

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour obtenir le diplôme de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Présenté par :

HACHEMI HOUARIA

KAMMOUN KARIMA

THEME :

Simulation et Modélisation des Performances des Panneaux Solaires à base des  
cellules à double jonction InGaP/GaAS

Soutenu le / / 2022 devant le jury composé de :

|             |                     |     |                          |
|-------------|---------------------|-----|--------------------------|
| Président : | Mr. MISSOUM IBRAHIM | MCB | Université de Mostaganem |
| Examineur : | Mr. MEHIDI AICHA    | MCA | Université de Mostaganem |
| Encadreur : | Mr. HADRI BAGHDAD   | Pr  | Université de Mostaganem |

Année Universitaire 2021/2022

## Résumé

Les cellules solaires inorganiques à base des matériaux semi-conducteurs III-V sont largement utilisées grâce à leurs rendements élevés. Dans ce mémoire de fin d'études, on vise à améliorer la performance de la cellule solaire à hétérojonction (double jonction) InGaP/ GaAs. Les deux sous cellules sont interconnectées par une jonction tunnel (JT) InGaP/InGaP et constituants des couches à la surface arrière (BSF) des matériaux InAlAsP et AlGaAs pour la cellule InGaP et la cellule GaAs respectivement. La simulation est faite après une optimisation, modélisation et le choix des matériaux utilisés et les épaisseurs des différentes couches constituant la cellule solaire. Le choix des matériaux dont l'énergie de gap est décroissante permet l'absorption du spectre solaire dans sa quasi-totalité et l'optimisation des épaisseurs des couches (couches minces) permet un compromis entre la performance et le coût de la conception de la structure optimisée. La cellule solaire InGaP/GaAs avec des paramètres optimaux est illuminée par un spectre solaire AM1.5 à travers une couche fenêtre InAlAsP. L'extraction des paramètres courant de court-circuit ( $J_{SC}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), et le rendement ( $\eta$ ) sont fait en utilisant le logiciel Tcad silvaco, et la modélisation du panneau a été faite par Matlab Simulink.

**Mots clés :** Cellule solaire, hétérojonction, Jonction tunnel (JT), BSF, InGaP, GaAs, Tcad Silvaco, panneau photovoltaïque simulation.

**ملخص:** تستخدم الخلايا الشمسية غير العضوية التي تعتمد على مواد أشباه النواقل من النوع III-V على نطاق واسع بسبب كفاءتها العالية. في العمل نهدف إلى تحسين الخلية الشمسية غير المتجانسة (ثانية الوصلة) InGaP /GaAs. ترتبط الخليتان الفرعيتان بواسطة قطب النفقي InGaP/GaAsP(JT) وطبقة السطح الخلفي (BSF) بمواد InAlAsP و AlGaAs لخلية GaAs على التوالي. تتم المحاكاة بعد التحسين والنمذجة واختيار المواد المستخدمة وسمك الطبقات المختلفة التي تشكل الخلية الشمسية. إن اختيار المواد التي تتناقص طاقة فجواتها يسمح بامتصاص الطيف الشمسي بكامله تقريباً، كما أن تحسين سماكة الطبقات (الطبقات الرقيقة) يسمح بالموازنة بين المردودية وتكلفة التصميم الأمثل المختار. تضاء الخلية الشمسية InGaP /GaAs مع الخصائص المثلى المنتقاة بواسطة الطيف الشمسي AM1.5 من خلال طبقة نافذة InAlAsP يتم استخلاص تيار الدارة القصيرة ( $J_{SC}$ )، جهد الدارة المفتوحة ( $V_{OC}$ )، المردودية ( $\eta$ ) باستخدام برنامج المحاكاة Tcadsilvaco و تم عمل نمذجة الألواح بواسطة MATLAB Simulink

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية غير المتجانسة (ثانية الوصلة)، القطب النفقي (JT)، BSF، InGaP، GaAs، Tcad Silvaco، محاكاة الألواح الكهروضوئية

## **Remerciement**

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur Baghdad Hadri et le co-encadreur docteur djaafar fatiha, pour tous les conseils qu'ils m'ont prodigués et pour ses assistances continues m'a prodigué et pour son assistance continue et ces encouragements.

On remercie également les membres du jury qui nous ont honorés d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail

On tient aussi à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour leur patience durant nos études.

## *Dédicace*

*A Mes Parents, symboles de courage et de volonté, qui ont Consacré  
leur vie pour mon bien-tre .*

*A Ma grand-mère et Mon grand-père << que dieu la garde pour  
notre famille >> .*

*A tous ma famille.*

*A tous mes oncles et toutes mes tantes.*

*A tous la promotion Energie Renouvelable.*

# Liste des matières

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction Générale :                                                                       | 1  |
| chapitre I: Notions Générales sur les semi-conducteurs.                                       |    |
| I.1 Introduction                                                                              | 4  |
| I.2 Classification des matériaux :                                                            | 4  |
| I.3 La structure atomique.                                                                    | 6  |
| I.4 La bande d'énergie :                                                                      | 7  |
| I.4.1 Gap direct et gap indirect.                                                             | 8  |
| I.5. Les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs                                    | 12 |
| I.5.2 Equations fondamentales dans les semi-conducteurs                                       | 12 |
| I.5.2.1 Equation de Poisson :                                                                 | 12 |
| I.5.2.2. Equations de continuité                                                              | 12 |
| I.5.2.3 Equations de transport :                                                              | 13 |
| I.5.3 Génération optique :                                                                    | 13 |
| I.6 Formation de la jonction PN.                                                              | 14 |
| I.7-Cellule solaire.                                                                          | 15 |
| I.7.1 spectre solaire                                                                         | 15 |
| I.7..2. Fonctionnement des cellules solaires.                                                 | 17 |
| I.7-3 Cellule solaires à double jonction                                                      | 18 |
| I-7.3.1. Fabrication                                                                          | 20 |
| I.7.3.2 L'ajout de la jonction tunnel à la cellule solaire                                    | 21 |
| I.7.3.2 Jonctions de tunnel                                                                   | 22 |
| Conclusion :                                                                                  | 24 |
| chapitre II: Choix des cellules solaire photovoltaïques à double jonction de type InGaP/GaAs. |    |
| II.1 Introduction :                                                                           | 26 |
| II.2 Performances des cellules solaires :                                                     | 26 |
| II.3. Choix des jonctions InGaP et GaAs :                                                     | 26 |
| II.4. La mise en tandem des cellules InGaP/GaAs.                                              | 27 |
| II.5.La jonction tunnel :                                                                     | 27 |
| II.6. Les types de la jonction tunnel                                                         | 28 |
| II.6.1. Tunnel dû au gap direct:                                                              | 28 |
| II.6.2.Tunnel dû au gap indirect.                                                             | 28 |
| II.7. Modélisation de la jonction tunnel.                                                     | 29 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.7.1. Calcul du courant tunnel.....                                                                                   | 29 |
| II.8. Critères de choix de la jonction tunnel : .....                                                                   | 30 |
| II.9. L'avantage de l'utilisation de la jonction tunnel : .....                                                         | 30 |
| II.9.1. La couche fenêtre :.....                                                                                        | 30 |
| II.10..Les propriétés de matériaux utilisés.....                                                                        | 31 |
| Conclusion : .....                                                                                                      | 35 |
| <b>Chapitre III: Modélisation et simulation les performances du panneau photovoltaïques Par Matlab Simulink.</b>        |    |
| III.1. Introduction : .....                                                                                             | 37 |
| III.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : .....                                                                | 37 |
| III.3.Les Schémas blocs .....                                                                                           | 39 |
| Figure III.3.Schéma de simulation du courant Ish. ....                                                                  | 41 |
| <b>Chapire IV: Résultats de la simulation par TACD Silvaco et Matlab Simulink.</b>                                      |    |
| Partie IV.1: Résultats de simulation obtenus par Tcad silvaco.....                                                      | 44 |
| IV.1.1. Introduction.....                                                                                               | 44 |
| II.1.5. Simulation de la cellule InGaP/GaAs :.....                                                                      | 45 |
| IV.1.6. Caractéristique(I-V)de la structure .....                                                                       | 46 |
| IV.1.7.Simulation de la cellule optimisée sans la jonction tunnel : le rôle de la jonction tunnel .                     | 47 |
| Partie IV.2 : Résultats simulation obtenus par MATLAB simulink. ....                                                    | 51 |
| IV.2.1. Introduction :.....                                                                                             | 51 |
| IV.2.2 les caractéristiques du panneau solaire photovoltaïque sous Matlab /simulink dans les conditions normales :..... | 51 |
| IV.2.3. Les résultats de simulation sous matlab-simulink : .....                                                        | 52 |
| IV.2.4. Effets climatiques sur le Panneau photovoltaïque PV .....                                                       | 53 |
| IV.2.5. Caractéristique(I-V) .....                                                                                      | 53 |
| Conclusion : .....                                                                                                      | 54 |
| Conclusion Générale .....                                                                                               | 56 |
| <b>Références bibliographiques</b>                                                                                      |    |
| <b>Annexe</b>                                                                                                           |    |

## Liste des figures

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapitre I :</b>                                                                                                       |    |
| <b>Figure I.1 :</b> Classification des matériaux par leur conductivité électrique.                                        | 05 |
| <b>Figure I.2 :</b> Tableau périodique partiel.                                                                           | 05 |
| <b>Figure I.3 :</b> Modèle de bande.                                                                                      | 06 |
| <b>Figure I.4 :</b> La structure atomique du silicium.                                                                    | 07 |
| <b>Figure I.5 :</b> Structure de bande interdite simplifiée pour un matériau semi-conducteur.                             | 08 |
| <b>Figure I.6 :</b> Diagramme de bandes d'énergie : (a) semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect. | 09 |
| <b>Figure I.7 :</b> Diagramme de bande réelle pour GaAs.                                                                  | 10 |
| <b>Figure I.8 :</b> Électron excité à la bande de conduction crée un trou dans la bande de valence.                       | 11 |
| <b>Figure I.9 :</b> La zone de charge d'espace.                                                                           | 14 |
| <b>Figure I.10 :</b> Courant de diode en fonction de la tension. Source.                                                  | 15 |
| <b>Figure I.11 :</b> Spectre solaire à AM0 et AM1.5.                                                                      | 18 |
| <b>Figure I.12 :</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en présence de la lumière.                     | 18 |
| <b>Figure I.13 :</b> Rendement quantique d'une cellule à double jonction.                                                 | 19 |
| <b>Figure I.14 :</b> Cellule à double jonction sans jonction tunnel.                                                      | 20 |
| <b>Figure I.15 :</b> Schéma simple d'une cellule à double jonction sans diode tunnel.                                     | 21 |
| <b>Figure I.16 :</b> (a) montre une cellule solaire à double jonction avec une jonction tunnel hautement.                 | 22 |
| <b>Figure I.17 :</b> Le courant de la jonction tunnel en fonction de la tension appliquée.                                | 23 |
| <b>Figure I.18 :</b> Cellule solaire à double jonction avec jonction tunnel.                                              | 23 |
| <b>Chapitre II.</b>                                                                                                       |    |
| <b>Figure II.1 :</b> La cellule solaire à double jonction.                                                                | 27 |
| <b>Figure II.2 :</b> Diagramme de bande de dopage de la jonction tunnel.                                                  | 28 |
| <b>Figure II.3 :</b> (a) Gap direct. (b) Gap indirect.                                                                    | 28 |
| <b>Chapitre III</b>                                                                                                       |    |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure.III.1</b> : Schéma électrique d'une cellule solaire photovoltaïque.                                               | 37 |
| <b>Figure III.2</b> : Schéma de simulation du courant Irs.                                                                  | 40 |
| <b>Figure III.3</b> : Schéma de simulation du courant Ish.                                                                  | 40 |
| <b>Figure III.4</b> : Schéma de simulation du courant I0.                                                                   | 41 |
| <b>Figure III.5</b> : Schéma de simulation de la courant I.                                                                 | 41 |
| <b>Figure III.6</b> : Schéma de simulation du courant total débité par le panneaux photovoltaïque Total.                    | 41 |
| <b>Figure. III .7</b> : Schéma d'un générateur PV sous MATLAB SIMULINK                                                      | 42 |
| <b>Chapitre IV :</b>                                                                                                        |    |
| <b>Figure.IV.1.1</b> : Conception de la cellule InGaP/GaAs optimisée.                                                       | 44 |
| <b>FigureIV.1.2</b> : Le spectre solaire AM1.5 illuminant la cellule solaire.                                               | 45 |
| <b>Figure IV.1.3</b> : Structure simulée sous SILVACO-Atlas.                                                                | 45 |
| <b>Figure IV.1. 4</b> : Caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs.                                                       | 46 |
| <b>Figure IV.1.5</b> : Caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs. Sans la jonction tunnel.                               | 47 |
| <b>Figure IV.1.6</b> : Structure simulée sous SILVACO-Atlas.                                                                | 48 |
| <b>Figure IV.1.7</b> : Caractéristique I-V de la cellule InGaP.                                                             | 49 |
| <b>Figure. IV.2.1</b> : Schéma de simulation pour obtenir les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une cellule photovoltaïque. | 51 |
| <b>FigureIV.2.2</b> : Caractéristique P(V)d'une cellule( $T=25^{\circ}\text{C}$ , $G=1000\text{W/m}^2$ ).                   | 52 |
| <b>FigureIV.2.3</b> : Caractéristique I(V) pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).                          | 53 |
| <b>FigureIV.2.4</b> : Caractéristique P(V)pour différentes températures( $G=1000\text{W/m}^2$ ).                            | 54 |

## Liste des tableaux :

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau I.1:</b> Alliage de quelques matériaux III-V et II-VI.                        | 06 |
| <b>Tableau I.2 :</b> Énergie de gap des semi-conducteurs.                                | 11 |
| <b>Tableau II.1:</b> Valeurs des paramètres de Bowing pour des ternaires utilisés.       | 32 |
| <b>Tableau II.2 :</b> Valeurs des constantes de réseau de différents matériaux utilisés. | 33 |
| <b>Tableau II.3:</b> Les propriétés de matériau $\text{Ga}(x)\text{In}(1-x)$ à 300K.     | 34 |
| <b>Tableau II.4 :</b> Les propriétés de matériau GaAs à 300K.                            | 35 |
| <b>Tableau IV.1.1 :</b> Les résultats de simulation à double jonction.                   | 46 |
| <b>Tableau IV.1.3 :</b> Les résultats de simulation sans la jonction tunnel.             | 47 |
| <b>Tableau IV.1.4 :</b> Les résultats de simulation de la cellule InGaP.                 | 50 |
| <b>Tableaux IV.2.1 :</b> Caractéristique électrique d'un panneau PV.                     | 52 |

# Liste des symboles

| Symbole                          | Signification                                                             | Unité                  |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $\hbar$                          | Constante de Planck reduite.                                              | eV.s                   |
| $\nu$                            | Fréquence du photon.                                                      | S <sup>-1</sup>        |
| C                                | Vitesse de la lumière dans le vide.                                       | m/s                    |
| T                                | Température ambiante.                                                     | °K                     |
| q                                | Charge élémentaire.                                                       | C                      |
| D <sub>n</sub> et D <sub>p</sub> | Coefficient de diffusion des électrons et des trous.                      | Cm <sup>2</sup> /s     |
| Ln et Lp                         | Longueurs de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau n et p. | µm                     |
| W                                | Largeur de la zone de charge d'espace                                     | µm                     |
| $\lambda$                        | Longueur d'onde.                                                          | µm                     |
| N <sub>A</sub> et N <sub>D</sub> | Concentration en impuretés accepteurs et ou donneurs.                     | cm <sup>-3</sup>       |
| n <sub>i</sub>                   | Concentration intrinsèque.                                                | cm <sup>-3</sup>       |
| J <sub>SC</sub>                  | Densité de courant de court circuit.                                      | mA/c<br>m <sup>2</sup> |
| J <sub>P</sub>                   | Densité de courant de crête de la jonction.                               | mA/c<br>m <sup>2</sup> |
| J <sub>Tun</sub>                 | Densité du courant tunnel                                                 | mA/c<br>m <sup>2</sup> |
| $\tau_n$ et $\tau_p$             | Durée de vie des électrons et des trous.                                  | µs                     |
| V <sub>OC</sub>                  | Tension en circuit ouvert                                                 | V                      |
| V <sub>d</sub>                   | Tension de diffusion                                                      | V                      |

|                          |                                                                 |                           |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|
| FF                       | Facteur de forme                                                | %                         |
| $\eta$                   | Rendement de conversion                                         | %                         |
| $\Delta a$               | Le désaccord de maille                                          | %                         |
| $U_{\text{Auger}}$       | Taux de recombinaison indirect.                                 | %                         |
| $C_{p0}$ et $C_{n0}$     | Coefficients de capture d'Auger du trou et de l'électron.       | $\text{cm}^{-3}/\text{s}$ |
| $C_p$ et $C_n$           | Taux de génération optiques des paires électrons trous          | $\text{cm}^{-3}/\text{s}$ |
| B                        | Coefficient de la recombinaison radiative.                      | $\text{cm}^{-3}/\text{s}$ |
| $n_0$                    | Indice de réfraction de l'air                                   |                           |
| $\epsilon_r$             | Permittivité relative                                           |                           |
| $\epsilon$               | Permittivité diélectrique                                       |                           |
| K                        | Coefficient d'extinction.                                       |                           |
| $c(C_{A-B})$             | Paramètre de Bowing                                             |                           |
| $\phi_m$                 | Travail de sortie du métal                                      | eV                        |
| $\chi$                   | Affinité électronique                                           | eV                        |
| $E_i$                    | Niveau de Fermi intrinsèque                                     | eV                        |
| $\Delta E_C, \Delta E_V$ | Discontinuité des bandes de conduction et de valence.           | eV                        |
| $E_g$                    | L'énergie de la bande interdite.                                | eV                        |
| $E_{g0}$                 | L'énergie de gap à (T=25°).                                     |                           |
| $\mu_n$ et $\mu_p$       | Mobilité des électrons et des trous.                            | $\text{cm}^2/\text{Vs}$   |
| $\alpha$                 | Coefficient d'absorption                                        | $\text{cm}^{-1}$          |
| $S_n$ et $S_p$           | Vitesse de recombinaison en surface des électrons et des trous. | $\text{cm}/\text{s}$      |

|                  |                          |                    |
|------------------|--------------------------|--------------------|
| a                | Constante de maille      | Å                  |
| $N_c, N_v$       | Densité effective d'état | $1/\text{cm}^3$    |
| $N_t$            | Densité d'état           | $1/\text{cm}^3$    |
| E                | Champ électrique         | V/cm               |
| $P_{\text{max}}$ | Puissance maximale       | mW/cm <sup>2</sup> |

## Introduction Générale :

La consommation totale de l'énergie dans le monde est en très forte croissance dans toutes les régions du monde avec une consommation de 81% provenant des combustibles fossiles [1]. L'exploitation de ces non renouvelables est le fait que la demande de l'énergie est en augmentation. Notre dépendance actuelle sur ces énergies entraînera des conséquences dévastatrices non seulement ces ressources d'énergie ne sont pas inépuisables mais de plus l'environnement subit une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> liée à la production et à la consommation d'énergie par combustion des fossiles.

Les industries sont continuellement à la recherche d'un nouveau moyen d'alimenter ses machines gourmandes en énergie avec plus de puissance. Les cellules solaires fournissent cette énergie nécessaire.

Les dernières technologies utilisent des matériaux avec différentes couches pour utiliser davantage le spectre soleil afin de convertir plus d'énergie lumineuse en énergie électrique. Avec autant de couches et de matériaux, la prédiction des performances des cellules est devenue une énorme tâche difficile pour les concepteurs. La méthode actuelle de fabrication d'une cellule, puis de la tester avec de la lumière au xénon par exemple, pour représenter la lumière du soleil, est coûteuse et prohibitive en raison du nombre de facteurs variables dans une cellule solaire à jonctions multiples.

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires est considérée comme la plus importante tâche à être développée pour mieux utiliser l'énergie solaire et produire de l'électricité. Cette dernière nécessite l'optimisation de la structure et des propriétés de la cellule solaire.

Les cellules mono-jonctions de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> génération ont atteint leur limite en termes de rendement. Les recherches actuelles s'orientent vers de nouveaux concepts, telles que les cellules multi-jonction qui permettent d'améliorer considérablement le rendement. C'est dans ce contexte que notre mémoire s'oriente vers l'étude des performances des cellules solaires photovoltaïques à double jonction.

En d'autres termes l'objectif de notre travail sera consacré à l'étude et simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à double jonctions à base de InGaP /GaAs utilisant le logiciel Tcad

SILVACO d'une part et d'autres part en utilisant Matlab Simulink pour la simulation d'un panneau solaire photovoltaïque à base de la cellule à double jonction.

Notre mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le chapitre I, nous donnerons un rappel sur la physique des semi-conducteurs, des cellules solaires ainsi que la théorie sous-jacente aux techniques d'optimisation utilisées.

Dans Le deuxième chapitre, nous aborderons le choix des cellules solaires photovoltaïques à double jonctions de type **InGaP/GaAs**.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier la modélisation et la simulation des performances du panneau photovoltaïque par Matlab Simulink.

Dans le quatrième chapitre nous allons présenter les résultats de simulation obtenus par Tcad Silvaco pour la cellule solaire photovoltaïque à double jonction et ceux obtenus par MATLAB Simulink dans le cadre de la simulation du panneau constitué de cellules en question.

Enfin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I**

## **Notions Générales sur les semi-conducteurs**

### I.1 Introduction

Le succès industriel des dispositifs à semi-conducteurs est en grande partie dû aux technologies de pointe qui ont été développées pour leur préparation. Les semi-conducteurs ont pris une importance considérable dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, la télécommunication, la télévision, les voitures et les appareils électroménagers, etc.

Dans tous les matériaux semi-conducteurs, les composés III-V sont d'une classe bien définie avec des propriétés qui sont des sources d'intérêt en termes de connaissances et d'applications fondamentale. En effet, le GaAs est à gap direct ayant une largeur proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui en résulte dans une efficacité maximale de conversion photovoltaïque assurée par une cellule solaire même à unique jonction. Des rendements de conversion autour de 25.7 % ont été atteints par de telle cellule au spectre AM 1.5[2].

Ce chapitre couvre des notions sur les matériaux semi-conducteurs en général, les composés binaires (III-V) et ternaires, et en particulier l'hétérojonction InGaP/GaAs.

### I.2 Classification des matériaux :

L'oxyde de zinc (ZnO), tellure de cadmium (CdTe), sulfure de Mercure HgS, une manière commune de classer un matériau est par ses propriétés électriques. Selon le niveau de la résistivité d'un élément, elle peut être classée par catégorie comme isolant, conducteur, ou semi-conducteur. La capacité de résister ou de conduire l'électricité d'un matériel dépend de beaucoup de facteurs ; la structure de réseau, les électrons libres, l'énergie de bande interdite, et la température. Quelques matériaux ont des propriétés électriques très discrètes qui les définissent en tant qu'un isolant ou conducteur. Cependant, d'autres matériaux tels que le silicium et l'arséniure de gallium peuvent agir en tant qu'isolant ou conducteur et sont donc considérés des semi-conducteurs. La figure I-1 montre la gamme typique des conductivités électriques pour des isolants, des conducteurs, et des semi-conducteurs.

