre les deux électrodes. Par conséquent, la recombinaison des porteurs est plus importante, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité de la cellule [12].

III.3.7 Influence de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base d'As

Nous avons aussi étudié l'effet de la température de fonctionnement sur l'évolution des performances de la cellule solaire à base d'As. Le but de cette étude est de fournir une analyse approfondie sur l'évolution des paramètres photovoltaïques de la cellule à base d'As à des températures qui varient entre 10 °C et 50 °C. Cette simulation est réalisée en considérant les valeurs optimales de l'épaisseur de l'absorbeur de 400 nm et l'épaisseur de HTM de 1200 nm.

Après on va procéder à la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque pour déduire l'effet de l'épaisseur sur les caractéristiques.

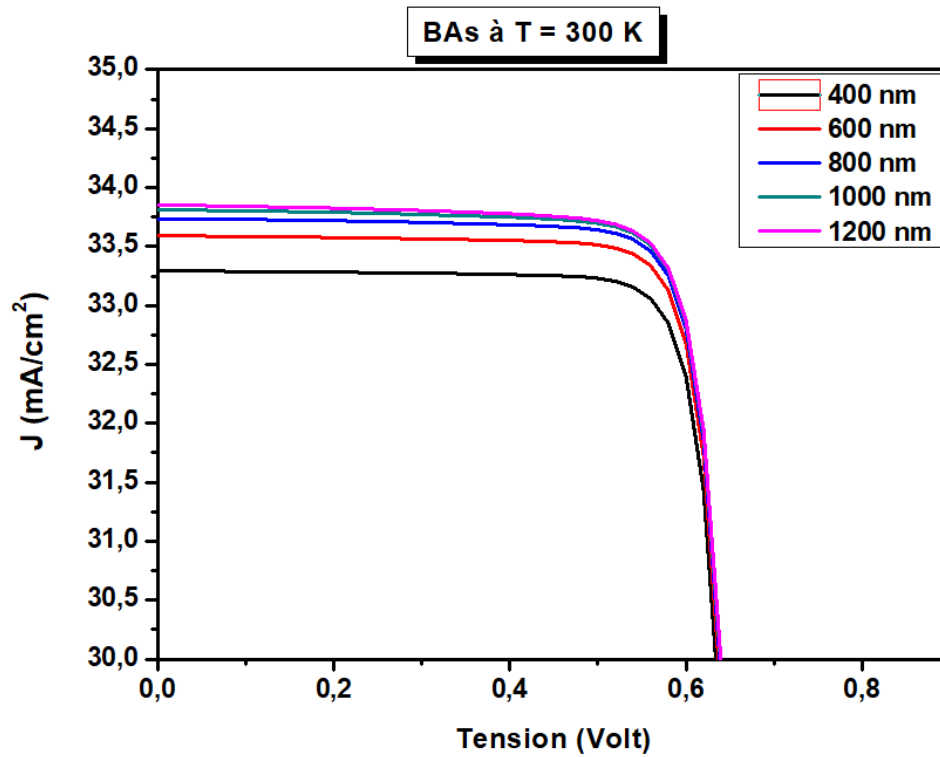


Figure III.13 Courbes IV de variation de l'épaisseur à base BAs

Tableau III.3 Caractéristique de variation de l'épaisseur à température 300 K à base de BAs

Epaisseur (nm)	400	600	800	1000	1200
V_{oc} (V)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
J_{cc} (mA/cm ²)	33.29	33.59	33.74	33.81	33.86
FF (%)	84.47	84.38	84.28	84.18	84.06
η (%)	19.56	19.73	19.81	19.85	19.86

