

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU D MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



## MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Electronique  
Option : Micro-électronique

Présenté par :  
**M<sup>r</sup> ALLEM Hocine**

### Thème :

**Etude de l'influence de la couche d'oxyde interfaciale sur les paramètres d'une cellule solaire à conversion photovoltaïque du type MIS.**

Devant le jury d'examen composé de :

<b>M<sup>r</sup> AMEUR Soltane</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTizi-Ouzou</b>	<b>Président</b>
<b>M<sup>r</sup> BELKAÏD Mohamed Saïd</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTizi-Ouzou</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M<sup>r</sup> DJEDDI Mabrouk</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMBBoumerdès</b>	<b>Examineur</b>
<b>M<sup>r</sup> LAGHROUCHE Mourad</b>	<b>Maître de Conférences</b>	<b>UMMTizi-Ouzou</b>	<b>Examineur</b>

Le : ... / ... / 2009.

# SOMMAIRE

Introduction.....	1
-------------------	---

## Chapitre I Le fonctionnement des cellules photovoltaïques

I. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	3
I.1 Le spectre solaire.....	3
I.2 Le flux énergétique.....	4
I.3 La constante solaire.....	4
I.4 Description de nombre d'Air Masse.....	4
II. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :.....	6
II.1. Définition.....	6
II.2. Rappel sur la jonction PN.....	6
II.3. Principe de l'effet photovoltaïque.....	7
II.4. Les paramètres caractérisant les cellules solaires.....	9
II.4.1 La réponse spectrale.....	9
II.4.2 Le courant de court-circuit.....	9
II.4.3 Tension du circuit ouvert.....	10
II.4.4 Le facteur de forme.....	10
II.4.5 Le rendement de conversion.....	12
III. Les cellules solaires fabriquées à base du silicium.....	12
IV. Association de cellules photovoltaïques.....	13
IV.1 Montage série.....	14
IV.2 Montage parallèle.....	14
IV.3 Montage mixte série-parallèle.....	15

## Chapitre II Les techniques d'élaboration des cellules solaires

I. L'élaboration du silicium.....	16
I.1. Le silicium monocristallin.....	17
I.1.1 Elaboration du silicium monocristallin par la méthode de Czochralski « CZ ».....	17
I.2 Le silicium multicristallin.....	18
I.2.1 Elaboration du silicium multicristallin par la méthode de solidification directionnelle.....	19
I.2.2 Description du four HEM (Heat Exchange Methode).....	19
II. Fabrication des cellules solaires au silicium.....	20
II.1. Fabrication de cellules solaires à base de silicium cristallin.....	21
II.1.1. La préparation du substrat.....	21
II.1.2. La formation de la jonction p-n.....	22
II.1.3. Passivation et texturisation de la surface.....	22
II.1.4. Dépôt d'une couche antireflet.....	22
II.1.5. Réalisation des contacts métalliques.....	22
a. Le dépôt physique en phase vapeur (PVD).....	23
b. La pulvérisation cathodique.....	23
c. La sérigraphie.....	24
II.2. Fabrication d'une cellule solaire à base du silicium amorphe (a-Si).....	25
III. L'oxyde d'étain (Le SnO <sub>2</sub> ).....	26
III.1 Les différentes phases d'obtention de l'oxyde d'étain.....	26

III.2 Les propriétés cristallines du SnO <sub>2</sub> .....	27
III.3. Les propriétés optiques du SnO <sub>2</sub> .....	28
III.4. Les propriétés électriques du SnO <sub>2</sub> .....	28
III.5. Les propriétés chimiques du SnO <sub>2</sub> .....	29
III.6. Le dépôt de SnO <sub>2</sub> en couches minces .....	29
III.6.1. Le Spray pyrolyse .....	29
III.6.2. Le dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition CVD) .....	31
III.6.2.1 Le dépôt CVD sous pression atmosphérique (APCVD) .....	31
III.6.2.2 Le dépôt CVD à basse pression atmosphérique (LPCVD) .....	32
III.6.2.3 Le dépôt CVD assisté par plasma (PECVD) .....	32

### **Chapitre III La structure MIS**

I. La structure Métal–Semiconducteur (contact Schottky) .....	34
I.1 L'épaisseur (w) de la zone de charge d'espace .....	35
I.1.1 Le potentiel électrique .....	35
I.1.2 Le champ électrique .....	36
I.2 Mécanisme de transport de charges .....	36
I.2.1 A l'obscurité .....	36
I.2.2 Sous éclaircissement .....	36
I.3 Les cellules solaires à hétérojonctions de type M-S à base du silicium et d'oxyde d'étain .....	37
I.3.1 Les cellules solaires du type Si monocristallin/SnO <sub>2</sub> .....	37
I.3.2 Les cellules solaires du type Si polycristallin/SnO <sub>2</sub> .....	38
I.3.4 Les cellules solaires du type Si amorphe/SnO <sub>2</sub> .....	38
II. La structure Métal–Isolant–Semiconducteur .....	39
II.1 Description des diagrammes de bandes d'énergie .....	39
II.2 Cas de la structure Si–SiO <sub>2</sub> –SnO <sub>2</sub> .....	43
II.2.1 Diagrammes des bandes d'énergie d'une structure Si–SiO <sub>2</sub> –SnO <sub>2</sub> .....	43
II.2.2 L'étude des courants .....	44
II.2.2.1 A l'obscurité .....	44
II.2.2.2 Sous éclaircissement .....	46
II.2.3 La barrière de potentiel $q\phi_B$ pour une structure MIS .....	47
II.2.4 La tension de circuit ouvert .....	48
II.3. Les cellules solaires de type MIS à base du silicium et d'oxyde d'étain .....	13

### **Chapitre IV Simulations et résultats**

I. L'absorption du Silicium .....	49
II. L'irradiation spectrale et le flux spectral .....	51
II.1 L'irradiation spectrale $I_\lambda$ .....	51
II.2 L'émission spectrale $E_\lambda$ .....	51
II.3 Le flux spectral des photons .....	53
III. La cellule solaire à structure MIS (Métal-Isolant-Semiconducteur) .....	54
III.1 Le courant photogénéré par la cellule solaire .....	55
IV. La caractéristique courant-tension de la structure MIS .....	57

V. La tension de circuit ouvert $V_{CO}$ .....	57
VI. Résultats de la simulation .....	58
VI.1 Influence du dopage sur les paramètres électriques des cellules solaires à structure MIS .....	58
VI.2 Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du spectre solaire pour différents dopages .....	60
VI.3 La caractéristique courant tension .....	61
VI.4 Le rendement de conversion .....	62
Conclusion .....	63
Annexe .....	65
Références .....	73

L'un des enjeux les plus importants que doit relever actuellement l'industrie de la microélectronique est sans doute l'amélioration des performances des cellules solaires afin d'obtenir des rendements de conversion les plus élevés possibles.

De plus en plus d'efforts sont consacrés dans la recherche afin d'arriver à des rendements de conversion meilleurs tout en diminuant le coût de fabrication des procédés de développement ceci, dans l'objectif d'obtenir un prix de revient des cellules solaires réalisées pouvant rendre attractif l'électricité solaire photovoltaïque par rapport à celle des énergies conventionnelles.

Le travail réalisé dans ce mémoire consiste en l'utilisation d'une simulation numérique pour mettre en évidence l'optimisation des paramètres prépondérants en vue d'obtenir un rendement maximum pour les cellules photovoltaïques du type Métal-Isolant-Semiconducteur. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel MATHCAD appliqué aux équations et relations relatives aux structures utilisées dans la conception des cellules photovoltaïques.

Généralement, les paramètres à optimiser dans ce domaine sont les épaisseurs des différents matériaux constituant la structure de la cellule, les niveaux et les profils de dopage ainsi le confinement optique du rayonnement incident. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, du type de la structure utilisée de la cellule solaire, de la qualité des différents matériaux qui la constituent (durée de vie, conductivité, mobilité ...), de la qualité et des états d'interface. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant à un rendement élevé.

Les avantages de la simulation numérique utilisée pour l'optimisation des paramètres de la cellule photovoltaïque sont principalement dus au fait que :

- elle permet d'éviter la redondance dans la fabrication d'opérations expérimentales permettant un gain en temps et en coût dans la réalisation du prototype de cellules avec des paramètres différents.

- elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres).
- elle offre la possibilité de séparer l'influence de chaque paramètre de la cellule indépendamment.

Le travail présenté dans ce mémoire est présenté de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous présentons les aspects nécessaires des paramètres et structures des cellules solaires afin de pouvoir cerner les éléments qui feront l'objet de l'optimisation et de la simulation.

Dans le second chapitre nous décrivons les techniques de fabrication des cellules solaires à base de Silicium ainsi que les propriétés physico-chimiques de couches minces d'oxyde d'étain pour les applications photovoltaïques dans le cas spécifique de la cellule Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la structure Métal-Isolant-Semiconducteur.

Dans le quatrième et dernier chapitre nous exposerons les résultats de la simulation des paramètres de la cellule solaire en fonction de son rendement et les valeurs optimisées.

## Introduction

Notre travail consiste à étudier et à simuler les cellules solaires à structure métal–oxyde–semiconducteur pour une application de type Si–SiO<sub>2</sub>–SnO<sub>2</sub>. C'est une structure très utilisée dans le domaine des cellules photovoltaïques afin d'augmenter l'efficacité du rendement de conversion.

Pour étudier cette structure, nous allons présenter dans ce chapitre le fonctionnement des cellules solaires à effet photovoltaïque.

## I Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

### I.1 Le spectre solaire

Le spectre solaire est la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence du rayonnement électromagnétique émit par le soleil, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X.

La longueur d'onde et la fréquence du spectre solaire sont représentées dans le tableau suivant :

Différents rayons	Longueurs d'onde	Fréquences
Ultraviolets	100-400 nm	3000-750 THz
Visibles	400-780 nm	750-385 THz
Infrarouges	780-10 <sup>6</sup> nm	385-0,3 Thz

Tableau 1 : les longueurs d'onde et les fréquences du spectre solaire.

La représentation du spectre solaire est donnée par la figure suivante :

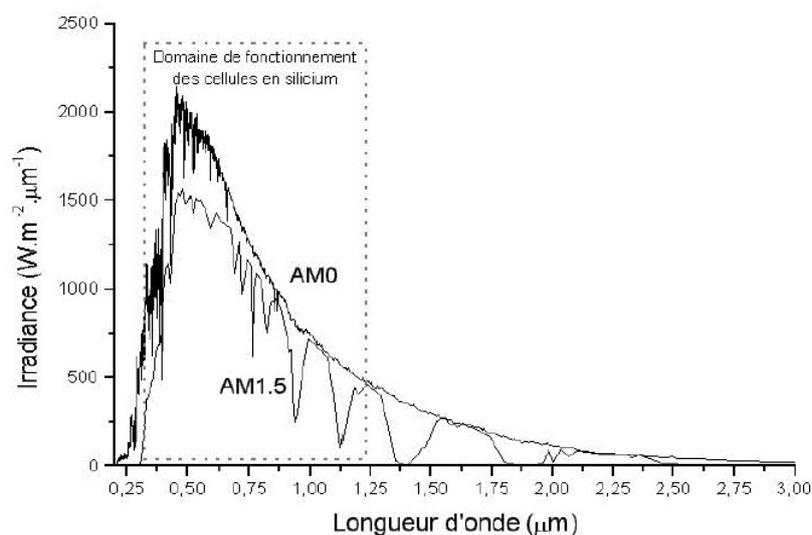


Figure 1 : la distribution spectrale du rayonnement (spectre AM<sub>0</sub> et AM<sub>1,5</sub>) solaire en fonction de la longueur d'onde [1].

L'énergie du spectre solaire se concentre essentiellement dans la gamme du visible et celle de l'infrarouge comme le montre le tableau 2 suivant :

	AM <sub>0</sub>	AM <sub>1</sub>
<b>Ultraviolet</b>	9 %	3 %
<b>Visible</b>	42,5 %	42 %
<b>Infrarouge</b>	48,5 %	55 %

Tableau 2 : la répartition des domaines constituant le spectre solaire [2].

### I.2 Le flux énergétique

C'est la quantité d'énergie émise par unité de temps par la totalité de la surface du soleil dans toutes les directions. S'exprime en Joule/seconde, ou bien en Watts.

### I.3 La constante solaire

La constante solaire est la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m<sup>2</sup> située à une distance de 149,6.10<sup>6</sup> km [3] par rapport au soleil (distance moyenne Terre-soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère.

Elle sera égale à 1367 Wm<sup>-2</sup> [4].

### I.4 Description du nombre d'Air Masse

La valeur de l'éclairement reçue sur terre est différente de celle émise par le soleil, ceci revient aux différentes couches atmosphériques qu'elle traverse qui causent une perte d'énergie remarquable.

Au moins 35 % [5] du rayonnement solaire intercepté par la terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui atteint la terre est diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière. D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire [6].

On appelle Masse d'Air (AM), la perte de l'énergie par l'absorption atmosphérique du rayonnement solaire, elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire [7].

$$AM = \frac{1}{\sin \theta}$$

$\theta$  : L'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre.

Le spectre  $AM_0$  : il correspond à la masse d'air arrivant au dessus de l'atmosphère (hors atmosphère). Il correspond à la puissance  $1367 \text{ W/m}^2$ . Ce spectre est utilisé pour les applications spatiales.

Le spectre  $AM_1$  : il correspond à la masse d'air arrivant perpendiculairement à la surface de la terre [8].

Le spectre  $AM_{1,5}$  : il correspond à un rayonnement arrivant à un angle d'inclinaison du soleil de  $48,19^\circ$  par rapport au zénith [9]. La puissance correspondante au spectre  $AM_{1,5}$  est de  $1000 \text{ W/m}^2$ . C'est le spectre le plus couramment utilisé.

La description de nombre d'air masse AM est représentée ci-dessous

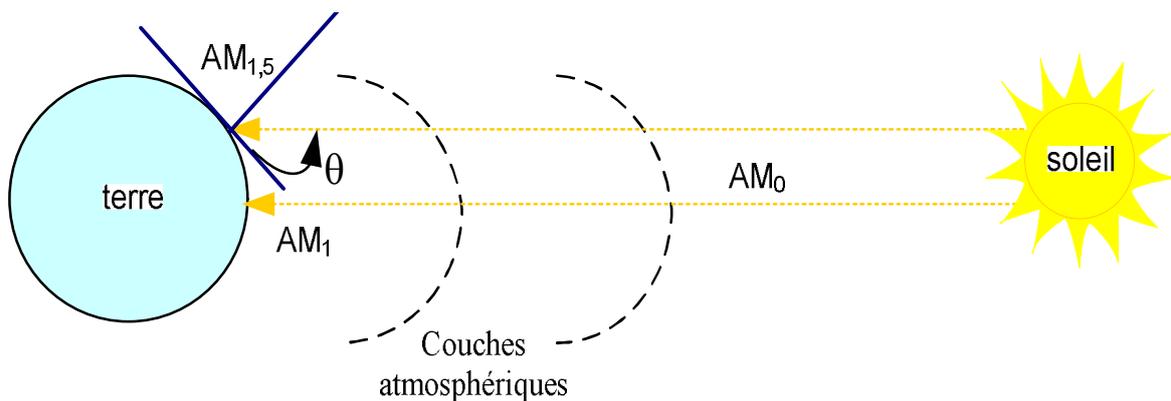


Figure 2 : description du nombre d'Air Masse (AM).

## II. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### II.1 Définition

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs optoélectroniques qui transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque est basée sur une jonction PN entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérostructures).

### II.2 Rappel sur la jonction PN

C'est une structure qui résulte de la juxtaposition dans un même matériau semiconducteur de deux zones, l'une de type P (majoritaire en trous, minoritaire en électrons) et l'autre de type N (majoritaire en électrons, minoritaire en trous). Dès la juxtaposition, des courants de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction et créent, au voisinage immédiat de celle-ci, une barrière de potentiel qui s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone.

Lorsque l'équilibre est atteint, le champ électrique créé par la barrière de potentiel est suffisant pour équilibrer les courants de diffusion des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires, par suite de la largeur très faible de la jonction (de 0,2 à quelques micromètres [10]), d'où un courant global de diffusion nul.

Les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction sont alors donnés par la figure 3.

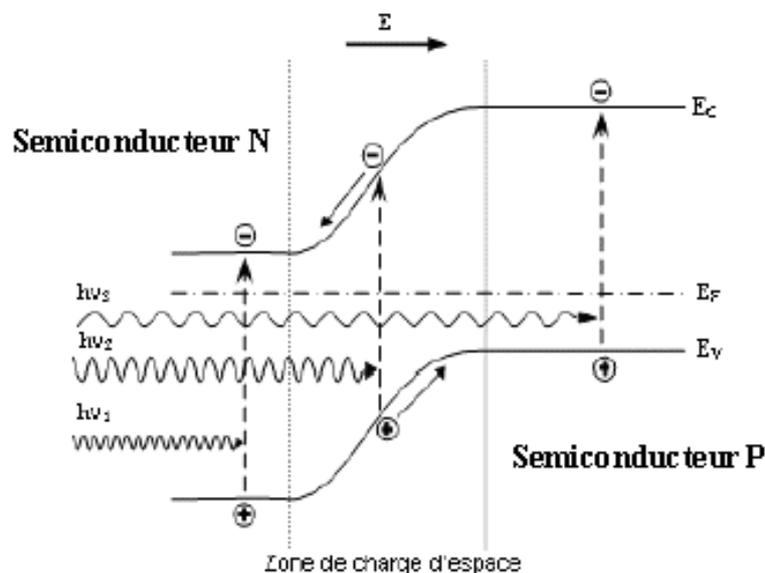


Figure 3 : diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

### II.3 Principe de l'effet photovoltaïque

La cellule solaire à homojonction à base de silicium est formée de plusieurs couches :

1. grille collectrice avant.
2. couche de Si dopée N.
3. couche de Si dopée P.
4. grille conductrice arrière.

Le Principe de l'effet photovoltaïque est basé sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie des photons en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électrons/trous dans le matériau semiconducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Afin de collecter les particules générées, le champ électrique  $E$  régnant dans la jonction permet de dissocier les paires électrons/trous créées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 4 :

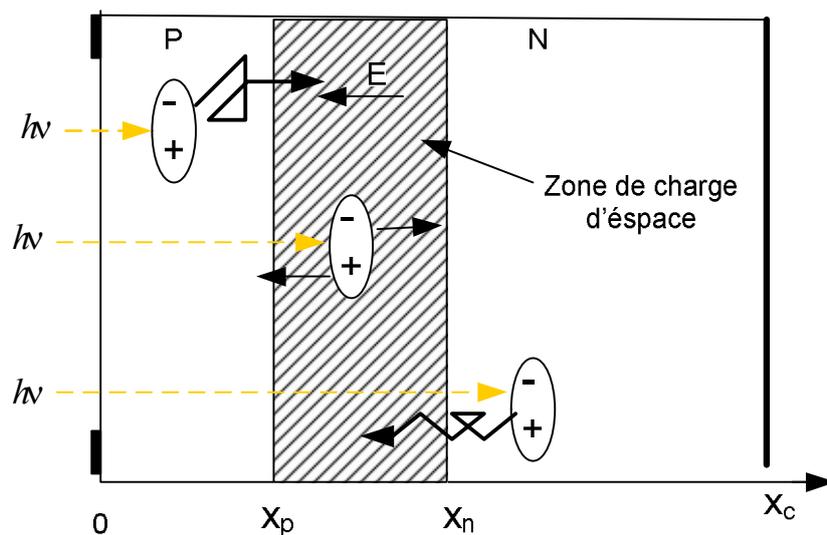


Figure 4 : structure d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion  $I_{ph\text{diffusion}}$ .
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont passer vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photocourant de génération  $I_{ph\text{génération}}$ .

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

$$I_{ph} = I_{ph\text{diffusion}} + I_{ph\text{génération}}$$

L'organigramme suivant montre les étapes essentielles de ce phénomène physique :

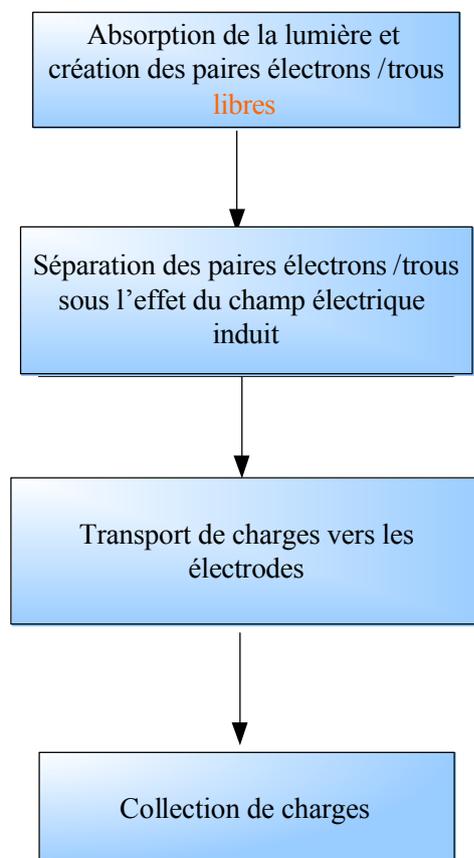


Figure 5 : les étapes essentielles de la conversion photovoltaïque.

Le courant total d'une cellule solaire sous éclairage est égal au courant photogénéré plus le courant de polarisation de la cellule :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$I_{ph}$  : courant photogénéré.

$I_s$  : courant de saturation.

$q$  : charge de l'électron.

$V$  : tension électrique en Volt.

$k$  : constante de Boltzmann.

$T$  : température en Kelvin.

## II.4 Les paramètres caractérisant les cellules solaires

### II.4.1 La réponse spectrale

La réponse spectrale  $r_s$  est le nombre de photoporteurs collectés par chaque photon incident en fonction de la longueur d'onde, il s'exprime comme suit [11]:

$$r_s = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\phi(\lambda)[1 - R(\lambda)]}$$

$J_{ph}(\lambda)$  : densité du photocourant fournie par la cellule.

$\phi(\lambda)$  : flux de photons reçu par la cellule.

$\phi(\lambda)[1 - R(\lambda)]$  : flux de photons qui participent à l'effet photovoltaïque.

$R(\lambda)$  : coefficient de réflexion de la surface.

### II.4.2 Le courant de court-circuit

On appelle courant de court-circuit, le courant qui circule dans une cellule solaire soumise à un flux de photons  $\phi(\lambda)$  sans application de tension. Il est donné par la relation suivante :

$$J_{CC} = q \int_0^{\infty} \phi(\lambda)[1 - R(\lambda)] r_s d\lambda$$

Le courant de court-circuit est défini comme étant le courant fourni par une cellule solaire dans un circuit ouvert :  $I_{CC} = I_{ph}$

### II.4.3 Tension du circuit ouvert

C'est la tension mesurée par un voltmètre aux bornes de la cellule solaire.

La tension de circuit ouvert peut être calculée de l'équation caractéristique courant-tension de la cellule solaire en posant  $I = 0$ . Elle sera donnée comme suit :

$$I = 0 \Rightarrow I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = 0$$

$$\Rightarrow V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right)$$

Pour un éclairement solaire très fort:  $I_{ph} \gg I_s$

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right)$$

En représentant la caractéristique courant-tension d'une cellule dans à l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique des cellules photovoltaïques.

La densité du courant de court-circuit  $J_{CC}$ , est obtenue sur la caractéristique pour une tension de  $V=0$  Volt (figure 7). Elle est proportionnelle à l'éclairement incident.

### II.4.4 Le facteur de forme

Une cellule solaire peut être représentée dans un circuit électrique comme suit :

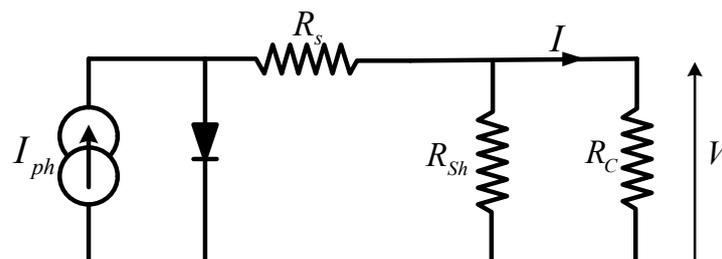


Figure 6 : le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairement.

$R_{sh}$  : résistance shunt caractérisant les pertes en courant.