Des semi-conducteurs peuvent être trouvés sous la forme élémentaire ou composée. Le silicium et le germanium sont des exemples des semi-conducteurs élémentaires, qui appartiennent au groupe IV dans le tableau périodique de Mendeleïev. La figure I-2 montre une table périodique partielle. En plus des semi-conducteurs du groupe IV, des composés peuvent être faits avec des éléments à partir des groupes III et V. Les exemples des semi-conducteurs III-V incluent le phosphore en aluminium (AlP), nitrure de gallium (GaN), phosphore d'indium

(InP), arséniure de gallium (GaAs). Notamment, Il est possible de faire des composés de semi-conducteur à partir des groupes II-VI.

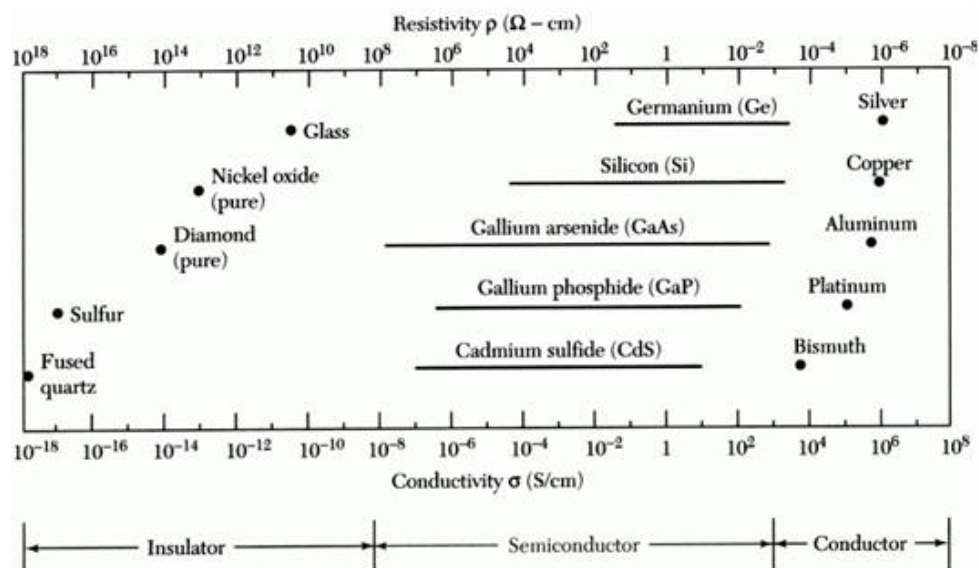


Figure I.1: Classification des matériaux par leur conductivité électrique [3].

# CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

Métaux

Semi-conducteurs

Non-métaux

Gaz nobles

Lanthanides et actinides

**Li** : Solide à 25°C, sous 1 bar

**He** : Gaz à 25°C, sous 1 bar

**Br** : Liquide à 25°C, sous 1 bar

**Tc** : Obtenu par synthèse

|   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |          |          |           |           |  |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|--|
|   |           |           |           |           |           |           |           |           |           | VIII       |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |          |          |           |           |  |
| I |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |           |           |           |           |           | VIII      |           |           |          |          |           |           |  |
| 1 | <b>H</b>  |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |           |           |           |           |           | 2         | <b>He</b> |           |          |          |           |           |  |
| 2 | <b>Li</b> | <b>Be</b> |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |           |           |           |           |           |           | <b>B</b>  | <b>C</b>  | <b>N</b> | <b>O</b> | <b>F</b>  | <b>Ne</b> |  |
| 3 | <b>Na</b> | <b>Mg</b> |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |           |           |           |           |           |           | <b>Al</b> | <b>Si</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Cl</b> | <b>Ar</b> |  |
| 4 | <b>K</b>  | <b>Ca</b> | <b>Sc</b> | <b>Ti</b> | <b>V</b>  | <b>Cr</b> | <b>Mn</b> | <b>Fe</b> | <b>Co</b> | <b>Ni</b>  | <b>Cu</b>  | <b>Zn</b>  | <b>Ga</b> | <b>Ge</b> | <b>As</b> | <b>Se</b> | <b>Br</b> | <b>Kr</b> |           |           |          |          |           |           |  |
| 5 | <b>Rb</b> | <b>Sr</b> | <b>Y</b>  | <b>Zr</b> | <b>Nb</b> | <b>Mo</b> | <b>Tc</b> | <b>Ru</b> | <b>Rh</b> | <b>Pd</b>  | <b>Ag</b>  | <b>Cd</b>  | <b>In</b> | <b>Sn</b> | <b>Sb</b> | <b>Te</b> | <b>I</b>  | <b>Xe</b> |           |           |          |          |           |           |  |
| 6 | <b>Cs</b> | <b>Ba</b> | <b>La</b> | <b>Hf</b> | <b>Ta</b> | <b>W</b>  | <b>Re</b> | <b>Os</b> | <b>Ir</b> | <b>Pt</b>  | <b>Au</b>  | <b>Hg</b>  | <b>Tl</b> | <b>Pb</b> | <b>Bi</b> | <b>Po</b> | <b>At</b> | <b>Rn</b> |           |           |          |          |           |           |  |
| 7 | <b>Fr</b> | <b>Ra</b> | <b>Lw</b> | <b>Rf</b> | <b>Db</b> | <b>Sg</b> | <b>Bh</b> | <b>Hs</b> | <b>Mt</b> | <b>Uun</b> | <b>Uuu</b> | <b>Uub</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |          |          |           |           |  |

Série des Lanthanides

|           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>La</b> | <b>Ce</b> | <b>Pr</b> | <b>Nd</b> | <b>Pm</b> | <b>Sm</b> | <b>Eu</b> | <b>Gd</b> | <b>Tb</b> | <b>Dy</b> | <b>Ho</b> | <b>Er</b> | <b>Tm</b> | <b>Yb</b> |
| 57        | 58        | 59        | 60        | 61        | 62        | 63        | 64        | 65        | 66        | 67        | 68        | 69        | 70        |

Série des Actinides

|           |           |           |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Ac</b> | <b>Th</b> | <b>Pa</b> | <b>U</b> | <b>Np</b> | <b>Pu</b> | <b>Am</b> | <b>Cm</b> | <b>Bk</b> | <b>Cf</b> | <b>Es</b> | <b>Fm</b> | <b>Md</b> | <b>No</b> |
| 89        | 90        | 91        | 92       | 93        | 94        | 95        | 96        | 97        | 98        | 99        | 100       | 101       | 102       |

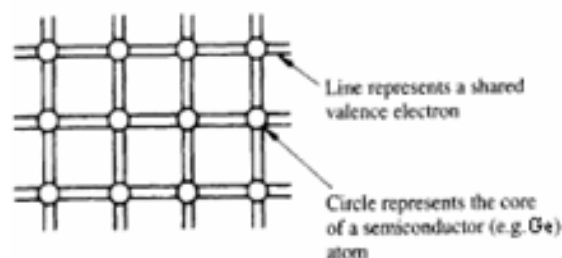
Figure I.2 : Tableau périodique partiel [4]

| Colonne                                 | Semi-conducteur                     |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| IV                                      | Ge, Si                              |
| Binaire II-V<br>Ternaire et Quaternaire | GaAs, GaP, GaSb, InAs, nP,<br>InSb. |
|                                         | $Al_xGa_{1-x}As, GaAs_yP_{1-y}$     |
|                                         | $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$           |
| Binaire II-VI<br>Ternaire               | CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS          |
|                                         | $Cd_xHg_{1-x}Te$                    |

**Tableau I.1:** Alliage de quelques matériaux III-V et II-VI

### I.3 La structure atomique

Les éléments du tableau périodique sont arrangés selon leur nombre de protons, neutrons, et électrons. Basant sur la théorie de Niels Bohr, les électrons d'un atome gravitent autour de noyau. La plus proche orbite a un maximum de deux électrons, alors que toutes les autres orbites ont un maximum de huit électrons. Les orbites qui sont plus proches de noyau sont remplies premièrement. Les éléments du groupe IV, comme le germanium (Ge) par exemple a quatre électrons dans la couche extérieure, ou celle de valence de leur atome. Dans la Figure 3, les atomes de semi-conducteurs partagent leurs quatre électrons de la bande de valence pour remplir cette couche extérieure avec le maximum nombre des électrons.

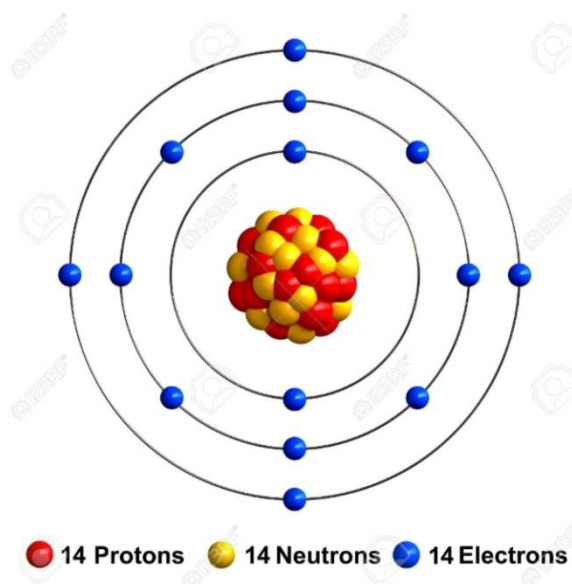


**Figure I.3 :** Modèle de bande.[5]

Chaque atome est capable de partager leurs électrons de la couche extérieure avec quatre atomes. Chaque paire d'électrons partagée permet de former une liaison covalente. Donc les atomes tendent à remplir leurs couches de valence pour atteindre la stabilité atomique. Par exemple les éléments de groupe III du tableau périodique ont trois électrons libres dans leur couche extérieure. La combinaison de ces éléments sera avec des éléments de groupe V. Ces derniers reçoivent des électrons pour remplir leur couche extérieure. Par conséquent un semi-conducteur composé est produit à travers les liaisons covalentes.[6][5]

Le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque. Le silicium possède 14 protons et 14 neutrons dans leur noyau. Les 14 électrons sont distribués dans des trois orbites. Il existe trois électrons dans la première orbite, huit électrons dans la deuxième orbite et quatre électrons dans l'orbite extérieure.

Quand les atomes de silicium sont liés, les électrons de l'orbite extérieure forment des liaisons covalentes. Par conséquent, le silicium forme des liaisons avec d'autres atomes de silicium [6].

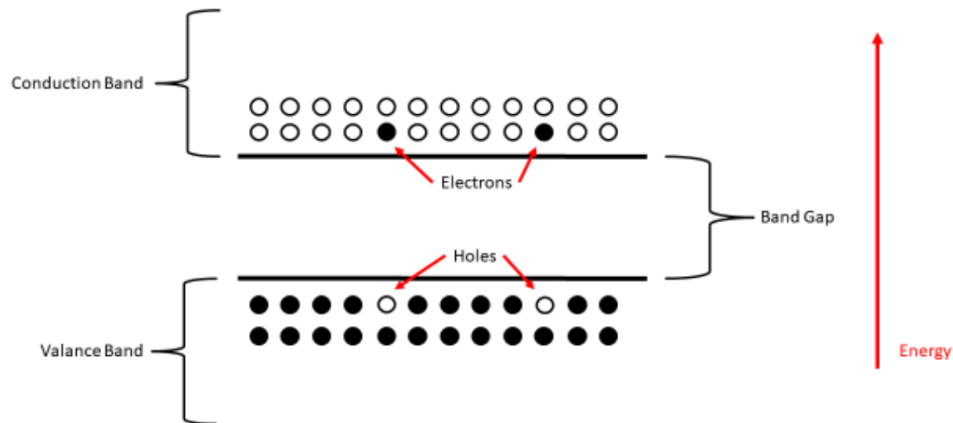


**Figure I.4:** La structure atomique d'un silicium [7].

### I.4 La bande d'énergie :

Tous les principes fondamentaux de l'électronique reposent sur le concept d'électrons énergétiquement restreints. Les niveaux d'énergie autorisés des électrons peuvent être regroupés en bandes avec une bande interdite  $E_g$ , ou une large bande de niveaux d'énergie interdits, les séparant. La bande d'énergie supérieure à la bande interdite est appelée bande de conduction et la bande inférieure est appelée bande de valence. L'absence d'électrons dans les états autorisés dans la valence sont appelés trous et traités comme des particules avec une charge positive et une masse similaire à la masse d'un électron. Un diagramme de bande

simplifié d'un semi-conducteur est illustré à la figure 1.5. Notez que certains électrons occupent déjà la bande de conduction. En effet, à l'équilibre thermique, certains électrons ont naturellement une énergie suffisamment grande (égale ou supérieure à l'énergie de la bande interdite) pour être existes dans la bande de conduction.



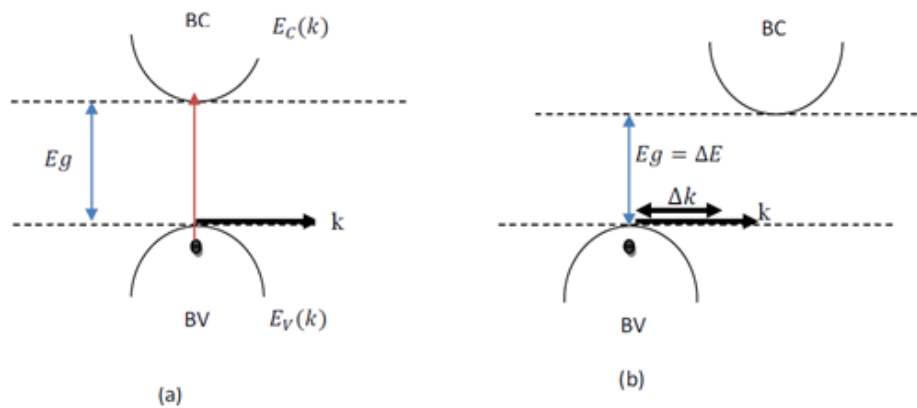
**Figure 1.5 :** Structure de bande interdite simplifiée pour un matériau semi-conducteur [5].

Dans un semi-conducteur, l'énergie n'est pas le seul paramètre qui restreint l'état des électrons. le facteur d'onde  $k$  définit également la forme des bandes de valence et de conduction.

### I.4.1 Gap direct et gap indirect

L'énergie de gap est l'énergie minimum nécessaire pour un électron passant de la bande de valence à la bande de conduction. Il existe deux types de semi-conducteurs, un semi-conducteur à gap direct et un semi-conducteur à gap indirect [2].

La notion de gap peut être illustrée par la relation de dispersion  $E_c(k)$  comme illustré dans la figure 1. 6.  $E_C$  signifie le bas de la bande de conduction,  $E_V$  est le haut de la bande de valence alors que  $k$  est le vecteur d'onde associé à un électron.[8]



**Figure I.6 :** Diagramme de bandes d'énergie : (a) semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect [3].

Si le minimum de la bande de valence et le maximum de la bande de conduction coïncident dans le même point de l'espace de vecteurs d'onde  $k$ , le semi-conducteur a un gap direct. Par contre, la bande de valence et la bande de conduction ont un vecteur d'onde  $k$  différent, dans ce cas le semi-conducteur a un gap indirect. [3]

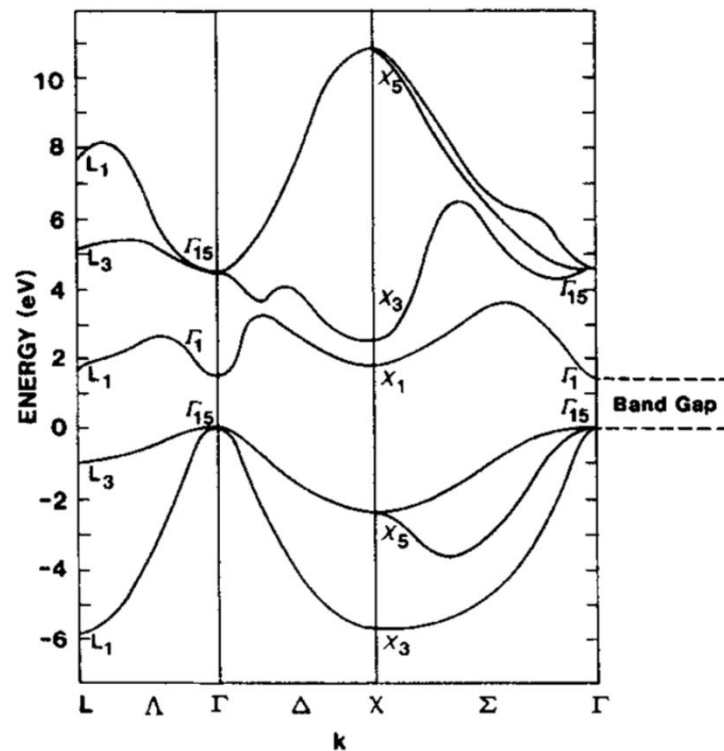
Dans un semi-conducteur à gap indirect, l'excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, nécessite un photon avec création d'un phonon. Le phonon est une mode de vibration du réseau cristallin.

Généralement, les semi-conducteurs à gap direct sont mieux utilisés pour l'optoélectronique. Le silicium est un semi-conducteur à gap indirect. Par contre l'Arséniure de Gallium est un semi-conducteur à gap direct.[3]

En réalité, Cette structure bidimensionnelle est beaucoup plus compliquée par rapport à la figure 1.6, avec GaAs, un matériau à bande interdite directe, ayant la structure illustrée à la figure 1.7.

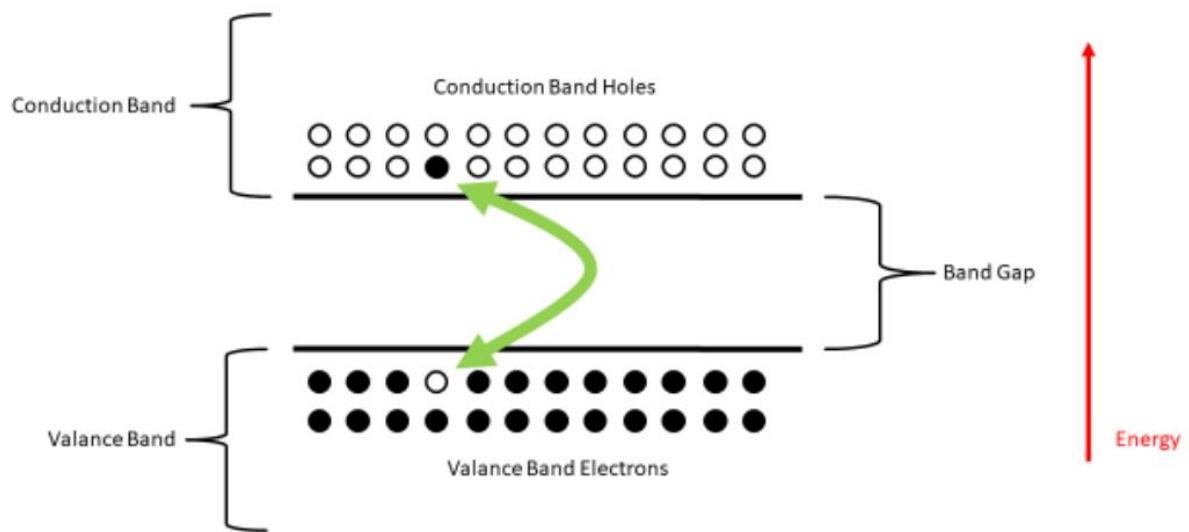
Cette structure de bande compliquée donne lieu à une affinité fortement dépendante de l'énergie pour certaines longueurs d'onde (ou énergie) des photons dans un matériau.

La courbure de ces bandes d'énergie par rapport à la quantité de mouvement conduit à un phénomène selon lequel une plus grande énergie supplémentaire est nécessaire pour donner la même augmentation de la quantité de mouvement.



**Figure 1.7 :** Diagramme de bande réelle pour GaAs. [6].

Un électron peut passer de la bande de valence à la bande de conduction s'il reçoit la quantité d'énergie et de quantité de mouvement requise. Cette impulsion est fournie sous la forme de phonons, qui sont des paquets d'impulsion acoustique se propageant à travers les liaisons entre les atomes du réseau. Ces phonons se produisent naturellement à toutes les valeurs des quantités de mouvement, la seule conséquence d'une bande interdite indirecte étant que seule une partie des électrons de la bande de valence qui reçoivent la quantité d'énergie nécessaires sont excités vers la bande de conduction. Une densité d'électrons libres  $n_i$  existe dans un semi-conducteur intrinsèque en raison de l'énergie disponible et de la température du matériau. L'énergie ajoutée au matériau crée davantage de ces électrons libres. Cette quantité d'énergie peut provenir d'un gradient de température, d'un champ électrique ou de paquets d'énergie électromagnétique appelés photons. Chaque électron excité laisse également derrière lui un trou ; une représentation unidimensionnelle de ceci est montrée dans la figure 1.8.



**Figure 1.8 :** Électron excité à la bande de conduction crée un trou dans la bande de valence. [5]

Les semi-conducteurs ont une énergie de gap qui dépend de type de matériaux. L'énergie de gap de semi-conducteurs dépend aussi de la température. Elle est donnée par l'équation de Varshiny suivante :

$$E_g = E_{g-300K} + \alpha \left[ \frac{300K^2}{300K + \beta} - \frac{T^2}{T + \beta} \right] \quad [I. 1]$$

Où  $E_{g-300K}$  est l'énergie de gap du matériau à 300 K.  $\alpha$  et  $\beta$  sont des valeurs spécifiques pour chaque semi-conducteur [9]. Le tableau suivant montre l'énergie de gap des quelques matériaux semi-conducteurs.

| Matériau | Energie de gap (eV) à 300K |
|----------|----------------------------|
| Si       | 1.12                       |
| Ge       | 0.66                       |
| GaAs     | 1.90                       |
| InGaP    | 1.42                       |

**Tableau I.2 :** Énergie de gap des semi-conducteurs.[10]

### I.5. Les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

#### I.5.2 Equations fondamentales dans les semi-conducteurs

Les équations de base décrivent le comportement des porteurs de charge dans des semi-conducteurs sous l'influence d'un champ électrique et / ou de la lumière sont :

Equation de Poisson, équations de continuité, et équations de transport.[11]

##### I.5.2.1 Equation de Poisson :

L'équation de Poisson est une équation différentielle partielle [12]. Elle relie le potentiel électrostatique à la densité locale de charge. Elle est donnée par l'équation suivante

$$(\varphi v) = - \rho \quad [I. 2]$$

$\varphi$  est le potentiel électrostatique,  $\varepsilon$  est la permittivité locale, et  $\rho$  est la densité locale de charge. Cette densité est la somme de la contribution de toutes les charges fixes et mobiles, contenant les électrons, les trous, et les impuretés ionisés.

$$\rho = -q[n - p + N_A^- - N_D^+ + \sum N_t] \quad [I. 3]$$

$q=1.6.10^{-19}C$ : La charge élémentaire.

$p, n$ : Densités d'électrons et de trous libres.

$N_A^-$  : et  $N_D^+$  : sont les densités d'atomes donneurs et accepteurs ionisés.

$\sum N_t$ : La somme de pièges dans un centre profond; elle est généralement négligeable.

