

UNIVERSITE Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

KASDI MERBAH OUARGLA



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

**BELKHAMSA Madjed**

**Et**

**BETTAYEB Bachir**

**Thème :**

**Optimisation par simulation d'une cellule  
solaire en couches minces à base de**

**$Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$**

Soutenu publiquement Le : 14 / 06 / 2023

Devant le jury composé de :

M' LOUAZENE Mohammed Lakhdar	MCA	Président	UKM Ouargla
M' BENMIR Abdelkader	MCB	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M' BOUHAFS Ali	MCB	Examineur	UKM Ouargla

**Année universitaire 2022/2023**



## DEDICACES

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage et la patience de faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées.

Je dédie ce travail à:

À ma mère que je remercie Dieu Tout-Puissant d'avoir dans ma vie est celle qu'elle mérite.

Le succès que j'ai eu parce qu'elle a lutté et travaillé pour mon succès avec son amour et son soutien et tous les sacrifices qu'elle a faits et ses précieux conseils pour toute son aide. Parce que si ce n'était pas pour vous, après Dieu, je n'aurais pas atteint ce stade, et peu importe les paroles que vous avez dites, elles ne rempliront pas votre droit. J'espère que Dieu vous protégera pour moi et vous gardera en bonne santé et bien. Et prolonger votre vie.

J'espère qu'à travers ce travail, aussi humble soit-il, vous obtiendrez l'expression de mon indéfectible et inexprimable gratitude. Je t'aime maman...

À mon cher père, qui a été mon modèle et mon professeur dans la vie et avant cela un père merveilleux, j'espère que Dieu le protégera et le récompensera pour son combat et prolongera sa vie.

Mon père SLIMANE, ma chère mère, mes chers frères et mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité .

À toute ma famille BELKHAMSA .

À mes chers amis qui m'ont soutenu depuis l'enfance, et aux camarades que nous avons connus au cours de ce parcours académique.

Au chef du département de génie électrique, le PROFESSEUR LOUAZENE Mohammed Lakhdar, et à tous mes collègues de la spécialisation en génie électrique 2023.

**B. MADJED**





## DEDICACES

Louange à Allah avant qu'Il ne soit satisfait, louange à Allah lorsqu'Il est satisfait, et louange à Allah après. Sa satisfaction. Nous louons Allah, Le Tout-Puissant, d'avoir pu nous aider à réaliser humblement ce travail.

À la meilleure des créatures, au bien-aimé, notre seigneur Muhammad, Que la meilleure des prières et des salutations soit sur lui.

À la lumière de mes yeux, à celle qui le paradis est placé sous ses pieds... À celle qui a privé son âme et qui m'a donné, de la source de sa tendresse elle m'a abreuvé... À celle qui a veillé les nuits pour mon éducation et mon enseignement, et m'a offert la vie... Elle m'a donné l'amour et la tendresse, elle m'a élevé. Ma chère mère aimante.

À celui qui accroît mon affiliation à lui, dont le souvenir m'honore et me rend fier, qui m'a fait grandir dans la noble et pure vertu. Mon père ALI.

À celui qui a été comme un deuxième père, sur qui je me suis appuyé dans les petits et grands moments, qui ne m'a jamais privé de son soutien tout au long de sa vie. Mon oncle

BETTAYEB SADEK.

À la lueur de mon cœur et à la colonne de ma vie, mes sœurs.

À mes chers amis et à tous ceux que le destin a choisi de me réunir avec eux sur les bancs d'établissements scolaires et de faire d'eux des frères.

À ma famille, mes proches et mes bien-aimés, la famille BATTAYEB.

À mon cher professeur ABDELKADER BENMIR et à tous mes enseignants à la Faculté des Sciences Appliquées et de la Technologie.

Et à tous ceux que mon cœur se souvient et que ma plume a oublié, je vous dédie ma recherche.

**B. BACHIR**



## REMERCIEMENTS

Merci

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a données tout au long de notre vie.

Étude

Nous remercions sincèrement **M. Benmir Abdelkader**, notre promoteur de ce travail, et ses conseils pertinents et sa sagesse pour sa grande patience et sa diligence à notre égard, et pour ses suggestions, qui ont grandement facilité ce travail.

Nos sincères remerciements aux professeurs du comité de l'Université de Ouargla qui ont consacré leur temps et leurs compétences pour juger ce travail, en leur souhaitant plein succès.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à ceux qui nous ont soutenus et ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

Remerciements particuliers aux étudiants de deuxième année à la maîtrise en génie électrique.

**B. MADJED**

**B. BACHIR**

## Résumé

L'objectif de ce travail est d'effectuer une optimisation par simulation à l'aide du logiciel SCAPS de l'épaisseur  $d$ , de la composition  $Y$  et de la densité des atomes dopants  $Na$  de la couche absorbeur pour une cellule photovoltaïque en couches minces à base de  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ . On a trouvé que la valeur optimale de l'épaisseur  $d$  est  $0.3 \mu m$ . Cependant, la composition optimale  $Y$  était la plus faible, ce qui correspond à un gap minimal  $E_g = 1.18 eV$ . Alors que la concentration en atomes dopants  $Na$  ne dépasse pas  $10^{16} cm^{-3}$ . Il a été constaté que toutes ces valeurs optimales donnent un rendement maximal  $\eta = 13.58 \%$ .

## ملخص

الهدف من خلال هذا العمل هو اجراء تحسين عن طريق المحاكاة باستعمال برنامج SCAPS، للسلك  $d$ ، التركيب  $Y$  وكثافة ذرات المنشطات  $Na$  للطبقة الماصة  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  لخلية شمسية كهروضوئية رقيقة. تم العثور على ان القيمة المثلى للسلك  $d$  هي  $0.3 \mu m$ . كما أن التركيب الأمثل  $Y$  هو الأدنى والذي يتوافق مع أدنى فجوة  $E_g = 1.18 eV$ . بينما لا يتجاوز تركيز ذرات المنشطات  $Na$  القيمة  $10^{16} cm^{-3}$ . وجد ان كل هذه القيم المثلى تعطي اقصى قدر من المردود  $\eta = 13.58 \%$ .

## Abstract

The objective of this work is to perform an optimization by simulation using the SCAPS software of the thickness  $d$ , the composition  $Y$  and the density of the doping atoms  $Na$  of the absorber layer in a  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  thin-film photovoltaic cell. It can be seen that the optimal value of the thickness  $d$  is  $0.3 \mu m$ . However, the optimal composition  $Y$  was the lowest, which corresponds to a minimum gap  $E_g = 1.18 eV$ . While the concentration of  $Na$  dopant atoms does not exceed  $10^{16} cm^{-3}$ . It was found that all these optimal values give the maximum efficiency  $\eta = 13.58 \%$ .

## Liste des figures

N° de figure	Titre	N° de page
<b>Chapitre I</b>		
I.1	Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique	5
I.2	Définition de la norme AM ; spectre représentant l'irradiance solaire hors atmosphère (AM0) et sur terre (AM1.5 global)	6
I.3	Dopage (Semiconducteur) - dopé P	7
I.4	Dopage (Semiconducteur) - dopé N	8
I.5	Jonction PN	9
I.6	La Cellule photovoltaïque	9
I.7	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal	10
I.8	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	11
<b>Chapitre II</b>		
II.1	Dispositif expérimental d'ablation laser	20
II.2	Bâti d'épitaxie par jet moléculaire	21
II.3	Dépôt par Spray-Pyrolyse : Pulvérisation par un système pneumatique classique	22
II.4	Dépôt par spray-pyrolyse avec atomiseur ultrasonique	23
II.5	Structure cristalline orthorhombique d'élément $Sb_2S(Se)_3$ les sphères jaunes représentent les atomes S(Se), les sphères blanches représentent les atomes Sb	24
II.6	Structure schématique d'une couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	25
<b>Chapitre III</b>		
III.1	Structure de la cellule à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	32
III.2	Effet de l'épaisseur de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV	34
III.3	Effet de la composition Y de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les Performances de la cellule PV	35
III.4	Effet du dopage Na de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV	36

## Liste des tableaux

N° de tableau	Titre	N° de page
<b>Chapitre III</b>		
III.1	Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation	33

## LISTE DES SYMBOLES

$E(x)$  : Champ électrique.

$E$  : Energie.

$E_g$  : Largeur de la bande interdite (gap).

$E_c$  : énergie minimale de la bande de conduction.

$E_v$  : énergie maximale de la bande de valence.

$n, p$  : Concentration des électrons et des trous respectivement.

$I$  : Courant de sortie.

$I_d$  : Courant de la diode.

$I_{ph}$  : Photo-courant

$I_{sh}$  : Courant shunt.

$J_{sc}$  : Courant de court-circuit.

$\vec{j}_n, \vec{j}_p$  : Sont des densités de courant d'électrons et de trous respectivement.

$G$  : représente le taux de génération d'électrons

$G_n, G_p$  : Sont les taux de génération des électrons et des trous.

$\mu_n, \mu_p$  : Mobilité des électrons et des trous respectivement.

$D_n, D_p$  : Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

$R$  : représente le taux de recombinaison d'électrons

$R_n, R_p$  : Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

$\Psi$  : Le potentiel électrostatique.

$n_i$  : La densité effective intrinsèque.

$\epsilon, \epsilon_0$  : permittivité du vide, Permittivité relative et permittivité totale respectivement.

$P_{in}$  : Puissance incidente.

$R_s$  : Résistance Série.

$R_{sh}$  : Résistance parallèle.

$V$  : Tension de sortie de la cellule.

$n$  : le facteur d'idéalité de la diode.

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert.

FF : Facteur de forme.

$\eta$  : Rendement de conversion.



$P_m$  : puissance maximale.

$SR(\lambda)$  : Réponse spectrale.

$R(\lambda)$  : Coefficient de réflexion.

$F(\lambda)$  : Flux solaire au sol.

$D$  : Epaisseur de la couche  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

$I_s$  : Courant de saturation inverse.

$\nabla n, \nabla p$  : les coefficients de diffusion des électrons et des trous.

$\Phi$  : le potentiel électrique.

$\partial n / \partial t$  : la dérivée partielle de la densité d'électrons  $n$  par rapport au temps.

$\nabla n$  et  $\nabla p$  : représentent les gradients spatiaux de la densité d'électrons et de trous.

# Sommaire

DEDICACES

REMERCIEMENTS

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

LISTE DES SYMBOLES

**Introduction générale ..... 1**

## **Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques**

I. 1. Introduction .....	4
I. 2. Historique .....	4
I. 3. Rayonnement solaire .....	5
I. 4. Matériaux semi-conducteurs .....	6
I.4.1. Semi-conducteurs intrinsèques .....	6
I.4.2. Semi-conducteurs extrinsèques .....	7
a) Dopage de type P .....	7
b) Dopage de type N .....	8
c) Jonction P-N (Diode) .....	8
I.5. Cellules solaires photovoltaïques .....	9
I.5.1. Définition .....	9
I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque .....	10
I.5.3. Modélisation d'une cellule solaire .....	10
a) Cellule solaire idéale .....	10
b) Cellule solaire réelle .....	11
I.5.4. Différentes caractéristiques d'une cellule solaire .....	11
a) Courant de court-circuit, $I_{sc}$ .....	11
b) Tension de circuit ouvert, $V_{co}$ .....	12
c) Réponse spectrale, $SR(\lambda)$ .....	12
d) Puissance maximale, $P_m$ .....	12
e) Facteur de forme, $FF$ .....	12
f) Rendement de conversion, $\eta$ .....	12
I.5.5. Générations et filières des cellules solaires .....	13
a) Première génération .....	13
b) Deuxième génération .....	13

c) Troisième génération.....	14
I.6. Conclusion.....	14
<b>Chapitre II : Cellules solaires en couches minces à base de <math>Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3</math></b>	
II. 1. Introduction .....	16
II. 2. Cellules solaires en couches minces.....	16
a) Les avantages de la technologie de type mince .....	17
b) Les inconvénients.....	17
II. 3. Comment faire des cellules solaires à couches minces .....	17
II. 4. Technique de caractérisation des couches minces .....	18
a) Caractérisation structurelle.....	18
b) Caractérisation optique .....	18
b.1. La Spectroscopie visible.....	18
b.2. L'ellipsométrie .....	18
c) Caractérisation électrique.....	19
II. 5. Dépôts des couches minces .....	19
II. 5. 1. Méthodes physiques .....	19
a) Dépôt physique en phase vapeur (PVD) .....	19
b) Pulvérisation .....	19
c) Ablation laser (PLD: Pulsed Laser Deposition).....	19
c.1. Ablation laser directe.....	19
c.2. Le dépôt par ablation laser réactive.....	20
d) Epitaxie par jet moléculaire (MBE).....	20
e) Vaporisation .....	21
II. 5. 2. Méthodes chimiques .....	22
II.5.2.1. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	22
II.5.2.2. Spray pyrolyse .....	22
II.5.2.3. Méthode colloïdale .....	23
II. 6. Couches minces en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ .....	24
II. 7. Propriétés physique des couches minces en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ .....	24
II. 8. Technologies des cellules solaires à couches minces en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ .....	25
II.9. Conclusion.....	26
<b>Chapitre III : Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de <math>Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3</math></b>	
III.1. Introduction.....	28
III. 2. Equations fondamentales dans les semiconducteurs.....	28
III. 2. 1. Equations de continuité .....	28
III. 2. 2. Équation de poisson .....	29

---

III. 2. 3. Équations de transport.....	29
III. 3. Présentation du logiciel utilisée .....	30
III. 4. Modèle de simulation.....	32
III. 5. Résultats et discussion .....	33
III. 5. 1. Effet de l'épaisseur d .....	34
III. 5. 2. Effet de la composition Y (gap $E_g$ ) .....	34
III. 5. 3. Effet de la concentration des atomes de dopage $N_a$ .....	35
III. 6. Conclusion .....	36
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>39</b>

---

***Introduction***

***Générale***

---

## Introduction générale

Avec les progrès de la science et le développement de la technologie, l'énergie est sans aucun doute devenue l'élément le plus important de la vie humaine en raison de ses nombreuses utilisations. Au fil des ans, la quantité de consommation de celui-ci a augmenté, et le taux de s'en passer à l'heure actuelle est presque inexistant.

