

Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Electrotechnique*

**Spécialité :** *Energies Renouvelables*

**Par :** Zita Djihad

**Thème**

**INFLUENCE DES COUCHES ANTIREFLETS SUR LES  
PERFORMANCES D'UNE CELLULE SOLAIRE AU SILICIUM  
MONOCRISTALLIN.**

**Soutenu publiquement le :**

**Devant le jury :**

Bahri Ahmed	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
Ben yelloul Kamel	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
Ferkous Khaled	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
Djellouli Abdelkader	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2017/2018**

## Résumé :

L'élaboration des cellules solaires est en cours de développement et d'exploitation par de nombreux laboratoires à travers le monde. Certains modèles sont déjà industrialisés, d'autres sont en cours. En raison du coût élevé de l'expérience, l'outil de simulation est devenu primordial pour prédire le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent. L'objectif de notre travail entre dans ce cadre précis. Il concerne l'étude et la simulation des cellules solaires au silicium monocristallin avec les couches antireflets par logicielle SCAPS dans l'objectif d'optimiser leurs paramètres.

**Mots clefs :** cellules solaires, photovoltaïque, silicium monocristallin, couches antireflets, logicielle SCAPS.

## المخلص:

يجري تطوير الخلايا الشمسية من قبل العديد من المختبرات في جميع أنحاء العالم. وقد تم بالفعل تصنيع بعض النماذج، وهناك بعض النماذج قيد التنفيذ. ونظرا لارتفاع تكلفة التجربة، أصبحت أداة المحاكاة ضرورية للتنبؤ بتطوير البحوث، لا سيما في مجال الخلايا الكهروضوئية، مما يوفر الوقت والمال. إن هدف عملنا يندرج ضمن هذا الإطار الدقيق. وتتعلق الدراسة ومحاكاة الخلايا الشمسية من السيليكون الأحادي مع الطبقات المضادة للانعكاس بواسطة برنامج SCAPS من أجل تحسين المعلمات الخاصة بهم.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الشمسية، الضوئية، سليسيوم احادي التبلور، طبقات مضادة للانعكاس، برنامج SCAPS.

## Abstract:

The development of solar cells is being developed and operated by many laboratories around the world. Some models are already industrialized, others are underway. Due to the high cost of the experiment, the simulation tool has become essential to predict the development of research, particularly in photovoltaic, saving time and money. The objective of our work falls within this precise framework. It concerns the study and the simulation of solar cells with monocrystalline silicon with the antireflective layers in order to optimize their parameters.

**Key words :** solar cells, photovoltaic, monocrystalline silicon, antireflective layers, logicielle SCAPS.

# *REMERCIEMENTS*

*Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m' avoir donné le courage, la  
volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Et merci à Mes parents, pour leur soutien continu durant mes  
longues études*

*Je tiens à remercier les professeurs respectés et les étudiants pour leurs  
recommandations et leurs conseils.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents*

*A mes frères et mes sœurs*

*A tous ma famille*

*A tous mes collègues et mes amis partout*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science*

*Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien*

*Et la prospérité de l'humanité.*

*Zita djihad.*

## *Sommaire*

---

<b><i>Résumé</i></b> .....	I
<b><i>Remerciements</i></b> .....	II
<b><i>Dédicace</i></b> .....	III
<b><i>Sommaire</i></b> .....	IV
<b><i>Liste des figures</i></b> .....	VII
<b><i>Liste des tableaux</i></b> .....	IX
<b><i>Liste des symboles</i></b> .....	X
<b><i>Les abréviations</i></b> .....	XI
<b><i>Introduction Générale</i></b> .....	1
<b><i>Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium</i></b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Le soleil .....	3
I.3.Le rayonnement solaire .....	4
I.4. la conversion photovoltaïque .....	6
I.5.La cellule solaire .....	6
I.6.Composition des cellules solaires .....	7
I.7.Silicium comme matériau de base .....	8
I.8.Les différents types de cellules solaires au silicium .....	9
I.8.1.Cellules solaires monocristallines .....	9
I.8.2.Cellules solaires poly cristallines .....	10
I.8.3.Cellule solaire amorphe .....	11
I.9.Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin .....	11
I.10.Caractéristique électrique .....	12
I.11.Circuit électrique équivalent .....	13
I.12.Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire .....	15
I.12.a. Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	15
I.12.b. La tension en circuit ouvert.....	16
I.12.c. Le point du fonctionnement $P_m$ ( $V_m$ , $I_m$ ) .....	16
I.12.d. Le facteur de forme FF .....	16
I.13.Influence des différents paramètres sur la caractéristique I(V) .....	17
I.13.a. Influence de l'éclairement .....	17
I.13.b.Influence de la température .....	18

---

## *Sommaire*

---

I.13.c.Influence de la résistance série $R_s$ .....	18
I.13.d.Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ .....	19
I.14.Conclusion .....	20

### ***Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet***

II.1.Introduction .....	21
II.2.les Propriétés optiques .....	21
II.2.1. L'absorption .....	21
II.2.2. La transmission .....	22
II.2.3. La réflexion .....	22
II.3.Etude théorique de la réflexion .....	22
II.4.Théorie et conception des couches antireflets .....	24
II.5.Facteurs influant sur la réflexion .....	26
II.5.1. Surface du substrat .....	26
II.5.2. Angle d'incidence .....	27
II. 5.3. Indice de réfraction .....	27
II.6.Effet des couches antireflets sur le rendement énergétique .....	27
II.7.Effet des couches antireflets et son épaisseur sur la réflectivité .....	28
II.8.Matériaux utilisés dans la couche antireflet et les technique d'élaboration .....	30
II.8.1.Couche antireflet (CAR) .....	30
II.8.2.Les matériaux utilisés dans la CAR .....	30
II.8.3.Élaborations des différentes techniques de dépôts .....	31
II.8.3.a.Evaporation sous vide .....	31
II.8.3.b.Pulvérisation cathodique .....	32
II.8.3.c.Dépôt chimique en phase vapeur « CVD » .....	33
II.8.3.d.Dépôt des couches antireflet par atomisation (spray) .....	33
II.8.3.e.Spin-on .....	34
II .9: CONCLUSION .....	35

### ***Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats***

III.1. Introduction .....	36
III.2. Présentation du logiciel SCAPS-1D.....	36
III.2.1 : Notions de base .....	37
III.2.1.a. Lancer SCAPS .....	38
III.2.1.b. Définir le problème .....	38

## *Sommaire*

---

III.2.1.c. Définir le point de fonctionnement .....	38
III.2.1.d.Sélection des caractéristiques à simuler .....	39
III.2.1.e.Lancer le calcul .....	39
III.2.1.f.Afficher les courbes simulées .....	39
III.2.1.g.Les courbes I-V .....	40
III.2.2 : Définition d'une cellule solaire .....	40
III.2.2.1 : Edition de la structure d'une cellule solaire .....	40
III.2.2.2 : Définition des couches .....	41
III.3.Les paramètres de la cellule solaire à simuler .....	42
III .4.Résultats et Discussion .....	43
III .4.1. Cellules solaires à base de silicium sans couche antireflet .....	43
III .4.2. Cellule solaire à base de silicium avec une couche antireflet .....	45
III .4.2.1.Influence de la couche antireflet sur les caractéristiques électriques .....	45
III .4.2.2.Influence de l'épaisseur de la CAR sur les caractéristiques électriques .....	47
III .4.2.3.Influence de matériau de la couche antireflet sur les caractéristiques électriques .....	51
III .4.Conclusion .....	53
<b><i>Conclusion Générale</i></b> .....	54
<b><i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i></b> .....	55

## Liste des Figures et tableaux

### Liste des Figures :

#### Chapitre I

FigureI.1 :	Coupe schématique du soleil.....	4
FigureI.2 :	Spectres du rayonnement du corps noir à la T de 5 900 K.....	5
FigureI.3 :	Définition de l'Air Mass.....	5
FigureI.4 :	Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire.....	7
FigureI.5 :	Composition d'une cellule ou Silicium monocristallin.....	8
FigureI.6 :	Bloc de silicium.....	8
FigureI.7 :	plaquettes Wafers.....	9
FigureI.8 :	Plaque de silicium monocristallin.....	10
FigureI.9 :	Plaque de silicium poly cristallines.....	10
FigureI.10 :	Plaque de silicium amorphe.....	11
FigureI.11 :	Schéma de principe du montage d'une cellule PV.....	12
FigureI.12 :	Caractéristique I-V d'une cellule solaire ; à l'obscurité et sous éclairage.....	13
FigureI.13 :	Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire a jonction p-n.....	14
FigureI.14 :	Courbes I (V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule monocristalline.....	17
FigureI.15 :	L'influence de la température, sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire.....	18
FigureI.16 :	influence de la résistance série sur la caractéristique I -V d'une cellule solaire éclairée.....	19
FigureI.17 :	influence de la résistance shunt sur la caractéristique I -V d'une cellule solaire éclairée.....	19

#### Chapitre II

FigureII.1 :	la réflexion de la lumière.....	21
FigureII.2 :	la transmission de la lumière.....	22



## Liste des Figures et tableaux

FigureII.3 :	la réflexion de la lumière.....	22
FigureII.4 :	réflexion et transmission de la lumière à l'interface entre 2milieux d'indices de réfraction respectifs $n_1$ et $n_2$ .....	23
FigureII.5 :	réflexions dans le système air/car/silicium .....	24
FigureII.6 :	Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.....	26
FigureII.7 :	Effet des couches antireflets sur le rendement énergétique.....	28
FigureII.8 :	(a) Comparaison de la réflectivité mesurée et simulée (IMD) pour un substrat de silicium recouvert ou non de $\text{SiN}_x$ .....	29
FigureII.9 :	la réflectivité pour différentes épaisseurs de $\text{SiN}$ .....	29
FigureII.10 :	Schéma conventionnel d'une évaporation sous vide.....	32
FigureII.11 :	Schéma de la technique de pulvérisation cathodique .....	33
FigureII.12 :	l'équipement de dépôt par spray pyrolyse.....	34
FigureII.13 :	Equipement utilisé pour le dépôt, par rotation (spin-on), de la source dopante et de la couche antireflet.....	35
<b><u>Chapitre III</u></b>		
FigureIII.1 :	Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal...	37
FigureIII.2 :	Panneau des bandes d'énergie.....	49
FigureIII.3 :	Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage...	40
FigureIII.4 :	Définition de la structure d'une cellule solaire au Si.....	41
FigureIII.5 :	Propriétés de la couche Si.....	42
FigureIII.6 :	Schéma de la cellule solaire n-p en silicium à simuler.....	44
FigureIII.7 :	Caractéristique I-V de la cellule simulée sous éclairage.....	44
FigureIII.8 :	Définition de la structure d'une cellule solaire au $\text{ZnO}/\text{Si}$ .....	45
FigureIII.9 :	Schéma de la cellule solaire à simuler $\text{ZnO}/\text{Si}$ .....	46
FigureIII.10 :	Caractéristique I-V de la cellule $\text{ZnO}/\text{Si}$ sous éclairage.....	47

## Liste des Figures et tableaux

---

FigureIII.11 :	Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour $e=1 \mu\text{m}$ .....	48
FigureIII.12 :	Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour $e=0.5 \mu\text{m}$ .....	48
FigureIII.13 :	Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour $e=0.1\mu\text{m}$ .....	49
FigureIII.14 :	Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour $e=0.05 \mu\text{m}$ .....	49
FigureIII.15 :	Effet de l'épaisseur de couche antireflet de ZnO sur le rendement énergétique.....	50
FigureIII.16 :	Caractéristique I-V de la cellule ZnS /Si pour $e=2 \mu\text{m}$ .....	52
FigureIII.17 :	Influence des couches antireflets sur le rendement énergétique.....	53

### Liste des tableaux :

#### Chapitre I

Tableau I.1 :	quelques caractéristiques principales du soleil.....	3
---------------	--	---

#### Chapitre II

Tableau II.1 :	Différents matériaux utilisés comme couche antireflet et sont Valeurs moyennes de l'indice de réfraction.....	31
----------------	---	----

#### Chapitre III

Tableau III.1 :	Paramètres physiques du silicium introduits dans SCAPS.....	43
Tableau III.2 :	les valeurs des caractéristiques de la cellule simulie.....	45
Tableau III.3 :	Les Paramètres physiques de ZnO introduits dans SCAPS.....	46
Tableau III.4 :	les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule ZnO/Si.....	47
Tableau III.5 :	les valeurs des caractéristiques électriques pour différentes valeurs de l'épaisseur de ZnO.....	50
Tableau III.6 :	<i>les Paramètres physiques de ZnS introduits dans SCAPS.</i>	51
Tableau III.7 :	les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule ZnS/Si	52

## Liste des symboles et les abréviations

---

### Liste des symboles :

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>
$\theta$	l'angle du soleil
T	la température
K	la constante de Boltzmann $1.38 \times 10^{-23} \text{ eV/K}$
$\lambda$	Longueur d'onde
I	Le courant électrique
V	La tension électrique
q	La charge d'un électron $1.602 \times 10^{-19}$
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$I_s$	Courant de saturation
n	Le facteur d'idéalité
$I_{obs}$	Courant d'obscurité
$V_{th}$	Le potentiel thermique
$R_s$	La résistance série
$R_{sh}$	La résistance shunt
$R_p$	La résistance parallèle
$G_{sh}$	La conductance shunt
$V_j$	La tension aux bornes de la jonction p-n
$P_m$	Puissance maximale
$I_m$	Curant du point du fonctionnement
$V_m$	Tension du point du fonctionnement
FF	Le facteur de forme
$\eta$	Le rendement
S	La surface de la cellule
E	L'éclairement
n	d'indices de réfraction

## Liste des symboles et les abréviations

---

R	Le coefficient de réflexion
r	l'amplitude de réflexion
k	coefficient d'extinction
$\alpha$	coefficient d'absorption
$\varphi$	phase optique
e	épaisseur
t	La transmission
i	l'intensité lumineuse incidente
c	la vitesse de la lumière dans le vide
$v(\lambda)$	la vitesse de la lumière dans le matériau

### Les abréviations :

AM	masse atmosphérique
Ph	Photovoltaïque.
CAR	couche anti réflexion
SCAPS	Solar Cell Capacitance Simulator

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

Les énergies renouvelables sont créées à partir de sources d'énergies naturelles et écologiques, Ces énergies sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants qui les rendent inépuisables. Elles sont également parfois appelées énergies "vertes" ou "propres" car elles émettent moins de CO<sub>2</sub> que les énergies issues de sources fossiles. Aujourd'hui les différents gouvernements cherchent à accroître la part d'énergie d'origine renouvelable sur le marché de l'énergie afin de lutter pour la sauvegarde de l'environnement [1].

Nous distinguons cinq grandes familles d'énergie renouvelable qui sont : Les énergies solaires, Les énergies Éoliennes, Les énergies Hydrauliques, La biomasse et La Géothermie.

L'énergie solaire est l'énergie la plus répandue et la plus répartie dans le monde. En une année, l'humanité entière consomme 10 milliards de Tonnes équivalent pétrole (Tep). Cette quantité représente moins de 3 % de ce que le Soleil nous envoie gratuitement chaque jour [2].elle est désigné l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur (le silicium, le CdTe, l'AsGa, le CIS, etc.) d'un photon en électron [3] dans une cellule. La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules [4].

Lors de la fabrication de cellules photovoltaïques en silicium cristallin, une étape importante pour obtenir de hauts rendements de conversion est l'étape de passivation qui consiste à augmenter la collecte des porteurs photo générés en améliorant leur durée de vie ,via l'amélioration de la qualité cristalline du silicium, Hormis leurs propriétés de passivation, les couches minces déposées doivent également présenter des propriétés optiques spécifiques. Ainsi, lorsqu'elles sont situées sur la face avant des cellules [5].

## **Introduction générale**

---

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence des Couches Antireflets sur les Performances d'une Cellule Solaire au Silicium monocristallin.

Cette étude comporte trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons Généralités sur la cellule solaire au silicium.
- Dans le deuxième chapitre nous présentons Théorie de réflexion et de couche antireflet.
- Dans le troisième chapitre nous étudions l'effet des différentes de deux types des couches antireflets et d'épaisseur Sur le rendement de la cellule solaire en silicium monocristallin.

# Chapitre I



# Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

---

## I.1.Introduction :

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. [1]

Dans ce chapitre, nous présentons des notions sur la source de l'énergie solaire (le soleil et le rayonnement) et des généralités sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (un matériau silicium puisque c'est le matériau utilisé et la cellule solaire).

## I.2. Le soleil :

Le Soleil est une étoile, ce qui signifie qu'il produit sa propre lumière, et le Soleil est une naine jaune, une des centaines de milliards d'étoiles qui composent notre Galaxie, la Voie lactée. Elle est située à 150 millions de kilomètres de la Terre.

Le Soleil est une immense boule de gaz chauds constituée principalement d'hydrogène et d'hélium, ces deux éléments les plus abondants de l'Univers. Elle produit toute son énergie par un processus que l'on nomme fusion nucléaire. Au centre du Soleil, des noyaux d'hydrogène fusionnent et se transforment en noyaux d'hélium [2].

**Tableau.I.1** : montre quelques caractéristiques principales du soleil [3] :

<b>Caractéristique</b>	<b>Valeur</b>
<b>Masse</b>	<b><math>1,989 \times 10^{30}</math> Kg</b>
<b>Diameter</b>	<b><math>1,392 \times 10^9</math> m</b>
<b>Masse volumique moyenne</b>	<b><math>1410</math> Kg m<sup>-3</sup></b>
<b>Puissance rayonnée</b>	<b><math>3,83 \times 10^{26}</math> W</b>
<b>Temperature superficielle</b>	<b>5770 K</b>

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

La structure du soleil est schématisée à la figure (I.1), On distingue quatre zones particulières ; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [3].

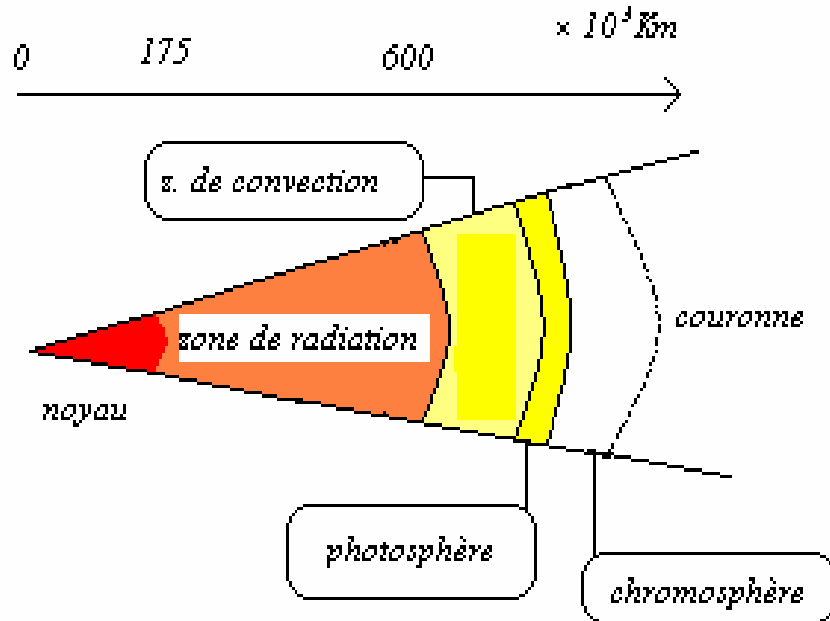


Fig. I.1 : Coupe schématique du soleil [3]

### I.3. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le Soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le Soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission est dans le jaune ( $\lambda=570 \text{ nm}$ ), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets. Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire a subi plusieurs « filtrations ». On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (connu pour stopper une bonne partie des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau.