##### I.5.2.2. Equations de continuité

Les équations de continuité donnent la variation des concentrations des porteurs à chaque instant. Cette variation des concentrations des trous ou des électrons est due à la création de paires électron-trou, les générations-recombinaisons internes, et à la présence des courants de conduction ou diffusion.

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont décrites comme suit :

$$\begin{aligned} \partial n / \partial t &= 1/q \operatorname{div} v_n + G_n - R_n \\ \partial n / \partial t &= 1/q \operatorname{div} v_p + G_p - R_p \end{aligned} \quad [I.4]$$

Où  $n$  et  $p$  sont la concentration des électrons et des trous respectivement,  $J_n$  et  $J_p$  ont les densités du courant des électrons et des trous,  $G_n$  and  $G_p$  sont les taux de génération pour les électrons et les trous,  $R_p$  et  $R_p$  sont les taux de recombinaison pour les électrons et trous,.[15].

### I.5.2.3 Equations de transport :

La densité de courant de dérive des électrons dans la bande de conduction est donnée par :

$$\vec{J}_n = -qu_n n \nabla \Phi_n \quad [I. 5]$$

$$\vec{J}_p = -qu_p p \nabla \Phi_p \quad [I. 6]$$

Où  $u_n$  et  $u_p$  sont les mobilités des électrons et des trous sont donnée par les relations suivantes :

$$n = n_{ie} \exp \left[ \frac{-q(\Psi - \Phi_n)}{KT_L} \right]$$

$$p = n_{ie} \exp \left[ \frac{-q(\Psi - \Phi_p)}{KT_L} \right]$$

$n_{ie}$  est la densité effective intrinsèque .En remplaçant  $n$  et  $p$  dans les équations de densité de courant, on obtient :

$$J_n = qD_n \nabla n + qu_n \nabla \Psi + u_n (kT_L (n - n_{ie})) \quad [I. 7]$$

$$J_p = qD_p \nabla p + qu_p \nabla \Psi + u_p (kT_L (p - n_{ie})) \quad [I. 8]$$

$D_n$  et  $D_p$  : Coefficients d'Einstein dont l'expression :

$$D_n = \left( \frac{KT}{q} \right)$$

$$D_p = \left( \frac{KT}{q} \right)$$

### I.5.3 Génération optique :

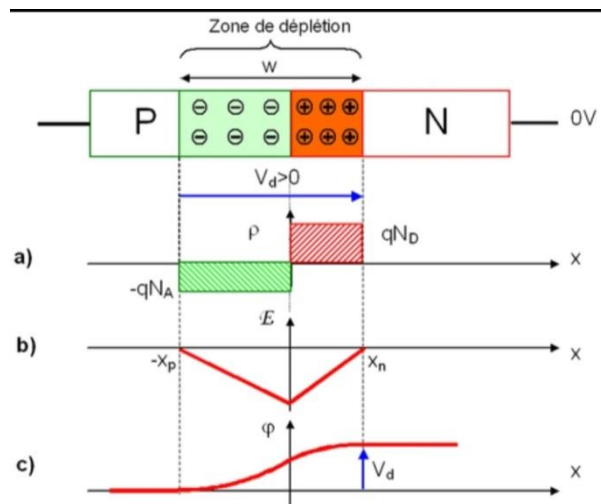
La génération est définie comme un processus par lequel les électrons et les trous sont créés [17]. La génération des électrons et des trous comme indiquée par les équations de continuité est faite grâce au rayon lumineux. Cette dernière est connue comme une génération optique. Quand la lumière frappe un semi-conducteur, elle excite et génère les porteurs de charge par des transitions de la bande de valence à la bande de conduction (transition directe) dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ou par des transitions indirectes dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque. Le déplacement des porteurs permet de créer des paires électrons-

trous. Cette recombinaison évite la création du courant électrique. Il faut, donc séparer ces charges en réalisant la jonction PN

### I.6 Formation de la jonction PN

La formation de la jonction PN permet de contrôler les caractéristiques électriques du matériau. La jonction PN est formée par le dopage du matériau avec des impuretés. Elle comporte deux parties, l'une est dopée par des accepteurs(p) et l'autre est dopée par des donneurs (n)[5].

Lorsqu'on met en contact un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p, un état d'équilibre est établi par la diffusion des porteurs. Les porteurs majoritaires (trous) diffusent de la région de type p vers la région de type n où se recombinent avec les électrons. Les porteurs majoritaires (électrons) de la région de type n diffusent vers la région de type p. Par conséquent une région contenant des charges fixes négatives et positives nommée la zone d'espace (ZCE) d'une faible épaisseur  $W_0$ . Cela fait apparaître un champ électrique opposé à la diffusion des porteurs de charge.[2][3][8]



**Figure I.9 :** La zone de charge d'espace [13].

Lorsqu'une tension externe est appliquée à travers la jonction, la concentration des porteurs minoritaires (électrons dans la région de type p et trous dans la région de type n) varie de façon exponentielle avec l'amplitude de la tension [5]. Cette relation est donnée par

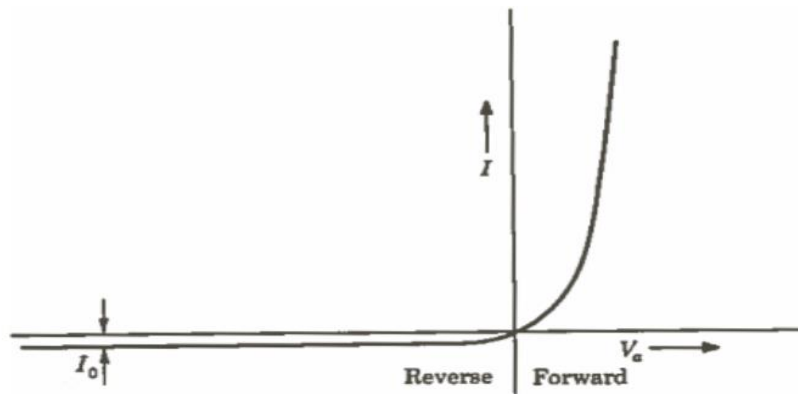
$$n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \quad [I. 9].$$

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \quad [I. 10]$$

Les équations  $n_p$  et  $p_n$  de l'équation (4), respectivement, décrivent les concentrations de porteurs minoritaires, fonction de la tension appliquée  $V_a$ , de la température  $T$  et de la charge  $q$ . La constante  $k$  est la constante de Boltzmann. Le courant ainsi créé par la jonction varie de façon exponentielle avec la tension appliquée. Cette relation est donnée comme

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{qV_e}{kT}\right) - 1 \right) \quad [I. 11]$$

Où  $I_0$  est la valeur du courant en régime permanent de polarisation inverse (courant de saturation). Cette relation est illustrée à la figure I.10



**Figure I.10 :** Courant de diode en fonction de la tension. Source : [5].

### I.7-Cellule solaire

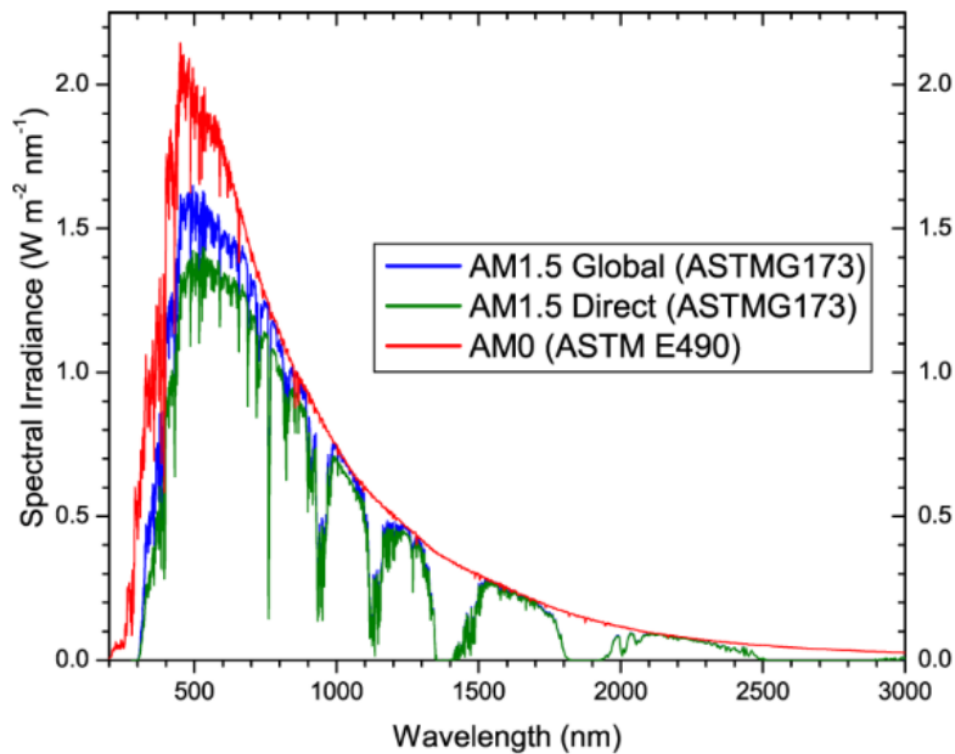
Une cellule solaire photovoltaïque, est un dispositif semi-conducteur qui convertit directement les photons en courant et tension électrique. La principale source de ces photons est le soleil lui-même.

#### I.7.1 spectre solaire

L'intensité des photons émis par le soleil est relativement constante en fonction du temps et varie en fonction de la longueur d'onde. La forme de ce spectre reste la même en tous points de l'espace, bien que l'amplitude de la courbe dans son ensemble soit décalée vers le haut ou vers le bas avec la distance par rapport au soleil. Au fur et à mesure que les photons s'éloignent du soleil, ils couvrent une surface de plus en plus grande, qui croît proportionnellement au carré de la distance au soleil. Compte tenu de la distance du soleil, chaque emplacement sur Terre ou sur une orbite terrestre est essentiellement le même, de sorte que le changement de puissance

en fonction de la distance est insignifiant en tout point de la Terre ou de l'orbite terrestre. L'intensité relative des photons à chaque longueur d'onde, où l'intensité est prise comme le nombre de photons par unité de surface et par unité de temps, change à mesure que la lumière se déplace à travers un milieu tel que l'atmosphère terrestre. Parce que nous nous intéressons principalement à deux régions seulement, l'espace, où il n'y a pas d'atmosphère, et la surface de la terre, avec une atmosphère pleine pour interférer avec le spectre lumineux, nous donnons à ces deux spectres des noms particuliers :

AM0 (espace) et AM1.5 (la surface de la terre). Les spectres relatifs à chacun de ces niveaux d'atmosphère sont présentés à la figure I.11.



**Figure I.11 :** Spectre solaire à AM0 et AM1.5. [7].

La longueur d'onde d'un photon est directement liée à l'énergie du photon par la relation bien connue

$$hc = \lambda E \quad I.11$$

Où  $h/2\pi$  est la constante de Planck réduite,  $c$  est la vitesse de la lumière,  $E$  est l'énergie du photon et  $\lambda$  est la longueur d'onde du photon.

Le spectre est important dans la conception d'une cellule solaire. Plus la bande interdite d'un semi-conducteur correspond à une partie du spectre solaire, plus la lumière de ces longueurs d'onde est absorbée. Il est évident que peu ou pas de photons avec des énergies inférieures à la bande interdite d'un matériau sont absorbés, car cela donnerait aux électrons une quantité d'énergie interdite. Il est moins évident, mais tout aussi vrai, que les énergies supérieures à la bande interdite sont également rarement absorbées dans un semi-conducteur.

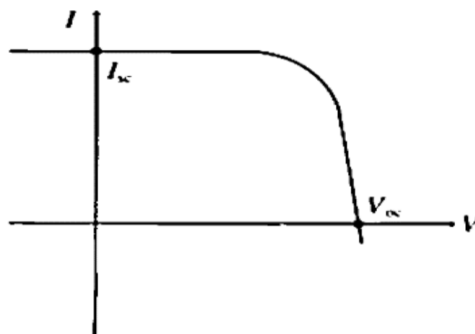
### I.7..2. Fonctionnement des cellules solaires

Une cellule solaire n'est rien de plus qu'une jonction PN destinée à être exposée à la lumière. Le fonctionnement d'une cellule solaire est un processus dans lequel les photons pénètrent dans le semi-conducteur, favorisant les porteurs de charge de valence dans la bande de conduction. Ces porteurs en excès (excès par rapport à la quantité d'un matériau dopé sans exposition à la lumière) sont ensuite balayés par le champ intégré de la jonction aux contacts au bord du semi-conducteur.

Ce courant, appelé photo courant, peut alors alimenter un circuit externe. Cela fait de la cellule une source d'énergie.

En l'absence de flux de courant, la tension de la cellule est la tension intégrée. La conservation de l'énergie dicte que lorsque le courant augmente, la tension doit diminuer en utilisant la même relation exponentielle discutée en relation avec l'équation (5). Cette relation est illustrée dans la figure I.12, où  $V_{OC}$  est la tension en circuit ouvert et  $I_{SC}$  est le courant de court-circuit, la tension et le courant maximum possibles, respectivement, qu'une cellule peut produire.

L'efficacité ou le rendement est liée au courant de court-circuit. Le photo courant est une fonction de la recombinaison. Une représentation du courant de la cellule solaire en fonction de la tension est illustrée à la figure I.12.

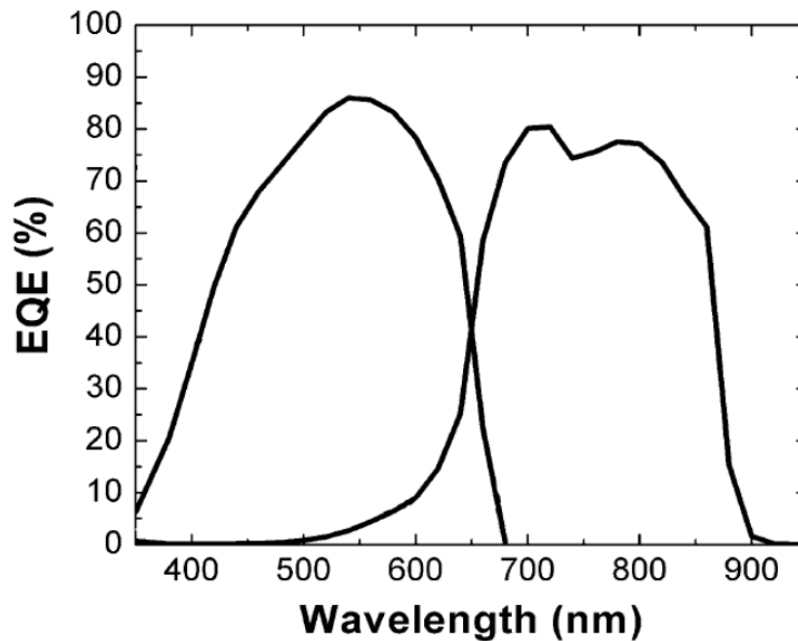


**Figure I.12 :** Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire dans la lumière.

À partir de ces relations, il est clair que trouver l'épaisseur de cellule la plus efficace est un acte d'équilibre, car une cellule plus mince nécessite moins de temps pour que les porteurs de charge atteignent les contacts, réduisant les recombinaisons, mais donne également aux photons moins de distance pour créer des porteurs libres.

### **I.7.3 Cellules solaires à double jonction :**

Compte tenu de la discussion précédente sur le fonctionnement des cellules solaires, aucune cellule solaire ne peut capturer le large spectre de l'énergie solaire pour la convertir en énergie électrique utile. La bande interdite d'un matériau limite son utilité à une plage limitée du spectre solaire complet. À capter davantage de lumière émise par le soleil, des cellules solaires supplémentaires sont nécessaires, chacune ayant une affinité maximale pour la lumière à une longueur d'onde différente. En utilisant un tableau de ceux-ci, il est possible de capturer presque toutes les parties du spectre. Bien entendu, pour réellement gagner en efficacité, il faut le faire sans augmenter la surface de la cellule ; par conséquent, les cellules doivent être empilées verticalement. Dans une telle configuration, une partie du spectre est absorbée par la cellule supérieure et le reste des photons passe par les cellules inférieures, et ainsi de suite. Le rendement quantique de la cellule solaire modélisée est illustré à la figure I.13. Cette efficacité quantique est une représentation de la capacité de chaque jonction d'une cellule solaire à jonctions multiples à absorber une partie particulière du spectre lumineux. Idéalement, il s'agirait de deux courbes distinctes et non superposées, comme c'est le cas à la figure 1.13.



**Figure I.13 :** Rendement quantique extérieur ( EQE ) d'une cellule à double jonction. [4].

Dans une cellule en tandem (double jonction) ou à jonctions multiples, la génération de porteurs fonctionne exactement comme dans une cellule solaire à jonction unique. La localisation des porteurs générés prend cependant une nouvelle importance. Les cellules dans une configuration à double jonction sont connectées en série et le courant est limité au plus petit élément de production de courant de la série. Pour minimiser le gaspillage de courant, les deux cellules d'une cellule à double jonction doivent produire à peu près la même quantité de courant.

La bande interdite la plus élevée dans une cellule à double jonction ou multi-jonction doit être placée sur le dessus, n'absorbant que les photons d'énergie la plus élevée et permettant à tous les photons d'énergie inférieure de passer à travers les cellules inférieures pour contribuer au taux de photo génération dans le bas. Des cellules. Sur la figure 1.13, la courbe de gauche représente la jonction supérieure, avec son pic d'absorption à une longueur d'onde inférieure et une énergie supérieure.

Les cellules composantes connectées en série peuvent limiter le courant à travers la cellule mais augmenteront considérablement la tension à laquelle la cellule fonctionne. La tension de circuit ouvert pour une cellule multi-jonction peut être estimée en additionnant les tensions de circuit ouvert du composant

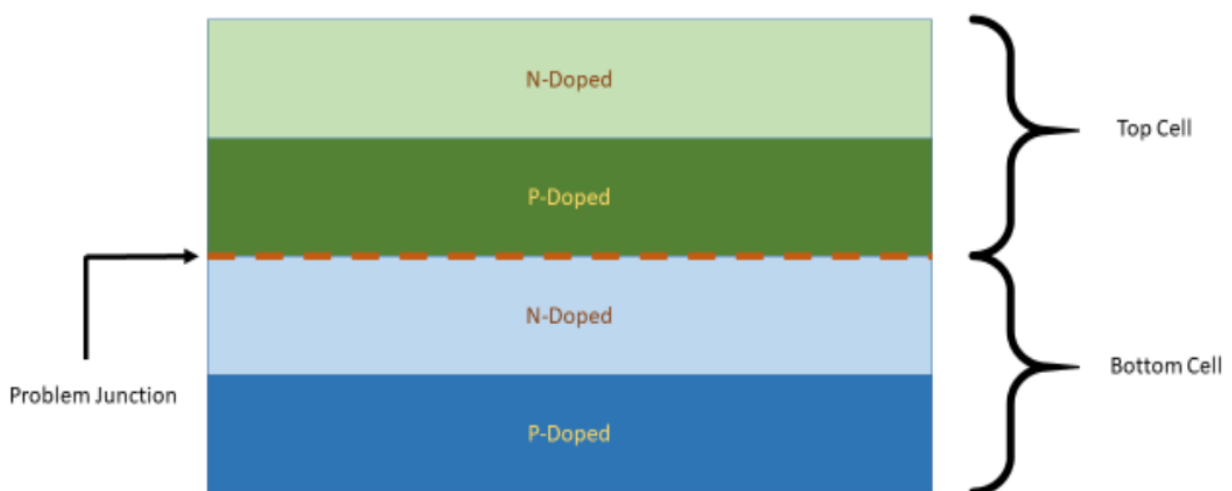
Les cellules, qui sont elles-mêmes les tensions intégrées créées à travers les jonctions et principalement une propriété des matériaux utilisés comme semi-conducteurs.

### I-7.3.1. Fabrication

Les cellules solaires peuvent être empilées de deux manières. Tout d'abord, ils peuvent être empilés mécaniquement, où une cellule complète est placée au-dessus d'une autre cellule complète. Parce que la métallisation existe entre les cellules, elles sont en fait connectées en parallèle, éliminant le problème des limitations de courant discuté dans les principes de fonctionnement des cellules en tandem. Cette méthode est d'un coût prohibitif et difficile à construire pour toutes les cellules de test, sauf quelques-unes.

La deuxième méthode, et la méthode utilisée dans la cellule explorée dans ce mémoire, consiste à faire croître les cellules les unes sur les autres, par épitaxie. Bien que ce processus soit beaucoup plus difficile et coûteux que la production d'une cellule solaire à jonction unique, son coût se situe dans le domaine de abordable pour les applications spatiales. En théorie, ce type de cellule à double jonction ressemble à la cellule représentée sur la figure 1.14, mais il y a un problème majeur. Comme le montre la figure 1.14, le simple fait d'empiler une cellule au-dessus d'une autre crée une jonction polarisée en inverse entre

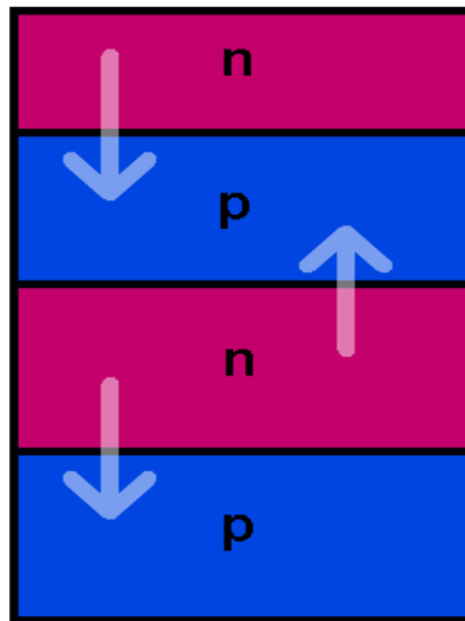
Les deux cellules. Cette jonction crée un champ électrique dans la direction opposée aux champs créés par les cellules constitutives et rend la cellule solaire totale non fonctionnelle. Heureusement, un type spécial de jonction PN, appelée jonction tunnel, peut être inséré entre les cellules pour atténuer ce problème.



**Figure I.14 :** Cellule à double jonction sans jonction tunnel[9].

### I.7.3.2 L'ajout de la jonction tunnel à la cellule solaire

La jonction tunnel est utilisée lors de la connexion des différentes couches d'une cellule solaire multi jonction. Lorsque les développeurs ont commencé à fabriquer des cellules multifonctions, ils n'ont pas utilisé de jonction tunnel pour connecter la cellule. Ils placeraient une cellule monocouche n-sur-p au-dessus d'une autre cellule n-sur-p. Lorsque ces deux cellules sont placées au-dessus de l'un à l'autre, ils formaient une structure que l'on voit sur la figure I.15.