$R_s$  : résistance série caractérisant les chutes de tension.

$R_c$  : résistance de charge.

Soit  $P$  la puissance débitée par la cellule solaire, l'expression de cette dernière peut être tirée de la figure 6 précédente :

$$P = IV < I_{CC} \cdot V_{CO}$$

En remplaçant  $I$  par son expression, cette puissance s'écrit :

$$P = V \left[ I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \right]$$

la puissance est maximale aux points :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dP}{dI} = 0$$

$V_{max}$  et  $I_{max}$  sont donnés par les équations suivantes :

$$\left( 1 + \frac{qV_{max}}{kT} \right) \exp\left(\frac{qV_{max}}{kT}\right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s}$$

$$\Rightarrow I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{max}}{kT}\right) - 1 \right] = I_s \frac{qV_{max}}{kT} \exp\left(\frac{qV_{max}}{kT}\right)$$

$$\Rightarrow I_{max} = I_s \frac{qV_{max}}{kT} \exp\left(\frac{qV_{max}}{kT}\right)$$

Le Facteur de remplissage, ou facteur de forme (FF) est le rapport des aires de ces deux rectangles, soit :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}}$$

$I_{max}$  et  $V_{max}$  désignent les coordonnées du courant et de la tension qui maximisent la puissance délivrée par la cellule, soit  $P_{max} = I_{max} V_{max}$  (figure 7).

Plus cette zone rectangulaire est grande, plus la caractéristique ressemble à un rectangle d'aire  $V_{CO} \cdot I_{CC}$ .

#### II.4.5 Le rendement de conversion

Le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance incidente sur sa surface :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{J_{CC} \cdot V_{CO} \cdot FF}{P_i}$$

où  $P_i$  est la puissance lumineuse incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Le rendement, exprimé en pourcentage, est un paramètre clef de la productivité de la cellule.

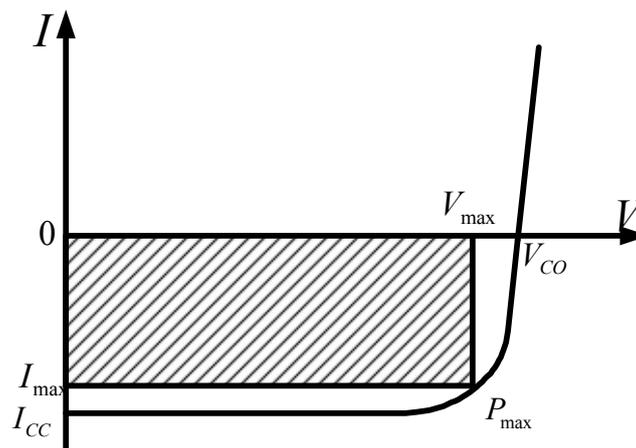


Figure 7: caractéristique I (V) d'une cellule solaire.

### III. Les cellules solaires fabriquées à base du silicium

Le matériau le plus répandu dans la technologie des cellules solaires est le silicium. Il existe plusieurs types de cellules solaires fabriquées à base de ce matériau :

- cellules au silicium monocristallin.
- cellules au silicium multicristallin.
- cellules au silicium amorphe.

Le tableau suivant présente les rendements typiques et théoriques que l'on peut obtenir avec ces différentes technologies utilisées [3], [12].

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement théorique (%)
Si monocristallin	12-16	24
Si multicristallin	13-15	
Si amorphe	5-10	12,7

Tableau 3 : rendements typiques et théoriques des cellules solaires fabriquées avec les différents types du silicium.

La réalisation de cellules à base de silicium cristallin reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. Les meilleurs rendements obtenus jusqu'ici sont ceux du silicium monocristallin avec des coûts de revient élevés du aux difficultés d'avoir du silicium pur à partir de la silice.

#### **Les cellules solaires à base du silicium multicristallin**

Une cellule photovoltaïque au silicium multicristallin est produite à partir des déchets de l'industrie électronique sous forme de lingots carrés refroidis axialement, découpés en plaquettes minces. Le rendement des cellules photovoltaïques fabriquées à base du silicium multicristallin varie de 13 à 15 % comme le montre le tableau 3 précédent.

#### **IV. Association de cellules photovoltaïques**

Dans les conditions standard, la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm<sup>2</sup> serait d'environ 1,25 W [13]. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres existant dans un réseau de photopiles en fonctionnement. En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairement et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau.

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension.

#### IV.1 Montage série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné (figure8).

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

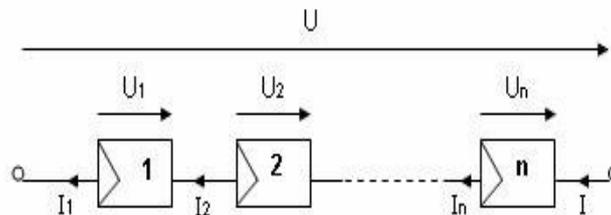


Figure 8 : association série de cellules photovoltaïques.

#### IV.2 Montage parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée (figure9).

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

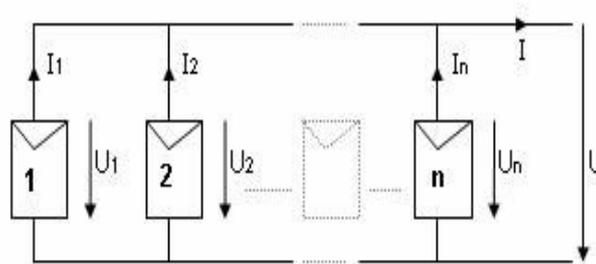


Figure 9 : association parallèle de cellules photovoltaïques.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V.

### IV.3 Montage mixte série-parallèle

Dans le cas d'un montage série-parallèle, il faut associer en dérivation des ensembles de panneaux montés en série ou bien associer en série des ensembles de panneaux montés en dérivation.

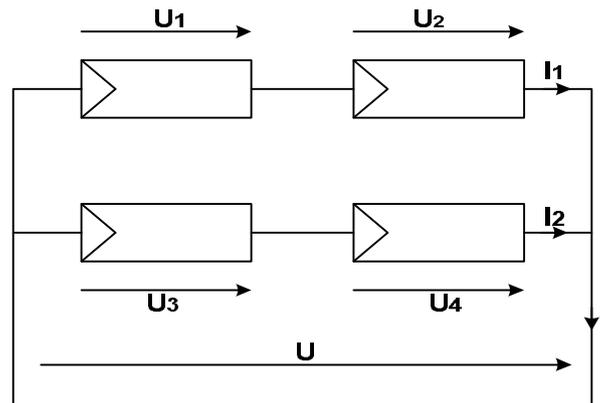


Figure 10 : association mixte de cellules photovoltaïques.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le principe de l'effet photovoltaïque basé sur la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Il inclut des notions relatives à l'énergie transmise par le soleil, ainsi que quelques éléments de physique des semiconducteurs et des principaux mécanismes de transport des charges électriques dans la jonction PN. Nous avons donné aussi un aperçu sur les caractéristiques électriques fondamentales tels que la tension, le courant et le rendement de conversion du dispositif photovoltaïque.

## Introduction

La fabrication des cellules photovoltaïques et des modules photovoltaïques est en pleine croissance. Beaucoup de recherches sont faites dans le domaine à fin de rendre les procédés de fabrication moins chers et plus efficaces en produisant ainsi des cellules à faible coût de revient.

Dans ce chapitre nous décrivons les techniques et les matériaux semiconducteurs utilisés pour la fabrication des cellules solaires à effet photovoltaïque de type MIS appliqué pour le cas Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>.

## I L'élaboration du silicium

Le silicium est un élément simple de numéro atomique 14, situé dans la 4<sup>ème</sup> colonne du tableau de Mendeleïev. Dans le cristal, les atomes de silicium occupent les nœuds d'un réseau cubique à faces centrées. La maille élémentaire est constituée de deux cubes à faces centrées, décalés l'un de l'autre du 1/4 de la diagonale.

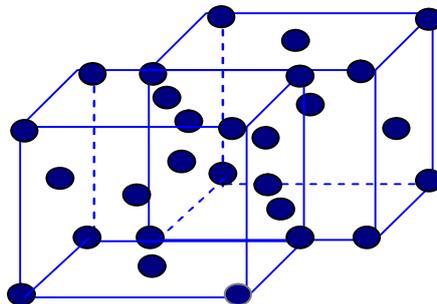


Figure 1 : réseau de silicium (structure blende).

Le silicium est employé comme matériau de base dans les équipements photovoltaïques car il offre plusieurs avantages tels que son abondance dans la croûte terrestre, sa faible toxicité, ses propriétés optiques et ses propriétés électroniques qui peuvent être modifiées par dopage.

Le spectre solaire utile pour les systèmes photovoltaïques au silicium est limité entre 350nm ( $\alpha = 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ) et 1180 nm ( $\alpha = 6,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ ).

La transmission est liée à l'absorption par la relation :

$$T = \exp - \alpha(\lambda)x$$

Le rayonnement solaire n'est pas totalement transmis ; une partie de ce rayonnement est réfléchi à la surface. Lors d'une incidence normale d'un rayonnement à l'interface entre deux matériaux, d'indice de réfraction  $n_1$  et  $n_2$ , il y'a naissance d'un rayonnement réfléchi d'intensité  $R$  donné par [14] :

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$$

L'indice de réfraction du silicium à  $\lambda = 600 \text{ nm}$  est  $n_2 = 3,94$  et l'indice de réfraction de l'air est  $n_1 = 1$ .

Parmi les différents types de silicium, le monocristallin et le multicristallin sont les plus adéquats pour la réalisation de cellules solaires photovoltaïques : le premier pour sa pureté cristallographique, le second pour son prix relativement peu élevé et permettant chacun d'obtenir un rendement de conversion correspondant convenable.

### **I.1 Le Silicium monocristallin**

Le Silicium monocristallin a été le premier matériau de base à être utilisé dans la fabrication des cellules solaires ; il présente deux avantages principaux :

- absence des joints de grain.
- présence d'une seule orientation cristallographique

Les atomes du silicium sont arrangés de façon périodique dans la structure diamant (zinc blende) avec une distance interatomique  $d = 2,35 \text{ \AA}$ . Le gap de ce matériau est indirect, il est de l'ordre de  $1,12 \text{ eV}$  à la température ambiante [15].

Le silicium monocristallin est obtenu généralement par la méthode de Czochralski (méthode de tirage vertical en bain fondu).

#### **I.1.1 Elaboration du silicium monocristallin par la méthode de Czochralski « CZ » :**

La croissance du silicium monocristallin CZ se fait sous vide, les principales étapes sont :

- faire fondre dans un creuset le silicium polycristallin en présence d'un gaz inerte.

- stabiliser la température du bain à une température supérieure à celle de la fusion du silicium.
- amener un germe monocristallin au contact du bain (pour faciliter la nucléation sur ses sites cristallographiques des atomes provenant du bain de silicium).
- élever verticalement le germe à une vitesse bien définie avec une rotation autour de son axe sans casser l'interface liquide-solide.
- refroidir lentement le germe durant sa levée pour le solidifier sans casser l'interface solide-liquide.

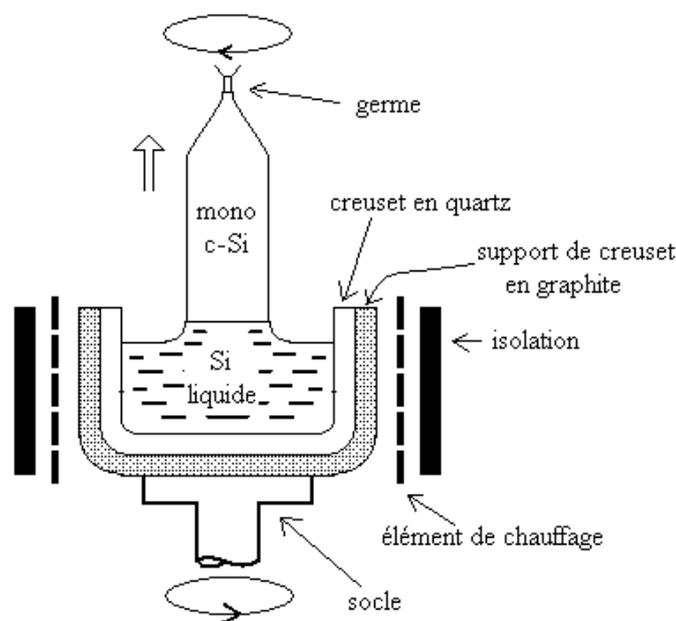


Figure 2 : technique de Czochralski pour la fabrication de Si monocristallin.

Lors de ces opérations, le silicium peut être soit intrinsèque soit dopé grâce à l'introduction de dopants (bore ou phosphore) dans le bain de fusion.

## I.2 Le silicium multicristallin

Le silicium multicristallin est composé de monocristaux (grains) qui ont une taille de l'ordre du millimètre voire plus. Chaque grain a une taille et une orientation cristallographique différente de celle de son voisin. Les monocristaux sont séparés les uns des autres par des zones perturbées appelées joints de grains.

Le silicium multicristallin est obtenu notamment par la méthode de solidification directionnelle ; cette technique permet la croissance du silicium multicristallin en assurant la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux qui limitent les effets néfastes des joints de grains.

### **I.2.1 Elaboration du silicium multicristallin par la méthode de solidification directionnelle**

La solidification directionnelle est une méthode qui consiste à faire croître un lingot de silicium multicristallin avec des grains colonnaires, c'est à dire une croissance des monocristaux du bas vers le haut du lingot. Ceci est basé sur la création d'un gradient de température à l'intérieur d'un four du type HEM (Heat Exchange Methode) où se trouve un creuset qui contient un bain de feedstock (silicium polycristallin + chutes de silicium monocristallin) [16].

### **I.2.2 Description du four HEM (Heat Exchange Methode)**

Le four HEM (figure 3) est composé d'une grande enceinte à l'intérieur de laquelle se trouvent des résistances chauffantes en graphite et un porte-creuset qui est en contact avec une couche isolante pouvant effectuer un déplacement vers le bas. Les arrivées des gaz et les canalisations du vide sont branchées sur l'enceinte. Le four est lié à des systèmes de refroidissement et de contrôle de la température et de pression. Pour pouvoir contrôler les différentes étapes de la croissance, tout le dispositif est relié à un système de contrôle automatique.

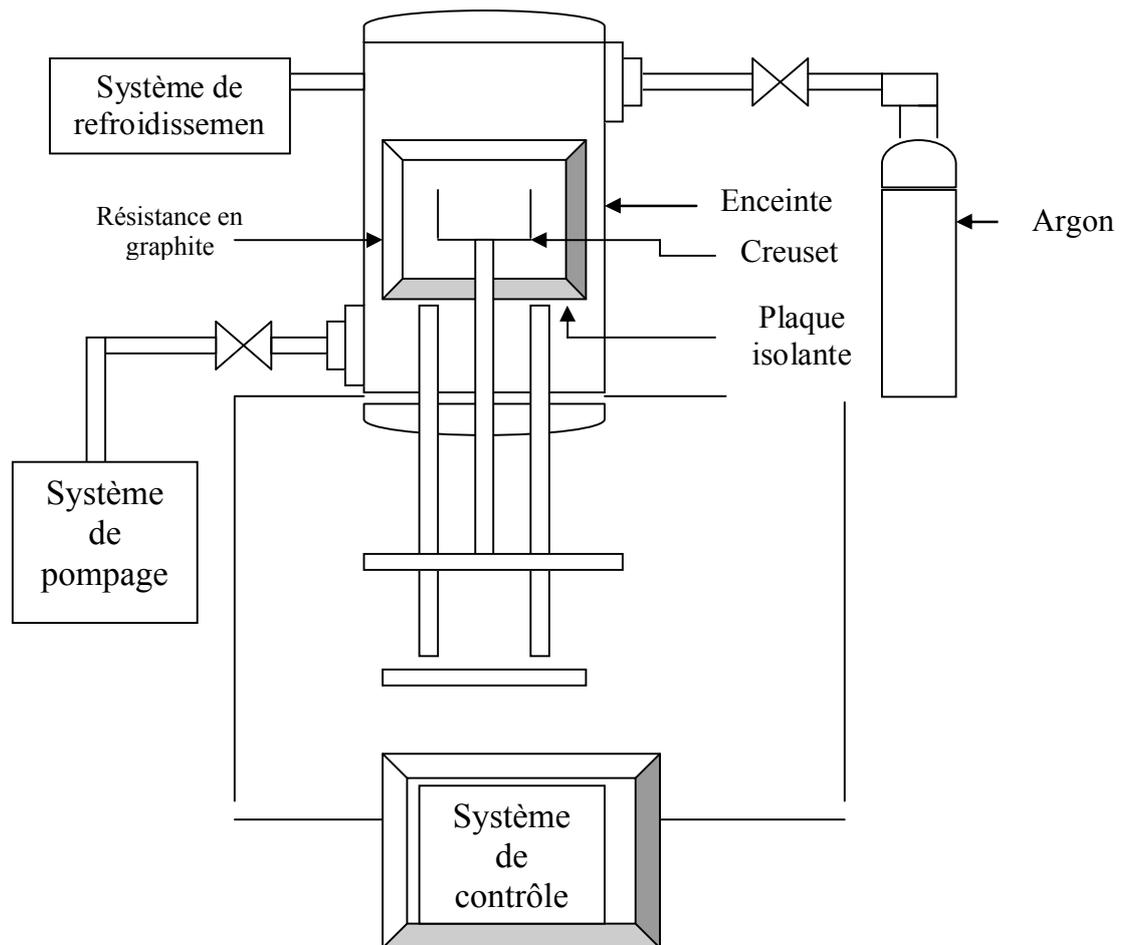


Figure 3 : description du four HEM

Dans cette technique, la régularité de la colonne des grains est moins bonne que dans le cas du silicium monocristallin.

## II Fabrication des cellules solaires au silicium

La plupart des modules photovoltaïques sont fabriqués à base de cellules photovoltaïques au silicium. Nous avons vu que ce silicium peut être soit à l'état cristallin (monocristallin ou polycristallin) ou bien à l'état amorphe. Selon le type du silicium, on distingue deux filières pour la fabrication de cellules photovoltaïques :

- 1) la filière de fabrication des cellules au silicium cristallin.
- 2) la filière de fabrication des cellules à couches minces en silicium amorphe (a-Si).

## II.1 Fabrication de cellules solaires à base de silicium cristallin

Le paramètre le plus important pour le choix du matériau est la largeur de sa bande interdite  $E_g$ . Il commande la densité de photons du rayonnement solaire qui participe à la conversion photovoltaïque et la tension de sortie de la cellule élémentaire. La température de fonctionnement et la facilité de créer une jonction dans ce matériau sont aussi des paramètres à prendre en considération. On réalisera des homojonctions où des hétérojonctions, selon les matériaux utilisés. La figure ci-dessous donne le rendement théorique maximal en fonction de la bande interdite des matériaux utilisés d'après Loferski [17].

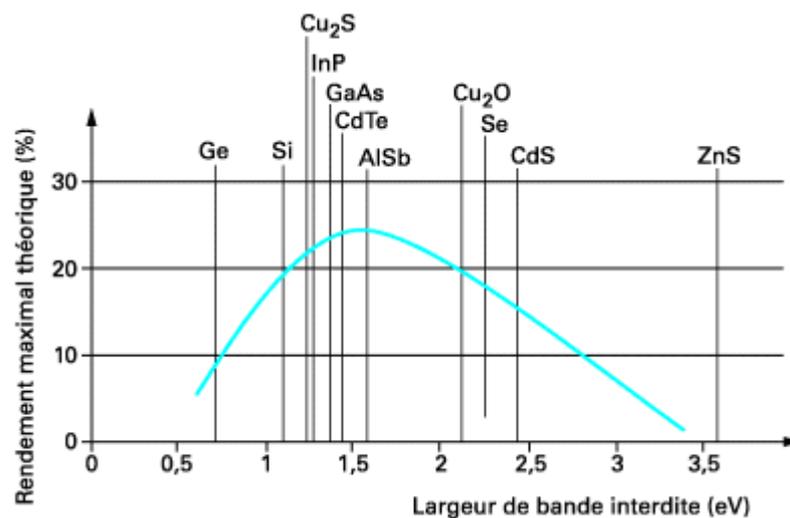


Figure 4 : rendement théorique maximal des cellules photovoltaïques en fonction des matériaux utilisés.

La fabrication d'une cellule solaire à base de silicium nécessite plusieurs étapes dont les principales sont les suivantes:

- préparation du substrat.
- formation de la jonction P-N.
- passivation et texturisation de la surface
- dépôt d'une couche antireflet.
- réalisation des contacts métalliques.

### II.1.1 La préparation du substrat

La première étape consiste à préparer le substrat du silicium. Cette étape consiste en l'élimination des effets de découpe créés au cours de l'usinage du silicium. Cette élimination s'effectue par les traitements de décapage et de polissage.

### **II.1.2 La formation de la jonction P-N**

Les jonctions P-N constituent la structure de base de fonctionnement de nombreux dispositifs à semiconducteurs comme le cas de la photopile. On réalisera des homojonctions qui sont des jonctions P-N au sein d'un même semi-conducteur (silicium) par implantation d'impuretés de type N ou P, ou des hétérojonctions à partir de semiconducteurs différents.

Cette jonction se réalise par l'incorporation de dopants (du phosphore pour le dopage de type N et du bore pour le dopage de type P) par voie chimique ou par des techniques de diffusion.

### **II.1.3 Passivation et texturisation de la surface**

La surface du substrat devient lisse après l'élimination des effets de découpe, donc elle réfléchit 35% de la lumière incidente [18]. Il est nécessaire de minimiser cette réflexion en rendant la surface moins lisse par les procédés chimiques, ceci afin d'améliorer l'absorption des photons dans la structure.

La surface est ensuite purifiée avec un flux d'hydrogène pour saturer les liaisons pendantes.

### **II.1.4 Dépôt d'une couche antireflet**

Il existe plusieurs techniques de dépôt d'une couche antireflet sur la surface avant des cellules. Cette couche permet de minimiser la réflexion des photons et donc de réduire les pertes par réflexion de la lumière incidente.

Parmi ces techniques nous pouvons citer le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le spray pyrolyse. Ces méthodes sont basées sur des techniques de mise en oeuvre facile avec des moyens matériels peu coûteux.

### **II.1.5 Réalisation des contacts métalliques**

Les faces avant et arrière de la plaquette doivent être recouvertes par des contacts métalliques pour la collecte des porteurs de photocourant généré. L'électrode avant (contact avant) est déposée sous forme de grille, pour laisser passer la lumière. Par contre, l'arrière est simplement recouverte d'une couche métallique continue. Il existe plusieurs techniques pour la métallisation.