Il est connu que l'énergie a deux sources, l'une non renouvelables, telles que les énergies fossiles (charbon, gaz et pétrole) et les sources fissiles (nucléaire). La mauvaise réalité de ces sources est qu'elles ne sont pas renouvelables et s'épuisent avec leur pollution continue de l'environnement et l'énergie nucléaire comporte des dangers et qui conduisent à de grandes catastrophes [7]. Mais d'autre part, il existe des sources renouvelables, qui sont des énergies telles que le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des plantes.

Parmi eux l'énergie solaire photovoltaïque (PV) qui est l'énergie électrique résultant de la conversion directe du rayonnement solaire à l'aide de la cellule solaire photovoltaïque. Cette énergie a l'avantage d'être non polluant, élégant, silencieux et sans pièces tournantes [15].

Beaucoup de travail a été fait ces dernières années pour améliorer la technologie des cellules solaires en couches minces afin qu'elles puissent atteindre le rendement le plus élevé possible. L'un des matériaux prometteurs en couches minces qui a attiré l'attention des scientifiques est le sélénosulfure d'antimoine  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ . Les chercheurs pensent que ce matériau peut fournir un rendement et une stabilité élevée pour les panneaux solaires tout en étant rentable pour la production de masse.

Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel SCAPS pour optimiser quelques paramètres de la couche absorbeur en  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  d'une cellule solaire en couches minces. Ces paramètres sont l'épaisseur  $d$ , la largeur de la bande interdite également appelée gap  $E_g$  et la densité des atomes de dopage  $N_a$ .

Ce mémoire est organisé comme suit :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous mentionnons quelques concepts de base dans le domaine photovoltaïque (PV). Où nous commençons en premier d'abord abordé l'histoire du photovoltaïque, après cela nous présentons concis aperçu du rayonnement solaire, puis nous discutons des matériaux semi-conducteurs, de la jonction PN et du rayonnement solaire. Ensuite, nous spécifier la cellule solaire photovoltaïque, son principe de fonctionnement, son

schéma équivalent, et ses caractéristiques photovoltaïques de base. Enfin, nous expliquons brièvement les différentes générations des cellules solaires photovoltaïques.

- ❖ Le deuxième chapitre est consacré à une étude approfondie du matériau  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  qui est la couche absorbeur de la cellule.
- ❖ Dans le troisième chapitre, Nous travaillons sur une simulation à l'aide du logiciel SCAPS d'une cellule solaire à couches minces à base de  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  afin d'améliorer les performances de cette cellule.
- Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

---

*Chapitre I : Généralités sur les  
cellules solaires photovoltaïques*

---



### I. 1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous introduisons le concept de base dans le domaine des cellules solaires photovoltaïques. Nous commençons par l'histoire du photovoltaïque, après quoi nous donnons un bref aperçu du rayonnement solaire, puis nous discutons des matériaux semi-conducteurs, de la jonction PN et du rayonnement solaire. Puis la définition de la cellule solaire photovoltaïque, son principe de fonctionnement, son schéma équivalent, et ses caractéristiques photovoltaïques de base. Enfin, nous expliquons brièvement les différentes générations de photovoltaïque.

### I. 2. Historique

L'histoire des cellules solaires photovoltaïques remonte au 19e siècle. Voici une brève chronologie des événements clés :

1839 : Le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque lorsqu'il observe que certains matériaux produisent une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

1876 : William Grylls Adams et son étudiant Richard Evans Day démontrent pour la première fois l'effet photovoltaïque dans le sélénium.

1883 : Charles Fritts, un inventeur américain, construit la première cellule solaire photovoltaïque en recouvrant une fine couche de sélénium sur une fine feuille d'or.

1905 : Albert Einstein publie son article sur l'effet photoélectrique, qui jette les bases de la compréhension scientifique de l'effet photovoltaïque.

1954 : Les physiciens américains Gerald Pearson, Calvin Fuller et Daryl Chapin de la société Bell Labs développent la première cellule solaire photovoltaïque en silicium. Cette cellule atteint un rendement de conversion de l'énergie solaire d'environ 6 %.

1960 : La NASA utilise des cellules solaires photovoltaïques pour alimenter les satellites Vanguard 1 et Explorer 6. C'est le début de l'utilisation de l'énergie solaire dans l'espace.

1970-1980 : Les cellules solaires photovoltaïques commencent à être utilisées dans des applications terrestres, principalement dans les domaines de l'énergie spatiale, de la signalisation et des télécommunications.

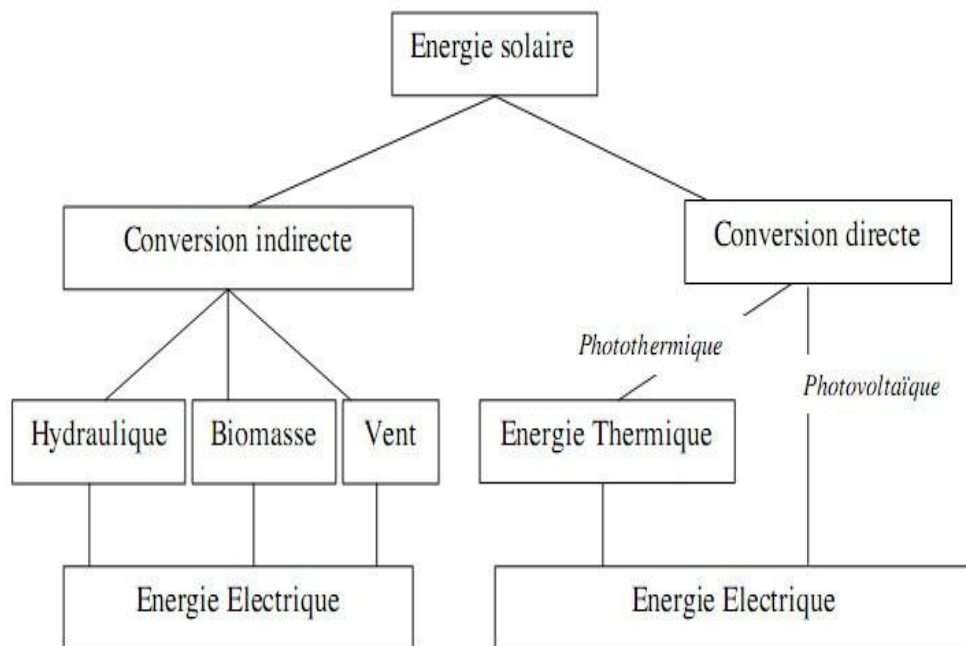
1990-2000 : Les coûts de production des cellules solaires photovoltaïques diminuent progressivement grâce aux avancées technologiques et à l'augmentation de la production à grande échelle. Cela ouvre la voie à une utilisation plus répandue de l'énergie solaire dans les installations résidentielles et commerciales.

Depuis les années 2000 : L'industrie solaire connaît une croissance rapide, stimulée par des politiques de soutien gouvernementales, des avancées technologiques, une sensibilisation accrue à l'énergie propre et une réduction des coûts. Les rendements des cellules solaires augmentent et de nouveaux matériaux et technologies émergent, tels que les cellules solaires à couche mince et les cellules solaires organiques [1] [2].

L'histoire des cellules solaires photovoltaïques est un exemple d'évolution technologique continue, avec des progrès constants pour améliorer leur efficacité, réduire les coûts et accroître leur utilisation dans le monde entier.

### I. 3. Rayonnement solaire

Le rayonnement moyen émis par le soleil est de 1,36 KW/m<sup>2</sup> hors atmosphère. Pour des conditions climatiques ainsi que pour la présence de certaines molécules dans l'atmosphère (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O...) ce rayonnement subit une atténuation et une modification de son spectre.



**Figure (I.1) :** Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

L'intensité et la distribution spectrale qui arrive à la surface de la terre se réduit alors à 1000 W/m<sup>2</sup> avec un spectre décalé vers le rouge.

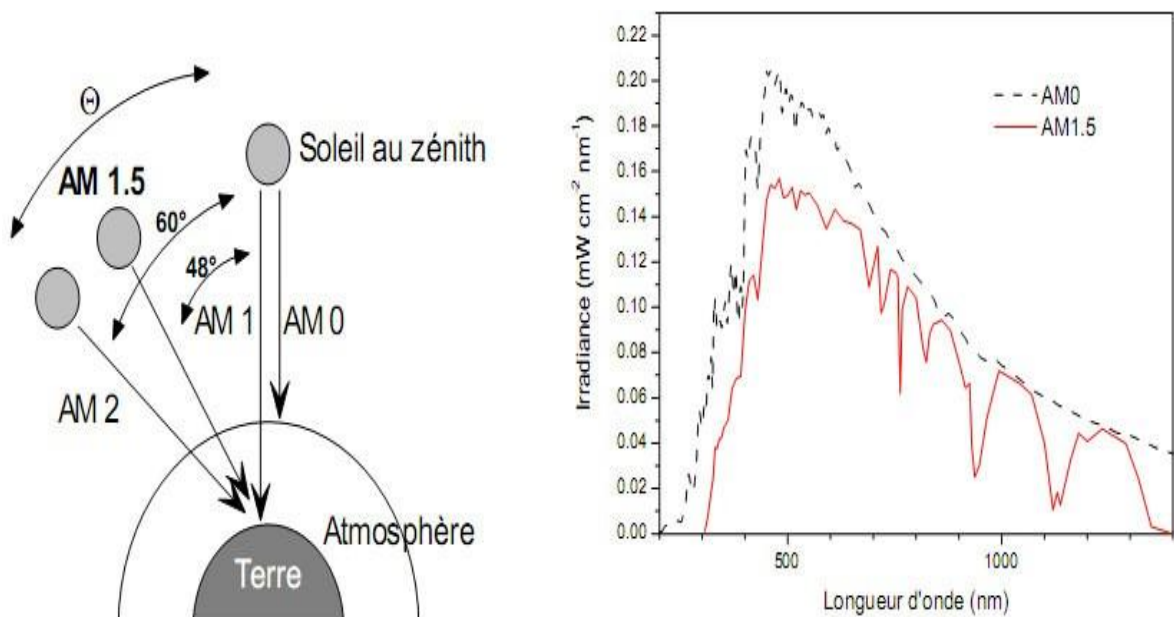
Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'air mass (AM), ou « masse atmosphérique » a été créée. Le nombre de masse (AM) est défini par l'équation (I. 1) :

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

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith (figure (I. 2)).

La figure (I. 2) montre le spectre d'irradiance solaire hors atmosphère (AM0) et sous AM1.5 global normalisé à  $100 \text{ mW/cm}^2$  [3].

Afin de standardiser les méthodes de mesure, un spectre AM1.5G (Global) a été défini comme référence internationale. Il correspond à une masse d'air de 1.5 et un angle  $\theta$  de  $48.2^\circ$ . Précisant que Global signifie que le spectre tient compte du rayonnement direct ainsi que du rayonnement diffus. Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et un composant diffus (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global.



**Figure (I.2) :** Définition de la norme AM ; spectre représentant l'irradiance solaire hors atmosphère (AM0) et sur terre (AM1.5 global)

#### I. 4. Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des matériaux qui ont des propriétés électriques intermédiaires entre celles des conducteurs (comme les métaux) et des isolants (comme le verre ou le bois). Leurs propriétés électriques sont principalement dues à la présence de lacunes ou d'excès d'électrons dans leur structure cristalline [4].