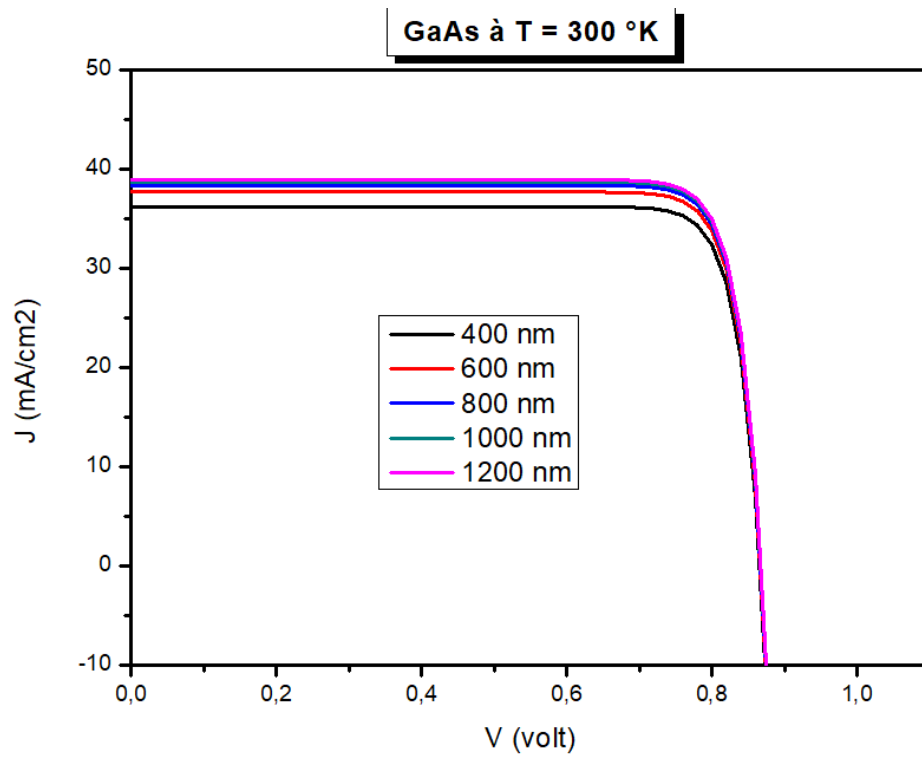


Figure III.14 Courbes IV de variation de l'épaisseur a base GaAs

Tableau III.4 Caractéristique de variation de l'épaisseur à température 300 K à base de GaAs

Epaisseur (nm)	400	600	800	1000	1200
VOC (V)	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
JCC (mA/cm ²)	36.24	37.73	38.40	38.75	38.96
FF (%)	85.57	85.53	85.51	85.50	85.50
η (%)	26.87	27.99	28.50	28.77	28.92

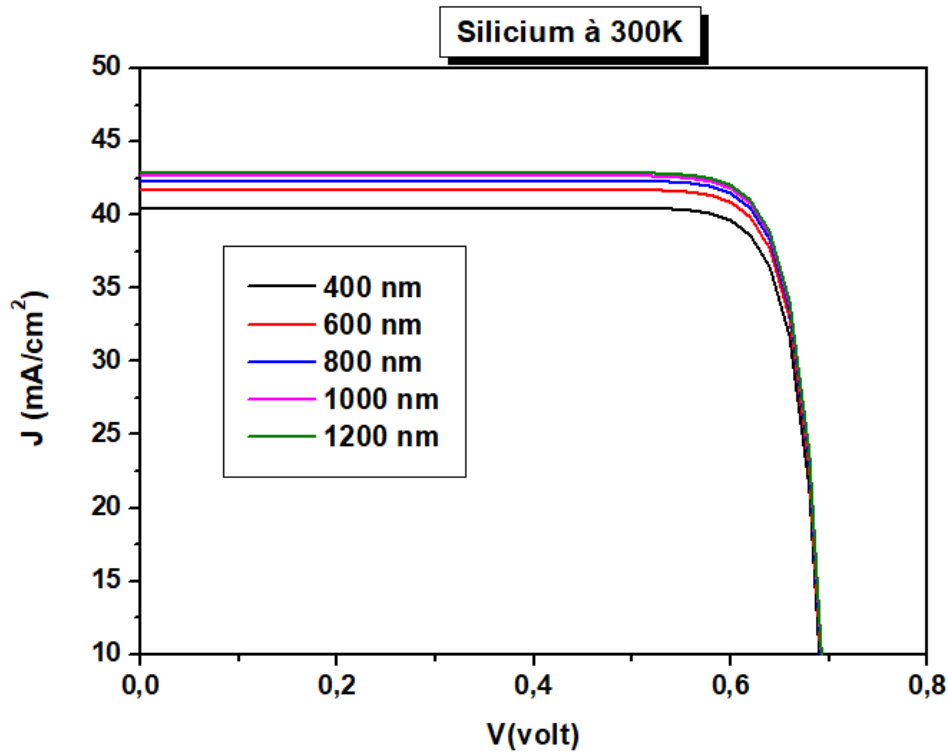


Figure III.15 Courbes IV de variation de l'épaisseur a base Si.

