



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

N° : DP202301ME

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Energétique et énergie renouvelable

Thème

**Modélisation et optimisation d'une cellule solaire à base SiGe
en utilisant la méthode des différences finis**

Présenté par :

Meciad Manel

Soutenu le : 25/06/2023 devant le jury composé de :

Tabet Ismail	MCA	Université Skikda	Président
Labioud Samir	MCA	Université Skikda	Rapporteur
Kezzar Mohamed	MCA	Université Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous remercierons dieu le tout puissant
de nous avoir donné la santé et la volonté pour
effectuer ce modeste travail.*

*Ensuite, je tiens à remercier mon encadreur Mr.S. Labiod
pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa
patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre
préparation de ce mémoire.*

*Puis, nous tenons à exprimer notre gratitude envers l'ensemble des
membres de jury M.I. Tabet et M. Kezar*

Qui ont accepté de lire et juger notre travail.

*Enfin, je remercie tous nos enseignants qui ont contribué à notre
formations depuis nos premiers jours à l'école jusqu'aujourd'hui, et
je remercie également tous ceux qui mon ont aidées de
près ou de loin à réaliser ce modeste travail*





DEDICACE

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance... Aussi, c'est tout simplement que : Je

dédie cette mémoire de master à :

Aux deux êtres qui me sont mon source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te

garde dans son vaste paradis, A mes parents

SALAH MECIAD ET DJEDDOU DJEMAA

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mon frère : Moncef , Firas et ma sœur :Aridj.

Et à tous La famille

A tout ceux qui ont participé pour réaliser ce modeste travail et tous ceux qui nous sont chers, à mes amie.



Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------	-----------

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

I.1. Introduction	03
I.2. Le rayonnement solaire	03
I.3. Le spectre solaire	03
I. 4. L'effet photovoltaïque	04
I.4.1. Principe et historique	04
I.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	06
I.5. Définition du modèle de dérive-diffusion (DDM : Drift Diffusion Model)	08
I.5.1. Système d'équations des semi-conducteurs	09
I.5.2. Modèles physiques considérés	09
I.5.2.1. La densité de charges	09
I.5.2.2. Les mobilités	10
I.5.2.3. Génération-Recombinaison	10
I.5.2.4. Génération-optique	11
I.6. Conclusion	11

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque.

II.1. Introduction	12
II.2. Résolution des problèmes aux dérivées partielles	12
II.2.1. Méthodes spatiales	12
II.2.1.1. La méthode des éléments finis	12
II.2.1.2. La méthode des différences finies	12
II.2.1.3. Principe de la méthode des différences finies	13
II.3. Normalisation du modèle dérive-diffusion	14
II.4. Conditions aux limites	16

II.4.1. Conditions aux contacts	16
II.4.2. Conditions aux autres frontières	17
II.5. Discrétisation du modèle dérive-diffusion	17
II.5.1. Système d'équations obtenues	18
II.6. Solution initiale	19
II.7. Solution finale	20
II.8. Conclusion	22

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1. Introduction	23
III.2. Simulation d'une cellule photovoltaïque	23
III.2.1. Définition du domaine de calcul	23
III.2.2. Elaboration du maillage	24
III.2.3. Générations optique	25
III.3. Résultats de la simulation numérique	25
III.4. Caractéristique I-V/ P-V	28
III.5. Conclusion	30
Conclusion générale	31
Références bibliographiques	32

Introduction générale

Introduction général

Introduction général

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble.

En effet, le développement des systèmes de conversion rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système à leur tête le panneau solaire. Ce dernier est composé de plusieurs cellules solaires qui nécessitent étude et compréhension.

Ce travail se devise en trois chapitres:

Nous allons étudier dans Le premier chapitre : Les cellules solaires ont pour rôle de convertir directement le rayonnement lumineux (rayonnement électromagnétique provenant du soleil ou autre) en énergie électrique. Elles s'appuient sur le phénomène photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons discuter les panneaux solaires, ainsi que le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Dans un deuxième temps, nous présenterons les diverses formulations mathématiques nécessaires à l'analyse des phénomènes de transport dans les semi-conducteurs.

Finalement, nous proposerons un modèle mathématique qui décrit la relation entre le Rayonnement optique et la génération des paire électrons-trous.

Introduction général

Dans le deuxième chapitre, La modélisation des composants et des systèmes électroniques a été longtemps basée sur l'aspect analytique [1, 2], mais avec l'évolution et la miniaturisation des composants, la solution analytique est devenue très difficile pour prendre en compte les effets de second ordre de plus en plus prédominants.

Dans ce chapitre, nous développerons un modèle numérique pour la simulation bidimensionnelle d'une cellule solaire en utilisant l'environnement MATLAB.

Nous présenterons en premier temps les diverses formulations mathématiques nécessaires à l'analyse des phénomènes de transport dans les semi-conducteurs.

Dans un deuxième temps, nous développerons plus particulièrement les préliminaires analytiques au traitement numérique du modèle dérive-diffusion (passage à des équations sans dimensions, choix des variables de base, normalisation...) ainsi que le traitement des conditions au niveau des interfaces et des frontières. La solution auto cohérente du problème non linéaire couplé sera ensuite décrite et les méthodes de résolution des systèmes linéaires résultants seront explicitées.

Dernier chapitre, Dans ce chapitre, nous développerons un modèle numérique pour la simulation bidimensionnelle d'une cellule photovoltaïque en utilisant l'environnement MATLAB.

Notre but étant le :

- Résoudre le couple poisson et continuité des porteurs libres
- Calculer la distribution du potentiel électrostatique, concentration des électrons et la concentration des trous.
- Calculer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).
- Calculer les principaux paramètres de la cellule simulée tels que le courant de court-circuit I_{sc} , tension de circuit ouvert V_{oc} , tension maximale V_m , courant et tension au point de puissance maximale I_m et V_m et les quantités de la variation des courants en mode court-circuit et en mode circuit ouvert.

Enfin, notre travail a été clôturer par une conclusion qui synthétise tous les résultats trouvés et propose les perspectives envisageable et pouvant faire suite à ce travail.

Chapitre I

Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

I.1. Introduction

Les cellules solaires ont pour rôle de convertir directement le rayonnement lumineux (rayonnement électromagnétique provenant du soleil ou autre) en énergie électrique. Elles s'appuient sur le phénomène photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons discuter les panneaux solaires, ainsi que le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Dans un deuxième temps, nous présenterons les diverses formulations mathématiques nécessaires à l'analyse des phénomènes de transport dans les semi-conducteurs.

Finalement, nous proposerons un modèle mathématique qui décrit la relation entre le rayonnement optique et la génération des paires électrons-trous.

I.2. Le rayonnement solaire

Le soleil, corps chaud à une température de plus de 6000°K , émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. En raison de la température élevée du soleil, le rayonnement est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil avec une intensité de $1367\text{W}/\text{m}^2$ à la surface supérieure de l'atmosphère (constante solaire), constitue un spectre continu allant de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible où il renferme le maximum d'énergie. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences (Diffusion par les molécules, les aérosols et absorption par les gaz atmosphériques...etc.). Le rayonnement solaire qui arrive finalement au sol avec une intensité réduite ($1000\text{W}/\text{m}^2$ au niveau de la mer) avec une bande spectrale répartie de la manière suivante : UV=5%, Visible=40%, IR=55% à cause des différentes atténuations atmosphériques et il se subdivise en trois composantes : diffuse, directe et réfléchi par le sol [1, 2] (Figure I.1).

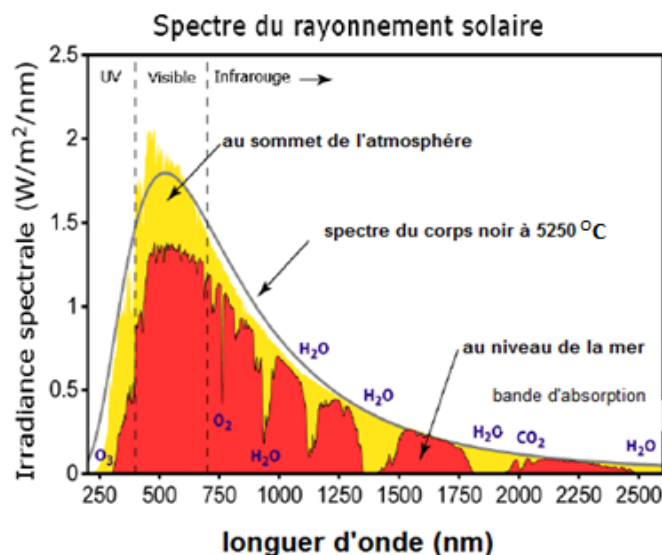


Figure (I.1) : Le rayonnement solaire.

I.3. Le spectre solaire

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

Le rayonnement ultraviolet est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde plus courte que le visible (<380 nanomètres) et plus longue que les rayons X.

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

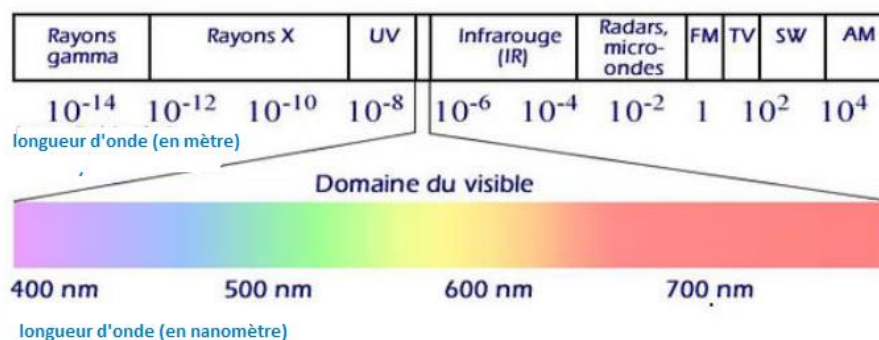
Le rayonnement visible est un rayonnement électromagnétique stimulant le nerf optique humain, de longueur d'ondes comprises approximativement entre 380 nm et 780 nm.

Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 780 nm et 1 mm (Figure I.2).

Le rayonnement solaire global est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.

Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice [1,2].



Figure(I.2): Le spectre solaire.

I. 4. L'effet photovoltaïque

I.4.1. Principe et historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839 [3], mais il faudra attendre près d'un siècle pour que ce phénomène physique soit utilisé. Les premiers panneaux photovoltaïques ont été réalisés dans les années 1950 pour équiper les satellites.

L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque ou photopile (Figure I.3).