##### I.4.1. Semi-conducteurs intrinsèques

Les semi-conducteurs intrinsèques sont des matériaux semi-conducteurs purs qui ne contiennent pas intentionnellement de dopants. Ils sont généralement constitués de cristaux de silicium (Si) ou de germanium (Ge) et leur conductivité électrique est principalement due à la présence d'électrons libres dans leur structure cristalline [5].

### I.4.2. Semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs extrinsèques sont des matériaux semi-conducteurs qui ont été délibérément dopés avec des impuretés pour améliorer leur conductivité électrique et modifier leur comportement électronique. Le dopage implique l'incorporation intentionnelle d'atomes d'impuretés dans la structure cristalline du matériau, qui remplacent certains des atomes de la matrice de base [5].

#### a) Dopage de type P

Le dopage de type P est un processus de dopage des semi-conducteurs extrinsèques qui implique l'ajout d'atomes qui ont un électron de moins que les atomes de base. Ce type de dopage crée des lacunes d'électrons appelées trous, qui peuvent être remplis par des électrons provenant d'autres atomes. Cela augmente la conductivité électrique du matériau de type P.

Les atomes qui sont couramment utilisés pour le dopage de type P sont ceux qui ont un électron de moins que l'élément de base du semi-conducteur, tels que le bore (B), l'aluminium (Al) et le gallium (Ga). Ces atomes ont une lacune d'électrons qui est facilement remplie par un électron d'un atome voisin.

Lorsque le matériau dopé de type P est soumis à une tension électrique, les trous se déplacent vers la borne négative et sont remplis par des électrons provenant de la borne positive, créant ainsi un courant électrique. Les semi-conducteurs dopés de type P sont également largement utilisés dans la fabrication de composants électroniques tels que les transistors, les diodes, les cellules solaires, les capteurs, etc.

Il est important de noter que le dopage de type P et le dopage de type N sont souvent combinés dans la fabrication de composants électroniques pour créer des jonctions PN, qui ont des propriétés électriques intéressantes pour de nombreuses applications [5].

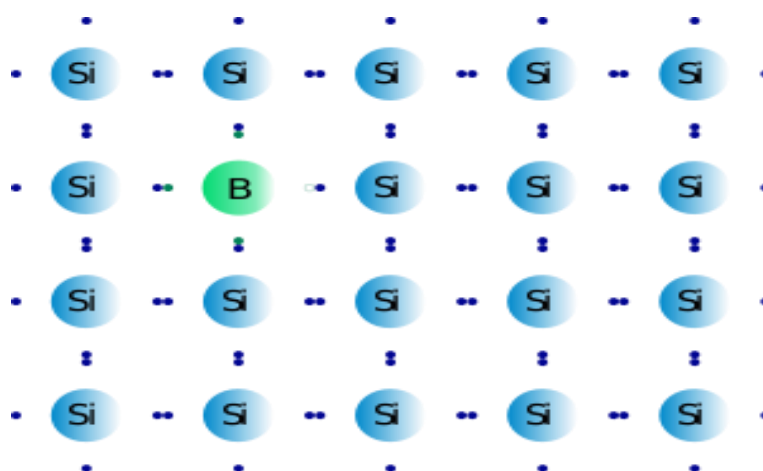


Figure I.3: Dopage (Semiconducteur) - dopé P

### b) Dopage de type N

Le dopage de type N est un processus de dopage des semi-conducteurs extrinsèques qui implique l'ajout d'atomes qui ont un électron de plus que les atomes de base. Ce type de dopage augmente le nombre d'électrons libres dans le matériau, augmentant ainsi sa conductivité électrique.

Les atomes qui sont couramment utilisés pour le dopage de type N sont ceux qui ont un électron de plus que l'élément de base du semi-conducteur, tels que le phosphore (P), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb). Ces atomes ont un électron supplémentaire qui est facilement libéré pour devenir un électron libre lorsqu'ils sont ajoutés à la structure cristalline du semi-conducteur.

Lorsque le matériau dopé de type N est soumis à une tension électrique, les électrons libres se déplacent vers la borne positive et sont remplacés par d'autres électrons libres provenant de la borne négative, créant ainsi un courant électrique. Les semi-conducteurs dopés de type N sont largement utilisés dans la fabrication de composants électroniques tels que les transistors, les diodes, les cellules solaires, les capteurs, etc [5].

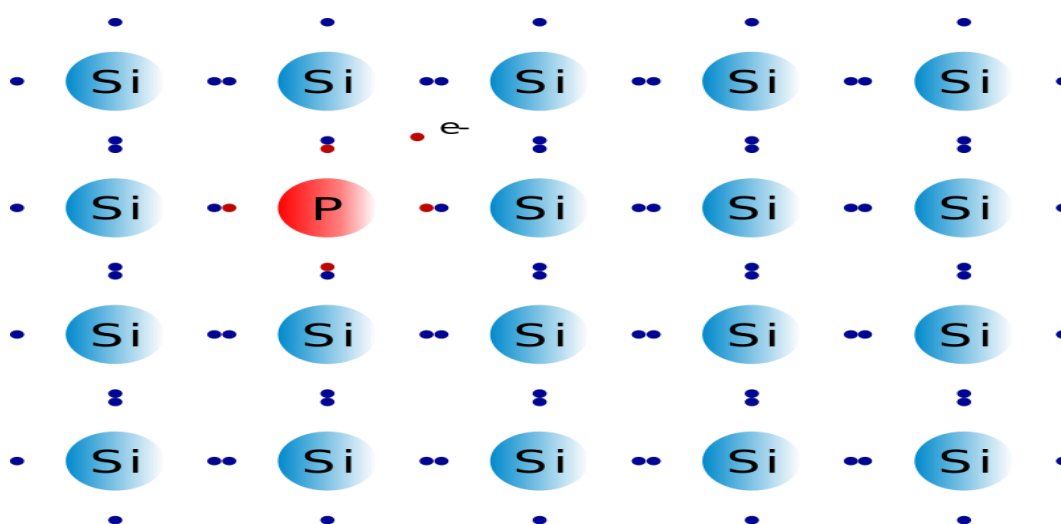


Figure I.4: Dopage (Semiconducteur) - dopé N

### c) Jonction P-N (Diode)

Une jonction P-N est une interface entre un semi-conducteur dopé de type P et un semi-conducteur dopé de type N. Cette jonction est créée en rapprochant deux matériaux semi-conducteurs dopés différemment, de telle sorte que les électrons de la zone N diffusent vers la zone P et comblerent les trous de cette zone, créant ainsi une zone neutre de charge. Cette jonction est également appelée diode.

Dans une diode, la jonction P-N est une région qui présente des propriétés électriques uniques. Lorsque la diode est polarisée en direct, la tension appliquée pousse les électrons de la région N vers les trous de la région P, ce qui crée un courant électrique qui circule facilement à travers la diode. En

revanche, lorsque la diode est polarisée en inverse, la tension appliquée repousse les électrons de la région N loin de la jonction, créant une région de charge négative et une région de charge positive, qui empêchent le courant électrique de circuler dans la diode.

Les diodes ont une variété d'applications, notamment dans la conversion de courant alternatif en courant continu, la régulation de la tension, la protection contre les surtensions, la détection de signaux, etc [5].

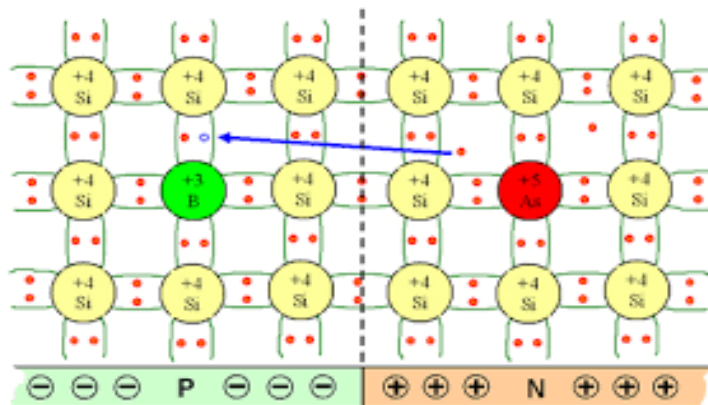


Figure I.5: Jonction PN

## I.5. Cellules solaires photovoltaïques

### I.5.1. Définition

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs électroniques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Elles sont souvent appelées cellules solaires, et peuvent être utilisées pour alimenter des appareils électroniques ou pour produire de l'électricité à grande échelle [6].

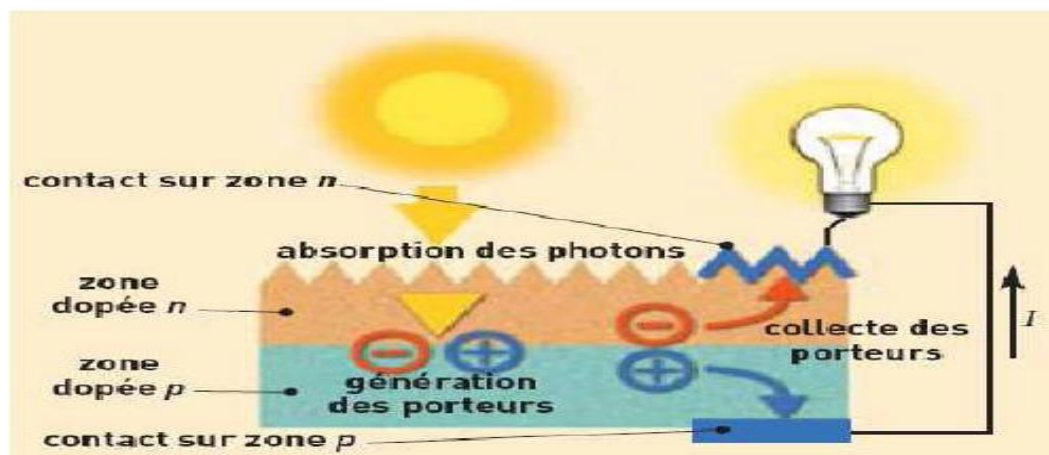


Figure I.6: Cellule photovoltaïque

### I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

La cellule solaire PV est un composant semi-conducteur convertissant l'éclairement incident en puissance électrique, ce phénomène appelé effet photovoltaïque, qui consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction PN, les étapes suivantes expliquent ce phénomène de conversion :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif [7].

### I.5.3. Modélisation d'une cellule solaire

#### a) Cellule solaire idéale

Si la caractéristique de la jonction est de la forme :

$$I = I_s \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (\text{I. 2})$$

On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photocourant supplémentaire,  $I_{ph}$  dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule solaire, on recueille ce courant [8].

Le courant sous lumière vaut :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (\text{I. 3})$$

La tension  $V$  est donnée par :

$$V = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I. 4})$$

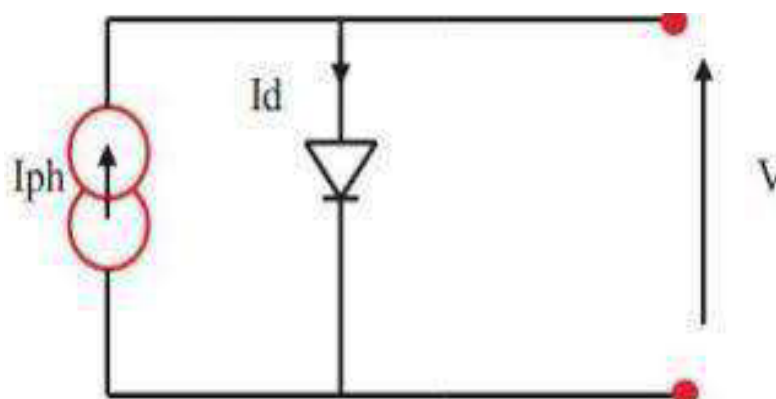


Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal

## b) Cellule solaire réelle

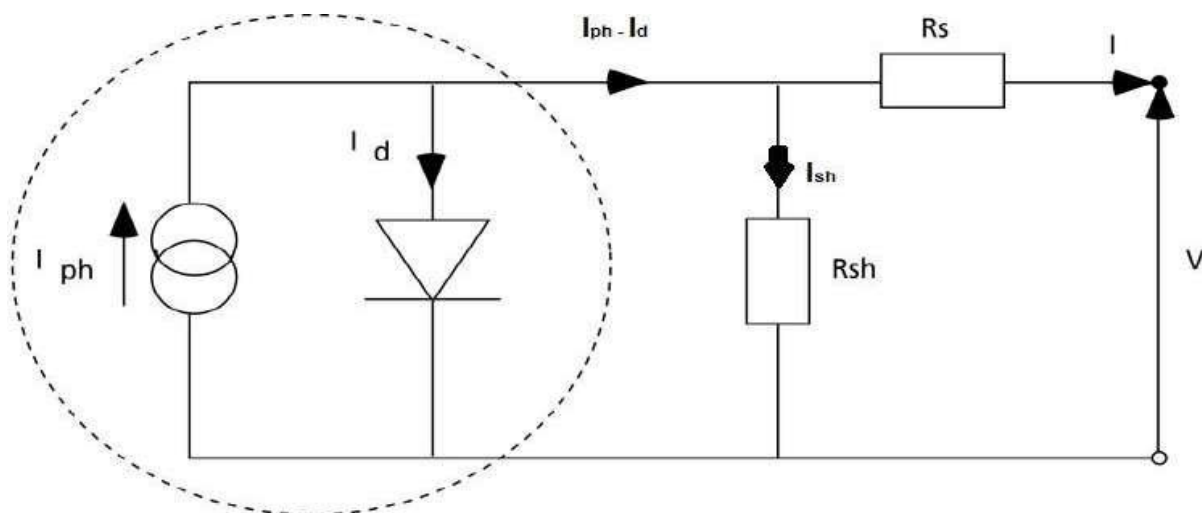
La figure I.6 présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule. Le premier est la résistance série  $R_s$ . Cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et de la base. Il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt  $R_{sh}$  qui correspondre aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau. Il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge.

