



Mémoire de fin d'étude

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

Physique des matériaux

Intitulé :
**Effets de la température sur les paramètres
photovoltaïques des cellules solaires
au silicium cristallin**

Présenté par : BORDJI Samir

Dirigé par : Dr. MELLAL Saida

Devant le jury :

- Khemissi Saad Eddine M.C.A Université Khenchela
- Zouiouche Mohamed M.C.A Université Khenchela

Année universitaire : 2022-2023

Dédicace

Tous les mots ne peuvent exprimer la gratitude, l'amour et le respect, c'est tout simplement que : je dédie ce travail à :

Ma petite et ma grande famille .

Remerciements

Je tiens par la présente à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour la précieuse contribution de mes enseignants et leur soutien inestimable tout au long de mon parcours.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement **Dr.MELLAL Saida**, mon encadrante, pour sa guidance éclairée et son dévouement exceptionnel tout au long de l'élaboration de mon mémoire. Votre expertise, votre patience et votre soutien constant ont été d'une valeur inestimable pour moi. Votre capacité à inspirer, à encourager et à diriger a grandement contribué à mon développement en tant que chercheur.

J'aimerais également exprimer ma gratitude envers tous les membres du département de physique des matériaux pour vos connaissances approfondies, votre passion pour la recherche et votre disponibilité pour discuter de mes idées et répondre à mes questions ont été d'une importance cruciale pour l'avancement de mon travail.

Enfin, j'adresse mes remerciements à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur compréhension tout au long de cette aventure académique exigeante.

Dédicace	I
Remerciements	II
Table des matières	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	1
<i>Chapitre I : Rayonnement solaire et conversion photovoltaïque</i>	
I.1.Introduction	3
I.2. Rayonnement solaire et masse d'air	3
I.3. Energie solaire	5
I.4. Interaction lumière /semiconducteur	6
I.5. Conversion photovoltaïque	8
I.6. La cellule photovoltaïque	9
I.6.1. Principe de fonctionnement	10
I.6.1.1. L'absorption de la lumière dans le matériau	11
I.6.1.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques	12
I.6.1.3. La collecte des charges	12
I.7. Différents types de cellules PV	13
I.7.1. Les cellules photovoltaïques à base de silicium	13
I.7.1.1. Cellules monocristallines	13
I.7.1.2 Cellules poly-cristallines	14
I.7.1.3. Cellules amorphes	14
I.7.1.4. Cellules nanocristallines	15
I.7.2. Les cellules photovoltaïques en couches minces	16
I.7.3. Les cellules photovoltaïques organiques	17
I.7.4. Les cellules hybrides	18
I.8. Conclusion du chapitre	19
<i>Chapitre II: Effets de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire au Silicium</i>	
II .1. Introduction	20
II.2. Modèle et caractéristique électrique de la cellule solaire	20

Table des matières

II.2.1. La modélisation électrique d'une cellule PV	20
II.2.2. Schéma électrique équivalent	21
II.2.3. Caractéristique électrique	21
II.2.4. Les zones de fonctionnement d'une cellule solaire	22
II.3 Grandeurs caractéristiques de la cellule	23
II.3.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	23
II.3.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}	24
II.3.3 Facteur de forme, FF	26
II.3.4 Rendement de conversion, η	26
II.4 Effet de la température sur les paramètres physiques de la cellule solaire au silicium	27
II.4.1 Le gap énergétique	27
II.4.2 La concentration intrinsèque	28
II.4.3 La masse effective	28
II.4.4. La durée de vie des porteurs	28
II.4.5 La mobilité	29
II.4.6. La constante de diffusion	30
II.4.7 Le coefficient d'absorption	31
II.4.8 Le coefficient de réflexion	32
II.5 Evolution des paramètres photovoltaïques en fonction de la température	33
II.5.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})	33
II.5.2 La tension en circuit ouvert (V_{co})	33
II.5.3 Le facteur de forme (FF)	34
II.6 Effet de la température sur les résistances parasites R_s et R_{sh}	34
II.7 Conclusion du chapitre	36
<i>Chapitre III : Simulation et discussion des résultats</i>	
III.1. Introduction	37
III.2. Influence de la température sur les paramètres physiques de la cellule au silicium	37
III.2.1 : Variation du gap d'énergie avec la température	37
III.2.2. Variation de la concentration intrinsèque avec la température	38
III.2.3 Variation de la durée de vie avec la température	39
III.2.4 Variation de la longueur de diffusion avec la température	40
III.2.5 Variation de la masse effective des porteurs avec la température	41

Table des matières

III.2.6 Variation de la mobilité des porteurs avec la température	42
III.3. Influence de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule au silicium	43
III.3.1. Présentation du logiciel SCAPS-1D	43
III.3.1.1 Fenêtre d'exécution (Action Panel)	45
III.3.1.2 Fenêtre de conception du dispositif (Set Problem)	46
III.3.1.3 Fenêtre de résultat	46
III.3.1.4 Edition de la structure d'une cellule solaire	49
III.3.1.5 Définition des propriétés des couches	50
III.3.2 Simulation de la cellule au silicium	51
III.3.2.1 Structure de la cellule étudiée	51
III.3.2.2 Les paramètres de la cellule solaire à simuler	51
III.3.2.3 Définition de la cellule solaire à base de silicium	52
III.3.3 Simulation par SCAPS	53
III.3.3.1 Caractéristique I-V à l'obscurité et sous éclairage	53
III.3.3.2 Caractéristique puissance-tension (P-V)	55
III.3.4 Effet de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) de la cellule solaire	55
III.3.5 Effet de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire	57
III.3.5.1 Courant de court-circuit	58
III.3.5.2 Tension de circuit ouvert	59
III.3.5.3 Facteur de forme	59
III.3.5.4 Puissance délivré	60
III.3.5.5 Rendement de conversion	61
III.3.6 Effet de la température sur les résistances parasites	62
III.3.6.1 La Résistance série (R_s)	62
III.3.6.2 La Résistance shunt (R_{sh})	63
III.6 Conclusion du chapitre	64
Conclusion générale	65
Références	67
Résumé	70

Liste des figures

Figure I.1	Répartition spectrale du rayonnement solaire	3
Figure I.2	Définition de l'air mass AMx	5
Figure I.3	Spectre électromagnétique	6
Figure I.4	Schéma montrant la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semiconducteur et un métal	7
Figure I.5	Effet de l'énergie lumineuse sur différentes bandes interdites Eg.	8
Figure I.6	Spectre du rayonnement solaire	8
Figure I.7	Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque simple	10
Figure I.8	Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairage	11
Figure I.9	Réflexion, transmission et absorption de la lumière	12
Figure I.10	Cellule photovoltaïques monocristalline	14
Figure I.11	Cellule photovoltaïques poly-cristalline	14
Figure I.12	Cellule photovoltaïque amorphe	15
Figure I.13	Cellule photovoltaïque en couche mince	17
Figure I.14	Cellule organique	18
Figure I.15	Image d'une cellule Grätzel	19
Figure II.1	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à jonction PN	21
Figure II.2	Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.	22
Figure II.3	La caractéristique typique d'une cellule solaire pour une illumination donnée	22
Figure II.4	Cellule photovoltaïque en court-circuit	24
Figure II.5	Cellule photovoltaïque en circuit ouvert	24
Figure II.6	Différents régimes de V_{oc} selon l'intensité d'éclairage	25
Figure II.7	Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire	27
Figure II.8	Effet de la température sur la réflectance	32
Figure III.1	Evolution du gap d'énergie du Si en fonction de la température	38
Figure III.2	Evolution de la concentration intrinsèque du Si en fonction de la température	39
Figure III.3	Variation de la durée de vie avec la température	40
Figure III.4	Variation de la longueur de diffusion avec la température	41
Figure III.5	Variation de la masse effective des électrons et des trous avec la température	42
Figure III.6	Variation de la mobilité des porteurs avec la température	43

Liste des figures

Figure III.7	Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal	46
Figure III.8	Panneau de définition de la structure	46
Figure III.9	Panneau des bandes d'énergie	47
Figure III.10	Panneau I-V avec visualisation des paramètres de la cellule	48
Figure III.11	Panneau du rendement quantique	49
Figure III.12	Définition de la structure d'une cellule solaire au Silicium	49
Figure III.13	Panneaux de définition des propriétés des couches	50
Figure III.14	schéma simplifié de la cellule solaire à simuler	51
Figure III.15	Schéma de la cellule solaire n-p en silicium à simuler	53
Figure III.16.a	Caractéristique (I-V) à l'obscurité.	54
Figure III.16.b	Caractéristique (I-V) sous éclairement	54
Figure III.17	Caractéristique (P-V) sous éclairement	55
Figure III.18	Courbes (I-V) pour différentes valeurs de la température	56
Figure III.19	Courbes (P-V) pour différentes valeurs de la température	56
Figure III.20	Evolution du courant de court-circuit (I_{cc}) en fonction de température	58
Figure III.21	La tension en circuit ouvert V_{co} d'une cellule solaire au silicium en fonction de la température	59
Figure III.22	Effet de la température sur le facteur de forme	60
Figure III.23	Evolution de la puissance maximale (P_{max}) en fonction de température	61
Figure III.24	Effet de la température sur le rendement	62
Figure III.25	Evolution de R_s en fonction de la température	63
Figure III.26	Evolution de R_{sh} en fonction de la température.	64

Liste des tableaux

Tableau I.1	Bandes interdites de quelques semi-conducteurs	7
Tableau III.1	Paramètres physiques du silicium introduits dans SCAPS	51
Tableau III.2	Valeurs des caractéristiques de la cellule simulée	55
Tableau III.3	Evolution avec la température de (V_{co}), (I_{cc}), (FF), (V_{max}), (I_{max}) et (η).	57

Introduction générale

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité ; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement [1].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques ou encore cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquence développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces derniers raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique I-V de la cellule solaire. D'où, l'importance de l'étude de l'influence de l'éclairement et de la température pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires.

En particulier, les performances électriques d'une cellule solaire au silicium sont très sensibles à la température [2]. Dans le présent travail, nous étudions pour une cellule solaire à base de silicium, l'influence de la température sur les paramètres physiques du silicium, matériau de base de la cellule, ainsi que le comportement en fonction de la température des principaux paramètres ; le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement (η) de conversion PV. Le présent travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous rappelons des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque ; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son

rayonnement puis nous décrivons le mécanisme de la conversion photovoltaïque, ainsi que l'élément convertisseur ; la cellule solaire, nous abordons sa structure et principe de fonctionnement. Nous avons également exploré les divers types de cellules solaires, notamment les cellules monocristallines, polycristallines et les cellules à couche mince.

Le deuxième chapitre porte dans un premier temps sur le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire, en faisant apparaître sa caractéristique électrique et ses paramètres photovoltaïques essentiels, ensuite on aborde le formalisme afférent à l'influence de la température sur les paramètres physiques et photovoltaïques de la cellule solaire au silicium.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus. Nous commençons par illustration de la variation des paramètres physiques du silicium en fonction de la température, tels que la hauteur de la barrière, la concentration intrinsèque la mobilité et la durée de vie des porteurs. Ensuite nous illustrons l'effet de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule étudiée, puis nous déterminons l'évolution des paramètres photovoltaïques en fonction de la température.

Chapitre I :

Rayonnement solaire et conversion photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie électrique peut être obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. Nous aborderons dans ce chapitre, en premier lieu, quelques notions sur la source d'énergie qui est le soleil, et les différentes applications associées à l'énergie solaire. Nous décrirons, ensuite, le principe de l'effet photovoltaïque, le fonctionnement des cellules chargées de la conversion photovoltaïque et leurs caractéristiques principales. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de différents types de cellules photovoltaïques et de leurs performances.

I.2 Rayonnement solaire et masse d'air

La répartition spectrale du rayonnement solaire [2] est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. la figure I.1 illustre la répartition spectrale réelle du rayonnement solaire hors atmosphère (qui est exprimée en $W/m^2.nm$ [2]) et la compare à celle d'un corps noir à 5900 K. On peut constater que le soleil se comporte de manière similaire à un corps noir.

La figure I.1, montre aussi, l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5 (on la définit ci-dessous), soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° « $h=41.8^\circ$ » au niveau de la mer (altitude nulle).

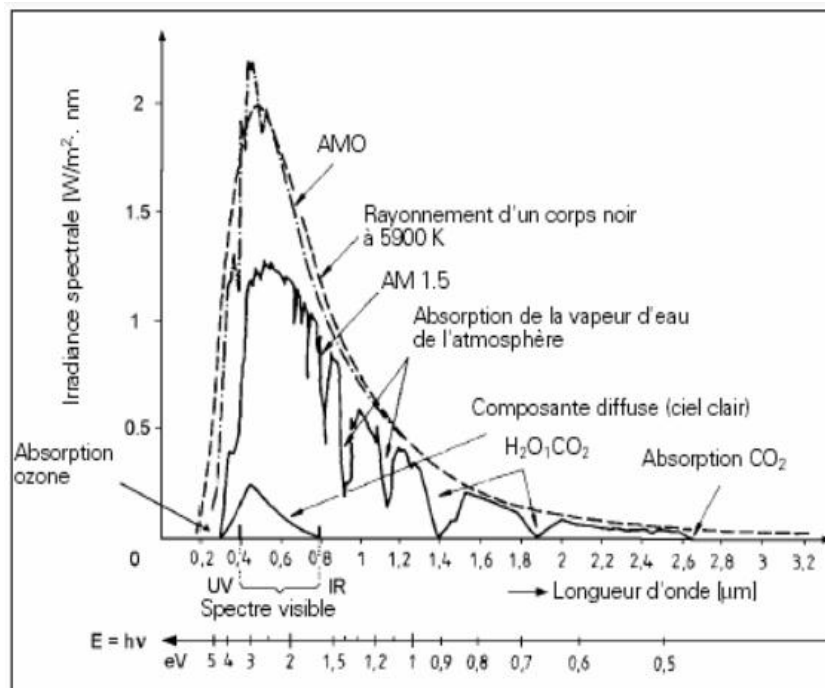


Figure I.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire : Hors atmosphère (AM0); b) A l'incidence 41.8° (AM1,5) [3].

Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre en incidence normal est constant et voisin de 1353 W/m^2 [3]. Le rayonnement solaire reçu au sol traversant les différentes couches atmosphériques ; l'atmosphère modifie ce spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux [4]:

- L'absorption par les différentes molécules gazeuses entrant dans sa composition [4]: 78 % d'azote (N_2), 21 % d'oxygène (O_2), 0.9 % d'argon (Ar), 0.03 % de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres gaz ainsi que la vapeur d'eau (H_2O) «très variable de 0 à 4 %» et une couche mince d'ozone (O_3) dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus puissants.
- La diffusion moléculaire de Rayleigh : c'est la diffusion due aux molécules de gaz constituant l'atmosphère et dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière [4].
- La présence de particules telles que les aérosols, la poussière et les nuages provoque une diffusion du rayonnement solaire, ce qui a pour effet de réduire le flux énergétique solaire optimal atteignant la surface de la Terre à environ 1000 W/m^2 . De plus, le spectre du rayonnement solaire est décalé vers le rouge par rapport à celui observé en dehors de l'atmosphère [5]. Ce spectre varie non seulement entre l'espace et la surface terrestre, mais également selon les différents endroits sur Terre. Le nombre de masse d'air est utilisé comme une caractéristique globale pour décrire ce phénomène.

On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais [3], le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure I.2). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil h .

À l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure (I.4), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.1})$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.2})$$

La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension AM_x , x étant [3]:

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I. 3})$$

Citons, à titre d'exemple :

- $AM1$: position du Soleil au zénith; $h=90^\circ$, (au niveau de la mer).
- $AM2$: le Soleil à 30° .
- $AM1,5$: le Soleil à 41.8° .

Et par convention, $AM0$ désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales).

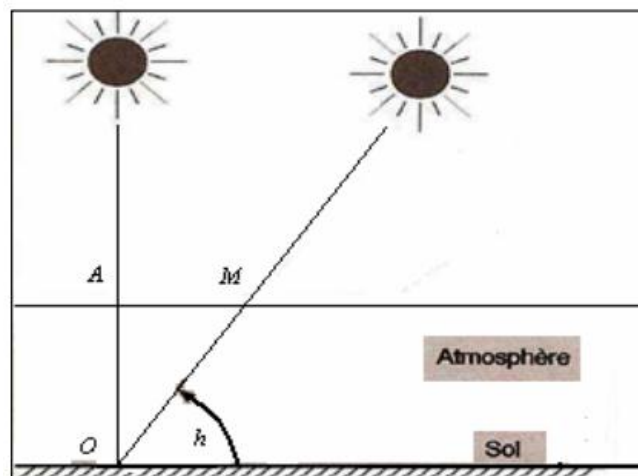
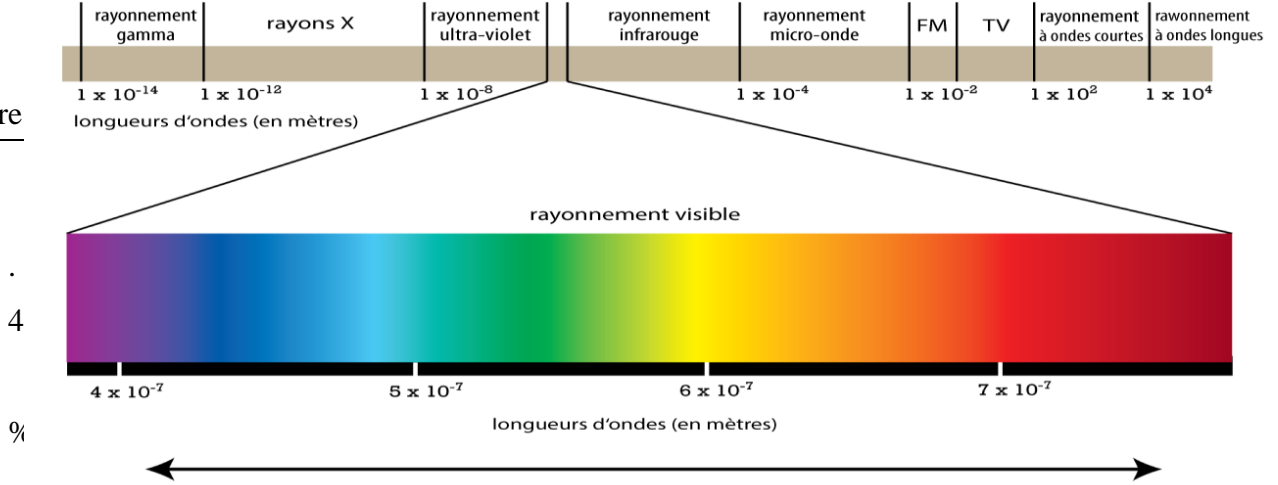


Figure I.2 : Définition de l'air Mass AM_x [3].