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

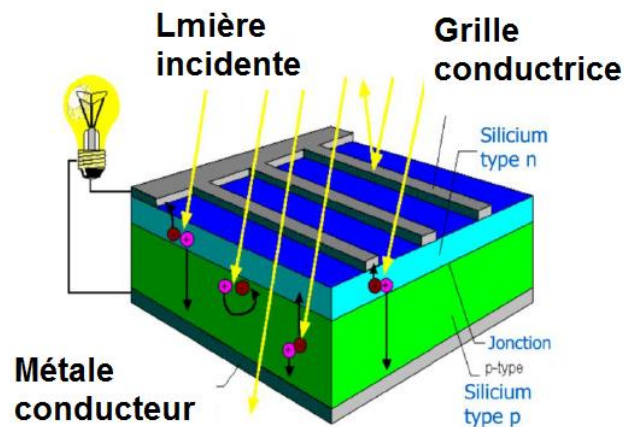


Figure (I.3) : Principe de l'effet photovoltaïque dans la cellule solaire en silicium.

Effet photovoltaïque c'est l'effet par lequel l'énergie lumineuse est directement transformée en énergie électrique dans un semi-conducteur. En général, une cellule photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur) dopée dans sa partie supérieure au bore (coté P) et dans sa partie inférieure au phosphore (coté N).

Au voisinage de cette jonction P-N, un champ électrique maintient la séparation des charges électriques. Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par effet photoélectriques et crée un pair électron - trou. L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est créé Figure (I.4).

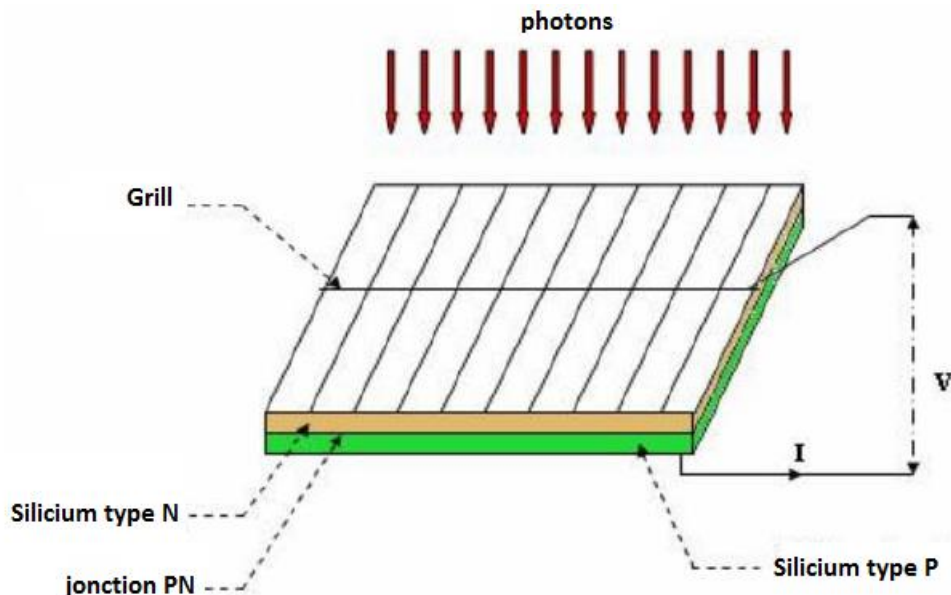


Figure (I. 4): Effet photovoltaïque dans une plaquette de silicium.

Un ensemble de cellules forment les modules solaires dont la fabrication a été multipliée par 8 sur la dernière décennie et dont le coût a baissé de 50 % en 5 ans. Actuellement, le rendement de ces cellules ne dépasse pas 15 %. Des recherches sont effectuées sur d'autres matériaux, comme le dit séléniure de cuivre et d'indium ou le tellure de cadmium.

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le paramètre prépondérant dans le choix d'un semi-conducteur (SC) inorganique pour la conversion photovoltaïque est donc la largeur du gap. Lofer ski a donné en 1956 la courbe de rendement théorique en fonction du gap des matériaux [4]. Selon le matériau, on réalise une homo-jonction, c'est-à-dire une jonction p-n d'un même semi-conducteur (Silicium, ou Germanium) à caractère p (conduction majoritaire de trous) ou n (conduction majoritaire d'électrons), ou une hétérojonction à partir de deux matériaux différents (les composés binaires arséniure de gallium GaAs, le tellurure de cadmium CdTe, les composés ternaires CIS, GaAlAs, et les composés quaternaires CIGS...) [5].

I.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires inorganiques sont basées sur la technologie des semi-conducteurs et la jonction p-n. Un semi-conducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite. La position du niveau de Fermi est fonction de la concentration des porteurs de charges. Le semi-conducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type p lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence. La Figure (I.5) présente la position du niveau de Fermi E_F pour les deux types de semi-conducteurs.

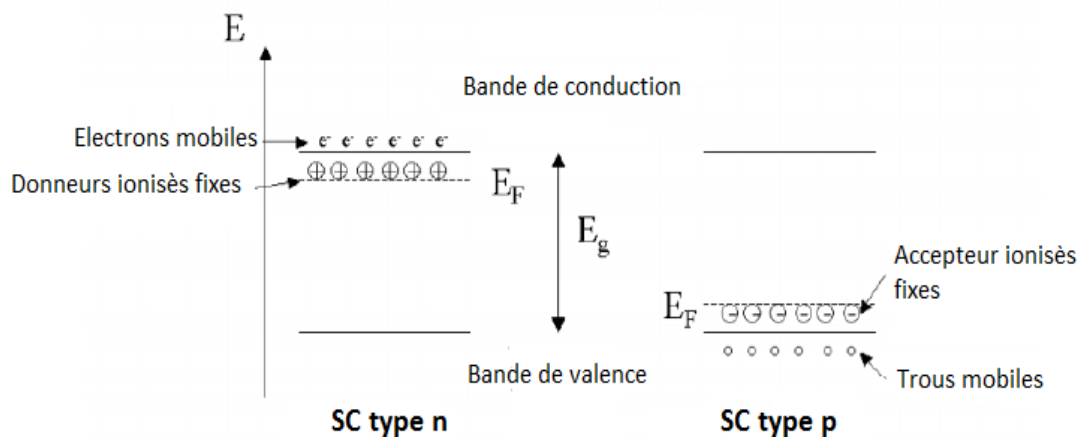


Figure (I.5): Semi-conducteurs de type p et n et position du niveau de Fermi E_F . Les charges associées aux donneurs (type n) et aux accepteurs (type p) sont représentées sur la Figure.

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n. Il existe deux types de jonctions : lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction, lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau comportant des zones avec des dopages différents p et n, on parle alors d'homo-jonction

(Ex : homo-jonction Si). Lors du contact entre les zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p.

Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel V_e à l'interface. Le principe de la jonction p-n est présenté en Figure (I.6).

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

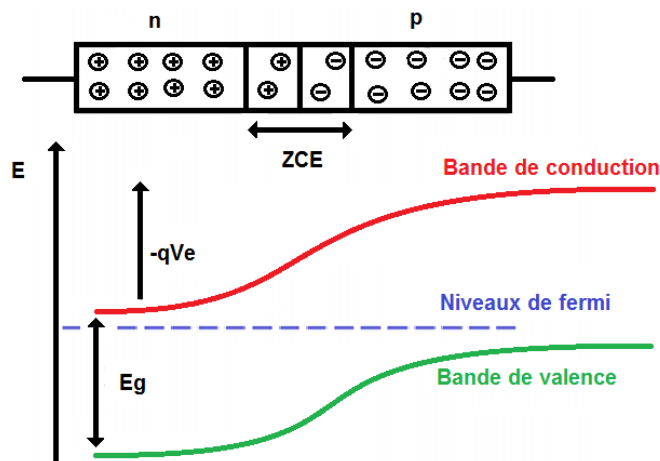


Figure (I.6): Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction p-n à l'équilibre.

Lorsque la jonction est en polarisation directe, la barrière de potentiel diminue jusqu'à une valeur à laquelle les électrons dans la bande de conduction peuvent transiter du semi-conducteur de type n vers le semi-conducteur de type p. Lorsque la jonction est polarisée en inverse, la barrière de potentiel augmente et inhibe le passage des électrons. La caractéristique courant-tension (I-V) d'une jonction p-n à l'obscurité est donc celle d'une diode (Figure I.6).

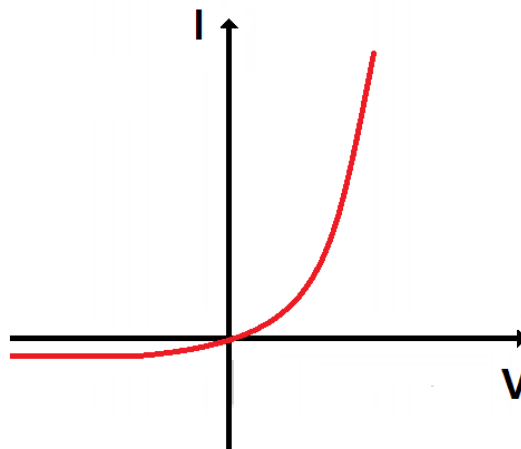


Figure (I.7): Caractéristique I-V d'une jonction p-n à l'obscurité.

Sous illumination, un semi-conducteur absorbe les photons incidents lorsque leur énergie est plus grande que celle de la bande interdite (E_g). Il y a formation de paires électrons-trous. Sans jonction p-n, ces électrons-trous se recombinent. La présence du champ électrique E dans la ZCE permet aux charges de se séparer : l'excès d'électrons diffus vers le côté n, et l'excès de trous diffus vers le côté p. Un photo-courant de porteurs minoritaires apparaît donc, opposé au courant de porteurs majoritaires déjà présent à l'obscurité cf. (Figure I.8). La ZCE est assez fine, de 100 à 300 nm. Cependant, comme l'électron peut se déplacer sur une longueur de diffusion L_n pendant sa durée de vie, les électrons collectés correspondent à ceux qui ont pu diffuser jusqu'à la ZCE. Ainsi les absorbeurs des cellules solaires ont souvent une épaisseur proche ou inférieure à la longueur de diffusion de leurs porteurs.