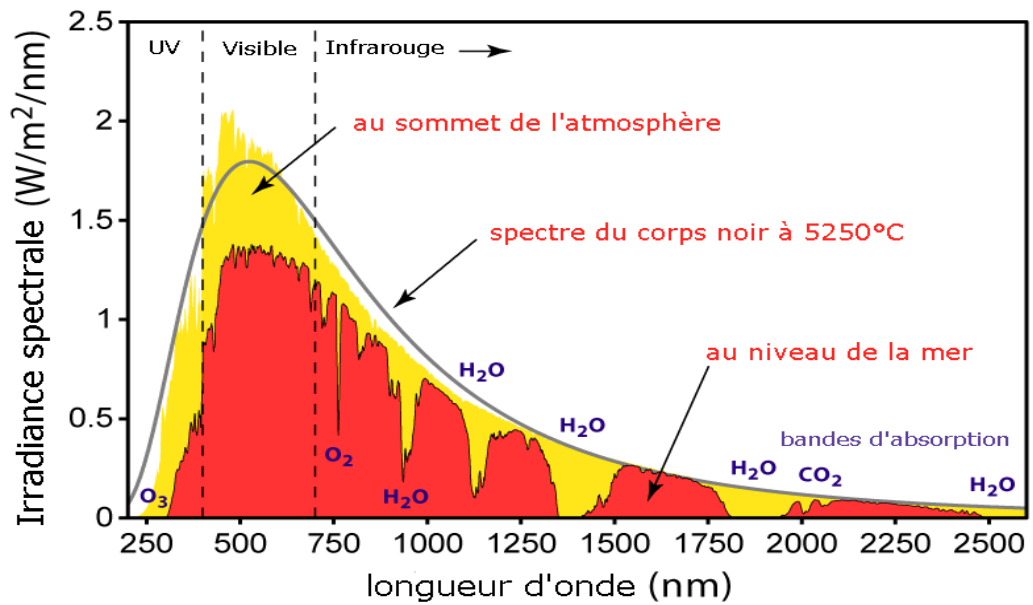


Fig. I.2 : Spectres du rayonnement du corps noir à la T de 5 900 K [4].

La partie faible du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la Terre, des ondes radio décamétriques aux rayons ultraviolets les plus mous, le reste étant réfléchi ou filtré par l'atmosphère et l'ionosphère. [4]

La notion d'AM pour « *Air Mass* » (masse atmosphérique) a été définie pour pouvoir comparer les performances des cellules photovoltaïques. Cette convention permet d'harmoniser les résultats dans les laboratoires.

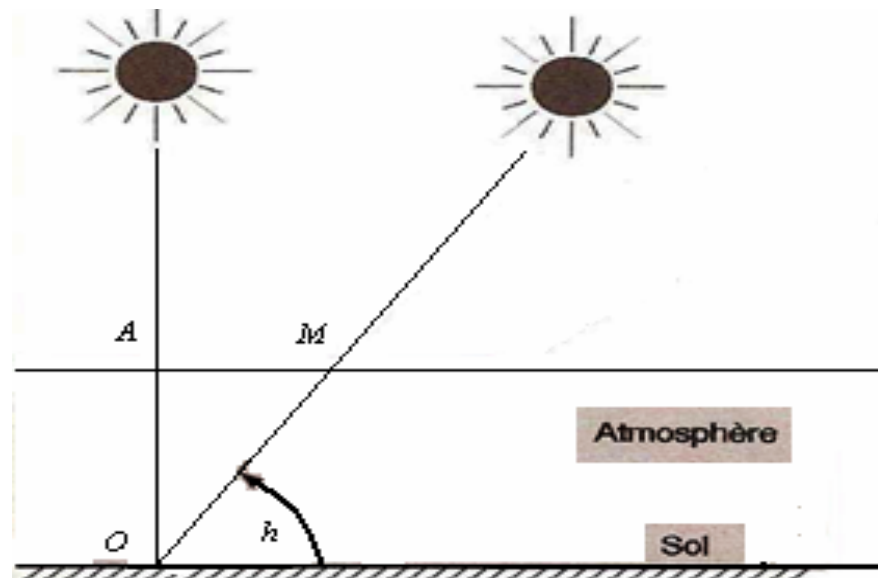


Fig. I.3 : Définition de l'*Air Mass*. [3].

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

---

AM quantifie la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (I.1)$$

Les spectres solaires *AM0* et *AM1.5* sont principalement utilisés pour évaluer les rendements de conversion des cellules solaires. *AM0* représente le spectre solaire dans l'espace (hors atmosphère) et est utilisée pour évaluer les performances des cellules solaires pour applications spatiales. Le spectre solaire *AM 1.5* représente le spectre solaire sur terre à une altitude de 0 m en plein soleil et avec un angle zénithal  $\theta$  de  $48,2^\circ$  (cette valeur de  $\theta$  donnant  $AM= 1,5$ ) [5].

### I.4. la conversion photovoltaïque :

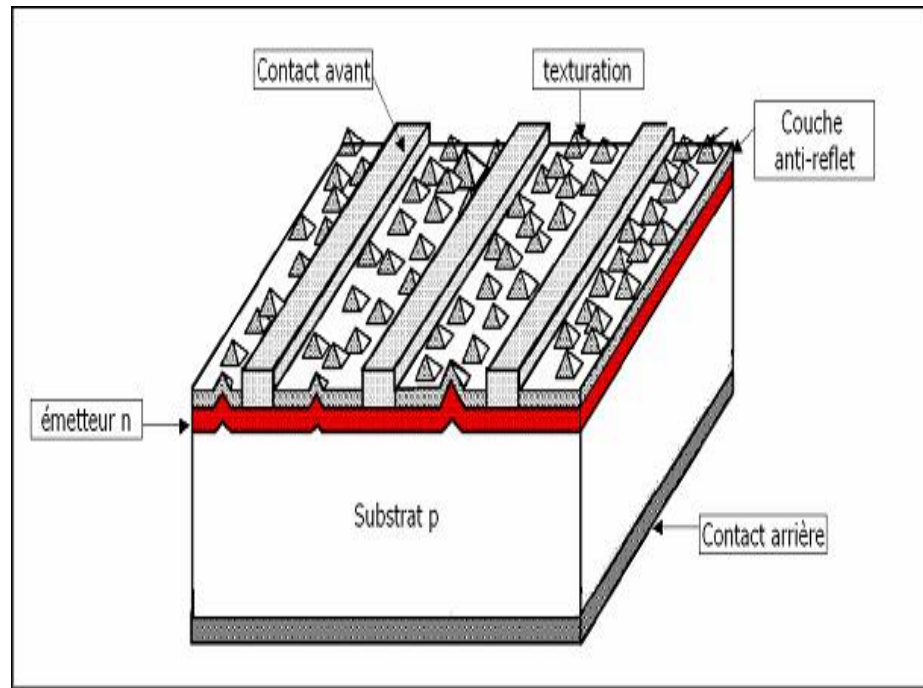
Le terme photovoltaïque se compose du mot grec désignant la lumière « photo » et du nom de famille du physicien Alessandro volta, auquel la « tension » électrique lui doit aussi son unité (volt).il signifie la conversion direct d'énergie lumineuse en énergie électrique au moyen de cellules photovoltaïques [6].

La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption des photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie du gap du semi-conducteur utilisé ; celle-ci conduit à la génération de paires électron-trou qui sont ensuite séparées grâce à la présence d'un champ électrique permanent à l'interface entre les zones n et p de la jonction. Il en résulte l'apparition d'une différence de potentiel au voisinage de la jonction (entre les contacts métalliques).

La séparation des porteurs est obtenue par un champ électrique qui est le plus souvent généré par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différent (hétérojonctions), ou par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diode Schottky), ou à l'interface de deux zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres (homojonction ou jonction p-n).[7]

### I.5.La cellule solaire :

Les cellules solaires ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. [8]



**Fig. I.4 :** Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire. [3]

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrice, ...etc.) ou bien regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques. [4]

### **I.6.Composition des cellules solaires :**

La cellule solaire est composée de plusieurs couches :

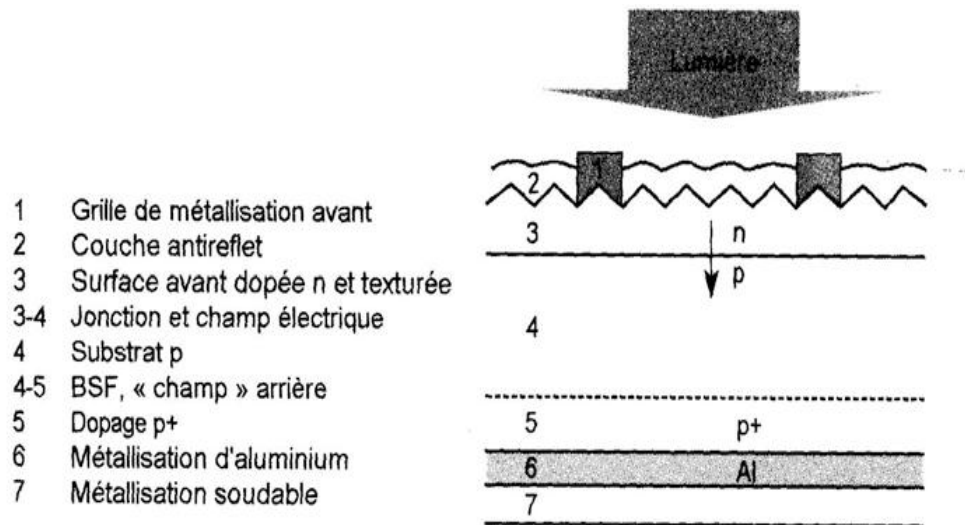
- une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion.

- une grille conductrice avant " collectrice des électrons " qui sert de cathode (pôle négatif) et qui ne doit pas être sensible à la corrosion. Elle est sous la forme d'un peigne, n'occulte qu'une faible portion de surface (5 à10 %).

- une couche de type (n) ayant des porteurs de charge libres négatif (électrons).

- une couche dopée (p) ayant des porteurs de charges positives (trous), crée une jonction avec la couche précédente.

- une surface conductrice en métal "grille collectrice arrière " qui joue le rôle de l'anode (pôle positif). [7]



**Fig. I.5 :** Composition d'une cellule au Silicium monocristallin [9].

### I.7.Silicium comme matériau de base :

Le silicium est maintenant le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium).



**Fig. I.6 :** Bloc de silicium. [10].

Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers).



**Fig. I.7 :** *plaquettes Wafers.* [10]

Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière. La production des cellules solaire nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. [10]

### **I.8. Les différents types de cellules solaires au silicium :**

Il existe différents types de cellules en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si).

#### **I.8.1. Cellules solaires monocristallines :**

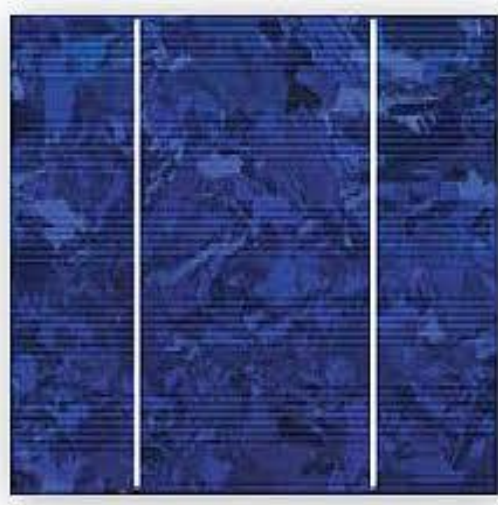
Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, appelées galettes. Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arête de 152 mm La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion (CAR). Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules poly cristallines. [11]



**Fig. I.8 :** *Plaque de silicium monocristallin.* [1]

### I.8.2. Cellules solaires poly cristallines :

Dans ce type Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires poly cristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires poly cristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires poly cristallines présentent un rendement entre 13 et 16 % . [11]



**Fig. I.9 :** *Plaque de silicium poly cristallines.* [1]



### I.8.3. Cellule solaire amorphe :

Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium. Les cellules amorphe est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet, par exemple, de les utiliser dans les panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m<sup>2</sup> pour obtenir 1kWc) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance.

Les cellules au silicium amorphes sont utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice...) [12].

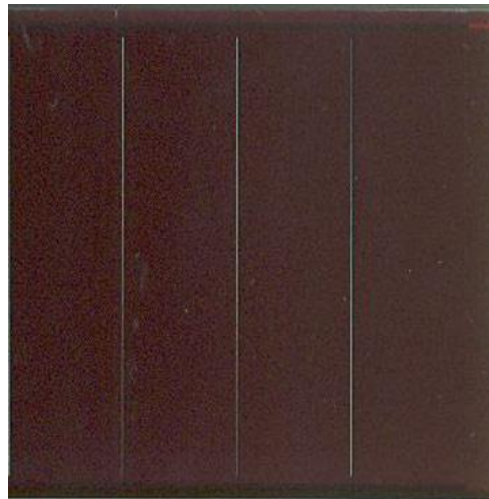


Fig. I.10 : *Plaque de silicium amorphe* [13].

### I.9. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin :

Un matériau semi-conducteur est isolant dans des conditions normales, et devient conducteur électrique lorsqu'on lui apporte de l'énergie. Cette énergie permet aux électrons de se détacher des noyaux des atomes et de se déplacer librement dans la structure du matériau. Lorsque cette énergie est apportée sous forme lumineuse, ce sont des « grains » de lumière appelés photons qui cèdent leur énergie aux électrons, On parle alors d'effet photoélectrique. La cellule photovoltaïque est d'exploiter ce déplacement d'électrons pour le convertir en un courant électrique utilisable. Pour cela, on attire les électrons hors du matériau via une électrode de collecte reliée à un circuit électrique extérieur.

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

Toute l'astuce réside dans le fait de forcer les électrons à s'écouler dans l'électrode plutôt que de se recombiner avec des atomes chargés positivement au sein du matériau. Cela nécessite la présence d'un champ électrique permanent interne au matériau. Pour cela, on crée deux zones : une zone p chargée (+) et une zone n chargée (-), qui vont former une jonction p-n. Cette jonction assure la fonction de diode en ne permettant le passage du courant que dans un sens, et oriente de ce fait le déplacement des électrons. [14]

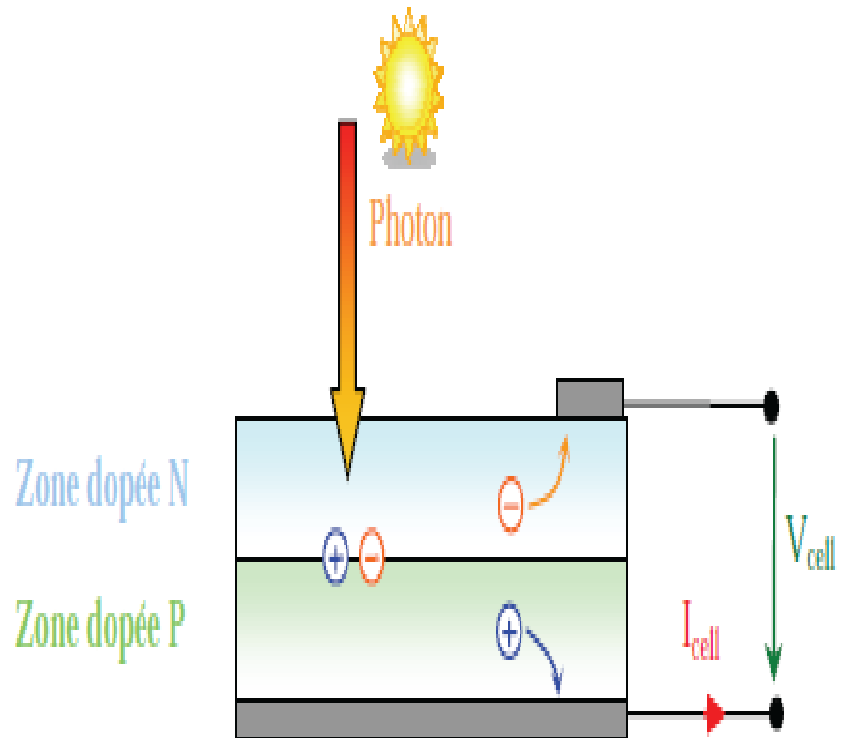
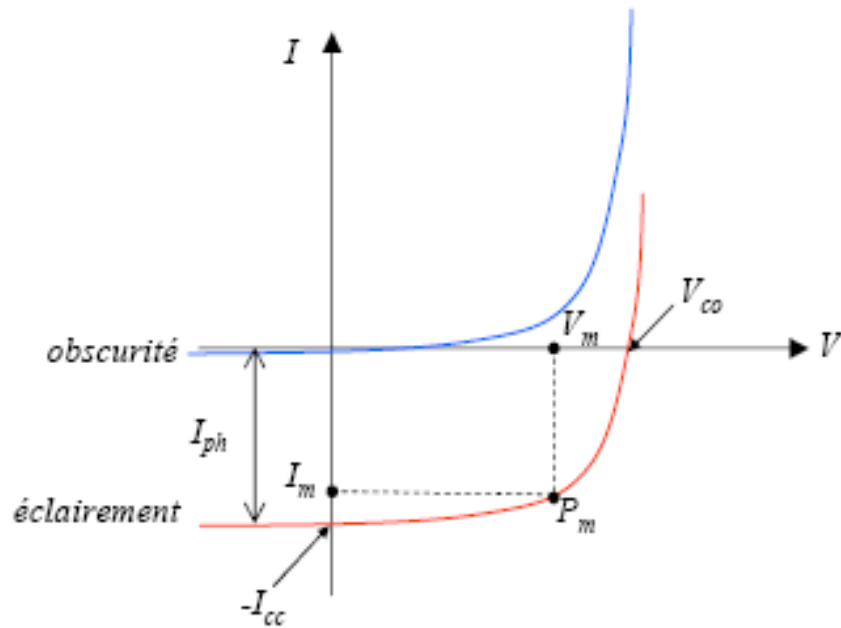


Fig. I.11 : Schéma de principe du montage d'une cellule PV. [11]

### I.10. Caractéristique électrique :

La variation du courant «  $A$  » (ou densité du courant «  $A/cm^2$  ») en fonction de la tension «  $V$  », à l'obscurité et en particulier sous éclairement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure (I.12) montre deux exemples de caractéristiques  $I-V$  de cellule solaire sans et avec éclairement.