I.3 Energie solaire

Les spectres révèlent que le rayonnement électromagnétique émis par le soleil se situe dans une plage de longueurs d'onde allant de $0,2 \mu\text{m}$ (ultraviolet) à $10 \mu\text{m}$ (infrarouge). La figure I.3 montre la partie visible du spectre électromagnétique.



dans la bande ultraviolette (UV) : $0,2 < \lambda \leq 0,38 \mu\text{m}$.

- 48,0 % dans la bande visible : $0,38 < \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$.
- 45,6 % dans la bande infrarouge (IR) : $0,78 < \lambda \leq 10 \mu\text{m}$.

Figure I.3 : Spectre électromagnétique [4]

Ce rayonnement solaire est divisé en différentes bandes, telles que : [3] :

Les grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique (photons), sont considérés comme des porteurs d'énergie associés à leur longueur d'onde par la relation suivante:[5]

$$E = h \times \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I. 4})$$

Avec :

- ν : la fréquence en hertz
- λ est la longueur d'onde en micromètres .
- h est la constante de Planck . ($h=6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) .
- c est la vitesse de la lumière . ($c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$) .

I.4 Interaction lumière /semiconducteur

Les matériaux semi-conducteurs sont caractérisés par leur bande interdite (ou gap), c'est-à-dire la différence d'énergie entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction (E_g). Seuls les photons dont l'énergie est comparable au gap du semi-conducteur vont être susceptibles de créer des paires électron_trous ($h\nu \sim E_g$) qui participent à la conduction d'un courant électrique. La région spectrale où l'absorption est maximum dépend donc de la valeur du gap des matériaux. Les semi-conducteurs utilisés dans

les cellules solaires ont généralement un gap qui coïncide au mieux avec le maximum d'émission du soleil (~500nm).

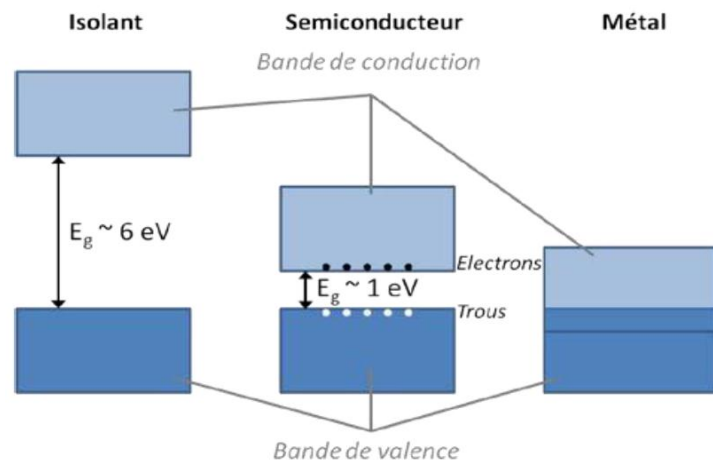


Figure I.4 : Schéma montrant la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semiconducteur et un métal.

Le tableau 1 montre les valeurs de la bande interdite de quelques semi-conducteurs.[6]

Semi-conducteur	Bande interdite (eV) à 300K
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
Inp	1.34

Tableau 1 : Bandes interdites de quelques semiconducteurs

La figure I.5 permet de comprendre le concept d'absorption de la lumière. Lorsque la lumière a une énergie supérieure à 1,1 eV pour le silicium, celui-ci génère de l'électricité. En revanche, la lumière d'énergie inférieure à 1,1 eV est inutile. Pour l'arséniure de gallium, une lumière d'énergie supérieure à 1,43 eV excite ses électrons de la couche extérieure. Enfin, l'arséniure de gallium aluminium requiert une lumière d'énergie supérieure à 1,7 eV.

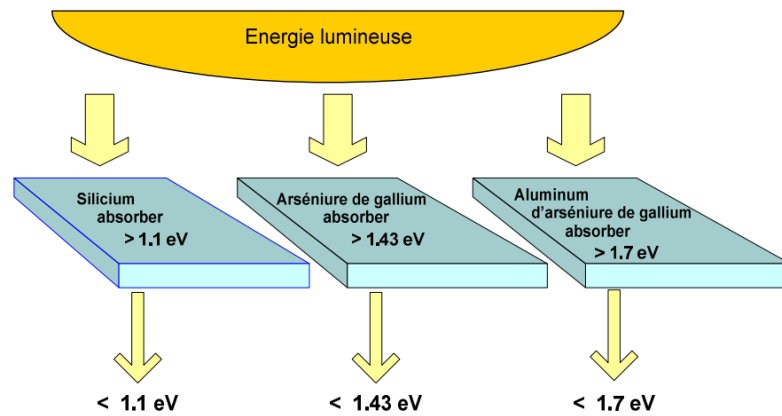


Figure I.5 : Effet de l'énergie lumineuse sur différentes bandes interdites E_g .

Donc pour qu'il y ait création des paires électrons-trous, il faut que l'énergie transportée par les photons arrivant au dispositif soit supérieure ou égale à la bande interdite du matériau semi-conducteur utilisé ; c'est-à-dire $E \geq E_g$.

La figure I-6 représente la gamme du rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible et les longueurs d'ondes correspondantes.

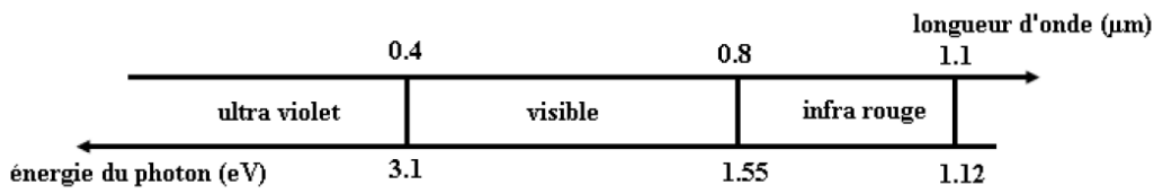


Figure I-6 : Spectre du rayonnement solaire

1.5 Conversion photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité.

Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque.

Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique.[8]

I.5.1 Mécanisme de conversion

Les différents processus qui entrent en jeu durant cette conversion sont résumés comme suit [8]:

Une cellule solaire est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons incidents (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des porteurs générés dans le dispositif.

Afin de recueillir les particules générées, un champ électrique est nécessaire pour dissocier les paires électron-trou créées. Pour cela, une jonction p-n est souvent utilisée, bien que d'autres structures telles que les hétérojonctions puissent également être utilisées.

I.6 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur électronique capable de générer un courant électrique en réponse au rayonnement solaire (photons) grâce à l'effet photovoltaïque.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure I.7.

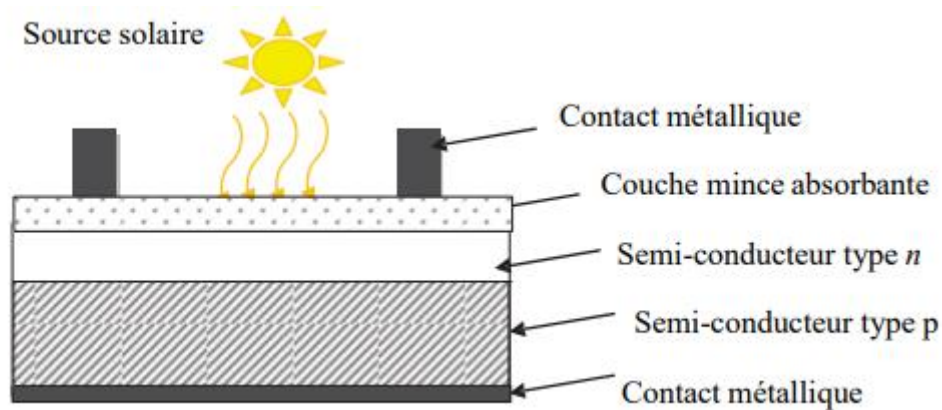


Figure I.7 : Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque simple.[10]

La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette de matériau semi-conducteur, où la jonction P-N représente le cœur de la cellule photovoltaïque; elle représente le vrai générateur dans le dispositif.

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photogénérés, pour ça; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [10].

I.6.1 Principe de fonctionnement

Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (I.8).

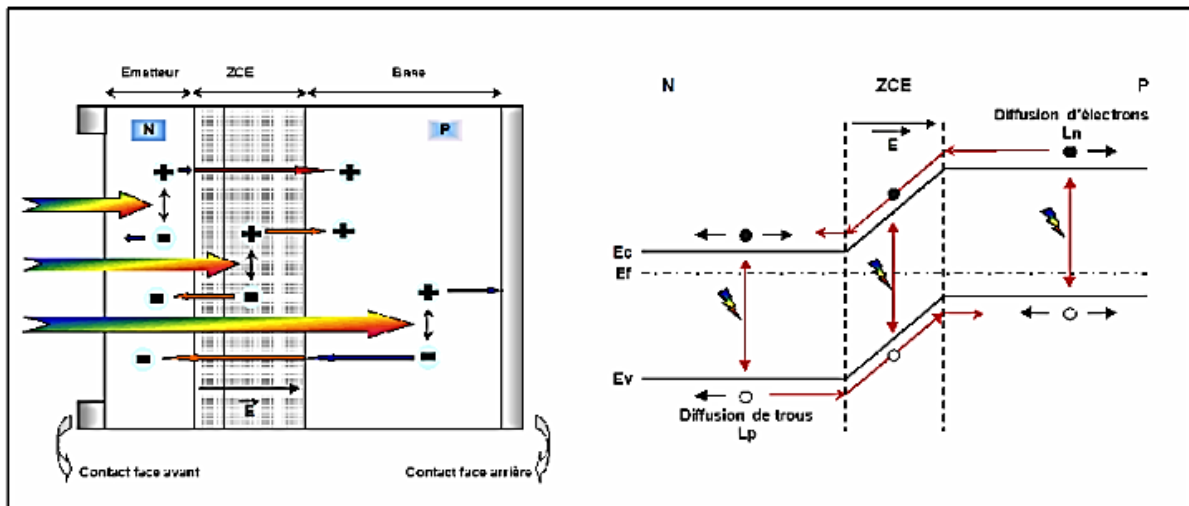


Figure. I. 8: Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairage [12].

I.6.1.1 L'absorption de la lumière dans le matériau

La lumière se compose de photons, dont l'énergie dépendant de sa longueur d'onde. Ces photons peuvent pénétrer dans certains matériaux, et généralement, un rayon qui arrive sur un solide subit les événements optiques suivants :

- la réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;
- la transmission : la lumière traverse l'objet ;
- l'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

Ce sont les propriétés optiques du matériau rencontré qui conditionnent la répartition de ces diverses contributions.

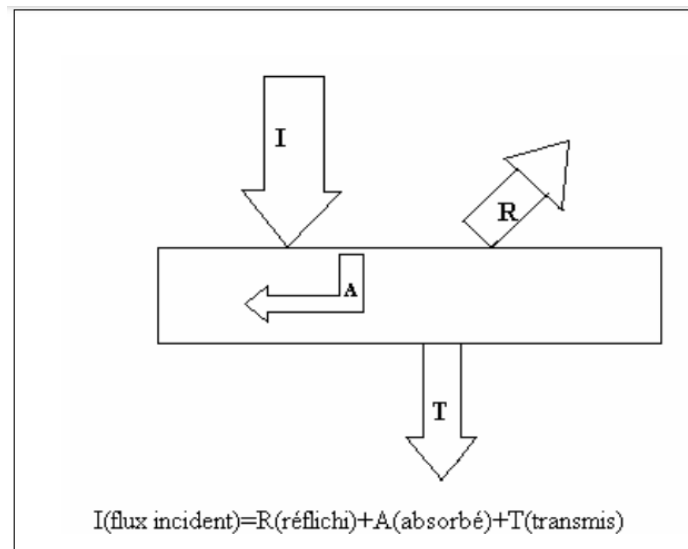


Figure 1.9 : Réflexion, transmission et absorption de la lumière

I.6.1.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité.

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Ces électrons seront alors, si l'énergie apportée par le photon le permet, autrement dit si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau, libérés de l'attraction de l'atome. Il y aura, par conséquent, création d'un électron libre et d'un trou. Ce phénomène peut être mis en jeu dans les semi-conducteurs [14].

I.6.1.3 La collecte des charges

Les photons incidents génèrent des paires électron-trou dans les régions de type N et P et dans la zone de charge d'espace. Les paires électron-trou générés se comportent différemment suivant la région :

- Dans la zone N et P, les porteurs minoritaires diffusent. Ce qui atteint la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la zone P (pour les trous) et vers la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Ce transport porteur de charges engendre un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou photogénèses vont être entraîné par le champ électrique vers la région N (électrons) et la région P (trous). Ce

déplacement des photo-porteurs donne naissance à un photo courant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photo-courant total I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [15]

La présence de contacts ohmiques assure le bon cheminement des porteurs qui créent le courant photo-généré I_{ph} .

I.7 Différents types de cellules PV

On a utilisé différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques et augmenter le rendement. On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures [16].

I.7.1 Les cellules photovoltaïques à base de silicium

Le silicium est le matériau de base des photopiles. En effet, malgré l'arrivée de nouvelles technologies, telles que les cellules à couches minces ou les cellules organiques, le silicium reste le matériau dominant dans l'industrie photovoltaïque en raison de son efficacité, de sa durabilité et de sa disponibilité en grande quantité. Les nouvelles recherches visent notamment à améliorer l'efficacité des cellules en réduisant les pertes de charge, à diminuer les coûts de production en réduisant l'épaisseur des cellules, à explorer de nouvelles formes de silicium comme le silicium noir, ainsi qu'à développer des technologies permettant de récupérer et de recycler le silicium utilisé dans les panneaux photovoltaïques en fin de vie [17].

I.7.1.1 Cellules monocristallines

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches.

- constituée d'un seul cristal.
- couleur gris bleuté, ou noir.
- La première génération de photopiles.
- Rendement excellent (15 -22%).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).



Figure I.10 : Cellule photovoltaïque monocristalline

I.7.1.2 Cellules poly-cristallines

Les cellules polycristallines sont fabriquées à partir d'un assemblage de cristaux. Elles sont également issues du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et donc hétérogènes. Les caractéristiques des cellules polycristallines sont les suivantes :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.



Figure I.11 : Cellule photovoltaïque poly-cristalline

I.7.1.3 Cellules amorphes

Les cellules amorphes, bien qu'elles ne soient pas cristallines, ont un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cela signifie qu'elles sont capables d'absorber une plus grande quantité de lumière solaire. Cependant, en raison de leur structure amorphe, les électrons ont une mobilité réduite, ce qui entraîne un rendement de conversion plus faible par rapport aux cellules cristallines.

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Efficacité plus bas 8-10%
- Durée de vie plus faible.[18]



Figure I.12: cellule photovoltaïque amorphe

I.7.1.4 Cellules nanocristallines

Une des dernières générations de photopiles. Fonctionne selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques.

- Rendement global de 10,4%.
- Procédé et coût de production encore plus bas[19].

Les performances d'efficacité énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces [13].

Les avantages du silicium sont :

- Ce semi-conducteur de type IV se dope facilement avec du bore et du phosphore
- Le Silicium est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre : O_2 (46%), Si (28%), Al (8%).
- Il possède un oxyde naturel SiO_2 présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- Les technologies de production sont aujourd'hui matures et leur industrialisation ne pose pas de difficulté.
- Les cellules PV offrent un rendement de conversion élevé.

- La durée de vie et le vieillissement des cellules PV sont maîtrisés.

Les inconvénients de cette technologie sont :

- Un coût de fabrication élevé.
- Une performance qui diminue fortement lorsque la température de module augmente
- Une performance qui diminue fortement à faible éclairement.
- Presque aucune flexibilité d'utilisation (surface rigide...).
- Un gap indirect à 1.12 eV : pour absorber 90% de l'énergie reçue, il faudrait une épaisseur de 100 μm , ce qui est conséquent notamment par rapport aux couches minces que nous verrons par la suite. De plus, cela fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part maximale du spectre solaire [20].

I.7.2 Les cellules photovoltaïques en couches minces

Ces cellules sont composées d'une couche mince de semi-conducteur entre 10 μm à 100-200 μm déposé sur un substrat tel que le verre, plastique, céramique, métal ou graphite [17]. Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées dont trois voies qui semblent s'imposer, même si cela ne représente actuellement pas plus de 20% du marché PV: le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et les combinaisons à partir du diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté).

Elles présentent les avantages suivants :

- Un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrications peu onéreux : utilisation de verre de faible qualité ou de polymères comme substrat, sur lesquels on dépose une mince couche active.
- Une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats souples.
- La possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes

Les principaux inconvénients sont :

- Le rendement encore faible.
- La rareté de certains matériaux.

- La toxicité de certains matériaux.

Les couches minces nécessitent beaucoup moins de matières que le silicium cristallin (moins de $1\mu\text{m}$ contre $100\mu\text{m}$ pour le silicium cristallin).

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

- ✓ **Silicium en couches minces** : rendements dans l'industrie assez faible, de l'ordre de 6 à 8% (13.4%, record cellule en laboratoire). Le processus de fabrication présente en revanche des coûts peu onéreux
- ✓ **Cuivre-indium-diséléniure (CIS) ou cuivre-indium-gallium-séléniure (CIGS)** : leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minimale, mais fabrication très délicate [21].
- ✓ **Cadmium-tellure (CdTe)** : rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [21].
- ✓ **Gallium Arsenic (GaAs)**: leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [15]. Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale.

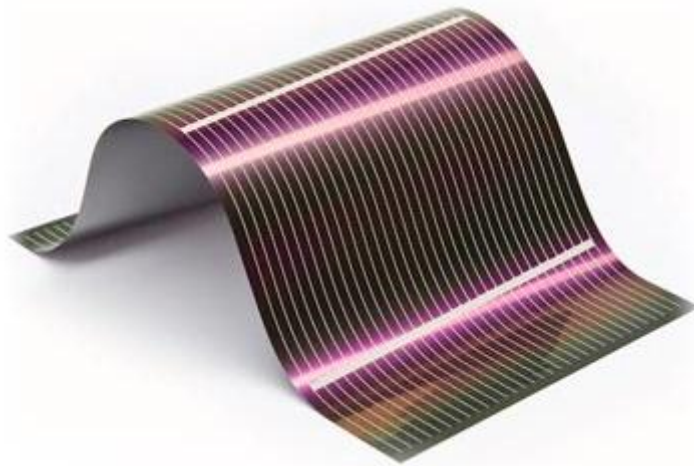


Figure I.13: cellule photovoltaïque en couche mince [22]

I.7.3 Les cellules photovoltaïques organiques

Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organiques, tel que les polymères. Leur rendement est de 5 % [23].