Tableau III.5 Caractéristique de variation de l'épaisseur à température 300 K à base de Si

Epaisseur (nm)	400	600	800	1000	1200
V_{oc} (V)	0.69	0.70	0.70	0.70	0.70
J_{cc} (mA/cm ²)	40.50	41.75	42.35	42.70	42.91
FF (%)	84.65	84.64	84.64	84.65	84.65
η (%)	23.98	24.74	25.12	25.33	25.46

Ensuite avec la valeur optimale de cette épaisseur, procèdera à étudier l'effet de la température sur les caractéristique des cellules.

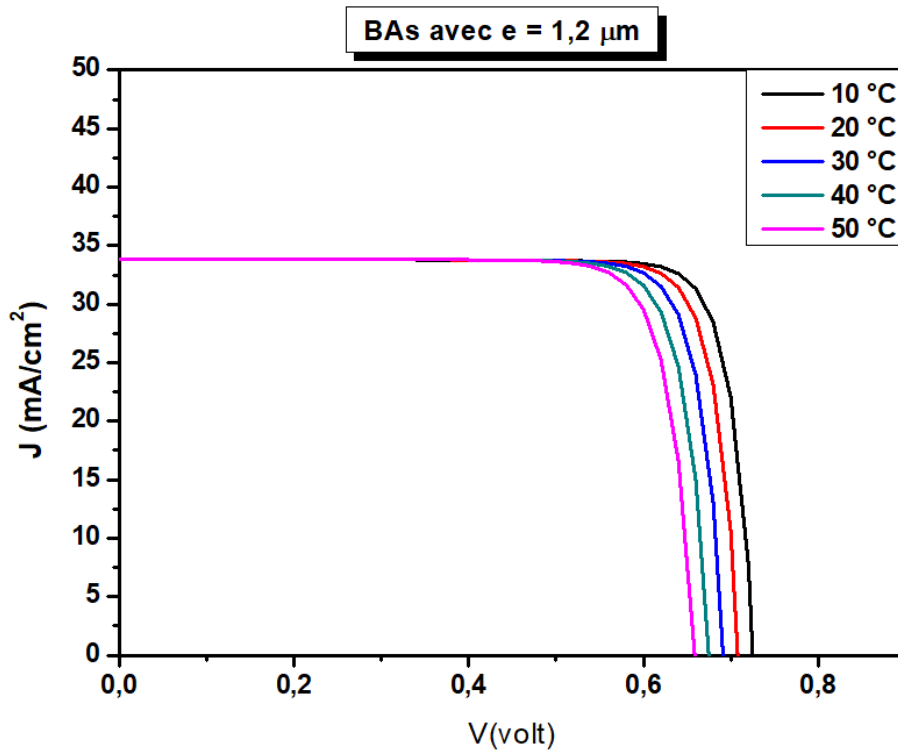


Figure III.16 Courbes IV de variation de température à base BAs

Tableau III.6 Caractéristique de variation de température à base BAs

Température (°C)	10	20	30	40	50
V _{oc} (V)	0.7242	0.7074	0.6906	0.6738	0.6571
J _{cc} (mA/cm ²)	33.460796	33.468521	33.475632	33.482008	33.487941
FF (%)	85.33	84.71	84.06	83.38	82.89
η (%)	20.68	20.05	19.43	18.81	18.24