**Fig.12 :** Caractéristique I-V d'une cellule solaire ; à l'obscurité et sous éclairage. [3]

### I.11.Circuit électrique équivalent :

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, la cellule solaire commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil  $V_s$ . le cas de la cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante:

$$I_{abs} = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (I.2)$$

Où  $n$  : le facteur de qualité de la diode ; sans dimension,  $I_s$  : le courant de saturation en Ampère (A),  $V_{th}$  : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (I.3)$$

Où :

$K$  : la constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{23} \text{J/K} = 8.61400 \times 10^5 \text{eV/K}$ ).

$T$  : la température absolue en Kelvin (K).

$q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.60281 \times 10^{-19} \text{C}$ ).

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

Sous éclairage, le terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{PH} - I_{abs} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (I.4)$$

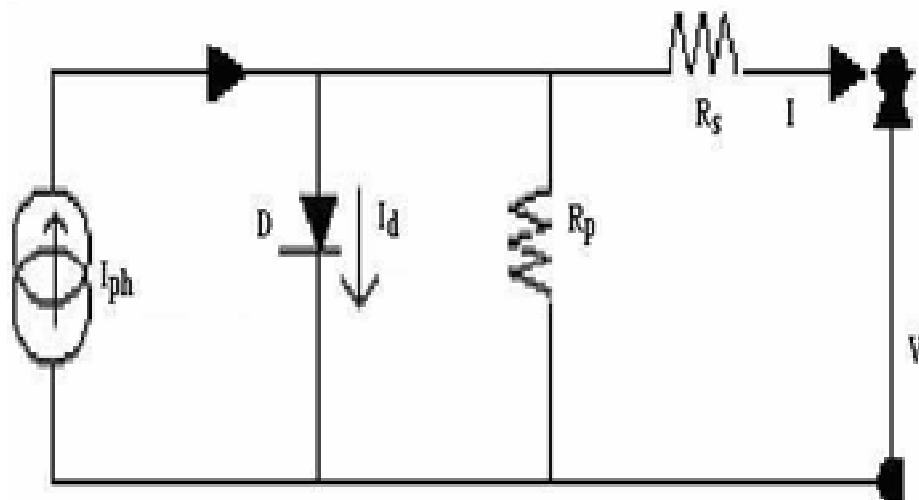
Dans le cas d'une cellule solaire réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords ; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique  $I-V$  devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt  $\left(G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}\right)$  pour écrire l'équation sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - G_{sh} (V + IR_s) \quad (I.6)$$

Et par conséquence le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (I.13) par un générateur de courant ( $I_{ph}$ ), une diode et deux résistances parasites ( $R_s$ ) et ( $R_{sh}$ ).



**Fig. I.13 :** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire a jonction P-N[3]

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

---

- ❖ La diode ( $D$ ) : modélise la jonction  $P-N$ .
- ❖ Le générateur du courant ( $I_{ph}$ ) : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant Photo généré.
- ❖ La résistance série  $R_s$  : modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension  $V_j$  aux bornes de la jonction  $p-n$ . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule solaire.
- ❖ La résistance parallèle  $R_p$  (résistance shunt  $R_{sh}$ ) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones  $n$  et  $p$  de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.[3]

### I.12. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire :

#### I.12.a. Le courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ( $V=0$ ). D'où, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.5), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Pour la plus part des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme  $I_s \left[ \exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors donnée par la relation :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (I.8)$$

Dans le cas idéal ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_{sh} \rightarrow \infty$ ) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (I.9)$$

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  se confond avec la photo courant  $I_{ph}$  :

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires au silicium

---

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (I.10)$$

### I.12.b. La tension en circuit ouvert $V_{co}$ :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, et elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = nV_{th} \log \left[ 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right] \quad (I.11)$$

### I.12.c. Le point du fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ :

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

$$P_m = I_m \times V_m \quad (I.12)$$

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

### I.12.d. Le facteur de forme $FF$ :

Le facteur de forme ( $FF$ ) «*Fil Factor* » est définit comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ) ; d'où il est donne par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.13)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance  $P_m$  sera égale à ( $I_{cc} \times V_{co}$ ). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul Paramètre, s'appelle le rendement  $\eta$  : Il est définit comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si  $S$  est la surface de la cellule (en  $m^2$ ) et  $E$  est l'éclairement -irradiante- (en  $W/m^2$ ) le rendement  $\eta$  énergétique s'écrit [3] :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.14)$$

Ou d'après (I.13) :  $P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (I.15)$$

### I.13. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I(V) :

#### I.13.a. Influence de l'éclairement :

La figure(I.14) présente les caractéristiques d'une cellule monocristalline typique de 10X10 cm : on a tracé la variation du courant par rapport à la tension pour Plusieurs intensités de rayonnement solaire.

Dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse [9], dans une cellule monocristalline la cellule peut fournir une tension correcte même à petits éclairages [15].

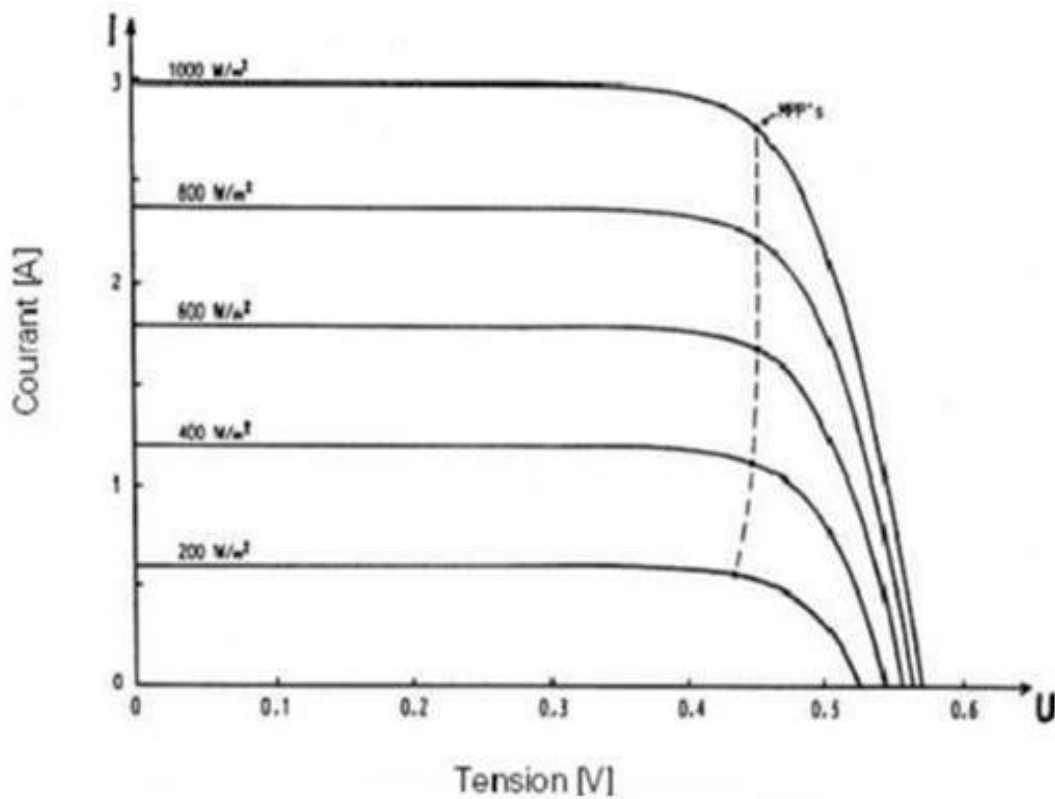


Fig. I.14 : Courbes I (V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule monocristalline [15]

### I.13.b. Influence de la température :

La température ( $T$ ) est un paramètre très important dans le comportement des cellules Solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure (I.15) montre l'influence de la température, sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire par ce que la température varie.

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du Courant du court-circuit ( $I_{cc}$ ), et on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert. ( $V_{co}$ ) en même temps. L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension ( $V_m$ ) et un léger accroissement du courant ( $I_m$ ) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale ( $P_m$ ) [3].

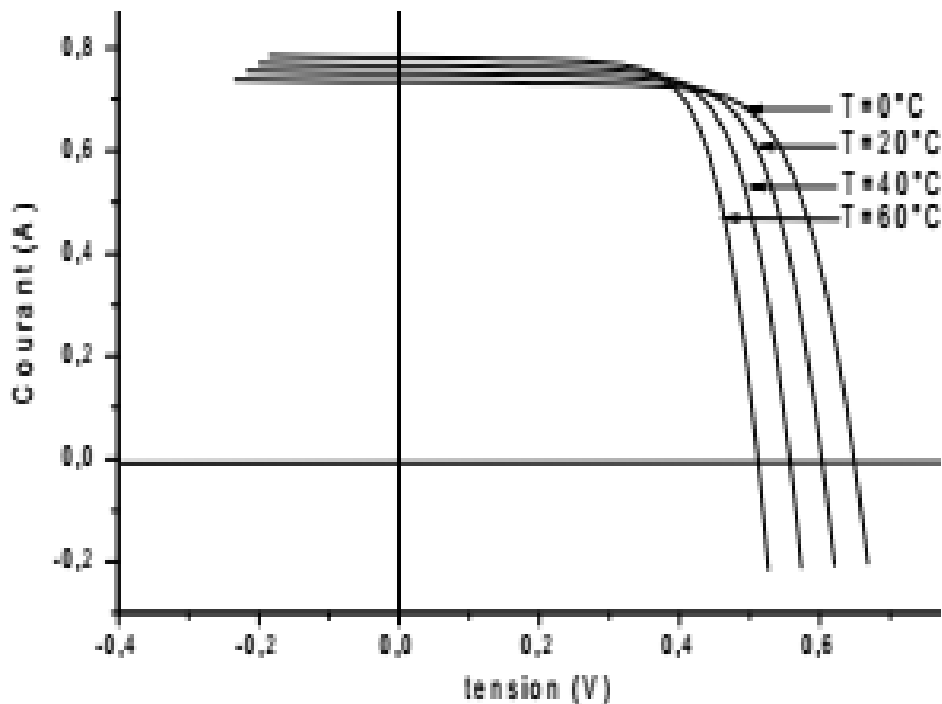


Fig. I.15 : L'influence de la température, sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire [3].

### I.13.c. Influence de la résistance série $R_s$ :

La résistance série ( $R_s$ ) caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [16].



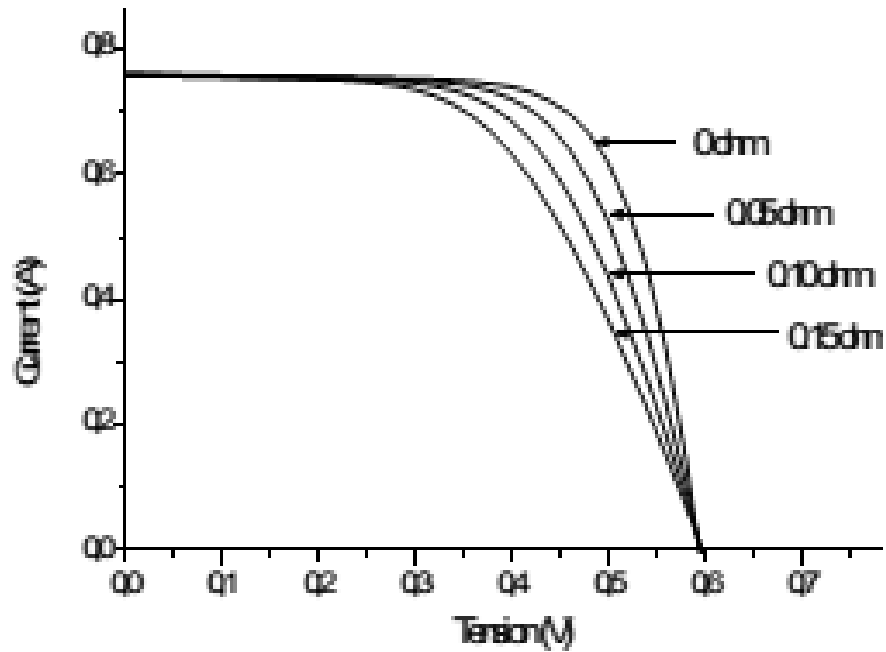


Fig. I.16 : influence de la résistance série sur la caractéristique I - V d'une cellule solaire éclairée [3].

### I.13.d. Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ :

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile (Micro court-circuit).

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant [17].

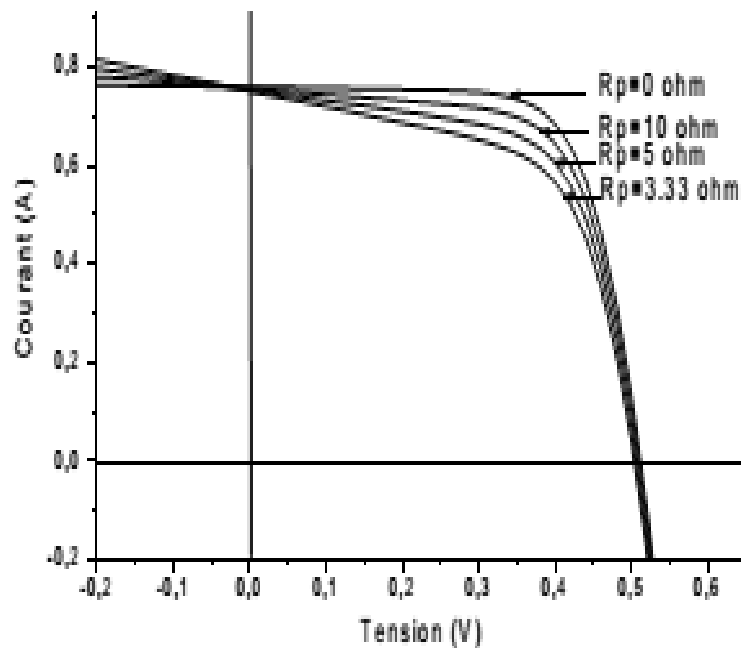


Fig. I. 17 : influence de la résistance shunt sur la caractéristique I - V d'une cellule solaire éclairée [3].

### **I.14. Conclusion :**

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et. Nous avons ensuite parlé sur le silicium et les différents types de cellules solaires au silicium, le fonctionnement, et leurs grandeurs caractéristiques, Finalement nous avons abordé l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques des cellules solaires.

# Chapitre II

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

### II.1.Introduction :

Dans une cellule solaire, on cherche à capter la plus grande partie des photons utiles du spectre solaire, en minimisant la réflexion à la surface de la plaquette [18], pour obtenir ce résultat doit être placé une couche antireflet sur le substrat d'une cellule solaire. Le chapitre II, présente comment les propriétés optiques des couches diélectriques sont exploitées pour réduire la réflectivité à la surface des cellules solaire, les matériaux utilisés comme CAR, et les Techniques de dépôt des couches antireflet.

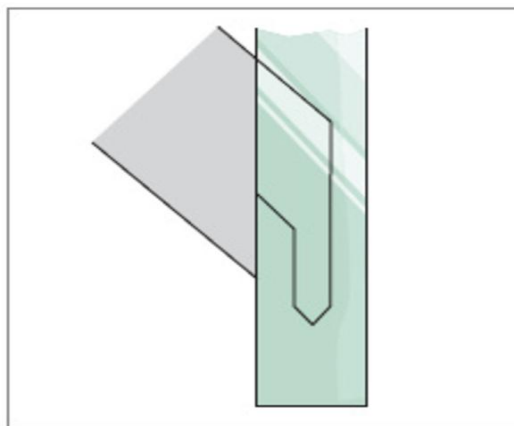
### II.2.les Propriétés optiques :

Afin de comprendre les enjeux de la gestion de la lumière au sein des cellules solaires, prenons l'exemple d'une couche absorbante isolée d'épaisseur finie. Lorsqu'un faisceau lumineux est dirigé vers une telle couche, trois mécanismes peuvent intervenir [19] : l'absorption, la transmission et la réflexion.

Pour une source lumineuse donnée, l'importance relative de ces trois phénomènes dépend à la fois des propriétés optiques de la couche absorbante, de la position de la source, de l'état de polarisation de la lumière incidente et de la longueur d'onde considérée si le matériau est dispersif. Dans tous les cas, le principe de conservation de l'énergie doit être respecté. [19]

#### II.2.1. L'absorption :

L'absorption de la lumière est un phénomène optique au cours duquel l'énergie lumineuse ou électromagnétique est absorbée par une substance quelconque [20]. Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire [21].



*Fig. II.1 : L'absorption de la lumière [22].*

### II.2.2. La transmission :

La transmission (facteur de transmission) – pourcentage du rayonnement solaire qui traverse la fenêtre et qui est transmis à l'intérieur de la pièce, le coefficient de transmission du rayonnement T pourra prendre une valeur comprise entre 0 et 100 % ou encore entre 0 et 1 [23].

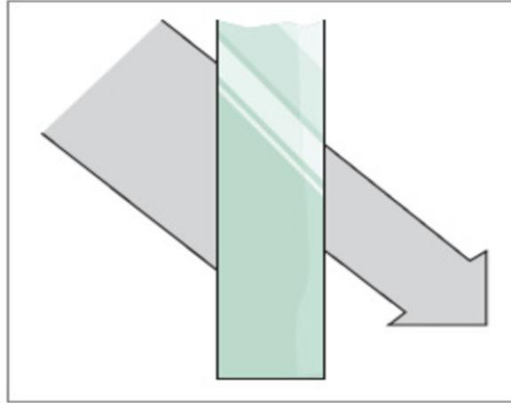


Fig. II.2 : la transmission de la lumière [22].

### II.2.3. La réflexion :

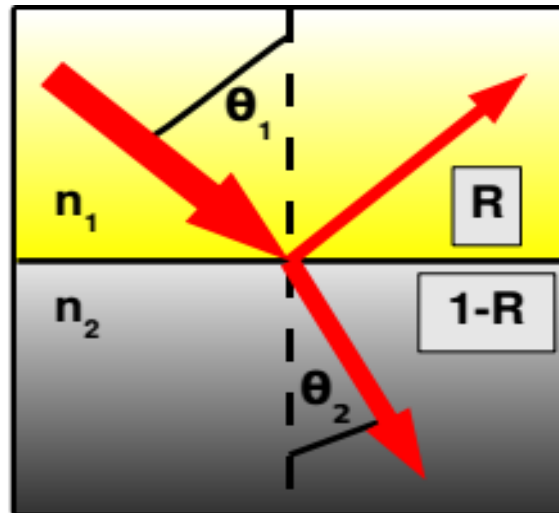
Lorsque la lumière atteint un nouveau milieu une partie est réfractée tandis que l'autre partie est renvoyée dans le premier milieu : on dit que cette lumière subit une réflexion [24].



Fig. II.3 : la réflexion de la lumière [22].

### II.3. Etude théorique de la réflexion :

C'est l'étude de la lumière transmise ou réfléchi par un corps dans différentes polarisations qui va fournir des informations sur le milieu, car les coefficients de Fresnel dépendent de la géométrie, mais aussi des caractéristiques des deux milieux, via  $n_1$  et  $n_2$  [25].



**Fig.II.4 :** réflexion et transmission de la lumière à l'interface entre 2 milieux d'indices de réfraction respectifs  $n_1$  et  $n_2$  [26].