### a) Le dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le dépôt de la cathode métallique s'effectue par évaporation thermique sous vide secondaire à une pression de l'ordre de  $10^{-7}$  millibar [19] à travers un masque correspondant. Le schéma du bâti utilisé pour l'évaporation sous vide est donné par la figure suivante :

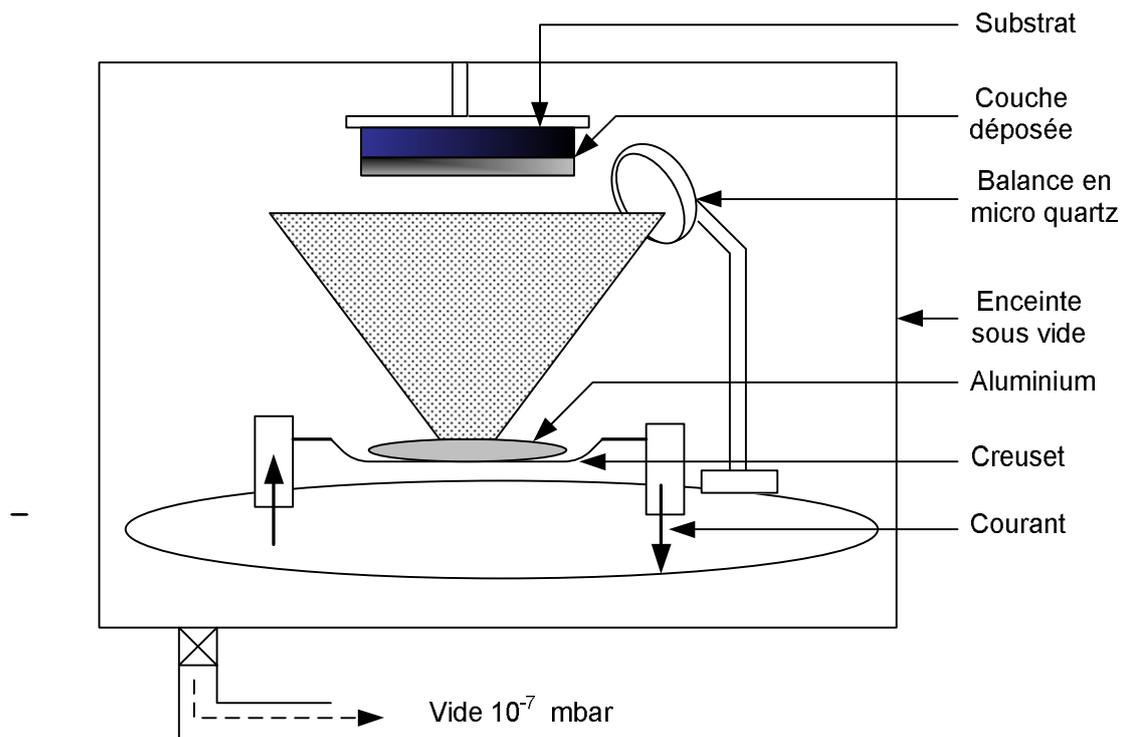


Figure 5 : schéma du bâti d'évaporation sous vide

Le métal à déposer est placé dans un creuset en tungstène et chauffé par effet Joule. Après évaporation, il se condense sur toutes les surfaces du bâti et en particulier sur le substrat et sur une balance de quartz qui permettra ensuite l'étalonnage et le contrôle de l'épaisseur de la couche à déposer et de la vitesse du dépôt.

### b) La pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt sous vide fonctionnant à froid, en plasma luminescent dans un gaz maintenu à pression réduite de l'ordre de 100 millibar.

Il permet de déposer tous types de matériaux, simples ou composés, réfractaires ou non, alliés ou non, conducteurs ou diélectriques. Tous les types de substrat qui acceptent une mise sous vide et un léger échauffement peuvent être traités par ce procédé.

Le matériau à déposer (cible) est introduit dans l'enceinte à vide sous forme d'une plaque de quelques millimètres d'épaisseur. La cible est fixée sur une électrode (la cathode) qu'on porte à une tension négative de 3 à 5 KV.

Une autre électrode (porte substrat) parallèle à la cible et à une distance de quelques centimètres, est maintenue à la masse.

Entre les deux électrodes est créé un champ électrique qui ionise le gaz (Argon) introduit auparavant dans l'enceinte. Un courant s'établit entre les deux électrodes. Le gaz est devenu conducteur. Il contient alors :

- des électrons qui sont attirés par l'anode.
- des ions positifs qui sont attirés par la cible (cathode).

L'impact des ions positifs, attirés par la cible du fait de sa polarisation négative, expulse les atomes de la cible qui se condensent sur le substrat, formant ainsi le dépôt voulu. La figure suivante montre l'enceinte et le mécanisme de pulvérisation :

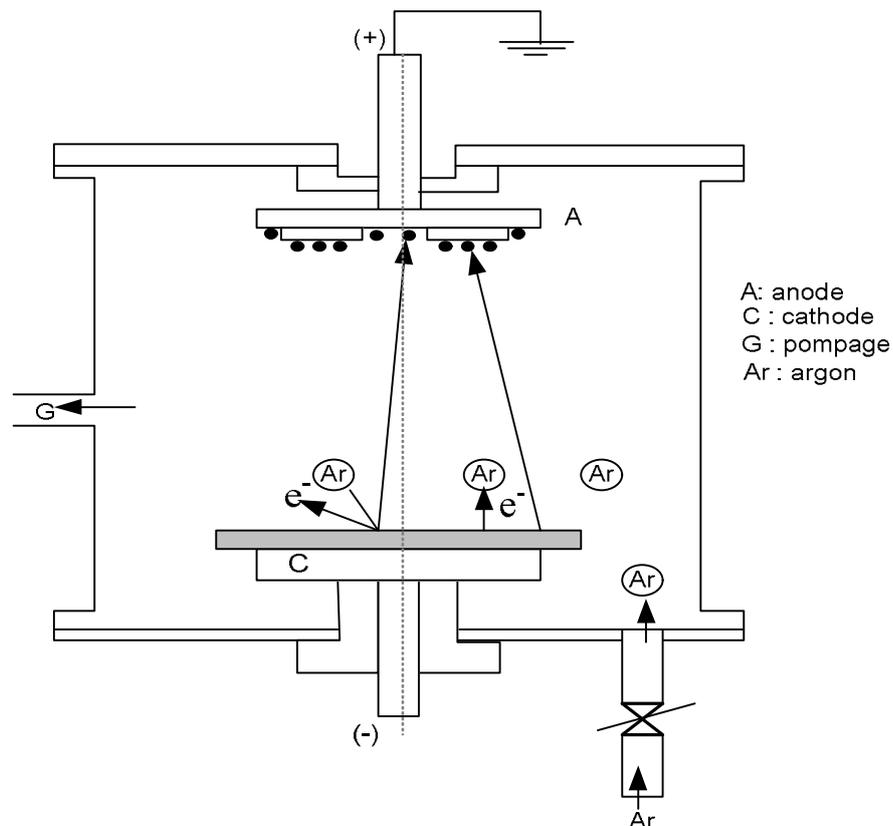


Figure 6 : enceinte et mécanisme de pulvérisation cathodique.

### c) La sérigraphie

La métallisation par sérigraphie s'effectue par l'application d'une pâte à travers un masque. Un traitement thermique à suivre va permettre la solidification de la pâte et sa densification sur la cellule. C'est pendant cette étape que le contact, en face avant et en face arrière est réalisé par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le semiconducteur. La pâte est constituée de :

- fritte de verre.
- métaux actifs.
- liants.

La sérigraphie bénéficie d'une rapidité d'exécution qui supporte la cadence de production.

Les contacts métalliques avec la technique de sérigraphie, sont réalisés à l'aide d'une pâte métallique. Ces derniers seront soumis à un recuit, après leur réalisation, pour obtenir une résistance optimale et renforcer les contacts avec les couches déposées.

## II.2 Fabrication de cellules solaires à base du silicium amorphe (a-Si)

Dans un matériau fabriqué à base du silicium amorphe, les atomes sont fixés les uns aux autres de façon désordonnée, il ne possède pas de largeur de bande interdite. Le réseau comporte un grand nombre de liaisons pendantes, c'est-à-dire d'atomes de Si qui ne sont reliés qu'à trois voisins seulement, et qui présentent donc un électron libre sur la couche extérieure. Ceci entraîne l'existence d'un grand nombre de niveaux d'énergie locaux qui occupent ce qui devrait être la bande interdite.

La solution dans ce cas consiste à obtenir un silicium contenant beaucoup d'hydrogène. Les atomes d'hydrogène vont en effet passiver les liaisons pendantes, et, en faisant ainsi disparaître les niveaux locaux de valeur intermédiaires.

Ce n'est qu'en 1972 que l'on a pu précipiter du silicium amorphe avec une teneur importante en hydrogène. Les cellules obtenues à cette époque n'étaient guère utilisables que dans des gadgets car elles vieillissaient très rapidement suite à la libération de leur hydrogène.

Actuellement, des progrès semblent avoir été effectués puisque des fabricants offrent des garanties analogues à celles des modules au silicium cristallin.

L'inconvénient de ces modules reste leur rendement plus faible, ce qui nécessite à puissance produite égale une surface plus grande.

Du point de vue de la fabrication, le silicium amorphe est avantageux car il est fabriqué à une température de 250°C. On peut donc utiliser des supports bon marché, et en particulier le verre qui peut constituer la face avant du module à condition d'avoir été préalablement couvert d'un conducteur transparent. Le fait que la température de fabrication soit plus basse diminue la consommation d'énergie lors de la fabrication.

Un autre avantage tient au fait que le silicium amorphe est plus opaque à la lumière que le silicium cristallin. Ceci permet de réaliser les cellules avec des couches plus minces, donc d'effectuer une économie de matière.

La constitution de la jonction peut se faire par dépôt de trois couches de silicium amorphe, une couche de type p, une couche de type i (non dopée, afin d'obtenir un volume de jonction plus grand) et une couche de type N [20]. Cette fabrication peut s'effectuer en continu, donc avec peu de main d'oeuvre.

### **III. L'oxyde d'étain (Le SnO<sub>2</sub>)**

Les couches minces d'oxyde d'étain possèdent du fait de leur caractère semiconducteur dégénéré de type N des propriétés adaptées à la réalisation de nombreuses applications. Il présente une très bonne stabilité chimique et thermique, il est transparent dans toute la gamme du visible et du proche infra-rouge et possède une bonne adhésion vis-à-vis de substrats de natures différentes. De plus, il présente une large gamme de conductivité variant de  $10^{-3}$  à  $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$  [21] et un faible coût de fabrication.

L'oxyde d'étain pourrait être utilisé dans une photopile pour les deux propriétés suivantes :

- **couche conductrice** : à cause de la forte valeur de conductivité dans le cas d'un SnO<sub>2</sub> dopé au fluor ou à l'antimoine.
- **couche antireflet** : grâce à ses propriétés électriques et optiques, notamment la bonne conduction du courant et la transparence vis-à-vis du rayonnement, il est très utilisé sous forme de couches minces dans les cellules solaires. La couche

supérieure de  $\text{SnO}_2$  possède un indice de réfraction égal à 2, ce qui peut lui permettre de servir de couche antireflet pour la réduction des pertes par réflexion.

### III.1 Les différentes phases d'obtention de l'oxyde d'étain

Les films d'oxyde d'étain sont amorphes quand ils sont déposés à des températures inférieures à  $350^\circ\text{C}$  [16]. Ce n'est qu'à partir de cette température que la cristallisation de ces films commence.

Les films minces d'oxyde d'étain élaborés par les différentes techniques de fabrication sont généralement non stoechiométriques, ils présentent des phases métastables telles que  $\text{SnO}$  et  $\text{Sn}_3\text{O}_4$ .

Un recuit des dépôts est nécessaire pour avoir une bonne stoechiométrie du  $\text{SnO}_2$ .

### III.2 Les propriétés cristallines du $\text{SnO}_2$

L'oxyde d'étain présente un écart à la stoechiométrie du fait de l'existence (plus ou moins grande suivant le mode d'élaboration des couches) de lacunes d'oxygène au sein de la maille. La formule chimique de ce composé se présente donc sous la forme  $\text{SnO}_x$  avec  $0,8 < x < 2,0$ .

Présent à l'état naturel, l'oxyde d'étain se cristallise avec une structure tétragonale rutile. Les paramètres du réseau cristallin sont les suivants :  $a=4,74 \text{ \AA}$  et  $c=3,19 \text{ \AA}$ . Ce dernier est constitué de deux atomes d'étain ( $R\text{Sn}_4^+=0,71 \text{ \AA}$ ) placés aux sommets d'un triangle équilatéral et de quatre atomes d'oxygène ( $RO_2^-=1,40 \text{ \AA}$ ) placés aux sommets d'un octaèdre régulier (figure 7). La description de l'orientation cristallographique de la maille varie selon le mode d'élaboration de l'oxyde d'étain [21].

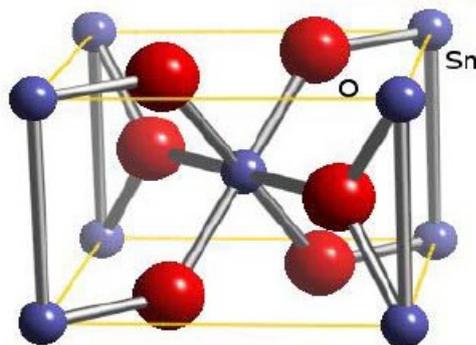


Figure 7 : maille élémentaire du  $\text{SnO}_2$

### III.3 Les propriétés optiques du SnO<sub>2</sub>

L'oxyde d'étain présente une forte absorption dans le domaine de l'ultraviolet et une forte réflexion dans le domaine de l'infrarouge. Cependant, dans toute la gamme spectrale du visible, les couches minces d'oxyde d'étain présentent une forte transmission.

La figure suivante représente le spectre d'absorption optique d'un film SnO<sub>2</sub> dopé au fluor (F) et déposé à différentes températures.

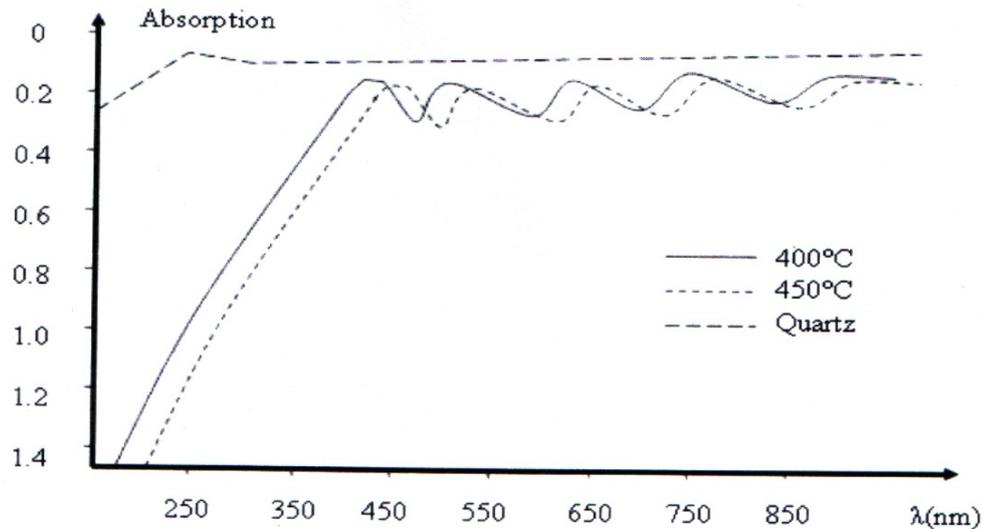


Figure 8 : spectre d'absorption optique d'un film SnO<sub>2</sub> dopé fluor (F) et déposé à différentes températures [2].

### III.4 Les propriétés électriques du SnO<sub>2</sub>

La conductivité électrique de l'oxyde d'étain résulte des liaisons vacantes de l'oxygène ou de l'existence des atomes interstitiels de l'étain.

Le dopage du SnO<sub>2</sub> permet de contrôler ses propriétés électriques. L'oxyde d'étain peut être dopé par l'antimoine (Sb), le Niobium (Nb), l'Indium (I), le Fluor (F) ou bien le Chlore (Cl).

Les valences des impuretés influent sur la concentration des porteurs, cette dernière croît avec les impuretés qui ont une valence supérieure à 4 et décroît avec celles qui ont une valence inférieure à 4. Dans le premier cas la conductivité augmente et dans le second elle diminue.

### III.5 Les propriétés chimiques du SnO<sub>2</sub>

Le SnO<sub>2</sub> est un matériau très résistant aux agents chimiques. Les acides sulfuriques concentrés H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, l'acide nitrique HNO<sub>3</sub> concentré et la soude NaOH ne peuvent pas attaquer les films d'oxyde d'étain déposés sur le silicium ou le verre.

Une attaque chimique des films SnO<sub>2</sub> déposés sur du verre avec l'acide fluorhydrique cause le détachement des films du substrat. Cela peut s'expliquer par l'attaque du verre par le HF.

D'après les études de la référence [2], la méthode utilisée pour une attaque chimique de l'oxyde d'étain est la réduction de ce dernier dans une solution d'acide sulfurique en présence de grenaille de zinc.

### III.6 Le dépôt du SnO<sub>2</sub> en couches minces

On peut obtenir des couches minces de SnO<sub>2</sub> en utilisant différentes techniques de fabrication telles que la technique de déposition chimique en phase vapeur (CVD), le spray pyrolyse et la pulvérisation cathodique.

Chaque technique de fabrication présente des paramètres qui doivent être optimisés pour avoir une couche mince de SnO<sub>2</sub> pouvant assurer une bonne conductivité électrique et donnant des propriétés optiques les meilleurs possibles.

#### III.6.1 Le spray pyrolyse

C'est une technique qui consiste à projeter une solution contenant les éléments qu'on veut déposer sur un substrat chauffé. La solution atteint la surface du substrat, par l'action d'un gaz propulseur (azote), en forme de gouttelettes où elles se décomposent ; les éléments réagissent endothermiquement et ils se déposent comme un film mince, tandis que les espèces volatiles s'évaporent.

Les paramètres essentiels d'un système spray qui conditionnent les propriétés des dépôts et de la structure à réaliser sont :

- distance substrat-jet.
- taille d'orifice du jet.
- température du substrat.
- vitesse du jet et la nature de la solution à pulvériser (spray).

En dépit d'une extrême dépendance des paramètres de dépôt par rapport aux conditions technologiques, le dépôt par spray peut se transposer aisément à l'échelle industrielle.

La configuration du spray peut être horizontale ou verticale, le substrat peut être statique ou rotatoire et le flux de la solution peut être dirigé par gravité ou bien forcé par la pression d'un gaz. Un schéma du dispositif est représenté sur la figure 9 suivante:

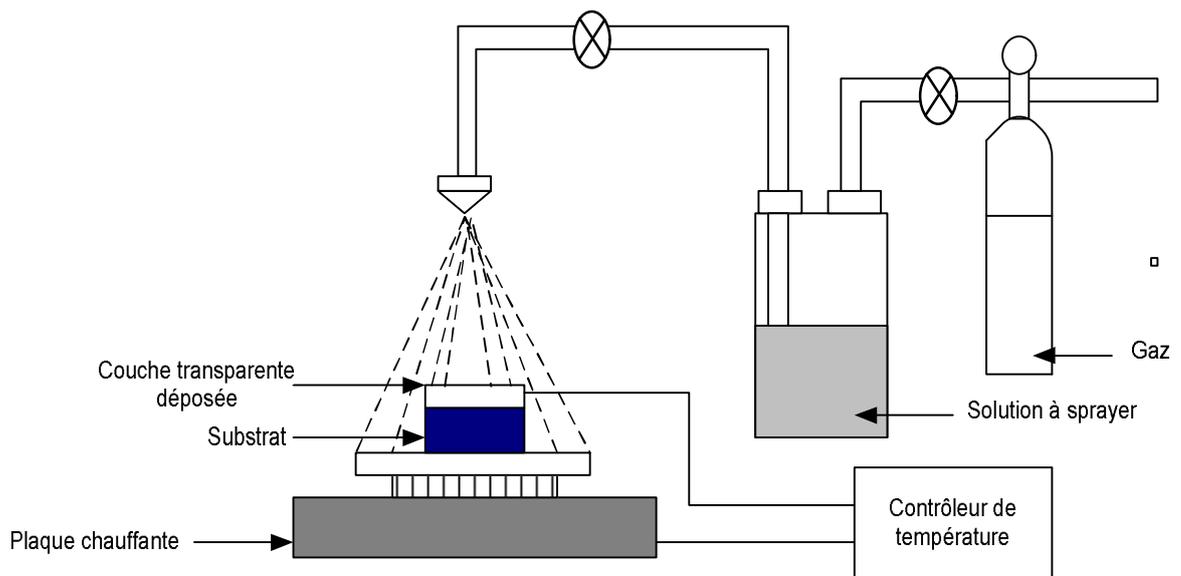
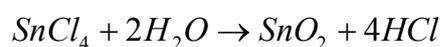


Figure 9 : schéma de dispositif spray.

Le fonctionnement de ce dispositif est illustré pour le cas d'un dépôt d'une couche mince semiconductrice d'oxyde d'étain par la réaction chimique suivante ayant lieu dans une plage de température entre 300 et 500°C [22] :



L'intérêt de cette méthode est sa simplicité et son faible coût matériel ainsi qu'un bon contrôle des conditions de dépôt (température du substrat, concentration de la solution de départ, la distance substrat-orifice). Elle présente l'avantage de réaliser des dépôts sur de grandes surfaces.

Le dopage des films obtenus peut se faire, dans le cadre de la même opération, par l'ajout du dopant (en général du Fluor dans le cas du SnO<sub>2</sub>) à la solution à spray.

### **III.6.2 Le dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition CVD)**

Cette technique est l'une de plus utilisées pour le dépôt de couches minces d'oxydes métalliques.

Le matériau est obtenu à partir de précurseurs gazeux qui réagissent sur le substrat. Cette technique consiste à mettre en composé volatile le matériau à déposer avec la surface du substrat. Ce dernier est chauffé pour fournir l'énergie d'activation nécessaire au déclenchement de la réaction de dépôt et aussi pour permettre une mobilité suffisante des espèces.

On provoque alors une ou plusieurs réactions chimiques donnant lieu au moins à la formation d'un produit solide ; les autres produits de la réaction doivent être gazeux afin d'être éliminés.

#### **III.6.2.1 Le dépôt CVD sous pression atmosphérique (APCVD)**

Le dépôt CVD sous pression atmosphérique se fait à l'aide d'un appareillage simple. Un précurseur est entraîné dans le réacteur CVD par un gaz inerte, tel que l'argon ou l'azote. Cette technique présente plusieurs avantages dont des dépôts uniformes et des vitesses de dépôt très importantes. Alors que le travail à des hautes températures limite le dépôt à l'utilisation des substrats qui supportent des températures élevées.

Le point faible de cette technique réside dans une éventuelle contamination du film déposé du fait de travailler à pression atmosphérique. Le schéma d'un réacteur APCVD est représenté sur la figure 10 suivante :

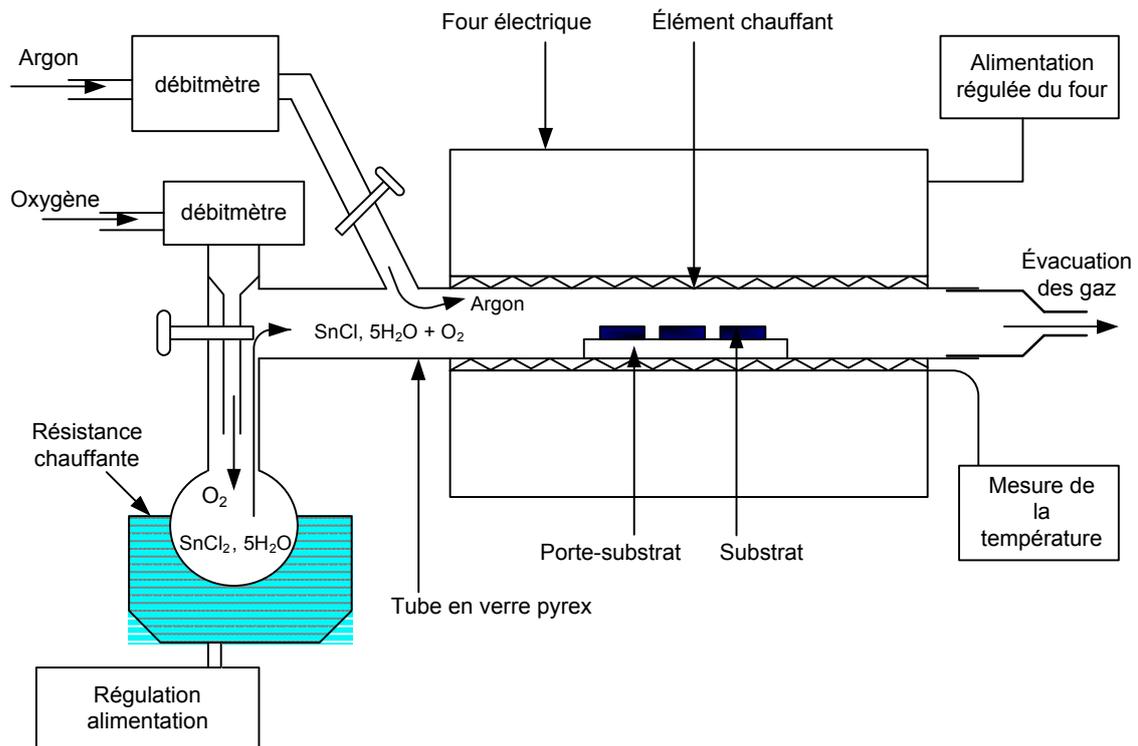


Figure 10 : dépôt de SnO<sub>2</sub> par APCVD schéma de principe [2].