L'équation de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque compte tenu des Résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  s'écrit donc [8] :

$$\mathbf{I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh}} \quad (\text{I. 5})$$

$$\mathbf{I(V) = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+R_s.I)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}}.} \quad (\text{I. 6})$$



**Figure I.8:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

### I.5.4. Différentes caractéristiques d'une cellule solaire

#### a) Courant de court-circuit, $I_{sc}$

Le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) est le second paramètre caractéristique décrivant une cellule photovoltaïque. L' $I_{sc}$  est le courant qui traverse la cellule lorsque celle-ci est en court-circuit. C'est à dire [9] :

$$\mathbf{I_{sc} = I(V = 0)} \quad (\text{I. 7})$$



**b) Tension de circuit ouvert,  $V_{co}$** 

La  $V_{co}$  est la tension maximale que peut générer la cellule. Celle-ci se mesure lorsque le courant est nul. C'est-à-dire [9] :

$$V_{co} = V (I = 0) \quad (I. 8)$$

**c) Réponse spectrale,  $SR(\lambda)$** 

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

La réponse spectrale  $SR$  est donnée par la relation suivante [9] :

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (I. 9)$$

**d) Puissance maximale,  $P_m$** 

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit  $V \cdot I$  est maximum, Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de cotés  $V_m$  et  $I_m$  [9] :

$$P_m = (V \cdot I)_{max} = I_m \cdot V_m \quad (I. 10)$$

**e) Facteur de forme,  $FF$** 

Le facteur de forme permet de qualifier la qualité de la cellule PV. C'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit de  $V_{co} \times I_{sc}$ . Ce rapport doit avoir une valeur la plus proche possible de 1 [9].

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{co}} \quad (I. 11)$$

**f) Rendement de conversion,  $\eta$** 

C'est le paramètre le plus important puisqu'il permet d'évaluer les performances de la cellule PV. C'est le rapport entre la puissance générée par la cellule ( $P_m$ ) et la puissance incidente ( $P_{in}$ ) du rayonnement lumineux éclairant la cellule. Il est défini par la relation suivante [9] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{co} \cdot FF}{P_{in}} \quad (I. 12)$$

### **I.5.5. Générations et filières des cellules solaires**

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité, tandis que les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale à propos de 89,7% en 2007.

#### **a) Première génération**

Elles sont à grande surface, à haute qualité et des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la première génération. La réduction des coûts de production de cette technologie est annulée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium. Cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion. Bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale, les photons de haute énergie à la fin du bleu et violet du spectre sont gaspillés sous forme de chaleur [10].

La production de cellules solaires à haut rendement avec une efficacité énergétique de conversion élevée sont ainsi favorisées à condition de ne pas augmenter la complexité de la cellule solaire. La limite théorique de l'efficacité des cellules solaires à simple jonction de silicium est de 33%.

#### **b) Deuxième génération**

Pour résoudre ces problèmes de besoins énergétiques et les coûts de production des cellules solaires, nous présentons la deuxième génération. La technologie des piles en couche mince a été imminente. Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'avantage d'augmenter la taille de l'unité.

Au fil du temps, les cellules solaires de deuxième génération sont attendues pour combler le fossé entre eux et les cellules de première génération par rapport au rendement de conversion énergétique. Avec l'augmentation de la dominance de cette technologie, le coût des matériaux constitutifs augmente également pour le couvercle supérieur et d'autres encapsulations pour lui donner une plus longue durée de vie. Les matériaux généralement utilisés dans la technologie en couche mince sont principalement le silicium amorphe (a-Si). Le diséléniure de cuivre et d'indium  $\text{CuInSe}_2$  (CIS), le diséléniure de cuivre d'indium et de gallium  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  (CIGS). Ces matériaux réduisent la masse, et par conséquent le coût de substrat formant le support pour le verre et la céramique. Non seulement ils réduisent les coûts mais également promettent une très haute efficacité de conversion d'énergie. Ce profile fait une tendance vers le changement de la première génération vers la deuxième génération. Mais la commercialisation de cette technologie s'est avérée être difficile [19].

### c) Troisième génération

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires [11]. La piètre performance électrique de la technologie en couche mince en maintenant de faibles coûts de production de cette technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères).

Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. La nécessité des découvertes révolutionnaires dans l'industrie photovoltaïque est parfois interrompue par des progrès dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication pour l'amélioration de la compétitivité des coûts et de l'expansion du marché du photovoltaïque. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de nouvelles compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution [12].

### I.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le concept de base d'une cellule photovoltaïque. On a commencé par une description du rayonnement solaire, les matériaux semi-conducteurs et la jonction *Pn*. Ensuite, on a rappelé le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses différentes caractéristiques PVs. Puis, Enfin, on a présenté les différents types des cellules solaires. Et leurs paramètres.

---

***Chapitre II : Cellules solaires en  
couches minces à base de  
 $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$***

---

## II. 1. Introduction

$Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  est un matériau très prometteur pour les applications photovoltaïques en raison de sa grande stabilité et de son élément non toxique [7]. Il est moins coûteux à produire que les cellules de première génération, Il a également un coefficient d'absorption très élevé et ne se dégrade pas, à cause de la température et de l'humidité. Ce type de matériau a d'autres propriétés intéressantes telles que la conductivité de type p et les transitions directes de bande interdite.

Bien que les mesures expérimentales disponibles des rendements de conversion indiquent environ 3.6 % à 7.6 %, la modélisation théorique récente des cellules solaires à base de matériau  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  montre que des rendements encore plus élevés allant jusqu'à 28 % peuvent être atteints en faisant varier le S/ (S + Se) rapport de composition [15].

Dans ce chapitre, nous évoquons au début quelques notions générales sur la technologie des couches minces, ensuite on donnant les différentes méthodes de dépôt de couches minces, après quoi nous terminons avec les différents éléments constitutifs de la cellule solaire photovoltaïque en  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ .

## II. 2. Cellules solaires en couches minces

Les cellules solaires en couches minces sont un type de cellules solaires qui utilisent des matériaux semi-conducteurs en couches minces pour convertir la lumière du soleil en électricité. Contrairement aux cellules solaires classiques à base de silicium cristallin, les cellules solaires en couches minces utilisent des couches beaucoup plus minces de matériaux semi-conducteurs, ce qui les rend plus flexibles, légères et potentiellement moins coûteuses à produire.

Il existe plusieurs types de matériaux semi-conducteurs utilisés dans les cellules solaires en couches minces, notamment le tellure de cadmium (CdTe), le sulfure de cuivre indium gallium (CIGS), l'arséniure de gallium (GaAs) et le diséléniure de cuivre indium (CIS). Chacun de ces matériaux à ses propres avantages et inconvénients en termes d'efficacité de conversion de la lumière en électricité, de stabilité à long terme, de coût et de disponibilité des matériaux.

Les cellules solaires en couches minces présentent généralement une efficacité de conversion inférieure à celle des cellules solaires en silicium cristallin, ce qui signifie qu'elles produisent moins d'électricité pour une surface donnée. De plus, certains matériaux utilisés dans les cellules solaires en couches minces peuvent être toxiques ou moins abondants, ce qui soulève des préoccupations en termes d'impact environnemental et de durabilité à long terme [13].

### a) Les avantages de la technologie de type mince

**1. Flexibilité :** Les cellules solaires en couches minces sont plus minces et plus flexibles que les cellules solaires traditionnelles, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans des applications où les cellules solaires rigides ne peuvent pas être utilisées. Par exemple, elles peuvent être intégrées dans des matériaux flexibles tels que les vêtements, les sacs à dos et les tentes.

**2. Légèreté :** Les cellules solaires en couches minces sont également plus légères que les cellules solaires traditionnelles, ce qui les rend plus faciles à transporter et à installer. Elles peuvent également être utilisées dans des applications où le poids est un facteur critique, comme les satellites.

**3. Meilleure performance à haute température et en faible éclaircissement :** Les cellules solaires en couches minces ont une meilleure performance à haute température et en faible éclaircissement que les cellules solaires traditionnelles, ce qui les rend plus adaptées aux environnements difficiles.

**4. Coûts de production plus faibles :** Les cellules solaires en couches minces peuvent être produites à des coûts de production plus faibles que les cellules solaires traditionnelles. Cela est dû au fait que les matériaux utilisés dans la production de cellules solaires en couches minces sont souvent moins coûteux que le silicium cristallin utilisé dans les cellules solaires traditionnelles.

**5. Potentiel pour des applications innovantes :** La flexibilité et la légèreté des cellules solaires en couches minces leur permettent d'être utilisées dans des applications innovantes, telles que les vitrages solaires, les revêtements de façades de bâtiments, les toits de voitures, les dispositifs portables, etc [14].

### b) Les inconvénients

- La difficulté d'obtenir des couches différentes qui adhèrent les une aux autres.
- La difficulté de parvenir à l'uniformité de l'épaisseur, La composition et la qualité à travers un substrat grand.
- Le problème des interfaces défectueuses résultant de l'inadéquation entre les mailles des matériaux [7].

## II .3. Comment faire des cellules solaires à couches minces

- **Matériau photovoltaïque :** Connue comme le principal matériau semi-conducteur responsable de la conversion de la lumière solaire en énergie, tel que CdTe, a-Si ou CIGS.
- **Couche conductrice :** IL nécessite une couche de matériau conducteur tel que l'aluminium, afin d'éviter les pertes d'électricité et d'améliorer la conductivité

- **Couche protectrice** : Lors des travaux visant à prolonger la durée de vie du module solaire, une fine couche de verre plastique de haute qualité a été ajoutée sur le dessus du système afin d'améliorer sa durabilité et de le protéger de l'environnement.

Et ici, peu importe le type de cellules solaires à couches minces que vous fabriquez, car elles sont toutes fabriquées de la même manière. Il suffit de placer le matériau photovoltaïque principal (a-Si, CdTe ou CGIS) entre une feuille de matériau conducteur et une couche de verre ou de plastique [15].

## II. 4. Technique de caractérisation des couches minces

Il existe de nombreux types de techniques d'analyse et de caractérisation des matériaux en raison de la variété des besoins de recherche qui sont menés sur le matériau. Et nous en citerons 3 types [7] :

### a) Caractérisation structurelle

Ces techniques se caractérisent par le recours à différents types d'analyses, telles que la diffraction des rayons X, qui donne la structure cristalline des matériaux, et reposent également sur différents types de microscopes, tels que la microscopie à force atomique (AFM) ou la microscopie Raman, qui permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les techniques de diffraction et la spectroscopie infrarouge.

### b) Caractérisation optique

Elle se compose de deux types :

#### b.1. La Spectroscopie visible

Cette technique fonctionne en s'appuyant sur l'interaction du rayonnement électromagnétique et de la matière dans le domaine du proche UV un très proche de l'IR, elle permet de retrouver les constantes optiques du matériau étudié avant tout (taux de transparence, coefficient d'absorption, gap optique et le coefficient d'extinction).

#### b.2. L'ellipsométrie

La mesure d'épaisseurs et d'indices de couches minces est appelée mesure d'ellipse. Il en existe plusieurs types basés sur le même principe de fonctionnement, mais le plus utilisé d'entre eux est :

- Ellipso mètre à extinction
- Ellipso mètre à modulation de phase
- Ellipso mètre à élément tournât.

### c) Caractérisation électrique

Ça devrait être noté les caractéristiques courant-tension  $I(V)$ , Capacité-tension  $C(V)$  pour la détermination de la densité d'imparités, la méthode des quatre points (mesure de la résistance), l'effet de hall pour mesurer la mobilité des porteurs de charge.

## II. 5. Dépôts des couches minces

Le dépôt des couches minces peut être composé de deux types : dépôt en phase vapeur physique (PVD) et dépôt en phase vapeur chimique (CVD).