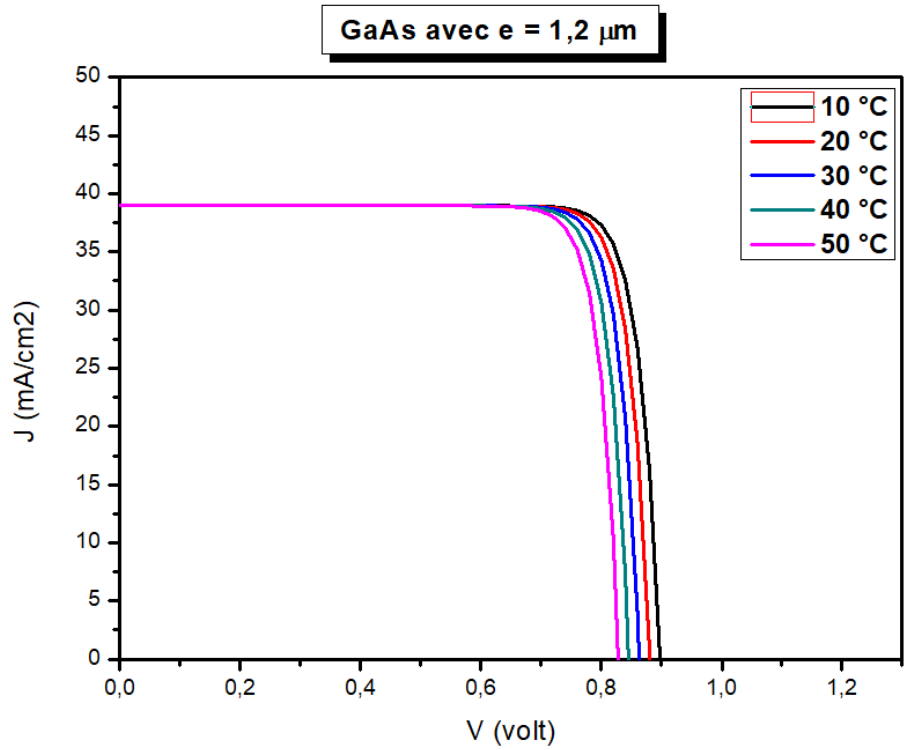


Figure III.17 Courbes IV de variation de température à base GaAs

Tableau III.7 Caractéristique de variation de température à l'épaisseur à 1200 nm à base de GaAs

température (°C)	10	20	30	40	50
V _{oc} (V)	0.89	0.88	0.86	0.84	0.82
J _{cc} (mA/cm ²)	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96
FF (%)	85.44	85.54	85.48	85.50	85.12
η (%)	29.90	29.35	28.75	28.11	27.50

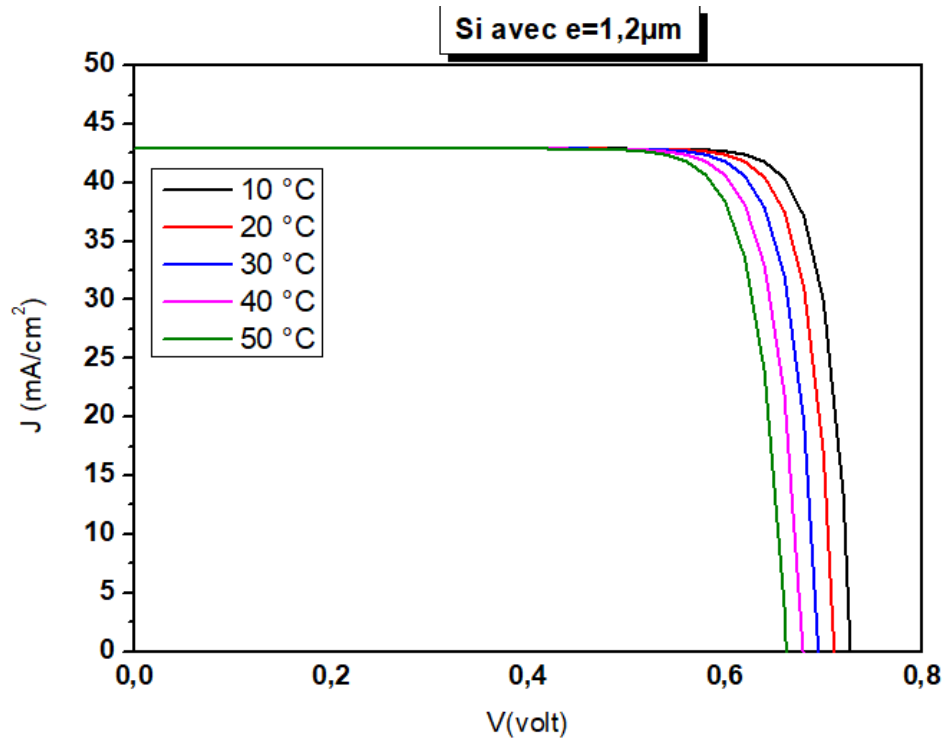


Figure III.18 Courbes IV de variation de température à base Si.

Tableau III.8 Caractéristique de variation de température à l'épaisseur à 1200 nm à base de Si

Température (°C)	10	20	30	40	50
V_{OC} (V)	0.89	0.88	0.86	0.84	0.82
J_{CC} (mA/cm ²)	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96
FF (%)	85.44	85.54	85.48	85.28	85.12
η (%)	29.9	29.35	28.75	28.11	27.50

Conclusion

nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche active en comparant les performances des cellules pour les différents matériaux et nous avons constaté que le rendement augmente avec l'épaisseur pour les deux cas.