### III.6.2.2 Le dépôt CVD à basse pression atmosphérique (LPCVD)

Un moyen d'abaisser la température d'élaboration est de baisser la pression dans la chambre de dépôt. C'est le cas du procédé LPCVD qui permet aussi d'améliorer l'homogénéité en épaisseur des dépôts et d'éviter les contaminations de l'air.

### III.6.2.3 Le dépôt CVD assisté par plasma (PECVD)

Cette technique présente plusieurs avantages qui sont :

- La gamme de température utilisée est inférieure à 150°C, ce qui permet l'utilisation d'une large gamme de substrat.
- Les vitesses de dépôt permettent une croissance des couches avec une vitesse de 20 à 150 nm/min [11].

Dans le cas du dépôt en phase gazeuse assisté par plasma, c'est le plasma qui va provoquer la décomposition des précurseurs. La réaction de recombinaison entre les espèces réactives ainsi créées conduit à la formation d'un film.

La figure suivante montre un schéma d'installation PECVD

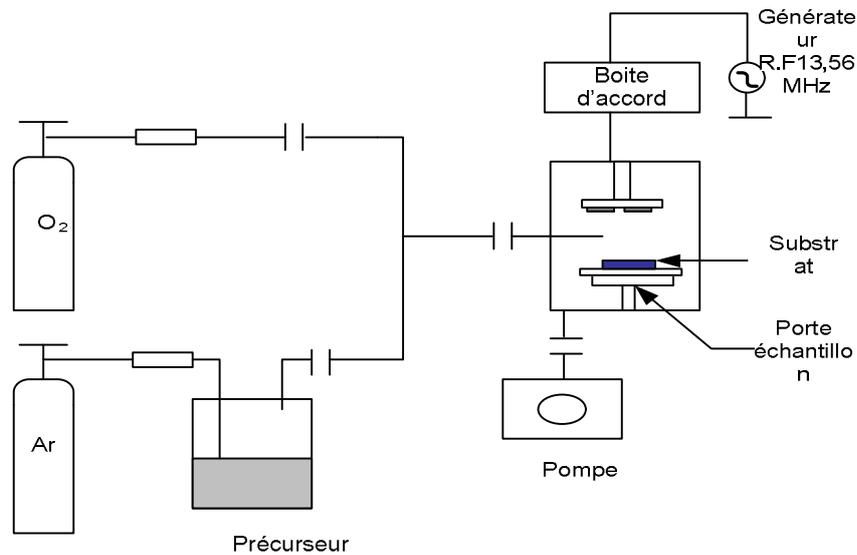


Figure 11 : schéma d'uns installation de PECVD.

### Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les techniques et les matériaux semiconducteurs utilisés pour la fabrication des cellules solaires de type métal–isolant–semiconducteur pour une application du cas Si–SiO<sub>2</sub>–SnO<sub>2</sub>. De nombreuses étapes sont alors suivies afin de mettre en évidence les différentes filières d'élaboration des matériaux de base utilisés tel que le silicium et l'oxyde d'étain.

## Introduction

La structure Métal–Isolant–Semiconducteur (MIS) est très utilisée dans le domaine de la microélectronique. L'intervalle entre le métal et le semiconducteur est rempli par un isolant qui est l'oxyde de Silicium ( $\text{SiO}_2$ ). Cette structure est utilisée dans le domaine des cellules photovoltaïques afin d'augmenter l'efficacité de la conversion.

### I La structure Métal–Semiconducteur (contact Schottky)

La figure 1 représente une structure Métal–Semiconducteur (M-S) correspondant à une barrière de Schottky dans laquelle le semiconducteur est de type N (caractérisé par son gap  $E_g$ , son affinité électronique  $q\chi_s$  et son travail de sortie  $q\phi_s$ ). L'affinité électronique est relative au niveau de Fermi. Le métal a un travail de sortie  $q\phi_m$  (l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à un électron situé sur le niveau de Fermi d'un métal pour l'extraire et l'amener dans le vide).

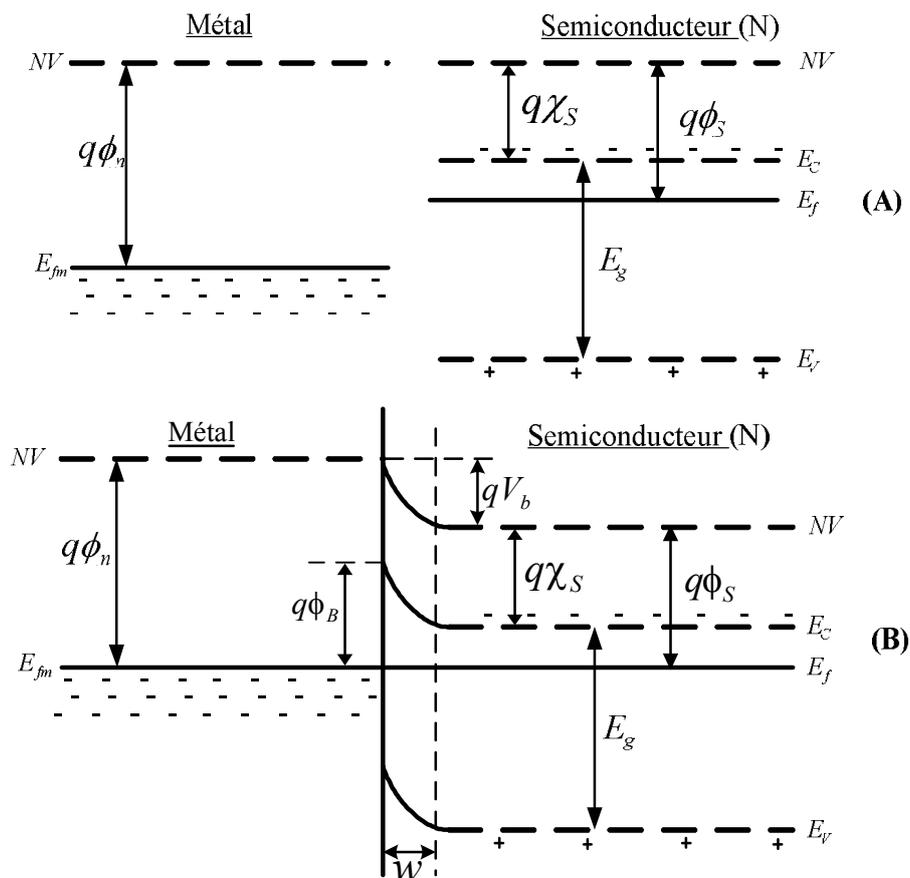


Figure 1 : diagramme énergétique d'un métal et d'un semiconducteur (N) avec  $\phi_m > \phi_s$ , séparés (A) et en contact (B).

Le caractère redresseur (barrière Schottky) est dû au fait que le travail de sortie du métal est supérieur à celui du semiconducteur de type N. Ce cas est choisi car il correspond à celui de la structure  $\text{Si}_N\text{-SnO}_2$  dans laquelle le  $\text{SnO}_2$  dégénéré joue le rôle de métal. Le champ électrique interne de cette structure servira, comme dans le cas de la jonction P-N à séparer les paires électrons-trous créées par les photons incidents.

Lors de la mise en contact des deux matériaux, des électrons quittent le semiconducteur pour s'accumuler à la surface du métal. Le métal se charge négativement alors qu'une zone de charge positive sera créée dans le semiconducteur correspondant aux ions donneurs ionisés. Un champ électrique  $\mathbf{E}$  dirigé du semiconducteur vers le métal apparaît, une barrière de potentiel  $q\phi_B$  se forme, et va alors ralentir la diffusion des électrons vers le métal jusqu'à ce qu'un équilibre thermodynamique soit atteint (les niveaux de Fermi s'alignent).

A l'interface, la barrière de potentiel  $q\phi_B$  (Schottky) sera égale à :

$$q\phi_B = q\phi_m - q\chi_s$$

La zone de déplétion se traduit par la courbure des bandes d'énergies vers le haut et par l'apparition d'une barrière de potentiel  $qV_b$  telle que :

$$qV_b = q\phi_m - q\phi_s$$

## I.1 L'épaisseur (w) de la zone de charge d'espace

### I.1.1 Le potentiel électrique

Concédons la structure métal semiconducteur de type N avec  $\phi_m > \phi_s$ . En négligeant les états de surfaces et en supposant que la zone désertée est totalement dépourvue de porteurs majoritaires, la distribution du potentiel sera donnée en intégrant l'équation de Poisson [7]:

$$V(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left( \frac{x^2}{2} - wx \right)$$

$N_D$  : dopage du semiconducteur.

$\epsilon_s$  : permittivité diélectrique du semiconducteur.

### I.1.2 Le champ électrique

Le champ électrique sera égal à :

$$E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s}(x-w)$$

La tension de diffusion peut être calculée de l'équation qui correspond à la différence de potentiel entre la surface du semiconducteur et son volume.

$$V_b = V(x=w) - V(x=0)$$

$$V_b = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} w^2$$

L'expression de la largeur de la zone de charge d'espace s'écrit :

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_b}{qN_D}}$$

## I.2 Mécanisme de transport de charges

### I.1.1 A l'obscurité

Le courant dans la structure Schottky est dû aux porteurs majoritaires (les électrons). Le courant est différent suivant les régions de la structure. A l'interface, il est conditionné par l'émission thermoionique et tunnel. Dans la zone de charge d'espace du semiconducteur, il est régi par le phénomène de diffusion.

### I.2.2 Sous éclaircissement

La figure 2 schématise la séparation des charges qui a lieu proche de l'interface métal-semiconducteur sous illumination. Une paire électron-trou est générée si un photon avec une énergie supérieure à  $E_g$  est absorbé dans le semiconducteur. En raison de la barrière  $q\phi_B$ , les charges vont être séparées, les trous diffusant vers la surface du métal, les électrons diffusant à travers le semiconducteur jusqu'au contact ohmique (situé sous le semiconducteur). En fermant le circuit le photocourant généré peut ainsi être collecté.

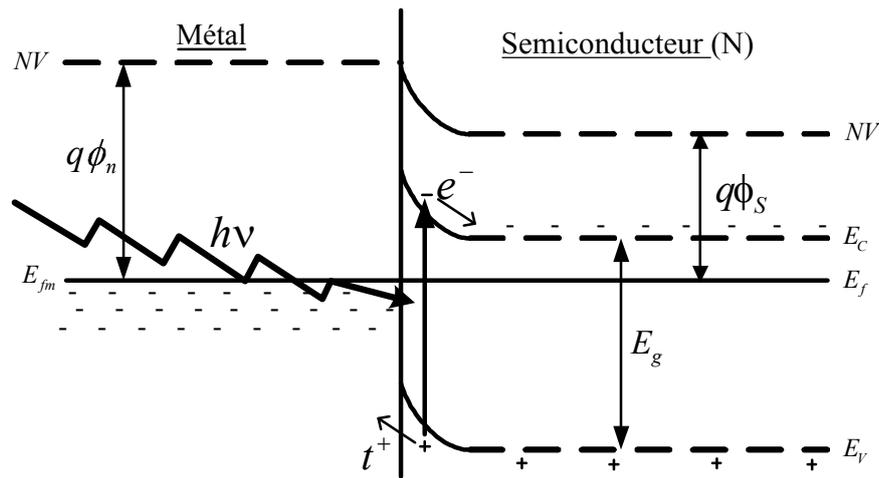


Figure 2 : séparation des charges photogénérées par diffusion.

Le fait que le courant d'obscurité est dû aux porteurs majoritaires implique qu'il est relativement fort. Ceci entraîne une diminution des performances photovoltaïques des cellules à structure Schottky.

### I.3 Les cellules solaires à hétérojonctions de type M-S à base du silicium et d'oxyde d'étain

L'étude de ce type de structure est limitée au début sur les jonctions Simonocristallin/SnO<sub>2</sub> et Si polycristallin/SnO<sub>2</sub>. Ces dernières années plusieurs efforts ont été effectués dans le but d'améliorer le rendement de conversion photovoltaïque de ce type de structure à base de silicium amorphe (Si amorphe/SnO<sub>2</sub>).

#### I.3.1 Les cellules solaires du type Si monocristallin/SnO<sub>2</sub>

Plusieurs travaux ont porté sur l'étude de l'hétérostructure Si monocristallin/SnO<sub>2</sub> et sur son application comme cellule solaire. La première cellule photovoltaïque Si/SnO<sub>2</sub> a été réalisée en 1967 et son rendement était de l'ordre de 0,1 % [16].

Les paramètres photovoltaïques des cellules Si monocristallin/SnO<sub>2</sub> de taille 2,2 cm<sup>2</sup> des travaux expérimentaux de la référence [2] sont représentés au tableau suivant :

cellules	Orientation du Si	$V_{CO}$ (V)	$J_{CC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ %
SnO <sub>2</sub> -pSi	100	0,10	01	0,3	0,03
SnO <sub>2</sub> -nSi	111	0,41	16	0,6	04

Tableau 1 : paramètres photovoltaïques des cellules solaires Si monocristallin /SnO<sub>2</sub> [2].

### I.3.2 Les cellules solaires du type Si polycristallin/SnO<sub>2</sub>

T. Feng et al [23] ont réalisé la cellule photovoltaïque Si/SnO<sub>2</sub> à partir d'un substrat de silicium polycristallin de type N, la moyenne de la taille des grains de ce polycristallin est de l'ordre de 1mm.

Les paramètres photovoltaïques de cette cellule sont donnés par le tableau suivant :

Paramètres photovoltaïques	$J_{CC}(\text{mA}/\text{Cm}^2)$	$V_{CO}(\text{V})$	FF	$\eta$ (%)
	26,60	0,56	0,68	10,12

Tableau 2 : paramètres photovoltaïques d'une cellule Si polycristallin/SnO<sub>2</sub>.

La faible valeur de la tension de circuit ouvert est due à la résistivité relativement élevée du silicium polycristallin.

### I.3.4 Les cellules solaires du type Si amorphe/SnO<sub>2</sub>

L'hétérostructure Si amorphe/SnO<sub>2</sub> représenté sur la figure 3 est constituée d'un substrat de verre couvert par une couche d'oxyde d'étain dopé au fluor d'épaisseur 0,5 à 1  $\mu\text{m}$ , d'une couche de silicium amorphe hydrogéné a-Si :H et d'une électrode métallique d'épaisseur variant de 1 à 2  $\mu\text{m}$  [24].

La couche de silicium amorphe utilisée dans la structure est de type p-i-n (p-aSi :H/i-aSi :H/n-aSi :H). Elle est déposée sur la couche d'oxyde d'étain dopée au fluor en utilisant un plasma de silane.

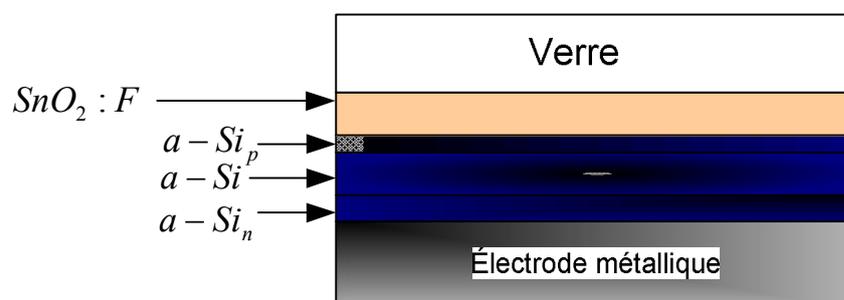


Figure 3 : structure d'une cellule solaire Si amorphe/SnO<sub>2</sub> (p-aSi :H/i-aSi :H/n-aSi :H) [24].

Kaplan [25] a proposé deux opérations pour améliorer le rendement de conversion photovoltaïque des cellules Si amorphe /SnO<sub>2</sub> :

- une bonne texturisation du SnO<sub>2</sub> pour pouvoir piéger les électrons.
- l'introduction d'un contact réflecteur arrière qui sert à réfléchir les porteurs minoritaires.

Les paramètres photovoltaïques d'une cellule Si amorphe:H/SnO<sub>2</sub> avec la texturisation de l'oxyde d'étain et un contact réflecteur arrière sont donnés par le tableau suivant :

Cellule solaire	$V_{co}(V)$	$J_{cc}(mA/Cm^2)$	FF	$\eta$ %
Si amorphe:H/SnO <sub>2</sub>	0,80	15,09	0,69	8,40

Tableau 3 : paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire Si amorphe:H/SnO<sub>2</sub> [25].

## II La structure Métal–Isolant–Semiconducteur

L'amélioration des caractéristiques de la structure MIS est dû au fait que les porteurs doivent traverser la couche isolante par effet tunnel, ce qui diminue le courant d'obscurité et permet d'augmenter ainsi la tension de circuit ouvert.

### II.1 Description des diagrammes de bandes d'énergie

Considérons un métal (travail de sortie  $q\phi_m$ ) et un semiconducteur (travail de sortie  $q\phi_s$ ) situés dans le vide, si les deux systèmes sont isolés, les niveaux de Fermi sont respectivement à la distance  $q\phi_m$  et  $q\phi_s$  du niveau du vide.

Si le métal et le semiconducteur sont reliés électriquement, ils échangent de l'énergie, leurs niveaux de Fermi s'alignent car ils constituent un seul système thermodynamique (figure 4). Il apparaît une barrière de potentiel créée par la différence des travaux de sorties des deux matériaux :

$$qV_b = q\phi_m - q\phi_s$$

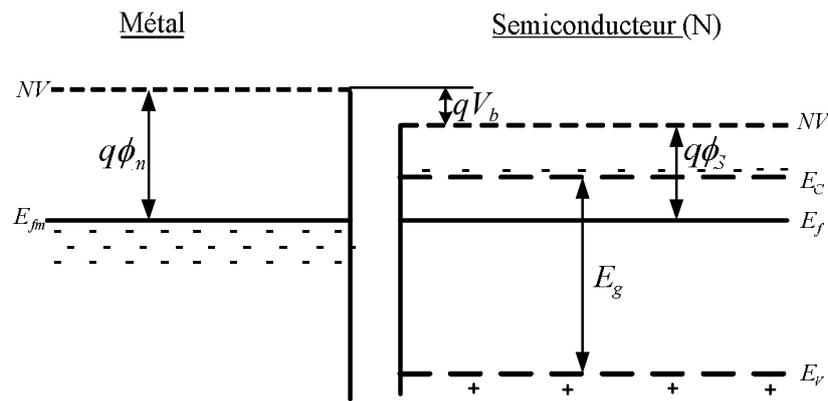


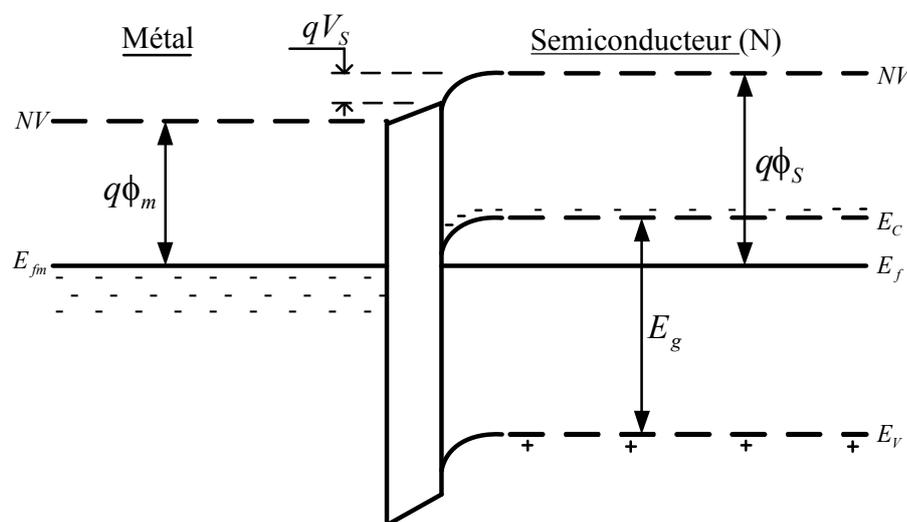
Figure 4: structure Métal–vide–semiconducteur

La structure se comporte comme un condensateur plan dont la tension entre les armatures est constante ( $V_b$ ). La charge dépend de la distance entre le métal et le semiconducteur. Si elle diminue, la valeur de la capacité et donc de la charge augmentent.

La charge dans le métal est égale et de signe opposé à celle du semiconducteur, elle est engendrée par la variation de la densité d'électrons à la surface. Dans le semiconducteur, la charge résulte de la variation de la densité des porteurs (électrons ou trous) sur une profondeur plus importante car la densité d'états est beaucoup plus faible que dans le métal.

Considérons le cas d'un semiconducteur type N :

1.  $q\phi_m < q\phi_s$  ( $V_b < 0$ ) : il apparaît une charge positive dans le métal (départ d'électrons de la surface) et une charge négative dans le semiconducteur (accumulation d'électrons), les bandes d'énergie se courbent vers le bas.

Figure 5: diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS. Cas  $q\phi_m < q\phi_s$

$V_s$  : le potentiel à l'interface isolant–semiconducteur.

- $q\phi_m = q\phi_s$  : la tension de diffusion est nulle, aucune charge n'apparaît, les bandes d'énergie restent plates.

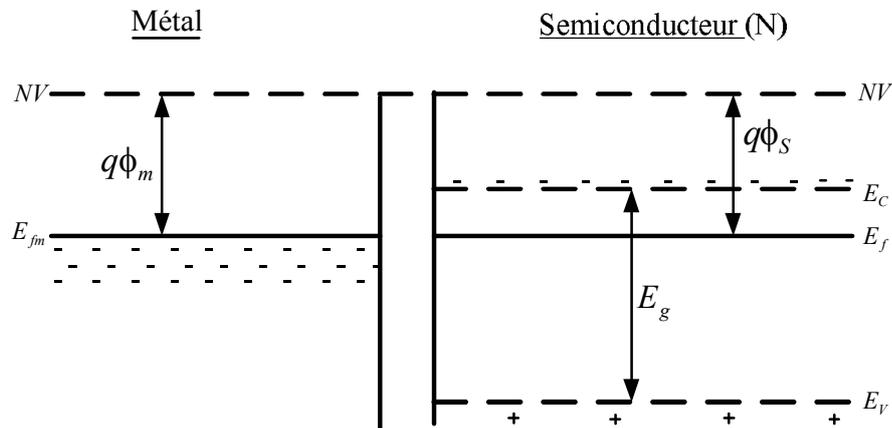


Figure 6 : diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS. Cas  $q\phi_m = q\phi_s$

- $q\phi_m > q\phi_s$  ( $V_b > 0$ ) : la charge positive du semiconducteur résulte du départ d'électrons de la surface laissant des ions donneurs non compensés. Les bandes d'énergies se courbent vers le haut et la bande de valence se rapproche du niveau de Fermi dans la zone de charge d'espace.

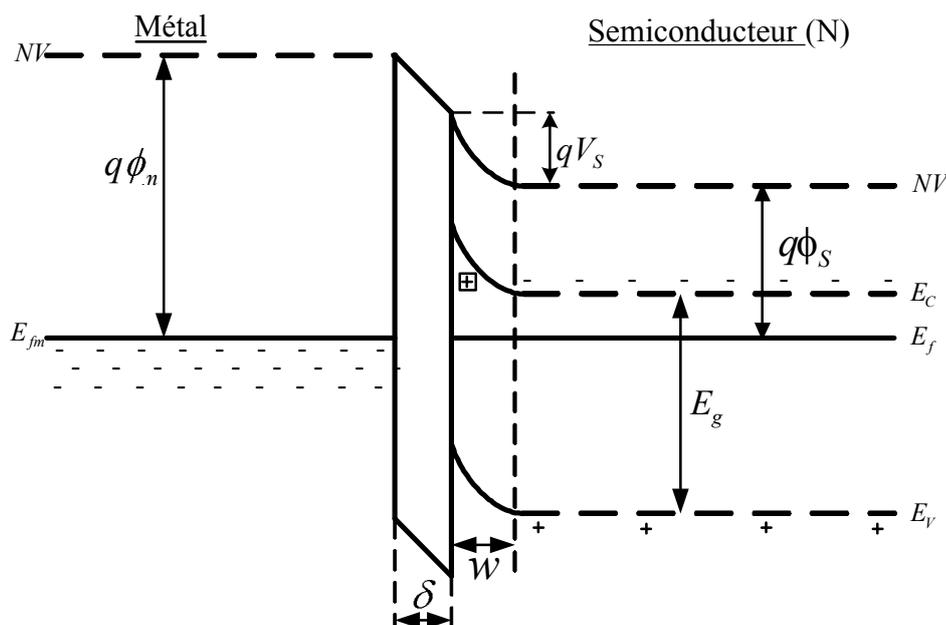


Figure 7 : diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS. Cas  $q\phi_m > q\phi_s$

4.  $q\phi_m \gg q\phi_s$  : le déficit en électrons, en conséquences, la densité des trous augmente ( $np = n_i^2$ ). Lorsque  $p$  devient plus grand que  $n_i$ , le semiconducteur est de type P au voisinage de la surface, on obtient le régime d'inversion.