### II. 5. 1. Méthodes physiques

#### a) Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Les dépôts physiques en phase vapeur (PVD) présentent beaucoup d'avantages par rapport au dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Par exemple, les films obtenus par PVD sont denses et leur processus de dépôt est facile à contrôler [16]. Ils ne provoquent pas de pollution atmosphérique comme les techniques CVD.

La technique PVD consiste simplement à évaporer ou à sublimer le matériau à déposer. Ce dernier étant dans un creuset sous vide est chauffé à haute température à l'aide d'un filament ou avec un faisceau d'électrons intense et énergétique ou bien en utilisant un laser. Une fois évaporé, le matériau se dépose par condensation sur le substrat formant ainsi la couche mince recherchée.

#### b) Pulvérisation

La pulvérisation est l'éjection d'atomes de la surface d'un matériau solide appelé la cible, soumis à un bombardement des particules énergétique. L'énergie des ions incidents communique leur énergie aux atomes de la surface du matériau bombardé par transformation de quantité de mouvement [7].

#### c) Ablation laser (PLD: Pulsed Laser Deposition)

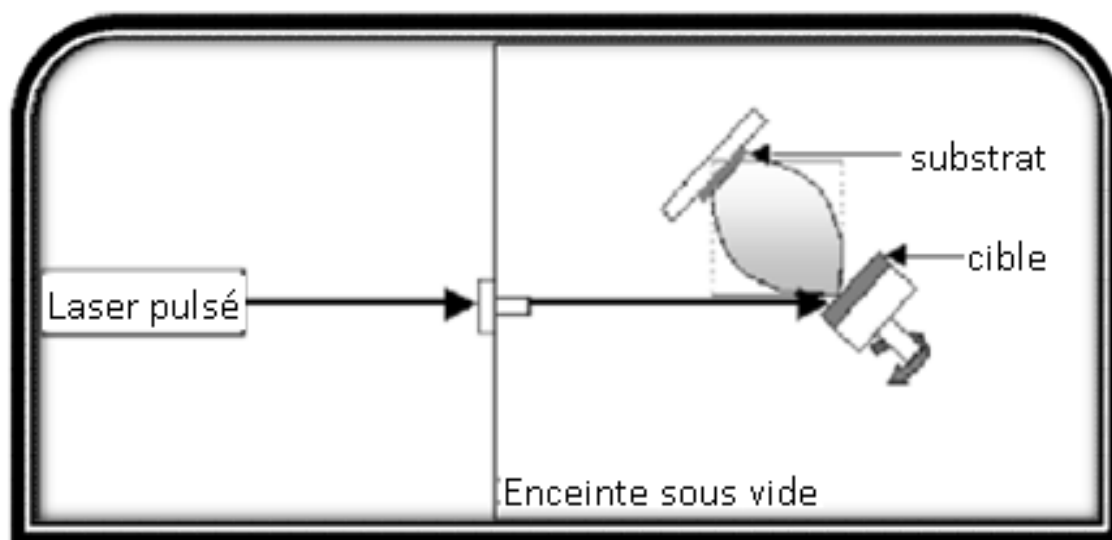
##### c.1. Ablation laser directe

Cette technique consiste à bombarder une cible solide (constituée du matériau à déposer) par des impulsions lumineuses intenses générées par un laser, généralement dans le domaine de l'ultraviolet.

Un faisceau laser impulsionnel est focalisé sur une cible massive, placée dans une enceinte ultravide. Dans certaines conditions d'interaction, une quantité de matière est éjectée de la cible, et peut être collectée sur un substrat placé en face de la cible (figure II.1).



La nature et la qualité du dépôt dépendent de nombreux paramètres (énergie du laser, nature et pression du gaz résiduel dans l'enceinte, température du substrat, etc.). Dans tous les cas, il est nécessaire de contrôler le transport des espèces de la cible jusqu'au substrat [17].



**Figure II.1:** Dispositif expérimental d'ablation laser

### c.2. Le dépôt par ablation laser réactive

La technique de dépôt en couches minces par ablation laser réactive consiste à vaporiser une cible d'un matériau donné, en présence d'un gaz réactif avec un faisceau laser à impulsion de forte intensité. Le plasma laser qui se forme au-dessus de la cible est susceptible de réagir directement avec le milieu ambiant pour former des molécules et des espèces que l'on peut collecter sur un substrat adéquat. Le dépôt obtenu aura une composition différente de celle de la cible d'origine, qui dépendra principalement de la nature du gaz réactif susceptible de réagir avec les espèces ablatées [16].

### d) Epitaxie par jet moléculaire (MBE)

L'épitaxie par jets moléculaires (ou MBE pour Molecular Beam Epitaxy) est une technique qui consiste à envoyer des molécules à la surface d'un substrat dans un vide très poussé afin d'éviter tout choc ou contamination sur le parcours. Elle permet de faire croître des échantillons nanostructurés de plusieurs  $cm^2$  à une vitesse d'environ 1nm par minute.

Le principe consiste à évaporer une source sous vide (cellule de Knudsen) par chauffage (Figure II.2). Les sources d'évaporation peuvent être de nature et de dopage différents ; pour chaque élément à évaporer, il faut adapter la puissance de chauffage des cellules.

Par le contrôle des cellules d'évaporation, on crée un jet de molécules en direction du substrat ; on peut ainsi réaliser couche par couche des structures très complexes telles que les super réseaux,

les diodes laser et les transistors à forte mobilité d'électron (HEMT). On obtient ainsi une très grande précision de croissance et des jonctions très abruptes.

L'inconvénient de cette opération est qu'elle est très lente et ne concerne qu'un seul substrat à la fois. Cette technique est donc très coûteuse et ne concerne que des dispositifs à très forte valeur ajoutée.

Ce système ultravide,  $10^{-10}$  Torr, permet tous les contrôles et les caractérisations *in situ* dont les principes nécessitent un vide poussé : diffraction d'électrons, spectroscopie Auger, ESCA (XPS ou UPS), diffraction des rayons X, etc... On peut ainsi, en permanence, vérifier la cristallinité du cristal en cours de croissance [17].

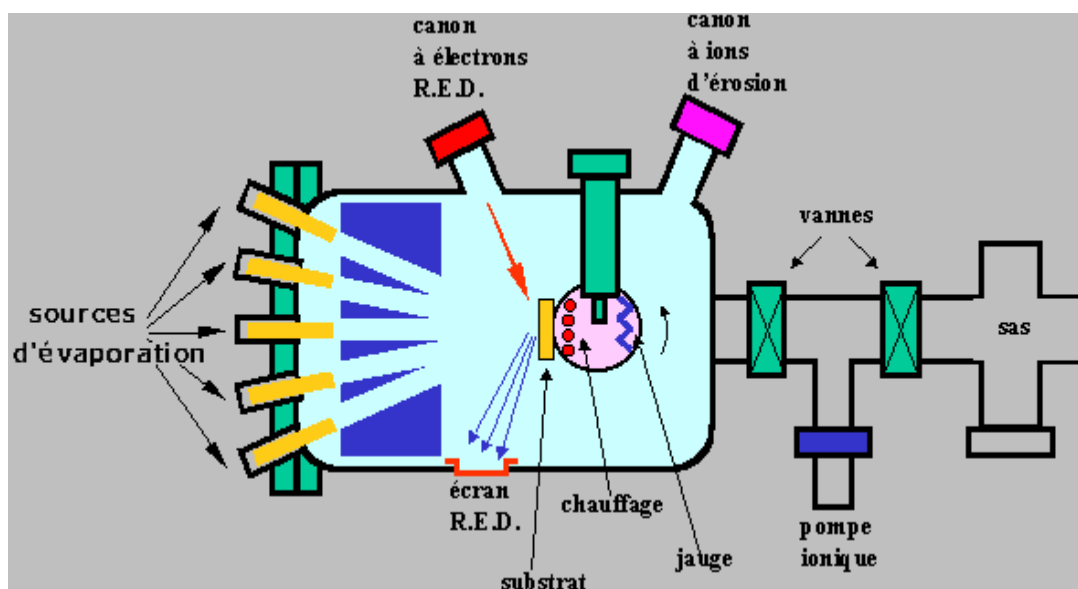


Figure II.2: Bâti d'épitaxie par jet moléculaire

### e) Vaporisation

On peut dire que cette méthode consiste en une évaporation ou sublimation sous vide des atomes de la substance qui se sont évaporés et condensés sur le substrat. Conditions expérimentales de vaporisation (vide, nature, forme du creuset, distance du creuset, substrat, etc.). Nous citons aussi les différentes techniques de l'évaporation mais les plus utilisées :

- Vaporisation résistive.
- Vaporisation par bombardement électrique.
- Vaporisation réactive [7].

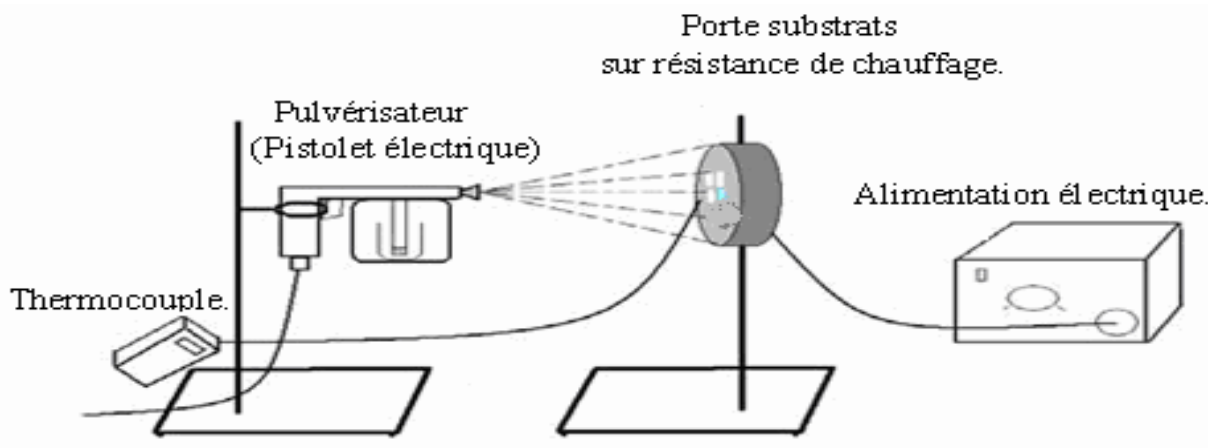
## II. 5. 2. Méthodes chimiques

### II.5.2.1. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

La technique de dépôt chimique en phase vapeur, ou “Chemical Vapor Déposition” (CVD), consiste à provoquer des réactions chimiques entre plusieurs gaz ou vapeurs pour former un dépôt solide sur un substrat chauffé. Elle s'effectue en général dans un four dans lequel on introduit les espèces réactants. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduit dans une enceinte ou sont placés les substrats chauffés. Cette réaction chimique nécessite un apport de chaleur du substrat, réalisé soit par effet joule, induction, radiation thermique ou laser [16].

### II.5.2.2. Spray pyrolyse

Une solution contenant les différents constituants du matériau à déposer est pulvérisée, en fines gouttes, soit par un système pneumatique classique ou par un atomiseur utilisant un générateur à ultrasons. Ces systèmes permettent de transformer la solution en un jet de gouttelettes très fines de quelques dizaines de  $\mu m$  de diamètre. Le jet arrive sur la surface des substrats chauffés, à une température suffisante pour permettre la décomposition des produits dissouts dans la solution et activer les réactions susceptibles de produire le matériau désiré. A ces températures, certains produits des réactions seront immédiatement éliminés (des éléments volatils), il ne reste donc que le composé à déposer sur le substrat (figure II.3 et II.4) [18].



**Figure II.3:** Dépôt par Spray-Pyrolyse : Pulvérisation par un système pneumatique classique

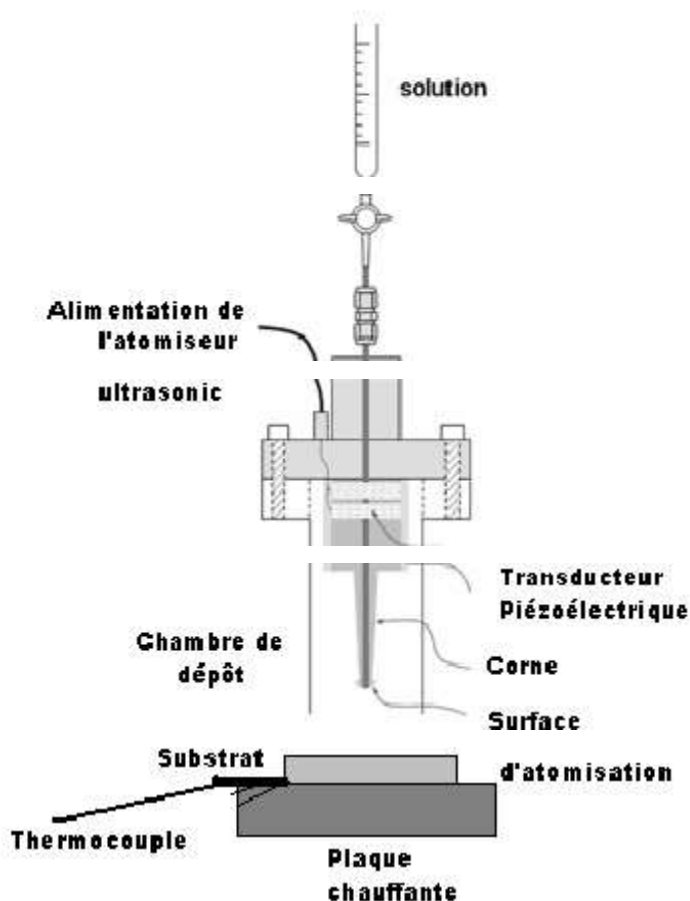


Figure II.4: Dépôt par spray-pyrolyse avec atomiseur ultrasonique

### II.5.2.3. Méthode colloïdale

Dans cette technique, le dépôt est réalisé à partir d'une solution colloïdale préalablement élaborée.