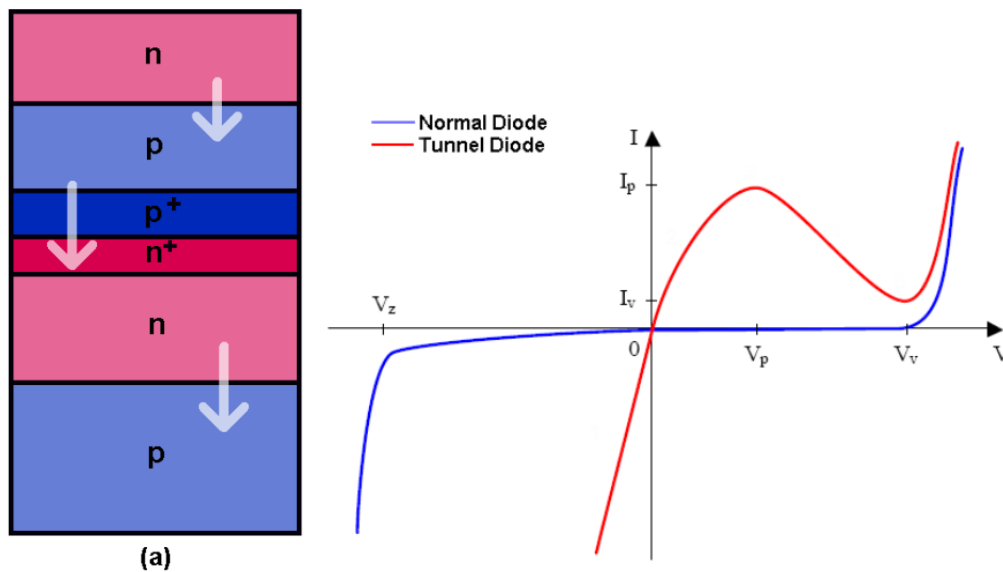


**Figure I.15 :** Schéma simple d'une cellule à double jonction sans diode tunnel[11].

Ce type de conception a un défaut majeur. La jonction entre les cellules forme une jonction parasite PN. Cette jonction sera une jonction PN à polarisation directe. Puisque la chute de tension aux bornes une jonction PN à polarisation directe est élevée par rapport à la tension produite par une cellule solaire, le champ de jonction serait trop grand pour que la couche supérieure de l'appareil puisse le surmonter.

Pour contrer le problème des jonctions parasites, les cellules solaires modernes utilisent une jonction tunnel fine et dopée placée entre les différentes couches de la cellule. C'est illustré à la figure I.16a. La jonction tunnel apporte une solution grâce au phénomène quantique dit tunnel les caractéristiques courant-tension significativement différentes de la jonction. La figure I.16 b montre une courbe typique de jonction tunnel I-V et diode PN normale sur le même axe. On peut voir que la jonction tunnel permet un courant de polarisation directe qui se produit à

une tension beaucoup plus faible valeur que la diode PN comparable [11]. Cela permet au courant de circuler à travers la jonction sans la chute de tension significative.



**Figure I.16 :** (a) Montre une cellule solaire à double jonction avec une jonction tunnel hautement dopée au milieu. (b) Montre la caractéristique I-V de diode normale et tunnel[11].

### I.7.3.2 Jonctions de tunnel

Une jonction tunnel se produit lorsqu'une jonction PN est si fortement dopée qu'elle cesse de fonctionner comme une diode normale. Cette situation se produit lorsque les deux côtés de la jonction dégénèrent, ce qui signifie que les niveaux de fermi sont à l'intérieur des bandes de valence et de conduction elles-mêmes [9].

Les caractéristiques courant-tension d'une jonction tunnel sont représentées sur la figure I.17. Lorsque cette diode est polarisée en inverse, elle ne bloque pas complètement le courant mais agit plutôt comme une résistance ; par conséquent, lorsqu'il est correctement polarisé, le courant peut passer dans le sens inverse d'une diode normale [9].

Cela permet à une telle diode d'être placée entre les deux jonctions de la cellule solaire multi-jonctions dans le sens inverse des jonctions PN du composant sans détruire le courant de la cellule globale. Cela élimine la création accidentelle d'une jonction PN normale dans le sens inverse, comme dans la Figure I.17 et ou Figure I.18

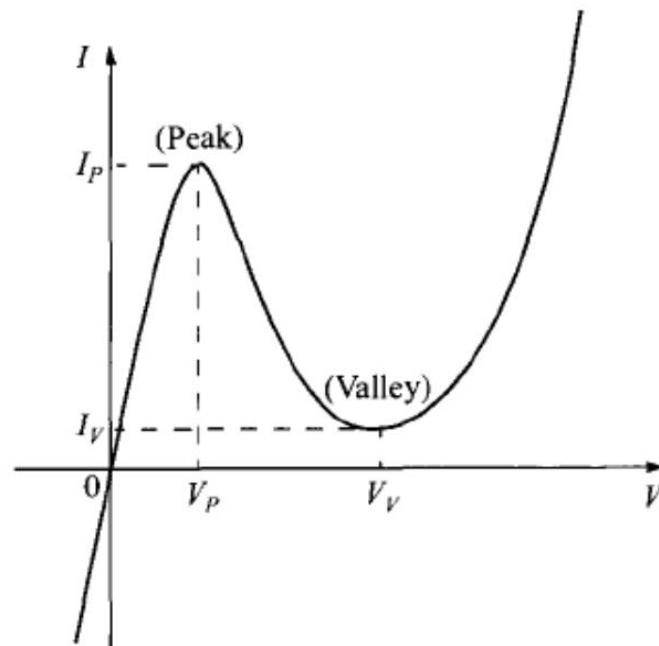


Figure I.17 : Le courant de la jonction tunnel en fonction de la tension appliquée [9].

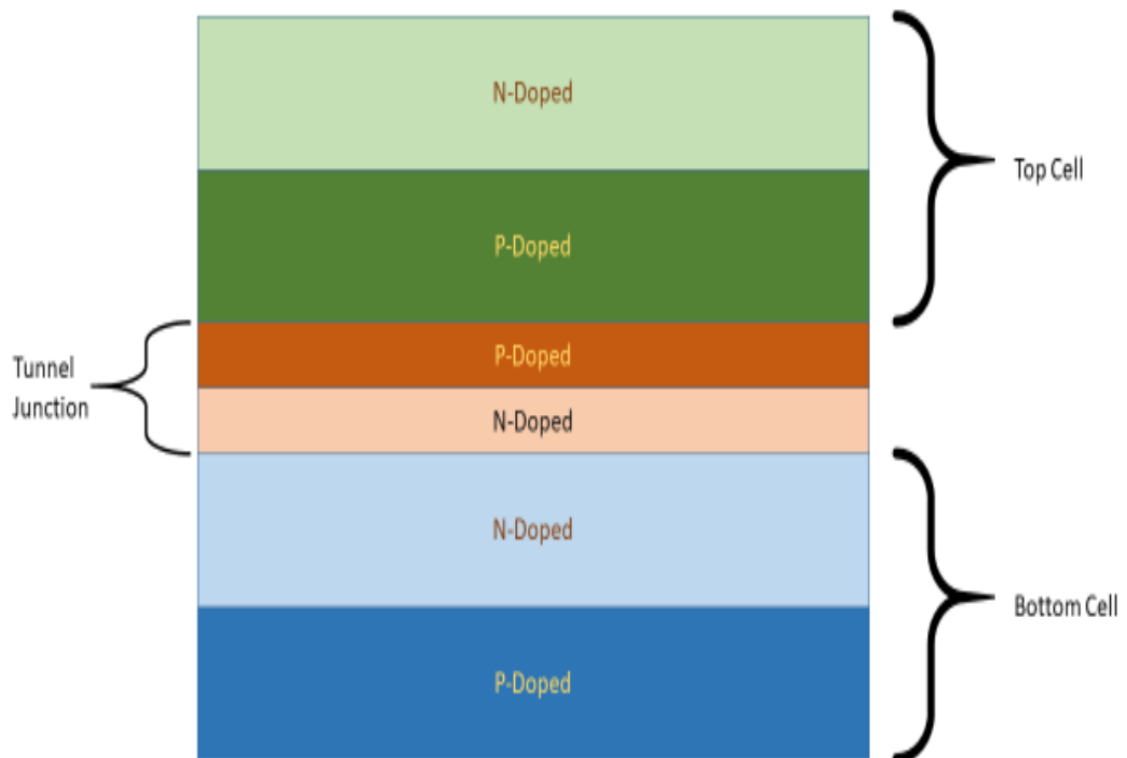


Figure I.18 : Cellule solaire à double jonction avec jonction tunnel[9].

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons abordé les notions fondamentales sur la physique des semi-conducteurs en particulier les différentes équations régissantes. Nous avons abordé aussi les cellules solaires en particulier celles à double jonctions où la nécessité d'introduire la jonction tunnel.

# **Chapitre II**

## **Choix des cellules solaires photovoltaïques à double jonctions de type InGaP/GaAs**

### II.1 Introduction :

L'énergie solaire est devenue l'un des sources les plus importantes qui remplace l'énergie fossile grâce à son abondance. Des efforts sont faits pour augmenter le rendement des cellules solaires et de réduire le cout de production. La modélisation et le choix des matériaux semi-conducteurs constituant les cellules solaires sont très importantes pour améliorer leur rendement.

### II.2 Performances des cellules solaires :

Différents facteurs affectent les performances des cellules solaires : Les concentrations de dopage, types de matériaux, épaisseur des couches, croissance du réseau, et même le processus de fabrication peuvent influencer sur les performances d'une cellule. Comparer différentes cellules solaires peuvent être difficiles en termes de performance nous ne procédons pas à des mesures des paramètres cités au paravent.

Si la cellule est exposée à la lumière mais non connectée à un circuit externe, une tension est développée qui s'oppose à toute autre diffusion de porteurs. Cette tension à ce point d'équilibre est la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et elle est la tension maximale que la cellule peut produire [14].

De même, dans des conditions de court-circuit, les électrons se dirigent vers le contact métallique sans accumulation de potentiel, un courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) se matérialise. Ce courant est le courant maximum que la cellule solaire peut fournir [14]. Le nombre de paires électron-trou dépend de l'intensité et de la longueur d'onde de la lumière entrante, qui à son tour détermine la quantité de courant produite [13].

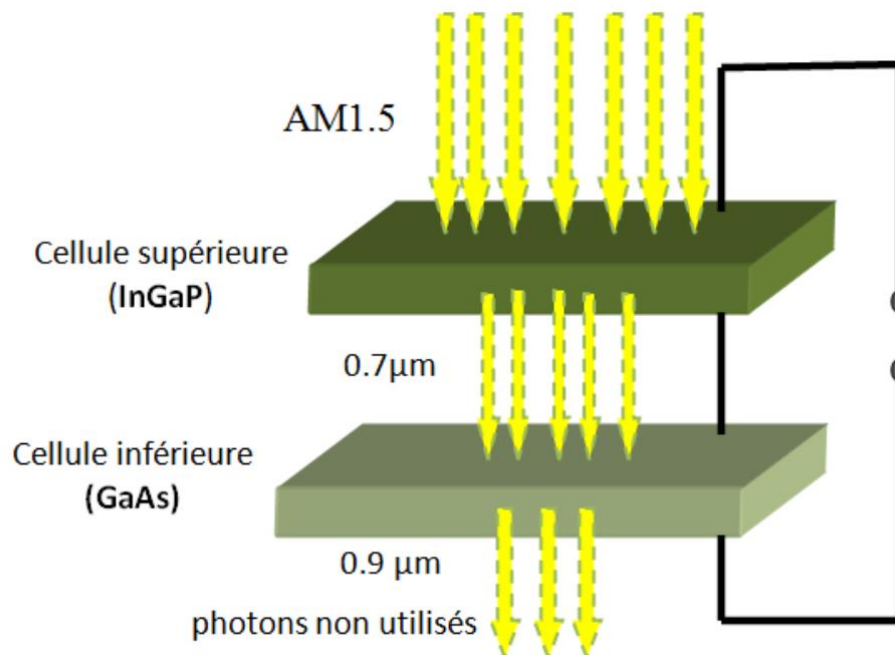
### II.3. Choix des jonctions InGaP et GaAs :

Sous un spectre solaire AM1.5, le choix des matériaux semi-conducteurs utilisés dans notre travail joue un rôle très important pour obtenir des meilleurs rendements. Ce choix dépend principalement du gap d'énergie. Le gap d'énergie optimal des cellules solaires à mono jonction et qui donne un meilleur rendement ne doit pas dépasser 1.4 eV comme le GaAs [16] [17]. La société américaine Alta Devises atteint un rendement de 28.8% pour une cellule mon jonction GaAs [18]. L'empilement d'une autre jonction augmente la performance de la cellule (dans notre travail InGaP). Les jonctions utilisées en tandem doit posséder des gaps descendants (1.75 à 1.8 eV pour la cellule supérieure et 1.1eV pour la cellule inférieure). Le rendement est amélioré à plus de 30% [19] en utilisant une cellule à double jonction à base de matériau

InGaP/GaAs sans concentration. Par l'utilisation des hétérojonctions, une grande partie de spectre est absorbée et donc plus de courant électrique est généré.

### II.4. La mise en tandem des cellules InGaP/GaAs :

Pour augmenter le rendement, plusieurs jonctions sont mises en tandem. Quand un rayon lumineux frappe une cellule solaire à multi jonction, il sera absorbé par la cellule supérieure (InGaP). Alors une partie sera pénétrée dans la deuxième cellule (GaAs). La tension générée par la cellule tandem est la somme des tensions de chaque cellule.



**Figure II.1 :** La cellule solaire à double jonction [19].

### II.5. La jonction tunnel :

La jonction tunnel est due au dopage excessif  $p^+$  /  $n^+$  du semi-conducteur pour déplacer les niveaux de Fermi vers la bande de valence ou vers la bande de conduction. Par conséquent des trous sont apparus dans la bande de valence de la jonction P et des électrons dans la bande de conduction de la jonction n. Donc la largeur de la zone de déplétion est diminuée par la concentration du dopage qui affecte l'effet de la jonction tunnel.

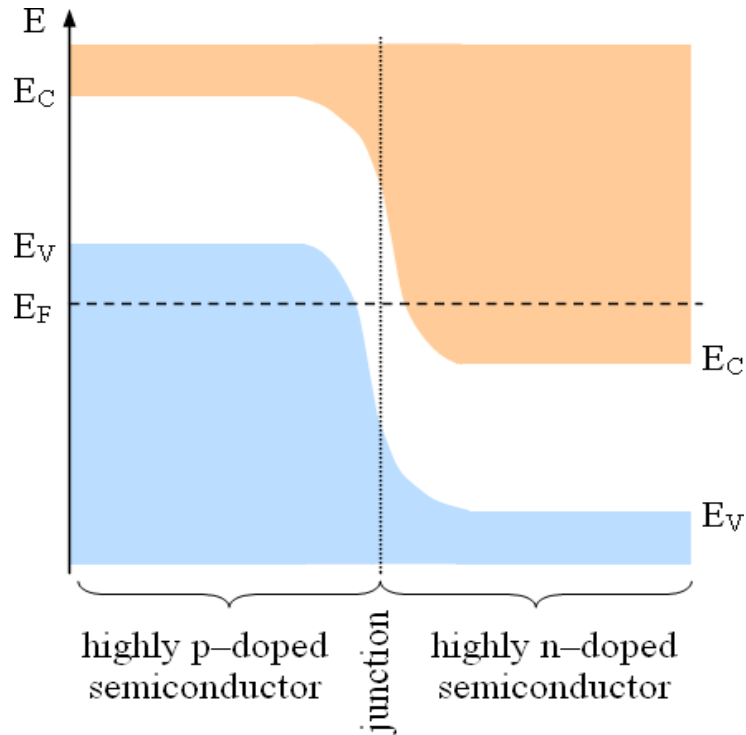


Figure II.2 : Diagramme de bande de dopage de la jonction tunnel [14]

## II.6. Les types de la jonction tunnel

**II.6.1. Tunnel dû au gap direct:** le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont sur le même « axe vertical ». Exemples de matériaux semi-conducteurs dont le gap est direct sont GaAs et InGaP [20].

**II.6.2. Tunnel dû au gap indirect:** le minimum de la bande de conduction et

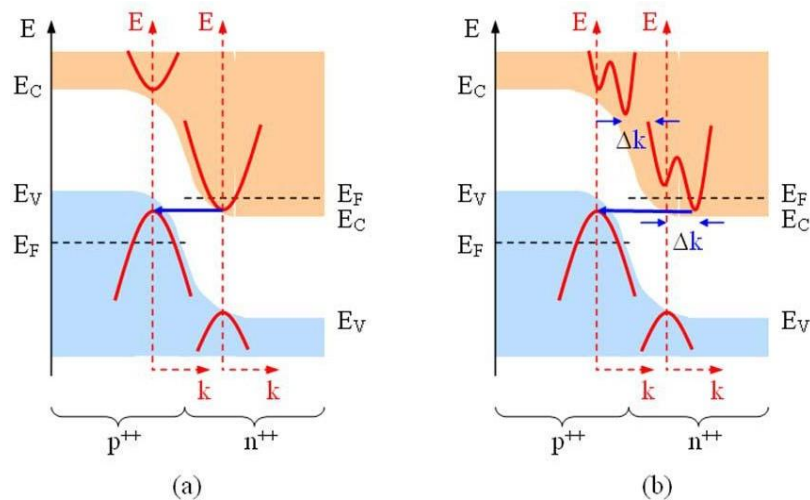


Figure II.3 : (a) Gap direct. (b) Gap indirect [14].

le maximum de la bande de valence n'appartiennent pas à la même «axe vertical».

### **II.7. Modélisation de la jonction tunnel :**

La jonction tunnel dans une cellule à multi jonction peut être défini comme le phénomène de la vitesse de porteurs à travers la barrière de potentiel. La caractéristique I-V de la jonction tunnel est illustrée dans la figure V-10. Elle est modélisée par les équations ci-dessous [21] :

$$J_{TOTAL} = \frac{V(t)}{V_p} J_T + J_x + J_{TH} \quad (II.1)$$

$$J_T = J_p e^{1 - \frac{V(t)}{V(p)}} \quad (II.2)$$

$J_{TOTAL}$  : densité de courant total de la jonction tunnel.

$J_T$ : densité de courant spécifique pour la diode tunnel.

$J_x$ : l'excès de densité de courant tunnel.

$J_{TH}$ : densité de courant caractérisant la diode.

$J_p$ : densité maximum(pic) du courant

$V_p$ : la tension maximum correspondant (pic).

$J_v$ : densité du courant maximale (pic)

#### **II.7.1.Calcul du courant tunnel**

La simulation par Tcad Silvaco tient en compte le profil des bandes d'énergie et la séparation entre les électrons générés dans la bande de conduction et les trous générés dans la bande de valence. Le courant tunnel est calculé en faisant un maillage de la structure de cellule en utilisant les instructions **qtx** et **qty** après le maillage principal de la cellule.

Le courant tunnel est calculé comme suit [22] :

$$J(E) = \frac{qKTm^*}{2\pi^2 h^3} T(E) Ln \left\{ \frac{1 + \exp[E_{f1} - E]/KT}{1 + \exp[E_{Fr} - E]/KT} \right\} \Delta E \quad (III.3)$$

$T(E)$  : la probabilité de tunnel.

$m^*$ : masse effective de l'électron.

$K$ : constante de Boltzmann  $q$  charge électrique

$T$ : température en Kelvin

$h$ : constante de Planck réduite

$E$ : l'énergie d'électron.

### II.8. Critères de choix de la jonction tunnel :

En 1958, l'auteur Esaka a découvert que la concentration de dopage des impuretés peut être augmentée de 1 à 1000 pour  $10^7$  atomes de semi-conducteurs [23]. Ce dopage crée une résistance négative. La zone de déplétion se rétrécit à cause de la concentration élevée du semi-conducteur. Ce qui va pousser les électrons à percer un tunnel à travers la barrière sans changer leur énergie.

Le choix de la jonction tunnel et leur utilisation entre les cellules (supérieure et inférieure) doit satisfaire les critères suivants :

- Les matériaux semi-conducteurs doivent posséder les mêmes constantes de réseau(mailles).
- L'épitaxie de la cellule supérieure exige que la cellule inférieure doive supporter une température élevée. Mais l'augmentation de la température entraîne une diffusion du dopant et donc la diminution du courant de crête de la JT (courant de pic).
- La JT doit assurer un contact ohmique entre les deux cellules en tandem.
- Il faut qu'elle assure un passage des photons vers la cellule inférieure.
- Leur épaisseur ne doit pas dépasser 10nm pour minimiser l'absorption par cette jonction tunnel [24].
- Il faut que l'énergie de gap du tunnel doive être supérieure à celle de la cellule supérieure.

Mais le courant tunnel va diminuer avec l'augmentation du gap.

### II.9. L'avantage de l'utilisation de la jonction tunnel :

Pour permettre la conduction électrique dans les deux sens entre les deux cellules InGaP et GaAs, on introduit une jonction tunnel. Elle assure la circulation du courant électrique dans la cellule en tandem et une résistance de connexion faible entre le BSF de la cellule supérieure (InGaP) et la fenêtre de la cellule inférieure (GaAs) [14] [21]. Par conséquent, si un rayon lumineux frappe une cellule solaire, la tension fournie par la cellule supérieure sera inversée[30]. L'épaisseur de la base et l'émetteur de jonction tunnel utilisé est de 8nm.

#### II.9.1. La couche fenêtre :

Le rôle de la fenêtre est la minimisation de la recombinaison et la passivation de la surface des pièges des porteurs minoritaires. Leur effet est caractérisé par la vitesse de recombinaison de surface des porteurs minoritaires. La valeur élevée de cette vitesse diminue la réponse spectrale de la cellule InGaP/GaAs [24].

Il y a plusieurs critères à prendre en considération pour le choix de la fenêtre.

- La fenêtre utilisée est InAlAsP[26].
- La constante de réseau est proche de celle d'InGaP(5.65Å).
- L'énergie de gap de la fenêtre doit être supérieure à l'énergie de gap de l'émetteur (InGaP) ( $E_g=2.30\text{eV}$ ).
- Une concentration de dopage élevée plus de  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ [27][19].
- Des matériaux qui produisent une vitesse de recombinaison de surface faible.

### II.9.2. Champ de la surface arrière(BSF) :

Le BSF est utilisé pour passiver l'interface entre la base de la cellule supérieure et la jonction tunnel (JT) et réduire la diffusion des dopants de la jonction tunnel [24]. En effet, la vitesse de recombinaison est élevée au niveau de cette interface, influe sur la réponse spectrale (RS) et la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ).

Nous avons utilisé deux BSF (InAlAsP pour la cellule supérieure et AlGaAs pour la cellule inférieure). Ce choix est fait en respectant les caractéristiques de la sous couche de BSF.

- Les constantes de réseau de InAlAsP et de AlGaAs sont proches de celle de GaAs (5.65Å et 5.64 Å respectivement).
- L'énergie de gap est supérieure à l'énergie de gap de GaAs ( $E_{g(\text{InAlAsP})}=2.30\text{eV}$ ,  $E_{g(\text{AlGaAs})}=1.80\text{eV}$ ).
- La concentration de dopage (est de l'ordre de  $10^{20}/\text{cm}^3$ ) [24].

### II.10. Les propriétés de matériaux utilisés

La simulation d'une cellule solaire à hétérojonction nécessite une bonne optimisation et un bon choix de matériaux semi-conducteurs. Les matériaux semi-conducteurs peuvent être composé d'un seul élément ou un alliage de plusieurs éléments (ternaire, quaternaire...etc.). L'alliage des matériaux semi-conducteurs comme InGaP dépend des propriétés physiques et électroniques de chaque semi-conducteur.