Le semi-conducteur utilisé est un polymère comme par exemple le poly acétylène. Des recherches sont en cours afin que toutes les couches de la cellule soient de nature polymère. L'objectif est de manipuler un seul type de matériau et donc une même technologie tout au long du processus de fabrication.

Elles présentent les avantages suivants :

- Forte absorption optique,
- Substrats variés
- Techniques de dépôt assez simple.
- Réaliser de grandes surfaces
- Cellules légères flexibles
- Coût de fabrication faible.

Les principaux inconvénients sont :

- Manque de stabilité dans le temps
- Longévité des cellules n'est toujours pas maîtrisée [23].



Figure I.14: Cellule organique

I.7.4 Les cellules hybrides

C'est une nouvelle génération de cellules solaires, elles sont moins chères. Elles utilisent des matériaux organiques et inorganiques à base de semi-conductrice nanostructure. Ces cellules sont flexibles. Parmi ces cellules, nous avons les cellules Grätzel. Ce sont des

cellules nanocristallines à colorant. Elles sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique [24].

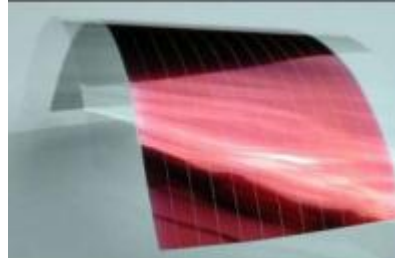


Figure I.15 : Image d'une cellule Grätzel [24]

I.8 Conclusion du chapitre

En conclusion, ce chapitre a exploré le lien essentiel entre le rayonnement solaire et la conversion photovoltaïque. Nous avons d'abord examiné quelques notions sur la source d'énergie qui est le soleil, et les différentes applications associées à l'énergie solaire.

Nous nous sommes ensuite plongés dans les principes fondamentaux de l'interaction entre la lumière et les semi-conducteurs, qui sont à la base de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Nous avons exploré comment les photons solaires excitent les électrons dans les matériaux semi-conducteurs, créant ainsi des paires électron-trou. Grâce à cet effet photoélectrique, les semi-conducteurs peuvent convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique utilisable.

L'accent a ensuite été mis sur les cellules solaires, qui sont les dispositifs de conversion photovoltaïque les plus couramment utilisés. Nous avons découvert les différentes couches et composants qui composent une cellule solaire typique, y compris les jonctions p-n et les matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Nous avons également exploré les divers types de cellules solaires, notamment les cellules monocristallines, polycristallines et les cellules à couche mince.

Chapitre II :
Effets de la température sur les paramètres photovoltaïques
de la cellule solaire au Silicium

II.1 Introduction

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. Dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées aux températures du fonctionnement variant de 10 à 50 °C.

L'énergie du rayonnement solaire n'est pas totalement transformée en électricité. Une bonne partie du rayonnement est simplement réfléchi sur la surface de la cellule. Une autre partie de l'énergie apportée par la lumière pénètre parfaitement, mais ne sert qu'à augmenter l'agitation thermique (l'échauffement) et donc la température de la cellule.

Les paramètres caractéristiques (photovoltaïques) des cellules solaires, à savoir le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion PV (η) sont influencés par la température. La dépendance de ces paramètres avec la température est étudiée pour une cellule solaire au silicium sous un éclairage constant (1000 W/m²).

II.2 Modèle et caractéristique électrique de la cellule solaire

II.2.1 La modélisation électrique d'une cellule PV

Le Modèle d'une cellule solaire à jonction PN, décrite précédemment, peut être équivalent à une diode (pour modéliser la jonction PN) et un générateur de courant continu, I_{ph} (pour modéliser le courant photogénéré). Pour tenir en compte les limitations de la cellule et de même calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comprenant une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} [2].

Une cellule solaire reliée à une charge extérieure et soumise à l'éclairage solaire débite un courant qui va se répartir entre la charge et sa structure interne. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors[2]:

$$I(V) = I_{ph} - I_D(V) = I_{ph} - I_s \left[e^{q(V+R_s I)/nKT} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

I : le courant total produit par la cellule [A]

V : la tension délivrée par la cellule [V]

I_{ph} photocourant, ou courant généré par l'éclairage [A],

I_D le courant traversant la diode [A],

I_s le courant de saturation de la diode [A],

q la charge élémentaire,

k la constante de Boltzmann,

T la température.

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

R_s la résistance série: elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, et doit être la plus faible que possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

R_{sh} la résistance shunt, connue sous le nom de court-circuit, elle tient compte des fuites à travers la cellule et peut être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.

II.2.2 Schéma électrique équivalent

Selon le modèle décrit précédemment, le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (II-1) par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh}).

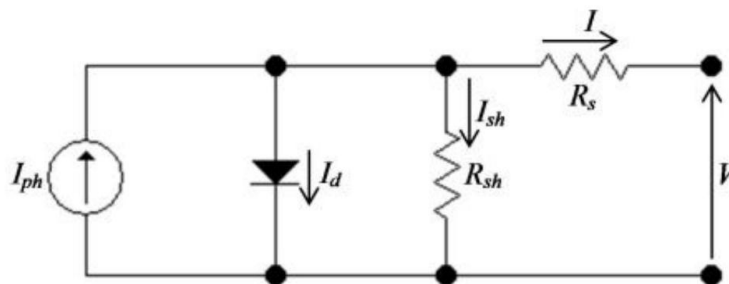


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à jonction PN[1]

II .2.3 Caractéristique électrique

La variation du courant « A » (ou densité du courant « A/cm² ») en fonction de la tension « V », à l'obscurité et en particulier sous éclaircissement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure (II.2) montre deux exemples de caractéristiques I(V) d'une cellule solaire sans et avec éclaircissement.

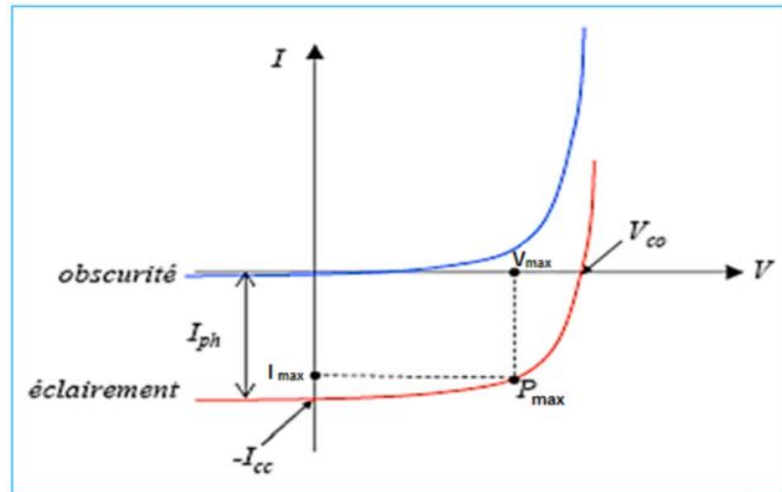


Figure II.2 : Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la figure II.2, les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en bleu, et sous illumination en rouge. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} , qui traduit la génération constante du courant par la lumière.

II.2.4 Les zones de fonctionnement d'une cellule solaire

La caractéristique $I(V)$ se divise en trois parties :

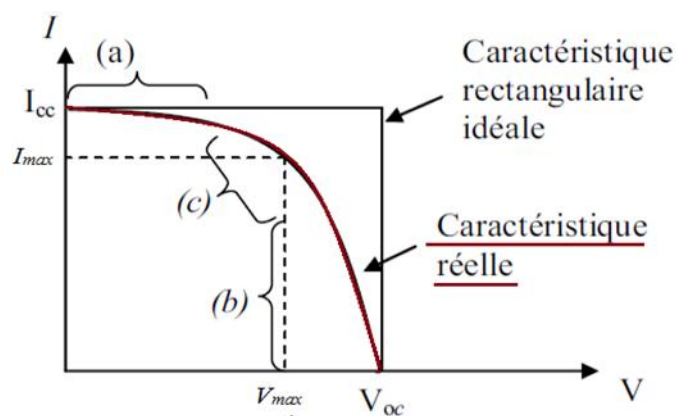


Figure II.3 : La caractéristique typique d'une cellule solaire pour un illumination donnée .

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.

- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} .

- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [24]

II.3 Grandeurs caractéristiques de la cellule

A partir de la caractéristique typique courant-tension de la cellule photovoltaïque (Figure II.3) on peut déterminer ses paramètres caractéristiques principales à savoir :

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

Des brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après.

II.3.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit exprimé en mA , est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement et en court-circuitant les bornes de la cellule. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçu. [25]

Tenant compte de l'effet des résistances R_s et R_{sh} ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

Il obtenu pour une tension de sortie nulle :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{R_s I_{cc}}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.3})$$

Dans le cas d'une cellule idéal : $R_s \rightarrow 0$, $R_p \rightarrow \infty$

Le courant de court-circuit I_{cc} se confonde avec le photo courant I_{ph} :

$$I_{cc} \cong I_{ph} \quad (\text{II.4})$$

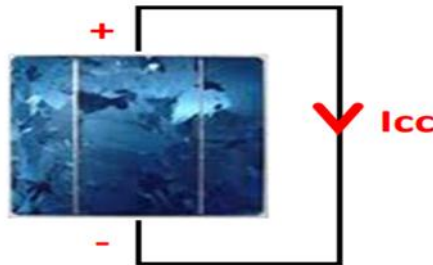


Figure II.4 : Cellule photovoltaïque en court-circuit

II.3.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infini. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN,...), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [26]

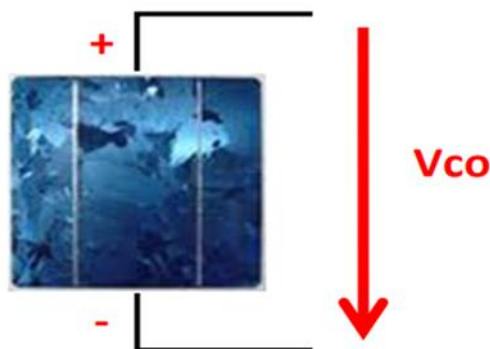


Figure II.5 : Cellule photovoltaïque en circuit ouvert

$$V_{co}(I = 0) = nV_T \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.5})$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement :

- Régimes des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \approx \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{D'où : } V_{co} = nV_T \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.7})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule, la formule précédente peut s'écrire aussi :

$$V_{co} = R_0 \cdot I_{ph} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Avec : } R_0 = \frac{n \cdot V_T}{I_s} \quad (\text{II.9})$$

R_0 : st la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, Soit : $\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1$

$$\text{D'où : } V_{co} = nV_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.10})$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

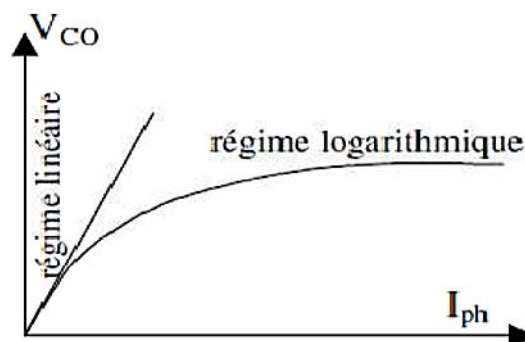


Figure II.6 : Différents régimes de V_{co} selon l'intensité d'éclairement. [27]

II.3.3 Facteur de forme, FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la *cellule*). Cette puissance est maximale (notée $P_m = P_{max}$) pour un point de fonctionnement P_m ($I_m = I_{max}$, $V_m = V_{max}$) de la courbe courant-tension.

Le facteur de forme qualifie la qualité d'une cellule PV : c'est le facteur de remplissage ou Fill Facteur (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$, plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. [28]

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II.11)$$

II.3.4 Rendement de conversion, η

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (II.12)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique.

En circuit ouvert $P_m = 0$, $V = V_{co}$ ou en court-circuit $R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$, aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée : $P_m = P_{max}$ (figure II.7).

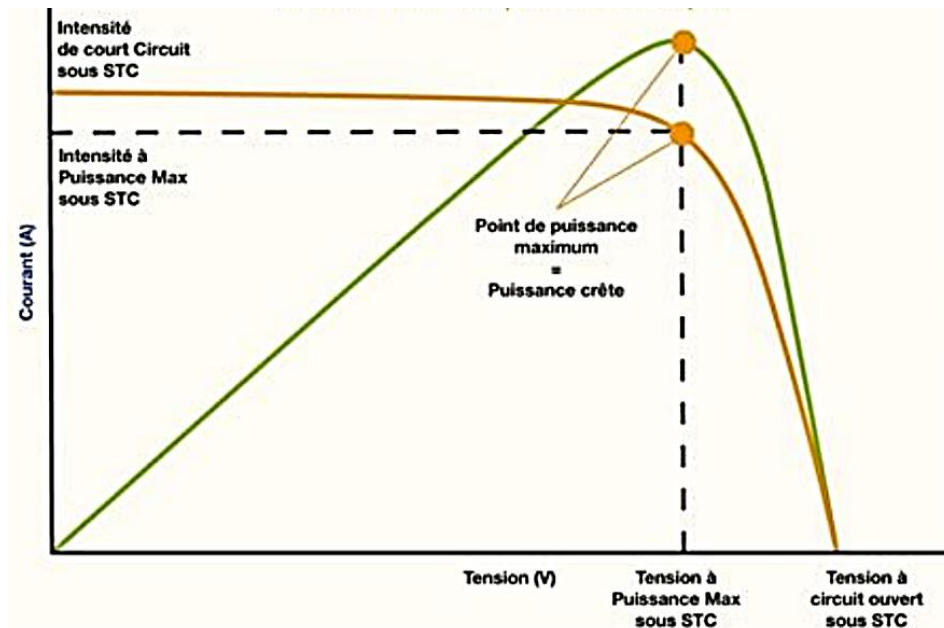


Figure II.7 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire

II.4 Effet de la température sur les paramètres physiques de la cellule solaire

Les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire sont influencées par plusieurs grandeurs tels que : les résistances série R_s et parallèle R_{sh} (shunt), le courant I_{ph} de photocourant, le facteur d'idéalité n de la diode, le courant de saturation I_s . Tous ces paramètres dépendent implicitement des propriétés intrinsèques et extrinsèques des matériaux qui la composent comme l'énergie du gap des semi-conducteurs, de la concentration intrinsèque n_i , des masses effectives et mobilités des porteurs du Silicium dont les expressions théoriques ont été introduites dans les programmes de calculs. Toutes ces propriétés évoluent en fonction de la Température T . Ces paramètres sont très importants dans le comportement des cellules solaires ; car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celles-ci.

II.4.1 Le gap énergétique

L'énergie de la bande interdite varie en fonction de la température selon une loi empirique donnée par [25]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \times T^2}{\beta + T} \quad (\text{II.13})$$

Où :

T est la température de mesure.

α, β sont des constantes dépendants des caractéristiques du matériau et des phases.

pour le silicium :

$$\alpha = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ [eV / } ^\circ\text{K]}$$

$$\beta = 636 \text{ K}$$

$E_g(0) = 1,17 \text{ [eV]}$ est l'énergie du gap à 0°K .

II.4.2 La concentration intrinsèque

L'expression de la concentration intrinsèque « n_i » est donnée par :

$$n_i(T) = \sqrt{N_c N_v} \times \exp\left(-\frac{E_g(T)}{2KT}\right) \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : } N_c = 2 \times \left(\frac{2\pi KT m_e^*}{h^2}\right)^{3/2} \quad \text{et} \quad N_v = 2 \times \left(\frac{2\pi KT m_t^*}{h^2}\right)^{3/2} \quad (\text{II.15})$$

Elle dépend fortement de la température à travers le terme exponentiel, ainsi que le produit des densités d'état effectives « $N_c \times N_v$ » qui sont proportionnelles à « T^3 » doublant tout les 11°C . Cette dépendance est d'autant plus faible que la largeur de la bande interdite est plus importante.

II.4.3 La masse effective

Les masses effectives des électrons et des trous tirent leur origine de l'interaction de ces derniers avec le potentiel périodique du cristal. Elles varient en fonction de la température selon les deux lois : [26]

$$m_e^*(T) = m_0 \times (1.054 + 4.5 \times 10^{-4} \times T) \quad (\text{II.16})$$

$$m_t^*(T) = m_0 \times (0.523 + 1.4 \times 10^{-3} \times T - 1.48 \times 10^{-6} \times T^2) \quad (\text{II.17})$$

Tel que : $m_0 = 9.109 \times 10^{-31} \text{ [Kg]}$

II.4.4. La durée de vie des porteurs

Les durées de vie des électrons et des trous varie en fonction de la température selon la loi [26] :

$$\tau_{e,t}(T) = \tau_{e,t}^0 \times \left(\frac{T}{300}\right)^\alpha \quad (\text{II.18})$$

Pour le silicium, $\alpha = -0.5$

$$\tau_e^0 \approx \tau_t^0 \approx 10^{-6} \text{ (s)} \quad (\text{II.19})$$

II.4.5 La mobilité

La mobilité des porteurs de charge dans un semi-conducteur est affectée par trois types d'interactions qui sont :

- Collisions avec les phonons (dont l'origine est liée à l'agitation thermique des atomes du réseau cristallin) ;
- Chocs sur les défauts du cristal .
- Chocs sur les impuretés ionisées.

Puisque les trois modes de collision sont indépendants, leurs probabilités s'ajoutent, et par suite, d'après [27], la variation de la mobilité totale en fonction de la température est donnée par la relation :

$$\frac{1}{\mu_{e,t}^{tot}} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_C} = \frac{1}{\mu_{IL}} + \frac{1}{\mu_C} \quad (\text{II.20})$$

Où : μ_L est la mobilité due au réseau.

μ_I est la mobilité due aux impuretés.

μ_C est la mobilité due aux impuretés ionisées.

$$\mu_C = \frac{1.04 \times 10^{21} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{vs}} \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{n.p} \times \ln \left[1 + 7.45 \times 10^{-2} \times \left(\frac{T}{300}\right)^2 \times (n.p)^{-1/3} \right]} \quad (\text{II.21})$$

$$\mu_e^{LI} = \frac{1252 \frac{cm^2}{vs} \left(\frac{T}{300}\right)^{-2.33}}{1 + \frac{CI}{1.432 \cdot 10^{17} cm^{-3} \times \left(\frac{T}{300}\right)^{2.546}}} + 88 \frac{cm^2}{vs} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.57} \quad (II.22)$$

$$\mu_I^{LI} = \frac{407 \frac{cm^2}{vs} \left(\frac{T}{300}\right)^{-2.546}}{1 + \frac{CI}{2.67 \cdot 10^{17} cm^{-3} \times \left(\frac{T}{300}\right)^{2.546}}} + 54.3 \frac{cm^2}{vs} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.57} \quad (II.23)$$

Tel que :

T : La température.

n, p : Les concentrations des électrons et des trous respectivement.