L'état colloïdal, ou solution colloïdale, est un état de la matière demi liquide. Il s'agit d'une dispersion de matière dans un liquide (solvant), structuré en granules nommées micelles (agrégat de molécules en solution colloïdale) de diamètre variant généralement entre 2 et 200 nm.

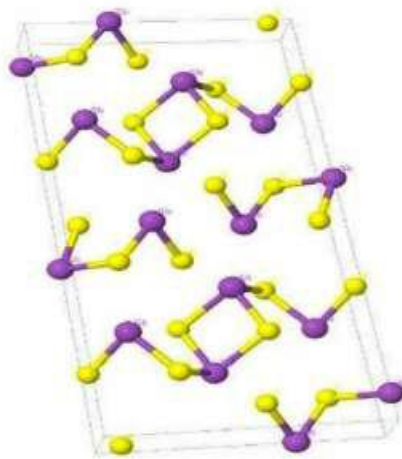
L'obtention d'une telle solution est régit par un phénomène de solvatation, ce dernier consiste à détruire les liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du matériau à dissoudre et les remplacent par de nouveaux liens avec ses propres molécules et conduit à une nouvelle structure. En d'autres termes, la solvatation est une proche association entre les molécules du solvant et la molécule ou les ions du soluté. La stabilité d'une solution colloïdale résulte de l'équilibre entre les interactions attractives et les interactions répulsives qui s'exercent sur les particules. Ces interactions dépendent notamment de la température et du pH de cette dernière [16].

## II. 6. Couches minces en $(Se_{1-x}S_x)_3$

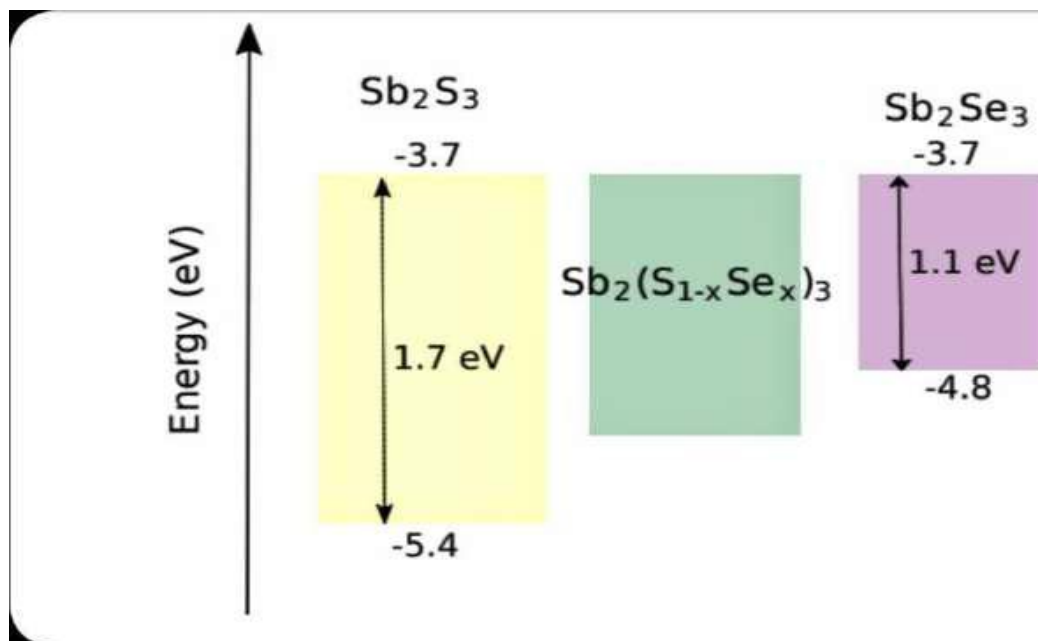
Il arrive qu'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces à base de  $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$  soit constituée d'un substrat (verre ou Plexiglas), d'une couche de contact en FTO, d'une couche fenêtre en ZnO, d'une couche diélectrique en CdS, et d'un absorbeur couche de  $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$  possédant une énergie de gap ( $E_g$ ) de 1 à 1.7 volts [15]. Des couches minces de  $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$  sont déposées par différentes couches d'isolants électroniques. Cette méthode est obtenue par évaporation thermique d'une poudre mixte, et d'autre part, la couche tampon CdS est synthétisée comme une couche tampon électronique qui étudie systématiquement l'évolution du rendement par renforcement soufré de l'alliage  $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$  film.

## II. 7. Propriétés physique des couches minces en $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$

Les éléments  $Sb_2S_3$  et  $Sb_2Se_3$  sont isomorphisme et elles ont la même structure orthorhombique cristalline (Figure II.5). L'atome S est remplacé par l'atome Se pour créer  $Sb_2 (Se_{1-x}S_x)_3$ . Une caractéristique très importante de la couche  $Sb_2 (S_{1-x}Se_x)_3$  est le gap qui peuvent être variée à partir du rapport  $Se/(S+Se)$ , où le gap de  $Sb_2S_3$  et  $Sb_2Se_3$  sont environ de 1.7 et 1.1 eV respectivement (Figure II.6) [7].



**Figure II.5:** Structure cristalline orthorhombique d'élément  $Sb_2S(Se)_3$  les sphères jaunes représentent les atomes S(Se), les sphères blanches représentent les atomes Sb



**Figure II.6:** Structure schématique d'une couche absorbeur en  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

## II. 8. Technologies des cellules solaires à couches minces en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

La synthèse des composés  $Sb_2S_3$  et  $Sb_2Se_3$  pour les cellules solaires PVs ont été signalés employant principalement les techniques : dépôt chimique en bain (CBD), thermique et évaporation thermique rapide revêtement par rotation, dépôt vapeur de transport, et dépôt de pulvérisation magnétron.

Les premières méthodes utilisées pour produire  $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$  ont été développées et démontrées par Deng et al. Ainsi, pour la première fois, ils ont fabriqué des nanotubes de  $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$  en utilisant une technique de synthèse colloïdale, et ont également découvert une relation quadratique entre la bande interdite et le rapport de composition soufre/sélénium.

Cette méthode modifie la concentration des atomes S de  $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$ . Ce changement entraîne une augmentation de l'écart de sorte que la nouvelle expression de  $E_g(Y)$

$$E_g(Y) = 0.0344 Y^2 + 0.0481 Y + 1.18 \text{ eV} \quad (\text{II. 1})$$

Une autre façon d'obtenir une efficacité de phage incrémentale élevée de  $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$  est à partir du dépôt séquentiel de  $TiO_2$ , considérant que la meilleure cellule produite par ce groupe peut atteindre une efficacité de conversion de 6.6 %.

La préparation de cellules solaires planaires à hétérojonction à base de  $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$  a également été rapportée par Zhang et al [19].

## II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les couches minces et en quoi consiste la cellule solaire, et Nous avons conjuré les différentes techniques de dépôt de couches minces et nous avons présenté le matériau  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  constituant essentiel de la cellule photovoltaïque que nous allons étudier.

---

***Chapitre III : Simulation d'une  
cellule solaire photovoltaïque à  
base de  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$***

---



### III.1. Introduction

La programmation et la modélisation des dispositifs photovoltaïques (PV) sont essentielles pour améliorer la productivité de ces cellules photovoltaïques ainsi que pour réduire le coût de fabrication. Ces modèles permettent de mieux comprendre l'influence de différents paramètres.

Concernant les performances de ces cellules, avec la possibilité de concevoir et d'optimiser différents types de cellules sans recourir systématiquement à des procédures expérimentales qui peuvent être coûteuses, évaluer le potentiel de la structure et son rendement théorique maximal. Il existe également de nombreux simulateurs PV aujourd'hui, qui sont gratuits ou sous licence [7].

Dans ce chapitre, nous livrons les équations de base du modèle utilisé par le programme SCAPS. Ensuite nous décrivons la méthode de simulation par ce logiciel. Nous étudions ensuite l'effet de l'épaisseur  $d$ , de la composition  $Y$  et de la densité d'atomes dopants  $\text{Na}$  de la couche absorbeur  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  sur la densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), facteur de forme (FF) et efficacité de conversion ( $\eta$ ) de la cellule Solaire photovoltaïque. Cela nous a permis de déduire des valeurs optimales qui donnent les meilleures performances de la cellule.

### III. 2. Equations fondamentales dans les semiconducteurs

Les équations fondamentales dans les semi-conducteurs sont un ensemble d'équations mathématiques utilisées pour décrire le comportement électrique et optique des semi-conducteurs. Ces équations sont dérivées à partir des principes de base de la physique quantique et des lois de conservation de la charge électrique.

Les équations fondamentales varient en fonction du contexte spécifique de l'étude des semi-conducteurs, mais voici quelques-unes des équations les plus couramment utilisées :

#### III. 2. 1. Equations de continuité

L'équation de continuité est une équation fondamentale utilisée dans l'étude des semi-conducteurs pour décrire la conservation de la charge pour les porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Elle exprime comment les variations de densité de porteurs de charge sont liées aux courants d'entrée et de sortie, en prenant en compte les processus de génération et de recombinaison.

L'équation de continuité pour les électrons s'exprime généralement comme suit [20] :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{d\Delta n(t)}{dt} = Gn - Rn + \frac{1}{q} \text{div}(j^{\rightarrow}n) \quad (\text{III. 1})$$

Où :  $q$  est la valeur absolue de la charge électronique élémentaire.

Cette équation indique que la variation de la densité d'électrons dans le temps est égale à la divergence du courant électronique, augmentée par le taux de génération d'électrons et diminuée par le taux de recombinaison d'électrons.

L'équation de continuité pour les trous suit une forme similaire :

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{d\Delta p(t)}{dt} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \text{div}(j^{\rightarrow} p) \quad (\text{III. 2})$$

Où  $p$  représente la densité de trous,  $J_p$  est le courant de trous,  $G_p$  est le taux de génération de trous et  $R_p$  est le taux de recombinaison de trous.

Ces équations de continuité permettent de modéliser et de comprendre le comportement des porteurs de charge dans les semi-conducteurs, en tenant compte des processus de génération et de recombinaison qui influencent leur densité. Elles sont utilisées dans la conception et l'analyse des dispositifs électroniques à semi-conducteurs pour prédire leur comportement en fonction des conditions environnantes et des propriétés du matériau.

### III. 2. 2. Équation de poisson

L'équation de Poisson est une équation fondamentale utilisée dans l'étude des semi-conducteurs pour décrire la relation entre le champ électrique et la distribution de charge électrique dans un matériau. Elle tire son nom du mathématicien français Siméon Denis Poisson, qui a formulé cette équation.

L'équation de Poisson s'exprime généralement comme suit [21] :

$$(\epsilon \nabla \psi) = -\rho_v(r) \quad (\text{III. 3})$$

Où :  $\psi$  est le potentiel électrostatique,  $\epsilon$  est la permittivité locale du milieu,  $r$  est le vecteur position et  $\rho_v$  est la densité volumique de charge.

### III. 2. 3. Équations de transport

Les équations de transport des porteurs les plus couramment utilisées dans l'étude des semi-conducteurs sont les équations de diffusion-drift, qui combinent les effets de la diffusion et du déplacement des porteurs de charge. Voici les équations générales pour les porteurs de charge [22] :

Pour les électrons :

$$\partial n / \partial t + \nabla J_n = G - R \quad (\text{III. 4})$$

Pour les trous :

$$\partial p / \partial t - \nabla J_p = G - R \quad (\text{III. 5})$$

Dans ces équations :

$\partial n/\partial t$  et  $\partial p/\partial t$  sont les variations de la densité d'électrons ( $n$ ) et de trous ( $p$ ) par rapport au temps.