La réflectivité à l'interface des deux milieux,  $n_s$  et  $n_0$  par la relation de Fresnel est :

$$R = \left[ \frac{n_s - n_0}{n_s + n_0} \right]^2 \quad (II.1)$$

Où :  $n_s$  et  $n_0$  sont les indices de réfraction du semi-conducteur et du milieu environnant respectivement.

Si le milieu environnant est l'air,  $n_0=1$ .

$$R = \left| \frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right|^2 \quad (II.2)$$

Le coefficient de réflexion  $R$  à l'interface est simplement le carré de l'amplitude de réflexion  $r$  :

$$R = |r|^2 \quad (II.3)$$

Avec  $r$  amplitude du coefficient de réflexion  $R$ , elle est liée aux indices de réfraction des deux milieux :

$$r = \frac{n_s - n_0}{n_s + n_0} \quad (II.4)$$

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

Tout milieu peut être décrit par l'indice optique complexe  $\tilde{n}$ , dans le cas général :

$$\tilde{n} = n - ik \quad ; \quad (i^2 = -1) \quad (II. 5)$$

Où  $n$  est l'indice de réfraction et  $k$  le coefficient d'extinction lié à le coefficient d'absorption  $\alpha$  du milieu pour chaque longueur d'onde  $\lambda$  par la relation [26] :

$$\kappa = \frac{\lambda \times \alpha}{4\pi} \quad (II. 6)$$

Pour le semi-conducteur L'indice de réfraction devient :

$$\tilde{n}_s = n_s - ik \quad (II. 7)$$

Le remplacement de  $\tilde{n}_s$  dans l'équation (II.4) donné :

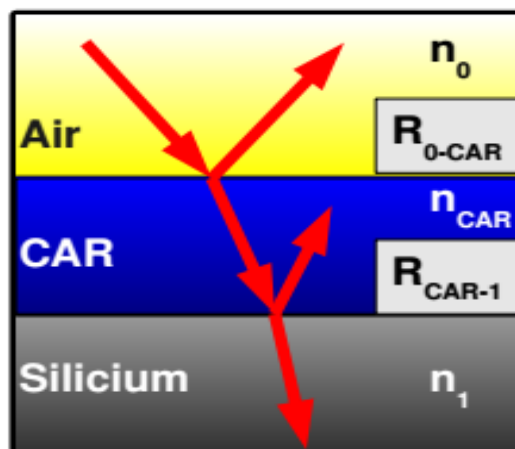
$$r = \frac{n_s - ik_s - n_0}{n_s - ik_s + n_0} \quad (II. 8)$$

Alors le coefficient de réflexion égale [27] :

$$R = \frac{(n_s - n_0)^2 + k_s^2}{(n_s + n_0)^2 + k_s^2} \quad (II. 9)$$

### II.4. Théorie et conception des couches antireflets :

Considérons le cas d'une couche antireflets apposée sur la surface du semi-conducteur d'indice de réfraction  $n_c$  est insérée entre le milieu environnant d'indice  $n_0$  et le substrat d'indice  $n_s$  sous une incidence normale.



*Fig. II.5* : réflexions dans le système air/car/silicium

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

L'amplitude et la phase de l'onde réfléchie sont dépendantes du saut d'indice. Cette réflexion, à incidence normale, est donnée en phase et en amplitude par :

$$r = \frac{(r_1 + r_2 \exp(-2i\varphi))}{(1 + r_1 r_2 \exp(-2i\varphi))} \quad (II. 10)$$

Avec :

$$r_1 = \frac{n_c - n_0}{n_c + n_0} \quad (II.11)$$

$$r_2 = \frac{n_s - n_c}{n_s + n_c} \quad (II. 12)$$

$$\varphi = \frac{2\pi n_c e}{\lambda} \quad (II. 13)$$

Où les indices  $r_1$  et  $r_2$  réfèrent aux air- couche antireflets respectivement, interfaces couche antireflets -semi-conducteur,  $\varphi$  est la différence de phase optique entre un rayon réfléchi en  $r_1$  et un rayon réfléchi en  $r_2$ ,  $e$  est l'épaisseur géométrique de la couche et  $\lambda$  la longueur d'onde [27] [28].

Pour qu'une couche antireflet produise une réflexion nulle, il faut donc satisfaire les conditions :

Il faut que les rayons aient des amplitudes identiques pour obtenir une intensité résultante nulle, ce qui équivaut à  $r_1 = r_2$  On obtient donc l'indice de réfraction optimal  $n_c$  [18] :

$$n_0 n_s = (n_c)^2 \quad (II. 14)$$

D'autre part il faut :

$$\varphi = \frac{(2m-1)\pi}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (II. 15)$$

On choisit  $m=1$  :

$$e = \frac{\lambda}{4n_c} \quad (II. 16)$$

Donc la couche antireflet doit être une lame quarte d'onde pour l'onde incidente. L'épaisseur ( $e$ ) à choisir pour une réflexion totale dépend de la longueur d'onde. Dans le



## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

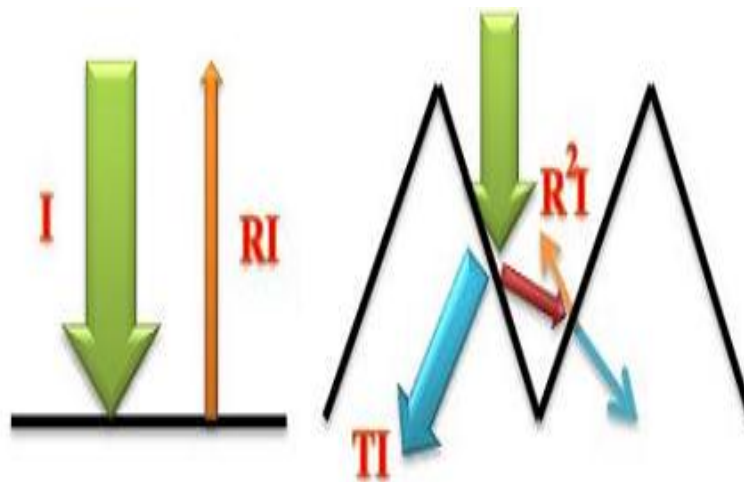
domaine photovoltaïque, on prend généralement 600 nm comme une référence pour le calcul. Cette longueur d'onde correspond en effet à l'émission maximale et réflexion minimale du soleil [26].

### II.5.Facteurs influant sur la réflexion :

Un grand nombre des facteurs qui influent sur la réflexion sur la surface de la cellule sont plusieurs, parmi eux comprennent : surface du substrat, l'angle d'incidence et Indice de réfraction :

#### II.5.1. Surface du substrat :

La rugosité de la surface permet réduire de la réflectivité par la favorisation des chances pour la lumière de se réfléchir sur le matériau. L'opération de texturisation vise à développer en surface un relief micrométrique (typiquement 5-10 $\mu$ m), permettant des réflexions multiples. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. et Par exemple, un rayon arrivant en incidence normale par rapport au plan de la cellule est réfléchi sur la face d'une « pyramide » adjacente, diminuant ainsi le coefficient de réflexion de  $R$  à  $R^2$ . De plus, le rayon transmis dans la cellule l'est avec un angle de réfraction différent de  $0^\circ$ , augmentant son parcours au sein du silicium par rapport au cas d'une surface plane. La probabilité d'absorption des photons en est donc améliorée [18].



**Fig.II.6 :** Schéma *comparatif des phénomènes de réflexion*  
*Sur surfaces plane et texturée.* [18].

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

Où :

I : est l'intensité lumineuse incidente, R : est le coefficient de réflexion et T : celui de transmission.

### II.5.2. Angle d'incidence :

Le coefficient de réflexion dépend dans les deux cas de l'inclinaison des rayons sur la surface réfléchissante. à le cas de la réflexion métallique, il dépend aussi de la longueur d'onde de la lumière ; et le cas de la réflexion vitreuse, il dépend des indices de réfraction des deux milieux.

Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence défini par la normale au dioptre et le rayon incident [29].

$$i'_1 = -i_1 \quad (\text{II.17})$$

$i'_1$  : L'angle de réflexion

$i_1$  : L'angle d'incidence

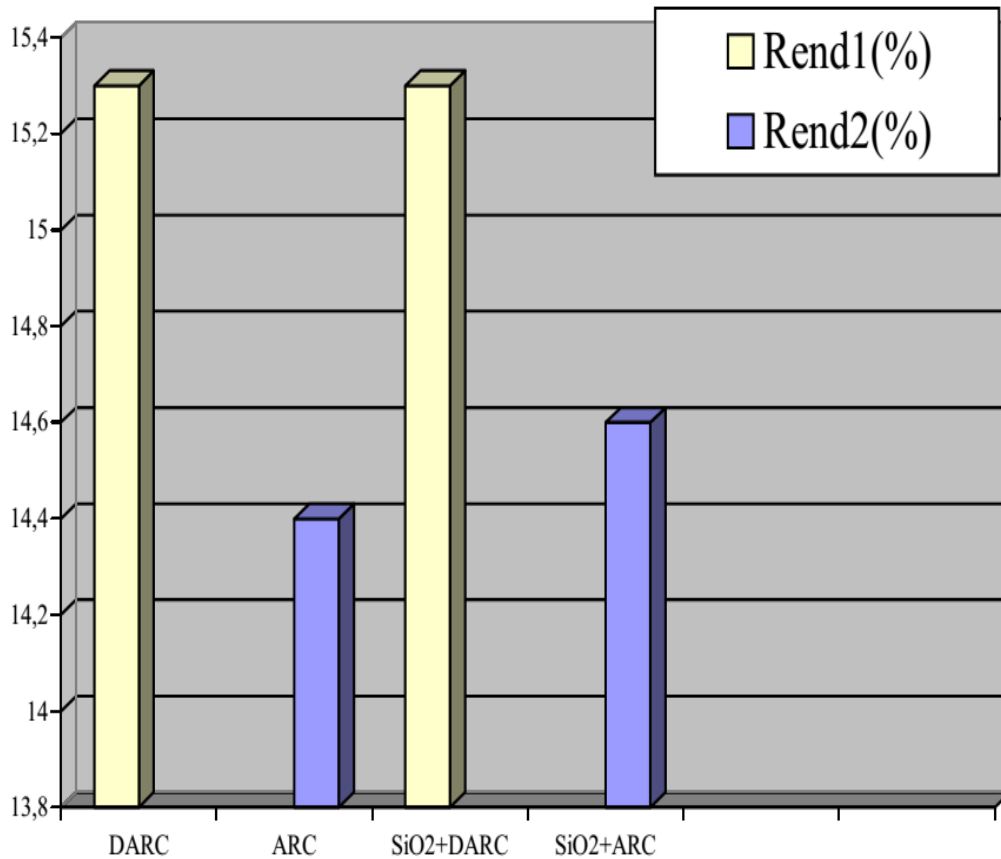
### II. 5.3. Indice de réfraction :

L'indice de réfraction d'un matériau est le rapport de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide(c), et de la vitesse de propagation de la lumière dans le matériau considéré  $v(\lambda)$ . Il détermine comment un rayon sera réfracté (dévié) lors d'un changement de milieu [30].

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)} \quad (\text{II.18})$$

### II.6.Effet des couches antireflets sur le rendement énergétique :

L'étude de L'influence des couches antireflets sur le rendement de la cellule Solaire au Silicium Multi cristallin étudié par Z. Ben Mohamed, M. Remram et A Laugier [31].par la méthode Polix.DePhot watt, le rendement d'une cellule conventionnelle N+P est 9.75 % les types des couches étudié est Nitrure de Silicium(  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) et Fluorure de Magnésium sur Sulfure de Zinc( $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$ ) et Les résultats obtenus sont regroupés dans la **figure. II.7**



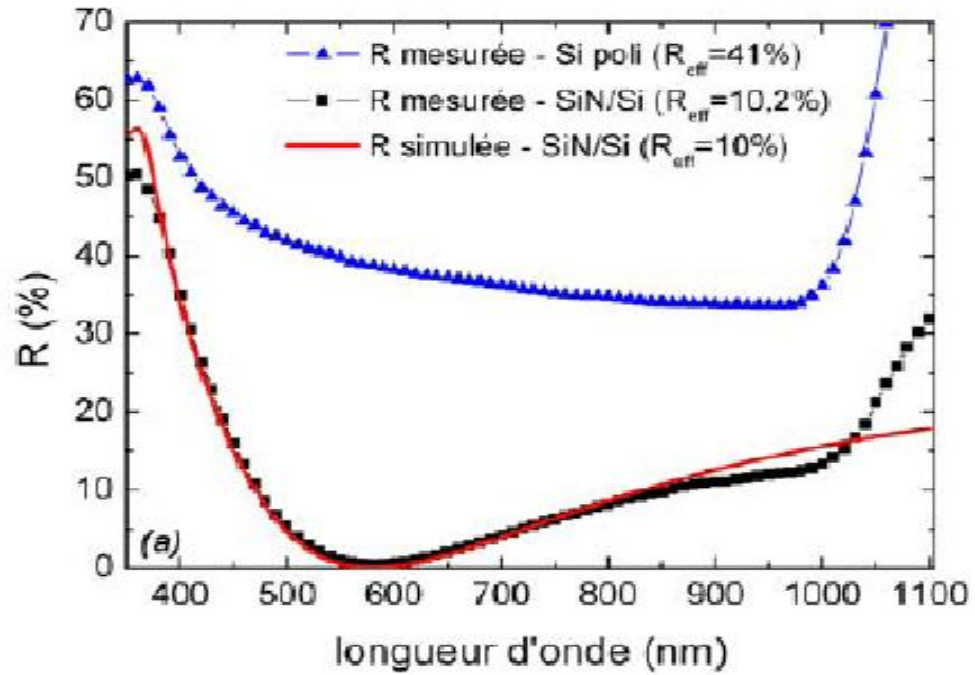
**Fig.II.7** : Effet des couches antireflets sur le rendement énergétique [31]

Dans le cas de la simple couche antireflet  $\text{Si}_3\text{N}_4$  le rendement est passé du 9.75 % à 14.4 %. Le rendement est meilleur dans le cas de la double couche antireflet  $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$ , il est dépassé 15.2 %.

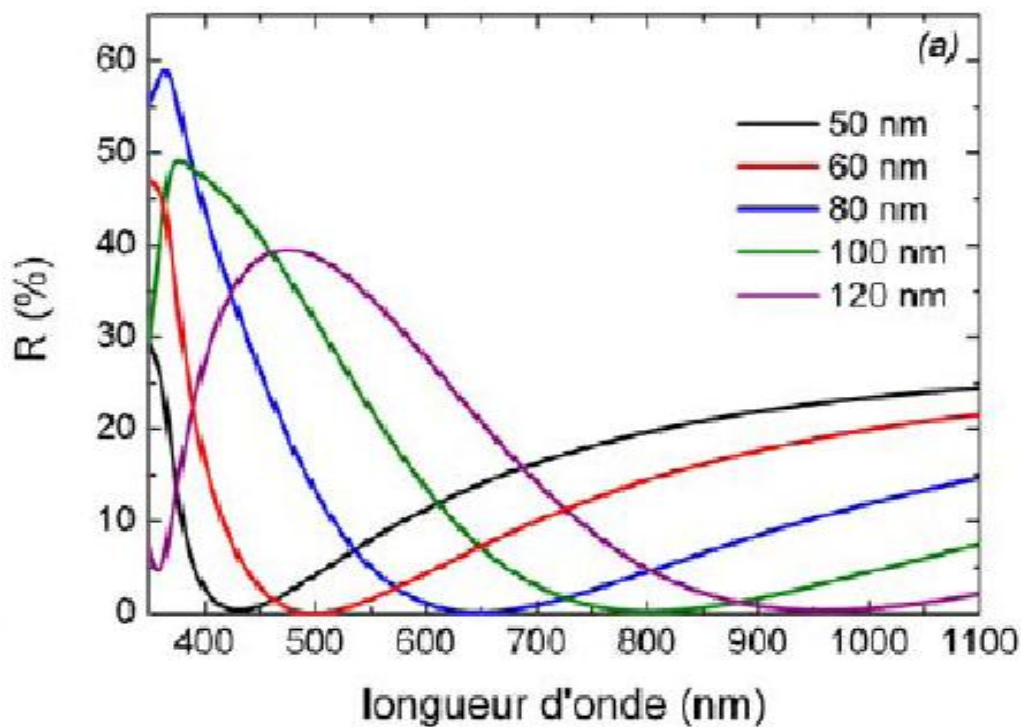
Ce résultat est expliqué par la diminution des pertes par réflexion et l'augmentation du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert, aucune influence de la couche de passivation sur le rendement énergétique, et l'utilisation de la couche  $\text{SiO}_2$  comme l'utilisation couche antireflet.

### **II.7.Effet des couches antireflets et son épaisseur sur la réflectivité :**

L'étude de l'impact de la couches antireflets  $\text{SiN}_x$  et de son épaisseur sur la réflectivité d'une cellule au silicium d'épaisseur 300  $\mu\text{m}$  par logiciel PC1D. J-F Lelievre[27] obtenir Les résultats de simulation



**Fig.II.8 :** (a) Comparaison de la réflectivité mesurée et simulée (IMD) pour un substrat de silicium recouvert ou non de  $\text{SiN}_x$  ( $R = \text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 7.7$ ;  $n [605 \text{ nm}] = 2.03$ ;  $e = 71 \text{ nm}$ ) [27].



**Fig.II.9 :** la réflectivité pour différentes épaisseurs de  $\text{SiN}$  ( $R = \text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 7.7 - n [605 \text{ nm}] = 2.03$ ) [27].

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

Le maximum du rayonnement solaire se situe pour une longueur d'onde d'environ 600 nm et il apparaît logique d'obtenir le minimum de réflectivité effective autour de celle-ci ( $R_{\text{effe}}=9.9\%$ ).

La présence d'une couche antireflet ( $\text{SiN}_x$ ) sur un substrat de cellule au silicium polie et l'augmentation de l'épaisseur peut réduire les pertes par réflexion

### **II.8. Matériaux utilisés dans la couche antireflet (CAR) et les technique d'élaboration :**

#### **II.8.1. Couche antireflet (CAR) :**

La couche antireflet est une couche mince [28] déposées sur silicium cristallin, Le fonctionnement de ces couches antireflets, repose sur l'adaptation de l'indice de réfraction de la couche de façon à produire des interférences destructives à une certaine longueur d'onde en tenant compte de l'épaisseur de la couche [32]. L'intégration des couches antireflets dans les cellules solaires comme des couches fenêtre permettent d'augmenter le rendement de la cellule est une solution complémentaire et indispensable [33].

#### **II.8.2. Les matériaux utilisés dans la CAR :**

Le choix des matériaux constituant les couches antireflets (CAR) doit être judicieux, car en plus des caractéristiques optiques, ces couches doivent avoir une très bonne qualité de passivation pour limiter les phénomènes de recombinaison qui peuvent avoir lieu à l'interface couche active/CAR d'où l'intérêt d'utiliser des matériaux à base de silicium. De bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion et une très bonne stabilité thermique sont également souhaitables [33].

Plusieurs matériaux sont utilisés comme CAR, Les plus adaptés sont le monoxyde et le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}$ ,  $n = 1,9$  et  $\text{SiO}_2$ ,  $n = 1,9$ ), le penta oxyde de tantale ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $n = 2,1$ ) et le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ,  $n = 2,3$ ) et une double couche de sulfure de zinc et fluorure de magnésium ( $\text{ZnS/MgF}_2$ ) [34]. La couche antireflet peut aussi être constituée d'un nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) [35].