CI : La concentration des impuretés ionisées.

A basse température, l'agitation thermique des atomes est faible ; les deux dernières catégories de chocs déterminent la valeur de la mobilité. A l'inverse, à forte température la mobilité dépend surtout des chocs sur les phonons. Enfin, l'augmentation de la température se traduit donc par une diminution de la mobilité.

II.4.6. La constante de diffusion

La diffusion existe même en l'absence d'une force appliquée au cristal, en particulier d'origine électrique. Dans un cristal semi-conducteur, la diffusion est due uniquement au caractère inhomogène du matériau, du fait par exemple de l'inégalité de la répartition des impuretés introduites lors du dopage. Elle se manifeste par la formation de mouvements ordonnés de particules qui sont les porteurs de charge mobiles « électrons et trous ». Le processus cesse lorsque la répartition est uniforme. Enfin, la relation d'Einstein permet d'obtenir les expressions des constantes de diffusion pour les électrons et les trous en fonction de la température soit :

$$D_{e,t}(T) = \frac{KT}{q} \times \mu_{e,t} \quad (II.24)$$

II.4.7 Le coefficient d'absorption

Du fait que le silicium est un semi-conducteur à gap indirect, l'absorption de la lumière est assistée par l'absorption ou l'émission des phonons. D'après [28], la variation du coefficient d'absorption en fonction de la température est donnée par :

$$\alpha(T) = \sum_{i,j=1,2} A_j C_i \times \left[\frac{(hv - E_{g,j} - E_{ph,i})^2}{\exp\left(\frac{E_{ph,i}}{KT}\right) - 1} + \frac{(hv - E_{g,j} - E_{ph,i})^2}{1 - \exp\left(-\frac{E_{ph,i}}{KT}\right)} \right] + A_d \times \frac{(hv - E_{g,d})^{3/2}}{hv} \quad (\text{II.25})$$

Tel que (Pour le silicium) :

$$E_{g,1} = 1.16 \text{ [eV]}$$

$$E_{g,2} = 2.25 \text{ [eV]}$$

$$E_{g,d} = 3.2 \text{ [eV]} \text{ Bande directe}$$

Et les énergies des phonons sont :

$$E_{ph,1} = 212 \times k \text{ (k est la constante de Boltzmann)}$$

$$E_{ph,2} = 670 \times k$$

$$C1 = 5.5$$

$$C2 = 4$$

$$A1 = 253 \text{ [cm}^{-1} \text{ eV}^{-2}\text{]}$$

$$A2 = 3312 \text{ [cm}^{-1} \text{ eV}^{-2}\text{]}$$

$$A_d = 2.3 \times 10^7 \text{ [cm}^{-1} \text{ eV}^{-2}\text{]}$$

Le premier terme représente l'absorption des phonons, tandis que le deuxième représente l'émission des phonons pendant l'absorption de la lumière. Le troisième terme donne l'absorption pour une transition directe. Expérimentalement, le coefficient d'absorption est modélisé par la formule mathématique suivante pour le silicium qui ne dépend pas de la température [30] :

$$\alpha(\lambda) = 0.526367 - 1.14425 \times \lambda^{-1} + 0.585368 \times \lambda^{-2} + 0.039958 \times \lambda^{-3}$$

II.4.8 Le coefficient de réflexion

H.A. Weakliem et al ont essayé d'étudier la réflexion du silicium en fonction de la température [36], ils ont mesuré expérimentalement la réflectivité à trois températures différentes 299 K – 413 K – 516 K pour des énergies de photons de 2,5 jusqu'à 3,8 [eV]. La variation de la réflectivité obtenue est représentée sur la figure ci-dessous :

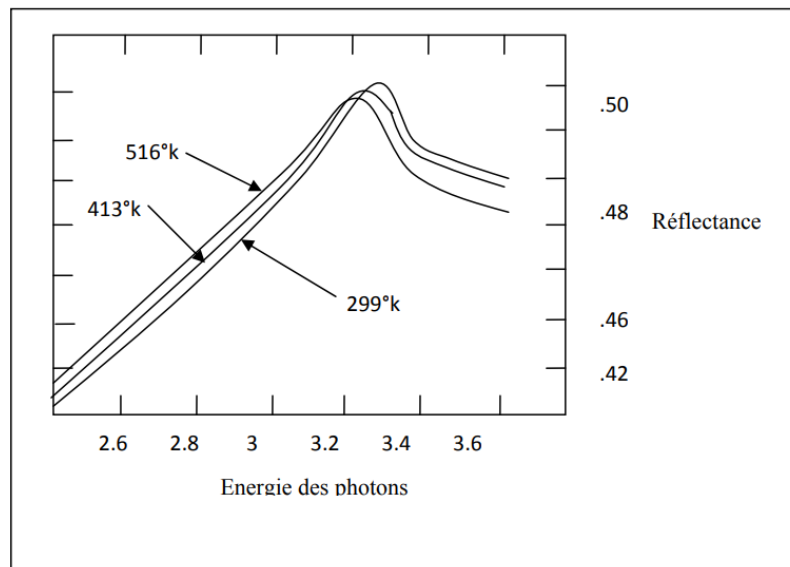


Figure II.8 : Effet de la température sur la réflectance

Cette variation paraît comme un décalage du spectre entier vers le rouge. Pour de longues longueurs d'onde, ceci produit un léger accroissement de la réflectivité :

$$\frac{1}{R} \times \frac{\Delta R}{\Delta T} = 1.5 \times 10^{-4} [K^{-1}] \quad (\text{II.26})$$

Cette dernière correspond à une petite augmentation de l'indice de réfraction :

$$\frac{1}{n} \times \frac{\Delta n}{\Delta T} = 1.3 \times 10^{-4} [K^{-1}] \quad (\text{II.27})$$

Pour les hautes températures, la contribution de la réflectance dans le fonctionnement des cellules est faible, donc on peut négliger le phénomène de la réflexion.

II.5 Evolution des paramètres photovoltaïques en fonction de la température

L'effet principale de la température sur les cellules solaires résulte de la variation de trois principaux paramètres, qui sont habituellement employés pour caractériser les performances de la cellule solaire, ceux-ci sont : le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}) qu'est en principe caractérisée par le courant de saturation (I_s) et le facteur d'idéalité (n) de la diode, et le facteur de forme (FF); qui est une fonction de (V_{co}).

II.5.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})

Selon [48] I_{ph} dépend de l'irradiance solaire disponible (G), la température de la cellule (T) et le coefficient de température du courant de court-circuit ($\mu_{I_{cc}}$). Le photo courant I_{ph} pour toutes les conditions de fonctionnement est lié au photocourant aux conditions de référence par :

$$I_{ph}(T) = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph.ref} + \mu_{I_{cc}}(T - T_{ref})] \quad (II.28)$$

Avec

$\mu_{I_{cc}}$: est le coefficient de température du courant de court-circuit [A/K].

G et T : sont les conditions de fonctionnement (irradiance et température respectivement).

G_{ref} et T_{ref} : sont les conditions de référence (irradiance et température respectivement); elles sont données numériquement [30]:

$$G_{ref} = 1000 W/m^2 \quad \text{et} \quad T_{ref} = 25^\circ C = 298.15^\circ K.$$

Pour notre cas particulière, $G = G_{ref}$

$$I_{ph}(T) = I_{ph.ref} + \mu_{I_{cc}}(T - T_{ref}) \leftrightarrow I_{CC}(T) \approx I_{ph}(T) = I_{ph.ref} + \mu_{I_{cc}}(T - T_{ref}) \quad (II.29)$$

II.5.2 La tension en circuit ouvert (V_{co})

$$V_{co} = nV_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (\text{II.30})$$

Il est important de remarquer que cette tension augmente peu avec le **log** de I_{ph} donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $V_T = \frac{kT}{q}$.

En effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{kT}{q}$. [24]

En général :

$$I_s(T) = I_{s0} \exp\left(\frac{-E_A}{nkT}\right) \quad (\text{II.31})$$

Où I_{s0} est une constante, E_A est l'énergie d'activation de ces porteurs minoritaires (le courant de saturation dû aux porteurs minoritaires activés thermiquement) [31].

n est le facteur d'idéalité et kT est l'énergie thermique. En remplaçant I_s par son expression (II.30) dans l'expression de V_{co} , on obtient la dépendance de V_{co} en fonction de la température :

$$V_{co}(T) = \frac{E_A}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{s0}}{I_{PH}}\right) \quad (\text{II.32})$$

II.5.3 Le facteur de forme (FF)

Le facteur de forme FF dépend d'un ensemble de paramètres de la cellule, y compris le courant et la tension au point de fonctionnement maximum, le facteur d'idéalité et les résistances parasites séries et shunt. D'où, il est difficile de trouver une formule pour décrire la sensibilité de ce paramètre avec la température. Le FF montre habituellement une dépendance inverse avec la température [30].

Nous avons vu que I_{cc} et V_{co} montrent habituellement le comportement presque linéaire en fonction de la température.

II.6 Effet de la température sur les résistances parasites R_s et R_{sh}

Il y a seulement trois types de dépendance thermique des résistances électriques : type conducteur, type à coefficient de température négatif et le type à coefficient de température positif [32]. Nous discuterons ci-dessous les trois types de sensibilités thermiques pour les résistances électriques :

a. Type conducteur

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (II.33)$$

Où α est le coefficient de température du conducteur ($\alpha > 0$) et R_0 est la résistance de référence. Nous obtenons :

$$\frac{dR}{dT} = \alpha R_0 > 0 \quad (II.34)$$

b. Type à coefficient de température négatif

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (II.35)$$

Où B est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ($B > 0$) et R_0 est une résistance référentielle. Nous obtenons :

$$\frac{dR}{dT} = -\frac{BR}{T^2} < 0 \quad (II.36)$$

c. Type à coefficient de température positif

$$R(T) = R_0 \exp(BT) \quad (II.37)$$

Où B est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ($B > 0$) et R_0 est une résistance référentielle. Nous obtenons :

$$\frac{dR}{dT} = BR > 0 \quad (II.38)$$

II.7 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons décrit dans une première étape le schéma équivalent d'une cellule solaire en faisant apparaître ses paramètres électriques essentiels. Ensuite, nous avons présenté l'effet de la température sur les paramètres physiques du matériau de base de la cellule solaire, ainsi que le comportement des différents paramètres photovoltaïques et résistances parasites avec la température.

Chapitre III :
Simulation et discussion des résultats

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous définissons en premier le logiciel SCAPS-1D utilisé dans ce mémoire pour calculer les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques telle que la caractéristique courant-tension (J-V). Ensuite on s'intéresse à l'étude de l'effet de la température sur le comportement de la cellule solaire à base de silicium qui comporte deux parties :

La première partie est consacrée à la simulation de l'influence de la température sur les paramètres physiques du silicium, matériau de base de la cellule ; dans ce cas, on utilise le logiciel Matlab pour déterminer l'évolution de ces paramètres tels que la hauteur de la barrière, la concentration intrinsèque la mobilité et la durée de vie des porteurs en fonction de la température.

La deuxième partie constitue l'objectif de mon travail qui est l'étude de l'effet de la température sur les paramètres photovoltaïques. En utilisant SCAPS, on a simulé la caractéristique courant-tension (J-V) et la caractéristique puissance-tension (P-V), ensuite on a étudié la variation de ces paramètres en fonction de la température, tels que le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement (η) de la cellule solaire.

III.2 Influence de la température sur les paramètres physiques de la cellule au silicium

La simulation a été faite à l'aide du logiciel MATLAB, qui est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique et de développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul. C'est aussi un excellent logiciel pour faire des simulations numériques.

En programmant en MATLAB les expressions évoquées au deuxième chapitre nous obtiendrons, pour le silicium (matériau de base de la cellule) les résultats suivants :

III.2.1 Variation du gap d'énergie avec la température

Nos résultats de simulation font l'objet de la figure III.1, ou nous avons fait varier la température de 0°C et 60°C, sous un éclairage constant (1000 W/m²).

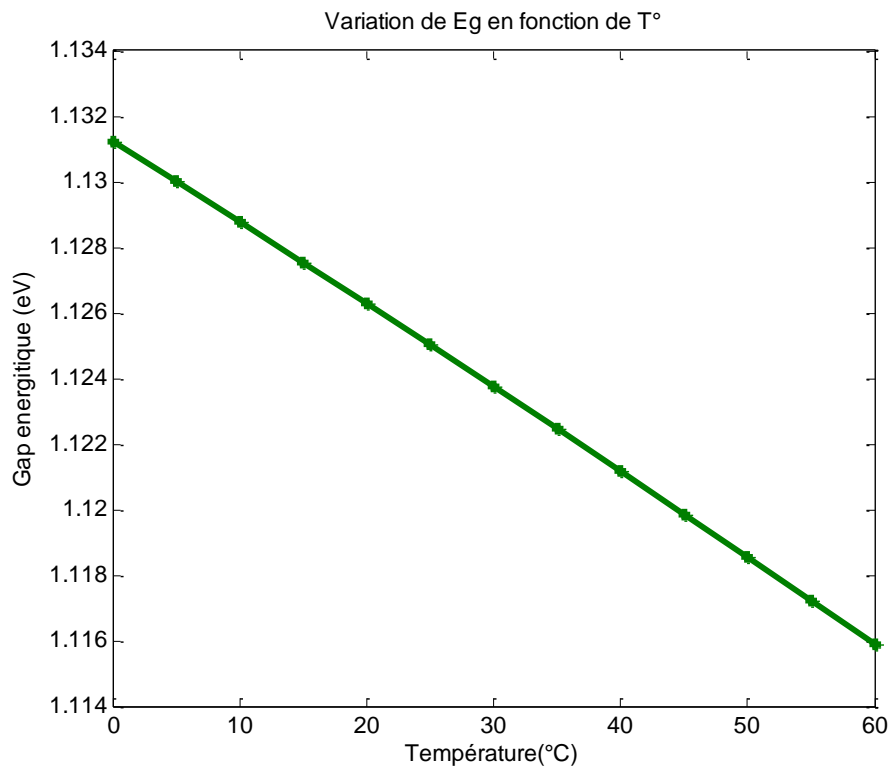


Figure III.1: Evolution du gap d'énergie du Si en fonction de la température

L'énergie de bande interdite E_g varie avec la température : on observe une diminution de cette énergie lorsque la température augmente. Ceci est dû à deux phénomènes : la dilatation thermique qui modifie les distances interatomiques du réseau cristallin et deuxièmement l'interaction électron-phonon ; cette deuxième étant l'élément prépondérant dans la modification de l'énergie de bande interdite.

III.2.2 Variation de la concentration intrinsèque avec la température

Les résultats de simulation que nous avons obtenus et pouvant mettre en évidence les effets de la variation de la température sur la concentration intrinsèque sont illustrés sur la figure III.2:

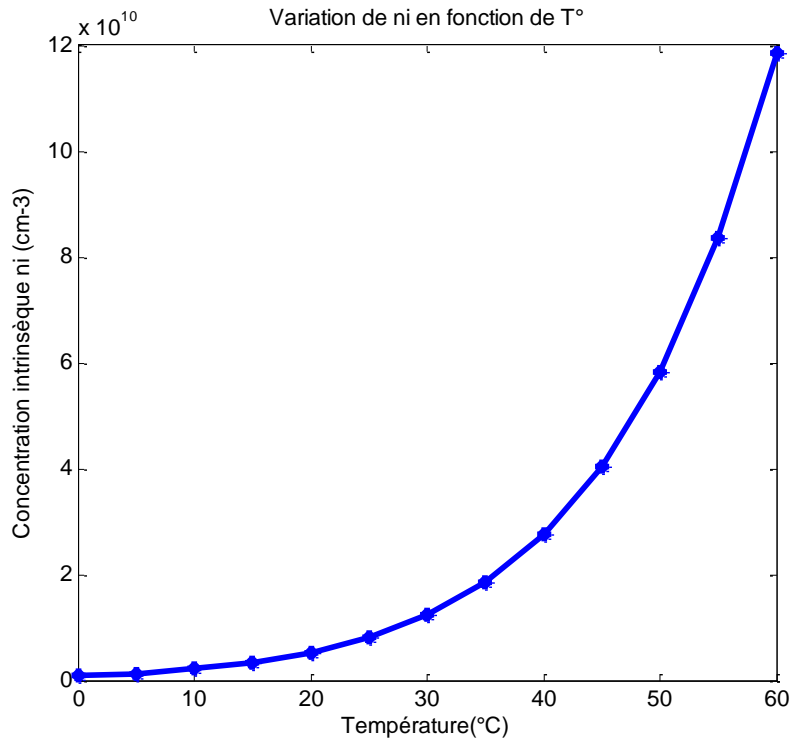


Figure III.2: Evolution de la concentration intrinsèque du Si en fonction de la température

La figure III.2 présente l'évolution de la concentration intrinsèque n_i dans le Silicium avec la température. On observe que concentration intrinsèque croit de manière exponentielle avec l'augmentation de la température du fait de l'agitation thermique qui augmente l'énergie des électrons, leur permettant ainsi de passer de la bande de valence à la bande de conduction, ou plus facilement sur un niveau accepteur d'impureté.

III.2.3 Variation de la durée de vie avec la température

La figure III.3 montre la Variation de la durée de vie des porteurs de charge dans le silicium pour une plage de température de 0°C à 60°C .

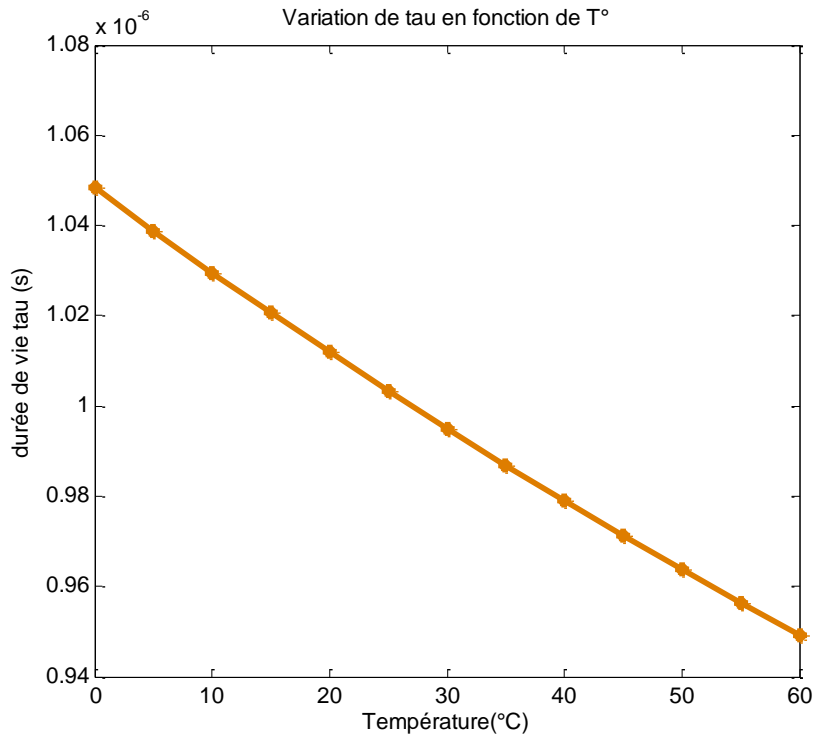


Figure III.3 : Variation de la durée de vie avec la température

La variation de la durée de vie en fonction de la température est obtenue en analysant la variation en température des recombinaisons. En effet, les mécanismes de recombinaison qui augmentent avec la température posent une limite supérieure à la durée de vie, et on voit la durée de vie diminuer avec la température.