$\nabla J_n$  et  $\nabla J_p$  représentent la divergence du courant de dérive-diffusion des électrons ( $J_n$ ) et des trous ( $J_p$ ),

$G$  et  $R$  correspondent respectivement aux taux de génération et de recombinaison des porteurs de charge.

Le terme de courant de dérive-diffusion dans ces équations est généralement exprimé comme la somme de deux termes :

$$J_n = q\mu_n (E + \nabla\phi) + qD_n\nabla n \quad (\text{III. 6})$$

$$J_p = -q\mu_p (E + \nabla\phi) - qD_p\nabla p \quad (\text{III. 7})$$

$\nabla n$  et  $\nabla p$  représentent les gradients spatiaux de la densité d'électrons et de trous.

Ces équations de transport des porteurs permettent de modéliser et de comprendre le mouvement des porteurs de charge dans les semi-conducteurs, en prenant en compte à la fois les effets de la dérive sous l'influence du champ électrique et les effets de diffusion dus aux gradients de concentration. Elles sont essentielles pour la conception et l'analyse des dispositifs à semi-conducteurs tels que les transistors, les diodes et les cellules solaires.

### III. 3. Présentation du logiciel utilisée

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un programme unidimensionnel de simulation des cellules solaires développé au département d'électronique et de systèmes d'information (ELIS) de l'université de Gent, en Belgique.

Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement [23] :

Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Stefaan Degraeve, Johan Verschraegen.

Le programme était à l'origine développé pour les structures des cellules de la famille  $CuInSe_2$  et  $CdTe$ . Les développements récents rendent le programme désormais également applicable aux cellules solaires cristallines (famille  $Si$  et  $GaAs$ ) et aux cellules amorphes ( $a-Si$  et  $Si$  micromorphe)

La version la plus récente, SCAPS 3.8, mai 2020, comprend :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être gradués (c'est-à-dire en fonction de la composition locale ou de la profondeur dans la cellule) :  $E_x$ ,  $\chi$  ;  $\epsilon$  ;  $N_C$ ,  $N_V$ ,  $v_{thn}$ ,  $v_{thp}$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $N_A$ ,  $N_D$ , tous les pièges (défauts)  $NT$ .

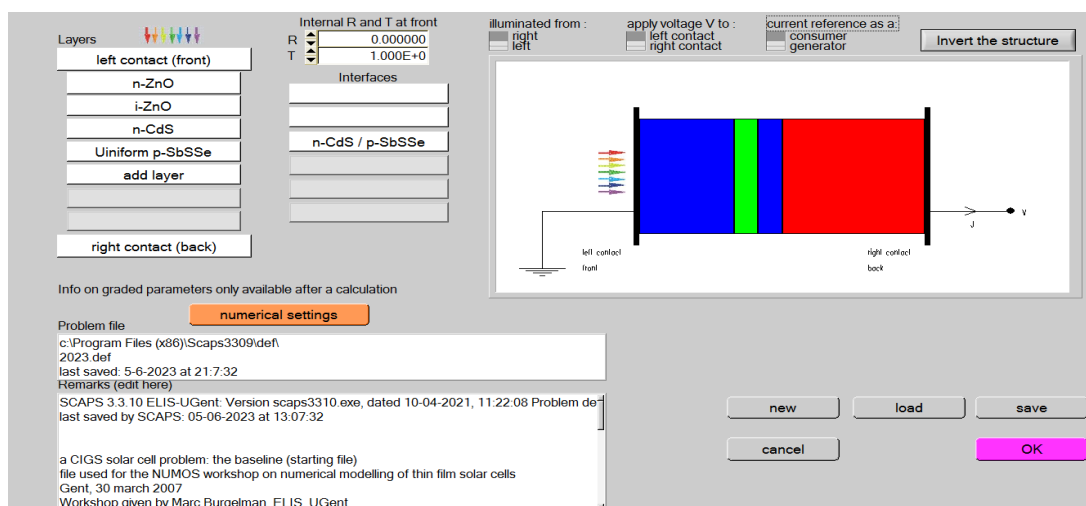
- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (directe), Auger, type SRH.
- Niveaux de défauts : en masse ou à l'interface ; leur état de charge et leur recombinaison sont pris en compte.
- Niveaux de défauts, type de charge : aucune charge (idéalisations), monovalent (donneur unique, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Niveaux de défauts, distributions énergétiques : niveau unique, uniforme, Gauss, queue ou combinaisons.
- Niveaux de défauts, propriété optique : excitation directe avec la lumière possible (effet photovoltaïque des impuretés, IPV).
- Défauts métastables : transitions entre les configurations accepteur et donneur pour les défauts métastables connus en CIGS : le défaut V\_Se et le défaut In\_Cu ; également mis en œuvre des transitions méta-stables personnalisées.
- Contacts : fonction travail ou bande plate ; filtre de propriété optique (réflexion du filtre de transmission).
- Effet tunnel : effet tunnel intra-bande (dans une bande de conduction ou dans une bande de valence) ; Tunnellisation vers et depuis les états d'interface.
- Génération : soit à partir d'un calcul interne, soit à partir d'un fichier G(x) fourni par l'utilisateur.
- Éclairage : une variété de spectres standards et autres inclus (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5Gédition2, monochromatique, blanc, ...).
- Éclairage : du côté p ou du côté n ; coupure et atténuation du spectre.
- Point de travail pour les calculs : tension, fréquence, température.
- Le programme calcule les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de travail donné, les caractéristiques J-V, les caractéristiques AC (C et G en fonction de V et/ou f), la réponse spectrale (également avec lumière ou tension de polarisation).
- Calculs par lots possibles ; présentation des résultats et réglages en fonction des paramètres du lot.
- Chargement et sauvegarde de tous les paramètres ; démarrage de SCAPS dans une configuration personnalisée ; un langage de script incluant une fonction utilisateur libre.
- Interface utilisateur très intuitive.

- Une fonction de langage de script pour exécuter SCAPS à partir d'un "fichier de script" ; toutes les variables internes sont accessibles et tracées via le script.
- Une fonction d'ajustement de courbe intégrée.
- Un panneau pour l'interprétation des mesures d'admittance.
- Le classement de tous les paramètres peut être défini à partir du fichier ; des "lois de classement" plus analytiques mises en œuvre.
- Nouveaux modèles analytiques pour le spectre, la génération et le coefficient d'absorption optique.
- Support de script pour la simulation de cellules tandem.

### III. 4. Modèle de simulation

Nous étudions la structure suivante de la cellule solaire  $\text{SbSSe}$  :

SLG/Mo/p-SbSSe/n-CdS/i-ZnO/n-ZnO/Al Comme le montre la figure III.1 qui montre les couches de matériaux suivantes :  $0.3\mu\text{m}$   $\text{SbSSe}$ , 50 nm n-CdS, 50 nm i-ZnO et 200 nm n-ZnO et Mo sur substrat de verre. Tel que, le verre soda calcique (SLG) est considéré comme un substrat, le molybdène (Mo) sur SLG comme contact arrière, le film  $\text{SbSSe}$  comme couche absorbeur de type p, le sulfure de cadmium (CdS) comme couche tampon de type n, Al ZnO dopé (ZnO : Al) en tant que couche d'oxyde conducteur transparent, et enfin Al en tant que couche de métal de contact avant, respectivement.



**Figure III.1:** Structure de la cellule à base de  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$

En utilisant le logiciel SCAPS, nous nous concentrerons sur l'optimisation de l'épaisseur  $d$ , de la composition  $Y$  et de la densité d'atomes dopants  $\text{Na}$  de la couche absorbeur  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$ .

Cela nous a permis de déduire les valeurs optimales qui donnent les meilleures performances.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs des paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation sont indiquées :

Matériau	p- $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$		n-CdS	n-ZnO	i-ZnO
	Pur A(y=0)	Pur B(y=1)			
Semiconducteur Propriété P du matériau pur					
Épaisseur de la couche ( $\mu m$ )	0.3	0.3	0.05	0.2	0.05
Affinité électronique $\chi$ (eV)	4.15	3.7	4.2	4.45	4.45
Permittivité relative, $\epsilon_r$	15.1	22	10	9	9
Densité effective des états dans la bande de conduction, $N_C$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{19}$	$2 \times 10^{19}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$
Densité effective des états dans la bande de valence, $N_V$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{19}$	$10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$
Vitesse thermique des électrons, (cm/s)	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$
Vitesse thermique des trous, (cm/s)	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$
Mobilité des électrons $\mu_n$ (cm/V.s)	15	9.8	$10^2$	$10^2$	$10^2$
Mobilité des trous $\mu_p$ (cm/V.s)	42	10	25	25	25
Concentration des atomes donneurs, $N_d$ ( $cm^{-3}$ )	0		$10^{18}$	$10^{20}$	$10^{18}$
Concentration des atomes accepteurs, $N_a$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{16}$		0	0	$10^{18}$
Energie du gap, $E_g$ (eV)	1.18	1.634	2.4	3.3	3.3

**Tableau III.1 :** Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation

### III. 5. Résultats et discussion

Afin d'obtenir un profil de configuration Y uniforme de la couche absorbeur, une simulation de cellule  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  se produit.

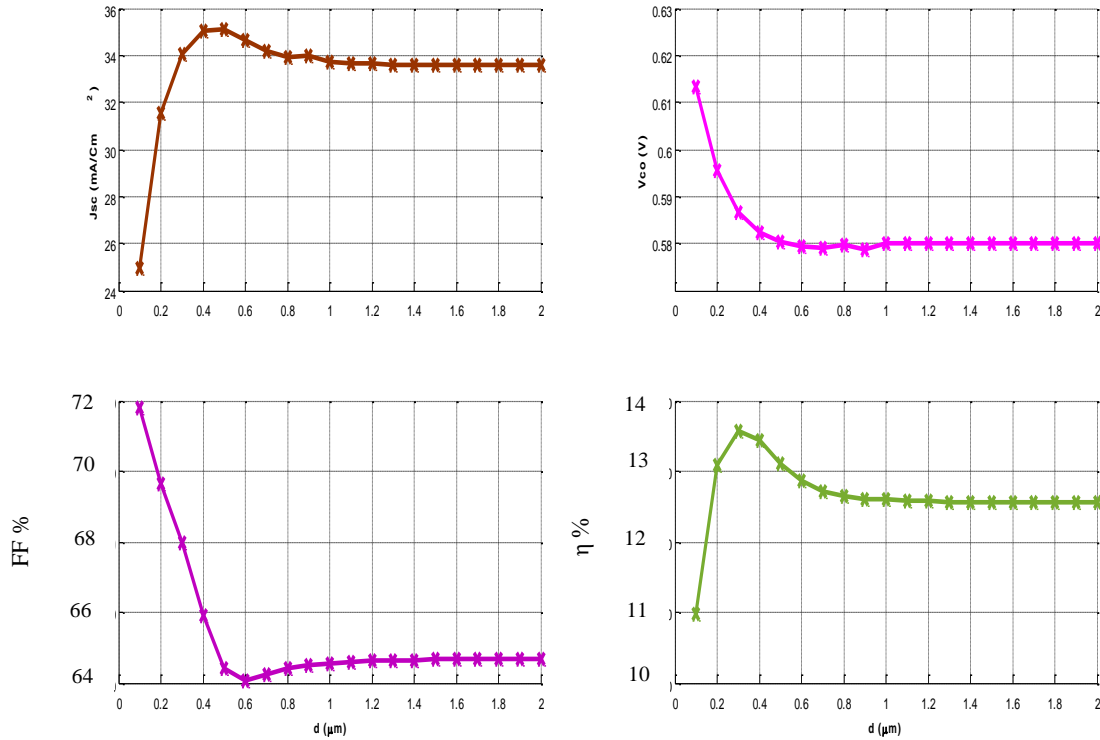
Tel que :

$$Y = X = \frac{[S]}{[S]+[Se]} ; 0 \leq Y = X \leq 1$$

### III. 5. 1. Effet de l'épaisseur d

La figure III.2 ci-dessous montrent la variation des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur  $d$  de la couche absorbant en  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  de type P pour :

$$Y=0 \rightarrow E_g = 1.18 \text{ eV} \text{ et } N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$



**Figure III.2:** Effet de l'épaisseur de la couche  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  sur les performances de la cellule PV

D'après la Fig. III.2, il apparaît que lorsque l'épaisseur  $d$  de l'absorbant augmente, l'absorption des photons et par la suite la génération de porteurs de charge augmente. Cela augmente le courant. Mais la tension et le facteur de forme sont diminués. Ainsi la valeur optimale de l'épaisseur est de  $0.3 \mu\text{m}$  qui nous donne un rendement maximum de  $13.58 \%$ .