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

*Tab. II.1 : Différents matériaux utilisés comme couche antireflet et sont Valeurs moyennes de l'indice de réfraction [36].*

Matériau	Indice de réfraction (n)
SiO	1.8-1.9
SiO <sub>2</sub>	1.4-1.5
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.9
TiO <sub>2</sub>	2.4-2.8
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1-2.3
ZnS	2.3-2.4
MgF <sub>2</sub>	1.3-1.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8-1.9

### II.8.3.Élaborations des différentes techniques de dépôts :

Les techniques de dépôt sont nécessaires, dans la réalisation des cellules solaires, pour déposer une couche conductrice, isolante ou de masquage dans un procédé qui n'utilise pas directement le matériau du substrat [37].

Les techniques de dépôt des couches antireflet sont : évaporation sous vide, pulvérisation cathodique, sérigraphie et dépôt chimique en phase vapeur ou à partir de solutions organométalliques par spray ou spin-on.

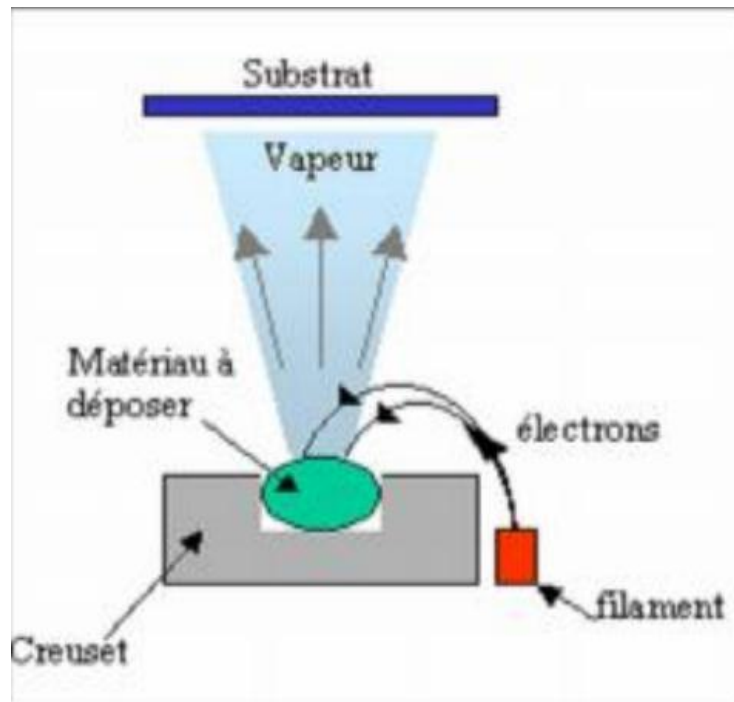
#### II.8.3.a.Evaporation sous vide :

L'évaporation sous vide fût l'une des premières méthodes mise au point dans la catégorie des dépôts physique en phase vapeur. Elle fût élaborée dans le but d'obtenir des couches minces et représente encore actuellement l'une des méthodes les plus couramment utilisé en industrie, Cette technique consiste à chauffer sous vide le matériau à déposer sous une température à laquelle il y a une pression de vapeur appréciable pour son évaporation ou sublimation. La matière ainsi éjectée perpendiculairement à la cible vient se condenser sur le substrat placé à son voisinage pour former un revêtement [38]. Les matériaux utilisés dans le dépôt des couches

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

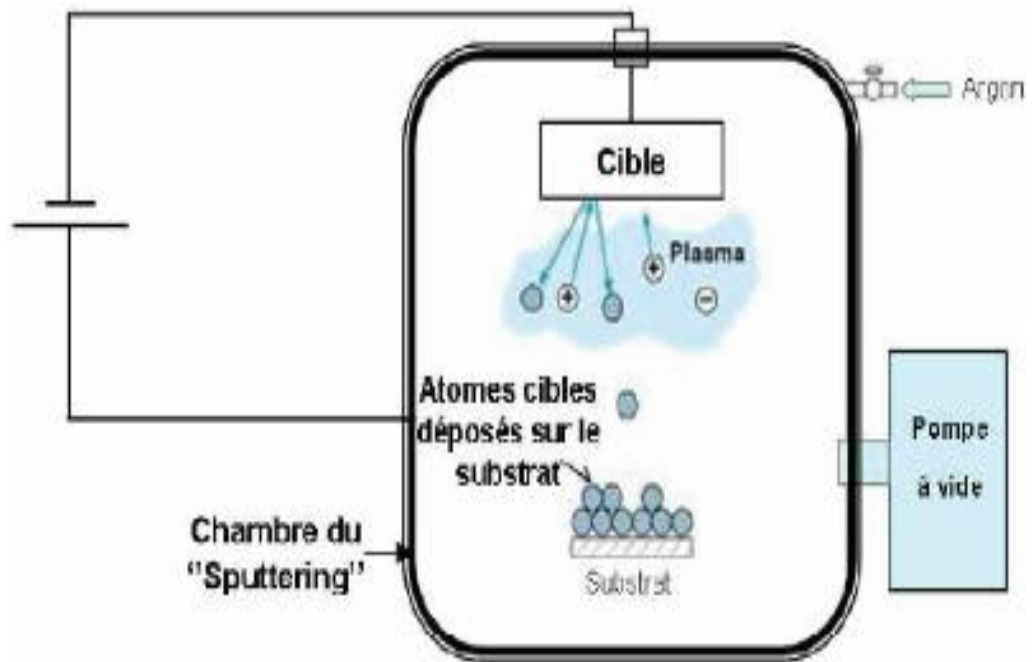
antireflet par évaporation sont :  $Ta_2O_5$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZnS$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO$  et  $SiO_2$  ils sont à l'état solide et présentent une haute pureté (99,99%)[27]. Le dépôt est réalisé sous vide à une pression aux alentours de  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  Pa, de façon à limiter la collision entre les atomes évaporés et celles du gaz résiduel pour limiter la contamination des couches déposées et augmenter la vitesse de dépôt [38] le système d'évaporation sous vide est composé de : Une chambre de dépôt, Un système de pompage, Un système de chauffage[39].



*Fig.II.10 : Schéma conventionnel d'une évaporation sous vide [38].*

### II.8.3.b.Pulvérisation cathodique :

La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt utilisant un plasma froid luminescent dans un gaz sous pression réduite pour vaporiser un solide. Dans cette méthode, le substrat est mis dans une enceinte contenant un gaz à basse pression en général l'argon, dans lequel on provoque une décharge électrique. Cette décharge a pour rôle d'ioniser les atomes de gaz. Sous l'impact des ions accélérés, des atomes sont arrachés à la cathode et sont déposés sur le substrat. Cette méthode permet d'avoir des dépôts de faible résistivité et des couches de bonne stœchiométrie ayant une transmission moyenne dans le visible. [39]



*Fig.II.11 : Schéma de la technique de pulvérisation cathodique [40].*

### II.8.3.c. Dépôt chimique en phase vapeur « CVD » :

La technique chimique en phase vapeur CVD met en jeu l'interaction de molécules gazeuses (les précurseurs) dans une enceinte contrôlée (pression, atmosphère, température...). Des espèces réactives sont créées et les processus d'adsorption et de désorption à la surface d'un échantillon conduisent à la formation d'un dépôt solide. Les précurseurs gazeux nécessaires à la réaction peuvent être dilués dans des gaz vecteurs neutres ce qui permet d'accélérer la diffusion des espèces chimiques et faciliter le transfert d'énergie. Un grand nombre de techniques CVD existent et diffèrent essentiellement par le type d'énergie utilisée pour activer les réactions chimiques nécessaires au dépôt de la couche antireflet. La méthode d'activation la plus couramment exploitée est l'énergie thermique qui est utilisée dans des procédés comme l'APCVD (Atmosphérique Pressure CVD), la RTCVD (Rapide Thermal CVD) ou la LPCVD (Low Pressure CVD). Bien que chacune de ces méthodes soit basée sur l'énergie thermique, les différents environnements conduiront à des dépôts spécifiques même si les précurseurs gazeux sont identiques [26].

### II.8.3.d. Dépôt des couches antireflet par atomisation (spray) :

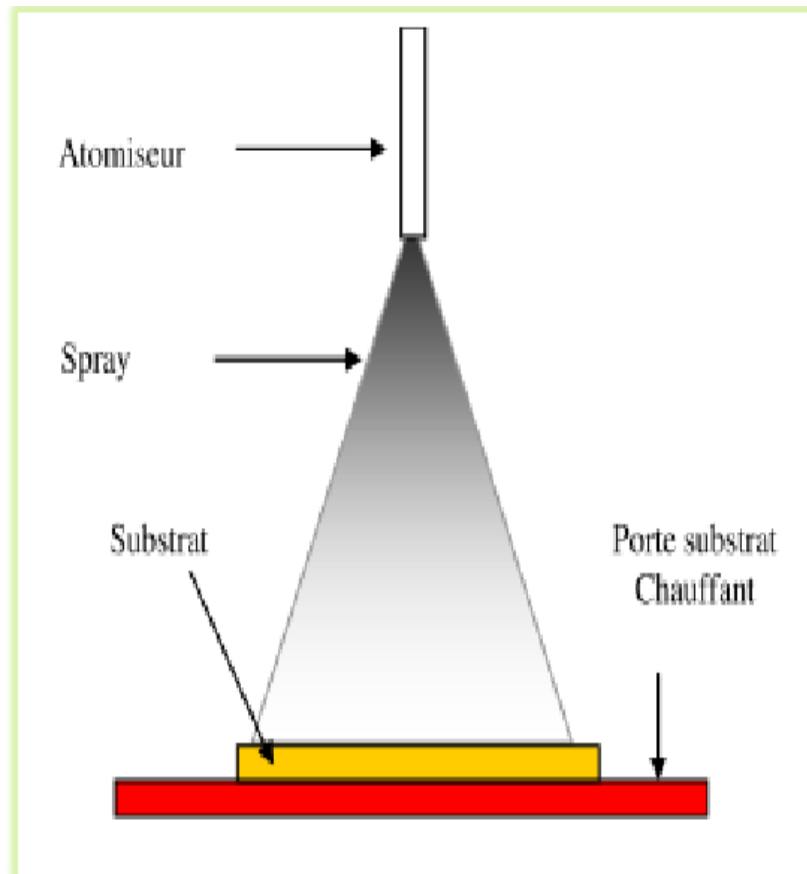
La technique spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais. Le spray pyrolyse représente une méthode très simple, n'exige pas de produits



## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

chimiques de haute qualité. Cette méthode a été utilisée pour le dépôt des couches denses et poreuses. Même des films multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique. Le dépôt de couches antireflets par la technique spray pyrolyse se traduit par la pulvérisation d'une solution d'un sel de métal sur un substrat chauffé. Les gouttelettes arrivant sur le substrat conduisent à la formation d'un dépôt après décomposition et réaction chimique en surface [41].



*Fig.II.12 : l'équipement de dépôt par spray pyrolyse [41].*

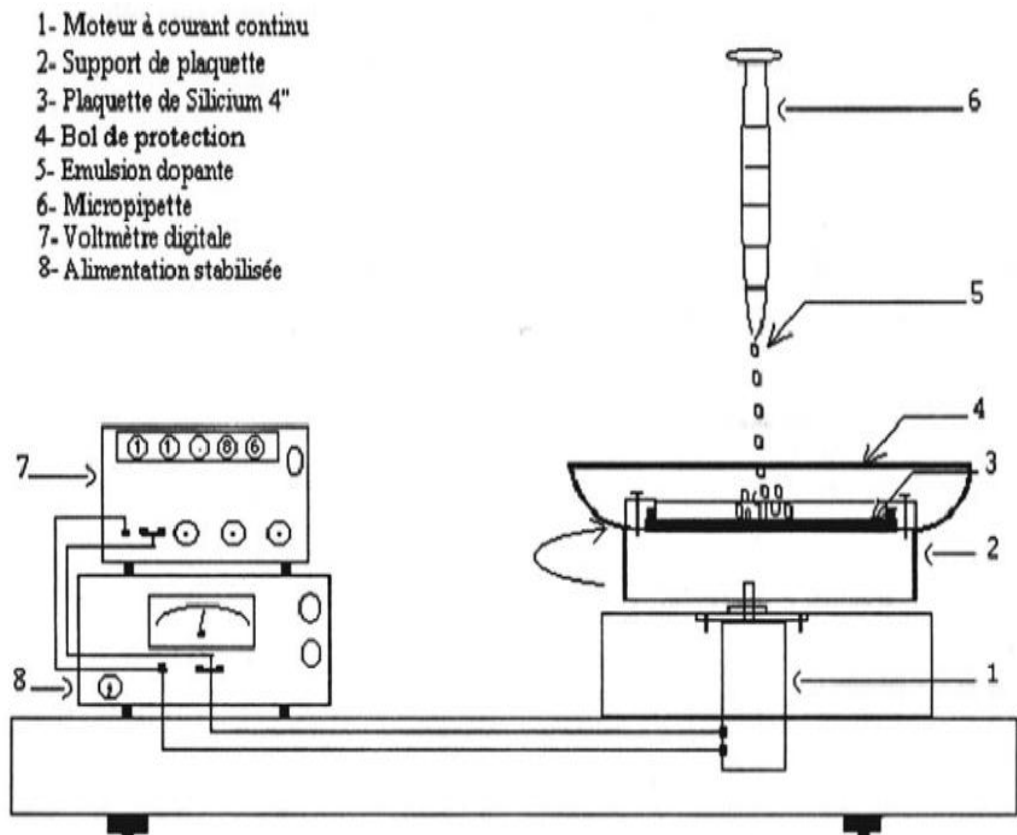
### II.8.3.e.Spin-on :

Le procédé spin-on s'apparente à celui de l'étalement de la résine photosensible couramment utilisée en photolithographie. L'émulsion dopante est déposée, au centre de la plaquette fixée sur un support animé d'un mouvement de rotation à une vitesse comprise entre 500 et 4000 tr/mn. La quantité de l'émulsion dopée est définie par la dimension de la plaquette et peut être optimisée pour une quantité minimale. Ce procédé permet le dépôt de la couche antireflet et la réalisation de la jonction p+ /p par un recuit simultané, pour l'ensemble de ces

## Chapitre II : Théorie de réflexion et couche antireflet

---

procédés la tendance est à l'utilisation d'un four à convoyeur pour le séchage de l'émulsion, la formation de la jonction, l'étape de métallisation et le dépôt de la couche antireflet [42].



*Fig.II.13 : Equipement utilisé pour le dépôt, par rotation (spin-on), de la source dopante et de la couche antireflet [42].*

### II .9: CONCLUSION :

Nous concluons de l'étude que la présence d'une couche d'antireflet dans le processus de fabrication des cellules solaires est un élément important pour améliorer le coefficient de réflexion et pour les ajouter il y a plusieurs techniques.

# Chapitre III

### III.1. Introduction :

Ce chapitre comporte deux parties : Dans la première nous définissons le logiciel **SCAPS-1D** utilisé dans ce mémoire pour calculer numériquement les caractéristiques électriques d'une cellule solaire p-n en silicium monocristallin.

La deuxième partie constitue l'objectif de mon travail qui est l'étude de l'effet de la couche antireflet avec un changement d'épaisseur et son matériau sur les caractéristiques électrique de la cellule solaire.

Ces caractéristiques sont la caractéristique courant-tension (I-V) et la caractéristique réponse spectrale-longueur d'ondes (SR-). Les paramètres de sortie de la cellule sont calculés à partir de la caractéristique (I-V). Ces paramètres sont : la densité de courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) de la cellule.

### III.2. 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.[43]

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.

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

-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.

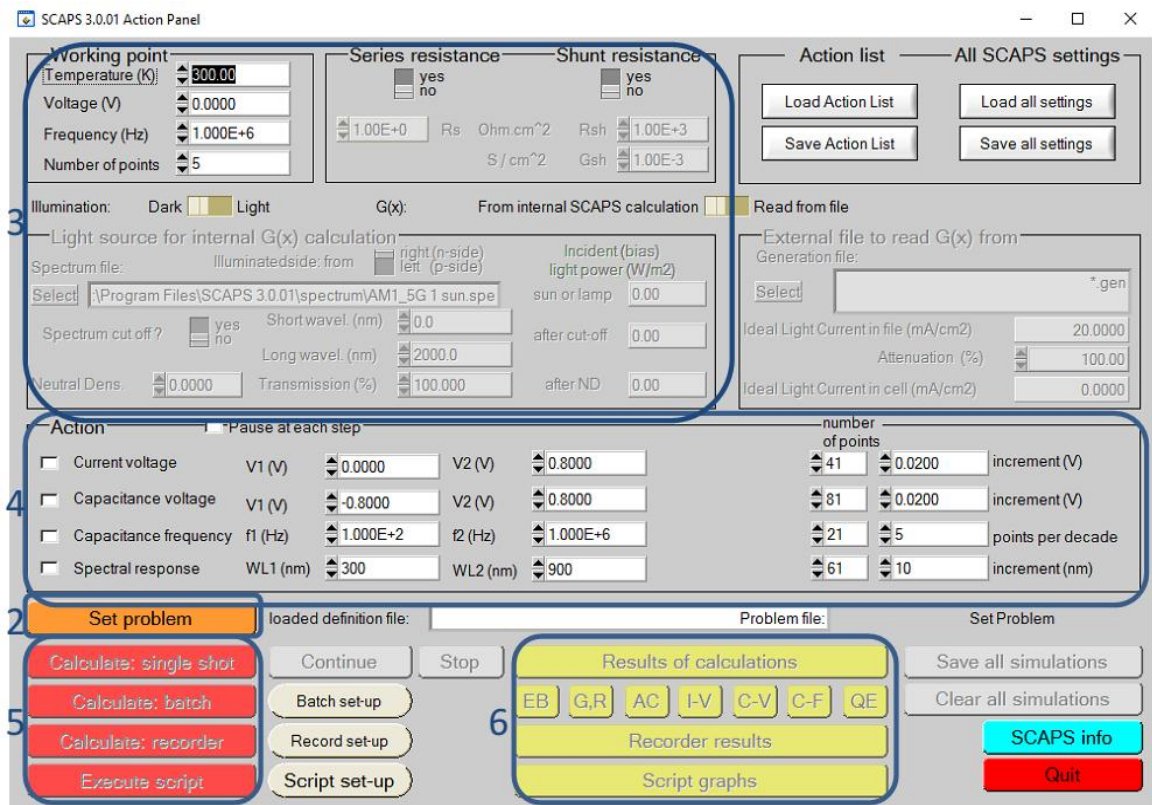
-C'est un logiciel qui présente une grande vitesse d'exécution.

-Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre. [44]

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. [43]

### III.2.1 : Notions de base :

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par Lab Windows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la **figure III.1** :



**Fig. III.1** : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal. [44]

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

---

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.2.1.a. Lancer SCAPS :

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

### III.2.1.b. Définir le problème :

Set problem

On clique sur l'icône ci-dessus dans le panneau d'action, pour saisir toutes les propriétés de la cellule solaire.