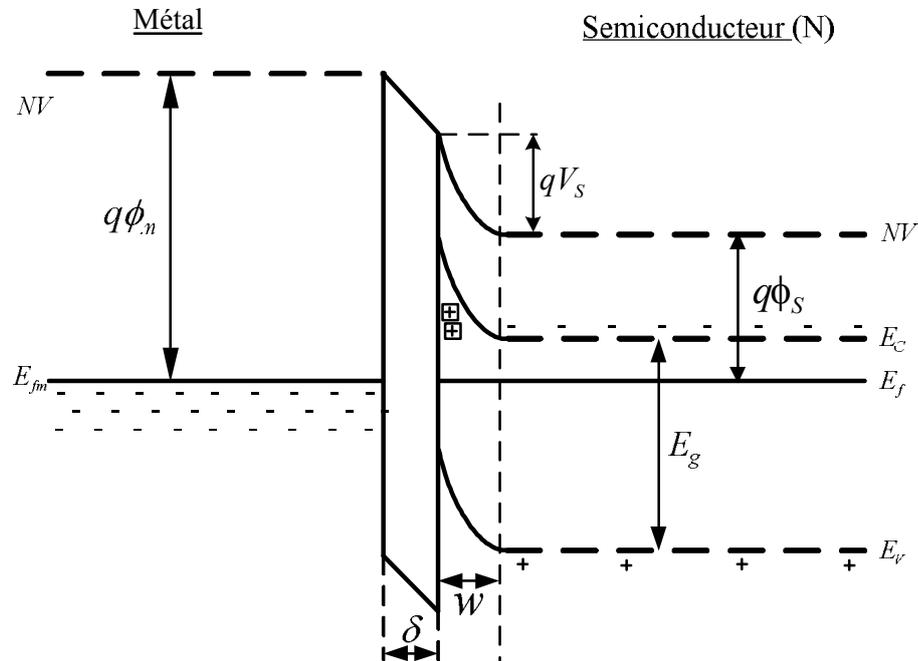


Figure 8 : diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS. Cas  $q\phi_m \gg q\phi_s$

5.  $q\phi_m \gg \gg q\phi_s$  : Si  $n < n_i < N_D < p$ , le semiconducteur est plus de type P à l'interface qu'il est de type N en profondeur, c'est le régime de forte inversion.

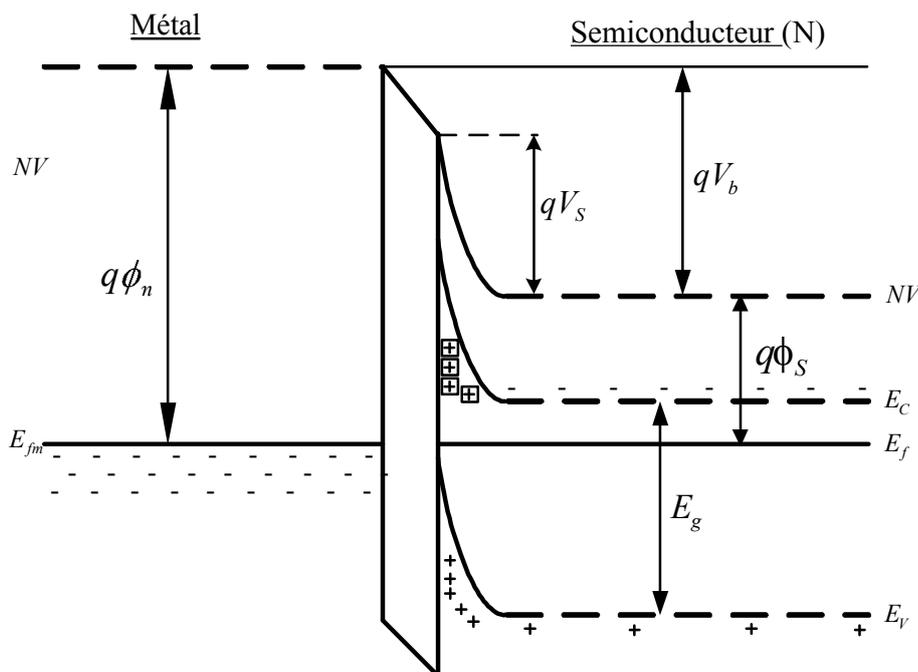


Figure 9 : diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS. Cas  $q\phi_m \gg \gg q\phi_s$

## II.2 Cas de la structure Si–SiO<sub>2</sub>–SnO<sub>2</sub>

L'utilisation de l'oxyde d'étain dans cette structure est dû au fait qu'elle ait un comportement MIS, qui dérive des propriétés suivantes :

- L'oxyde d'étain est un semiconducteur à large bande interdite ( $gap > 3eV$ ) de type N dégénéré.
- Il agit comme une fenêtre vis-à-vis du spectre solaire.
- Une fine couche d'oxyde isolante SiO<sub>2</sub> interfaciale existe toujours entre le Silicium et l'oxyde d'étain.

### II.2.1 Diagrammes des bandes d'énergie d'une structure Si–SiO<sub>2</sub>–SnO<sub>2</sub>

La réalisation de cette structure consiste en premier lieu à oxyder thermiquement la surface du semiconducteur (Si) pour fournir un isolant (oxyde de Silicium SiO<sub>2</sub>) et de déposer l'oxyde d'étain par la suite.

Le Si de type N est caractérisé par son gap  $E_g = 1,12eV$ , un travail de sortie  $\phi_s$  et une affinité électronique  $\chi = 4,05eV$  [26].

Le SnO<sub>2</sub> a un travail de sortie  $\phi_m = 4,85eV$ .

Si les deux systèmes sont isolés, les niveaux de Fermi sont respectivement à la distance  $q\phi_m$  et  $q\phi_s$  du niveau du vide.

Dans le cas de notre structure  $q\phi_m > q\phi_s$  ( $V_b > 0$ ), cela engendre une charge positive du côté semiconducteur qui résulte du départ des électrons de la surface laissant des ions donneurs non compensés. Les bandes d'énergie se courbent vers le haut et la bande de valence se rapproche du niveau de Fermi dans la zone de charge d'espace.

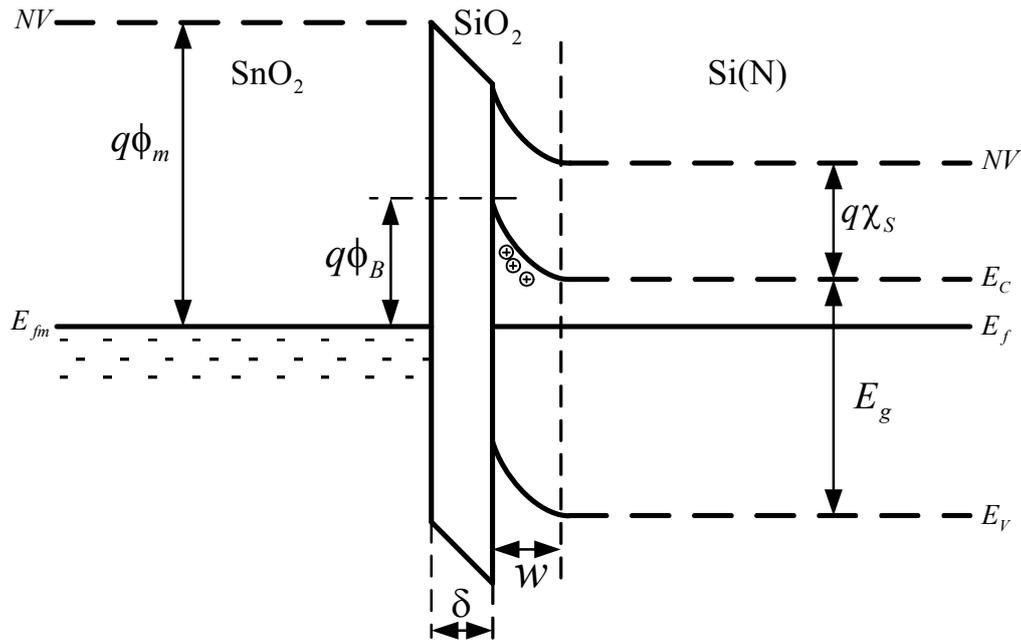


Figure 10 : diagramme de bande d'énergie de la structure Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> à l'équilibre thermodynamique.

## II.2.2 L'étude des courants

### II.2.2.1 A l'obscurité

A l'obscurité, la densité de courant est la somme des contributions suivantes :

$$J = J_{te} + J_{diff} + J_p + J_{sh} + J_{rec}$$

$J_{te}$  : courant dû aux électrons qui se déplacent par effet tunnel de la bande de conduction du silicium vers le SnO<sub>2</sub> (courant d'émission thermoïonique).

$J_{rec}$  : courant de recombinaison dans la région de déplétion du silicium.

$J_{diff}$  : courant de diffusion des porteurs minoritaires.

$J_p$  : courant des trous qui passent par effet tunnel de la bande de valence du SnO<sub>2</sub> à celle du Si.

$J_{sh}$  : courant dû aux trous traversant par effet tunnel de la bande de valence du Si à travers les états d'interface vers la bande de conduction du SnO<sub>2</sub>.

Comme les densités des courants  $J_{rec}$ ,  $J_p$  et  $J_{sh}$  sont négligeables, devant celle  $J_{te}$  et  $J_{diff}$ ,

l'équation devient :

$$J = J_{te} + J_{diff}$$

Soit

$$J = J_{01} \left[ \exp\left(\frac{eV}{n_1 kT}\right) - 1 \right] + J_{02} \left[ \exp\left(\frac{eV}{n_2 kT}\right) - 1 \right]$$

$n_1$  et  $n_2$  : coefficients d'idéalité.

Le premier terme de l'équation correspond au processus thermoïonique et le second au processus de diffusion.

Dans le cas d'une barrière Schottky,  $J_{01}$  et  $J_{02}$  sont données par les expressions :

$$J_{01} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right)$$

$$J_{02} = \frac{P_n q D_p}{L_p}$$

Avec

$L_p$  : longueur de diffusion des trous.

$D_p$  : constante de diffusion des trous.

$P_n$  : concentration des trous.

L'introduction de la couche isolante d'épaisseur  $\delta$  réduit les densités de courant  $J_{01}$  et

$J_{02}$  de la façon suivante :

$$J_{01} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp(-\delta \sqrt{q\phi_T})$$

$$J_{02} = \frac{P_n q D_p}{L_p} \exp\left(\frac{q\gamma}{kT}\right)$$

Avec

$$\gamma = (E_{fm} - E_{fp})_{x=0}$$

$q\phi_T$  : hauteur de barrière moyenne due à la couche d'oxyde  $\delta$ .

$\phi_B$  : hauteur de la barrière de potentiel métal–semiconducteur

Pour la structure MIS l'expression de la densité de courant  $J$  à l'obscurité devient :

$$J = \left[ A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp(-\delta \sqrt{q\phi_T}) \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_1 kT}\right) - 1 \right] \right] + \left[ \frac{P_n q D_p}{L_p} \exp\left(\frac{q\gamma}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_2 kT}\right) - 1 \right] \right]$$

II.2.2.2 Sous éclairement

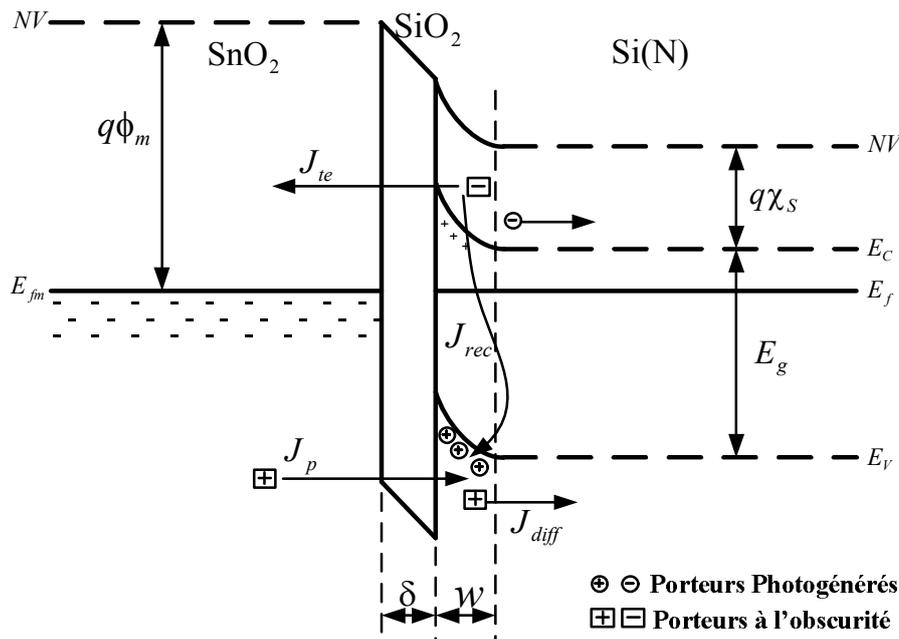


Figure 11 : diagramme de bande d'énergie de la structure Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> sous éclairement [2].

Lorsque la cellule est éclairée, les photons d'énergie suffisante créent des paires électrons-trous (e<sup>-</sup>, t<sup>+</sup>). Le champ électrique qui règne dans la région de déplétion accélère les électrons photogénérés à l'intérieur du semiconducteur et les trous photogénérés à l'interface isolant-semiconducteur créant ainsi un photocourant  $J_L$ .

La densité de courant devient alors :

$$J = J_{te} + J_{diff} - J_L$$

où  $J_{te} + J_{diff}$  est la densité de courant à l'obscurité.

L'intérêt majeur de la couche isolante est de réduire le courant inverse de saturation, permettant ainsi l'augmentation de la tension de circuit ouvert.

Dans le cas général, le processus thermoïonique domine le mécanisme de courant dans les structures métal–isolant–semiconducteur. Une estimation des valeurs des composantes thermoïonique  $J_{01}$  et de diffusion  $J_{02}$  a été faite par A.K.GOSH et Al, les valeurs suivantes ont été obtenues [2]:

$$J_{01} = 10^{-6} \text{ à } 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \text{ et } J_{02} = 10^{-11} \text{ à } 10^{-12} \text{ A/cm}^2.$$

Ainsi

$$J_{01} \gg J_{02} \text{ donc } J_0 = J_{01} + J_{02} \approx J_{01}$$

$J_0$  sera donnée par l'expression :

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(-\delta\sqrt{q\phi_T}\right)$$

La densité de courant total  $J$  devient :

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(-\delta\sqrt{q\phi_T}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_1 kT}\right) - 1 \right]$$

### II.2.3 La barrière de potentiel $q\phi_B$ pour une structure MIS

Dans une structure métal–semiconducteur, la hauteur de la barrière Schottky  $\phi_B$  est constante, mais dans une structure MIS la présence d'états de surface dans l'isolant peut faire varier la valeur de  $\phi_B$ . Dans une telle structure, elle sera donnée par :

$$\phi_B = \frac{1}{n_0} (\phi_m - \chi_s) + \left(1 - \frac{1}{n_0}\right) (E_g - \phi_0)$$

où

$$n_0 = 1 + \frac{qD_{it}\delta}{\varepsilon_1\varepsilon_0}$$

$\varepsilon_1$  : permittivité diélectrique du  $\text{SnO}_2$ .

$\varepsilon_0$  : permittivité diélectrique du vide.

$D_{it}$  : densité des états de surface.

$\phi_0$  : niveau mesuré à partir du haut de la bande de valence à celui où les états de surface sont sensés maintenir une neutralité de charge.

### II.2.4 La tension de circuit ouvert

En écrivant  $J = 0$ , nous obtenons  $J_L = J_{CC}$  et l'équation de la tension de circuit ouvert sera donnée par l'expression suivante :

$$V_{CO} = \frac{nkT}{q} \left[ \ln \left( \frac{J_L}{A^* T^2} \right) + \frac{q\phi_B}{kT} + \delta \sqrt{q\phi_T} \right]$$

Il est clair dans cette équation, que la présence d'une fine couche isolante entre le métal et le semiconducteur peut améliorer de façon considérable les performances de ce type de cellules photovoltaïques, principalement en augmentant la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ .

### II.3 Les cellules solaires de type MIS à base du silicium et d'oxyde d'étain

D'après les travaux de A.K. Gosh et al [27], l'introduction d'une couche isolante de SiO<sub>2</sub> entre le silicium monocristallin et l'oxyde d'étain améliore les paramètres photovoltaïques des cellules Si monocristallin/SnO<sub>2</sub>.

La tension de circuit ouvert optimale obtenue, correspond à une épaisseur d'oxyde  $\delta = 20 \text{ \AA}$  [6].

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la structure Métal–oxyde–semiconducteur, et nous l'avons appliqué pour le cas des cellules de type Si–SiO<sub>2</sub>–SnO<sub>2</sub>. La présence de la couche isolante dans cette structure engendre la diminution du courant d'obscurité et l'augmentation de la tension de circuit–ouvert.

## Introduction

L'efficacité des cellules photovoltaïques dépend considérablement de la fréquence du rayonnement solaire incident. Le spectre AM<sub>1,5</sub> qui correspond aux applications photovoltaïques terrestres se présente en pratique lorsque le ciel est très clair. Dans ce cas, l'intensité du rayonnement est toujours inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup> à cause des atténuations qui sont dues à la poussière et aux molécules de l'atmosphère. Un facteur de normalisation est donc appliqué pour ramener le spectre à la puissance globale voulue de S=1000 W/m<sup>2</sup> [28].

### I. L'absorption du Silicium

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  d'un matériau représente la quantité de photons absorbée lors de la traversée de ce matériau par la lumière. Il sera donné par la relation [29] :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \left[ \text{cm}^{-1} \right]$$

où k est le coefficient d'extinction.

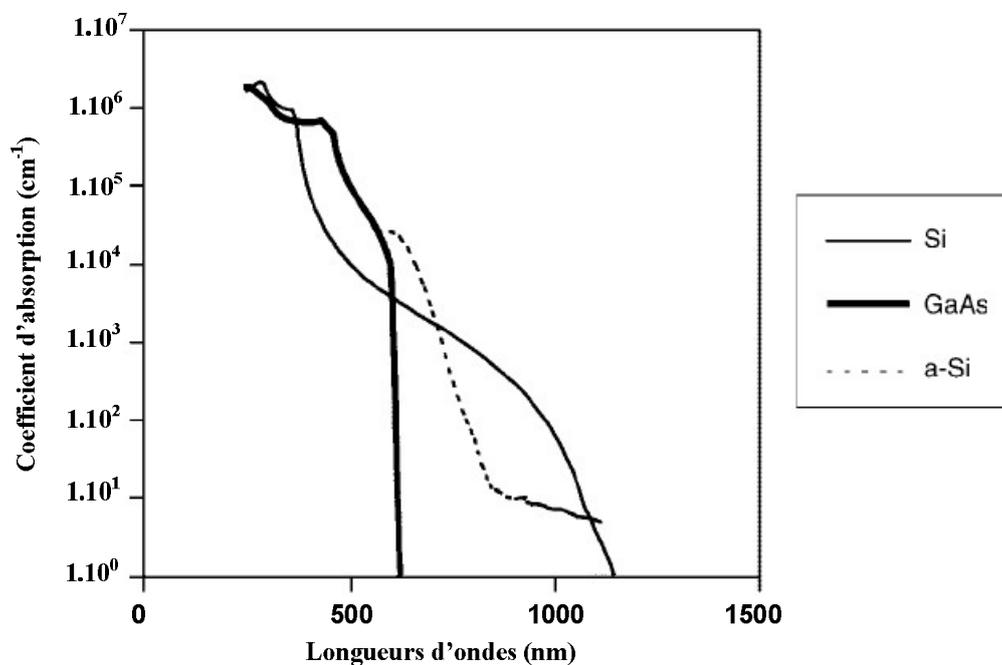


Figure 1 : coefficient d'absorption du silicium, du GaAs et du silicium amorphe en fonction de la longueur d'onde [30].

Le coefficient d'absorption du silicium, en le comparant avec d'autres matériaux tel que l'Arséniure du Gallium (GaAs) et le silicium amorphe [30] se caractérise par la grande marge de valeurs qu'il peut prendre dans la gamme des longueurs d'ondes notamment le visible (figure 1). Ce facteur est très important dans le domaine des cellules solaires.

Lorsque le coefficient d'absorption est nul, les photons peuvent traverser complètement le matériau. Il sera dit, alors, transparent aux longueurs d'onde du rayonnement incident.

Le silicium peut être transparent au-delà de l'infrarouge, à une longueur supérieure à 1,1  $\mu\text{m}$  [30].

La courbe du coefficient d'absorption que nous avons obtenue par simulation dans le cas du Silicium en fonction de la longueur d'onde est donnée par la figure 2.

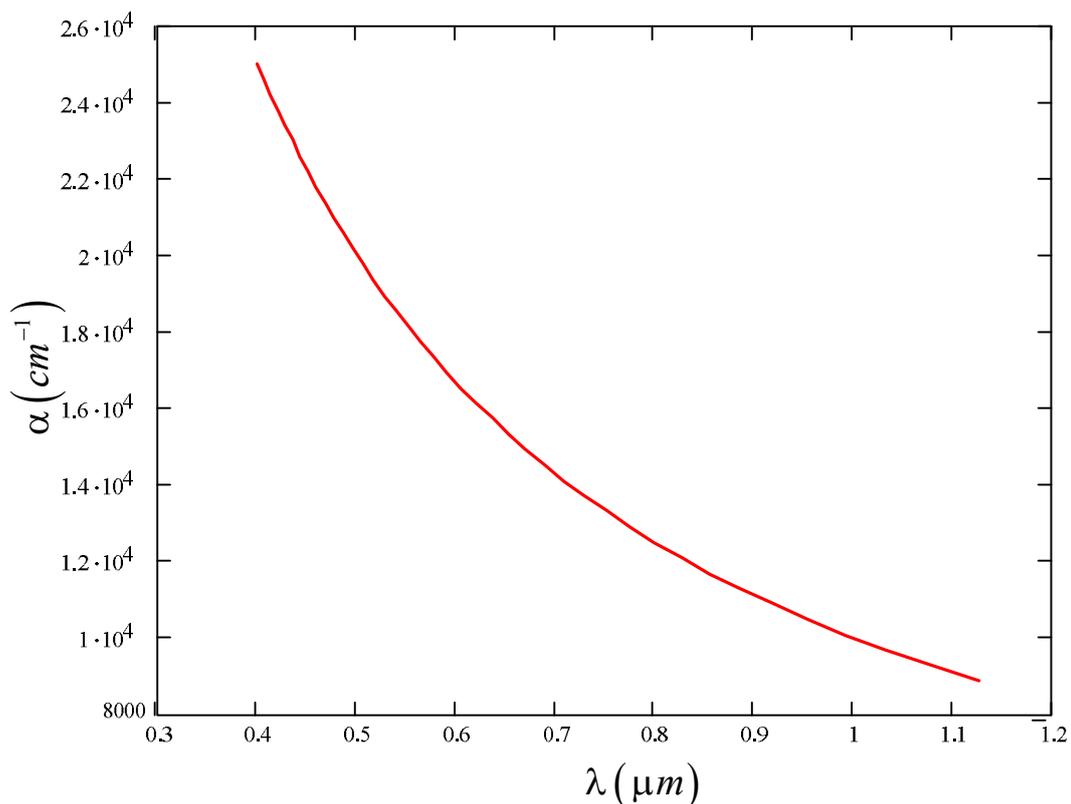


Figure 2 : coefficient d'absorption du Silicium en fonction de la longueur d'onde.

Dans la gamme du visible et du proche infrarouge le coefficient d'absorption décroît en fonction des longueurs d'ondes.

Lorsque la lumière arrive sur la surface d'une cellule solaire, une partie des photons sera réfléchi par la surface, et le reste sera transmis.