III.2.4 Variation de la longueur de diffusion avec la température

Les résultats de simulation que nous avons obtenus et pouvant mettre en évidence les effets de la variation de la température sur la longueur de diffusion des électrons et des trous dans le silicium sont illustrés sur la figure III.4:

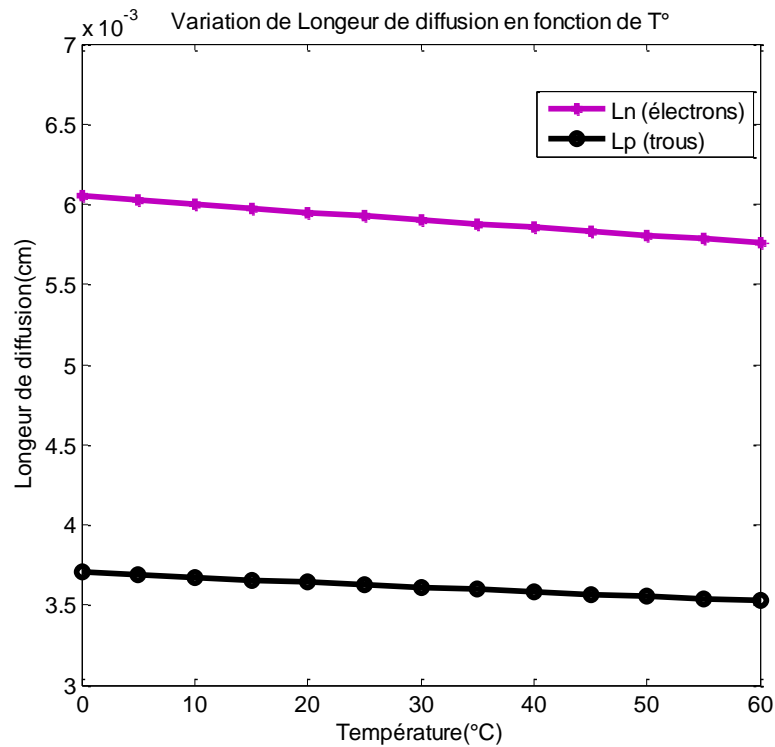


Figure III.4 Variation de la longueur de diffusion avec la température

La longueur de diffusion décrit la capacité de transport des porteurs dans un dispositif de cellule solaire. Cela dépend du coefficient de diffusion et de la durée de vie des porteurs ; en effet la variation de la longueur de diffusion des électrons et des trous dans le silicium en fonction de la température, représentée sur la figure III.4, montre une légère diminution.

III.2.5 Variation des masses effectives des porteurs avec la température

La figure III.5 présente l'évolution des masses effectives des électrons et des trous dans le Silicium avec la température.

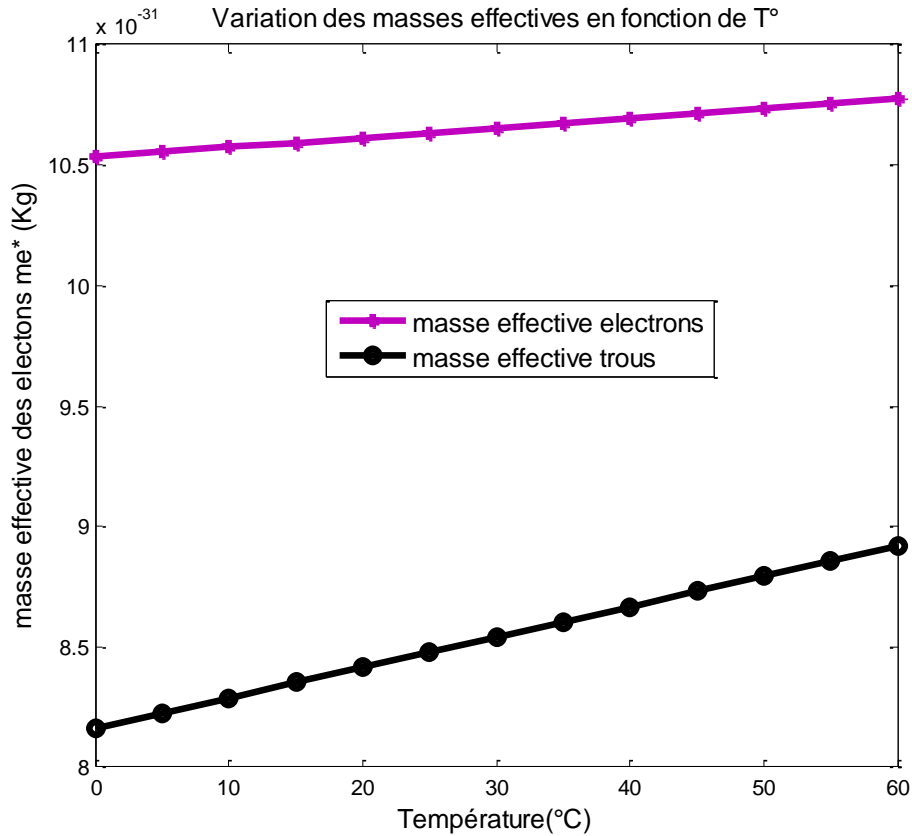


Figure III.5 Variation de la masse effective des électrons et des trous avec la température

Dans la figure III.5 nous observant la dépendance de la masse effective avec la température. La masse effective des porteurs à tendance à augmenter avec l'augmentation de la température.

III.2.6 Variation de la mobilité des porteurs avec la température

Les résultats de simulation de la variation de la mobilité en fonction de la température illustrés sur la figure III.6 .

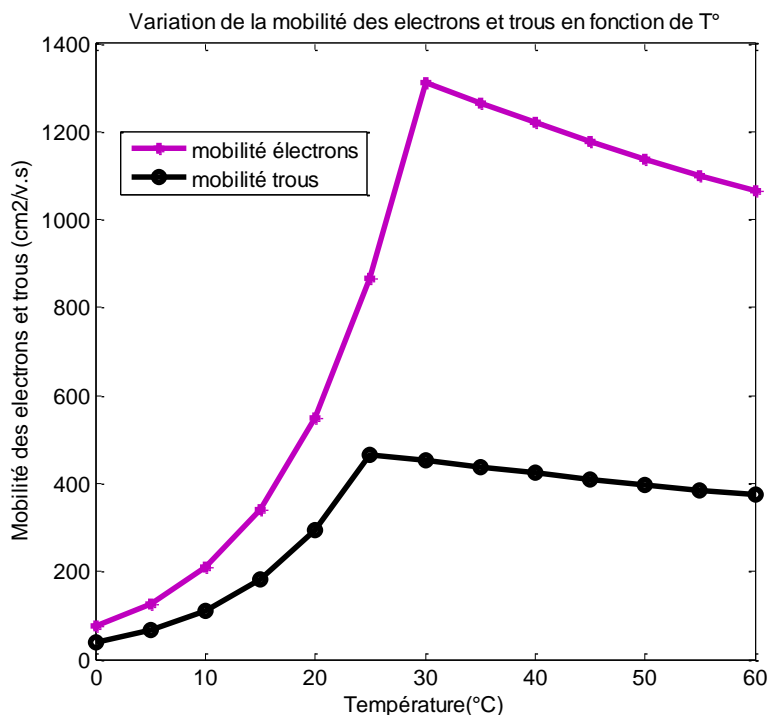


Figure III.6 Variation de la mobilité des porteurs avec la température

A basse température ($T < 27^{\circ}\text{C}$) la mobilité augmente avec l'augmentation de la température puisque les porteurs de charge sont fortement déviés des impuretés ionisées qui dominent, tandis qu'à haute température la mobilité diminue avec la température car l'agitation thermique accroît le nombre de "chocs" qui s'oppose au déplacement.

III.3 Influence de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule au silicium

Afin de connaître l'effet de la température sur les performances de la cellule solaire à base de silicium, on a utilisé le logiciel SCAPS qui dispose d'une bibliothèque des propriétés de nombreux matériaux utilisés dans les cellules solaires.

III.3.1 Présentation du logiciel SCAPS-1D

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques.

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe à peu près 50 MB d'espace sur le disque.[32]

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe₂ et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si) Parmi les principaux avantages de SCAPS-1D :

- Les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif.

- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).

- Illumination : du côté p ou n

- Possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci.

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.

- Introduction de résistances en série, et obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité –fréquence.

- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH. -C'est un logiciel qui présente une grande vitesse d'exécution.

- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre. [33]

SCAPS contient plusieurs panneaux (fenêtres ou pages). Le principal panneau est « le panneau de l'action ». Il permet de régler le problème, définir la liste d'actions de calculs requis, exécuter les calculs, naviguer vers d'autres panneaux, sauver les résultats de l'intrigue. [33]

Le logiciel est organisé en plusieurs panneaux dans lesquels l'utilisateur peut définir les paramètres ou dans lesquels les résultats sont calculés [7]. SCAPS analyse la physique du modèle en tenant en compte des profils de recombinaison, de la distribution du champ

électrique, des mécanismes de transports des porteurs et des densités de courant individuelles.

III.3.1.1 Fenêtre d'exécution (Action Panel)

La fenêtre d'exécution « Action panel » de SCAPS est accessible dès le démarrage du logiciel. Elle est constituée de différents blocs comme le montre la figure III.7

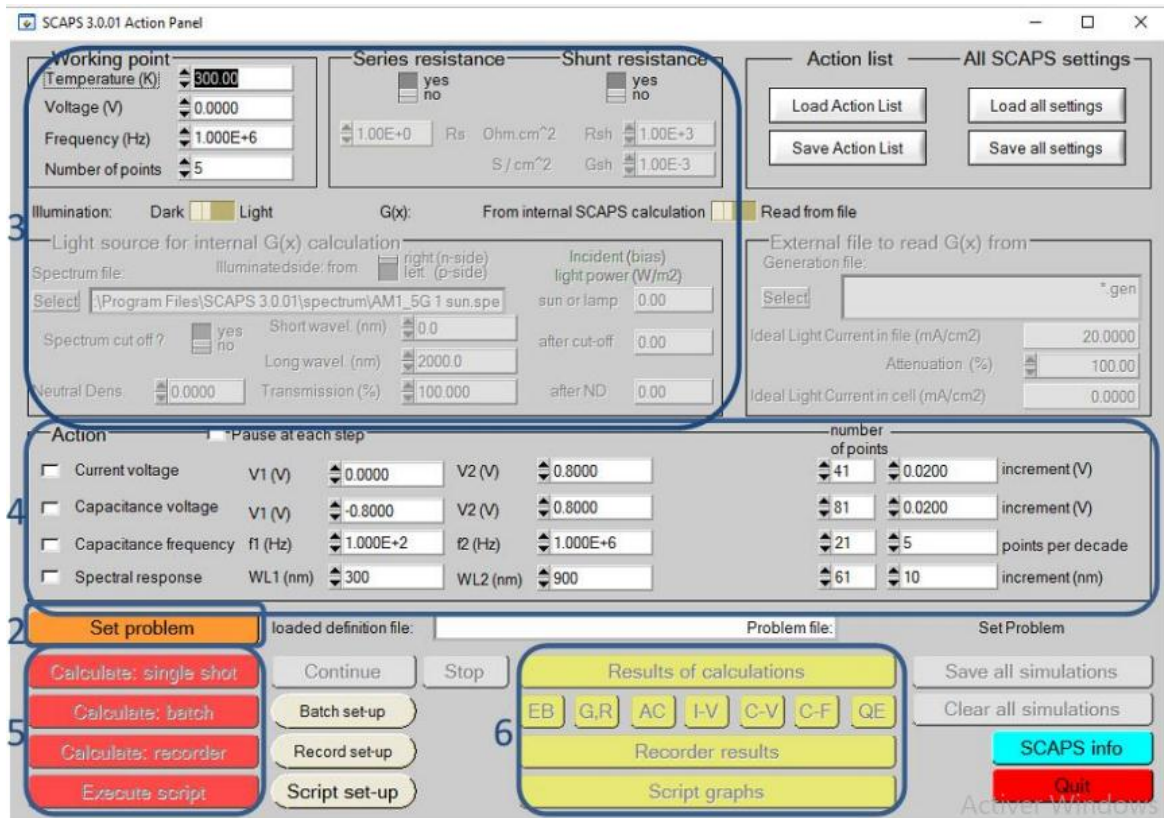


Figure III.7 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal. [7]

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.3.1.2 Fenêtre de conception du dispositif (Set Problem)

Lorsque vous cliquez sur le bouton "Set Problem" dans le panneau Actions (Figure III.7 bloc 2), le panneau "Solar cell definition" s'affiche (Figure III.8).

Ce panneau permet de créer/éditer des structures de cellules solaires, d'afficher une fenêtre qui contient un grand nombre de données comme l'énergie de gap, la permittivité électrique, l'affinité, le dopage, et le type de dopage. En plus, les défauts de différents types peuvent être définis, à la fois, dans la masse de couches et aux interfaces. En considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux à savoir : le type de charge, la distribution énergétique, la propriété optique et les transitions métastables entre les niveaux, et de les sauvegarder ou de les charger à partir de fichiers de définition. Ces fichiers de définition sont des fichiers ASCII standard portant l'extension « *.def ».

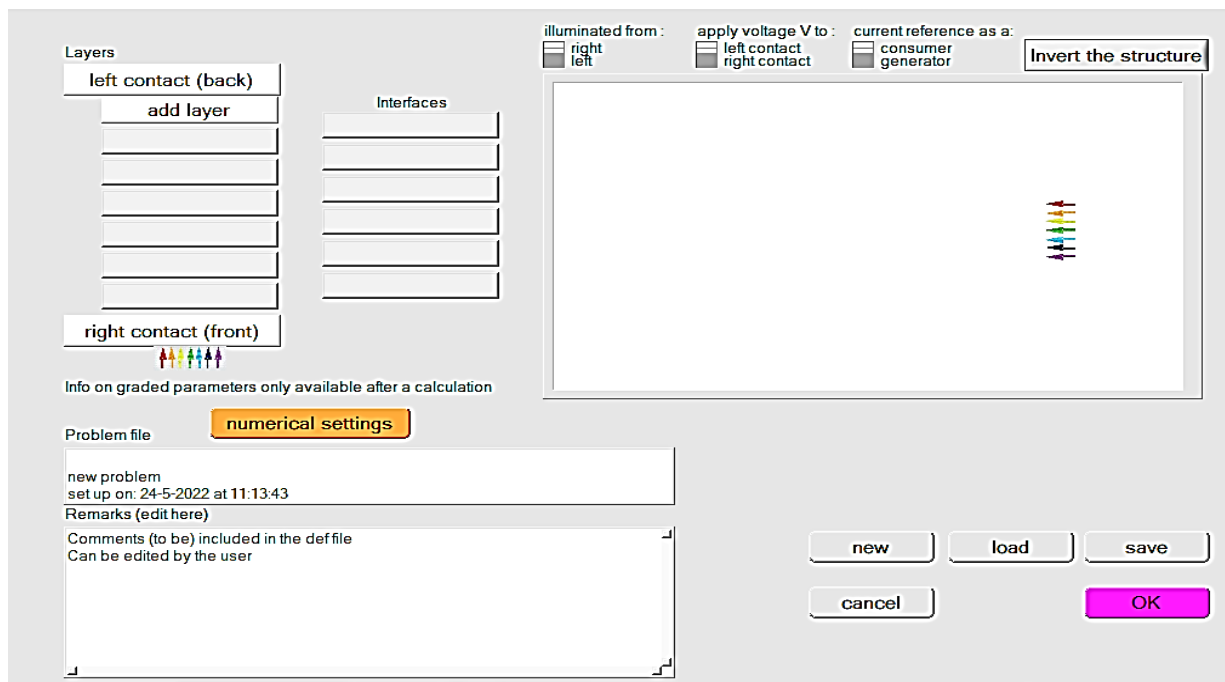


Figure III.8 : Panneau de définition de la structure [7]

III.3.1.3 Fenêtre de résultat

Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau

d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure). [24]

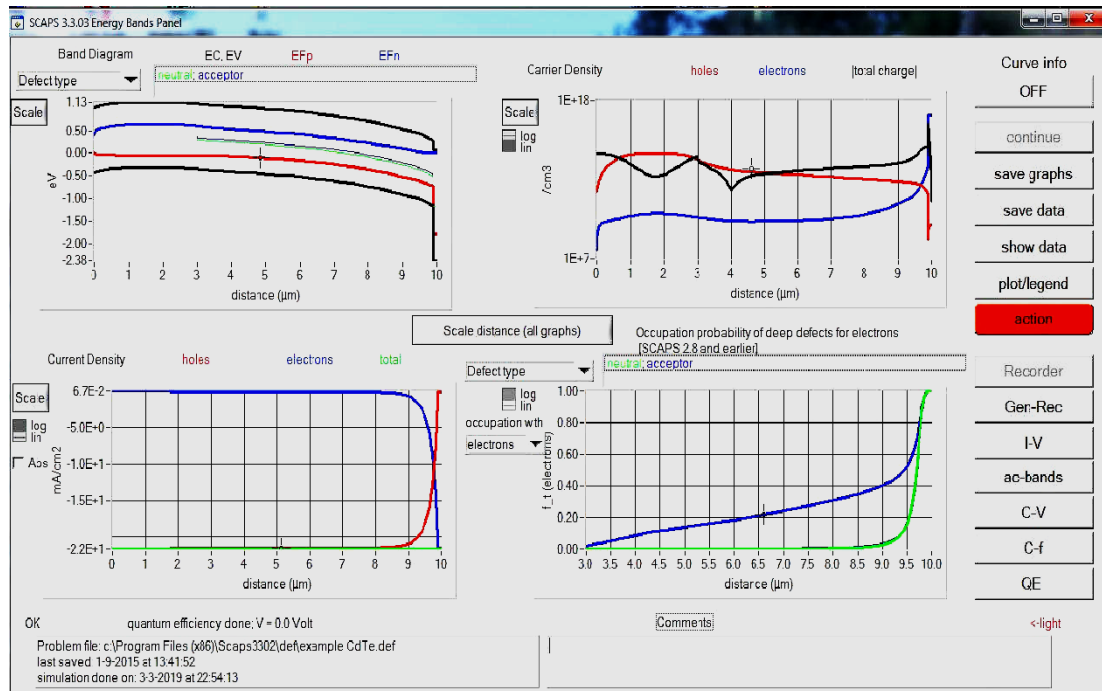


Figure III.9 : Panneau des bandes d'énergie [34]

a) Panneau I-V (I-V panel)

Les résultats des simulations courant-tension sont représentés sur le panneau IV « IV panel ». Le graphique de gauche affiche toutes les simulations I-V. Le graphique de droite fournit des informations détaillées sur les courants de recombinaison dans la dernière simulation. Cela permet de voir le mécanisme de recombinaison principal dans la structure pour des tensions variables. Si la simulation est effectuée sous illumination, les paramètres de la cellule solaire sont calculés et affichés (Figure III.10).