### III.2.1.c. Définir le point de fonctionnement :

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

**-La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T, les paramètres du matériau correspondant.

**-Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et ( $\lambda$ ). SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.

**-La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations I-V, ( $\lambda$ ) et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.

**-L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour  $QE(\lambda)$ , elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one Sun (= 1000 W/m<sup>2</sup>) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

### III.2.1.d.Sélection des caractéristiques à simuler :

On peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler : IV, C-V, C-f et ( $\lambda$ ), les valeurs initiales et finales de l'argument et que le nombre des étapes. [44]

### III.2.1.e.Lancer le calcul :

Calculate: single shot

### III.2.1.f.Afficher les courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la **figure III.2**. 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). [45]

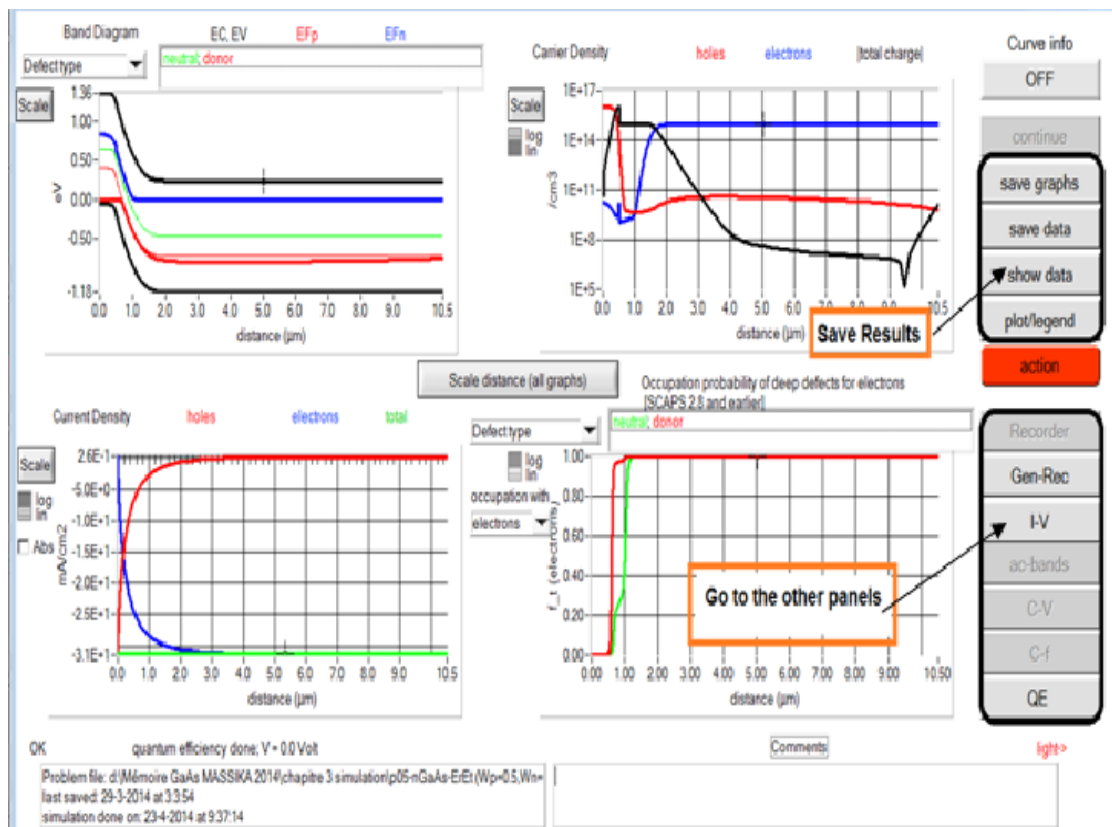
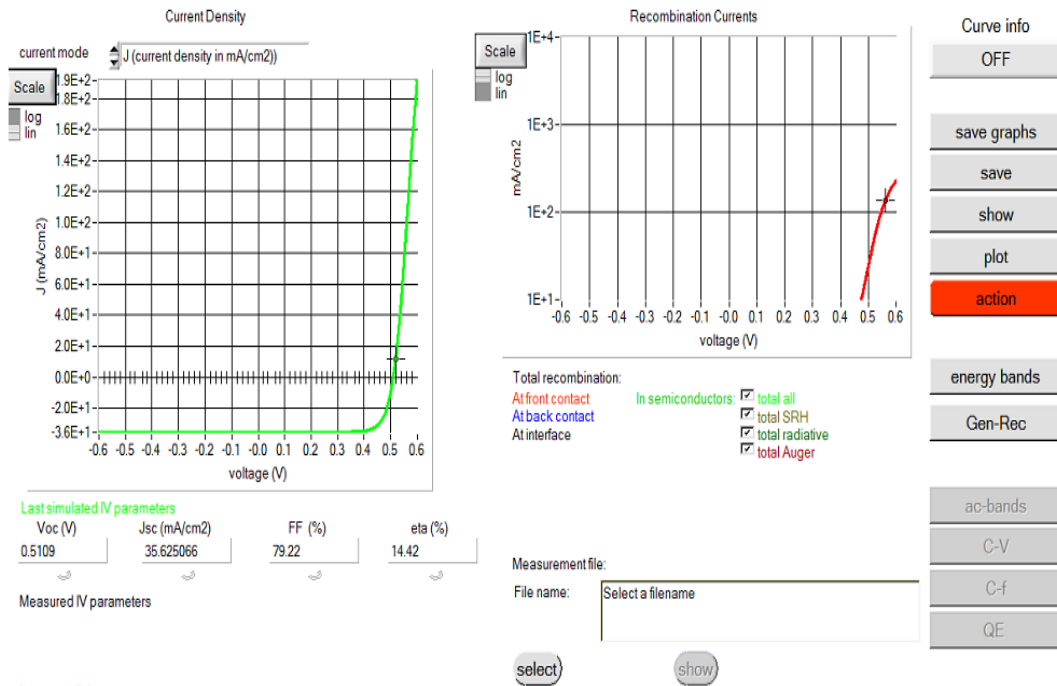


Fig. III.2 : Panneau des bandes d'énergie [45]

### III.2.1.g. Les courbes I-V :

La **figure III.3** montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.



**Fig. III.3 :** Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage [44].

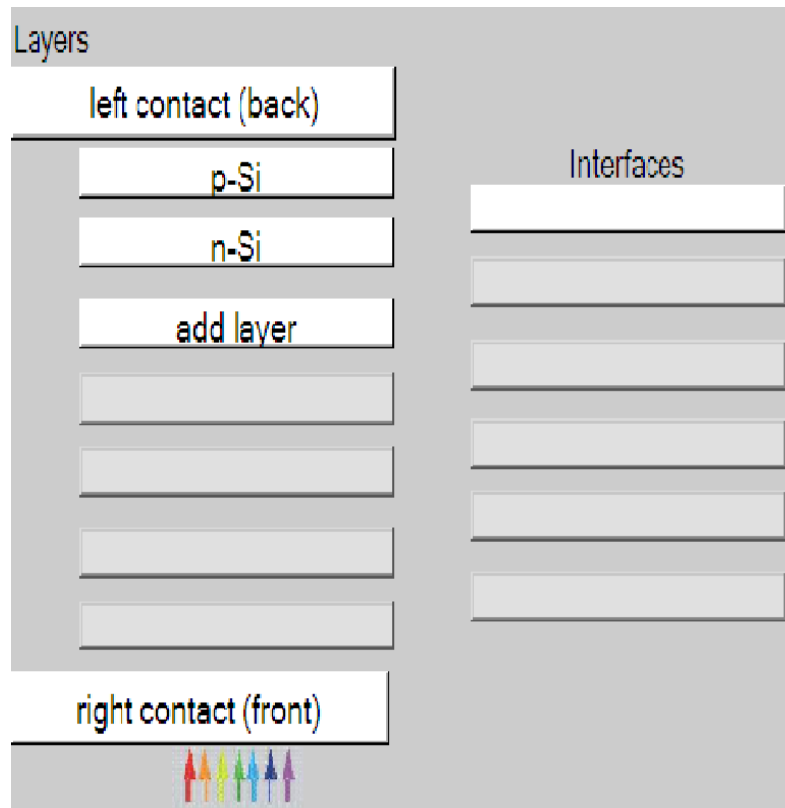
### III.2.2 : Définition d'une cellule solaire :

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.

#### III.2.2.1 : 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.4**. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.





*Fig. III.4 : Définition de la structure d'une cellule solaire au Si*

### III.2.2.2 : Définition des couches :

Après cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (**Figure III.5**) 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

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

la, L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut introduite sous forme de données.

The screenshot shows the 'SCAPS 3.3.07 Layer Properties Panel' for 'LAYER 1' (p-si). The panel is divided into several sections:

- Basic Properties:** thickness (98.000 μm), material type (uniform pure A (y=0)), and semiconductor property (pure A (y=0)).
- Physical Properties:** bandgap (1.120 eV), electron affinity (4.050 eV), dielectric permittivity (11.900), CB effective density of states (2.800E+19 1/cm<sup>3</sup>), VB effective density of states (1.040E+17 1/cm<sup>3</sup>), electron thermal velocity (1.000E+7 cm/s), hole thermal velocity (1.000E+7 cm/s), electron mobility (1.500E+3 cm<sup>2</sup>/Vs), and hole mobility (4.500E+2 cm<sup>2</sup>/Vs).
- Carrier Properties:** effective mass of electrons (1.000E+0) and effective mass of holes (1.000E+0).
- Doping:** no ND grading (uniform), shallow uniform donor density ND (0.000E+0 1/cm<sup>3</sup>), no NA grading (uniform), and shallow uniform acceptor density NA (1.000E+15 1/cm<sup>3</sup>).
- Absorption Interpolation Model:** alpha pure A material (y=0), with options for 'from file' and 'from model'. Buttons for 'show', 'save', and 'Set absorption file' are present. The file path is c:\Program Files\Scaps3307\absorption\Si.abs.

*Fig. III.5 : Propriétés de la couche Si.*

### III.3. Les paramètres de la cellule solaire à simuler :

Les paramètres physiques du Si définis dans l'interface du logiciel SCAPS sont présentés dans le **tableau III.1** [45] :

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

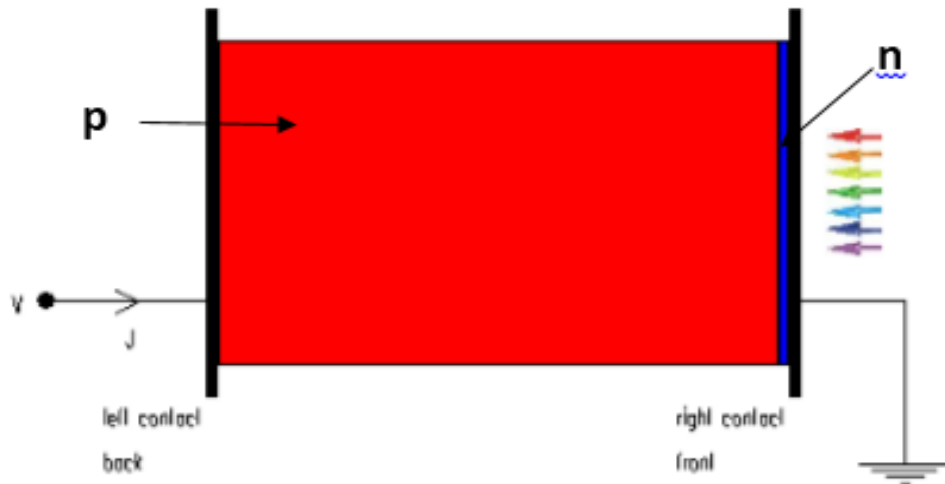
Paramètre	n-Si	p-Si
Température $T$ (K)	300	300
L'épaisseur ( $\mu m$ )	2	98
Profil	Uniform	Uniform
Propriétés	Pure A (y=0)	Pure A (y=0)
Gap d'énergie $E_g$ (eV)	1.12	1.12
Affinité électronique $\chi$ (eV)	4.05	4.05
Permittivité relative $\epsilon_r$	11.9	11.9
La densité d'état efficace dans la bande de conduction $CB$ : $NC$ ( $cm^{-3}$ )	$2.8 \times 10^{19}$	$2.8 \times 10^{19}$
La densité d'état efficace dans la bande de valence $VB$ : $NV$ ( $cm^{-3}$ )	$1.04 \times 10^{17}$	$1.04 \times 10^{17}$
La vitesse thermique des électrons $V_{tm}$ (cm/s)	$10^7$	$10^7$
La vitesse thermique des trous $V_{thp}$ (cm/s)	$10^7$	$10^7$
La mobilité des électrons $\mu_n$ ( $cm^2/Vs$ )	1500	1500
La mobilité des trous $\mu_p$ ( $cm^2/Vs$ )	450	450
Densité des donneurs : $ND$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{15}$	0
Densité des acceptons : $NA$ ( $cm^{-3}$ )	0	$10^{15}$
Coefficient of absorption	SCAPS (Si.abs)	SCAPS (Si.abs)

### III .4.Résultats et Discussion :

#### III .4.1. Cellules solaires à base de silicium sans couche antireflet :

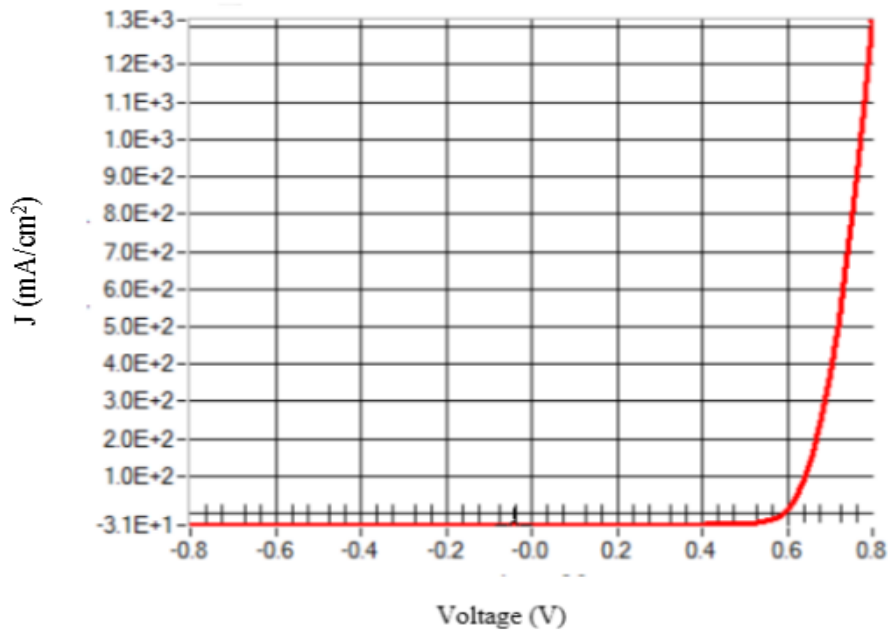
La **figure III.6** représente la structure obtenue de la cellule solaire au silicium à l'aide du logiciel SCAPS-1D. La cellule est de type n-p : à droite La région n éclairée qui constitue l'émetteur ( $2\mu m$ ) et la région P ( $98\mu m$ ) plus épaisse, qui forme le collecteur est à gauche.

Le changement de la sens du graphe à conséquence de structure de cellule solaire pour mon résultat on choisit V à gauche contact appelé consommateur.



**Fig. III.6 :** Schéma de la cellule solaire **n-p** en silicium à simuler.

Les résultats de la simulation des caractéristiques I-V sur la cellule **n-p** en silicium sous spectre AM1.5G à 300K sont présentés dans la **figure III.7** :



**Fig. III.7 :** Caractéristique I-V de la cellule simulée sous éclairage

Les paramètres de sortie de la cellule solaire sous éclairage mesurés sont regroupés dans le **tableau III.2**

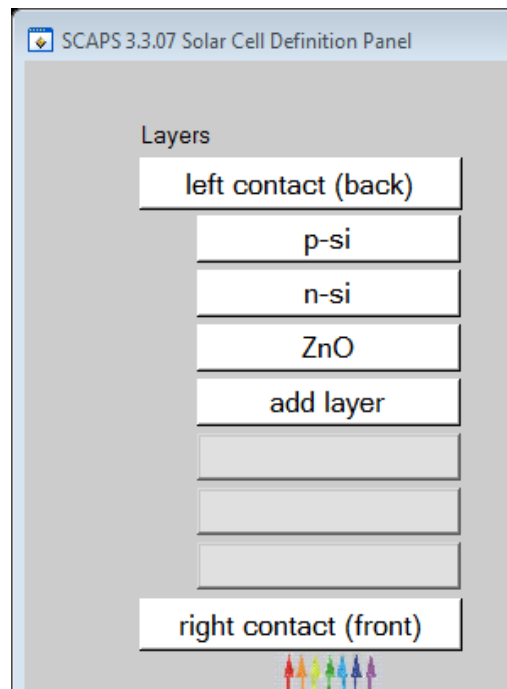
*Tab.III.2 : les valeurs des caractéristiques de la cellule simulie*

Les Caractéristiques	Les valeurs
courant de court-circuit $I_{cc}(\text{mA.cm}^{-2})$	29.700947
tension en circuit ouvert $V_{co}(\text{V})$	0.5909
facteur de forme FF%	78.56
puissance maximale $P_{\max}(\text{mW.cm}^{-2})$	13.79
rendement photovoltaïque $\eta\%$	13.79

### III .4.2. Cellule solaire à base de silicium avec une couche antireflet :

#### III .4.2.1. Influence de la couche antireflet sur les caractéristiques électriques :

Pour étudier l'influence de la couche antireflet sur la caractéristique I-V, nous avons pris les mêmes paramètres que la cellule basique **n-p** et nous ajoutons la couche antireflet à matériau de l'oxyde de zinc ( ZnO).