Nous avons vu que la réflectivité des surfaces des cellules solaires dépend de la texture de ces dernières et du coefficient de réflexion du matériau au moyen des couches antireflets.

Dans le cas de la cellule solaire utilisée dans ce travail Si(N)-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>, le rayonnement incident traverse en premier lieu le métal qui est représenté par l'oxyde d'étain ; un taux de 20 % du rayonnement sera réfléchi [21].

Le coefficient de réflexion dans le cas de l'interface Si/SiO<sub>2</sub> à l'incidence normale sera égal à 0,10 [29]. Cela entraîne une réflexion totale entre le métal et l'interface Si/SiO<sub>2</sub> d'un taux global de 30 %.

Le coefficient de transmission  $T_r$  d'un matériau est le taux de lumière qui sera transmise à travers ce dernier. Il est donné par la relation suivant [31] :

$$T_r = I - R$$

## II. L'irradiation spectrale et le flux spectral

### II.1 L'irradiation spectrale $I_\lambda$

L'irradiation spectrale est la quantité d'énergie en provenance du soleil, reçue par une unité de surface à une longueur d'onde différentielle. Son unité est W/m<sup>2</sup>µm.

### II.2 L'émission spectrale $E_\lambda$

La loi de Planck donne les valeurs de l'émission spectrale  $E_\lambda$  d'un corps noir. Elle est définie par la puissance spectrale rayonnée par unité de surface et par unité de longueur d'onde [30].

Le rayonnement solaire peut être approximé par le rayonnement du corps noir à 5900 K.

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

où

$h$  est la constante de Planck ( $h=6,63.10^{-34} J.s$ )

$$2\pi hc^2 = 3,74.10^{-16} Wm^2$$

$$\frac{hc}{k} = 0,0143 mK$$

L'énergie totale rayonnée par unité de surface du corps noir pour toutes les valeurs des longueurs d'onde est donnée par la référence [10], elle s'écrit comme suit :

$$\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 = 5,66 \times 10^{-8} T^4 \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$T$  : température en Kelvin.

L'irradiation spectrale reçue à partir du soleil en une unité astronomique de distance sera donnée par [30] :

$$I_{\lambda} = E_{\lambda} \frac{S}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda}$$

où  $S$  est la constante solaire, correspondant au spectre AM<sub>1.5</sub>.

$I_{\lambda}$  peut s'écrire alors sous la forme :

$$I_{\lambda} = \frac{6,608.10^{-12}}{\lambda^5 \left( e^{\frac{0,0143}{\lambda T}} - 1 \right) T^4} \left[ \frac{W}{m^2 \mu m} \right]$$

La figure 3 ci-dessous représente les résultats de notre simulation de l'irradiation spectrale en fonction de la longueur d'onde pour le spectre AM<sub>1.5</sub>.

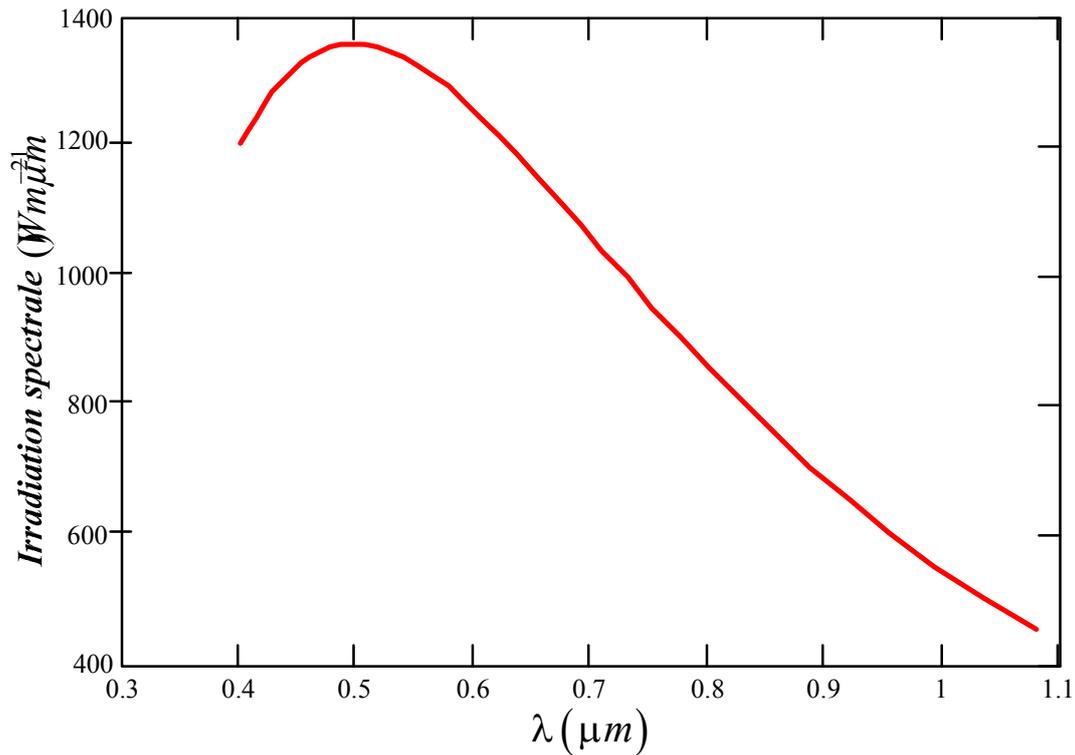


Figure 3 : irradiation spectrale en fonction de la longueur d'onde.

### II.3 Le flux spectral des photons

Le flux spectral des photons reçu sur la surface principale de la cellule solaire est relatif à l'irradiation spectrale et la longueur d'onde. Il sera obtenu en prenant en considération que l'irradiation spectrale est l'énergie par unité de surface et par unité de longueur d'onde. En remplaçant l'énergie d'un photon par  $\frac{hc}{\lambda}$ , l'équation du flux sera [30] :

$$\phi = 10^{20} \frac{I_{\lambda} \lambda}{19,8} \left[ \frac{\text{photon}}{m^2 \mu ms} \right]$$

Cette équation relie directement le flux spectral des photons à l'irradiation spectrale.

Le flux spectral en fonction de la longueur d'onde est donné par la figure 4, résultat de la simulation que nous avons effectuée.

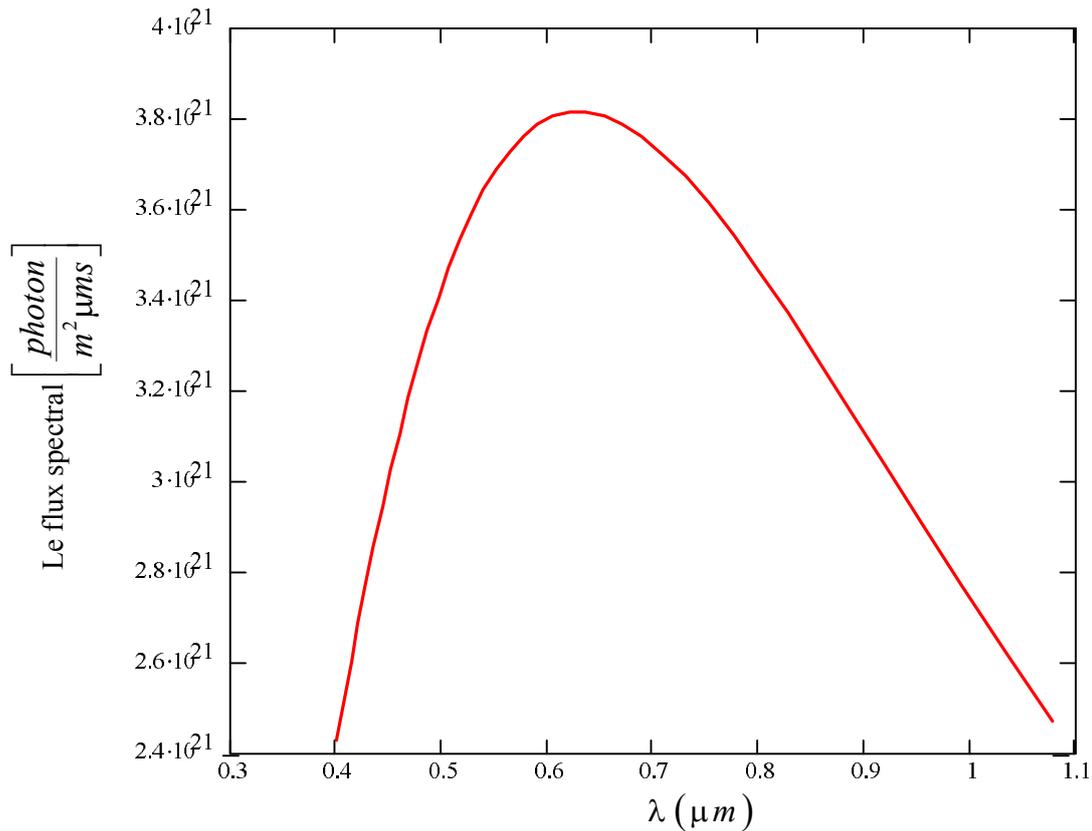


Figure 4 : flux spectral des photons en fonction de la longueur d'onde.

### III. La cellule solaire à structure MIS (Métal-Isolant-Semiconducteur)

La couche « métallique » d'oxyde d'étain utilisée pour réaliser la structure MIS doit être suffisamment mince pour permettre à une quantité importante de la lumière d'atteindre le semiconducteur. Dans les applications photovoltaïques, l'excitation des porteurs à partir du métal vers le semiconducteur contribue à moins de 1% par rapport au photocourant total, et sera par conséquent négligée.

Les courtes longueurs d'onde de la lumière entrant dans le semiconducteur sont principalement absorbées dans la région de déplétion. Les longues longueurs d'onde sont absorbées dans la région neutre du semiconducteur, créant ainsi des paires électrons-trous comme dans une jonction PN.

Le diagramme des bandes d'énergie correspondant à cette cellule est représenté sur la figure 5:

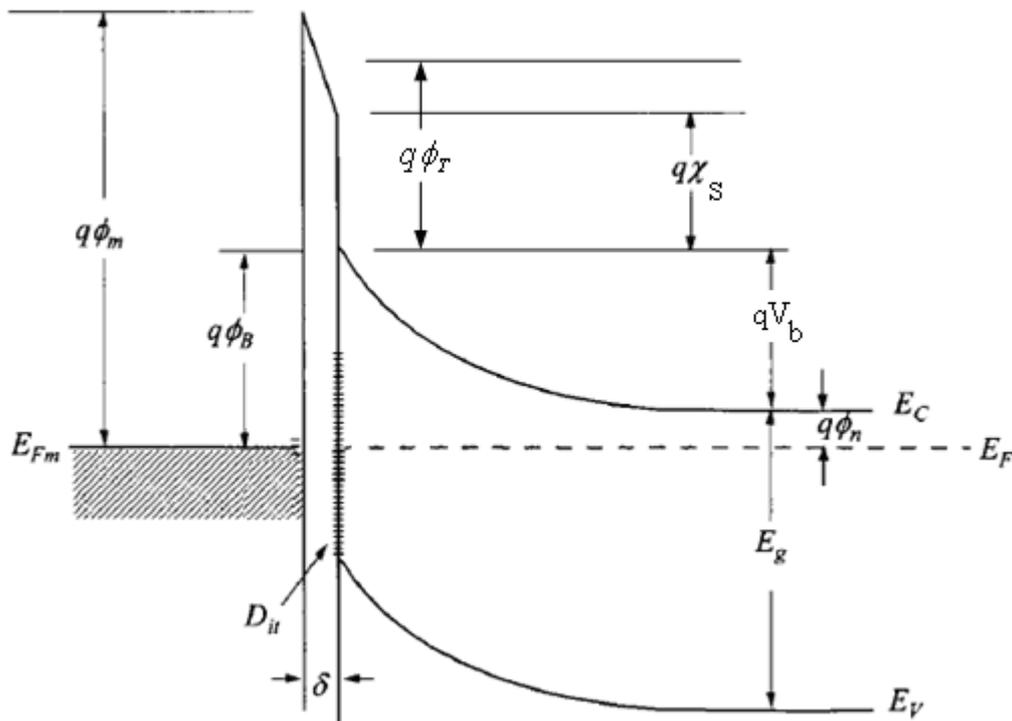


Figure 5 : Diagramme de bandes d'énergie pour une structure MIS.

### III.1 Le courant photogénéré par la cellule solaire

Les deux majeures contributions du photocourant généré dans une structure MIS sont originaires de la région de déplétion et de la région neutre du semiconducteur.

La collection due à la région de déplétion est similaire à une jonction PN, elle conduit à un photocourant [32,33] :

$$J_{dr} = qT_r(\lambda)\phi(\lambda)[1 - \exp(-\alpha w)]$$

où

$T_r(\lambda)$  : coefficient de transmission.

$\alpha(\lambda)$  : coefficient d'absorption.

$\Phi(\lambda)$  : flux du rayonnement solaire.

Le photocourant généré dans la région neutre du semiconducteur est donné par l'équation suivante [32,33]

$$J_n = \frac{q\Phi(1-R)\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \exp[-\alpha w]$$

$$\left[ \alpha L_p - \frac{(S_p L_p / D_p) [\cosh(H' / L_p) - \exp(-\alpha H')] + \sinh(H' / L_p) + \alpha L_p \exp(-\alpha H')}{(S_p L_p / D_p) \sinh(H' / L_p) + \cosh(H' / L_p)} \right]$$

où

$H$  : épaisseur du dispositif.

$H' = H - w$

$w$  : largeur de la région de déplétion.

L'épaisseur de la largeur de la région de déplétion est donnée par l'équation suivante [36]:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_b}{qN_D}}$$

$\varepsilon_s$  : permittivité diélectrique du semiconducteur (pour le Silicium :  $\varepsilon_s = 10^{-10}$  F.m<sup>-1</sup>).

$N_D$  : concentration des impuretés donatrices.

$q$  : unité de la charge électrostatique. ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C).

$V_b$  : différence de potentiel lors de la courbure de la bande conduction à travers le semiconducteur. Elle sera donnée par la relation suivante [34]:

$$qV_b = q\phi_B - q\phi_n$$

où:

$$q\phi_n = E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$

avec

$N_C = 2,8 \cdot 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> à 300 K, est la densité équivalente d'états dans la bande de conduction.

$q\phi_B$  : hauteur de la barrière entre le métal et le semiconducteur.

Dans une structure MIS, pour des dopages  $N_D < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $q\phi_B$  varie en fonction du travail de sortie du  $\text{SnO}_2$  ( $q\phi_m$ ) selon la relation [35] :

$$q\phi_B = 0.27q\phi_m - 0.52$$

avec une densité d'états de surface  $D_{it} = 4.10^{13} / \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$

La densité du photocourant total est donnée par la somme des deux contributions originaires de la région de déplétion et de la région neutre du substrat [32] :

$$J_L = J_{dr} + J_p$$

#### IV. La caractéristique courant-tension de la structure MIS

La cellule solaire à conversion photovoltaïque est caractérisée par la courbe courant-tension. Pour une structure MIS après illumination, elle est donnée par la relation [35] :

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - J_L$$

où  $J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \exp(-\delta\sqrt{q\phi_T})$  est la densité courant de saturation.

$A^*$  : constante effective de Richardson.

$n$  : facteur d'idéalité ( $n=1$ ).

#### V. La tension de circuit ouvert $V_{CO}$

La tension de circuit ouvert est obtenue lorsque la densité de courant total est nulle ( $J=0$ ), soit :

$$V_{CO} = \frac{nkT}{q} \left[ \ln\left(\frac{J_L}{A^* T^2}\right) + \frac{q\phi_B}{kT} + \delta\sqrt{q\phi_T} \right]$$

où :

$\delta$  : épaisseur de la couche d'oxyde.

$q\phi_T$  : elle désigne la hauteur de barrière moyenne en eV due à la couche d'oxyde  $\delta$  lorsque celle-ci est exprimée en  $\text{\AA}$ .

## VI. Résultats de la simulation

### VI.1 Influence du dopage sur les paramètres électriques des cellules solaires à structure MIS

La première étape de notre travail a consisté à modéliser numériquement la densité du photocourant généré par la somme des deux contributions originaires de la région de déplétion et la région neutre du semiconducteur.

Cette densité est simulée en fonction de la longueur d'onde du rayonnement solaire incident pour différents dopages variant de  $1.10^{15}$  à  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Les figures 6, 7 et 8 montrent respectivement les résultats obtenus de la variation des densités des photocourants  $J_{dr}$ ,  $J_p$ , et  $J_L$  :

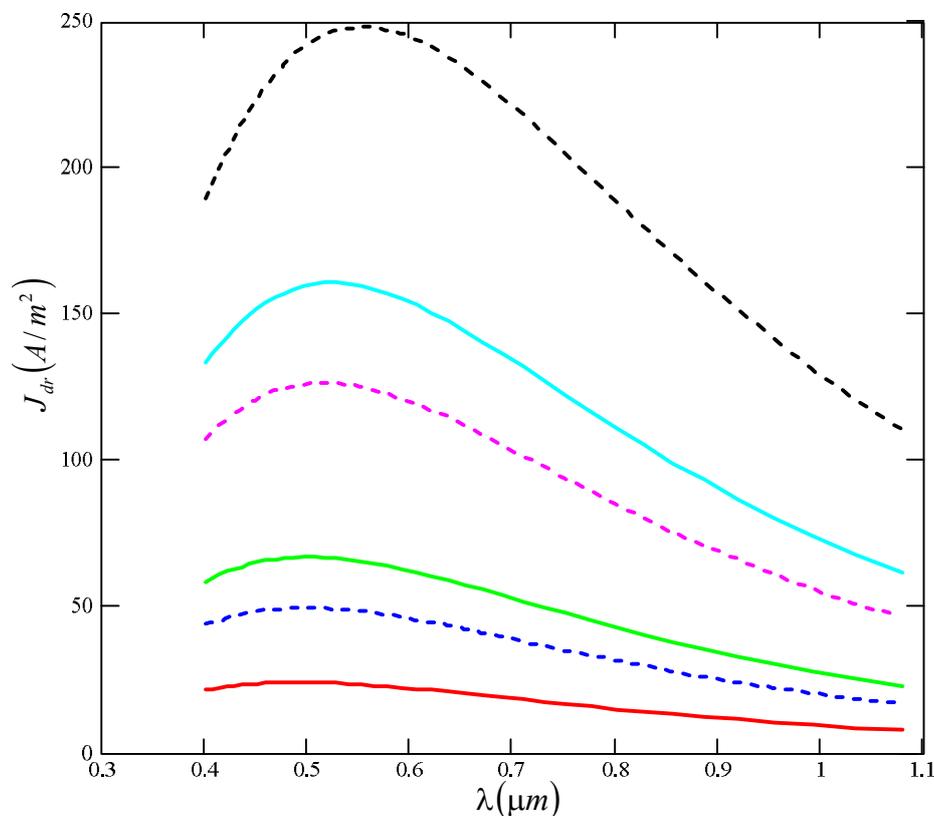


Figure 6 : variations de la densité de courant dans la zone de déplétion en fonction de la longueur d'onde.

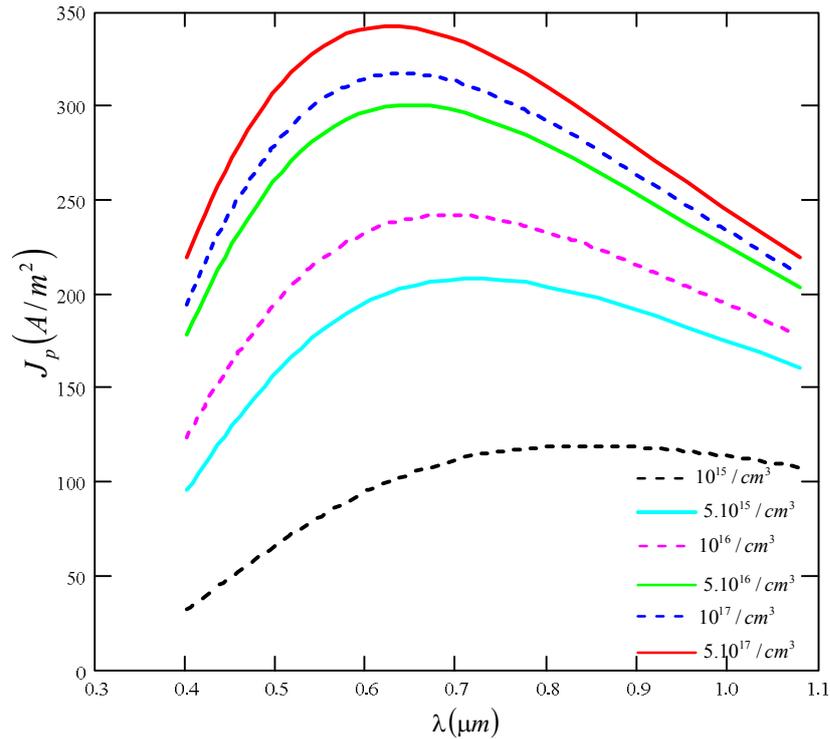


Figure 7 : variations de la densité de courant dans la zone neutre du silicium en fonction de la longueur d'onde.

Les figures 6 et 7 montrent que le photocourant généré suit l'allure du flux solaire incident pour les différents dopages utilisés.

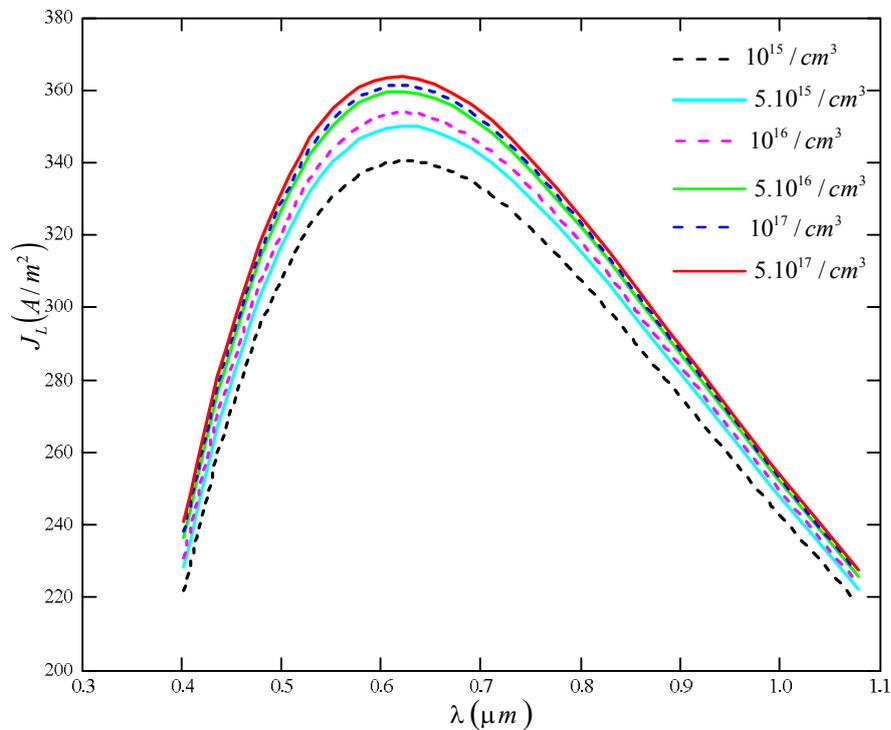


Figure 8 : variations de la densité de courant photogénéré en fonction de la longueur d'onde.

La figure 8 illustre la variation du photocourant total généré par une cellule solaire à structure MIS. Elle montre une augmentation du photocourant lorsque le dopage du substrat augmente.

Pour un dopage de  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$  nous avons enregistré une densité de photocourant maximale de  $363,9 \text{ A/m}^2$ .