La modélisation mathématique joue un rôle important dans l'optimisation effective de la cellule à réaliser. Elle permet un choix approximatif et proche de celle de l'expérimentation.

L'alliage des semi-conducteurs est l'étape principale pour simuler et réaliser une cellule solaire à hétérojonction. Dans notre cas, on a tenu en compte les propriétés des semi-conducteurs InGaP et GaAs.

### II.10.1. Les critères adoptés pour faire l'alliage des matériaux semi-conducteurs III-V

Dans ce travail, nous avons utilisé des alliages des semi-conducteurs III-V comme le  $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_{(x)}\text{P}/\text{GaAs}$  car ils assurent un rendement élevé. Le calcul de certains paramètres dans un alliage ternaire  $\text{A}_{(x)}\text{B}_{(1-x)}$  est donné par l'équation linéaire suivante (dite la loi de Vegard) [15]:

$$T_{\text{ABC}}(x) = xB_{\text{AC}} + (1-x)B_{\text{BC}} = a + bx \quad (\text{V-9})$$

Où :  $a = B_{\text{BC}}$  et  $b = B_{\text{AC}} - B_{\text{BC}}$

Alors que d'autres paramètres des matériaux ternaires est donnée par la relation non linéaire suivante :

$$T_{\text{abc}} = xT_{\text{ac}} + (1-x)T_{\text{bc}} - x(1-x) C_{\text{abc}}$$

Où

$T_{\text{abc}}$ : énergie de gap ternaire.

$T_{\text{ac}}$  et  $T_{\text{bc}}$  : énergie de gap binaire.  $x$ : la fraction molaire.

$C_{\text{abc}}$ : le facteur de Bowing.

Le tableau ci-après résume le paramètre de Bowing pour quelque matériau ternaire.

| Matériaux           | InGaP | AlGaP | GaInAs | InAsN |
|---------------------|-------|-------|--------|-------|
| Paramètre de Bowing | 0.65  | 0     | 0.477  | 4.22  |

**Tableau II.1:** Valeurs des paramètres de Bowing pour des matériaux ternaires utilisés[15].

- Énergie de gap : la valeur de l'énergie de gap qui permet l'absorption du spectre AM1.5 varie de 1.75 à 1.8 eV pour la cellule supérieure (top) et de 1.1 eV pour la cellule inférieure (Bottom) [16]. Dans notre mémoire les deux cellules mises en tandem sont InGaP et GaAs dont l'énergie de gap est 1.90 eV et 1.42 eV respectivement [26].

- La constante de réseau : l'épitaxie (hétérojonction) des deux semi-conducteurs différents ne peut se faire que si les semi-conducteurs ont des constantes de réseaux très proches pour éviter le désaccord de maille entre le substrat et le matériau semi-conducteur. La constante de réseau de  $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_{(x)}\text{P}$  (un alliage ternaire) est calculée selon la loi de Vegard comme suit [6][27][17]:

$$\alpha_{\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_{(x)}\text{P}} = x\alpha_{\text{GaP}} + (1-x)\alpha_{\text{InP}}$$

Où  $\alpha$  est la constante de réseau et  $x$  est la fraction molaire.

Alors que le désaccord de réseau entre les matériaux semi-conducteur du

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha(epit) - \alpha(sub)}{\alpha(epit)} \quad [II.4]$$

Substrat et celle du matériau des couches supérieures est donné par [27]

Le tableau ci-après résume les constantes de réseau des matériaux utilisées :

| Matériau                | InGaP | GaAs | InAlAsP | AlGaAs |
|-------------------------|-------|------|---------|--------|
| Constante de maille (Å) | 5.65  | 5.65 | 5.65    | 5.64   |

**Tableau II.2:** Valeurs des constantes de réseau de différents matériaux utilisés [26].

### **II.10.2. Propriétés des matériaux InGaP/ GaAs :**

La construction des cellules solaires à hétérojonction dépend principalement du choix des matériaux semi- conducteurs et la compatibilité entre les propriétés physiques et électriques des matériaux des couches juxtaposées. La simulation et l'optimisation des matériaux semi-conducteurs utilisées dans la conception des cellules solaires ne sont pas assez simples. Ils sont limités par plusieurs paramètres optoélectroniques des matériaux tels que la durée de vie, la mobilité, la recombinaison, et la réfraction.

### **II.10.3. Propriétés de matériau InGaP :**

Le  $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$  est un composé ternaire. Il possède un gap direct pour une fraction molaire inférieure à 0.74 et un gap indirect pour une fraction molaire supérieure à 0.74. Il est caractérisé par une faible vitesse de recombinaison à la surface. Le tableau ci-après présente les propriétés de matériau  $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$  à 300K.

| Paramètre                                                               | $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$                                                     | $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$                             | reference |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Energie de gap (eV)                                                     | $E_g(x)=1.35+0.73x+0.7x^2$<br>(atlas)                                                          | 1.89                                                                 | [15]      |
| Permittivité diélectrique                                               | 1.5-1.4x                                                                                       | 11.8                                                                 | [15]      |
| Affinité électronique $\chi$ (eV)                                       | $\chi(x)=4.38-0.58x$                                                                           | 4.09                                                                 | [15]      |
| Constante de réseau(A°)                                                 |                                                                                                | 5.65                                                                 | [19]      |
| Coefficient d'Auger( $\text{cm}^6/\text{s}$ )                           | $A(x)=-8.2 \times 10^{-30}x^2$<br>$+8.3 \times 10^{-30}x$<br>$+9 \times 10^{-31}$              | $3 \times 10^{-30}$                                                  | [27]      |
| Recombinaison radiative $A_0$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )                | $A_0(Eg)=(1 \pm 0.3)10^{-10}$                                                                  |                                                                      | [27]      |
| Recombinaison En surface                                                | InGaP/GaAs:1.5cm/s                                                                             |                                                                      | [27]      |
| Masse effective des électrons et des trous $m_{e(x)}^*$ et $m_{h(x)}^*$ | $\frac{m_{e(x)}^*}{m_e} = 0.0254x^2 - 0.114x + 0.08$<br>$\frac{m_{h(x)}^*}{m_0} = 0.19x + 0.6$ | $\frac{m_{e(x)}^*}{m_0} = 0.029$<br>$\frac{m_{h(x)}^*}{m_0} = 0.695$ | [15]      |

**Tableau II.3:** Les propriétés de matériau  $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$  à 300K.

#### II.10.4. Propriétés de matériau GaAs

L'arséniure de gallium est un composé de gap direct. Il est caractérisé par une forte mobilité des électrons et une stabilité à une température élevée. Les propriétés du matériau GaAs sont illustrées dans le tableau ci-après [15] [27]:

| Paramètre                                                                            | GaAs                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Energie de gap(eV)                                                                   | 1.42                                                                     |
| Permittivité diélectrique                                                            | 13.2                                                                     |
| Affinité électronique $\chi$ (eV)                                                    | 4.07                                                                     |
| Constante de réseau (Å)                                                              | 5.65                                                                     |
| Coefficient d'Auger(cm <sup>6</sup> /s)                                              | Dopé (n): $1.9 \times 10^{-31}$<br>Dopé (p): $12 \times 10^{-31}$        |
| Recombinaison radiative $A_0$ (cm <sup>3</sup> /s)                                   | $10^{-10}$                                                               |
| Masse effective des électrons et des trous et<br><br>$m_{e(x)}^*$ et<br>$m_{h(x)}^*$ | $\frac{m_{e(x)}^*}{m_0} = 0.067$<br><br>$\frac{m_{h(x)}^*}{m_0} = 0.642$ |

**Tableau II.4 :** Les propriétés de matériau GaAs à 300k.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le pourquoi du choix des matériaux InGaP/GaAs, en fonction de ses propriétés physiques, électriques et structurales pour la cellule à double jonction et ainsi que la jonction Tunnel. Ce choix a été fait dans le but d'améliorer le rendement tout en réduisant les pertes comparativement par rapport à la cellule solaire mono jonction.

## **Chapitre III**

# **Modélisation et simulation des performances des panneaux photovoltaïques par Matlab Simulink**

### III.1. Introduction :

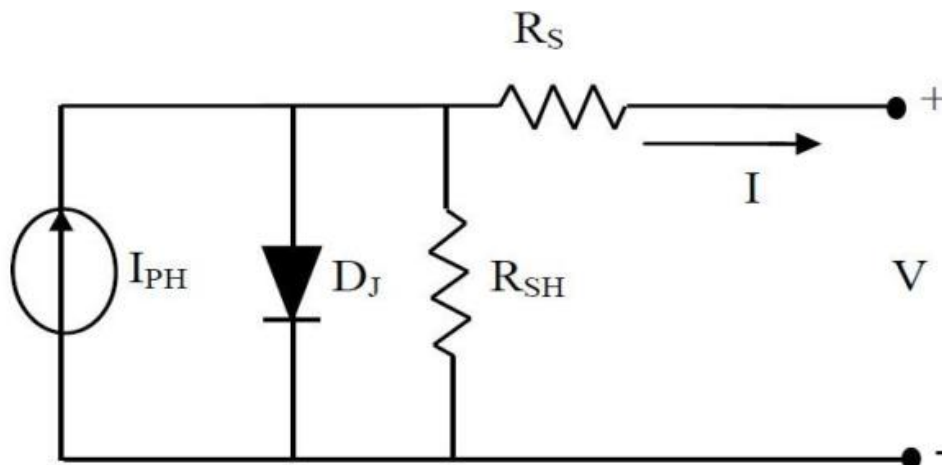
L'énergie solaire est devenue l'un des sources les plus importantes qui remplace l'énergie fossile grâce à son abondance. Des efforts sont faits pour augmenter le rendement des cellules solaires et de réduire le cout de production. La modélisation et le choix des matériaux semi-conducteurs constituant les cellules solaires sont très importantes pour améliorer leur rendement.

### III.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Le modèle à une seule diode et cinq paramètres (figure III.1) est le plus utilisé pour sa simplicité, sa rapidité à simuler, ainsi que sa précision. Il se compose d'un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour représenter les différentes pertes dans la cellule.

**2.1. La résistance série :** représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

**2.2. La résistance shunt :** est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée



**Figure.III.1 :** Schéma électrique d'une cellule solaire photovoltaïque

Ce modèle est dit à 5 paramètres qui sont :  $I_{ph}$ ,  $I_{sh}$ ,  $I_0$ ,  $R_{sh}$  et  $R_s$

Ce modèle contient une source de courant  $I_{ph}$  qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule, et une diode en parallèle qui représente la jonction PN. La résistance série  $R_s$  tient compte des pertes ohmiques des matériaux, des métallisations et du contact semi-conducteur.

La résistance parallèle  $R_{sh}$  représente le courant de fuite qui se situe entre le dessus et le dessous de la cellule.

L'équation des courants du modèle à une diode de la cellule PV est le suivant :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sh} - I_0 \quad (III.1)$$

Avec :

$I_{cell}$ : Courant délivré par la cellule.

$I_{ph}$ : Photo courant.

$I_0$  : Courant de la diode.

$I_{sh}$ : Courant shunt

### **2.3.a-Photo-courant :**

Le courant  $I_{ph}$  d'une cellule PV dépend de la température et de l'ensoleillement ainsi que du coefficient de température du courant de court-circuit généralement donné dans les références constructeurs. Le courant  $I_{ph}$  a pour expression générale :

$$I_{ph} = (I_{sc} + k_i(T + T_{ref})) \frac{G}{G_{ref}} \quad (III.2)$$

$I_{sc}[A]$  : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

$k_i[A/K]$  : coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule à 25°C et 1000 W/m<sup>2</sup> ( $k_i = 0.0032$ ).

$T [K]$  : Température de fonctionnement.

$G [W/m^2]$  : Irradiation sur la surface de la cellule.

$T_{ref}[K]$  : Température de référence (ambiante) (25 °C +273 °C = 298K).

$G_{ref}[W/m^2]$  : Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

### **2.4. Courant de saturation inverse de la diode :**

Le courant inverse de saturation de la diode qui représente la valeur asymptotique du courant  $I$  en polarisation inverse, dépend de la température et de la largeur de la bande d'énergie du matériau de la cellule solaire :

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_{g0} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{AK} \right] \quad (III.3)$$

Avec :

$I_{rs}[A]$  : courant inverse de saturation

$q [C]$  : charge de l'électron ( $1.6 \times 10^{-19} C$ )

$E_{g0} [eV]$  : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

$A$  : facteur d'idéalité de la jonction (diode) (1,3) ( $1 < A < 2$ )

$K [J/K]$  : constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$ )

Le courant inverse de saturation de la diode (courant de fuite) est donné par l'expression suivante :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{AN_sKT}\right) - 1} \quad (III.4)$$

Avec :

$V_{oc}[V]$  : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série.

Le courant dans la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I R_S}{R_{sh}} \quad (III.5)$$

$I [A]$  : courant débité par le module

$V [V]$  : tension aux bornes du module

Le courant total débité par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I R_S}{A N_s K T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I R_S}{R_{sh}} \quad (III.6)$$

Remarque : pour  $N_p$  modules connectés en parallèle le courant  $I$  est multiplié par  $N_p$

$$I_{tot} = N_p I \quad (III.7)$$

Pour  $N_s$  modules connectés en série la tension  $V$  est multipliée par  $N_s$  :

$$V_{tot} = N_s V \quad (III.8)$$

### III.3. Les Schémas blocs

Les schémas de simulation des différents courants du modèle sont réalisés à l'aide du logiciel Matlab. /Simulink

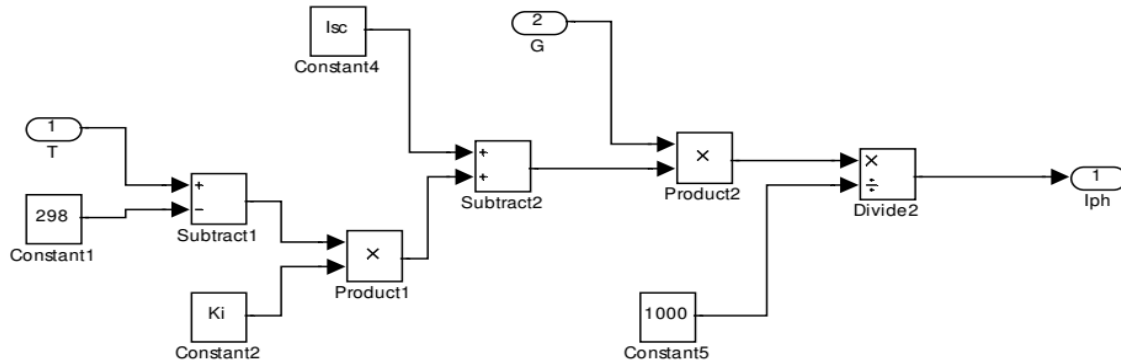


Figure III.2 : Schéma de simulation du courant  $I_{ph}$

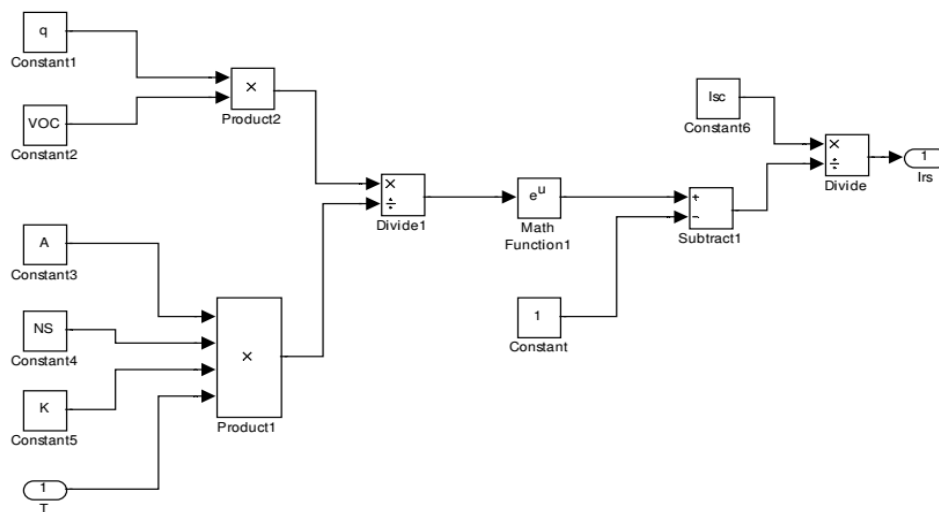
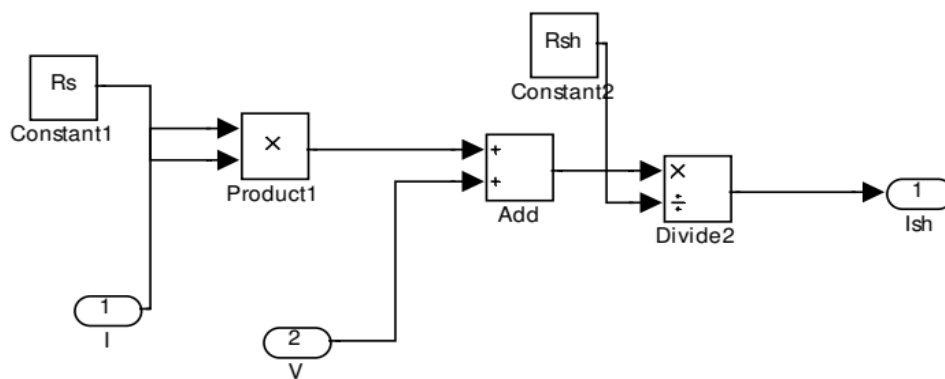
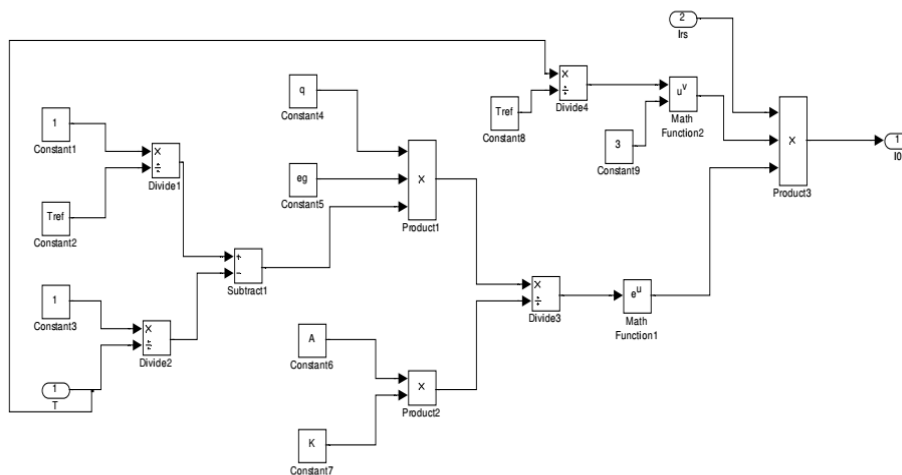


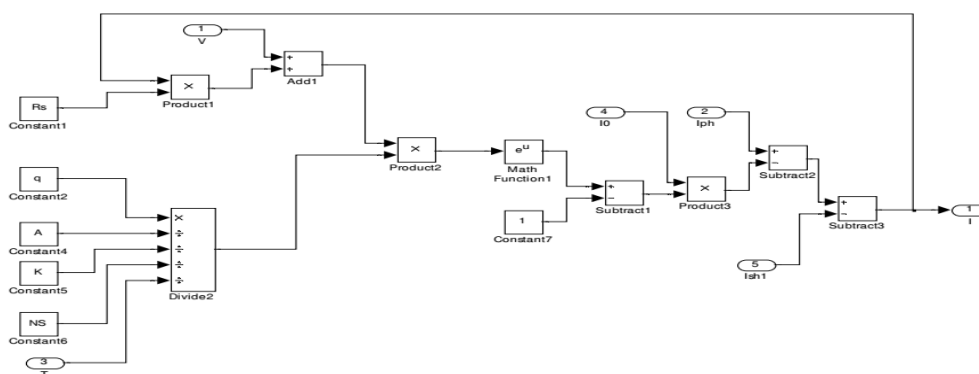
Figure III.3 : Schéma de simulation du courant  $I_{rs}$



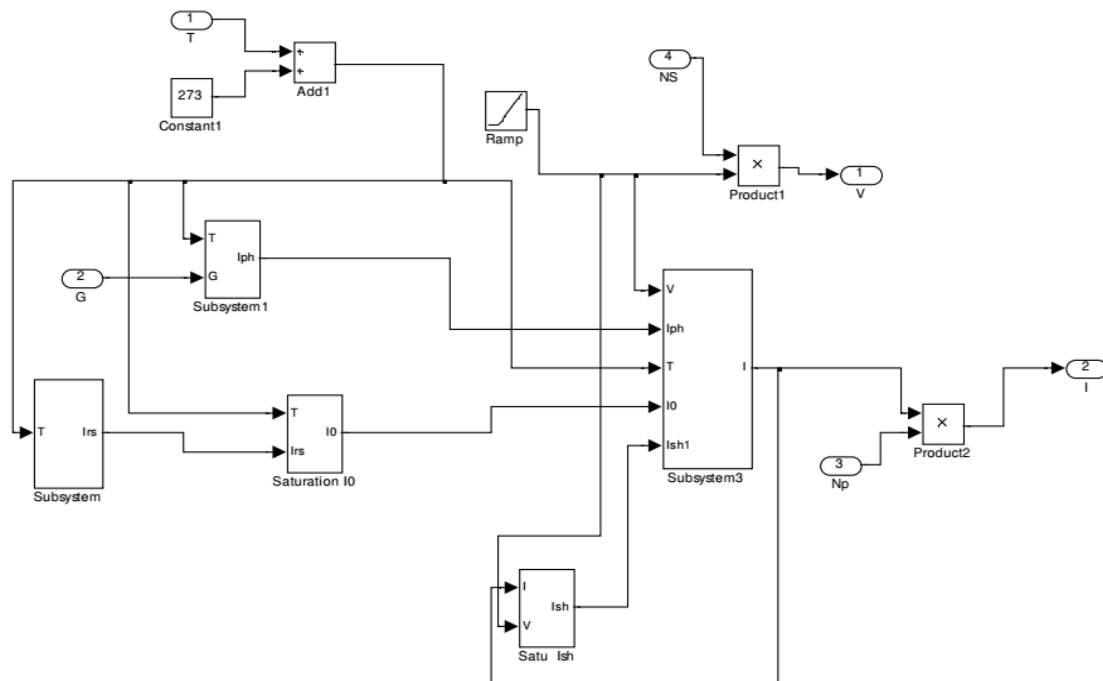
**Figure III.4 : Schéma de simulation du courant Ish.**



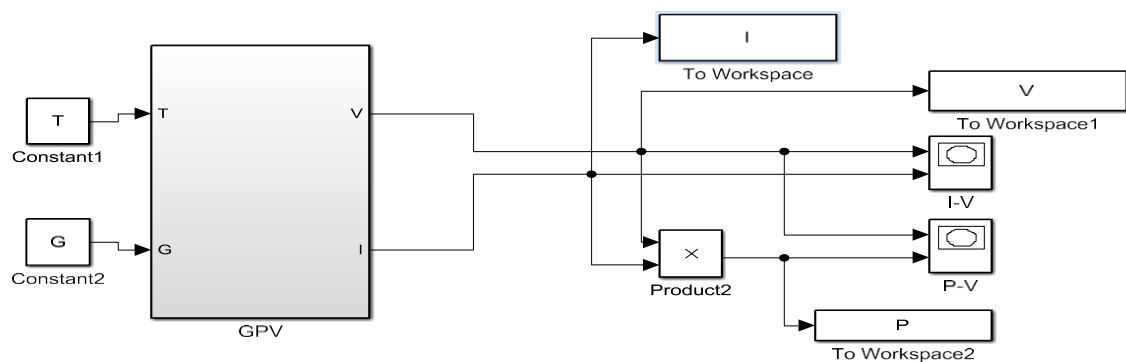
**Figure III.5 : Schéma de simulation du courant I0**



**Figure III.6 : Schéma de simulation de la courant I.**



**Figure III.7 :** Schéma de simulation du courant total débité par le panneau photovoltaïque total.



**Figure III.8 :** schéma d'un générateur PV sous MATLAB/Simulink

## Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque à l'aide de Matlab Simulink.