*Fig. III.8 : Définition de la structure d'une cellule solaire au ZnO /Si*

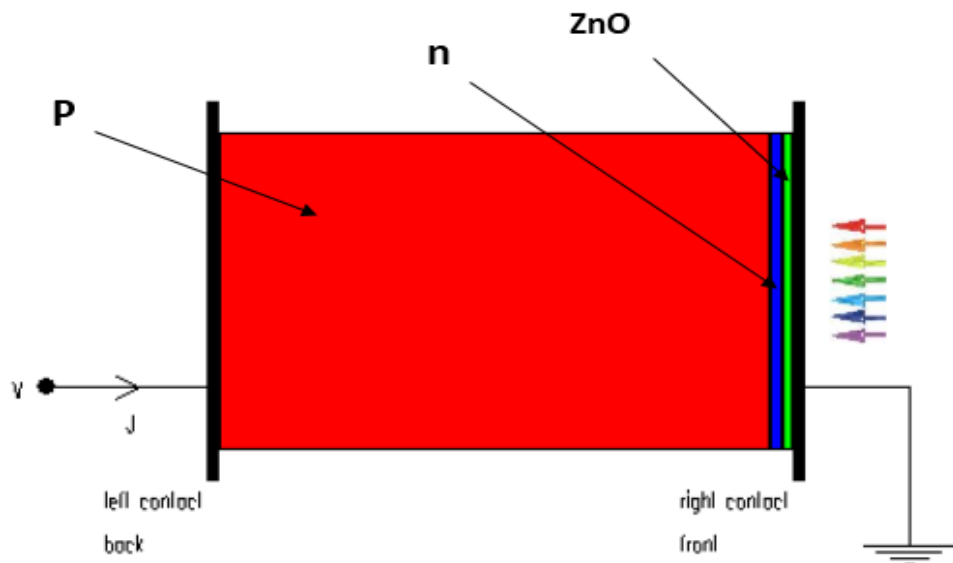
Les paramètres physiques de la couche de ZnO dans l'interface du logiciel SCAPS sont présentés dans le **tableau III.3** :

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

*Tableau III.3 : les Paramètres physiques de ZnO introduits dans SCAPS.*

Paramètre	ZnO
Température $T$ (K)	300
L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	2
Profil	Uniform
Propriétés	Pure A ( $y=0$ )
Gap d'énergie $E_g$ (eV)	3.3
Affinité électronique $\chi$ (eV)	4.45
Permittivité relative $\epsilon_r$	9
La densité d'état efficace dans la bande de conduction $CB : NC$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.2 \times 10^{18}$
La densité d'état efficace dans la bande de valence $VB : NV$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.8 \times 10^{19}$
La vitesse thermique des électrons $V_{thn}$ (cm/s)	$10^7$
La vitesse thermique des trous $V_{thp}$ (cm/s)	$10^7$
La mobilité des électrons $\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	100
La mobilité des trous $\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	25
Densité des donneurs : $ND$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{18}$
Densité des acceptons : $NA$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	0
Coefficient of absorption	SCAPS (ZnO.abs)

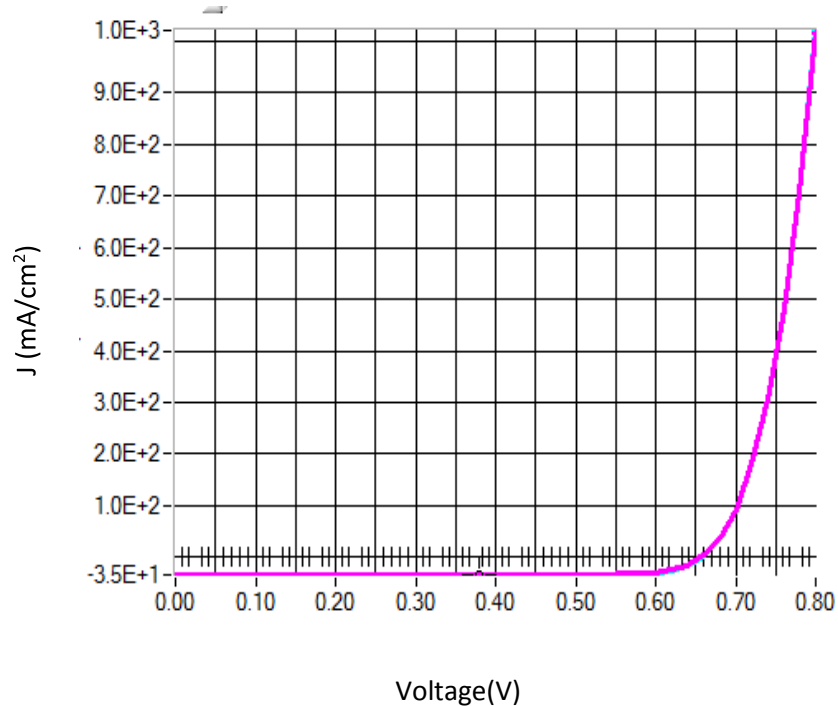
La **figure III.9** représente la structure obtenue de la cellule à l'aide du logiciel SCAPS-1D :



*Fig. III.9 : Schéma de la cellule solaire à simuler ZnO/Si*

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

Les résultats des caractéristiques I-V de la simulation sur la cellule **n-p** en silicium avec la couche de ZnO sont présentés dans la **figure III.10** Sous éclairement :



**Fig.III.10** : Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si sous éclairement

Les paramètres de sortie de la cellule simulée sont résumés dans le **tableau III.4**

**Tab.III.4** : les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule ZnO/Si

Les Caractéristiques	Les valeurs
courant de court-circuit $I_{cc}$ ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	33.602330
tension en circuit ouvert $V_{co}$ (V)	0.6576
facteur de forme FF(%)	83.25
puissance maximale $P_{max}$ ( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	18.40
rendement photovoltaïque $\eta$ (%)	18.40

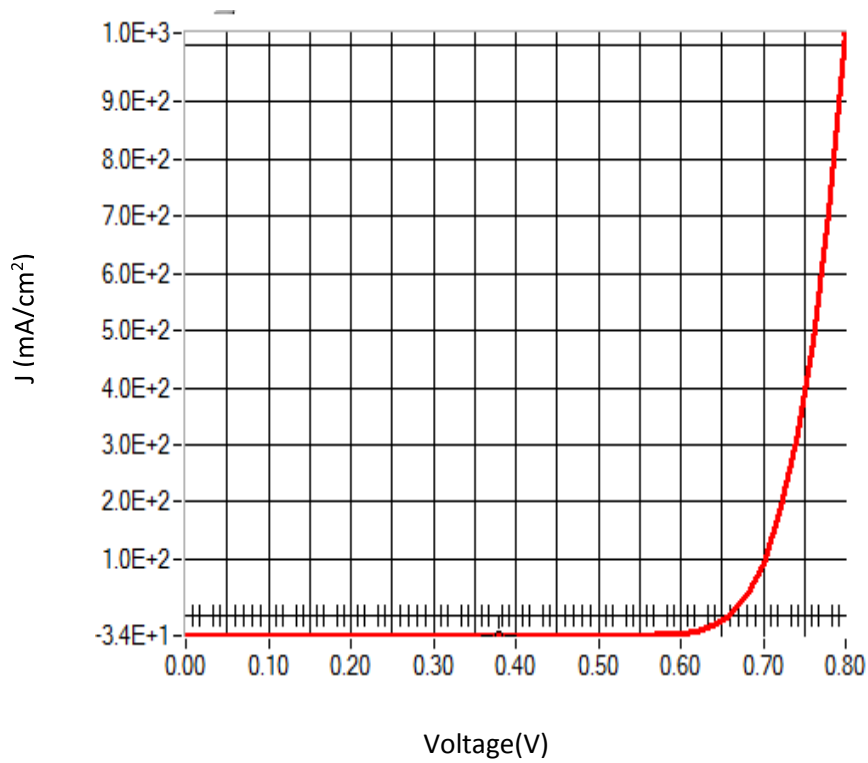
Lors de l'ajout de la CAR de ZnO, on remarque une augmentation de courant de court-circuit de 29.700947mA à 33.602330mA, Quant à la valeur de la tension, elle augmentera de 0.5909V à 0.6576V, note que le rendement obtenu a augmenté de 13.79% à 18.40%.

### III .4.2.2. Influence de l'épaisseur de la CAR sur les caractéristiques électriques :

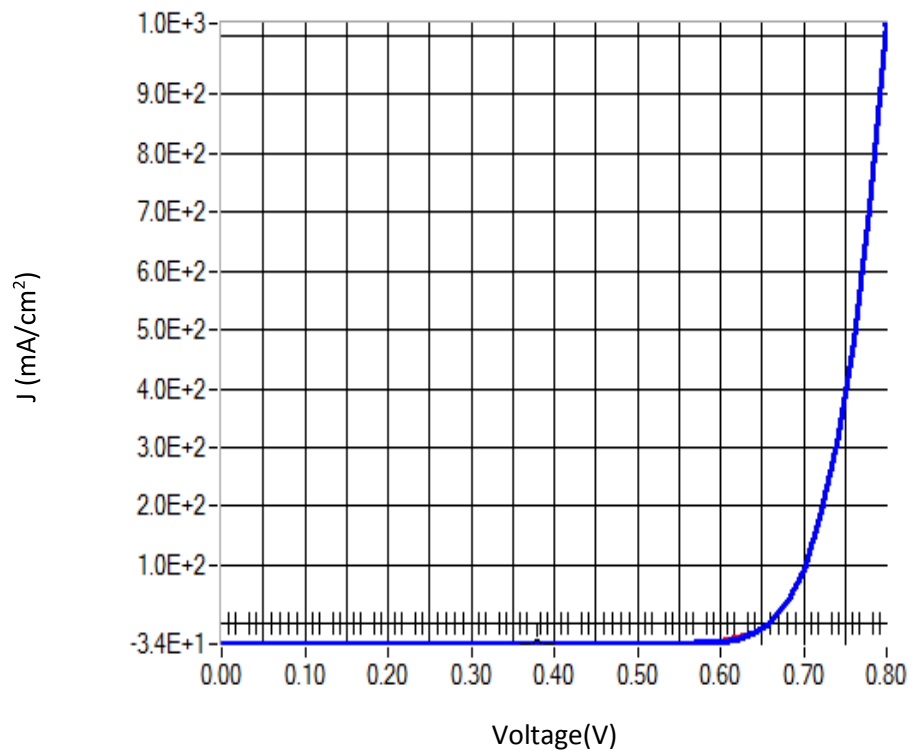
Pour cet exemple, nous avons pris les mêmes paramètres que la cellule basique et nous avons changé l'épaisseur de la couche antireflet de ZnO pour :  $e=1$ ,  $e=0.5$ ,  $e=0.1$ ,  $e=0.05$ .

### Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

Les figures III.11 ,12et 13 montre les résultats de la simulation des caractéristiques I-V sur la cellule pour différentes valeurs de l'épaisseur de ZnO.

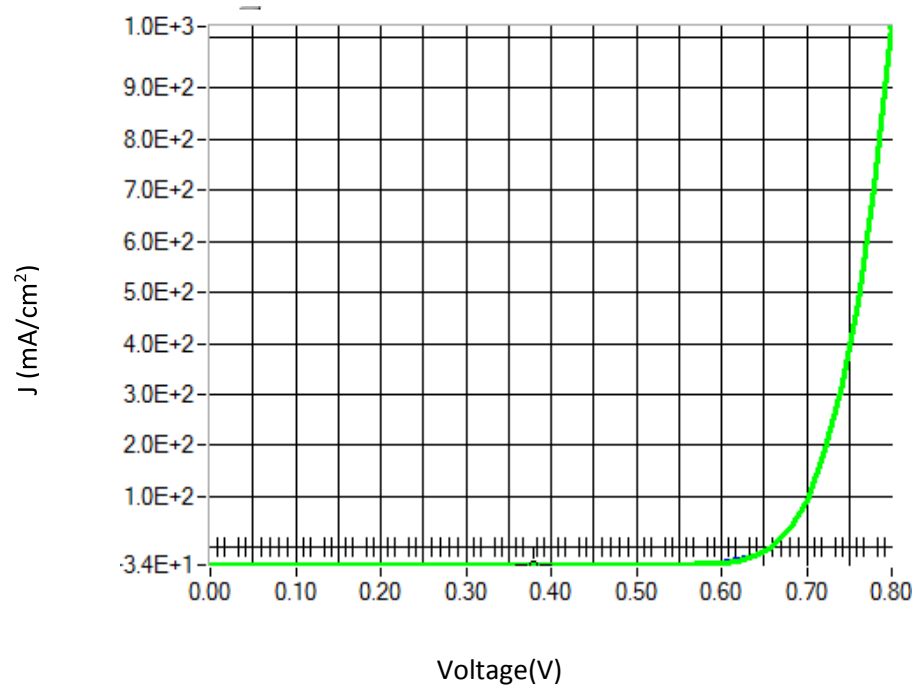


**Fig.III.11** : Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour  $e=1 \mu\text{m}$

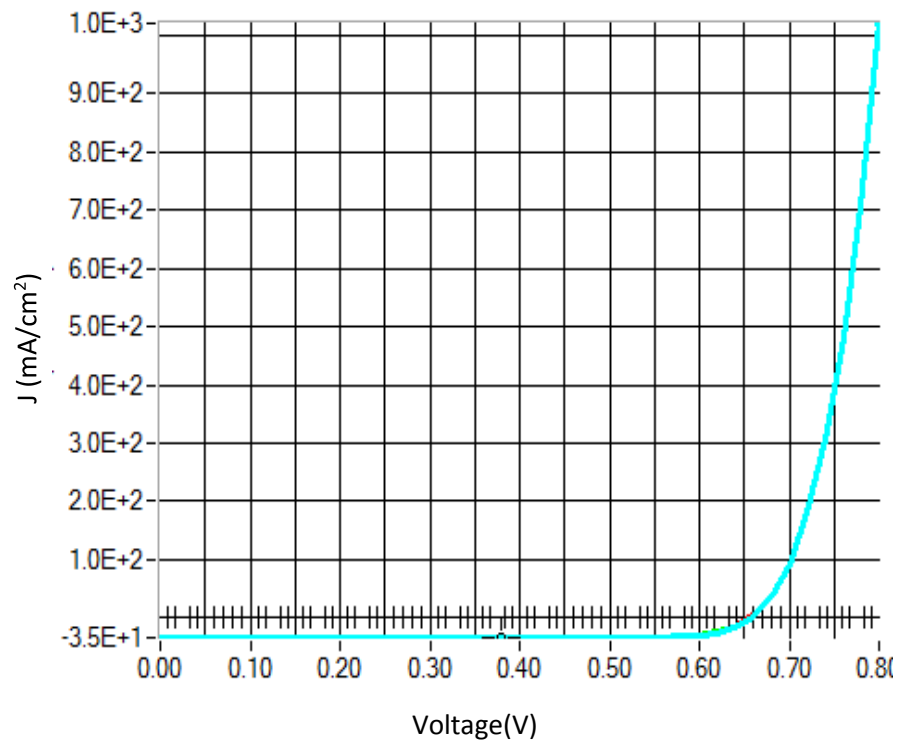


**Fig.III.12** : Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour  $e=0.5 \mu\text{m}$





**Fig.III.13 :** Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour  $e=0.1 \mu\text{m}$



**Fig.III.14 :** Caractéristique I-V de la cellule ZnO/Si pour  $e=0.05 \mu\text{m}$

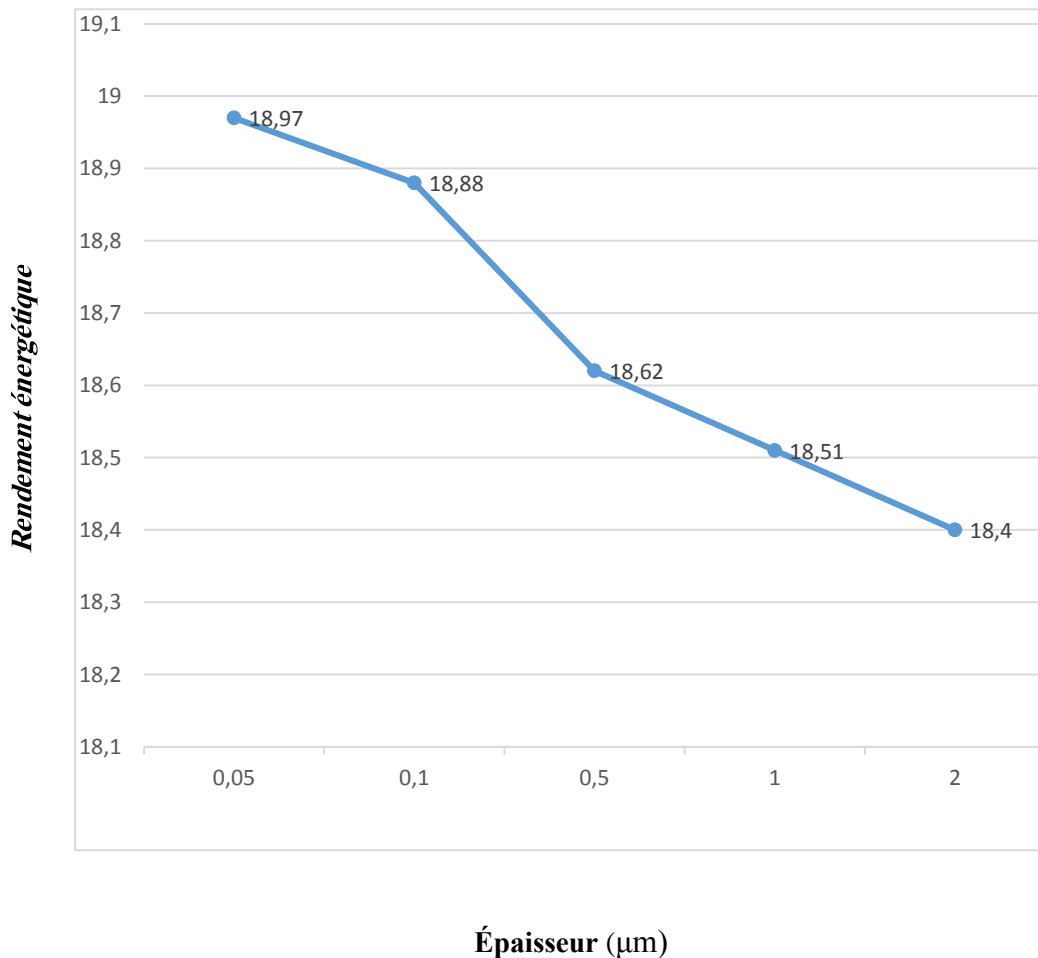
Les paramètres de sortie de la cellule simulée sont résumés dans le **tableau III.5**

### Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

*Tab.III.5 : les valeurs des caractéristiques électriques pour différentes valeurs de l'épaisseur de ZnO*

Les Caractéristiques	Epaisseur			
	0.05 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
courant de court-circuit $I_{cc}(\text{mA.cm}^{-2})$	34.613367	34.443436	33.985580	33.795256
tension en circuit ouvert $V_{co}$ (V)	0.6584	0.6583	0.6579	0.6578
puissance maximale $P_{max}$ ( $\text{mW.cm}^{-2}$ )	18.97	18.88	18.62	18.51
facteur de forme FF(%)	83.25	83.25	83.25	83.25
rendement photovoltaïque $\eta(\%)$	18.97	18.88	18.62	18.51

La figure III.15 représente la différence de rendement pour chaque structure de cellule solaire



*Fig.III.15 : Effet de l'épaisseur de couche antireflet de ZnO sur le rendement énergétique*

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

Pour les valeurs d'épaisseur :  $e=0.05$ ,  $e=0.1$ ,  $e=0.5$ ,  $e=1$  on remarque une diminution du  $J_{sc}$  ; Il passe de  $34.613367 \text{ mA/cm}^2$  à  $33.795256 \text{ mA/cm}^2$ . Quant à la valeur de la tension, elle diminue ; elle varie entre  $0.6584 \text{ v}$  et  $0.6578 \text{ v}$ . On remarque que le rendement obtenu pour une épaisseur de  $0.05 \mu\text{m}$  est de  $18.97\%$  quant à l'épaisseur de  $1 \mu\text{m}$ , elle donne un rendement de  $18.51\%$ . Cette différence de  $0.95 \mu\text{m}$  va engendrer une diminution de  $0.46\%$ . Donc, les couches à très faible épaisseur sont les plus intéressantes et les plus attrayantes.