## VI.2 Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du spectre solaire pour différents dopages

Les résultats de simulation de la tension  $V_{CO}$  sont obtenus à partir de l'équation caractéristique de la tension de circuit ouvert. Pour une épaisseur optimale de la couche d'oxyde  $\delta = 20 \text{ \AA}$  et une hauteur de barrière  $q\phi_{Bn} = 0,789 \text{ eV}$ , nous avons obtenu les courbes de la figure 9 suivante :

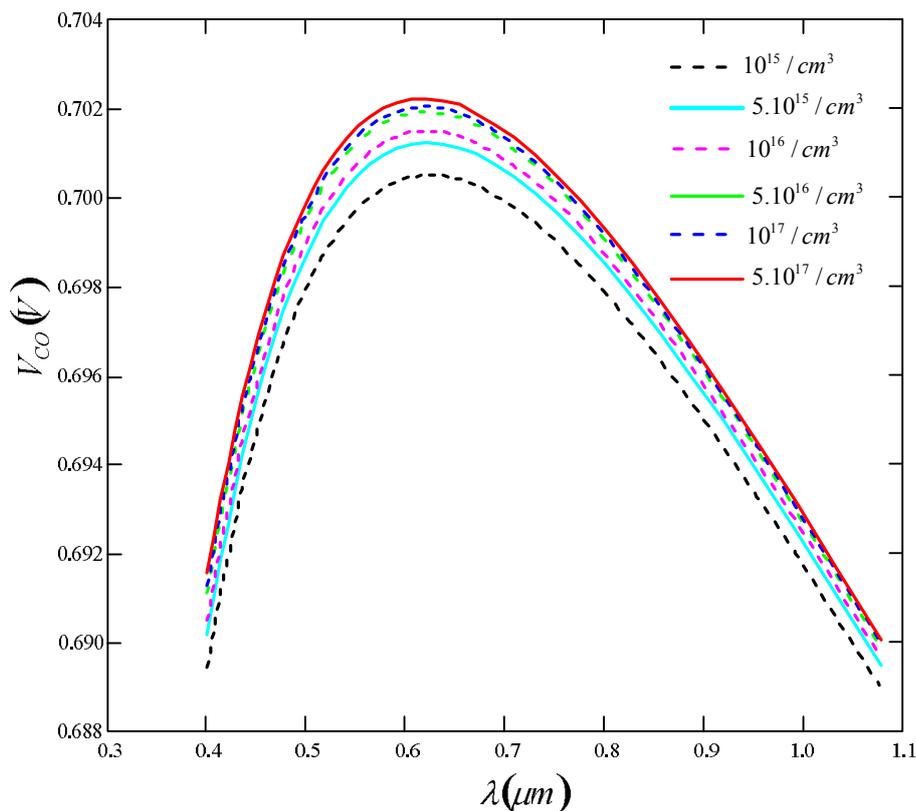


Figure 9 : variations de la tension de circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde.

Avec l'augmentation du dopage, on observe l'augmentation des tensions de circuit ouvert. Pour  $N_D = 5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , nous avons obtenu une tension optimale : sa valeur est de 0,705 Volt.

### VI.3 La caractéristique courant tension

Elle est représentée sur la figure 10 :

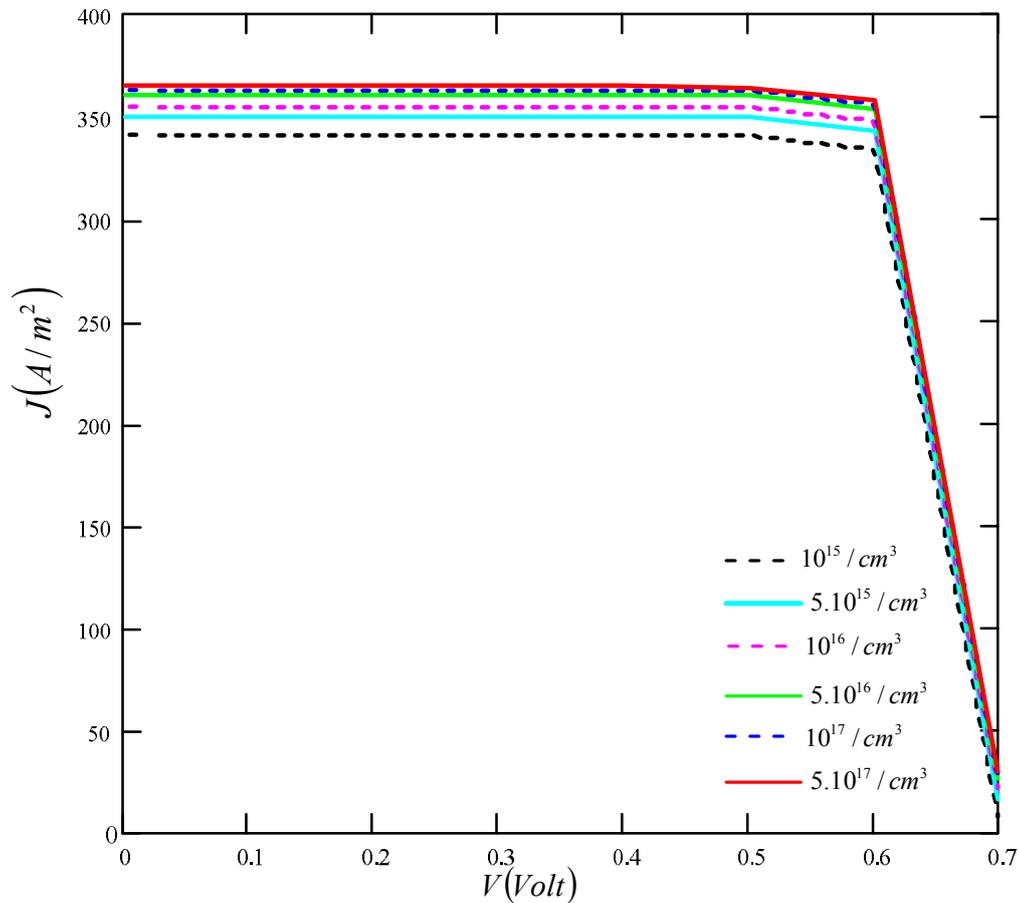


Figure 10 : caractéristiques courant-tension pour des différents dopages.

### VI.4 Le rendement de conversion

Le rendement de conversion est défini par la relation suivante :

$$\eta = FF \frac{I_{CC} V_{CO}}{P_i}$$

où  $FF$  le facteur de forme.

Le tableau ci-dessous nous montre les résultats de la simulation pour les différents paramètres électriques de la cellule solaire type Si(N)-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>.

$N_D(\text{cm}^{-3})$	$J_m(\text{A/m}^2)$	$V_m(\text{V})$	$J_{CC}(\text{A/m}^2)$	$V_{Co}(\text{V})$	$FF$	$\text{Rendement}\%$
$1.10^{15}$	333,8	0,600	340,6	0,702	0,838	20,00
$5.10^{15}$	342,8	0,600	350,1	0,703	0,836	20,60
$1.10^{16}$	346,8	0,600	353,8	0,704	0,835	20,80
$5.10^{16}$	352,8	0,600	359,8	0,705	0,835	21,20
$1.10^{17}$	355,4	0,600	361,7	0,705	0,836	21,30
$5.10^{17}$	357,7	0,600	363,9	0,705	0,837	21,50

Les courbes obtenues par cette modélisation montrent que le rendement de conversion est amélioré lorsque le dopage du substrat augmente.

Cette amélioration est due à l'augmentation de la tension de circuit ouvert et aussi à l'augmentation du courant photolumineux.

Les résultats obtenus sont meilleurs pour un dopage de  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Le rendement de conversion correspondant est égal à 21,50 %,

### Conclusion

Nous avons utilisé la structure MIS (Métal-Oxyde-Semi conducteur), et nous l'avons appliqué pour le cas Si(N)-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>. C'est une structure qui est en régime de déplétion, elle remplit les conditions de son utilisation en tant que cellule solaire. Ce type de cellule présente une augmentation du rendement de conversion photovoltaïque qui est dû à la présence de la couche isolante (SiO<sub>2</sub>).

Les résultats de simulation obtenus dans ce travail ont permis de déterminer l'influence du spectre solaire caractérisé par ces différentes longueurs d'onde sur le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion.

En effet, les paramètres caractérisant la cellule solaire sont proportionnels au spectre solaire incident, et les valeurs optimales sont obtenues pour la longueur d'onde  $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ .

Nous avons également modélisé l'influence du dopage sur les paramètres électriques de la structure. Il a été démontré que lorsque le dopage augmente, le rendement de conversion de la cellule augmente. Les résultats obtenus sont meilleurs pour un dopage de  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Le rendement de conversion enregistré est égal à 21,50 %, avec une tension de circuit ouvert optimale égale à 0,705 V, la densité de courant de court-circuit est de 363,9 A/m<sup>2</sup>.

Le travail réalisé dans ce mémoire a porté sur les simulations numériques des grandeurs caractérisant les cellules solaires à effet photovoltaïque en fonction des divers paramètres électriques caractérisant la structure de base.

Nous avons utilisé la structure Métal–Oxyde–Semiconducteur et nous l’avons appliqué pour le cas Si–SiO<sub>2</sub>–SnO<sub>2</sub>. C’est une structure qui est en régime de déplétion, elle remplit les conditions de son utilisation en tant que cellule solaire. Ce type de cellule présente une augmentation du rendement de conversion photovoltaïque qui est dû à la présence de la couche isolante SiO<sub>2</sub>. L’optimisation des différents paramètres, et ce, pour obtenir le meilleur rendement possible a été menée en tenant compte de la valeur de l’épaisseur de la couche d’oxyde optimisée à 20 Å.

Afin d’optimiser cette structure, nous avons utilisé MATHCAD comme logiciel de calcul et de simulation basé sur un assortiment complet de fonctionnalités de mathématiques appliquées et de calculs dynamiques.

Dans un premier temps nous avons simulé le photocourant total, originaire de la région de déplétion et de la région neutre du substrat en fonction de la longueur d’onde. En effet, le photocourant produit par la cellule est proportionnel au spectre solaire incident et la valeur optimale est obtenue pour la longueur d’onde  $\lambda = 0,6\mu m$ . La valeur optimisée de cette densité de courant est de 36,39 mA/cm<sup>2</sup>.

Nous avons déterminé les variations de la tension de circuit ouvert aux bornes de la cellule en fonction de la longueur d’onde du rayonnement ; la tension optimale obtenue est de 0,705 Volt.

Nous avons également modélisé l’influence du dopage sur le courant de court-circuit ainsi la tension de circuit ouvert. Il est apparu que l’augmentation du dopage améliore l’ensemble des paramètres électriques intervenant dans le rendement de conversion de la cellule solaire ; en effet les courbes de variation aussi bien de la tension de circuit ouvert

que de la densité de courant de court-circuit évoluent dans le même sens que l'évolution des valeurs du dopage du semiconducteur.

Les résultats obtenus sont meilleurs pour un dopage de  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Ainsi, tenant compte des valeurs optimisées obtenues pour la tension de circuit ouvert et de la densité de courant de court-circuit, la structure MIS appliquée au cas Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> permet la modélisation d'une cellule solaire avec un rendement de 21,50 %.

L'optimisation ainsi obtenue ouvre des perspectives à une application à l'étude et la réalisation de cellules basées sur la même structure (MIS) et employant d'autres types de TCO tels que l'oxyde de zinc ZnO et l'oxyde de titane TiO<sub>2</sub> dopés très fortement de façon à pouvoir assurer comme dans le cas du SnO<sub>2</sub> un rôle métallique dans la structure elle-même et de servir de couches antireflets pour la cellule solaire.

**Le logiciel MATHCAD****Application pour une cellule solaire du type MIS, cas du Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>**

Mathcad est un logiciel qui permet de traiter des données numériques et de les représenter graphiquement, sans avoir à manier des outils mathématiques complexes, tout en obtenant des présentations de bonne qualité.

Nous avons utilisé ce logiciel dans notre travail afin de représenter graphiquement les variations des paramètres électriques des cellules solaires du type Métal–Isolant–Semiconducteur tels que la densité de courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la caractéristique courant–tension et le rendement de conversion.

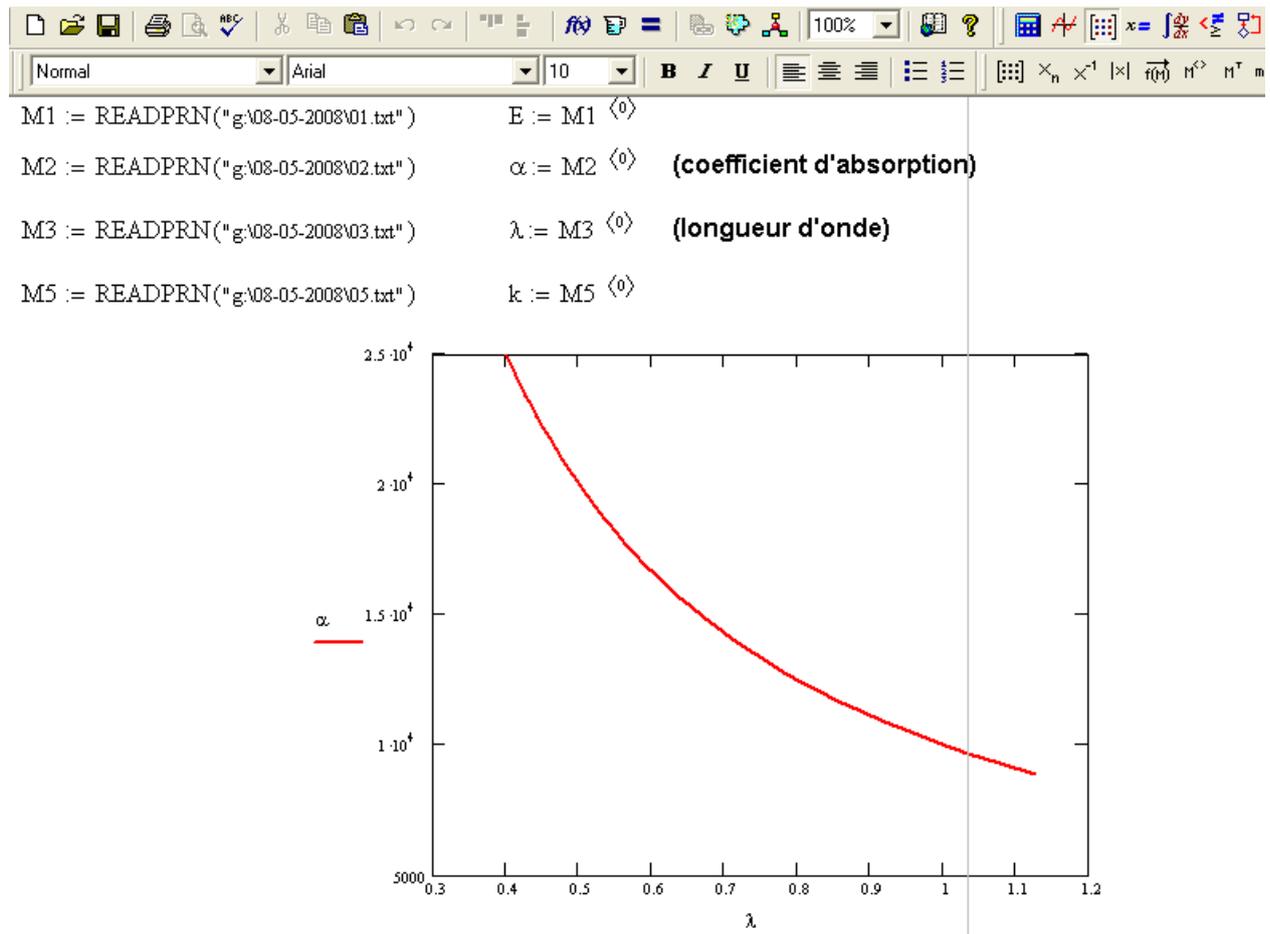
Nous allons illustrer dans cette partie les étapes suivies pour obtenir les différentes courbes représentées dans ce travail.

Le coefficient d'absorption du silicium a été calculé en fonction de la longueur d'onde à base des données expérimentales illustrées dans le tableau suivant [30]:

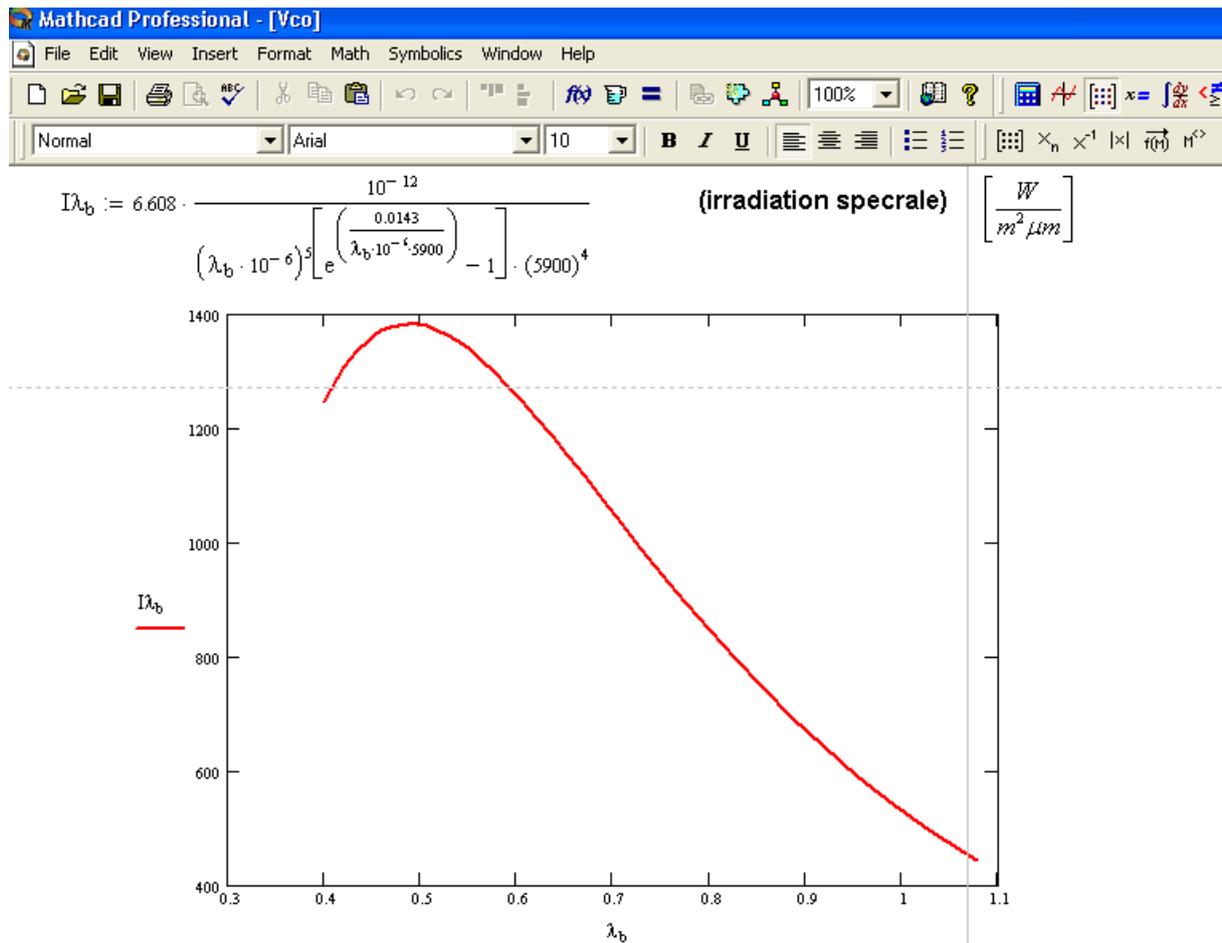
Nous avons pris un pas de 0.05 eV pour l'énergie d'un photon ; nous avons calculé par la suite la longueur d'onde correspondante en utilisant la relation suivante [38]:

$$\lambda = \frac{1,24}{h\nu} \text{ (}\mu\text{m)}$$

La courbe du coefficient d'absorption  $\alpha$  est représentée en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  avec le logiciel de calcul Mathcad. Elle est illustrée dans la fenêtre suivante :

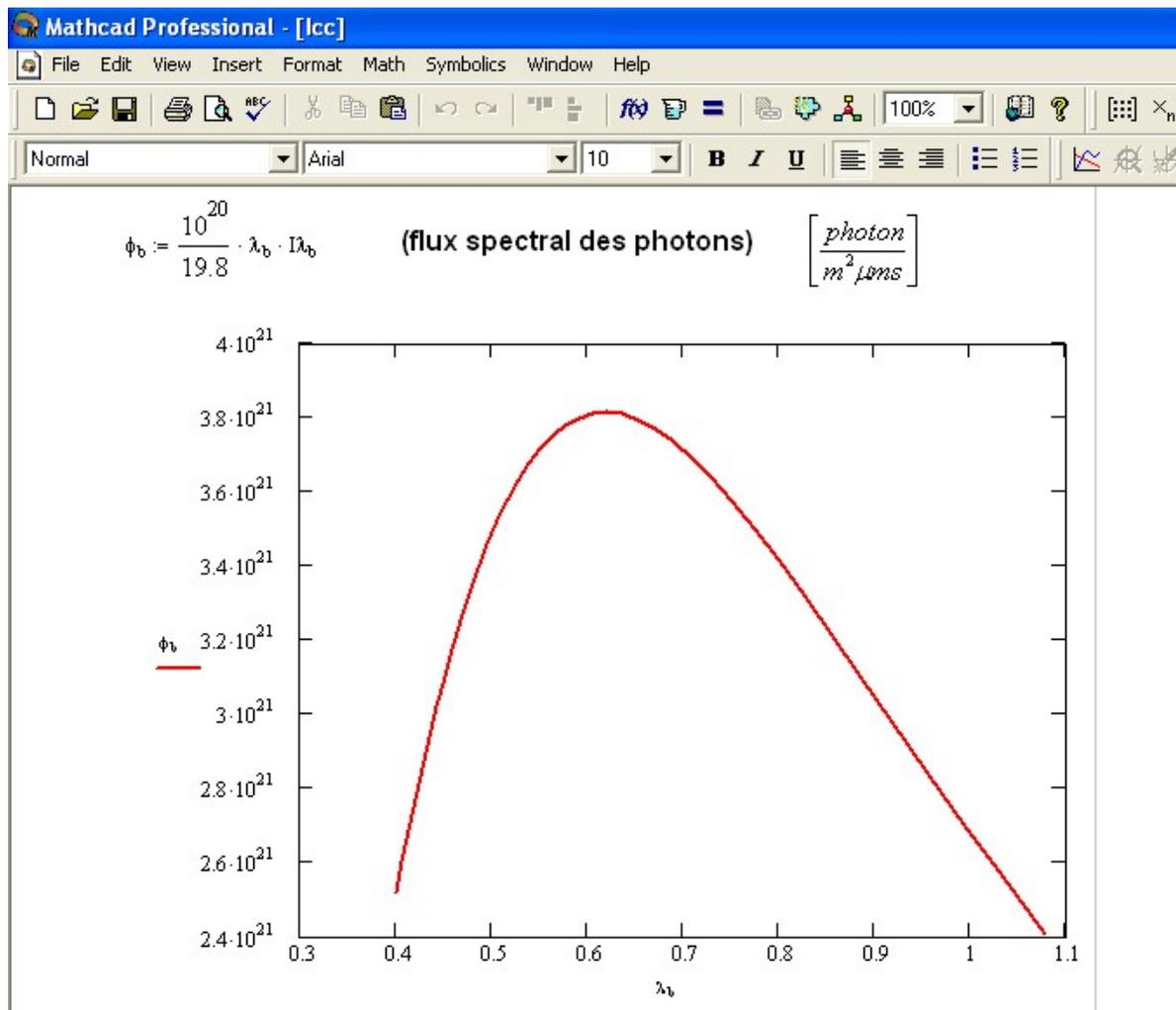


Nous avons représenté par la suite la courbe de l'irradiation spectrale en fonction des longueurs d'ondes  $\lambda$  qui varient de 0,400 jusqu'à 1,078  $\mu\text{m}$ . Le calcul a été fait à base de l'équation de l'irradiation spectrale en fonction de la longueur d'onde  $I_\lambda$  à la température d'un corps noir de 5900 K pour un spectre solaire  $S=1000 \text{ W/m}^2$ .



Sur l'interface du logiciel nous remarquons qu'il n'est pas nécessaire d'entrer des codes ou des programmes pour faire les calculs ou bien représenter les courbes. Nous avons introduit uniquement les équations à utiliser et MATHCAD effectuera les calculs ensuite il représente la courbe voulue en fonction des paramètres de simulation.

La courbe ci-dessous représente la variation du flux du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde, elle est obtenue par simulation de l'équation du flux spectral  $\phi$  des photons en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .