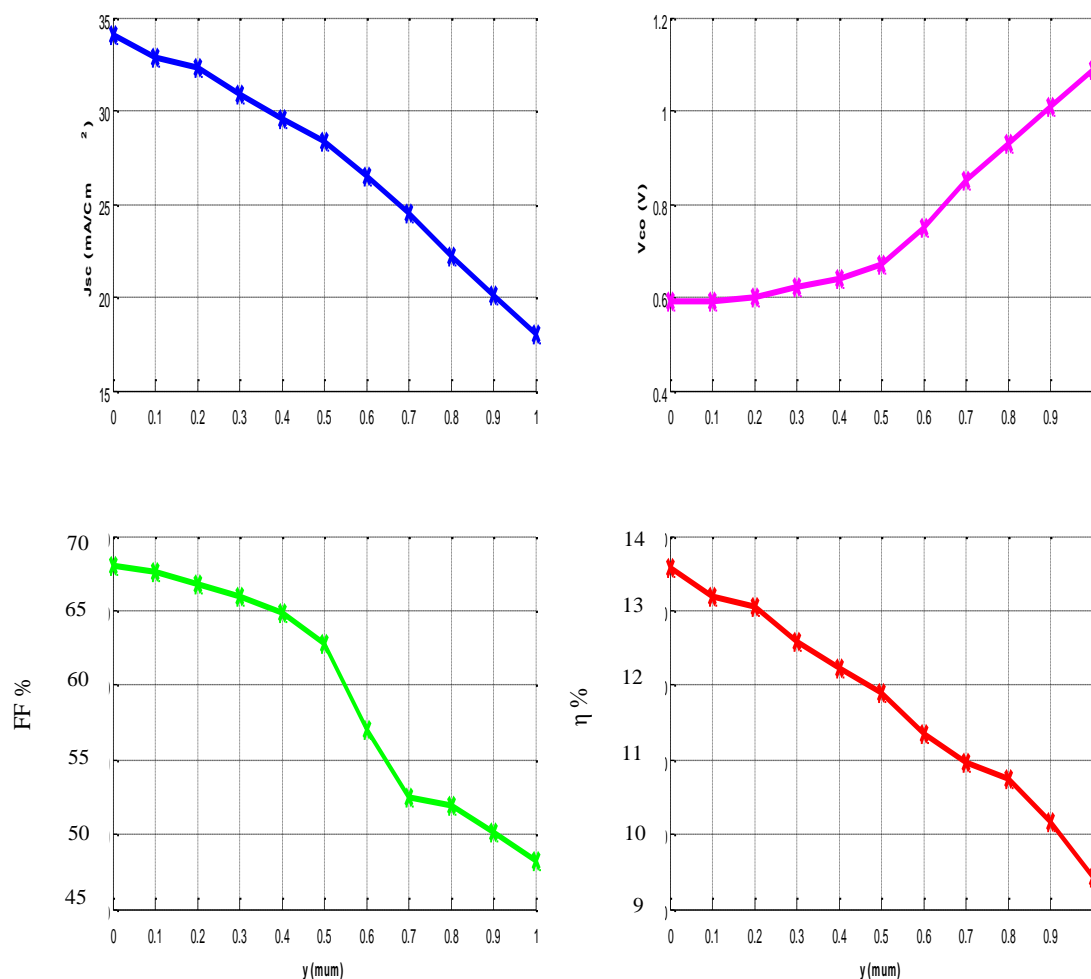
### III. 5. 2. Effet de la composition Y (gap $E_g$ )

La figure III.3 ci-dessous illustre la variation des performances de la cellule en fonction de la composition Y de la couche absorbant en  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  de type P pour :

$$d = 0.3 \mu\text{m} \text{ et } N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

La largeur de la bande interdite  $E_g$  dépend de Y par une équation quadratique donnée par :

$$E_g(Y) = 0.3096 Y^2 + 0.1443 Y + 1.18 \text{ (eV)} \quad (\text{III. 8})$$



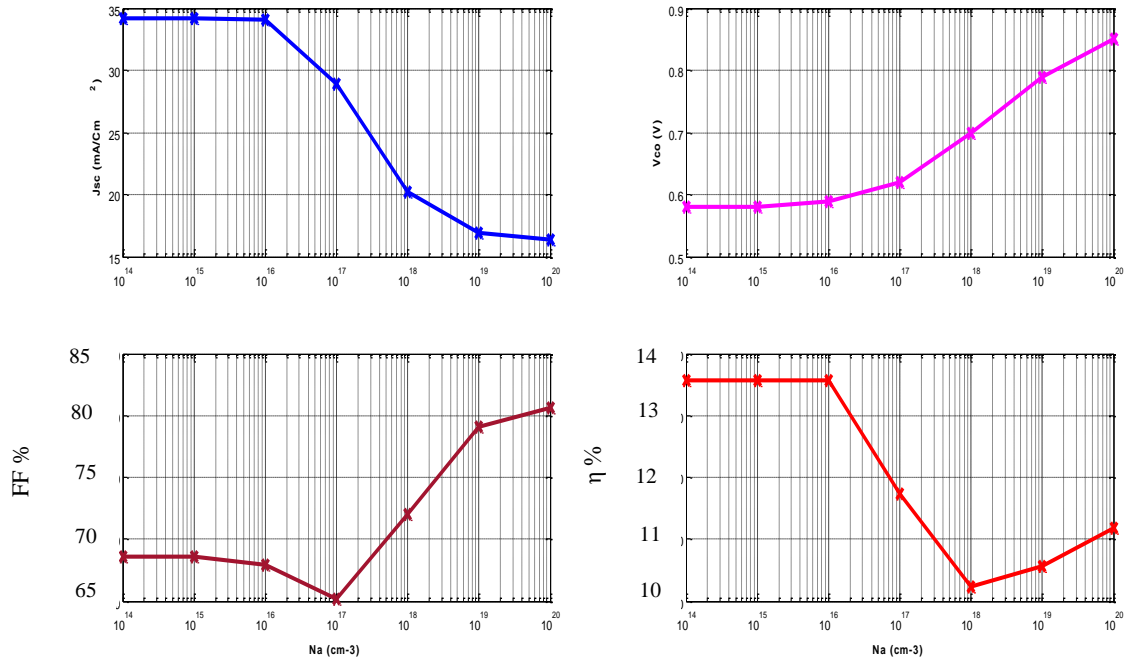
**Figure III.3 :** Effet de la composition Y de la couche  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  sur les Performances de la cellule PV

Comme la montre la Fig. III.3, on remarque que si Y augmente,  $E_g$  augmente également. D'où, le nombre de porteurs photogénérés diminue et par conséquent le courant diminue. Cependant la tension de circuit ouvert augmente. Ce qui se traduit par la valeur optimale de configuration  $Y = 0$  qui correspond à un gap optimal  $E_g = 1.18$  eV. Ce qui correspond à un rendement maximum de  $\eta = 13.58$  %.

### III. 5. 3. Effet de la concentration des atomes de dopage $Na$

La figure III.4 nous montre la variation des performances des cellules en fonction du dopage  $Na$  de la couche absorbeur en  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  de type P Pour :  $d = 0.3$  μm,  $Y = 0$ .





**Figure III.4 :** Effet du dopage Na de la couche  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  sur les performances de la cellule PV

Comme le montre la figure III.4, les performances de la cellule sont proches de la stabilité tant que le dopage Na est inférieur à  $10^{16} cm^{-3}$ . Cependant, s'il dépasse cette valeur, il subira à une baisse des performances. Par conséquent, la valeur optimale du dopage Na ne doit pas dépasser  $10^{16} cm^{-3}$ .

Le rendement correspondant est  $\eta = 13.58 \%$ .

### III. 6. Conclusion

Afin de concevoir une structure optimale de la couche d'absorbeur  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ , dans ce chapitre, nous avons étudié à l'aide du logiciel de simulation SCAPS, l'influence des paramètres physiques et géométriques de cette couche sur les performances de la cellule. Grâce à cela nous avons obtenu les valeurs et résultats suivants :

$d = 0.3 \mu m$  ,  $Y = 0 \rightarrow E_g = 1.18 eV$  ,  $Na = 10^{16} cm^{-3}$  ,  $\eta = 13.58 \%$ .

---

*Conclusion*  
*Générale*

---

## Conclusion générale

Dans ce travail nous avons optimisé par simulation quelques paramètres de la couche absorbeur  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  d'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces ayant la structure suivante :  $\text{ZnO}(\text{n}) / \text{ZnO}(\text{i}) / \text{CdS}(\text{n}) / \text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3(\text{p})$ . Ces paramètres sont l'épaisseur  $d$ , la composition  $Y$  et la densité des atomes dopants  $N_a$ . Cette simulation est réalisée à l'aide du logiciel SCAPS.

Cette simulation nous amène à obtenir les résultats suivants, qui montrent que :

- ❖ Le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  jusqu'à où il atteint une valeur optimale  $d_{\text{opt}} = 0.3 \mu\text{m}$  à partir de laquelle l'accroissement du rendement devient négligeable.
- ❖ Le meilleur rendement est obtenu à pour une valeur optimale de la composition la couche absorbeur  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  la plus basse  $Y=0$ . Ce qui correspond au gap le plus bas  $E_g = 1.18 \text{ eV}$ .
- ❖ La valeur du dopage  $N_a$  de la couche absorbeur  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  ne doit pas dépasser  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Toutes ces valeurs optimales mentionnées précédemment donnent un rendement maximal  $\eta = 13.58 \%$ .

Tous ces résultats d'optimisation donnent des indications utiles pour un processus de fabrication réalisable.

---

# ***REFERENCES***

---

## REFERENCES

- [1] Green, M. A. (2009). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer Science & Business Media.
- [2] Hoffmann, W., & Bockholt, U. (2017). *60 Years of Photovoltaics at Fraunhofer ISE: Solar Cells and Beyond*. Fraunhofer Verlag.
- [3] Naïma TOUAFEK, << Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  >> THESE Doctorat, 2015.
- [4] "Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties" de Peter Y. Yu ET Manuel Cardona (2010)
- [5] *Semiconductor Physics and Devices*" de Donald A. Neamen
- [6] Solar Energy Industries Association: <https://www.seia.org/initiatives/about-solar-energy>
- [7] Benchellouia Mohammed Fethi ET Belmadani Maaradj, «Simulation d'une cellule Solaire photovoltaïque en couches minces à base de  $\text{Sb}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$  avec un profil graduel » Université de Ouargla 2020.
- [8] Dahmane Abderrahmane, <<Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si :H(n)/c-Si(p)>> Mémoire MASTER ACADEMIQUE, 2016.
- [9] M. Zazoui, J.C. Bourgoin, D. Stievenard, D. Deresmes and G. Strobl," Recombination Centers in electron-irradiated Czochralski silicon solar cells", J. Appl. Phys, Vol. 76 (1994)
- [10] G. Gourdin. "Solar cell technology (current state of the art)", 2007.
- [11] M. A. Green. "3rd generation PV solar cells for 2020 and beyond", vol 14, 2010.
- [12] T. Key, "Solar photovoltaics: Expanding electric generation options", 2008.
- [13] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E.D. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*,27(1),3-12.
- [14] "Thin Film Solar Cells: Advances and Future Challenges" par S. S. Islam et al., publié dans *Renewable and Sustainable Energy Reviews* en 2020.
- [15] GUERROUT Nouredine ET GOUAREH Abdelhamid, « Simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de  $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$  » Université de Ouargla 2021.
- [16] Benelmadjat Hannane, "élaboration et caractérisation des composites dopés par des agrégats nanométriques de semi-conducteurs", thèse magister, Constantine (2007).
- [17] CHELOUCHE Salim, << Propriétés des fenêtres optiques  $\text{ZnO} : \text{Al}$  pour cellules solaires en couches minces à base de CIGS>> Mémoire de magister, Université de SETIF (2012).
- [18] couches minces. <http://www.univ-oeb.dz/supports> de cours/Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la vie/Département des Sciences de la matière.

[19] LASLADJ Meriem, “Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération Pour des applications spatiales”, Mémoire de Magister en Electronique, Université FERHAT Abbas de Setif-1, (Algérie), 2014.

[20] "Semiconductor Device Fundamentals" by Robert F. Pierret - Ce livre est une référence classique dans le domaine des semi-conducteurs. Il couvre en détail les principes de base des semi-conducteurs, y compris les équations fondamentales comme l'équation de continuité, et leur utilisation dans la modélisation des dispositifs.

[21] "Semiconductor Device Fundamentals" by Robert F. Pierret - Ce livre couvre en détail les principes des dispositifs à semi-conducteurs, y compris l'équation de Poisson. Il explique comment cette équation est utilisée pour modéliser le comportement électrique des semi-conducteurs et les propriétés des dispositifs.

[22] "Semiconductor Device Fundamentals" by Robert F. Pierret - Ce livre couvre en détail les principes des dispositifs à semi-conducteurs, y compris les équations de transport des porteurs. Il explique comment ces équations sont dérivées et utilisées pour modéliser le comportement des porteurs de charge.

[23] <https://scaps.elis.ugent.be/>