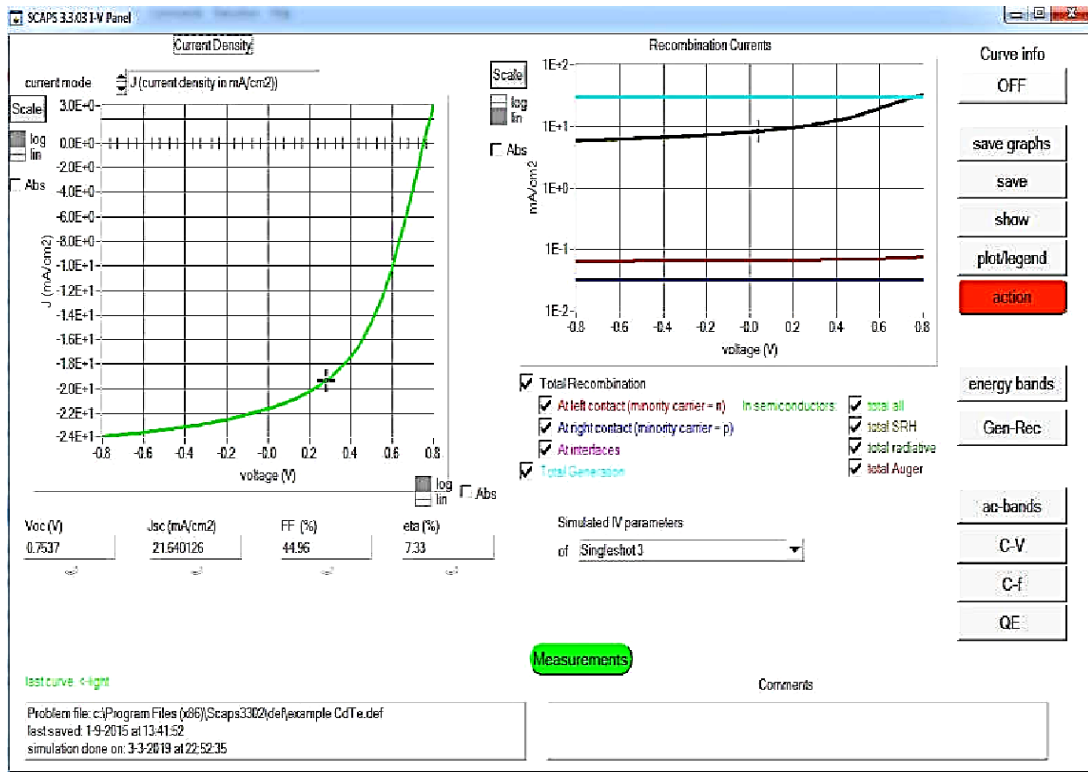


Figure III.10 : Panneau I-V avec visualisation des paramètres de la cellule [7]

b) Panneau QE (QE-panel)

Comme le montre la figure III.11, ce panneau permet d'analyser les simulations du rendement quantique. Sur l'axe horizontal, il est possible d'afficher la longueur d'onde ou l'énergie photonique de la lumière monochrome. Sur l'axe vertical on a plusieurs possibilités.

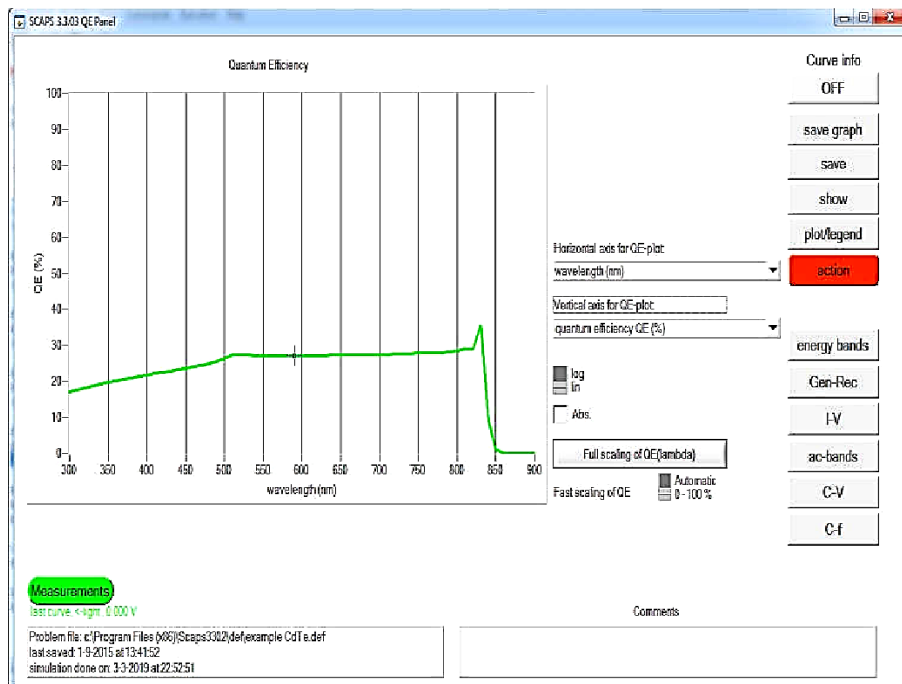


Figure III.11: Panneau du rendement quantique [7]

III.3.1.4 Edition de la structure d'une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Les propriétés des couches, contacts et de l'interface peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III.12. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

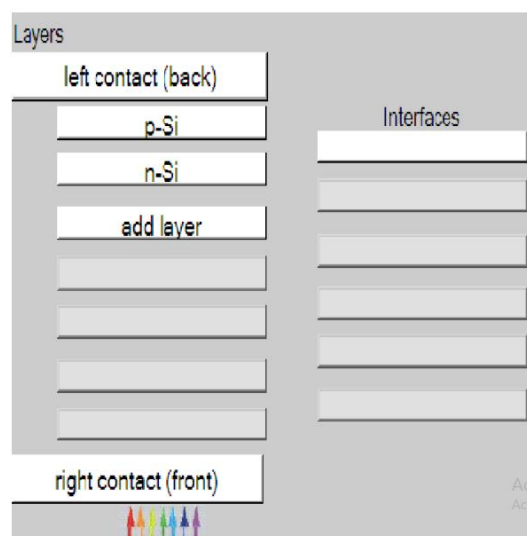


Fig. III.12 : Définition de la structure d'une cellule solaire au Si

III.3.1.5 Définition des propriétés des couches

Après cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure III.13) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Dans le cinquième block, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...). Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la, L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données.

The screenshot shows the 'layer 1' configuration window in SCAPS. It is divided into several sections:

- General Properties:**
 - Thickness (μm): 2.000
 - Layer name: uniform pure A (y=0)
 - Purity: The layer is pure A: $y = 0$, uniform
 - Semiconductor Property P of the pure material: pure A (y = 0)
- Material Parameters:**
 - bandgap (eV): 1.200
 - electron affinity (eV): 4.500
 - dielectric permittivity (relative): 10.000
 - CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$): $1.000\text{E}+19$
 - VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$): $1.000\text{E}+19$
 - electron thermal velocity (cm/s): $1.000\text{E}+7$
 - hole thermal velocity (cm/s): $1.000\text{E}+7$
 - electron mobility (cm^2/Vs): $5.000\text{E}+1$
 - hole mobility (cm^2/Vs): $5.000\text{E}+1$
 - effective mass of electron: $1.000\text{E}+0$
 - effective mass of hole: $1.000\text{E}+0$
- Doping:**
 - no ND grading (uniform): no ND grading (uniform)
 - shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$): $1.000\text{E}+15$
 - no NA grading (uniform): no NA grading (uniform)
 - shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$): $1.000\text{E}+15$
- Recombination model:**
 - Band to band recombination:
 - Radiative recombination coefficient (cm^3/s): $0.000\text{E}+0$
 - Auger electron capture coefficient (cm^6/s): $0.000\text{E}+0$
 - Auger hole capture coefficient (cm^6/s): $0.000\text{E}+0$
 - Recombination at defects: Summary
- Absorption interpolation model:**
 - alpha curve A material (v=0)
 - from file: [] from model: []
 - Set absorption model: []
 - List of absorption submodels present: sqrt(hv-Eg) law (SCAPS traditional)
- Buttons:** Add a Defect, Add, cancel, Load Material, Save Material

Figure III.13: Panneaux de définition des propriétés des couches [7]

III.3.2 Simulation de la cellule au silicium

Notre travail consiste à simuler une cellule solaire à base de silicium, afin de connaître l'effet de la température sur les performances de la cellule solaire.

III.3.2.1 Structure de la cellule étudiée

Notre structure de référence est une cellule solaire mono jonction à base de silicium d'épaisseur totale $d=100\ \mu\text{m}$, composée d'une couche **P** d'épaisseur $98\ \mu\text{m}$ dopée à une concentration $N_a=10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ et d'une couche **N** d'épaisseur $2\ \mu\text{m}$ dopée à une concentration $N_d=10^{15}\ \text{cm}^{-3}$. Pour la collecte du courant nous avons positionné des électrodes en haut et en bas de la structure [34] ;

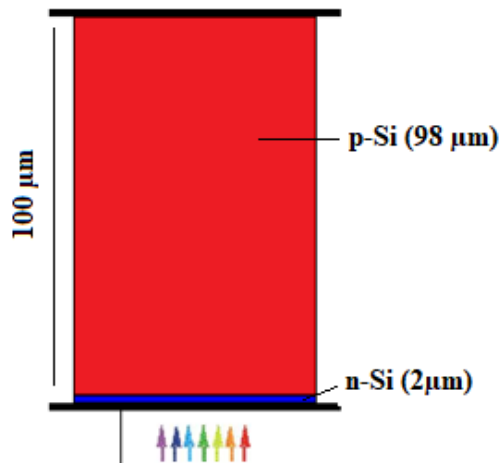


Figure III.14 : schéma simplifié de la cellule solaire à simuler

III.3.2.2 Les paramètres de la cellule solaire à simuler

Les paramètres physiques du Silicium tirés de la littérature et définis dans l'interface du logiciel SCAPS sont présentés dans le tableau III.1 [34] :

Tableau III.1 : Paramètres physiques du silicium introduits dans SCAPS

Paramètres	n-Si	p-Si
Température T(K)	300	300
L'épaisseur (μm)	2	98
Profil	Uniform	Uniform

Propriétés	Pure à (y=0)	Pure à (y=0)
Gap d'énergie (eV)	1.12	1.12
Affinité électronique χ (eV)	4.05	4.05
Permittivité relative ϵ_r	11.9	11.9
La densité d'état efficace dans la bande de conduction CB : $N_C(\text{cm}^{-3})$	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}
La densité d'état efficace dans la bande de valence VB : $N_V(\text{cm}^{-3})$	1.04×10^{17}	1.04×10^{17}
La vitesse thermique des électrons $V_{thn}(\text{cm/s})$	10^7	10^7
La vitesse thermique des trous $V_{thp}(\text{cm/s})$	10^7	10^7
La mobilité des électrons $\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$	1500	1500
La mobilité des trous $\mu_p(\text{cm}^2/\text{s})$	450	450
Densité des donneurs : $N_D(\text{cm}^{-3})$	10^{15}	0
Densité des acceptons : $N_A(\text{cm}^{-3})$	0	10^{15}
Coefficient d'absorbance	SCAPS(Si.abs)	SCAPS(Si.abs)

III.3.2.3 Définition de la cellule solaire à base de silicium

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

La figure III.8 représente la structure obtenue de la cellule solaire au silicium à l'aide du logiciel SCAPS-1D. La cellule est de type n-p : à droite La région n éclairée qui constitue l'émetteur ($2\mu\text{m}$) et la région P ($98\mu\text{m}$) plus épaisse, qui forme le collecteur est à gauche.

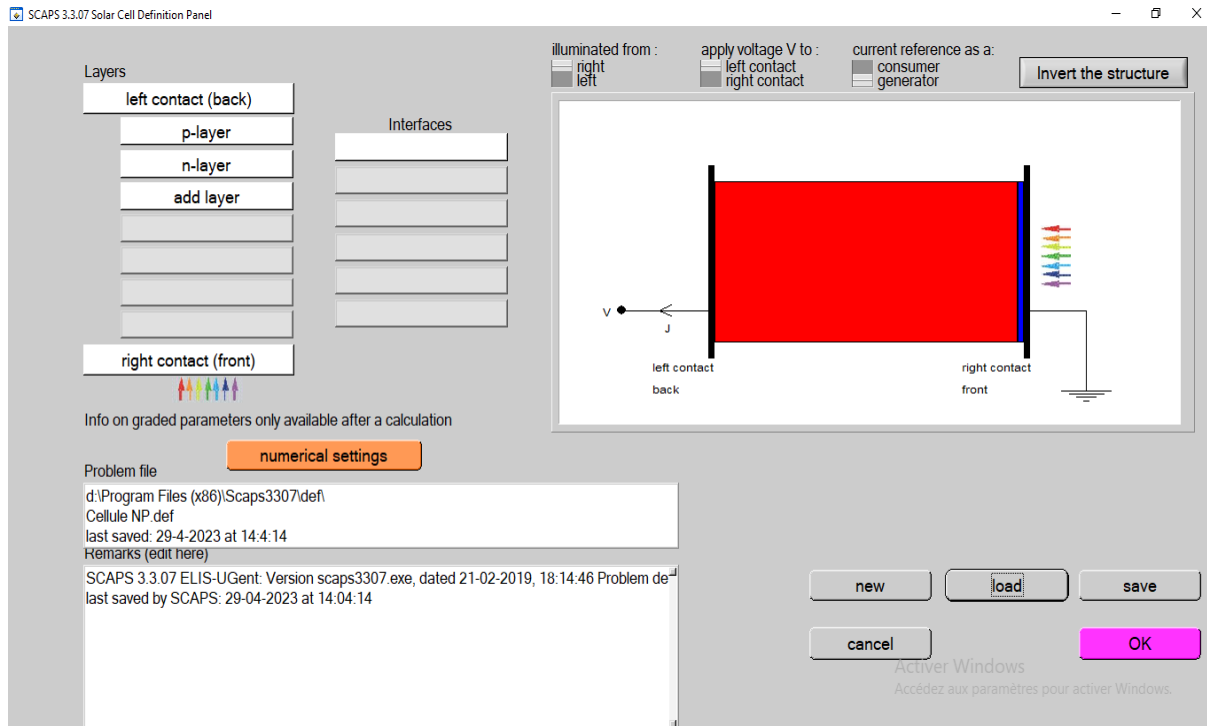


Fig. III.15 : Schéma de la cellule solaire n-p en silicium à simuler

III.3.3 Simulation par SCAPS

Les résultats obtenus par SCAPS concernent les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), ainsi que l'effet de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à savoir : le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement (η).

III.3.3.1 Caractéristique I-V à l'obscurité et sous éclaircment

On s'intéresse dans cette partie à la simulation de la caractéristique (I-V) de la cellule solaire au silicium à $T=300^{\circ}\text{K}$, sous un éclaircment de $100\text{mW}/\text{cm}^2$.

Les figures III.16.a et III.16.b montrent les résultats de la simulation des caractéristiques (I-V) sur la cellule Si à l'obscurité et sous éclaircment respectivement.

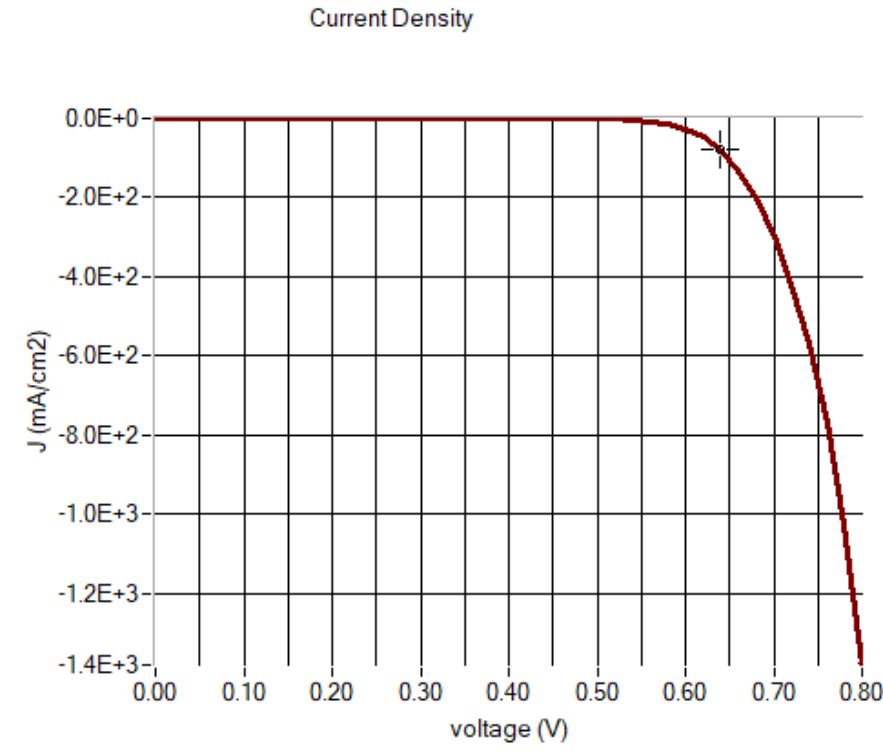


Figure III.16.a : Caractéristique (I-V) à l'obscurité.