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

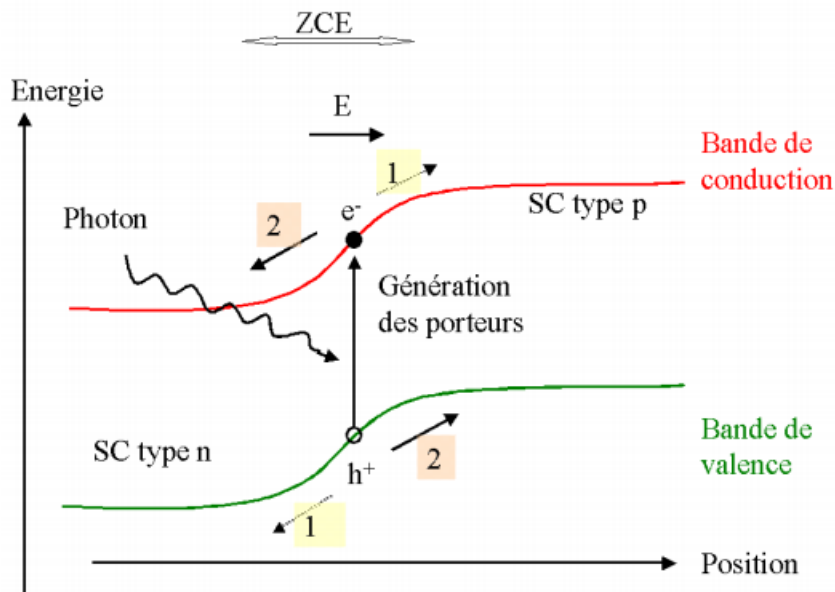


Figure (I.8) : Principe d'un dispositif photovoltaïque

A l'obscurité, la caractéristique courant-tension (I-V) d'une diode idéale est régie par l'équation de Shockley :

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (I.1)$$

Où I_0 est le courant de saturation, n le facteur d'idéalité, k est la constante de Boltzmann, T la température en degrés Kelvin et q la charge de l'électron. C'est la courbe qui est présentée dans (la Figure I.8). Sous illumination, un photo-courant I_{ph} s'opposant au courant d'obscurité est généré ($I_{ph} < 0$) de la façon suivante :

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (I.2)$$

Le courant I est en général rapporté à une surface : la densité de courant J s'exprime en mA.cm⁻².

I.5. Définition du modèle de dérive-diffusion (DDM : Drift Diffusion Model)

En physique du solide, l'interprétation des phénomènes de conduction dans un Semi-conducteur se fait en toute rigueur par l'application des théories de la mécanique quantique. On en déduit alors par approximation une équation de transport pour chaque type de particules, dite équation de Boltzmann [6].

Les équations de dérive-diffusion forment le modèle le plus couramment utilisé de nos jours pour décrire les composants à semi-conducteurs. La majeure partie de la littérature sur les modèles mathématiques pour la simulation de composants s'intéresse à ce système non linéaire d'équations à dérivées partielles, et les logiciels numériques pour sa résolution sont devenus pratiquement monnaie courante sur toute installation de recherche dans le domaine des semi-conducteurs [7].

D'un point de vue d'ingénierie, l'intérêt dans le modèle de dérive-diffusion est de remplacer, autant que possible, les tests de laboratoire par la simulation numérique dans le but

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

de minimiser le coût. Pour cette fin, il est important que les calculs soient réalisés en un temps raisonnable [8].

I.5.1. Système d'équations des semi-conducteurs

Sous les hypothèses précédemment adoptées et en considérant une température uniforme dans le matériau, les équations de base qui régissent les phénomènes de conduction dans les Semi-conducteurs [9, 10] sont regroupées comme suit:

- Equation de Poisson

L'équation de Poisson dont l'intégration permet de calculer la variation du potentiel dans le semi-conducteur à partir de la charge d'espace qui est formée par des charges dues aux porteurs libres et aux impuretés que l'on suppose totalement ionisées.

$$\nabla^2 = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{I.3})$$

ρ : Représente la densité de charge volumique

ε : Permittivité diélectrique du semi-conducteur = $\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$

- Equations de continuité

L'équation de continuité et l'équation de transport relient les concentrations locales de charges aux phénomènes de transport et aux mécanismes de génération-recombinaison.

L'équation de continuité est donnée séparément pour chacun des deux types de porteurs de charge par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n = GR_n \quad (\text{I.4})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = GR_p \quad (\text{I.5})$$

- Equations de transport

Les équations de transports dérivent de la théorie de transport de Boltzmann. Ces dernières donnent la deuxième relation entre la densité des porteurs libres et le potentiel électrostatique local.

$$\vec{j}_n = -q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{\nabla} v + q \cdot D_n \cdot \vec{\nabla} n \quad (\text{I.6})$$

$$\vec{j}_p = -q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{\nabla} v + q \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p \quad (\text{I.7})$$

Le système de 5 équations peut se résoudre à un système de 3 équations en substituant les équations (I.6) et (I.7) dans les équations (I.4) et (I.5) respectivement.

I.5.2. Modèles physiques considérés

Dans le système d'équations que nous venons de décrire, des modèles physiques sont nécessaire inhérents aux composants semi-conducteurs.

I.5.2.1. La densité de charges

La densité de charge ρ fait intervenir les concentrations en porteurs libres, n pour les électrons et p pour les trous et la concentration en impuretés électriquement actives c .

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Celle-ci intervient dans l'équation de Poisson et est définie par :

$$\rho = q(p - n + c + ct)$$

q est la charge de l'électron, c 'est la densité de charges fixes qui est donnée par $c = N_D - N_A$

Avec :

N_D : Concentration des atomes donneurs

N_A : Concentration des atomes donneurs

La densité de charge c 'est évaluée quant à elle, soit par des fonctions analytiques telles que des «Gaussiennes» ou des «erreurs complémentaires».

Ct représente la densité de charges due aux centres recombinants. Ce dernier est souvent négligé lorsqu'on travaille en régime statique ou bien lorsque les transitions peuvent être considérées comme instantanées.

I.5.2.2. Les mobilités

Les mobilités des électrons μ_n et des trous μ_p dépendent d'un certain nombre de paramètres (dopage, champ électrique, température...) [11, 12]. Dans notre cas, nous nous intéressons surtout à sa dépendance avec le dopage [13] et le champ électrique [14].

La variation de la mobilité μ avec le champ électrique et la concentration des impuretés ionisées est donnée par l'expression suivante [15] :

$$\left(\frac{\mu_0}{\mu}\right)^2 = 1 + \left(\frac{Dop}{\frac{Dop}{s} + N}\right) + \left(\frac{\left(\frac{E}{A}\right)^2}{\frac{E}{A} + F}\right) + \left(\frac{E}{B}\right)^2 \quad (I.8)$$

Les valeurs des constantes μ_0 , N , S , A , F , et B sont notées sur le tableau ci-dessous

	μ_0	N	S	A	F	B
Trous	$480 \text{cm}^2 / \text{V.s}$	$410^{10} \text{At.cm}^{-3}$	81	$6.110^3 \text{V} / \text{m}$	1.6	$2.510^4 \text{V} / \text{m}$
Electrons	$1400 \text{cm}^2 / \text{V.s}$	$310^{10} \text{At.cm}^{-3}$	350	$3.510^3 \text{V} / \text{m}$	8.8	$7.410^3 \text{V} / \text{m}$

Tableau (I.1): Tableau des paramètres de la mobilité.

I.5.2.3. Génération-Recombinaison

Nous avons vu que l'écriture des équations de continuité introduit deux termes GR_n et GR_p qui décrivent les phénomènes de générations-recombinaison, et qui représentent les divers mécanismes physiques qui vont perturber les densités de porteurs [16].

Le modèle de génération-recombinaison des paires électron-trous que nous considérons dans notre cas est celui de Shockley-Read-Hall (SRH). La vitesse de recombinaison r_{SRH} est donnée par la loi :

Chapitre I : Etat de l'art et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

$$RG_n = RG_p = r_{SRH} = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_p \cdot (n + n_i) + (p + n_i)} \quad (I.9)$$

n_i représente la concentration intrinsèque du semi-conducteur, τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous respectivement.

I.5.2.4. Génération-optique

Dans cette partie, nous allons montrer le processus photo-induits de la génération de porteurs de charge. L'illumination d'un matériau semi-conducteur avec un Flux de photons ϕ d'énergie supérieur à la largeur de bande-gap ($h\nu > E_G$) provoque une absorption de photons qui résulte la génération de paires d'électrons.

Le taux de la génération de paires électron-trou en fonction de la profondeur est exprimé par la formule suivante [17] :

$$G(x) = G_s e^{-\alpha x} \quad (I.10)$$

Avec G_s est le taux de génération des paires électron-trou en surface, sa formule est donnée comme suit :

$$G_s = \eta \alpha (1 - R) \frac{\lambda P_0}{hcA} \quad (I.11)$$

η : est le rendement quantique de la génération de paires électron-trou.

α : Le coefficient d'absorption.

λ : La longueur d'onde de la source lumineuse.

R : Le coefficient de réflexion.

A : Le champ de la surface éclairée.

P_0 : La puissance de la source lumineuse.

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière dans le vide.

En supposant un éclairage uniforme du matériau de l'échantillon, le flux de photons est directement proportionnel au nombre de photons N_{ph} incidents sur le surface par unité de temps et inversement proportionnelle à la surface de la surface éclairée. Le nombre de photons N_{ph} dépend de la puissance du faisceau lumineux qui est donné par cette formule :

$$N_{ph} = \frac{\lambda P_0}{hc} \quad (I.12)$$

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève introduction concernant les panneaux solaire, nous avons ainsi décrit les caractéristiques principales d'une cellule PV (photovoltaïque).

Dans un deuxième temps, les principales formulations mathématiques qui décrivent le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ont été présentées expliquées.

Finalement nous avons proposé un modèle physique qui explique la génération des paires électrons-trous en fonction du rayonnement optique.

Chapitre II

Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

II.1. Introduction

La modélisation des composants et des systèmes électroniques a été longtemps basée sur l'aspect analytique [1, 2], mais avec l'évolution et la miniaturisation des composants, la solution analytique est devenue très difficile pour prendre en compte les effets de second ordre de plus en plus prédominants.

Dans ce chapitre, nous développerons un modèle numérique pour la simulation bidimensionnelle d'une cellule solaire en utilisant l'environnement MATLAB.

Nous présenterons en premier temps les diverses formulations mathématiques nécessaires à l'analyse des phénomènes de transport dans les semi-conducteurs.

Dans un deuxième temps, nous développerons plus particulièrement les préliminaires analytiques au traitement numérique du modèle dérive-diffusion (passage à des équations sans dimensions, choix des variables de base, normalisation...) ainsi que le traitement des conditions au niveau des interfaces et des frontières. La solution auto cohérente du problème non linéaire couplé sera ensuite décrite et les méthodes de résolution des systèmes linéaires résultants seront explicitées.

II.2. Résolution des problèmes aux dérivées partielles

II.2.1. Méthodes spatiales

Les équations qui régissent le fonctionnement des composants considérés, en l'occurrence la cellule photovoltaïque dans notre cas, sont alors posées. Nous nous utiliserons alors à proposer une méthode de résolution numérique de celles-ci.

Dans cette partie, exposons quelques méthodes numériques de résolution des problèmes aux dérivées partielles décrivant des phénomènes physiques. Pour passer d'un problème exact Continu régi par une EDP (Equation Différentielle Partielle) au problème approché discret, il existe un grand nombre de méthodes numériques, chacune d'elles étant plus adaptée à un certain type de problèmes.

II.2.1.1. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à interpoler une fonction sur des éléments qui correspondent à des sous-ensembles du domaine de calcul de la fonction [1].

La méthode des éléments finis consiste à restreindre l'intervalle de définition de la fonction à des intervalles plus petits, appelés éléments, sur lesquels il est plus facile d'appliquer la définition de la fonction d'approximation.