### III.4.2.3. Influence de matériau de la couche antireflet sur les caractéristiques électriques :

Pour étudier l'influence de matériau de la couche antireflet sur la caractéristique I-V Nous avons pris les mêmes paramètres que la cellule basique **n-p** et nous changeons la couche antireflet à matériau de l'oxyde de zinc (ZnO) par matériau de sulfure de zinc (ZnS) pour  $e=2 \mu\text{m}$ .

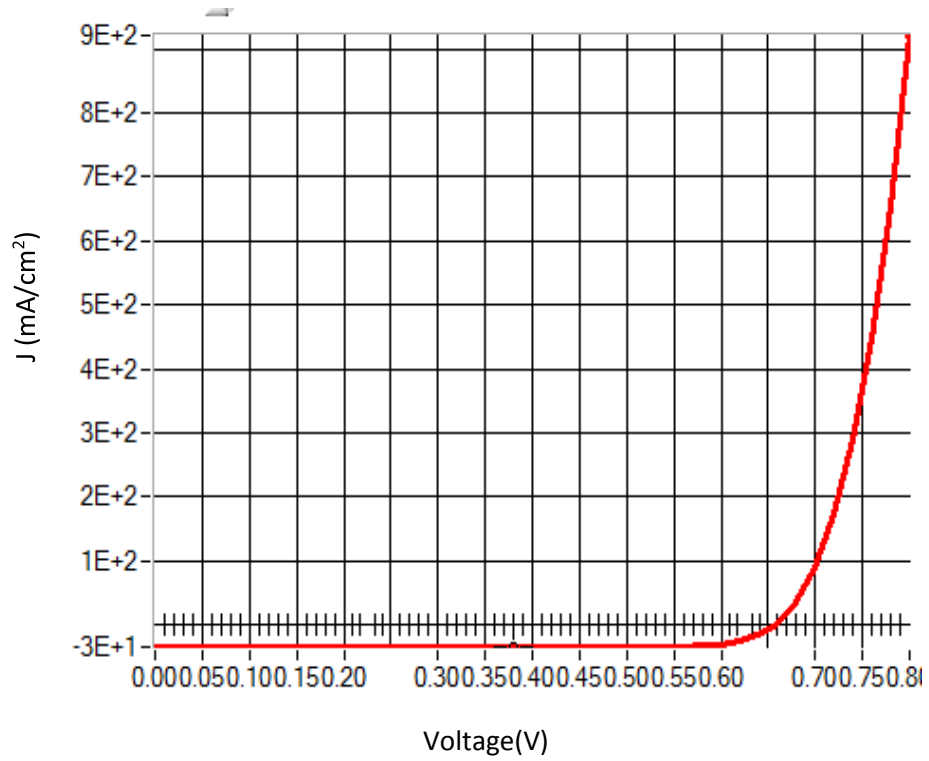
Les paramètres physiques de la couche de ZnS dans l'interface du logiciel SCAPS sont présentés dans le **tableau III.6** [46] :

*Tableau III.6 : les Paramètres physiques de ZnS introduits dans SCAPS.*

Paramètre	ZnS
Température $T$ (K)	300
L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	2
Profil	Uniform
Propriétés	Pure A ( $y=0$ )
Gap d'énergie $E_g$ (eV)	3.7
Affinité électronique $\chi$ (eV)	3.9
Permittivité relative $\epsilon_r$	8.9
La densité d'état efficace dans la bande de conduction $CB : NC$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5 \times 10^{18}$
La densité d'état efficace dans la bande de valence $VB : NV$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5 \times 10^{19}$
La vitesse thermique des électrons $V_{thn}$ (cm/s)	$3 \times 10^6$
La vitesse thermique des trous $V_{thp}$ (cm/s)	$1 \times 10^6$
La mobilité des électrons $\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	140
La mobilité des trous $\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	10
Densité des donneurs : $ND$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{15}$
Densité des acceptons : $NA$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	0
Coefficient of absorption	SCAPS (ZnS.abs)

## Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

Les résultats des caractéristiques I-V de la simulation sur la cellule **n-p** en silicium avec la couche de ZnS sont présentés dans la **figure III.16** Sous éclairément :



**Fig.III.16** : Caractéristique I-V de la cellule ZnS/Si pour  $e=2 \mu\text{m}$

Les paramètres de sortie de la cellule simulée sont résumés dans le **tableau III.7**

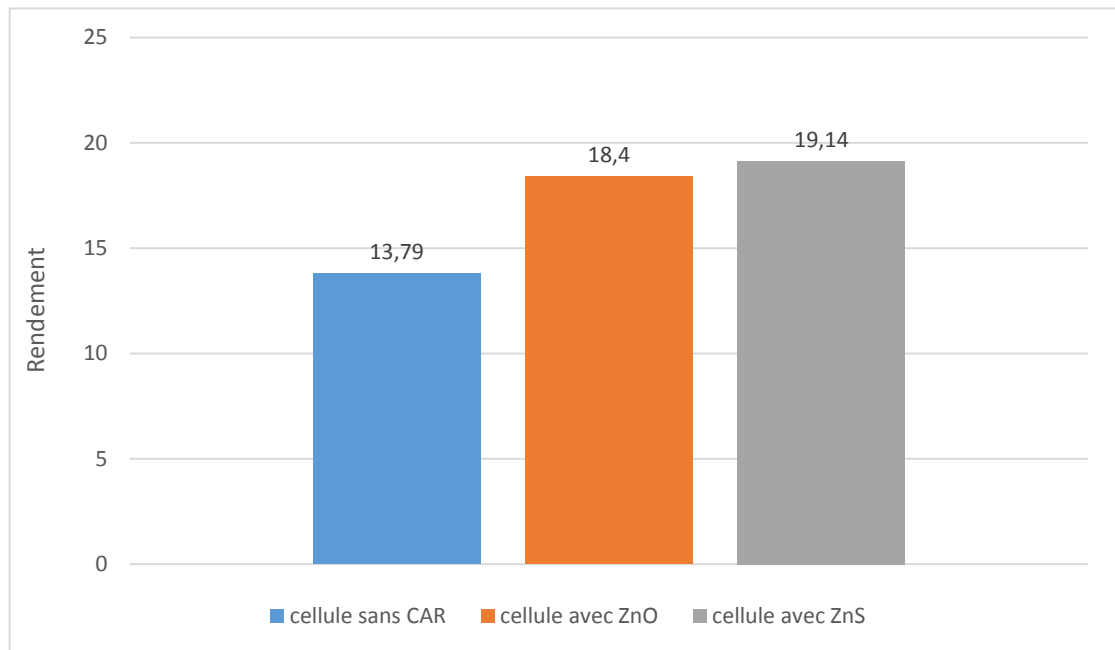
**Tab.III.7** : les valeurs des caractéristiques électriques de la cellule ZnS/Si

Les Caractéristiques	Les valeurs
courant de court-circuit $I_{cc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	34.91
tension en circuit ouvert $V_{co}$ (V)	0.6586
facteur de forme FF(%)	83.22
puissance maximale $P_{max}$ (mW.cm <sup>-2</sup> )	19.13
rendement photovoltaïque $\eta$ (%)	19.14

### Chapitre III : Simulation Et Discussion Des Résultats

---

La figure III.17 représente la différence de rendement pour chaque structure de cellule solaire.



**Fig.III.17 :** *Influence des couches antireflets sur le rendement énergétique.*

Lors de la changement de matériau d'une couche anti-réflexion de ZnO par ZnS , on remarque une augmentation de courant de court-circuit de 33.602330mA à 34.911473mA, Quant à la valeur de la tension, elle est augmenté de 0.6576V à 0.6586V, note que le rendement obtenu a augmenté de 18.40% à 19.14%.

#### **CONCLUSION :**

L'utilisation d'une couche antireflet dans le processus de fabrication d'une cellule solaire est un élément important pour optimiser le rendement de la cellule photovoltaïque mais l'utilisation seule n'est pas suffisante, il faut bien choisir le matériau et l'épaisseur de cette couche.

# Conclusion générale

## Conclusion Générale

---

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est un moyen de produire de l'électricité attrayant. En effet, le soleil est une source d'énergie gratuite disponible partout autour du globe.

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie lumineuse en énergie «électrique. Les dispositifs capables d'effectuer cette transformation sont appelés cellules solaires.

Les rendements étaient relativement très faibles, ce qui a donné motivation à l'étude des facteurs limitatifs du rendement de conversion.

L'optimisation du rendement de conversion des cellules photovoltaïques est basée sur la compréhension et le développement du concept du dispositif. Toutefois, il existe des outils de caractérisation permettant de comprendre non seulement le fonctionnement des cellules mais aussi et surtout maîtrisé les paramètres limitatifs des performances de celles-ci. L'optimisation d'une cellule n'est pas facile car chaque étape devait faire un objet particulier. Notre travail présenté porte sur l'étude des performances des cellules solaires.

Dans cette étude, nous voulions vérifier et démontrer l'effet de l'utilisation de la couche antireflet sur la performance de la cellule solaire au silicium monocristallin et l'effet de son épaisseur

En conclusion, nous avons démontré que la couche antireflet présente un avantage considérable sur le rendement énergétique d'une cellule solaire au silicium monocristallin par le programme de modélisation SCAPS. Les résultats présentés indiquent que l'utilisation d'une couche antireflet a prouvé son efficacité sur les performances photovoltaïques de la cellule.

# Références bibliographiques



## Références bibliographiques

---

### **Bibliographie de l'introduction générale :**

- [1] : [www.planete-oui.fr/tout-savoir-sur/faq/mon-offre-1-renouvelable/quest-ce-que-les-energies-renouvelables-dou-proviennent-elles](http://www.planete-oui.fr/tout-savoir-sur/faq/mon-offre-1-renouvelable/quest-ce-que-les-energies-renouvelables-dou-proviennent-elles), 21 mars 2016.
- [2] : [mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-solaire/lenergie-solaire-pour-produire-de-lelectricite](http://mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-solaire/lenergie-solaire-pour-produire-de-lelectricite), janvier 2017.
- [3] : [www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/energie\\_sol aire\\_photovoltaique.php4,08/05/2017](http://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_sol aire_photovoltaique.php4,08/05/2017).
- [4] : [Tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/historique-de-la-cellule-photovoltaique.html](http://Tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/historique-de-la-cellule-photovoltaique.html),08/05/2017
- [5] : [www.promes.cnrs.fr/index.php?page=caracterisation-des-proprietes-photovoltaiques](http://www.promes.cnrs.fr/index.php?page=caracterisation-des-proprietes-photovoltaiques),08/05/2017.

### **Références bibliographiques pour les chapitres :**

- [1] : [www.photovoltaique.info/les-technologies-de-cellules.html](http://www.photovoltaique.info/les-technologies-de-cellules.html), 05/12/2016.
- [2] : PIERRE CHASTENAY ASTRONOME, formation des personnes-ressources en science et technologie, p2-3.
- [3] : SALAHEDDINE BENSALAM, thème : effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, p13-18.
- [4] : [www.Magnetosynergie.Com/Archives/Documentsforum/Lerayonnementsolaireetle-photovoltaique,Pdf](http://www.Magnetosynergie.Com/Archives/Documentsforum/Lerayonnementsolaireetle-photovoltaique,Pdf).
- [5] : Djicknoum DIOUF, Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure inter digitée en face arrière, p7-8.
- [6] : SVEN GEITMANN, énergies renouvelables & carburants alternatifs de nouvelles énergies pour l'avenir, p87
- [7] : [asaabejaia.org/publications/67-cellules-solaires](http://asaabejaia.org/publications/67-cellules-solaires),30/05/2013
- [8] : R. MERAHI1, R. CHENNI2, M. HOUBES : modélisation et simulation d'un module PV par matlab, p223.
- [9] : [blog.alma-solarshop.fr/fabrication-des-cellules-et-assemblage-en-module/](http://blog.alma-solarshop.fr/fabrication-des-cellules-et-assemblage-en-module/) ,2016.
- [10] : [fr.scribd.com/document/78761955/energie-solaire-photovoltaique](http://fr.scribd.com/document/78761955/energie-solaire-photovoltaique) ,14/05/2017.
- [11] : université pierre et marie curie up mC, master énergétique et environnement : TP énergie solaire, (14,15p).
- [12] : [energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html](http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html),20/03/2017.

## Références bibliographiques

---

- [13] : [www.ecosources.info/dossiers/types\\_de\\_cellules\\_photovoltaiques](http://www.ecosources.info/dossiers/types_de_cellules_photovoltaiques), 20/03/2017.
- [14] : CECILE MIQUEL, systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental, p15.
- [15] : ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ, énergie solaire photovoltaïque, p63
- [16] : BENDJELLOULI ZAKARIA, contribution à la modélisation d'une cellule solaire, p27.
- [17] : ZOUACHE FOUJIL, étude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque, p31.
- [18] : OUDDAH MOURAD, étude du silicium poreux destine aux cellules solaires, p25.
- [19] : GUILLAUME GOMARD, thèse : cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultraminesces, p25.
- [20] : [architekturverzeichnis.blogspot.com/2015/](http://architekturverzeichnis.blogspot.com/2015/) , 12/12/2015.
- [21] : [www.alloprof.qc.ca/bv/pages/p1054.aspx](http://www.alloprof.qc.ca/bv/pages/p1054.aspx) ,02/07/2017.
- [22] : MAKHTOUR DJAMEL & GHARBI SAMIR, étude et simulation d'une structure à base de InGaN pour le photovoltaïque, p50.
- [23] : [www.persienneisotra.fr/calcul-du-facteur-de-transmission-solaire-et lumineuse](http://www.persienneisotra.fr/calcul-du-facteur-de-transmission-solaire-et_lumineuse) , 17/04/2017.
- [24] : [www.physique-chimie-lycee.fr/cours-seconde-physique/sa02\\_3-reflexion-refraction.html](http://www.physique-chimie-lycee.fr/cours-seconde-physique/sa02_3-reflexion-refraction.html) ,11/04/2017.
- [25] : [sesp.esep.pro/fr/pages polarisation/coef-reflexion transmission.html](http://sesp.esep.pro/fr/pages_polarisation/coef-reflexion_transmission.html),16/03/2017.
- [26] : JULIEN DUPUIS, élaboration et caractérisation de couches de  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  : het  $\text{SiN}_x$  : h réalisées par méthode pecvd : application à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium, p29-30-41-42.
- [27] : NAIT KACI FAZIA, étude et réalisation de couches d'oxynitruure de silicium sur un substrat de silicium monocristallin ou multi cristallin, p19, 24,25.
- [28] : MARTIN ROCHETTE, réalisation d'un prototype de laser à cavité étendue continûment accordable, p19-20.
- [29] : [www.physagreg.fr/optique-11-lois-optique-geometrique.php](http://www.physagreg.fr/optique-11-lois-optique-geometrique.php), 04 octobre 2016.
- [30] : RAPHAEL COZZOLINO, étude de couches minces organométalliques déposées par procédé plasma basse pression à partir de zirconium Tert butoxide : application aux traitements antireflets, p32.

## Références bibliographiques

---

- [31] : Z. BEN MOHAMED, M. REMRAM ET A. LAUGIER, influence des couches antireflets sur les performances d'une cellule solaire au silicium multi cristallin
- [32] : BOUBRIK NACER, comparaison des effets antireflets du  $\text{SnO}_2$  et  $\text{ZnO}$  utilisés comme couches antireflet sur les propriétés de la cellule solaire à homo-jonction, p20.
- [33] : ZAKARIA AZDAD, élaboration des couches minces a-SiCN : H déposées par pulvérisation réactive. Études des propriétés optiques et structurales, p5
- [34] : MELLE DJERIOUAT KHADIDJA, optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs, p203
- [35] : perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P13.HTM ,11-05-2005
- [36] : BENADLA NADJET, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires conventionnelles à base de mc\_si, p57
- [37] : BENCHERRAT ABDENNEBI, étude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solaire à faible budget thermique, p53
- [38] : MEDJDOUB SARRA, étude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération, p34
- [39] : ZERIG ALKHADHIR, BENAMOR RAKBIA, mémoire : étude de procédé bain chimique et les réactions amenant au matériau CdS en couche minces, p23-24-26
- [40] : ADEL TAABOUCHE, Contribution à l'étude structurale et microstructurale de films ZnO obtenus par ablation laser, p25.
- [41] : KENZA KAMLI, élaboration et caractérisations physicochimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : effet des sources d'étain, p15-16
- [42] : A.MOUHOUB, procédés technologiques alternatifs de réalisation des photopiles solaires au silicium cristallin, p16-17
- [43] : FATIMA BENSMAIN, Etude théorique sur les applications actuelles du ZnO et les dopages possibles sur ce matériau, p59
- [44] : CHEHBOUB Wissame, Simulation numérique de la cellule solaire à hétérojonction Ni/a-Si :H(p)/c-Si(n)/Al par SCAPS-1D,p9
- [45] Bayawa MOHAMED<sup>a,b,\*</sup> Serges ZAMBOU<sup>c,d,\*</sup>, Serge Sylvain ZEKENG<sup>a</sup>, Influence of moisture on the operation of a mono-crystalline based silicon photovoltaic cell: A numerical study using SCAPS 1 D,p5
- [46] Peter Kusterle, Intermediate Band Solar Cells Based on Cr:ZnS,p42

## Résumé :

L'élaboration des cellules solaires est en cours de développement et d'exploitation par de nombreux laboratoires à travers le monde. Certains modèles sont déjà industrialisés, d'autres sont en cours. En raison du coût élevé de l'expérience, l'outil de simulation est devenu primordial pour prédire le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent. L'objectif de notre travail entre dans ce cadre précis. Il concerne l'étude et la simulation des cellules solaires au silicium monocristallin avec les couches antireflets par logicielle SCAPS dans l'objectif d'optimiser leurs paramètres.

**Mots clefs :** cellules solaires, photovoltaïque, silicium monocristallin, couches antireflets, logicielle SCAPS.

## الملخص:

يجري تطوير الخلايا الشمسية من قبل العديد من المختبرات في جميع أنحاء العالم. وقد تم بالفعل تصنيع بعض النماذج، وهناك بعض النماذج قيد التنفيذ. ونظرا لارتفاع تكلفة التجربة، أصبحت أداة المحاكاة ضرورية للتنبؤ بتطوير البحوث، لا سيما في مجال الخلايا الكهروضوئية، مما يوفر الوقت والمال. إن هدف عملنا يندرج ضمن هذا الإطار الدقيق. وتتعلق الدراسة ومحاكاة الخلايا الشمسية من السيليكون الأحادي مع الطبقات المضادة للانعكاس بواسطة برنامج SCAPS من أجل تحسين المعلومات الخاصة بهم.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الشمسية، الضوئية، سليسيوم احادي التبلور، طبقات مضادة للانعكاس، برنامج SCAPS.

## Abstract:

The development of solar cells is being developed and operated by many laboratories around the world. Some models are already industrialized, others are underway. Due to the high cost of the experiment, the simulation tool has become essential to predict the development of research, particularly in photovoltaic, saving time and money. The objective of our work falls within this precise framework. It concerns the study and the simulation of solar cells with monocrystalline silicon with the antireflective layers in order to optimize their parameters.

**Key words:** solar cells, photovoltaic, monocrystalline silicon, antireflective layers, logicielle SCAPS.