# **Chapitre IV**

## **Résultats de simulation par TCAD Silvaco et Matlab Simulink**

## Partie IV.1. Résultats de simulation obtenus par Tcad silvaco

### IV.1.1. Introduction

La cellule solaire est la partie essentielle du panneau solaire. Pour améliorer le rendement de panneaux solaires, il faut améliorer la performance des cellules qui composent ce panneau. Les cellules solaires inorganiques à base des matériaux InGaP/ GaAs donnent des rendements élevés grâce à ses gaps décroissants qui permettent d'absorber le spectre solaire dans sa quasi-totalité. La cellule solaire tandem (multifonction) InGaP/GaA a été simulée après une optimisation des différents paramètres tels que l'épaisseur, le dopage, et les matériaux. Les résultats de simulation obtenus et leurs interprétations sont présentés dans cette partie.

### IV.1.2. Résultats de simulation :

Nous avons utilisé comme paramètres technologiques et géométriques, ceux des jonctions d'InGaP et de GaAs et nous nous sommes intéressés aux émetteurs et aux bases de ces deux jonctions. Les paramètres utilisés sont : l'épaisseur, la fraction molaire et le dopage. Pour une meilleure solution optimisée, un des paramètres est fixe tandis que les autres sont variables sur une plage de valeurs afin d'obtenir un rendement optimal.

Les deux cellules sont interconnectées par une jonction tunnel. L'épaisseur de celle-ci ainsi que les types de matériaux utilisés pour l'émetteur et la base, sont variés et choisis afin d'obtenir des meilleures performances de la cellule InGaP/GaAs optimisée.

Les résultats de simulation nous a permis d'obtenir une structure à multi jonctions qui donne un rendement optimal à une température 300K. Les tableaux ci-après montrent les meilleurs résultats de chaque essai.

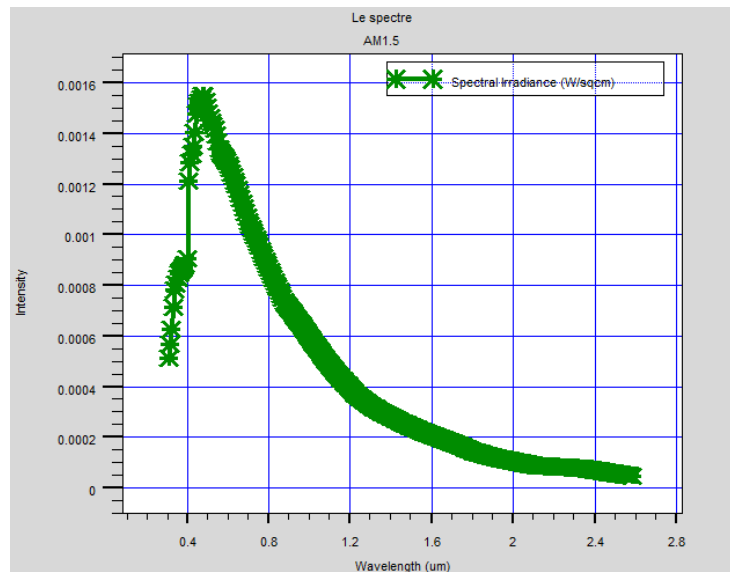
### IV.1.3 La structure de la cellule optimisée :

| Contact Anode       |                 |           |                   |
|---------------------|-----------------|-----------|-------------------|
| 30nm                | Fenetre         | n+InAlGaP | accept=1e19cm-3   |
| 55nm                | Emetteur        | n+InGaP   | accept=15e18cm-3  |
| 550nm               | Base            | p+InGaP   | donners=11e18cm-3 |
| 30nm                | BSF             | p+InAlGaP | donners=10e19cm-3 |
| Epaisseur Ajustable | Emetteur tunnel | p+InGaP   | donners=9e19cm-3  |
|                     | Base tunnel     | n+InGaP   | accept=9e19cm-3   |
| 40nm                | Fenetre         | n+InGaP   | accept=5e20cm-3   |
| 550nm               | Emetteur        | n+GaAs    | accept=1e18cm-3   |
| 3um                 | Base            | p+GaAs    | donners=1e17cm-3  |
| 10nm                | BSF             | p+AlGaAs  | donners=10e19cm-3 |
| 150nm               | Substrat        | p+GaAs    | donners=1e18cm-3  |
| Contact Cathode     |                 |           |                   |

FigureIV.1.1 : Conception de la cellule InGaP/GaAs optimisée

### IV.1.4. Le spectre solaire :

La cellule solaire InGaP/GaAs est éclairée par un spectre solaire AM1.5 d'une puissance de  $1000\text{W}/\text{cm}^2$  car il permet de simuler la caractéristique et donc de calculer le rendement de la cellule.

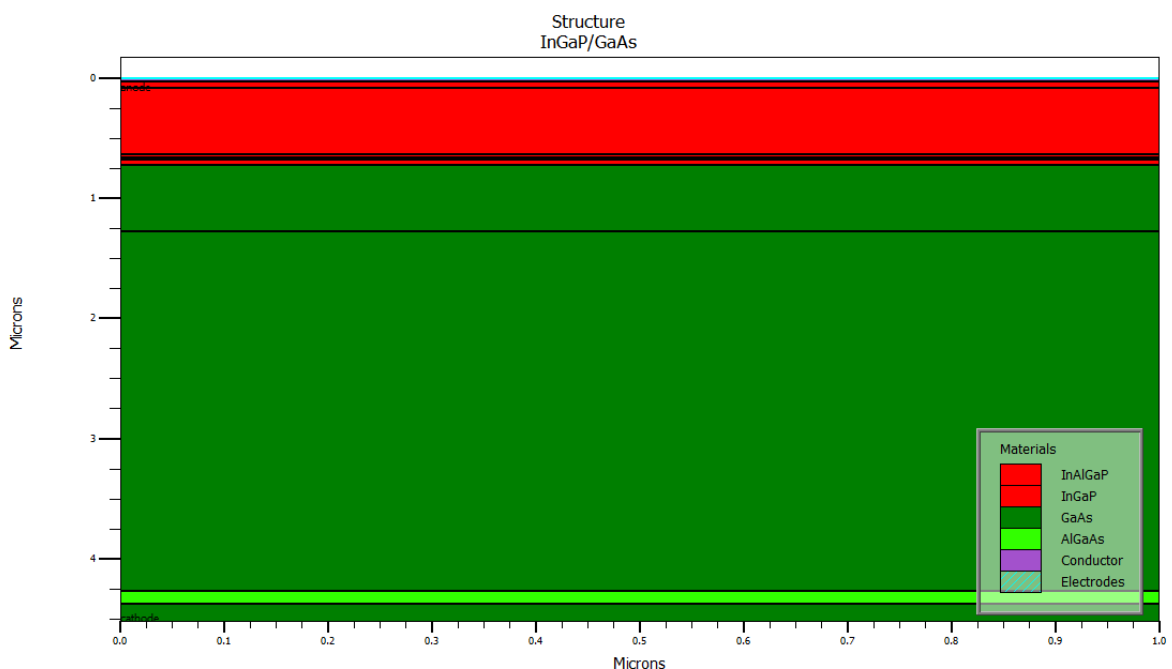


**Figure IV.1.2 :** le spectre solaire AM1.5 illuminant la cellule solaire

La figure IV.2. Montre le spectre solaire AM1.5 L'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde de la cellule solaire.

### II.1.5. Simulation de la cellule InGaP/GaAs :

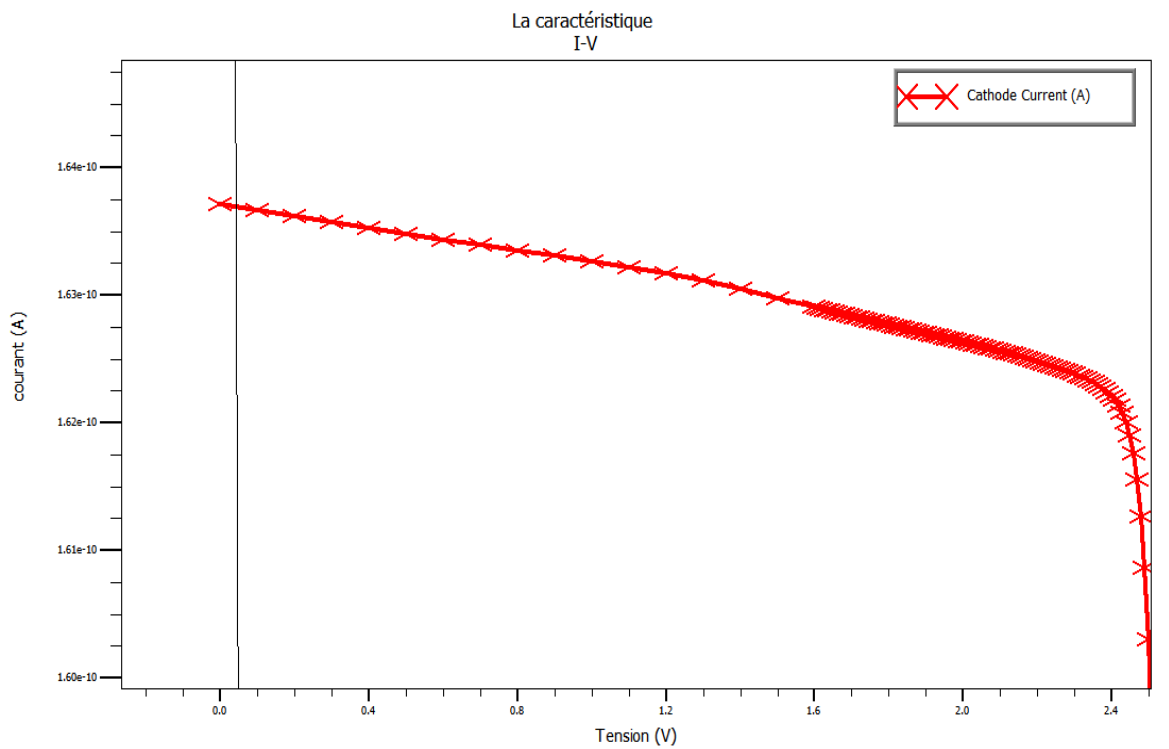
La simulation solaire InGaP/GaAs est simulée avec les caractéristiques mentionnées dans la figure IV.1.1. les résultats de simulation obtenus sont :



**Figure IV.1.3:** Structure simulée sous SILVACO-Atlas.

#### IV.1.6. Caractéristique(I-V)de la structure

La figure IV.1.3 représente la caractéristique(I-V) d'une cellule InGaP/GaAs simulée par Silvaco-Atlas



**FigureIV.1.4.**Caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs.

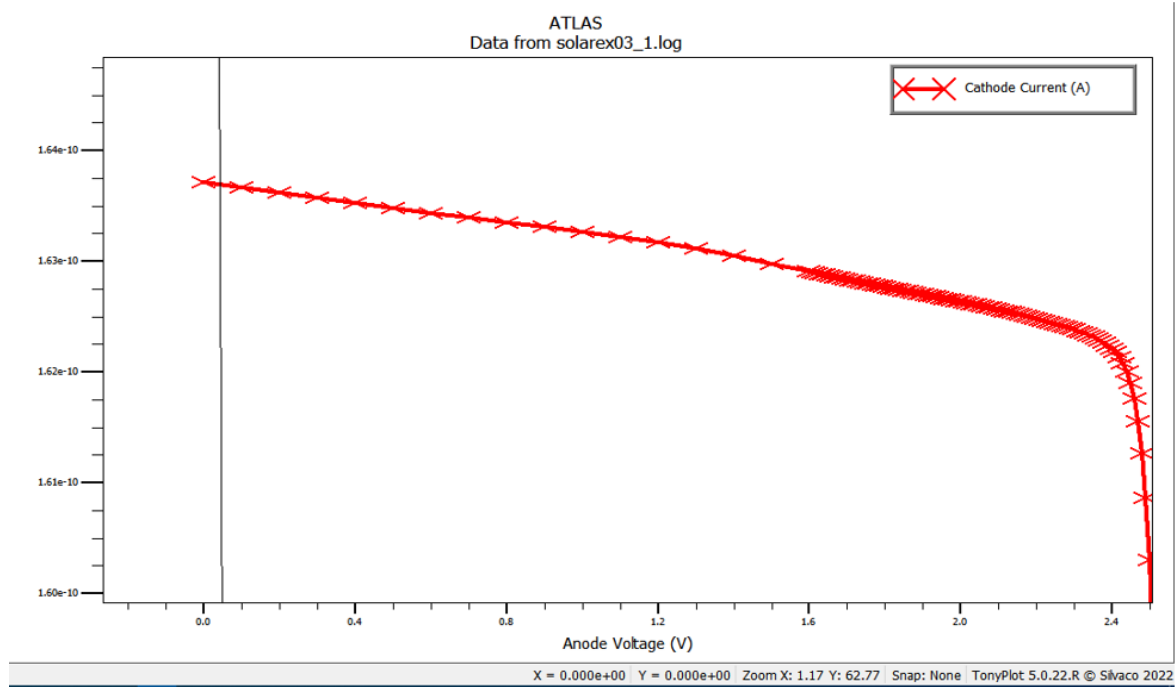
La figure IV.1.4 représente les caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs Les paramètres obtenus à partir de celle ci sont résumés dans le tableau suivant.

**TableauIV.1.1.** les résultats de simulation a double jonction.

|                                          |                                 |
|------------------------------------------|---------------------------------|
| Rendement ( $\eta$ )                     | 29.02%                          |
| Facteur de forme (FF)                    | 91.77%                          |
| Densité de Courant de CC<br>( $J_{CC}$ ) | 16.376.37mA/c<br>m <sup>2</sup> |
| (Isc)                                    | 1.63mA                          |
| Tension du CO( $V_{CO}$ )                | 2.66V                           |
| Température                              | 300K                            |
| (Pm)                                     | 4.00 mW                         |
| (Im)                                     | 1.60mA                          |

#### IV.1.7.Simulation de la cellule optimisée sans la jonction tunnel : le rôle de la jonction tunnel

Pour avoir le rôle et l'importance de la jonction tunnel, nous avons simulée la cellule optimisée sans elle.



**Figure IV.1.5 :** Caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs. Sans la jonction Tunnel

Les résultats obtenus à partir de la caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs. sans la jonction tunnel sont résumés dans le tableau suivant

..

|                                         |                         |
|-----------------------------------------|-------------------------|
| Rendement ( $\eta$ )                    | 10.43%                  |
| Facteur de Forme(FF)                    | 79.35%                  |
| Densité de Courant de<br>CC( $I_{CC}$ ) | 18.23mA/cm <sup>2</sup> |
| ( $I_{sc}$ )                            | 18.23mA                 |
| Tension du CO( $V_{OC}$ )               | 0.99V                   |
| Température                             | 300k                    |
| ( $P_m$ )                               | 4.00                    |
| ( $I_m$ )                               | 1.60                    |

**Tableau IV.1.3 :** les résultats de simulation sans la jonction tunnel

Nous constatons que le rendement de la cellule optimisée sans la jonction Tunnel a chuté ( il est passé de 29,02% à 10,43%).

#### **1.7.1. L'effet de la jonction tunnel,**

La jonction tunnel est mise entre les deux cellules InGaP/GaAs pour assurer une connexion d'une faible résistance entre le BSF (type p) de la cellule InGaP et la fenêtre (type) de la cellule GaAs [29]. La concentration élevée de dopage peut compenser les donneurs et accepteurs dans la jonction ce qui augmente la largeur de la zone de déplétion et diminue le courant tunnel.

#### **1.7.2. Comparaison entre les différentes jonctions tunnels**

Les jonctions tunnel les plus utilisés dans les cellules à multicouches sont les jonctions tunnel à base des matériaux GaAs/GaAs, InGaP/GaAs, InAlAsP/InGaP et InGaP/InGaP. Pour obtenir un meilleur rendement ,nous avons simulé notre cellule solaire InGaP/GaAs en variant le type de la jonction tunnel en tenant compte de la concentration de chaque couche. Les différents résultats de simulation sont indiqués dans les tableaux et les figures ci-dessous. La jonction tunnel est non linéaire c.-à-d. le courant de la cellule dépend de la tension et de la température. La jonction tunnel de type InGaP/InGaP ne présente pas une résistance négative alors que celle de type GaAs/GaAs possède une résistance négative. Donc le mouvement des porteurs est plus rapide dans la jonction de type InGaP [54].

#### **IV.1.8. L'intérêt (avantage) de l'utilisation de l'hétérojonction**

Les cellules solaires mis en tandem donnent un rendement élevé par rapport à une seule jonction (cellule). Dans un premier pas, on simule la première cellule supérieure (InGaP) seule et après la deuxième cellule inférieure GaAs seule pour comparer leur rendement

##### **A- Simulation de la cellule InGaP**

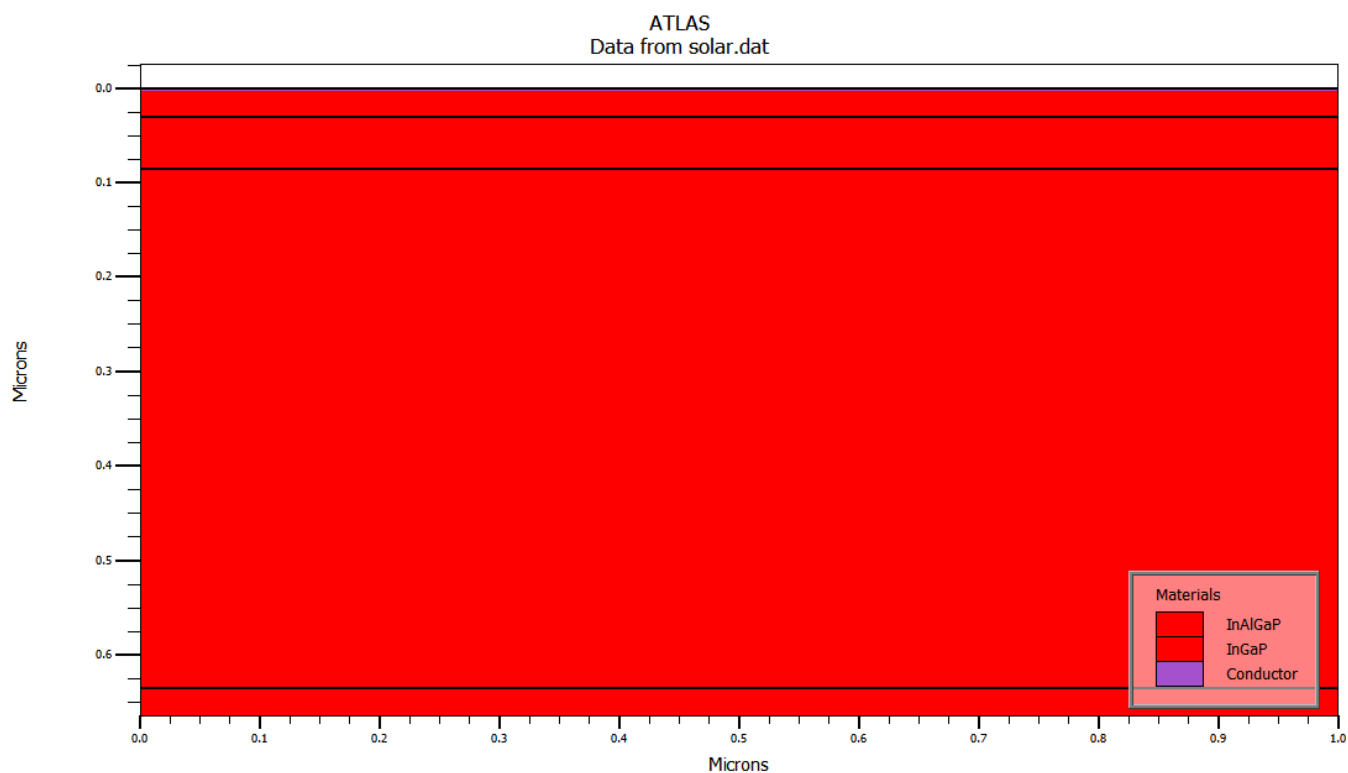


Figure IV.1.6 : Structure simulée sous SILVACO-Atlas.

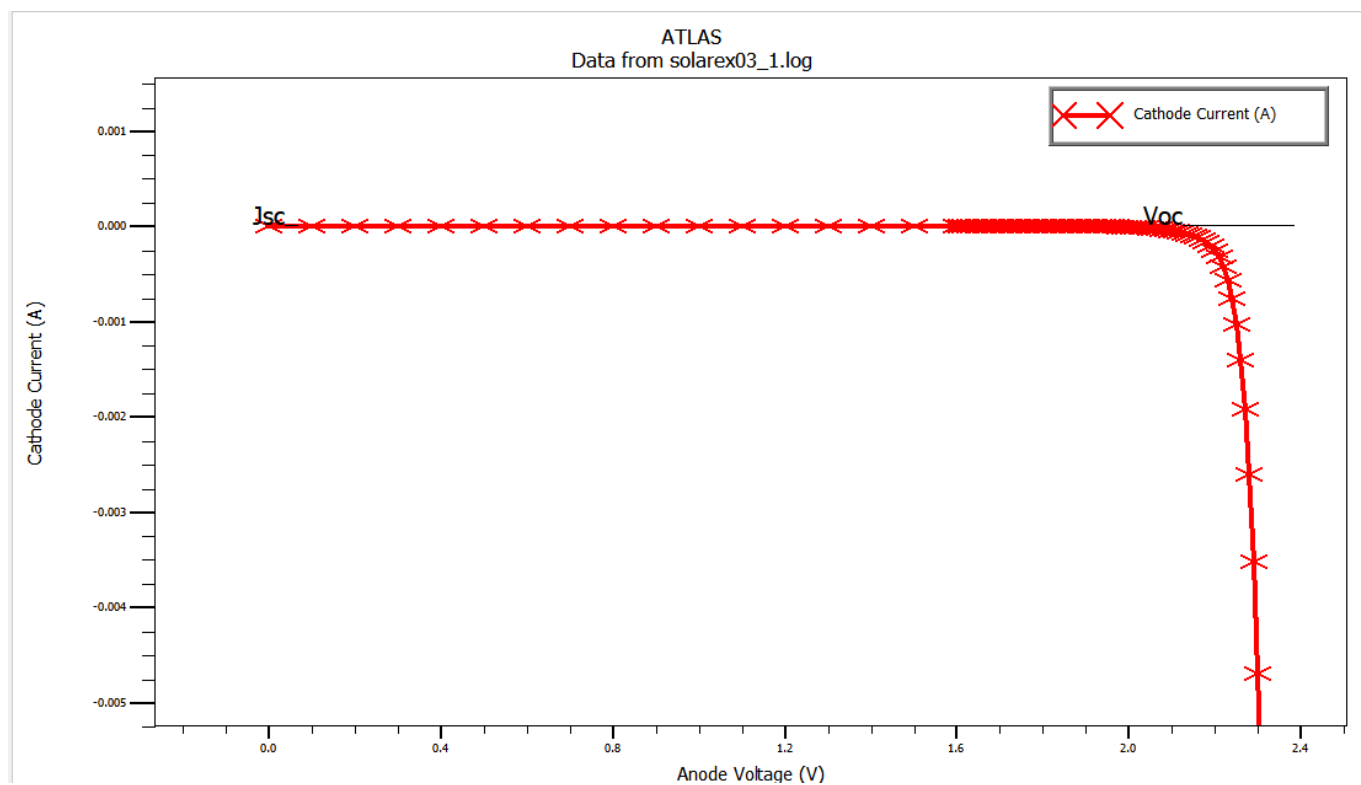


Figure IV.1.7 : Caractéristique I-V de la cellule InGaP..