Avantages : traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques sur la convergence.

Inconvénient : complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire active.

II.2.1.2. La méthode des différences finies

La méthode des différences finies a été développée par A. Thom [2]. Elle nécessite de définir un maillage de l'espace défini par le système physique à modéliser (chaque cellule du maillage contient alors les constantes physiques du matériau mis en jeu).

On approxime ensuite les EDP régissant ce système avec le principe des différences finies en les transformant en un système d'équations linéaire. Enfin, on résout les équations en chaque point du maillage en prenant en compte les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites du système.

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

Les points essentiels à assurer pour cette méthode sont la précision des calculs et la stabilité de l'algorithme.

Trois types d'erreurs vont apparaître : les erreurs dus à l'établissement du modèle du système, les erreurs dues à la discrétisation de l'espace et les erreurs d'arrondis des nombres dans le calculateur. Il faut noter qu'un maillage plus fin utilisé pour réduire le second type d'erreurs va augmenter le nombre d'opérations et ainsi les erreurs du troisième type.

La méthode utilisée dans le cadre de ce travail est la méthode des différences finies. En effet cette méthode reste la plus utilisée dans la simulation des composants semi-conducteurs, en particulier dans le cas de structures similaires à celles que nous considérons et qui présentent une géométrie carrée. Cette méthode consiste à construire et résoudre un système d'équations algébriques dont les inconnues sont les valeurs des variables à rechercher en un nombre fini de points du domaine étudié.

II.2.1.3. Principe de la méthode des différences finies

L'ordinateur ne connaît pas la continuité mathématique, alors l'obtention d'expressions programmables passe donc par la discrétisation des formulations considérées. Les dérivées partielles spatiales et temporelles du modèle dérive-diffusion peuvent être traitées par la technique des différences finies [3].

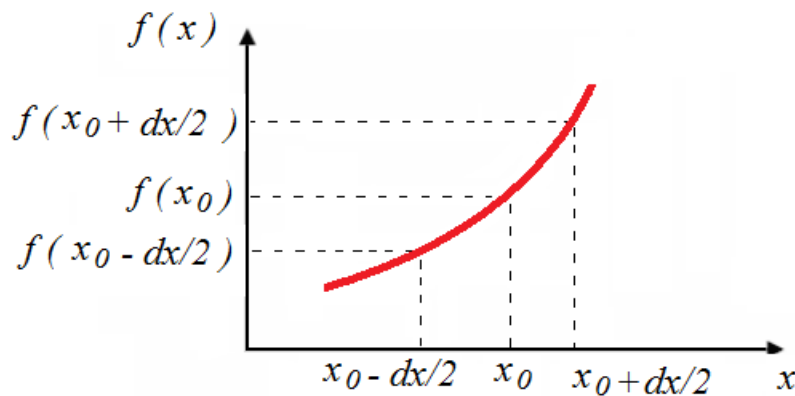


Figure (II.1) : Evaluation d'une dérivée

Pour illustrer le principe, considérons une fonction $f(x)$ connue aux points $x_0 - (\Delta x / 2)$, x_0 , $x_0 + (\Delta x / 2)$. On évalue numériquement la dérivée de $f(x)$ sur le point x_0 par le développement en série de Taylor de la fonction $f(x)$ sur les points $x_0 - (\Delta x / 2)$ et $x_0 + (\Delta x / 2)$ On a :

$$f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) = f(x_0) + \frac{\Delta x}{2} f'(x_0) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x_0) + o(\Delta x^3) \quad (\text{II.1})$$

La dérivée peut être obtenue de différentes manières :
 - Soit par une approximation par différence «progressive»

A partir de l'équation (II.1) on aura :

$$f'(x_0) = \frac{f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f(x_0)}{\Delta x / 2} + o(\Delta x) \quad (\text{II.2})$$

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

- Soit par une approximation par différence «rétrograde»
A partir de l'équation (2.9) on aura :

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x / 2} + o(\Delta x) \quad (\text{II.3})$$

- Soit par une approximation par différence «milieu»
La soustraction des équations (2.8) et (2.9) permet d'avoir:

$$f'(x_0) = \frac{f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x / 2} + o(\Delta x) \quad (\text{II.4})$$

On peut noter que les points de différentiation sont décalés par rapport aux points de discrétisation (voir figure (II.1)). On constate également que le dernier schéma est plus performant car l'erreur commise est seulement d'ordre 2.

On peut estimer la dérivée seconde de la fonction $f(x)$ comme suit :

$$f''(x_0) = \frac{f'\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f'\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x / 2} \quad (\text{II.5})$$

Alors

$$f''(x_0) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} - \frac{f(x_0 - \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \right] \quad (\text{II.6})$$

Ce qui permet d'écrire finalement

$$f''(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) + f(x_0 - \Delta x) - 2f(x_0)}{\Delta x^2} \quad (\text{II.7})$$

II.3. Normalisation du modèle dérive-diffusion

Les variables choisies présentent des ordres de grandeurs très différents dont la dynamique peut être recentrée par une étape de normalisation des principales variables [4].

Celles-ci sont résumées dans le tableau (II.1).

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

GRANDEURS	VARIABLES	UNITE	FACTEUR DE NORMALISATION	ORDRE DE GRANDEURS
<i>Distance</i>	L	m	$L = \sqrt{\frac{\epsilon U_T}{q n_i}}$	$3.34E^{-5}$
<i>Potentiel électrique</i>	U_t	V	$U_T = \frac{K.T}{q}$	0.0258
<i>Concentration</i>	n, p, N_D, N_A	At / cm^3	n_i	$1.48E^{10}$
<i>Constante de diffusion</i>	D_n, D_p	cm^2 / S	$D_0 = \frac{L J_0}{q.n_i}$	$1.46E^6$
<i>Mobilité</i>	μ_n, μ_p	$cm^2 / V.S$	$\frac{D_0}{U_T}$	$5.65E^7$
<i>Densité de courant</i>	J_n, J_p	A / cm^2	$J_0 = \frac{q.D_0.n_i}{L}$	$3.42E^{13}$
<i>Génération-Recombinaison</i>	$G - R$	$cm^{-2}.S^{-1}$	$\frac{D_0.n_i}{L^2}$	$1.14E^{11}$
<i>Champ électrique</i>	E	V / cm	$\frac{U_T}{L}$	$7.62E^4$
<i>Temps (duré de vie)</i>	τ	S	$\frac{L^2}{D_0}$	$7.88E^{12}$

Tableau (II.1) : Tableau de normalisation des constantes

En utilisant ces grandeurs de normalisation, les équations de semi-conducteur deviennent :
Normalisation de l'équation de Poisson

$$U_T \frac{1}{L^2} (\Delta^2 V) = -\frac{q}{\epsilon} n_i (P - N - C) \quad (II.8)$$

L'équation de Poisson en quantités normalisées s'écrit comme suit :

$$\nabla^2 V = N - P + C \quad (II.9)$$

✓ Normalisation des équations de transport

Par substitution des grandeurs normalisées, les équations (I.6) et (I.7) s'écrivent comme suit :

$$\vec{j}_n = q.n_i \cdot \frac{D_0}{L} . M_n . (-N . \vec{\nabla} V + \vec{\nabla} N) \quad (II.10)$$

$$\vec{j}_p = q.n_i \cdot \frac{D_0}{L} . M_p . (-P . \vec{\nabla} V - \vec{\nabla} P) \quad (II.11)$$

M_n et M_p représentent les mobilités des électrons et des trous en quantités normalisées.

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

Les équations de transport en quantités normalisées s'écrivent comme suit :

$$\vec{j}_N = M_N \cdot (-N \cdot \vec{\nabla} V - \vec{\nabla} N) \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{j}_P = M_P \cdot (-P \cdot \vec{\nabla} V - \vec{\nabla} P) \quad (\text{II.13})$$

✓ Normalisation des équations de continuités

La substitution des variables normalisés dans les équations de continuités permet d'avoir :

$$\frac{D_0 n_i}{L^2} \frac{\partial N}{\partial T} - \frac{J_0}{qL} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_N = \frac{D_0 n_i}{L^2} \cdot R_{SRH} \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{D_0 n_i}{L^2} \frac{\partial P}{\partial T} + \frac{J_0}{qL} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_P = \frac{D_0 n_i}{L^2} \cdot R_{SRH} \quad (\text{II.15})$$

Ce qui permet d'aboutir à :

$$\frac{\partial N}{\partial T} - \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_N = R_{SRH} \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{\partial P}{\partial T} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_P = R_{SRH} \quad (\text{II.17})$$

II.4. Conditions aux limites

II.4.1. Conditions aux contacts

Elles sont du type « Dirichlet », elles portent sur le potentiel électrostatique et les densités de porteurs libres comme suit :

✓ Sur le potentiel électrostatique :

Le potentiel électrostatique dans le semi-conducteur est relié à la polarisation extérieure V_{app} et à la tension de diffusion suivant les relations suivantes :

$$\begin{cases} V = V_{app} + Ln(N) \rightarrow \text{Pour une région dopée } N \\ V = V_{app} - Ln(P) \rightarrow \text{Pour une région dopée } P \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

✓ Sur les densités de porteurs :

Dans le cas où les contacts sont ohmiques, c'est-à-dire que le semi-conducteur est supposé être électriquement neutre et en équilibre thermodynamique au voisinage des contacts, alors ces hypothèses sont traduites par les équations normalisées suivantes :

$$\begin{cases} N - P - C = 0 \\ N \cdot P = 1 \end{cases}$$

Par conséquent, les densités de porteurs sont décrites selon :

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

$$\begin{cases} N = \frac{C}{2} + \sqrt{\left(\frac{C}{2}\right)^2 + 1} \\ P = -\frac{C}{2} + \sqrt{\left(\frac{C}{2}\right)^2 + 1} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.4.2. Conditions aux autres frontières

Sur les autres surfaces limites du semi-conducteur ce sont les conditions de Neumann qui les gèrent. En d'autres termes, les frontières extérieures non polarisées du domaine de calcul sont supposées telles que les dérivées normales des trois inconnues (V, N et P) soient nulles.

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \frac{\partial N}{\partial n}, \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

II.5. Discrétisation du modèle dérive-diffusion

Soit un espace de modélisation bidimensionnel (O, X, Y). ΔX et ΔY représentent les pas de discrétisation dans les deux directions et i, j les coordonnées du point de l'espace de modélisation.