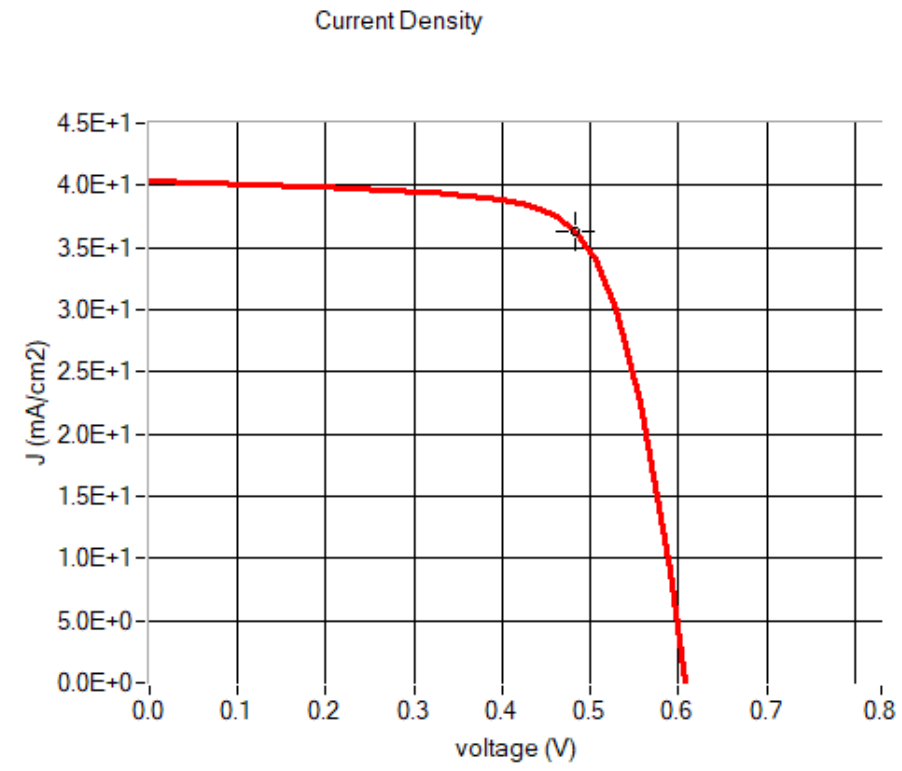


Figure III.16.b : Caractéristique (I-V) sous éclaircissement

Les paramètres de sortie de la cellule solaire simulés sont regroupés dans le tableau III.2

Tableau III.2 : Valeurs des caractéristiques PV de la cellule simulée

Caractéristiques PV	Valeurs
Courant de court-circuit I_{cc} (mA .cm ⁻²)	40.34
Tension en circuit ouvert V_{co} (V)	0.61
Facteur de forme FF%	71.63
Tension maximale V_{max} (V)	0.483
Courant maximale I_{max} (mA/cm ²)	36.28
Rendement photovoltaïque η (%)	17.5368

III.3.3.2 Caractéristique puissance-tension (P-V)

La courbe III. Représente la variation de la puissance fournie par la cellule solaire en fonction de la tension à ses bornes.

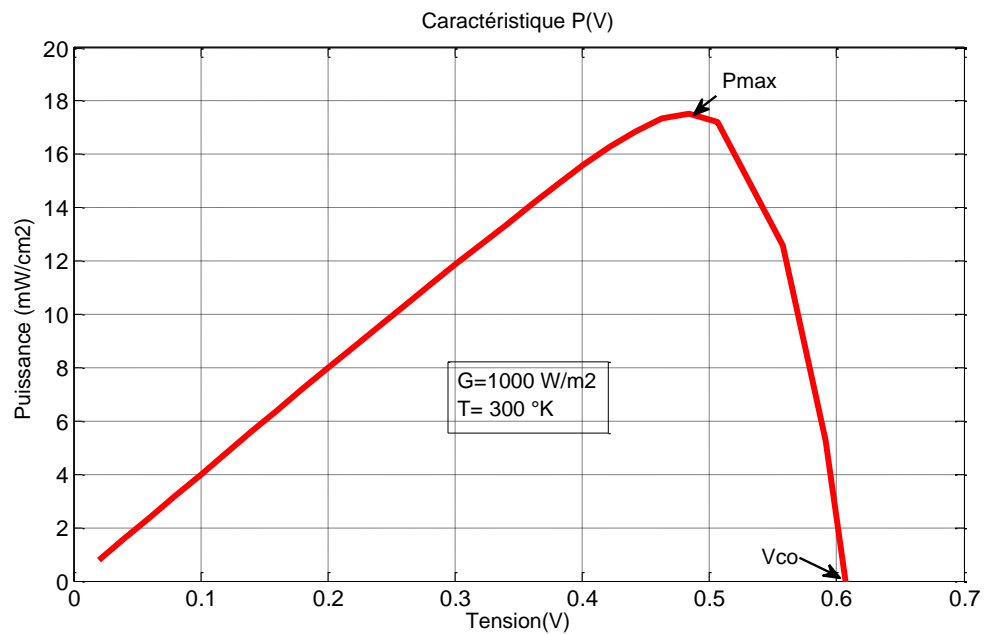


Figure III.17 : Caractéristique (P-V) sous éclairage

La cellule solaire fournit le maximum de puissance P_{max} si la tension à ses bornes est proche de la tension de circuit ouvert V_{co} .

III.3.4 Effet de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) de la cellule solaire

Les figures (III.18) et (III.19) montrent respectivement les caractéristiques (I-V) et (P-V) de la cellule solaire au silicium à simulée pour différentes températures, sous un éclairement constant (1000 W/m^2).

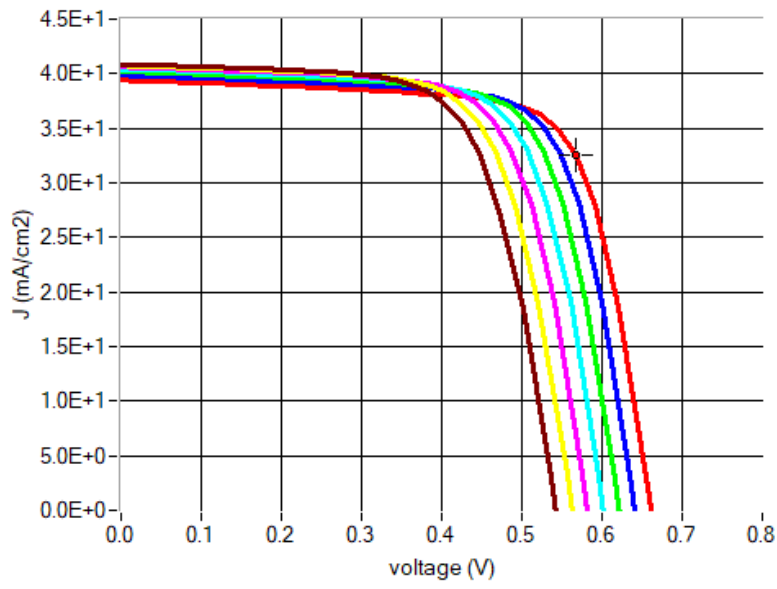


Figure III.18: Courbes (I-V) pour différentes valeurs de la température.
T varie de 0°C (rouge), à 60°C (marron) par pas de 10°C .

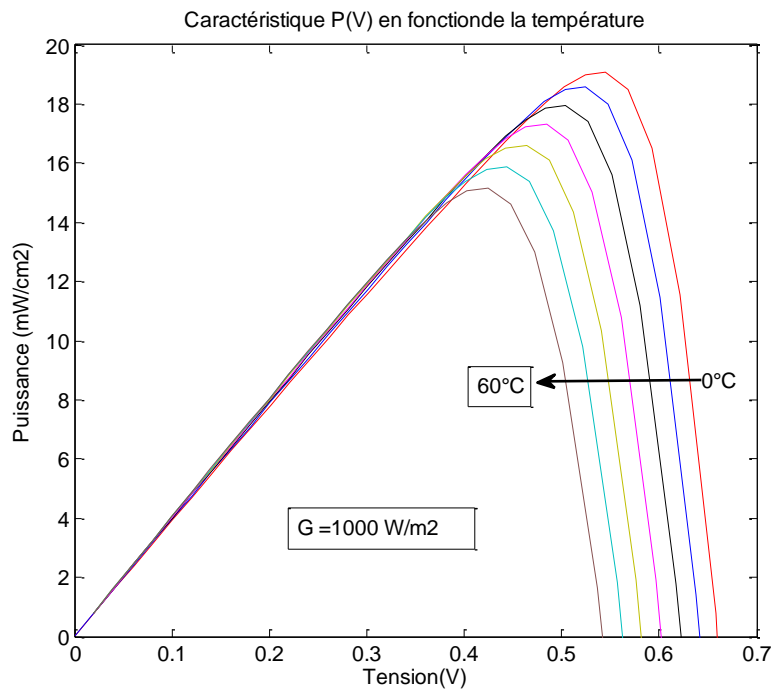


Figure III.19: Courbes (P-V) pour différentes valeurs de la température.
T varie de 0°C (rouge), à 60°C (marron) par pas de 10°C .

Sous l'effet d'une hausse de la température, la figure ci-dessus (III.18) montre une légère augmentation du courant de la cellule. Cependant il apparaît que la tension à vide de celle-ci diminue.

La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance, la figure ci-dessus (III.19) montre que plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue.

Cet accroissement du courant peut être négligé au point I_{cc} mais pas au point de puissance maximale où ce dernier connaît un décalage important.

III.3.5 Effet de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire

La température de fonctionnement de la cellule solaire a un important effet non moins négligeable sur la réponse électrique de cette dernière. Pour examiner l'influence de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule, nous avons varié cette dernière entre 0°C et 60°C . tout en fixant les autres paramètres.

Le tableau (III.3) montre l'évolution avec la température de la tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}), la puissance maximale extraite de la cellule (P_m), le facteur de forme (FF) et le rendement de la conversion photovoltaïque (η).

Tableau III.3: Evolution avec la température de (V_{co}), (I_{cc}), (FF), (V_{max}), (I_{max}) et (η).

$T(^{\circ}\text{C})$	0	10	20	30	40	50	60
Courant de court-circuit I_{cc} ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)	39.42	39.85	40.17	40.41	40.59	40.74	40.86
Tension en circuit ouvert V_{co} (V)	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54
Facteur de forme FF%	73.22	72.63	71.93	71.14	70.28	69.33	68.32
Tension maximale V_{max} (V)	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41
Courant maximale I_{max} (mA/cm^2)	35.45	35.86	36.13	36.28	36.35	36.36	36.31
rendement de conversion η (%)	19.08	18.58	17.99	17.33	16.64	15.91	15.16

Les résultats de simulation de l'effet de la température sur le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, la puissance maximale et le rendement η , sont présentés sur les figures III.20, III.21, III.22, III.23 et III.24 ci-dessous.

III.3.5.1 Courant de court-circuit

La variation de courant de court-circuit I_{cc} en fonction de la température est illustrée par la figure (III.20).

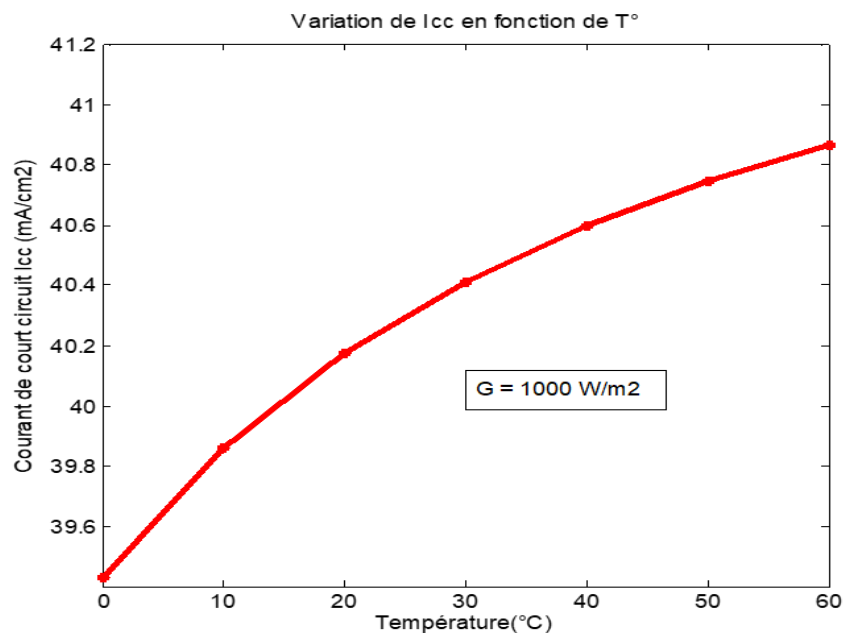


Figure III.20 : Evolution du courant de court-circuit (I_{cc}) en fonction de température

On peut voir que l'augmentation de la température mène à une augmentation du courant de court-circuit. Le comportement thermique de ce dernier est montré dans la figure III.20. Nous avons également observé une augmentation linéaire de I_{cc} avec la température dans la gamme 30-60 $^\circ\text{C}$ avec un taux de l'ordre de 2.4 mA/ $^\circ\text{C}$.

Le photocourant (I_{ph}) d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est due à la décroissance de la largeur de la bande interdite (E_g) du matériau semiconducteur; ce qui permet d'utiliser un peu plus de photons de basse énergie. En conséquence, le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule augmente [35].

Sous un éclairage constant la variation de (I_{cc}) en fonction de la température dans une gamme thermique étroite pour les cellules solaires au silicium est très petite et peut être insignifiante.

III.3.5.2 Tension de circuit ouvert

La variation de la tension de circuit ouvert, qui est un des paramètres de base d'une cellule solaire, en fonction de la température est illustrée par la figure (III.21) ci-dessous.

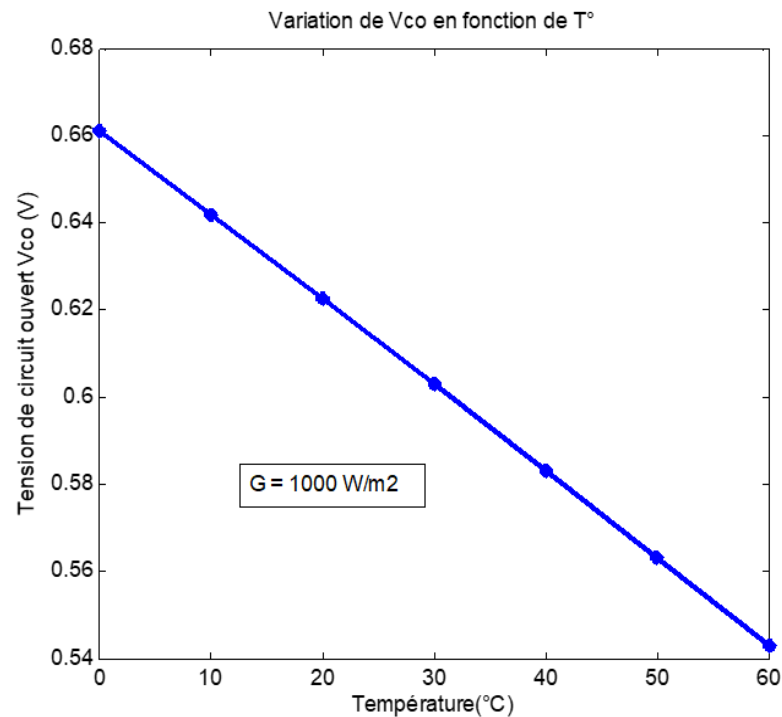


Figure III.21 : La tension en circuit ouvert V_{co} d'une cellule solaire au silicium en fonction de la température

Le comportement thermique de V_{co} sous un éclairage constant est montré dans la figure III.22. Sous une irradiance de 100 mW/cm^2 la tension en circuit ouvert V_{co} diminue avec la croissance de la température par un ordre de grandeur de $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$;

III.3.5.3 Facteur de forme

La variation de FF avec la température dans la gamme $0\text{-}60^\circ\text{C}$ pour la cellule solaire au silicium est illustrée dans la Fig. III.23.

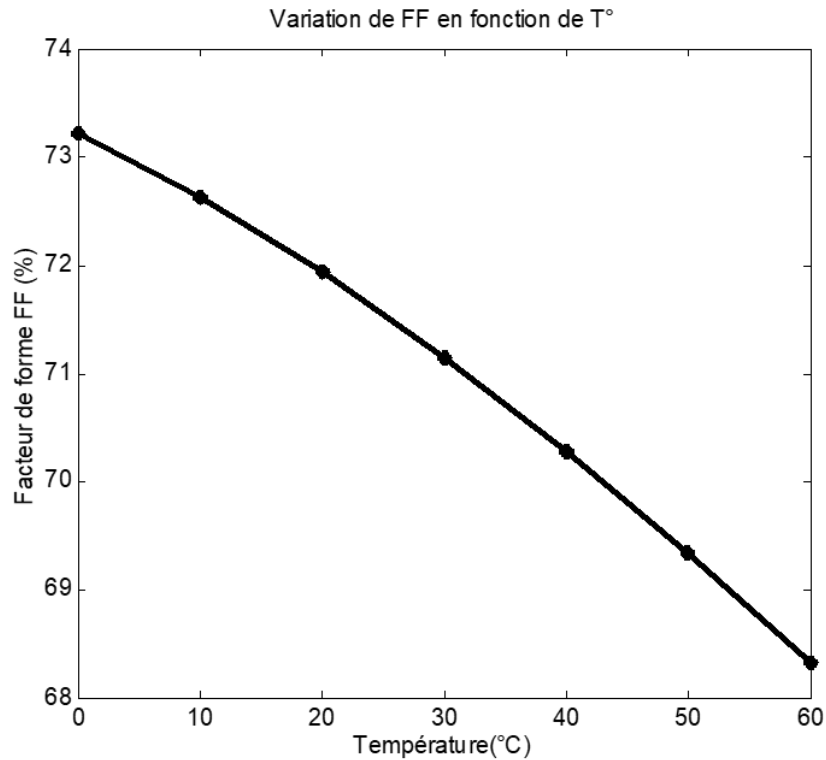


Figure III.22: Effet de la température sur le facteur de forme

Ce paramètre subit aussi une décroissance similaire à celle de la tension de circuit ouvert. Son taux de variation est de l'ordre de $-0.082\%/^{\circ}\text{C}$.

III.3.5.4 Puissance délivrée

A partir du tableau (III-3) précédent, on peut calculer la puissance maximale (P_{max}) fournie par la cellule, l'allure de sa variation avec la température est illustrée par la figure III.24.