Nous avons calculé les épaisseurs de la zone  $w$  de charge d'espace qui correspondent aux différents dopages utilisés. Nous avons pris des valeurs de concentrations qui varient de  $1.10^{15}$  à  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Les calculs sont basés sur les propriétés électriques des différents matériaux constituant la structure. Elles sont représentées dans le tableau suivant :

propriétés	Si
Affinité électronique (eV)	4,05
Gap (eV)	1,12
$N_C$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2,8.10^{19}$
$N_V$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2,65.10^{19}$
Constante diélectrique (F/m)	$10^{-10}$
Longueur de diffusion des trous	$35 \mu\text{m}$
Coefficient de diffusion des trous	$12.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Vitesse de recombinaison des trous	$1000 \text{ m/s}$

<b>propriétés</b>	SiO <sub>2</sub>
Affinité électronique (eV)	0,90
Gap (eV)	9
Densité des états d'interface (/cm <sup>2</sup> eV)	4.10 <sup>13</sup>

Normal Arial 10 B I U

$N_c := 2.8 \cdot 10^{19}$  (densité équivalente d'états dans la bande de conduction pour le Silicium) [cm<sup>-3</sup>]

$N_d := \begin{pmatrix} 10^{15} \\ 5 \cdot 10^{15} \\ 10^{16} \\ 5 \cdot 10^{16} \\ 10^{17} \\ 5 \cdot 10^{17} \end{pmatrix}$

$\Phi_n := 0.0259 \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right)$

$\Phi_n = \begin{pmatrix} 0.265 \\ 0.224 \\ 0.206 \\ 0.164 \\ 0.146 \\ 0.104 \end{pmatrix}$  (les valeurs  $\Phi_m, \Phi_B, \Phi_n$  sont exprimées en eV)

$\Phi_m := 4.35$

$\Phi_B := 0.27 \cdot \Phi_m - 0.52$   $\Phi_B = 0.789$

$V_b := \Phi_B - \Phi_n$

$w_i := \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_b \cdot 10^{-6}}{q \cdot N_{d_i}}}$

$h_i := H - w_i$

$V_{b_i} = \begin{pmatrix} 0.524 \\ 0.566 \\ 0.584 \\ 0.626 \\ 0.644 \\ 0.685 \end{pmatrix}$

$w_i = \begin{pmatrix} 8.095 \cdot 10^{-7} \\ 3.762 \cdot 10^{-7} \\ 2.702 \cdot 10^{-7} \\ 1.251 \cdot 10^{-7} \\ 8.969 \cdot 10^{-8} \\ 4.139 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix}$

$h_i = \begin{pmatrix} 2.492 \cdot 10^{-4} \\ 2.496 \cdot 10^{-4} \\ 2.497 \cdot 10^{-4} \\ 2.499 \cdot 10^{-4} \\ 2.499 \cdot 10^{-4} \\ 2.5 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}$

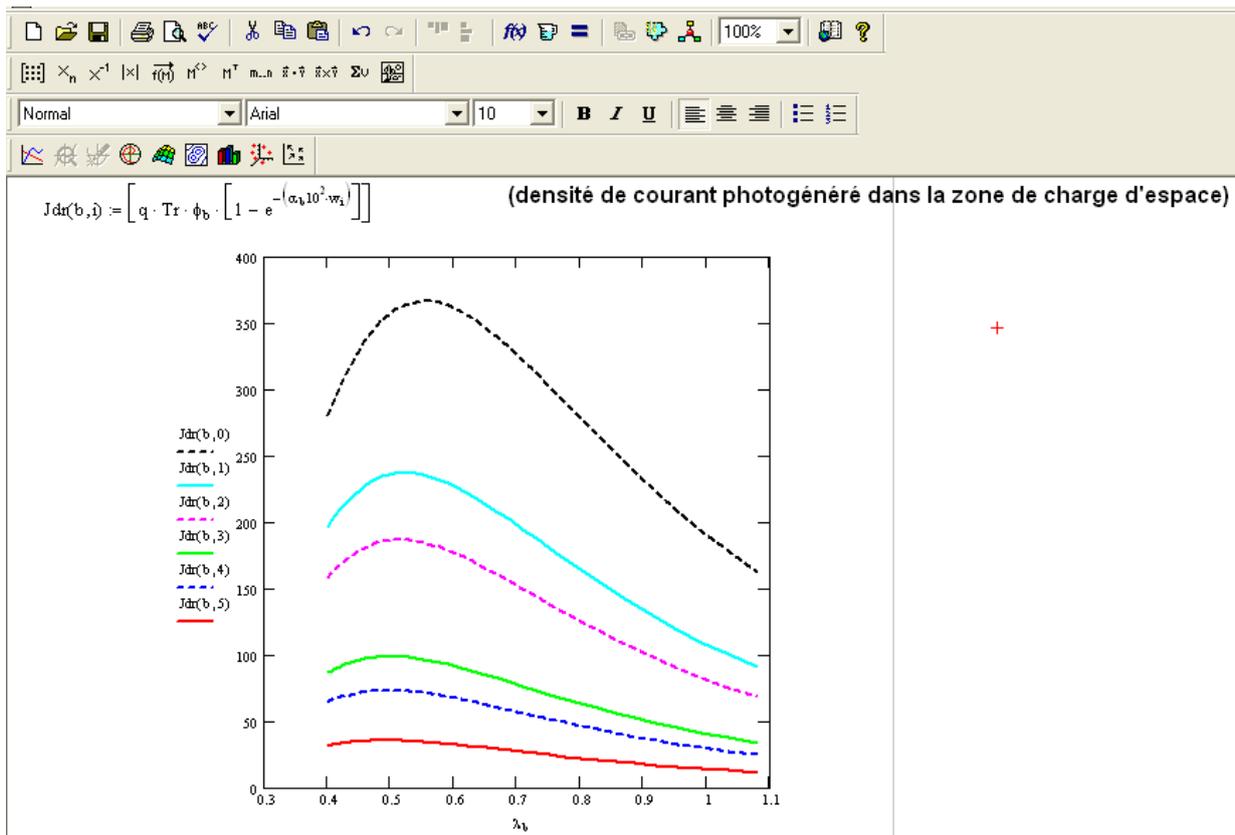
$h$  représente l'épaisseur de la structure moins l'épaisseur de la zone de charge d'espace.

Nous avons calculé la hauteur de la barrière de potentiel  $q\phi_n$  limitée pas la bande de conduction et le niveau de fermi correspondant au dopage  $N_D$ . Nous avons calculé aussi la hauteur de la barrière entre le métal et le semiconducteur  $q\phi_B$ , elle est égale à 0,789 eV.

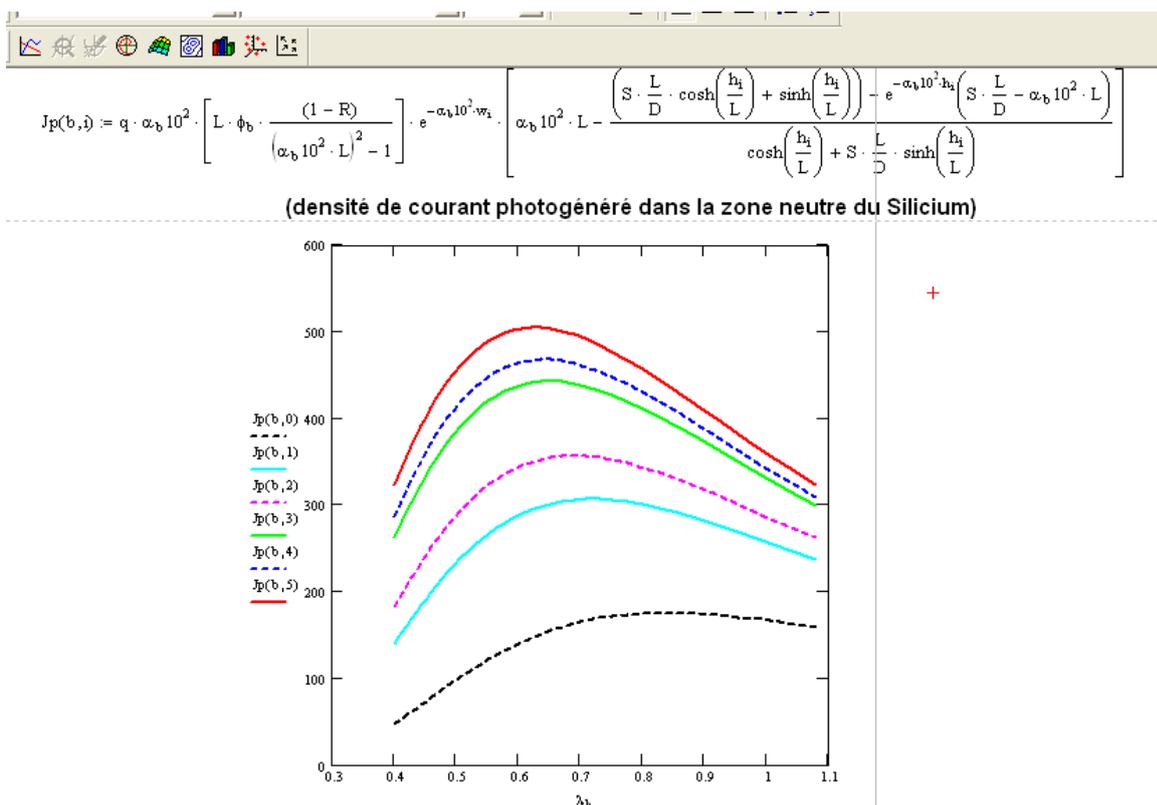
L'épaisseur  $H$  de la zone de charge d'espace est donnée en fonction des hauteurs de barrières données précédemment. Pour différents dopages utilisés nous avons calculé les épaisseurs  $w$  correspondantes.

Les courbes de la densité de courant photogénéré issue de la zone de déplétion et de la zone neutre du semiconducteur sont données par un calcul basé sur les équations  $J_{dr}$  et  $J_p$  caractérisant ces densités de courant en fonction de la longueur d'onde. Une courbe du photocourant total est ainsi obtenue par la somme des deux dernières densités de courant.

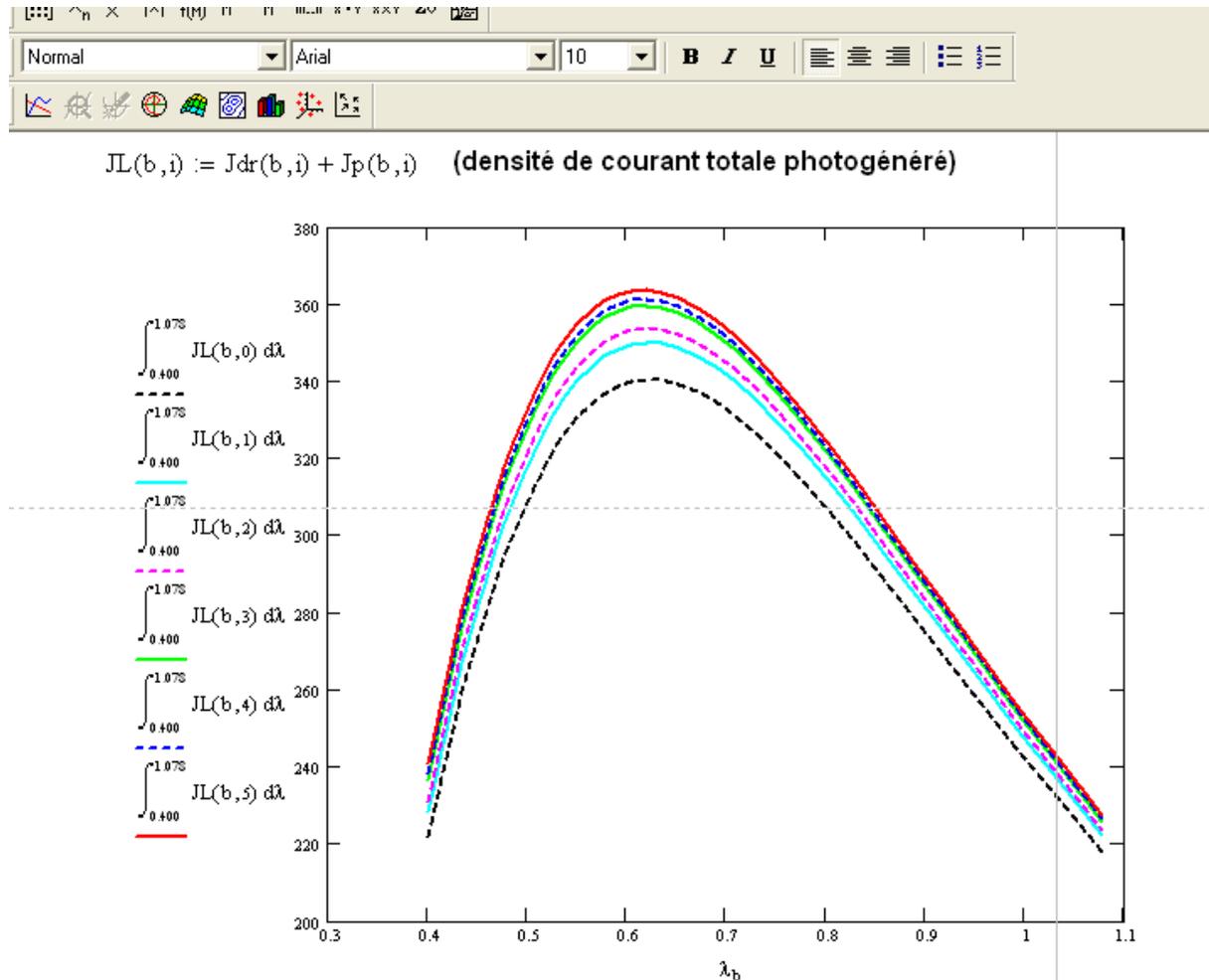
La densité de courant photogénéré dans la zone de charge d'espace est donnée par la figure suivante :



Les variations de la densité de courant photogénéré dans la zone neutre du semiconducteur est donnée par la figure suivante :



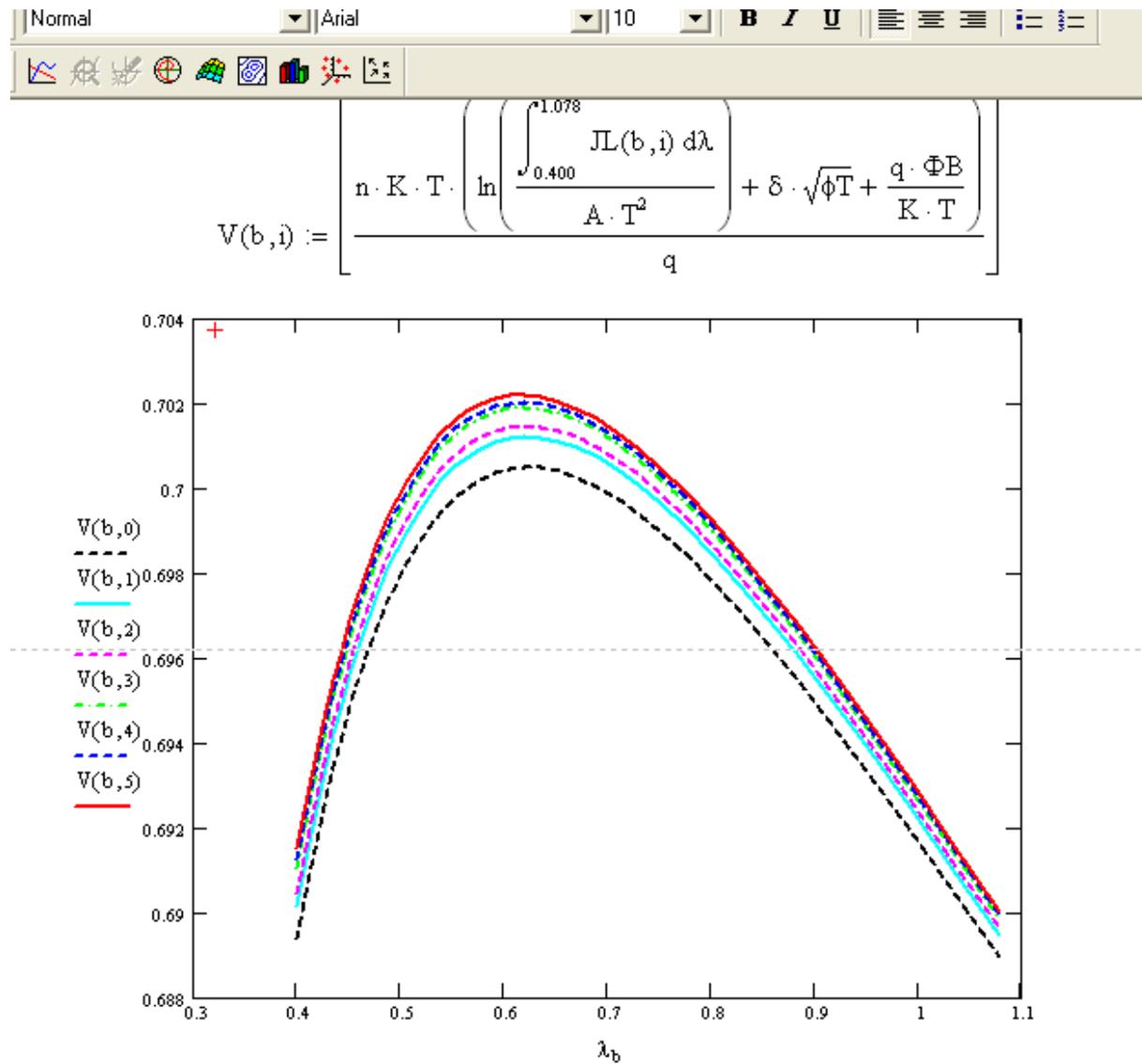
La densité de courant photogénéré total est obtenue par la somme des deux contributions précédentes. Elle est faite sur l'intégral balayant le spectre solaire utilisé contenant le visible et une partie de l'infrarouge.



Constantes utilisées dans la simulation :

Constantes	
Constante de Recharadson	
$A_n$	112 A/cm <sup>2</sup> .K <sup>2</sup>
$A_p$	32 A/cm <sup>2</sup> .K <sup>2</sup>
Charge de l'électron (e)	1,6.10 <sup>-19</sup> C
Vitesse de propagation de la lumière (c)	3.10 <sup>8</sup> m.s <sup>-1</sup>
Constante de Planck (h)	6,626.10 <sup>-34</sup> J.s
Constante de Boltzmann (k)	1,380.10 <sup>-23</sup> J.K <sup>-1</sup>

Les variations des tensions de circuit ouvert sont calculées à partir de l'équation caractéristique en fonction des densités de courant photogénéré.



- [1] N. Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, thèse de doctorat, Lyon, (2005).
- [2] M. S. Belkaïd, Contribution à la réalisation et l'optimisation photovoltaïque d'hétérojonctions à semiconducteurs de type Silicium–oxyde d'étain, thèse de magister, USTHB, (1984).
- [3] Article issu d'Internet : <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Cellule/Technologie.htm>
- [4] T. Markvart and L. Castaner, Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Elsevier Ltd, (2003).
- [5] Article issu d'Internet : [http://culturesciencesphysique.enslyon.fr/XML/db/csp physique/metadata/LOM\\_CSP\\_CorpsNoir\\_Climat.xml](http://culturesciencesphysique.enslyon.fr/XML/db/csp physique/metadata/LOM_CSP_CorpsNoir_Climat.xml)
- [6] Article issu d'Internet : [www.geog.umontreal.ca/donnees/geo2122/Cours%2006/Cours-6\\_2008.ppt.ppt](http://www.geog.umontreal.ca/donnees/geo2122/Cours%2006/Cours-6_2008.ppt.ppt)
- [7] B. BROUSSE, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, thèse de doctorat, Université de Limoges, (2004).
- [8] R. A. Messenger and J. Ventre, Photovoltaic systems engineering, Second edition, CRC Press LLC, 2004.
- [9] S. Quozola, Epitaxie en phase vapeur de Silicium sur Silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût, thèse de doctorat, Université de Lyon (2003).
- [10] S. S. Li, Semiconductor physical electronics, Second edition, Springer Science, Florida USA, (2006).
- [11] S. Maïfi, Etude d'une structure électronique de type MISS à partir de substrat de silicium et de dépôt de semiconducteurs transparents. Application photovoltaïque, thèse de magister, UMMTO, (2007).
- [12] Article issu d'Internet : [www.pvdatabase.org/pdf/Tramway\\_SMTC\\_Clermont1.pdf](http://www.pvdatabase.org/pdf/Tramway_SMTC_Clermont1.pdf)
- [13] Article issu d'Internet : <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Cellule/Association.htm>
- [14] A. Luque and S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, John Wiley & Sons Ltd, England, (2003).
- [15] A. Goetzberger and Al, Crystalline silicon solar cells, John Wiley & Sons Ltd, England, (1998).

- [16] K. Lagha, Etude et réalisation du semiconducteur transparent SnO<sub>2</sub> par APCVD application photovoltaïque, thèse de magister, UMMTO (2005).
- [17] Conversion photovoltaïque du rayonnement solaire à la cellule, Technique de l'ingénieur, Réf D3935.
- [18] Article issu d'Internet : <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P13.HTM>
- [19] M. Ohring, The materials science of thin films, Academic Pres, New Jersey (1992).
- [20] Article issu d'Internet: <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P14.HTM>
- [21] N. Bauduin, Dépôt de couches minces d'oxyde d'étain pur ou dopé par procédé plasma CVD basse pression: caractérisation énergétique et réactionnelle de la décharge par techniques spectroscopiques et modélisation, thèse de doctorat, Université de Paris VI, (2001).
- [22] R. Tala-Ighil, Etude et réalisation d'une cellule photovoltaïque à hétérostructure avec contact sérigraphie, thèse de doctorat, UMBB, 2007.
- [23] T. Feng and Al, Spray-deposited high-efficiency SnO<sub>2</sub>/Si solar cells, J.App.Phys, (1979).
- [24] A. M. B. Van Mol, Chemical vapour deposition of tin oxide thin films, thèse de doctorat, Université d'Eindhoven, (2003).
- [25] R. Kaplan and Al, Effects of the back reflector on the optical enhancement factor and quantum efficiency of a-Si:H p-i-n solar cells, Turk.J.phys, (2002).
- [26] B. Boittiaux, Cours d'électronique (les composants semiconducteurs) 2<sup>e</sup> édition, Paris (1995).
- [27] A. K. Ghosh and Al, SnO<sub>2</sub>/Si solar cells-heterostructure or Shottky-barrier or MIS-type device, J.App.Phys, (1978).
- [28] L. Sicot, Etude et réalisation de cellules photovoltaïques en polymère, thèse de doctorat, Orsay, (1999).
- [29] R. C. Neville, Solar energy conversion, The solar cell, Second edition, Elsevier, USA, (1995).
- [30] L. Castaner and S. Silvestre, Modelling photovoltaic systems using PSpice, John Wiley & Sons Ltd, England (2002).
- [31] T. Markvart and L. Castaner, Solar cells: materials, manufacture and operation, Elsevier Ltd, (2005).

- [32] M. Y. Doghish and F. D. Ho, A Comprehensive analytical model for metal-insulator-semiconductor (MIS) devices: a solar cell application, IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. 40, NO. 8, PP 1446-1454, (1993).
- [33] K. C. Kao, Dielectric phenomena in solids, Elsevier, USA, (2004).
- [34] D. A. Neamen, Semiconductor\_physics\_and\_devices. Basic principles, Third edition, NewYork, USA, (2003).
- [35] S. M. Sze and Kwok K. Ng, Physics of semiconductor devices, third edition, John Wiley & Sons, New Jersey USA (2007).
- [36] M. Y. Doghish and F. D. Ho, A comprehensive analytical model for metal-insulator-semiconductor (MIS) devices, IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. 39, NO. 12, PP 2771-2780, (1992).
- [37] P. Carsten, Optimierung von MIS inversions schicht solar zellen, thèse de doctorat, université de Hannover, Allemagne, (2005).
- [38] H. Mathieu, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 5<sup>e</sup> édition, Paris (2001).
- [39] E. D. PALIK, Handbook of optical constants of solids 111, Elsevier Science, USA, (1998).
- [40] M. Ohring, The materials science of thin films, Academic Pres, New Jersey (1992).
- [41] H. O. Pierson, Handbook of chemical vapor deposition (CVD) principles, technology, and applications, Second edition, Noyes Publications, New York, USA, (1999).