Si on applique le principe des différences finies aux équations (II.9),(II.16) et(II.17), on obtient les trois équations linéaires suivantes :

$$G.V_{(i-1,j)} + D.V_{(i+1,j)} + B.V_{(i,j-1)} + H.V_{(i,j+1)} - S.V_{(i,j)} = N_{(i,j)} - P_{(i,j)} + C(i, j) \quad (21)$$

Où les coefficients G, D, B, H et S sont donnés par [3] :

$$G = \frac{2}{(X_i - X_{i-1})(X_{i+1} - X_{i-1})}$$

$$D = \frac{2}{(X_{i+1} - X_i)(X_{i+1} - X_{i-1})}$$

$$B = \frac{2}{(Y_j - Y_{j-1})(Y_{j+1} - Y_{j-1})}$$

$$H = \frac{2}{(Y_{j+1} - Y_i)(Y_{j+1} - Y_{j-1})}$$

$$S = G + D + B + H$$

Les équations de continuités sont discrétisées alors selon le principe des différences finis

$$A_1.N_{(i-1,j)} + A_2.N_{(i+1,j)} + A_3.N_{(i,j-1)} + A_4.N_{(i,j+1)} - A_5.N_{(i,j)} = R_{SRH} - R_{opt} \quad (\text{II.22})$$

$$B_1.P_{(i-1,j)} + B_2.P_{(i+1,j)} + B_3.P_{(i,j-1)} + B_4.P_{(i,j+1)} - B_5.P_{(i,j)} = R_{SRH} - R_{opt} \quad (\text{II.23})$$

Les expressions A_{1-5} et B_{1-5} dépendent du potentiel en terme normalisé

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

$$\begin{pmatrix} -B_5 & B_2 & & B_4 & & \\ B_1 & -B_5 & B_2 & & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & B_4 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ B_3 & & & \ddots & \ddots & \\ & \ddots & & & \ddots & B_2 \\ & & B_3 & & & \\ & & & B_1 & -B_5 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P(1) \\ P(2) \\ \vdots \\ P(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ P(n*m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{SRH} - R_{opt} \\ R_{SRH} - R_{opt} \\ \vdots \\ R_{SRH} - R_{opt} \\ \vdots \\ \vdots \\ R_{SRH} - R_{opt} \end{pmatrix} \quad (II.25)$$

$$\begin{pmatrix} -A_5 & A_2 & & A_4 & & \\ A_1 & -A_5 & A_2 & & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & A_4 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ A_3 & & & \ddots & \ddots & \\ & \ddots & & & \ddots & A_2 \\ & & A_3 & & & \\ & & & A_1 & -A_5 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N(1) \\ N(2) \\ \vdots \\ N(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ N(n*m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{SRH} - R_{opt} \\ R_{SRH} - R_{opt} \\ \vdots \\ R_{SRH} - R_{opt} \\ \vdots \\ \vdots \\ R_{SRH} - R_{opt} \end{pmatrix} \quad (II.26)$$

Nous sommes donc amenés à résoudre les trois systèmes implicites couplés de $m*n$ inconnues dont les inconnues sont le potentiel électrostatique, la concentration des électrons et la concentration des trous en chaque point de l'espace.

II.6. Solution initiale

Un problème délicat est la détermination de l'approximation initiale en V , N et P nécessaire au départ du processus itératif. Le temps de calcul dépend directement de la qualité de celle-ci. De plus, une solution trop mauvaise peut conduire à une non-convergence de l'algorithme utilisé, se traduisant par un incident arithmétique, ou des oscillations. Ce problème a toutefois été rendu moins crucial par l'emploi des nouvelles formules de discrétisations, qui semblent moins sensibles à la qualité de la solution initiale (rayon de convergence plus grand).

Pour notre simulation, nous avons utilisé la méthode d'approximation des pseudo-potentiels de Fermi [5].

La densité des majoritaire dans les zones N et P est connue, ce qui fait que, le gradient du pseudo-potential de Fermi est faible. Nous le considérons donc constant et égal à sa valeur au contact dont dépend la zone considérée.

L'organigramme ci-dessous résume les étapes nécessaires qui permettent d'avoir la solution initiale des trois variables N_0 , P_0 et V_0 . Cette approximation est excellente en comparaison du résultat final.

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

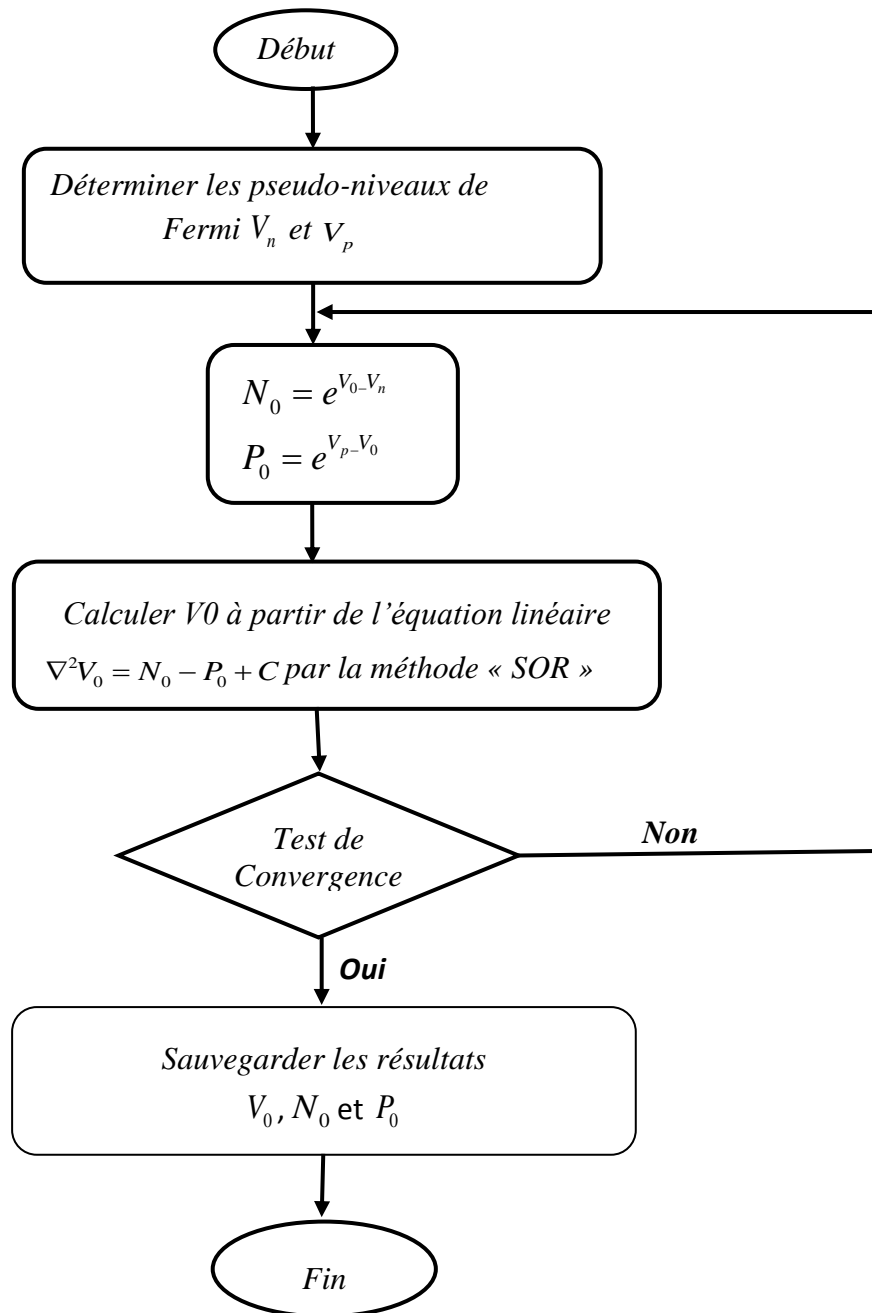


Figure (II.2) : Algorithme de base pour la détermination de la solution initiale au niveau de cellule photovoltaïque.

II.7. Solution finale

Nous sommes donc confrontés à la résolution d'un système couplé de $3 \cdot m \cdot n$ équations algébriques dont les inconnues sont les valeurs du potentiel, les concentrations en électrons et trous en chacun des points du maillage.

La méthode choisie dans le cadre de ce travail est la méthode de Gummel.

Le principe du calcul itératif en analyse numérique repose sur l'utilisation d'une valeur initiale, puis de la raffiner par une succession d'approximations qui lui permettent de se rapprocher graduellement de la solution finale. La solution initiale obtenue, décide donc de l'exactitude de la solution finale. Cette méthode assure une bonne convergence très rapide.

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

La méthode de résolution de chaque système d'équations, est celle préconisée par SOR [6, 7]. Le choix de cette méthode a été motivé par sa bonne convergence et le gain en mémoire machine.

L'introduction d'un paramètre de relaxation ω sur la méthode de Gauss-Seidel permet de former une combinaison linéaire.

Les différentes étapes du calcul de la solution final sont synthétisées sur l'organigramme de la figure (II.3).

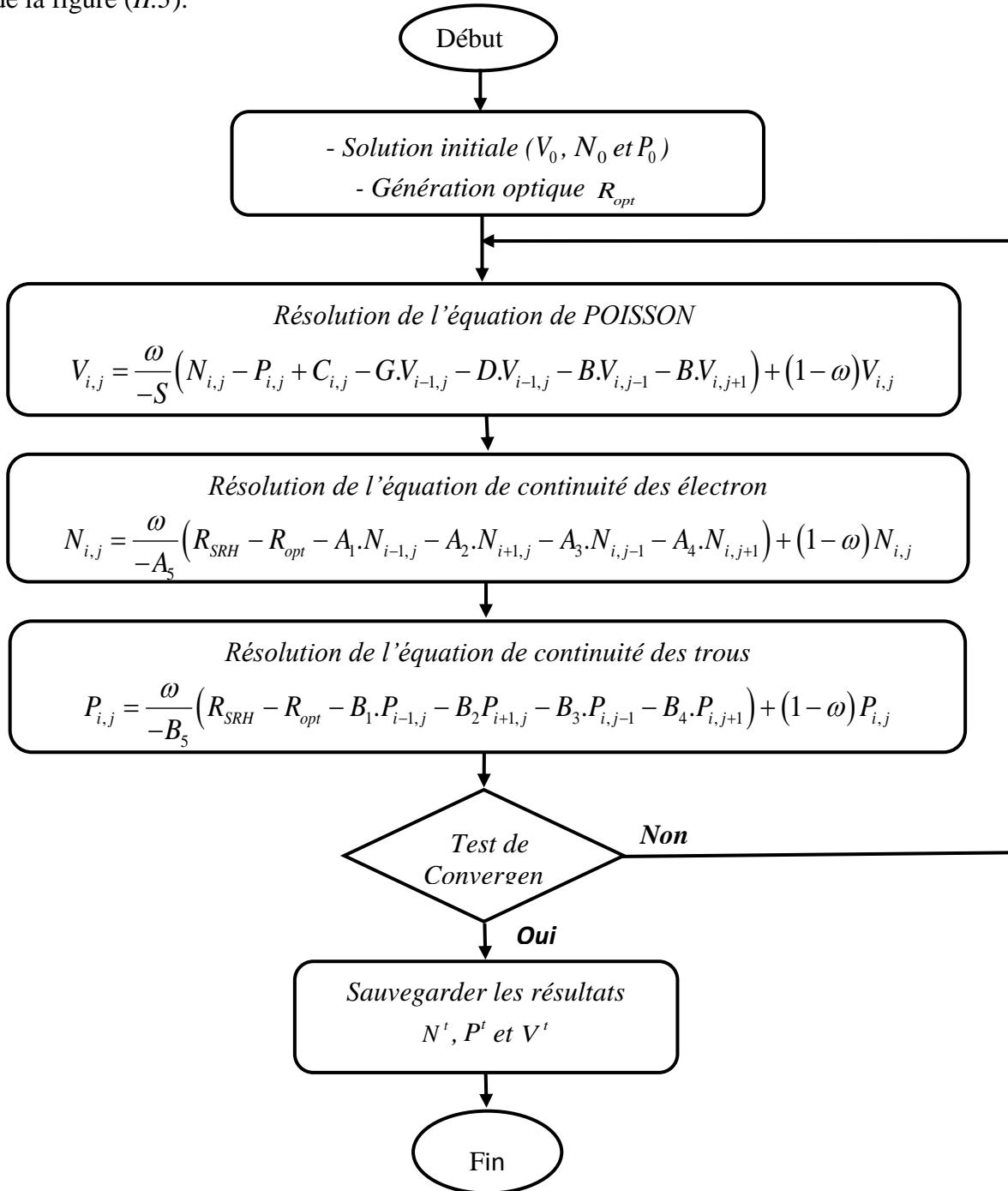


Figure (II.3) : Algorithme de base pour la détermination de la solution finale au niveau de cellule photovoltaïque.