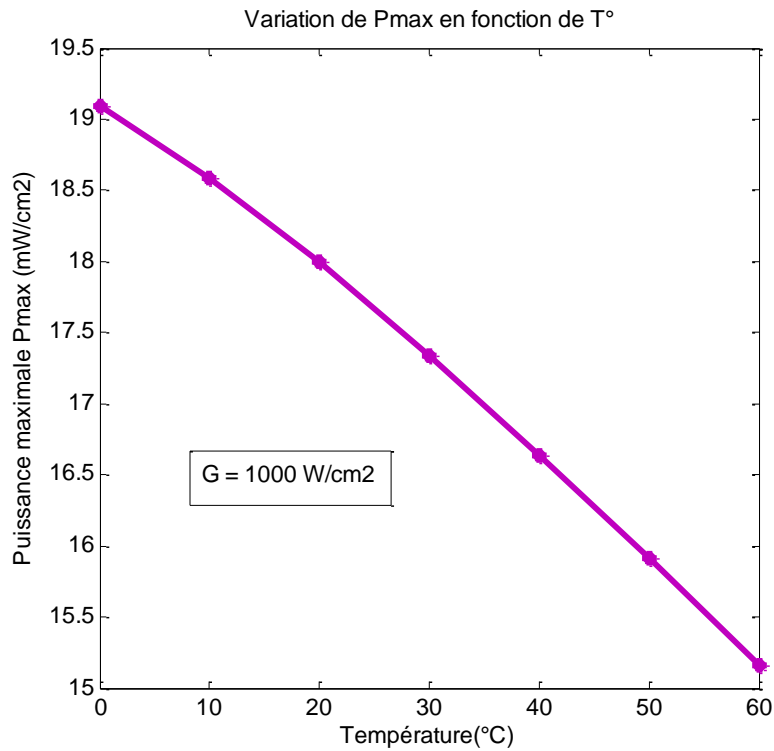


Figure III.23: Evolution de la puissance maximale (P_{max}) en fonction de température

On remarque une diminution de la puissance maximale avec l'augmentation de la température avec une variation relative de $(-0.065 \text{ mW}/^{\circ}\text{C})$.

III.3.5.5 Rendement de conversion

Le rendement qui est la caractéristique principale qui valorise la qualité d'une cellule solaire, la figure. III.25 illustre l'allure du rendement η de la conversion PV en fonction de la température.

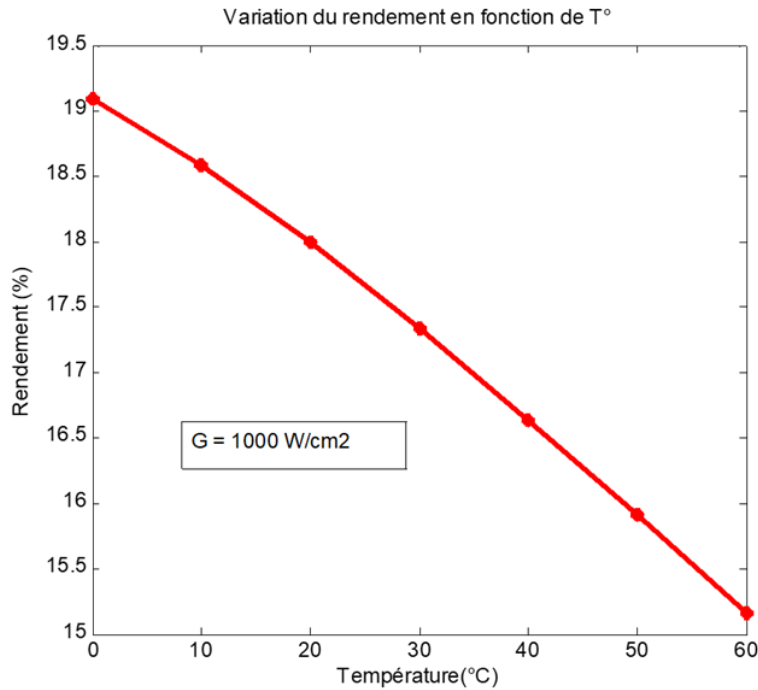


Figure III.24 : Effet de la température sur le rendement

Nous constatons que la valeur maximum de η est au-dessous de la température ambiante. Dans la gamme de température 20-60°C; la diminution du rendement de la conversion PV est presque linéaire avec la température, la pente correspondante ($d\eta/dT = -0.070\% / ^\circ\text{C}$).

III.3.6 Effet de la température sur les résistances parasites

III.3.6.1 La Résistance série (R_s)

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et de la jonction n-p. *Ding et al* [36] confirment que R_s est à coefficient de température positif, donc il est possible d'utiliser l'expression (II-37):

Où ($B_s > 0$) est un coefficient spécifique au silicium et R_{so} est la résistance série de référence telle que :

$$B_s = 1.768 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

$$R_{so} = 0.7 \times 10^{-5} \Omega,$$

La figure III.26 montre le comportement de R_s en fonction de la température

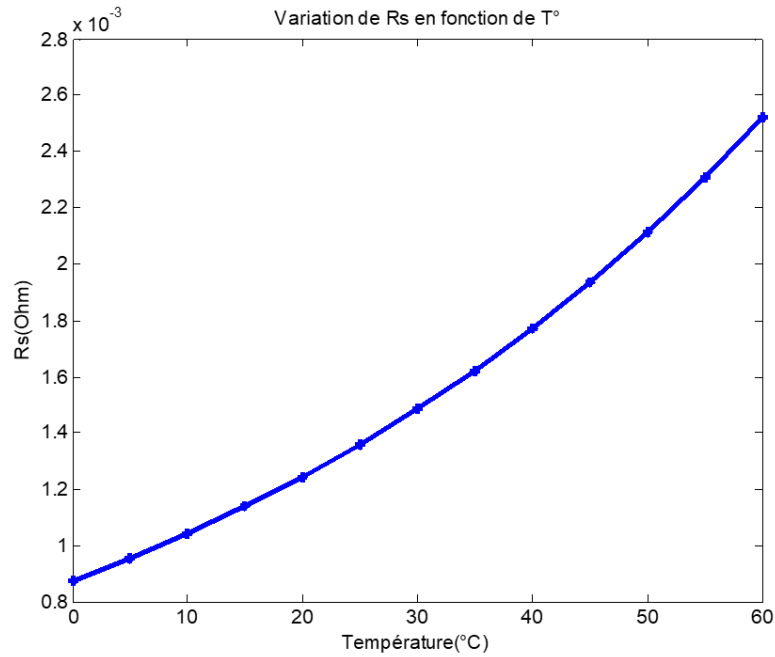


Figure III.25: Evolution de R_s en fonction de la température

On constate que l'augmentation de la température mène à une augmentation de R_s . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant les contacts des électrodes, et en diminuant la résistivité du semiconducteur utilisé.

III.3.6.2 La Résistance shunt (R_{sh})

D'après *Ding et al* [36], la résistance shunt R_{sh} peut être mis sous la forme spécifique à coefficient de température négatif selon l'expression (II-35).

Où ($B_{sh} > 0$) est un coefficient spécifique au silicium et R_{sh0} est la résistance shunt de référence telle que :

$$R_{sh0} = 97.25 \times 10^{-2} \Omega,$$

$$B_{sh} = 804.098 \text{ K}.$$

La figure III.27 montre le comportement de R_{sh} en fonction de la température. On constate que l'augmentation de la température mène à une diminution de R_{sh}

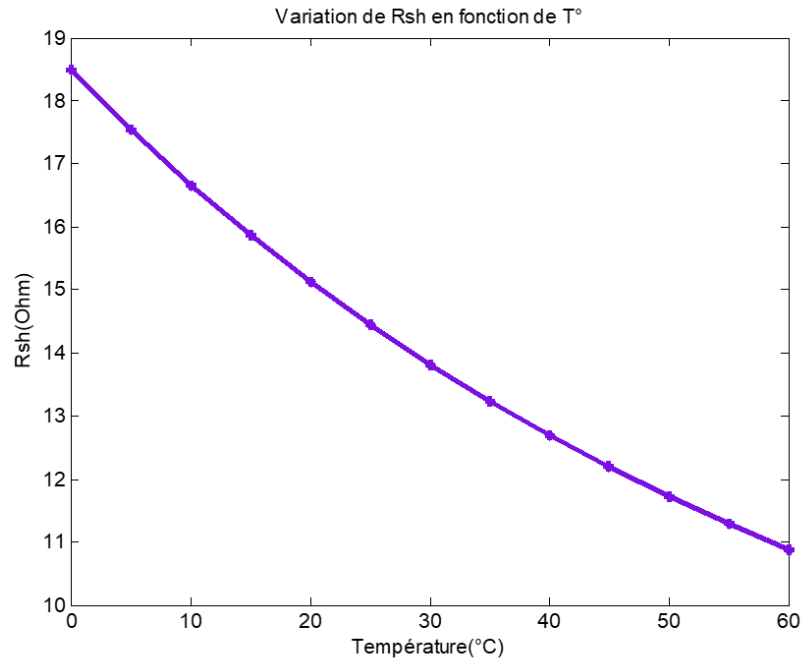


Figure III.26: Evolution de R_{sh} en fonction de la température.

On constate que l'augmentation de la température mène à une diminution de La résistance parallèle (ou shunt) R_{sh} qui caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau et aux épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace. Aussi les dépôts conducteurs peuvent entraîner des résistances de fuite entre les bornes.

III.3.7 Conclusion du chapitre

Nous avons jugé adéquat de simuler au sein de ce chapitre les paramètres physiques les plus influencés par la variation de la température, et entraînant ainsi la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire au silicium : à savoir la variation de son courant de court-circuit I_{cc} et tension de circuit ouvert V_{co} et par conséquent le rendement de conversion η de la cellule. On a étudié aussi les variations des résistances parasites en fonction de la température.

Les résultats obtenus indiquent que la hausse de température à un effet néfaste sur le fonctionnement de la cellule solaire à base de silicium, qui se traduit par une diminution de son rendement de conversion.

Conclusion générale

L'intérêt scientifique aussi bien que le potentiel commercial ont conduit à une recherche accrue dans le domaine du photovoltaïque qui s'est considérablement développé durant ces vingt dernières années. Le travail que nous avons mené avait pour but d'étudier l'effet de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de silicium en utilisant les logiciels Matlab et SCAPS permettant de simuler simultanément l'évolution des paramètres physiques et électriques de la cellule photovoltaïque. Dans le premier chapitre, nous avons tout d'abord rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite nous avons expliqué, le principe de l'effet photovoltaïque, le fonctionnement des cellules chargées de la conversion photovoltaïque et leurs caractéristiques principales. Ainsi que la présentation de différents types de cellules photovoltaïques et leurs performances. Puis, on a décrit au deuxième chapitre le circuit électrique équivalent la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$, et ses principales grandeurs caractéristiques que sont le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , son facteur de forme FF et son rendement énergétique η ainsi que l'étude de l'influence de la température sur les différents paramètres de la cellule. Dans le troisième chapitre, et après avoir traité l'effet de la température T sur les paramètres physique du silicium matériau de base de la cellule solaire, nous avons commencé par illustration de l'effet de la température à travers ces paramètres sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$, ensuite, nous avons extrait sous le même éclairement AM1.5, les différents paramètres photovoltaïques aux différentes températures entre 0 et 60 °C et leurs conséquences sur les performances de la cellule.

Notre étude nous a conduit à obtenir des résultats concluants où, nous avons constaté que le gap énergétique et la concentration intrinsèque du silicium augmente avec l'augmentation de la température et se traduit par la légère augmentation du courant de court-circuit avec un taux de 2.4 mA/°C, cependant les autres paramètres physiques : durée de vie, longueur de diffusion et mobilité des porteurs diminuent avec la hausse de température , ce qui justifie la diminution des paramètres photovoltaïques avec la température, telle que la variation de la tension de circuit ouvert V_{co} est de de -2 mV/°C, le taux de variation du facteur de forme FF est de l'ordre de -0.082% /°C, pour le rendement de conversion photovoltaïque de la cellule solaire η , il diminue linéairement avec la température de -0.070% /°C. Ensuite, nous avons présenté dans notre étude l'influence de la température sur les résistances parasites de la cellule solaire. À travers cette étude, nous avons constaté que l'augmentation de la température mène à une

augmentation de R_s et à une diminution de la résistance parallèle (ou shunt) R_{sh} . Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale P_{max} , du facteur de forme FF et du rendement η .

Au vu de cette étude, on trouve que la hausse de température a un effet néfaste sur le fonctionnement de la cellule solaire à base de silicium cristallin. Donc, pour maintenir un rendement maximal des cellules solaires, ces dernières doivent être réalisées selon une architecture qui permet l'évacuation de la chaleur, aussi la résistance R_s doit donc être la plus minimale possible en optimisant les contacts des électrodes, et en diminuant la résistivité du semiconducteur utilisé, alors que la résistance parallèle R_{sh} être la plus maximale possible en minimisant les défauts structuraux du matériau utilisé et en optimisant les épaisseurs des régions N et P et la zone de charge d'espace.

Références

Références

[1]	S.BENSALAM «.Effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Université Sétif, 2011
[2]	A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
[3]	J. Bernard, « Energie solaire calcul et optimisation », 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
[4]	B. Brousse, « Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique », Thèse de doctorat, université de Limoges (France), 2004.
[5]	B. Pire, "Bethe Hans Albrecht", ENCYCLOPEDIE UNIVERSALIS, version 12.00, logiciel et moteur de recherche OPTI Media, Paris 2007.
[6]	Faruk Kurker, " Microfabrication based design and simlation of hétérojunction solar cell", MSc Thesis. INAS, Cukurova university, ADANA, 2010.
[7]	Lechaari Med Amine, « Simulation de l'effet de température sur les performance d'une cellule solaire basé aux pérovskite MAPbCl3 », Mémoire de Master Genie Electricque, Université d'El-Oued 2022,
[8]	P.Michalopoulos, " Anovelapproach for the development and optimisation of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco", Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
[9]	ADHIM YOUNES « Amélioration de l'efficacité des cellules solaires en silicium cristallin en optimisant le dopage de la région de l'émetteur », Mémoire Master Physique , Université de Bouira 2021
[10]	L. Marleau, Introduction à la physique des particules (lectures notes), [En ligne] : http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/marleau_ppnotes.pdf
[11]	V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.
[12]	B. Equer, Energie solaire photovoltaïque (volumel : physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993
[13]	S. Quoizola, « Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût », Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 2003.
[14]	C.Hua and C.Shen ,Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system ,in Proc APEC,pp 679 ,685,1998.
[15]	H.Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques ,2 ème édition,Masson ,1990.
[16]	“A. ZERGA «Modelisation, Simulation et Caracterisation des Cellules

Références

	Solaires au silicium »Synthese des travaux de recherche de l'habilitation universitaire presentee a l'Universite de Tlemcen (2009).”
[17]	Xuan-Linh DANG, « Contribution à l'étude des systèmes Photovoltaïque (PV)/Stockage distribués. Impact de leur intégration à un réseau fragile » ,thèse de doctorat Domaine électronique - électrotechnique - automatique de l'école normale supérieure Cachan ,(2014]ISBN, page 76
[18]	Michael Graetzel, "Les nouvelles cellules solaires nanocristallines," Actualité Chimique
[19]	O.Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur,"Ecole Normale Supérieure de Cachan, Electrotechnique 5 Décembre 2009.
[20]	A. Mermoud, M. Viloz; www.pvsyst.com
[21]	A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006
[22]	https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques
[23]	“ Jing-shun Huang, Chen-Yuchou, Ching-Uhlin, Solar EnergyMaterials-Solar Cells94 182-186 (2010).”
[24]	“Cellulegraetzel-www.panneau-solairesouple.com photovoltaïque.kappatau.eu.”
[25]	Siegfried Selberherr. «Analysis and simulation of semiconductor devices » .Springer verlag1984
[26]	Jutta Beier, Klaus Bucher .« comparison of dark and light I-V curves of solar cells ». 10th European photovoltaic solar energy conference 1991
[27]	Christopher M Snowden. « Semiconductor device Modelling » .Springer verlag 1989.
[28]	K. Bucher, J. Bruns, H. G. Wagemann.« Absorption coefficient of silicon : An assessment of measurements and the simulation of temperature variation ». J. Appl
[29]	B.O. Seraphin. « Solar energy conversion – Solid state physics aspects » .Topics in applied physics. Vol-31. Springer verlag 1979.
[30]	Fatima Khelfaoui . « Influence d'une source de chaleur sur la distribution thermique dans un milieu semiconducteur fini-incidence sur la conversion photovoltaïque » . Mémoire de Magistère en électronique .Université de Constantine 2000
[31]	L. W . James et al, Appl Phys. Lett. 26 pp 467 .1975.
[32]	Nicolas Barnier ,Pascal Brisset . « Optimisation par algorithme génétique

Références

	sous contraintes, Technique et science informatiques » . Volume 18 - n_1.1999.
[33]	Zouach Foudil «Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques » Mémoire de magistère en électronique, Université Mentouri de Constantine, 2009
[34]	S. Rachedi, K. Ghaffour, Conférence MajecSTIC 2005 : Manifestation des JeunesChercheurs francophones dans les domaines des STIC; 122-126, Rennes (France), 2005.
[35]	A. G. Aberle, S. R. Wenham, M. A. Green, In: 23th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1993; p.133.
[36]	J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D Meissner, Solar Energy (2009), doi:10.1016/j.solener.2009.09.011.

Résumé :

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. Dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées aux températures du fonctionnement variant de 10 à 50 °C. Les paramètres caractéristiques des cellules solaires, à savoir le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion PV (η) sont influencés par la température. La dépendance de ces paramètres avec la température est étudiée pour une cellule solaire au silicium cristallin dans la gamme (0-60°C) sous un éclairage constant (1000 W/m²). Les résultats obtenus indiquent que la hausse de température a un effet néfaste sur le fonctionnement de la cellule solaire à base de silicium, qui se traduit par une diminution de son rendement de conversion.

Summary :

Photovoltaic conversion is a highly temperature-dependent energy application. In terrestrial applications, solar cells are typically exposed to operating temperatures ranging from 10 to 50°C. The characteristic parameters of solar cells, namely the short-circuit current (I_{cc}), the open-circuit voltage (V_{co}), the form factor (FF) and the PV conversion efficiency (η) are influenced by temperature. The dependence of these parameters with the temperature is studied for a crystalline silicon solar cell in the range (0-60°C) under a constant illumination (1000 W/m²). The results obtained indicate that the temperature rise has a detrimental effect on the operation of the silicon-based solar cell, which translates into a reduction in its conversion efficiency.

ملخص:

التحويل الكهروضوئي هو تطبيق طاقي يتأثر بدرجة كبيرة على درجة الحرارة. في التطبيقات الأرضية، تتعرض الخلايا الشمسية عادةً خلال تشغيلها لدرجات حرارة تتراوح من 10 إلى 50 درجة مئوية. و التي تؤثر بدرجة كبيرة على المعلمات المميزة للخلايا الشمسية ، أي تيار الدائرة القصيرة (I_{cc}) ، جهد الدائرة المفتوحة (V_{co}) ، عامل الشكل (FF) وكذا مردود التحويل الكهروضوئي (η). من خلال هذه المذكرة تمت دراسة مدى ارتباط هذه المعلمات مع درجة الحرارة لخلية شمسية من السيليكون البلوري في المجال (0-60 درجة مئوية) تحت إضاءة ثابتة (1000 واط / متر مربع). تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن ارتفاع درجة الحرارة له تأثير ضار على عمل الخلية الشمسية القائمة على السيليكون ، مما يترجم إلى انخفاض في مردود تحويلها.