Les résultats obtenus à partir de la Caractéristique I-V de la cellule InGaP, sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1.4 :** les résultats de simulation de la cellule InGaP

|                                         |                           |
|-----------------------------------------|---------------------------|
| Rendement ( $\eta$ )                    | 22.83%                    |
| Facteur de Forme (FF)                   | 91.53%                    |
| Densité de Courant de<br>CC( $I_{CC}$ ) | 14.2254mA/cm <sup>2</sup> |
| ( $I_{sc}$ )                            | 1.42mA                    |
| Tension du CO( $V_{CO}$ )               | 2.42V                     |
| Température                             | 300k                      |
| ( $P_m$ )                               | 4.00mW                    |
| ( $I_m$ )                               | 1.60mA                    |

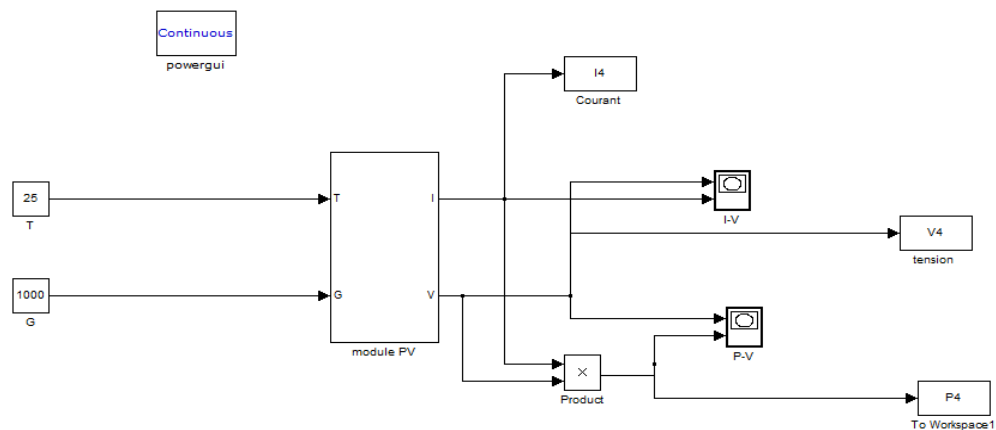
## Partie IV.2 : Résultats simulation obtenus par MATLAB simulink.

### IV.2.1. Introduction :

Dans cette parties On utilise l’outil MATLAB Simulink pour faire la simulation du panneau compose d'un ensemble de cellules à double jonction. Notre travail commence par la cellule solaire et ses caractéristiques I-V et P-V, puis influence des conditions irradiation et de temperature sur ces mêmes caractéristiques.

### IV.2.2 les caractéristiques du panneau solaire photovoltaïque sous MATLAB Simulink dans les conditions normales:

La figure II.1 représente le schema bloc de simulation du panneau solaire photovoltaïque réalisé sous l’environnement MATLAB Simulink pour visuéaliser les caractéristiques (I-V) et (P-V) sous l’effet d’une variation de la température avec l'irradiation étant maintenue constant ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $30^{\circ}\text{C}$  et  $50^{\circ}\text{C}$ ).



**Figure. IV.2. 1 :** Caractéristique électrique du panneau solaire photovoltaïque.

|     |             |
|-----|-------------|
| VOC | 95.7(V)     |
| Isc | 6.52(A)     |
| Ns  | 36(cellule) |
| Ki  | 32          |
| Tn  | 300(K)      |
| Q   | 1.6 e-19    |
| K   | 1.38 e-23   |
| Eg0 | 1.46 (eV)   |
| Rs  | 0.221       |
| Rsh | 2500        |

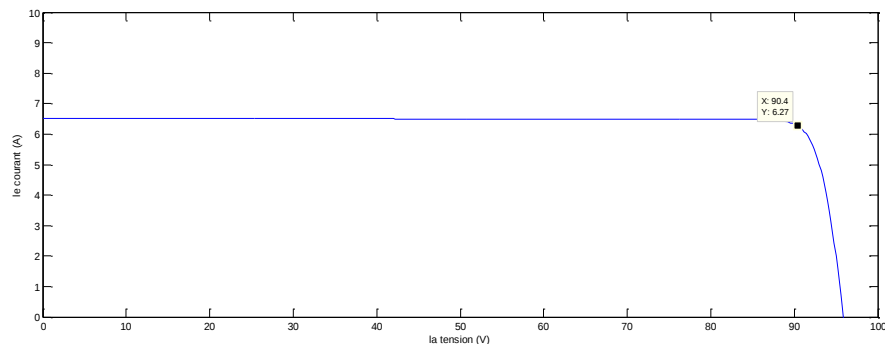
**Tableaux IV.2.1 :** Caractéristique électrique d'un panneau PV.

### IV.2.3. Les résultats de simulation sous matlab-simulink :

#### 3.1. Les Caractéristiques I(V) et P(V) sous les conditions standard ( $T=25^{\circ}\text{C}$ , $E=1000\text{W/m}^2$ ) :

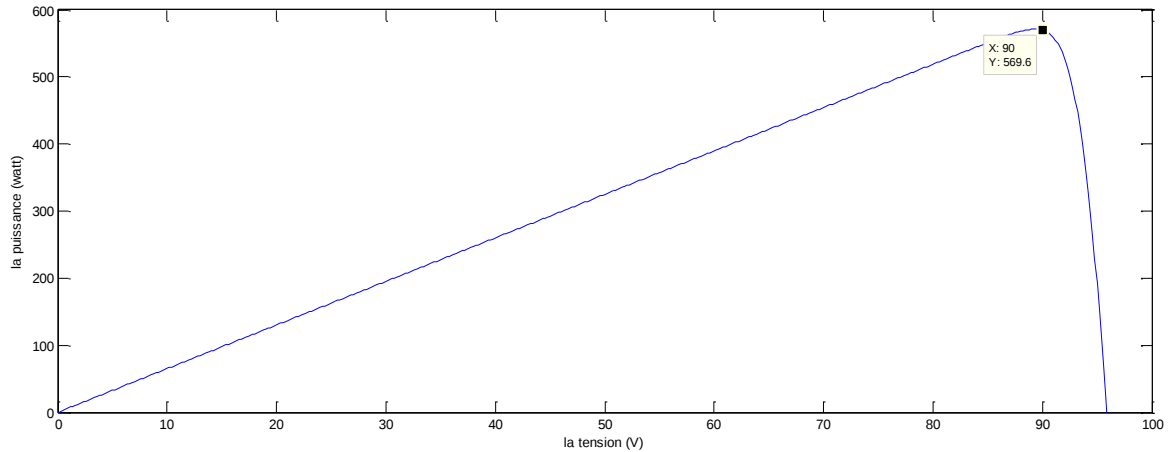
Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) des Caractéristiques courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque Dans les conditions standards ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $E=1000\text{W/m}^2$ )

La figure suivante représente la caractéristique courant–tension du panneau photovoltaïque dans les Conditions de  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ .



**Figure IV.2.1 :** Caractéristique I(V) de panneau ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ ).

La figure suivante représente la caractéristique puissance–tension du panneau photovoltaïque dans les Conditions suivantes  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . La puissance maximale est  $P_{\text{max}}=180\text{W}$ . On remarque que ,quand la tension augmente la puissance au Optimale ( $P_{\text{max}}$ ) ensuite elle décroît.



**FigureIV.2.2.**Caractéristique P(V)du panneau ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ ).

La figure représente la caractéristique  $p(v)$  d'une cellule dans les conditions de  $T=25^\circ\text{C}$  et  $G=1000\text{W/m}^2$ . La puissance augmente presque linéairement jusqu'à la valeur maximale puis elle décroît fortement jusqu'elle atteint la valeur de  $V_{\text{oc}} = 95.7(\text{V})$ .

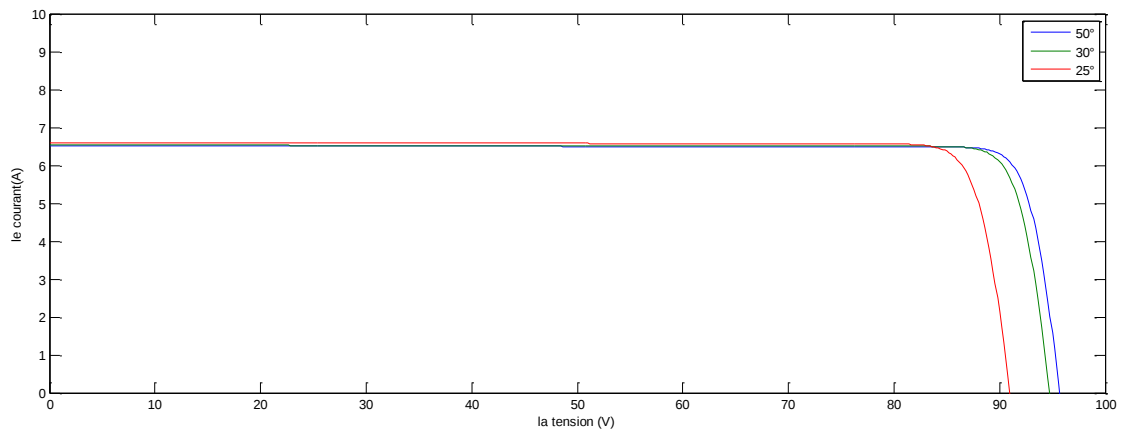
### IV.2.4. Effets climatiques sur le Panneau photovoltaïque PV

#### 4.1. Influence de la température sur le panneau

Les figures suivantes représentent la caractéristique courant – tension  $I(V)$  et puissance Tension  $P(V)$  dans la même condition de l'éclairement ( $E=1000\text{ W/m}^2$ ) et pour différents Températures ( $T= 25, 30, 50^\circ\text{C}$ ) .

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par Contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température Et la puissance maximale diminue. On constate que la température influence négativement sur la Tension de circuit ouvert.

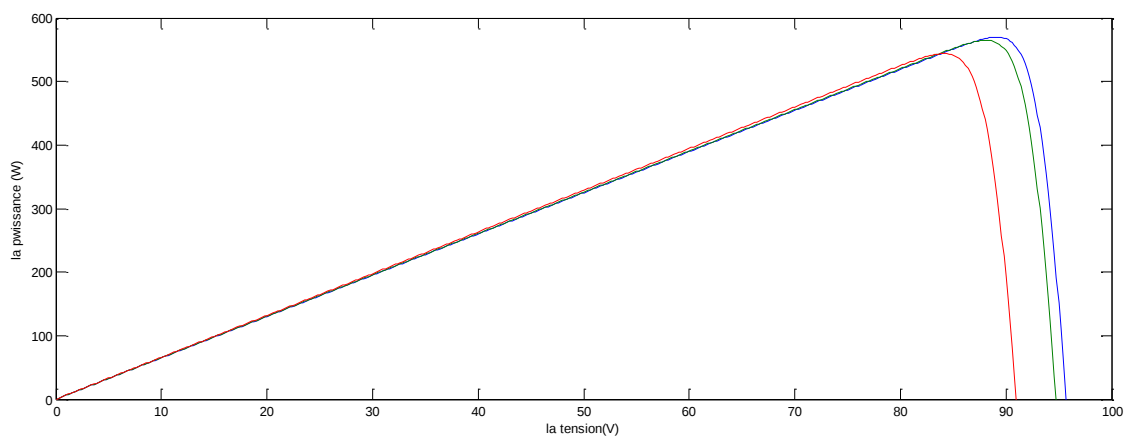
#### IV.2.5. Caractéristique(I-V)



**Figure IV.2.3 :** Caractéristique  $I(V)$  pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

La figure suivante présente la caractéristique  $I(v)$  pour  $G=1000\text{W/m}^2$  à différentes températures, Les trois courbes sont presque identiques. Le courant est toujours stable, Ensuite elle diminue

### IV.2.6. Caractéristique (P-V)



**Figure IV.2.4 :** Caractéristique  $P(V)$  pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

La figure suivante montre caractéristique  $P(V)$  pour ( $G=1000\text{W/m}^2$ ) et différentes températures.

Les caractéristiques IV2.3 et IV2.4 obtenues montrent que la tension de circuit ouvert du panneau solaire augmente lorsque la température de fonctionnement diminue par contre le courant de court-circuit reste pratiquement constant et par conséquent la puissance maximale du générateur PV augmente avec la diminution de la température.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation par TACD Silvaco de la cellule photovoltaïque double jonction InGaP/GaAs et étudié les caractéristique électrique (courant, tension)

Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB SIMULINK pour faire une simulation numérique sur le module photovoltaïque dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ).

Nous avons étudié l'influence de la température sur le fonctionnement du panneau photovoltaïque PV.

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons extrait les paramètres internes et externes qui affectent la performance de la cellule solaire inorganique à double jonction à base des matériaux InGaP/GaAs. Les paramètres internes sont : la fraction molaire, le dopage de la base et de l'émetteur, le type et l'épaisseur de la jonction tunnel, l'épaisseur de la couche BSF et l'épaisseur de l'émetteur et de la base.

La modélisation et la simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs sont réalisées à l'aide du logiciel Tcad Silvaco pour extraire les caractéristiques de base de la cellule solaire : courant de court-circuit (ISC), tension de circuit ouvert (VOC), facteur de forme (FF) et le rendement électrique ( $\eta$ ).

Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et La simulation d'un générateur photovoltaïque, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier l'effet Climatique sur le générateur photovoltaïque PV (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ).

La simulation et la modélisation de la cellule solaire ont été prises (développées) à partir des données de certains auteurs en variant les valeurs des paramètres qui sont importantes dans l'amélioration du rendement de la cellule. Le rendement électrique optimal obtenu est de 29.02% avec un facteur de forme de 91.77%.

Au début, nous avons présentés les matériaux semi-conducteurs, leurs propriétés et la possibilité de faire un alliage entre les matériaux (III-V) de tableau Mendeleïev Tels qu'Indium (In), Gallium (Ga), Aluminium (Al)...etc.et nous sommes Intéressés sur l'importance du choix des modèles physiques utilisés par le logiciel Tcad silvaco pour simuler la cellule solaire à hétérojonction III-V.

Dans une deuxième étape, nous allons sommes basés sur le critère de choix des matériaux constituant la cellule solaire et le principe de l'alliage en vérifiant la validité de la loi de Végard. Après une modélisation précise, nous avons présenté les résultats de simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs.

Ensuite, nous allons présenter la modélisation mathématique de la cellule et La simulation d'un générateur photovoltaïque.

Dans une dernière étape, nous avons simulé la cellule solaire à hétérojonction InGaP/GaAs avec des caractéristiques qui donnent un rendement optimal % dont l'épaisseur ne dépasse pas les quelques nanomètres  $4.431\mu\text{m}$ .

Nous allons étudier l'influence de la température et l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule PV.

On conclut que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé et L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface, il est intéressant d'étudier le cas d'une cellule solaire photovoltaïque à trois ou quatre jonctions pour augmenter la production d'énergie.

## Références bibliographiques

- [1] Office of Integrated Analysis and Forecasting. International Energy Outlook 2014. Energy Information Administration, 2014.
- [2] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap03-3.9.1-Algerie.pdf>.
- [3] M. Belarbi, «Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités.», thèse de doctorat, université de AbdHamid Ibn badis, Mostaganem, 2016.
- [4] Periodic table of elements, 21 March 2007, <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/student-science-tech/>
- [5] B. Sullivan, «The Effect of Temperature on the Optimization Photovoltaic Cells Using Silvaco Atlas Modeling», mémoire de master, Septembre 2010.
- [6] Jamie E. VanDyke, «Modeling Laser Effects on Multi-Junction Solar Cells Using Silvaco Atlas Software for Space craft Power Beaming Applications», mémoire de master, Juin 2010.
- [7] Silicon atomic structure, 13 March 2007, [http://www.micromountain.com/sci\\_diagrams/at\\_struct/at\\_struct\\_pages/silicon\\_lab\\_none.htm](http://www.micromountain.com/sci_diagrams/at_struct/at_struct_pages/silicon_lab_none.htm)
- [8] I. Mallem, «Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO», mémoire de magister, 2014.
- [9] T. Prutski, P. Diaz-Arencia, R.A. Brito-Orta, A. Mintairov, T. Kosel, and J. Merz, « Luminescence anisotropy of InGaP layers grown by liquid phase epitaxy », J. Appl. Phys. 37, pp. 1563-1568, Mai 2004.
- [10] R.F. Pierret, «Semiconductor Device Fundamentals», Addison-Wesley Publishing, Reading, Massachusetts, 1999.
- [11] K. Djriouat, «Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions: GaInP/GaAs», mémoire de magistère.
- [12] S.M. Sze, and Kwok K. Ng, «Physics of semiconductor devices», J. Wiley and Sons, 2007
- [11] Jeffrey B. Lavery, « Quantum Tunneling Model a P-N Junction in Silvaco », United States Navy B.S./B.A., University of San Diego, 2003
- [13] ATLAS User's Manual: Device Simulation Software. Santa Clara, CA: SILVACO International, 2012.
- [14] D. DIOUF, «Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction et à structure interdigitée en face arrière», thèse de doctorat, 2010, université Paris Sud 11
- [15] S. Selberher, «Analysis and simulation of semiconductor devices», Wien, New York: Springer-Verlag, 1984. (s.d.).

- [16] M.Green, « Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Application», Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1-12, 1982
- [17] G. Writing, «Global Energy Assessment, Toward a Sustainable Future», 2012, Cambridge University Press. ISBN 9780521182935
- [18] <http://www.lechodusolaire.fr/rendement-de-conversion-cellules-solaires-gaas-atteint-316/> le 13-01-2018.
- [19] F.Djaafar, B.Hadri, G.Bachir, «The Effect of a Back Surface Field (BSF) on the Efficiency of Dual Junction InGaP/GaAs Cell», Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Electrical Systems, Tunisia, 2017.
- [20] F.Bouraba, «Etude D'une LED a base d'un InGaN pour l'émission de la lumière blanche », mémoire de magister, 2012
- [21] M. Babar, E. A. Al-Ammar & N. H Malik, «Numerical simulation model of multijunction solar cell», Journal of Energy Technologies and Policy (2012), 2(7), 44-53.
- [22] M. MERAD BOUDIA, « Modélisation electro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », thèse de doctorat, 2016
- [23] L.Esaki, «New phenomenon in narrow Germanium p-n junction», Phys.Rev, Vol.109, pp.603-604, 1958.
- [24] F.Nemmar, « Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques a base de matériaux organiques », thèse de doctorat, 2013
- [26] F.Djaafar, B.Hadri et B.Ghalem, «Comparison between the Efficiency of Heterojunction Thin Film InGaP\GaAs\Ge and InGaP\GaAs Solar Cell», International Science Index, Energy and Power Engineering Vol: 11, No: 3, 2017, waset.org/Publication/10006842, Singapore.
- [28] F.Djaafar, « Etude et modélisation des performance des cellule photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques ». Thèse de doctorat, 2018, Université de sciences et technologie de Mohammed Boudiaf USTOMB

### **Annexe1:**

présentation de l'outil de simulation Tcad silvaco



## **Introduction:**

Dans cet annexe on va montrer brièvement l'importance d'utilisation des logiciels de simulation et l'explication de rôle des simulateurs pour compléter la partie théorique, le simulateur TCAD-SILVACO est considéré comme l'un des simulateurs récemment utilisé dans les entreprises de la microélectronique, cet outil de logiciel est utilisé pour les dispositifs semi-conducteurs dans leurs recherches car il a une large gamme d'étude dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires inorganiques, organiques. , une brève historique de l'évolution de ce logiciel jusqu'à aujourd'hui sera présenté dans cet annexe, aussi sa présentation et ces différents modules, , l'explication de la programmation des étapes de fabrication virtuelle de la structure à deux dimensions et même à 3dimension d'une cellule solaire par exemple sous le module Atlas-Silvaco seront aussi présentées telles que:

- la spécification de la structure (maillages, régions, dopages, électrodes)
- spécification des modèles et des matériaux (Matériau, Modèles, Contacts, Interfaces) : une explication des différents modèles utilisés dans notre travail tel que : les modèles de la mobilité, les modèles de recombinaison, les modèles de statistiques des porteurs, les modèles de l'ionisation par impact.
- Sélection des méthodes numériques (newton, gummel, bloc et Bicgst pour la simulation a trois dimensions).
- Spécification des solutions (par les instructions: Log, Solve, Load, Save).
- l'analyse des résultats (Extract, Tonyplot).

Et enfin l'illustration de l'organigramme de simulation utilisé dans Atlas-Silvaco

## **Le rôle d'utilisation de la simulation :**

La simulation établit le lien entre le monde théorique et le monde expérimental. elle complète la théorie et l'expérimental et construit la réalité physique en présence de certaines contraintes ou d'une analyse mathématique impossible.



**Figure1.** Le rôle de la simulation.

▪ **Simulation des dispositifs semi-conducteurs (Que faut-il ?):**

L'importance principale du simulateur est de réduire le nombre des étapes itératives nécessaires pour fabriquer les dispositifs avec certaines caractéristiques désirées. De ce fait, le simulateur utilisé permet de présenter comme résultats les données suivantes:

- ♣ les Courbes à 2D inclus les courbes d'un paramètre comme par exemple: le champ électrique en fonction de la distance le long du canal (x) de dispositif.
- ♣ Les courbes à 3D inclut la distance verticale dans l'axe z.
- ♣ Vecteur : contient les courbes de la densité de courant ou bien du champ électrique en fonction du voltage et le vecteur de position.
- ♣ les caractéristiques de transfert I-V, F-V, Q-V, G-V, G-T ...