Chapitre II : Modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle de simulation numérique d'une cellule photovoltaïque en régime statique basé sur la résolution bidimensionnelle des équations des semi-conducteurs, incluant quelques modèles physiques tels que la génération recombinaison, la génération optique, la mobilité...

Nous avons proposé un schéma auto-cohérent pour résoudre les trois systèmes d'équations couplés obtenus.

Les trois équations sont discrétisées à l'aide du concept des différences finies, puis les deux systèmes d'équations obtenus sont résolus par la méthode directe incluse dans MATLAB.

Les principales étapes pour la résolution du système couplé ont été présentées.

Chapitre III

Simulation et résultats

Chapitre III: Simulation et résultats

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous développerons un modèle numérique pour la simulation bidimensionnelle d'une cellule photovoltaïque en utilisant l'environnement MATLAB.

Notre but étant le :

- Résoudre le couple poisson et continuité des porteurs libres.
- Calculer la distribution du potentiel électrostatique, concentration des électrons et la concentration des trous.
- Calculer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).
- Calculer les principaux paramètres de la cellule simulée tels que le courant de court-circuit I_{sc} , tension de circuit ouvert V_{oc} , tension maximale V_m , courant et tension au point de puissance maximale I_m et V_m et les quantités de la variation des courants en mode court-circuit et en mode circuit ouvert.

III.2. Simulation d'une cellule photovoltaïque

III.2.1. Définition du domaine de calcul

Le composant considéré dans notre simulation est une jonction P-N a base d'un semi-conducteur de type SiGe. La géométrie et le type de dopage de chaque région sont donnés sur la Figure (III.1). La largeur de la cellule est $L=20\mu m$.

L'épaisseur de la région N est de $5\mu m$ avec une concentration en atomes donneurs de $10^{20} At/cm^3$. Concernant la région P, l'épaisseur de cette région est de $15\mu m$ avec une concentration en atomes accepteurs de $10^{16} At/cm^3$.

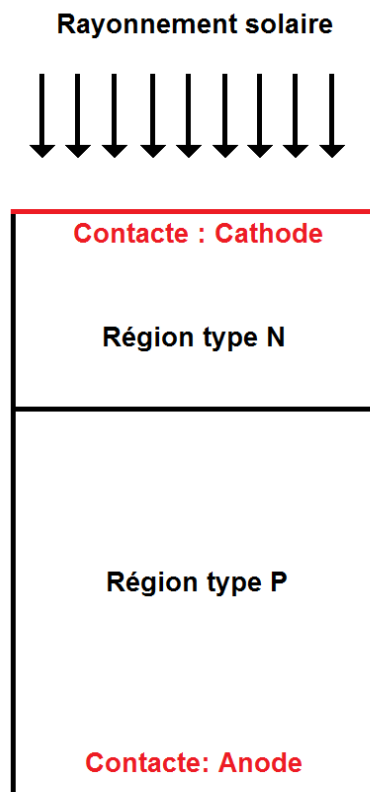


Figure (III.1) : Schéma de la cellule photovoltaïque

Chapitre III: Simulation et résultats

III.2.2. Elaboration du maillage :

Le maillage est une phase très importante de la simulation puisque les calculs se font en chaque point de celui-ci. La précision de la solution va donc dépendre de la qualité de ce dernier. Un maillage fin apportera plus de précision, mais nécessitera beaucoup de temps de calcul. Il faut donc obtenir un compromis.

Les différents critères de raffinement d'un maillage sont :

-Il est nécessaire de raffiner dans les régions où le dopage varie fortement (au niveau des jonctions), dans les régions où les charges s'accumulent, et au niveau des zones peu dopées mais sous fortes polarisations.

-Il est inutile de raffiner le maillage dans les régions électriquement neutres et les oxydes.

Dans le cadre de notre étude, le maillage est uniforme suivant l'axe x et y tel que $\Delta x=0.5\mu m$ et $\Delta y=0.2\mu m$

Le choix du pas de l'espace et du temps est régi par les deux limitations suivantes [1]:

-Le pas spatial doit être suffisamment petit par rapport à la longueur de Debye.

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} < \sqrt{\frac{\epsilon U_T}{qn_i}} \quad (\text{III.1})$$

Le maillage adopté pour simuler la cellule photovoltaïque est présentée dans la figure (III.2).

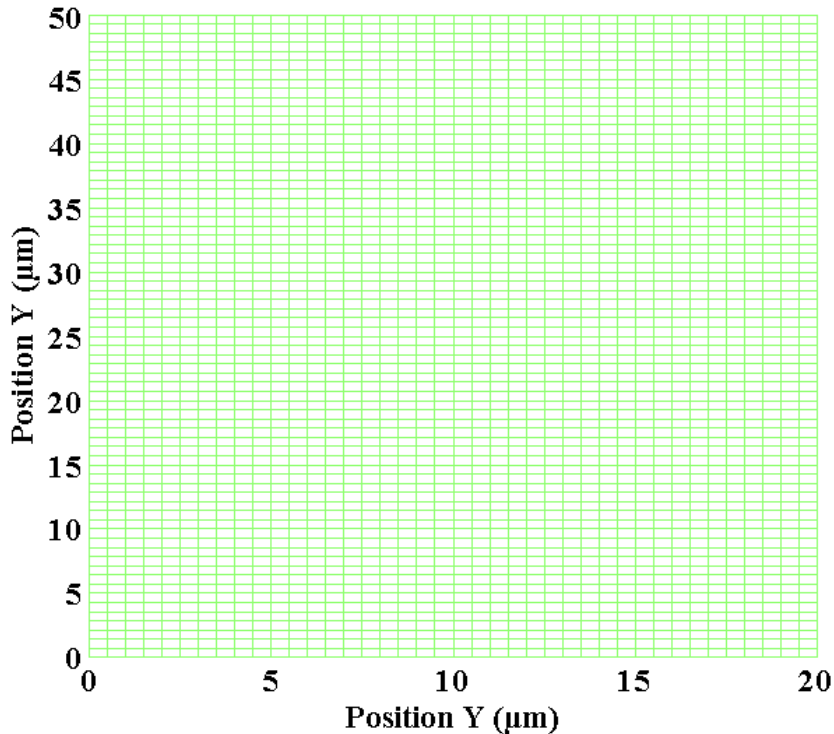


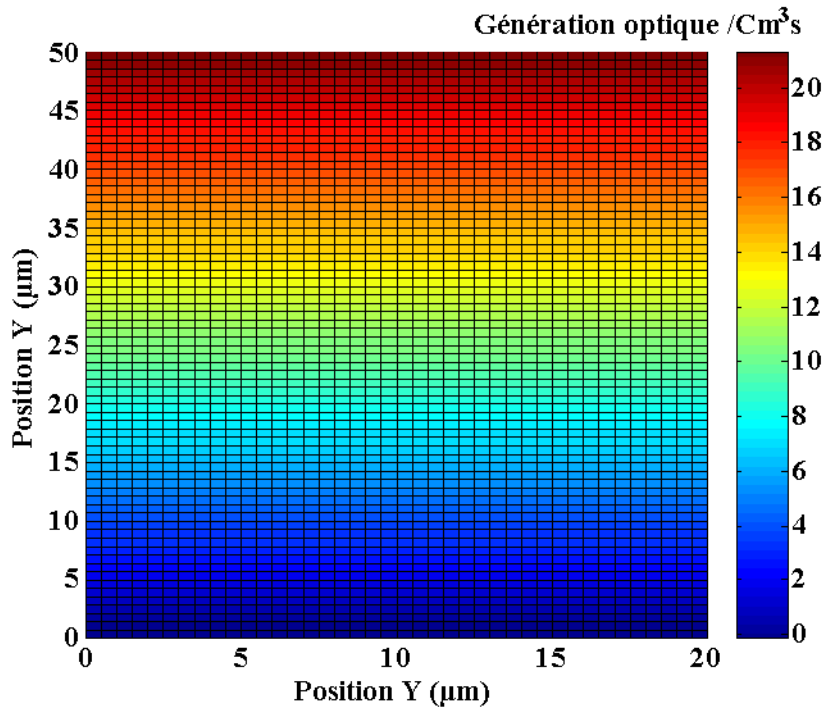
Figure (III.2) : Maillage optimisé pour la simulation de la cellule photovoltaïque

Chapitre III: Simulation et résultats

III.2.3. Générations optique

Au niveau de la diffusion en atome donneur (contacte cathode), on applique un rayonnement solaire suivant la direction y avec une puissance optique de $1W/cm^2$. La génération optique a été calculée en utilisant les formules I.10, I.11 et I.12.

La distribution de la génération optique en échelle logarithmique est présentée dans la figure(III.3).



Figure(III.3) : Distribution de la génération optique dans la cellule dans l'échelle logarithmique

III.3. Résultats de la simulation numérique

La cellule photovoltaïque est polarisé par une tension directe $V_d=0.41V$. La figure (III.4) présente l'erreur relative des électrons dans échelle logarithmique en fonction des itérations de Gummel, on observe une bonne convergence vers la solution finale. Le calcul itératif s'arrête automatiquement pour une précision de 10^{-8} . Chaque itération prend une durée de $0.0182 s$.