Nous avons étudié par la suite l'effet de la température de fonctionnement sur les performances des deux cellules solaires. On a pu voir que l'efficacité des cellules solaires à base de GaAs et de BAS chute pour les températures élevées tout comme les autres cellules PV.

On conclue que la température et l'épaisseur à une relation inverse sur le rendement

Références

- [1] Marc Burgelman – Koen Decock - Johan Verschraegen - Stefaan Degrave - Alex Niemegeers, Department ELIS (Electronics and Information Systems), University of Gent (“Belgium”)
- [2] SCAPS Manual
- [3] Kang, J. S., Li, M., Wu, H., Nguyen, H. and Hu, Y. Experimental observation of high thermal conductivity in boron arsenide, *Science*, 361.6402 (2018): 575–578.
- [4] Li, S. et al. High thermal conductivity in cubic Boron Arsenide crystals, *Science*, 361.6402 (2018): 579–581.
- [5] Tian, F. et al. Unusual high thermal conductivity in Boron Arsenide bulk crystals, *Science*, 361.6402 (2018): 582–585.
- [6] Green. M, 1998, “Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications”, University of New SouthWales.
- [7] Brozel. MR and Stillman. GE, 1996, “Properties of Gallium Arsenides”, 3rd edition, Institution of Electrical Engineers.
- [8] Jha. A. R, 2010, “Solar Cell Technology and Applications”, Taylor & Francis Group, p.26, ISBN 978-1-4200-8177-0
- [9] Hohenberg, Pierre, and Walter Kohn. "Inhomogeneous electron gas." *Physical review* 136.3B (1964): B864
- [10] Kohn, Walter, and Lu Jeu Sham. "Self-consistent equations including exchange and correlation effects." *Physical review* 140.4A (1965): A1133.
- [11] BLAHA, P. "An Augmented Plane Wave+ Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties." WIEN2k (2001).
- [12] ZerarkaSelssabil, Serdji Baya, Mémoire Master “Study of electron transport effect on perovskitesolarcellusing simulation “Université Mohamed khider à Biskra 2020

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Le travail réalisé dans ce mémoire constitue une contribution à l'étude et à la simulation des cellules solaires aux couches minces basées sur des matériaux autres que le Silicium. Notre principal objectif a été de modéliser les caractéristiques électriques de la cellule solaire et de prédire leurs comportements en utilisant le simulateur solaire unidimensionnel SCAPS-1D. On s'intéresse particulièrement à étudier les cellules solaires fabriquées de matériaux à base d'Arsénique (GaAs et BAs).

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à étudier les caractéristiques des cellules de référence dans les conditions normales et dans ce cas nous avons trouvé que les deux cellules à base de GaAs et de BAs avaient relativement de très bonnes performances comparées à celle de la cellule à base de Silicium.

Par ailleurs nous avons également étudié l'influence de l'épaisseur de la couche active en comparant les performances des cellules pour les différents matériaux et nous avons constaté que le rendement augmente avec l'épaisseur pour les deux cas. Toutes fois les performances de la cellule à base de BAs restent inférieures à celles des cellules à base de Si et de GaAs.

Nous avons étudié par la suite l'effet de la température de fonctionnement sur les performances des deux cellules solaires. On a pu voir que l'efficacité des cellules solaires à base de GaAs et de BAS chute pour les températures élevées tout comme les autres cellules PV.

En perspective en compte approfondir la compréhension des mécanismes qui régissent le fonctionnement des cellules solaires pour améliorer d'avantage leurs rendements et tenter de trouver d'autres matériaux susceptibles de remplacer le Silicium.

Résumé :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de matériaux autres que le Silicium prometteur. Nous nous intéressons principalement aux matériaux à base de d'Arsénique, en particulier le GaAs et le BAs. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le code de calcul Wien2k pour déterminer les paramètres des matériaux puis le logiciel SCAPS pour étudier les performances des cellules solaires dont la couche active est l'un des deux matériaux en question. Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court-circuit I_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique n-i-p dont la couche HTL est le p-Si et la couche ETL est le n-Si associé au n-TiO₂.

Par la suite nous étudions l'influence de la température et l'épaisseur de la couche active sur les paramètres de sortie, surtout le rendement électrique de la structure.

Keywords: Solar cell, photovoltaic, GaAs, BAs, simulation, SCAPS