▪ **Présentation de logiciel de simulation:**

**SILVACO (SiliconValley Corporation)** : est une société américaine, « Silvaco International » ayant son siège à Santa Clara en Californie. Ils s'agit l'un des fournisseurs principaux de chaînes professionnelles des logiciels de simulation et de conception assistée par l'ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Les entreprises de la microélectronique utilisent cet outil dans le développement des processus technologique des dispositifs,

**L'historique de Silvaco** : Cet outil de conception assistée par ordinateur sert de simuler le comportement électrique d'un dispositif en tenant compte de sa structure telle que : les dopages, les différentes géométries, les matériaux....etc). Le terme **TCAD** est l'acronyme anglo-saxon de "**Technology Computer Aided Design**". Il permet non seulement de concevoir

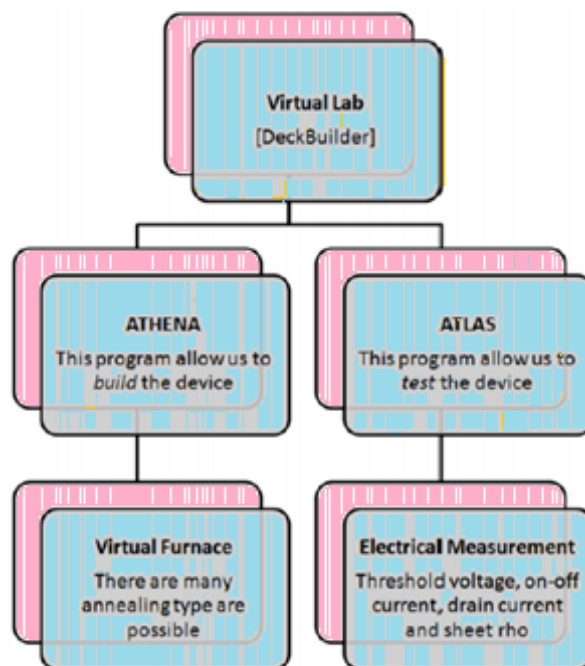
des dispositifs mais aussi de comprendre les mécanismes physiques qui régissent leur fonctionnement

- **En 1984**, la société SILVACO a été fondée par **Dr. Ivan Pesic** pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés (IC, integrated circuits) analogiques pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précises et linéaires.
- **En 1989**, Silvaco est intégré dans la technologie TCAD, elle a été basée sur une recherche du département des dispositifs physiques de l'Université de Stanford, ainsi apparaissent dans SILVACO deux modules Athéna et Atlas à l'aide d'un projet de recherche de l'Université de Californie, Berkeley.
- **En 1992**, Silvaco a conçu son propre logiciel de simulation comportementale SPICE. Ainsi « Smart-Spice » devient partie de la chaîne TCAD de SILVACO, il permet des simulations des circuits électroniques avec les modèles physiques des composants créés à l'aide d'Atlas tout en utilisant une logique SPICE. « Smart-Spice » écrit en C++ permet facilement l'introduction des modèles nouveaux de simulation et permet une amélioration des algorithmes numériques pour une meilleure convergence.
- **En 1997**, Silvaco introduit IC-CAD (Integrated Circuit Computer Aided Design) analogue qui est un outil pour capture schématique (schematic capture), disposition sur circuits imprimés (layout) et vérification physique. Tous ces outils associés au simulateur de circuit « Smart-Spice » fournissent une structure complète, économique, et hautement productive pour la conception de circuits intégrés analogiques.
- **En 2004**, Silvaco propose un outil d'extraction des signaux parasites qui permet la conversion directe des données des masques et des informations intéressantes aux processus des schémas électriques.
- **En 2010**, Silvaco Data Systems et la société Simucad Design Automation (Simucad. Inc) qui fournissant logiciel de simulation logique EDA ont été fusionnés pour former Silvaco, Inc
- **En 2015**, La société Silvaco a également fait l'acquisition d'Invarian, Inc. : et une société privée en France fournissant un logiciel d'analyse des circuits intégrés (power Integrity) (IP) et de la variabilité (d'infini scale) (SA).
- **En 2018**, la société de Silvaco a également fait la commercialisation des outils de modélisations et des simulations de nanoélectronique atomiste.
- **En 2019**, Silvaco a annoncé que la conception des semi-conducteurs IP (SIP) de Samsung Foundry (SF) est maintenant commercialisée, sous licence et prise en charge par Silvaco. L'offre initiale d'IP de conception matérielle de SF concerne le nœud de processus de 14 nm.

La société développe et commercialise également la base IP de la bibliothèque de cellules standard pour les nœuds de processus de 180 nm à moins de 14 nm, tels que (Interface PHYs, Interface controllers, Automotive controllers , AMBA IP cores and subsystems, Security cores, Analog cores, Embedded processors.....)

### III.3.2 Présentation des modules de TCAD-SILVACO:

**III.3.2.1 Virtual Wafer Fab (VWF) de Silvaco:** c'est un ensemble d'outils de simulation et d'outils interactifs peuvent être utilisés pour la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs



**Figure.2.** L'environnement Virtual Wafer Fabrication (VWF) de Silvaco.

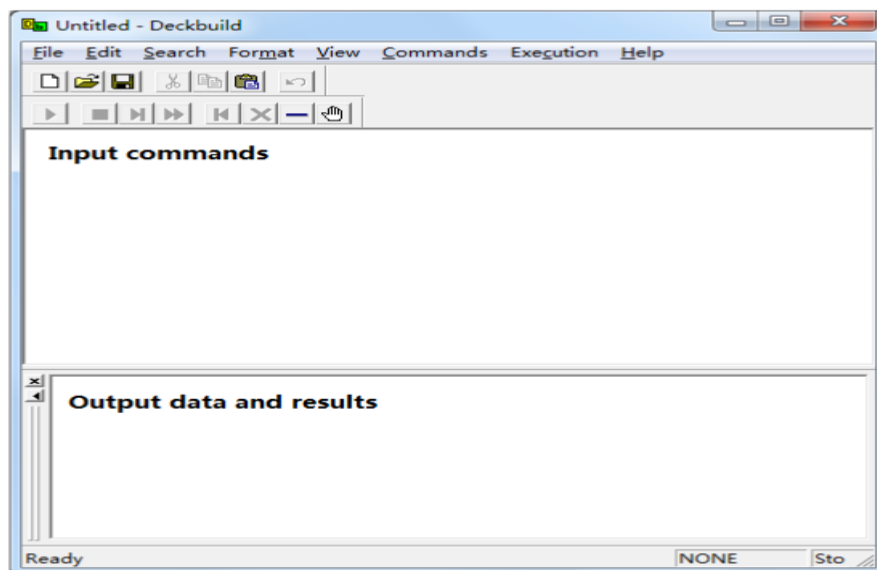
#### Les outils interactifs (VWF interactive tools):

Ces outils sont conçus pour être utilisés de manière interactive lors de la création d'un seul fichier d'entrée. En utilisant une interface graphique d'utilisateur (Graphical User Interface, GUI), le travail de construction des fichiers d'entrée devient plus efficace. On peut utiliser les outils interactifs pour un ensemble des fichiers, ou d'utiliser comme des composants intégrés dans l'environnement « VWF automation tools ». Les outils interactifs sont :

- a) **DevEdit:** c'est un environnement de dessin des structures des dispositifs (dimension, dopage, ...) et son maillage, Il peut être utilisé pour générer des nouvelles mailles sur des structures

existant pour créer ou modifier les dispositifs, qui peuvent être alors utilisés dans les simulateurs 2D et 3D de SILVACO]ATLAS user's manual.

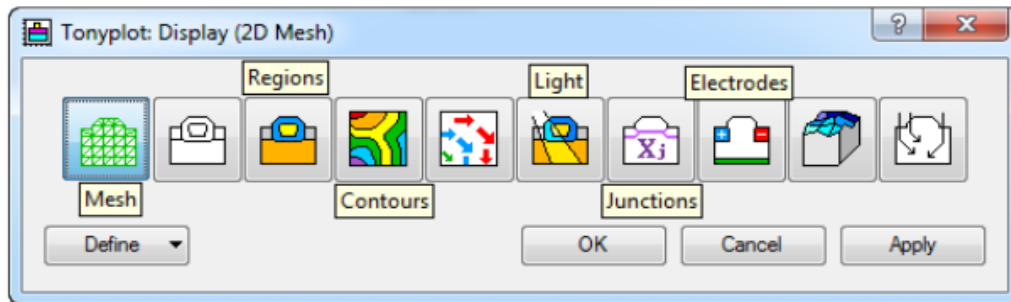
- b) **MaskViews**: c'est un outil de dessin des masques (layouts).
- c) **Manager**: c'est un outil de gestion des fichiers créés et utilisés par VWF.
- d) **Optimiseur**: il s'agit d'un outil d'optimisation qui permet d'ajuster automatiquement les paramètres technologiques et les paramètres électriques par la variation d'un ou plusieurs paramètres d'entrée.
- e) **SPDB** : (Semiconductor Process Data Base), il s'agit d'un produit séparé, ce n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il est conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement et des données qui décrivent les conditions expérimentales.
- f) **DeckBuild**: il s'agit d'un environnement d'exécution graphique interactive, pour le développement des processus et la simulation des entrées de dispositif. Il se compose d'une fenêtre pour la saisie des commandes d'entrée, et une fenêtre pour la sortie et le contrôle du simulateur, et un ensemble d'autres fenêtres pour chaque simulateur comme les modules : **Athena** et **Atlas** et d'autres modules qui fournissent le support d'exécution le langage complet.



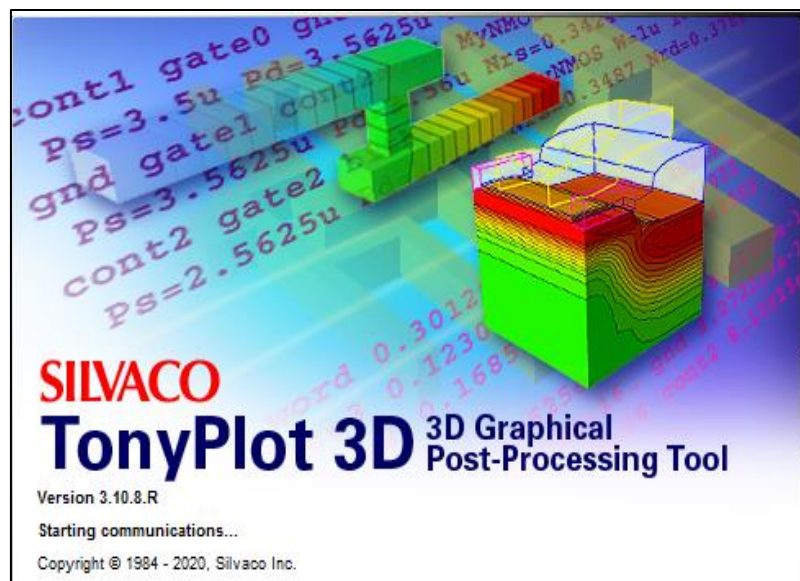
**Figure .3** .Outil interactif DeckBuild.

- g) **TonyPlot** : Il s'agit d'un environnement de visualisation et d'analyse graphique des structures unidimensionnelles (1D) et bidimensionnelles (2D) des résultats de simulations générés par le simulateur SILVACO (structure du composant, distributions des grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...). Il existe également un autre outil

similaire à cet outil qui est appelé : TonyPlot3D , cet outil est conçu pour visualiser les structures à trois dimensions (3D).



**Figure .4.** Environnement Tony plot (2D).



**Figure.5.** Fenêtre de TonyPlot 3D.

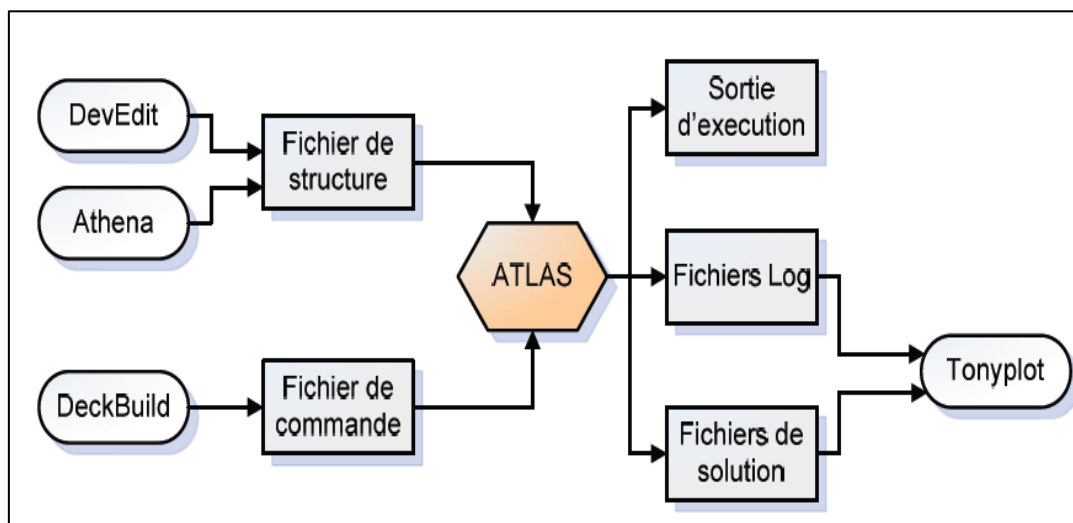
### Les modules de simulation (VWF core tools):

Ces outils peuvent simuler les caractéristiques électriques des processus de fabrication technologiques des dispositifs, de sorte que les outils de simulation peuvent remplacer l'expérience réelle pour réduire le coût de fabrication. Les modules de simulation comprennent:

- ✓ **SSuprem3**: c'est un simulateur de procédé unidimensionnel (1D) avec prolongements simples de simulations des dispositifs.
- ✓ **Athena** : c'est un outil de simulation bidimensionnelle (2D) de SILVACO-TCAD qui est utilisé à différentes étapes des procédés technologiques de fabrications qui sont réalisées dans la salle blanche de l'industrie des semi-conducteurs tels que les procédés de: dépôt l'implantation ionique, l'oxydation, la diffusion, la lithographie, la gravure..., Par conséquent, Il permet de simuler rapidement et précisément toutes les étapes de fabrication utilisées dans diverses technologies bipolaires, MOSFET, HEMT, MESFET, optoélectronique, MEMS....

fournissant ainsi des informations importantes de la conception, et l'optimisation de flux des procédés technologiques comme : les concentrations des porteurs et les profondeurs de jonctions, etc...,

- ✓ **Atlas:** C'est un simulateur à deux dimensions (2D) ou à trois dimensions (3D) des dispositifs semi-conducteurs basés sur les principes de la physique des semi-conducteurs. Il sert de donner des informations sur les équations des effets physiques internes des dispositifs semi-conducteurs et permet d'étudier les différentes caractéristiques électriques liées à leurs fonctionnements. Par conséquent, Atlas est donc c'est le logiciel qui fournit le potentiel général de base physique et électrique en deux ou en trois dimensions (2D, 3D) pour la simulation des dispositifs.



**Figure.6.** Les modules utilisés par le simulateur TCAD-SILVACO.

### Spécification de la structure :

#### Le maillage (mesh):

Le maillage présente les cellules (nommées: réseau) obtenues de l'intersection d'un ensemble des lignes parallèles et verticales des points caractérisés par leurs coordonnées, ces cellules permettent de couvrir toute la surface du dispositif. Dans Atlas, la modélisation des dispositifs semi-conducteurs se fait à travers un ensemble des équations aux différentielles partielles (PDE), en physique des semi conducteurs , on a trois équations PDE couplés (les équations de continuités des porteurs (électrons et trous), et l'équation de Poisson), Atlas a résolu ces trois équations physiques numériquement par la méthode des éléments finis, cette méthode permet la discrétisation des éléments des équations du système algébrique à traiter pour chaque point de maillage de dispositif, il sert de calculer les valeurs des inconnues afin de convertir le modèle original continué vers un système algébrique non linéaire, de ce fait, le système algébrique est résolu par une procédure itérative qui permet d'optimiser les étapes

successives de la solution, pour obtenir des résultats de simulation fiable et précis, le choix de maillage joue un rôle nécessaire et donne un compromis entre la vitesse d'exécution (rapidité de convergence) et la précision des résultats [1], un maillage fin capable de résoudre toutes les équations et donne une simulation précise tandis qu'un maillage épais sert de diminuer le nombre des points total et permet de donner une efficacité numérique et une simulation rapide, dans ATLAS-SILVACO pour générer un maillage, trois conditions importantes doivent être spécifiées:

- La direction des lignes à 2D (x.mesh, y.mesh) ou bien à 3D (x.mesh, y.mesh ou z.mesh).
- La localisation des lignes principales (loc)
- L'espacement entre chaque ligne (spac : c'est le pas en microns) permet de spécifier la distance entre les lignes secondaires

#### **III.6.2.2 Spécification des modèles physiques:**

La mobilité des porteurs et les générations de recombinaisons sont prendre en compte dans la modélisation physique. En fonction des dimensions et du choix de la technologies des dispositifs, plusieurs modèles ont été développés pour les semi-conducteurs. Ces quantités doivent être choisies de manière judicieuse pour se rapprocher du comportement physique réel de dispositif, à l'aide de la commande "**Models**" on peut utiliser plusieurs modèles physiques existant dans le logiciel, ces modèles sont divisés en différentes catégories nous citons parmi lesquels:

- Les modèles de mobilité tels que : CVT, FLDMOB, CONMOB....etc
- Les modèles de recombinaison tels que: Shockley Read Hall (SRH), Auger,....
- Les modèles de statistique des porteurs tels que: de Boltzmann, Fermi dirac, Bgn, ioniz, etc ...
- Les modèles d'impact ionisation : Selb....

le choix du modèle dépend du matériau utilisé dans la simulation.

#### **III.6.4 Les interfaces:**

"**Interface**" c'est l'instruction qui indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/ isolant, par exemple, la vitesse de recombinaison en surface et la densité de charge à l'interface.

#### **III.6.5. Le choix de la méthode numérique :**

Le choix d'une méthode numérique c'est très important pour assurer la convergence des calculs dans la résolution des équations différentielles à plusieurs inconnues (l'équation de

poisson et les équations de continuités), l'instruction "**Method**" permet d'activer cette étape. Les trois méthodes les plus utilisées sont : **Newton, Gummel, et Block**

### **III.6.6 Extraction et visualisation des résultats:**

La description finale des résultats obtenus peut présenter par les commandes: "**Log**", "**Solve**", "**Load**", et "**Save**", lorsque les solutions obtenues les données seront affichées graphiquement:

- ❖ **Log:** permet la sauvegarde des caractéristiques secondaires et les données dans un seul fichier:
- ❖ **Solve:** cette commande permet de trouver les solutions (courant-tension) pour chaque point de polarisation -.
- ❖ **Load:** permet de charger les solutions précédentes proposées en tant qu'une initialisation pour les autres points de polarisation.
- ❖ **Save:** permet la sauvegarde de toutes les données trouvées pour un noeud dans un fichier de sortie.

#### **III.6.6.1 Extract :**

les valeurs des paramètres et des résultats des dispositifs seront sauvegardées dans le fichier : fichier.log peuvent être extraits précisément via la commande "**Extract**", en particulier dans les dispositifs nanométriques il permet d'extraire les valeurs de la structure d'une manière plus précise pour éviter les erreurs de la lecture.

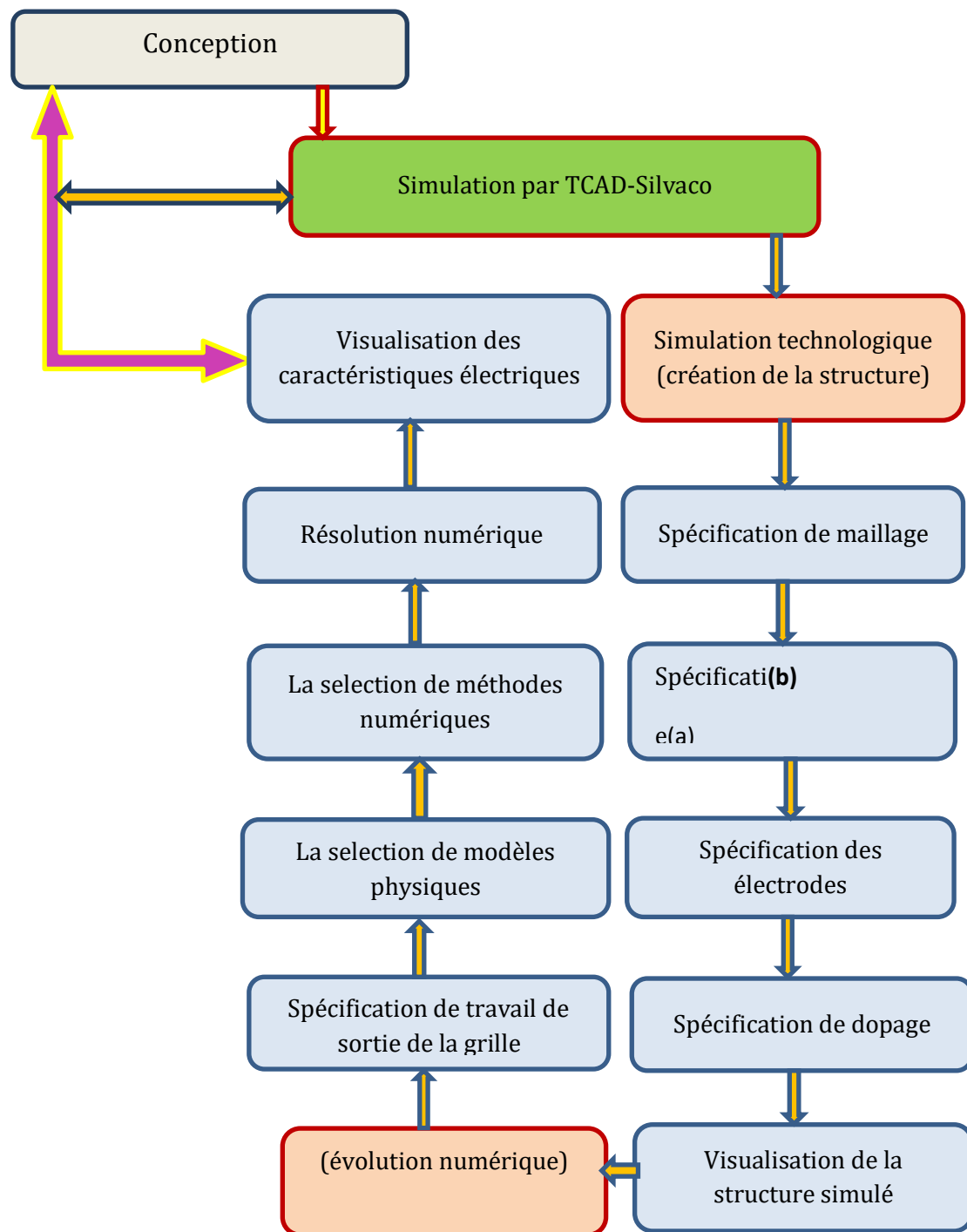
Cet exemple permet l'extraction de la tension de seuil ( $V_{th}$ )

#### **III.6.6.2 Tonyplot:**

Cette commande permet de visualiser graphiquement les résultats obtenus des simulations.

### **III.7 L'organigramme de simulation :**

La simulation des processus technologiques et de la caractérisation électrique des dispositifs cellules solaires à double jonction par Atlas-Silvaco se traduit par l'organigramme suivant :



**Figure.7.** Organigramme de la simulation technologique et numérique utilisé par Atlas-Silvaco.