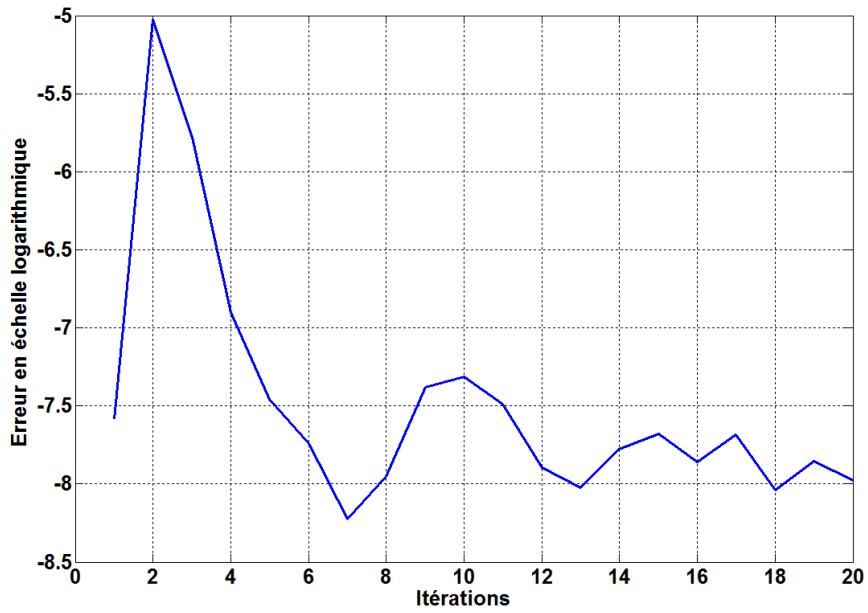


Figure (III.4): Erreur relative des électrons dans l'échelle logarithmique

La figure (III.5) représente la répartition de la densité des électrons dans l'échelle logarithmique sur toute la cellule photovoltaïque.

Près de la diffusion cathode, on aperçoit un creux qui correspond à la zone désertée de la jonction P-N. La concentration des électrons décroît du contacte cathode vers le contacte anode.

La distribution de la densité des trous est présentée dans la figure (III.6) dans échelle logarithmique. On observe parfaitement une zone désertée de la jonction P-N à côté du contacte cathode. La concentration des trous décroît du contacte anode vers le contacte cathode.

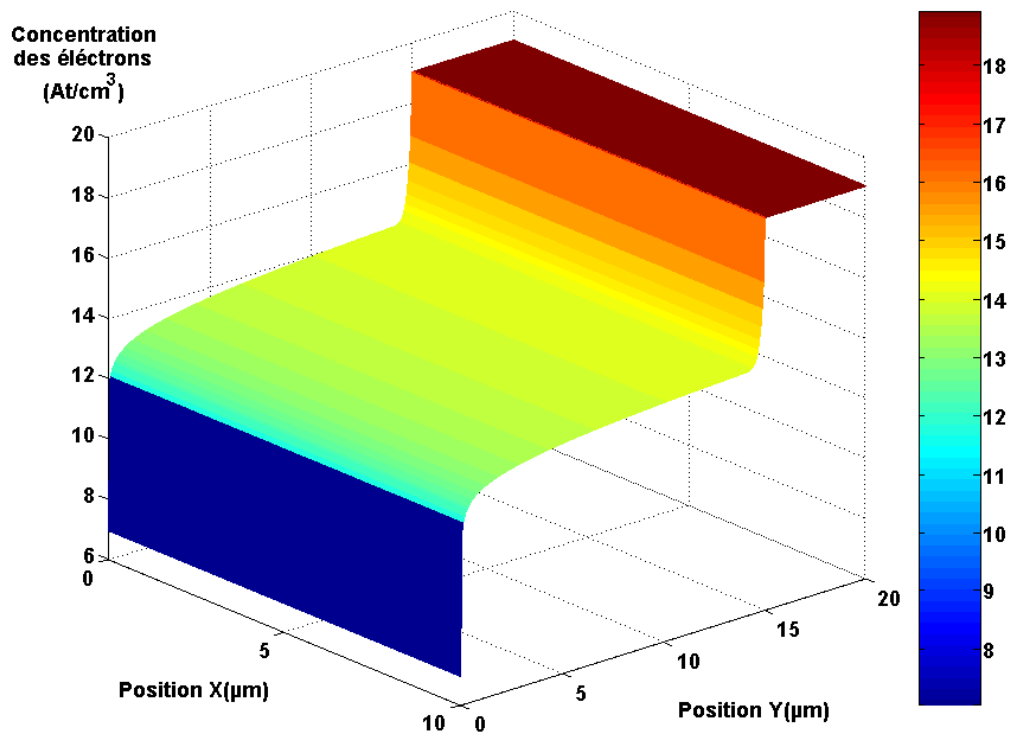


Figure (III.5) : Distribution bidimensionnelle de la concentration des électrons

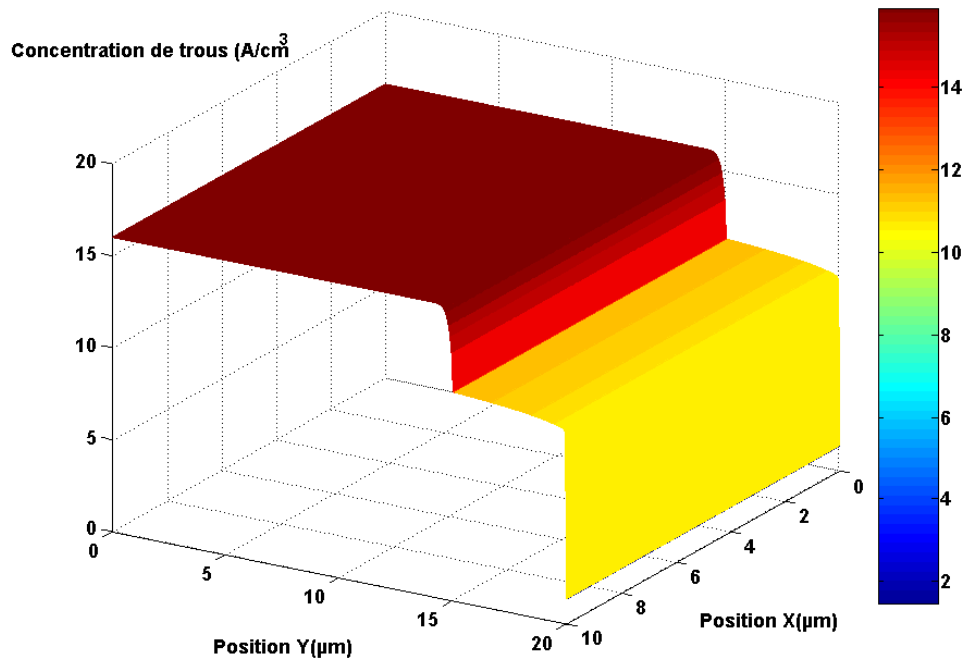


Figure (III.6): Distribution bidimensionnelle de la concentration des électrons

Chapitre III: Simulation et résultats

La figure (III.7) montre la distribution du potentiel électrostatique dans la cellule photovoltaïque, on note que le potentiel électrostatique presque constant à côté des diffusions anode est cathode, mais varie d'une manière brutale dans la zone des charges d'espace.

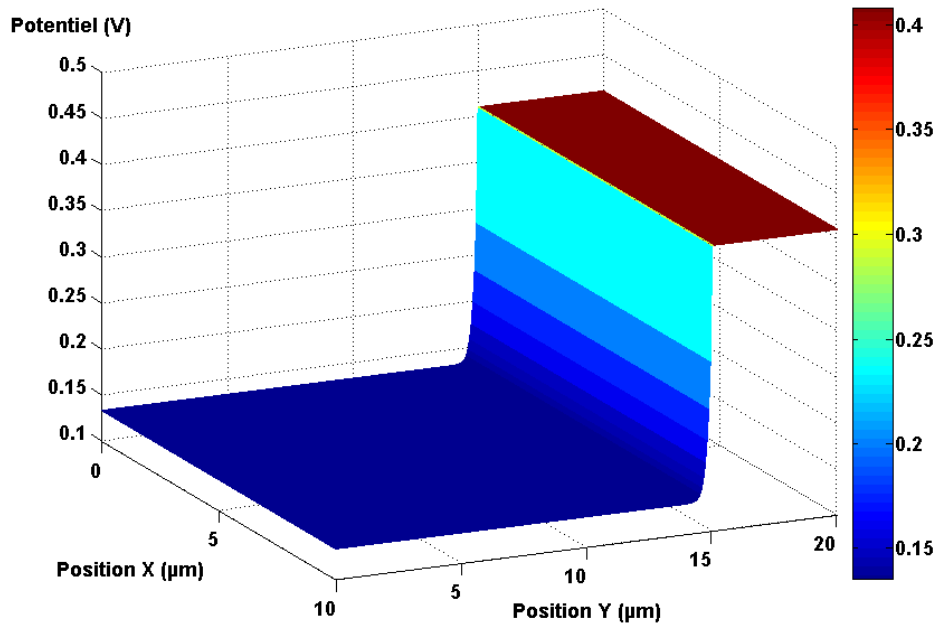


Figure (III.7) : Distribution du potentiel électrostatique

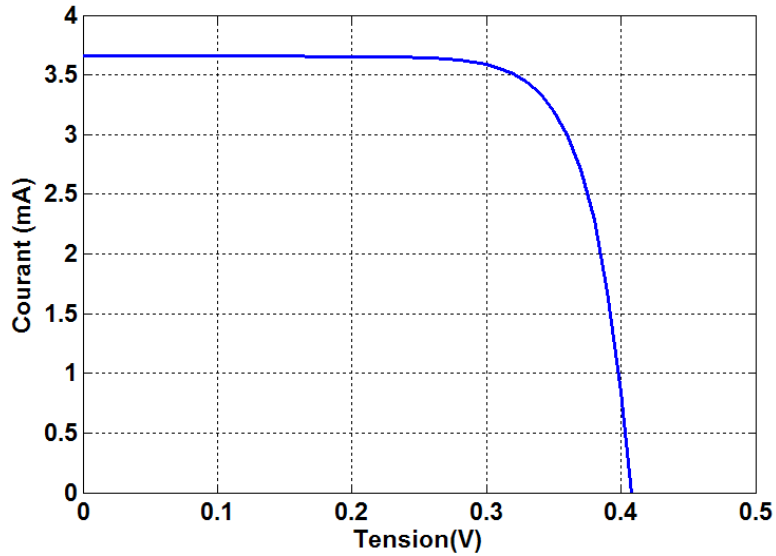
III.4. Caractéristique I-V/ P-V

Les caractéristiques de sortie I-V et P-V sont présentées dans les figures (III.8) et (III.9) tel que la tension anode varie dans l'intervalle $[0 \text{ } 4.1] \text{ V}$ avec un déplacement de 10^{-3} V .

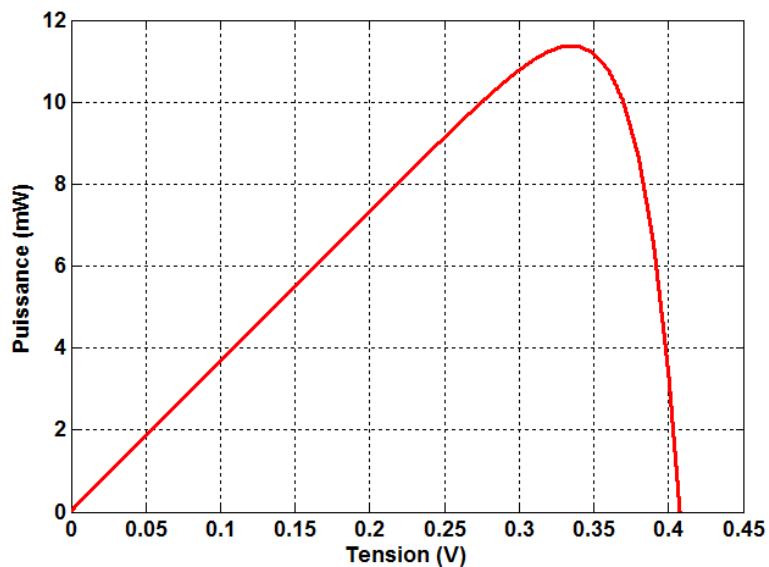
La courante anode a été calculée par l'intégration de la densité du courant au niveau du contact anode en utilisant la formule suivante :

$$I_D = S_{Anode} \cdot \sum_{Anode} J(i, j) \quad (\text{III.2})$$

Chapitre III: Simulation et résultats



Figure(III.8) : Caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque



Figure(III.9) : Caractéristique P-V de la cellule photovoltaïque

D'après les figures obtenues, nous avons pu calculer les paramètres datassent du la cellule photovoltaïque simulée, qui sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Courant en court-circuit I_{sc} (mA)	3.682
Tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	0.413
Tension maximale V_m (V)	0.342
Courant maximal I_m (mA)	3.321
$\left. \frac{\partial I}{\partial V} \right _{V=0}$ (A/V)	4.036×10^3
$\left. \frac{\partial I}{\partial V} \right _{V=V_{oc}}$ (A/V)	9.245×10^{-3}

Chapitre III: Simulation et résultats

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montrés les principales étapes, pour résoudre le couple Poisson-continuité des porteurs pour la simulation numérique d'une cellule photovoltaïque.

Nous avons résolus les trois équations de base des semi-conducteurs à l'aide d'un schéma auto cohérent proposé initialement dans un cas unidimensionnel par Gummel [2].

Nous avons pu ainsi résoudre le problème proposé avec une bonne précision, autrement dit, l'algorithme numérique développé converge vers la solution finale avec une précision désirée.

Les résultats obtenus par notre simulation numérique ont été présentés D'autre part, cela nous a permis d'observer plusieurs phénomènes. Citons en particulier, les variations des zones de charge d'espace à partir de la cartographie de la concentration des électrons et des trous ainsi que l'effet de l'énergie optique sur le courant de sortie (au niveau du contacte anode).

D'autre part, les caractéristiques électriques I-V et P-V de la cellule photovoltaïque ont été calculées et présentées. Ainsi que nous avons pu calculer les paramètres datassent de la cellule photovoltaïque.

A partir du modèle développé, nous pouvons d'une part déterminer les cinq paramètres intrinsèques de la cellule photovoltaïque en régime statique (résistance série, résistance parallèle, photo-courant,...), cette dernière va permettre d'étudier le fonctionnement du composant dans d'une manière analytique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux présentés ici concernent la modélisation d'un système de production d'électricité photovoltaïque.

Lorsque l'étude repose sur la comparaison de plusieurs modèles d'un système de panneaux photovoltaïques.

Pour ce qui est de la conception des systèmes photovoltaïques, les données les plus utiles concernant les lectures mensuelles de la radiation totale reçue par un panneau solaire photovoltaïque, la seconde inclinée par rapport à l'horizontale d'un angle correspondant à la latitude du lieu pour favoriser la capture d'énergie solaire.

En donnant une introduction sur les panneaux solaires, nous avons décrit les principales caractéristiques d'une pile photovoltaïque (photovoltaïque).

Dans une seconde étape, les principales formulations mathématiques décrivant le fonctionnement des cellules photovoltaïques ont été expliquées.

Enfin, nous avons proposé un modèle physique qui explique la production de trous électroniques par rapport au rayonnement optique.

Nous avons développé un modèle de simulation numérique d'une cellule photovoltaïque à l'état statique basé sur la résolution en deux dimensions des équations semi-conductrices, incluant quelques modèles physiques tels que la génération recombinante, la génération optique, la mobilité...

La présente étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Résolus les trois équations de base des semi-conducteurs à l'aide d'un schéma auto cohérent proposé initialement dans un cas unidimensionnel par Gummel
- La diffusion en atome donneur (contacte cathode), on applique un rayonnement solaire suivant la direction y avec une puissance optique de $1W/cm^2$. La génération optique a été calculée en utilisant les formules I.10, I.11 et I.12.
- Présente l'erreur relative des électrons dans échelle logarithmique en fonction des itérations de Gummel, on observe une bonne convergence vers la solution finale. Le calcul itératif s'arrête automatiquement pour une précision de 10^{-8} . Chaque itération prend une durée de 0.0182 s.
- La répartition de la densité des électrons dans l'échelle logarithmique sur toute la cellule photovoltaïque.
- Près de la diffusion cathode, on aperçoit un creux qui correspond à la zone désertée de la jonction P-N. La concentration des électrons décroît du contacte cathode vers le contacte anode.
- La distribution du potentiel électrostatique dans la cellule photovoltaïque, on note que le potentiel électrostatique presque constant à côté des diffusions anode est cathode, mais varie d'une manière brutale dans la zone des charges d'espace

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques du chapitre 1

- [1] **Anne Labouret, Michel Vilozz**, Energie Solaire Photovoltaïque, 3ème édition, Dunod, Paris, 2006.
- [2] **Jack Bernard**, Energie solaire calcul et optimisation, 2004, France.
- [3] **Hegedus, S.S. and W.N. Shafarman**, Thin-film solar cells : Device measurements and analyses. Progress in Photovoltaics, 2004. 12(2-3): p. 155-176.
- [4] **Loferski J. J.**, Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion, J. Appl. Phys. 1956, 27, 777-784.
- [5] **Leon Freris, David Infield**, Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, Dunod, Paris, 2009.
- [6] **C.M. Snowden**, "Introduction To Semiconductor Device Modelling", World Scientific, ISBN: 978-9971-5-0142-6, (1986).
- [7] **P. A. Markowich**, "Semiconductor equations", Wien-New York, Springer-Verlag, ISBN:3211821570, (1989).
- [8] **D. Hadjli**, " Modelisation et Simulation Tridimensionnelle des Composants à Semiconducteur de Taille Submicronique ". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, (1999).
- [9] **Kwok K. Ng**, "Physics Of Semiconducteur Devices", Third Edition, A John Wiley & Sons, Inc, Publication, ISBN: 0-471-14323-5, (2007).
- [10] **S. Selberherr**, "Analysis And Simulation Of SemiConductor Devices", New York, Springer-Verlag, (1984).
- [11] **K. Yamaguchi**, "Field-Dependent Mobility Model For Two-Dimensional Numerical Analysis Of MOSFET's", IEEE Trans Electron Devices, Vol. 26, pp. 1068–1074, (1979).
- [12] **C.Lombardi, S. Manzini, A. Saporito, and M. Vanzi**, "A Physically Based Mobility Model For Numerical Simulation Of Non Planar Devices", IEEE Trans Comp-Aided Design, Vol.7, pp. 1154–1171, (1992).
- [13] **D.M. Caughey, and R. E. Thomas**, "Carrier Mobilities In Silicon Empirically Related to Doping And Field", IEEE Proc, vol.55, pp. 2192–2193, (1967).
- [14] **C. Canali, G. Majni, R. Minder, and G. Ottaviani**, "Electron and Hole Drift Velocity Measurements In Silicon And Their Empirical Relation To Electric Field And Temperature", IEEE Transactions on Electron Devices, vol.22, pp. vol.55, pp. 1045 – 1047, (1975).
- [15] **D. L. Schafetter and H. K. Gummel**, "Large-Signal Analysis Of A Silicon Read Diode Oscillator", IEEE Transaction on Electron Devices, vol.16, pp. 64-77, (1969).
- [16] **Dieter K. Schröder**, "Semiconductor Material And Device Characterization", Third Edition, A JOHN WILEY & SONS, INC, Publication, ISBN: 0-471-73906-5, (2006).

Références bibliographiques

[17]. **Bube, R. H.** Photoelectronic Properties of Semiconductors (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).

Références bibliographiques du chapitre 2

[1] **M. N. Sadiku**, “A Simple Introduction To Finite Element Analysis Of Electromagnetic Problems”, IEEE TransEduc, Vol.32, No. 2, pp. 85–93, (1989).

[2] **A. Thom, C. Apelt**, “Field Computations In Engineering And Physics”, London-Van Ostrand, (1961).

[3] **Steven E. Pav**, “Numerical Methods Course Notes”, University of California at. San Diego, (2005).

[4] **A. DeMari**, “An Accurate Numerical Steady State One-Dimensional Solution Of The PN Junction”, Solid-State Electronics, Vol. 11, pp. 33-59, (1968).

[5] **J.W. Slotboom**, “Computer-aided two-dimension alanalysis of bipolar transistors”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 20, pp. 669-679, (1973).

[6] **A. Quarteroni, R. Sacco, and F. Saleri**, “Méthode Numériques”, Deuxième édition, Springer-Verlag press, Italy, Milano, ISBN: 13 978-88-470-0495-5, (2007).

[7] **F. Jedrzejewski**, “Introduction Aux Méthodes Numériques”, Deuxième édition, Springer-Verlag press, France, Paris, ISBN: 978-2-287-25203-7, (2005).

Références bibliographiques du chapitre 3

[1] **K.Tomizawa**, “Numerical Simulation Of SubmicronSemiconductorDevices”, The Artech House Materials Science Library, (1993).

[2] **D. L. Schafetter and H. K. Gummel**, “Large-Signal Analysis Of A Silicon Read Diode Oscillator”, IEEE Transaction on Electron Devices, vol.16, pp. 64-77, (1969).

Résumé

Résumé

Le travail de cette thèse s'est concentré sur l'étude de l'efficacité d'une cellule photovoltaïque à l'aide des méthodes numériques pour résoudre le modèle physique décrivant le mouvement des charges et la distribution de potentiel dans les composants semi-conducteurs.

La programmation de la cellule photovoltaïque a été réalisée à l'aide d'un programme de simulation en deux dimensions. Ce programme est basé sur l'algorithme de Gummel pour la résolution séquentielle d'équations de semi-conducteurs qui est basée sur la méthode des différences finies. Le modèle numérique a été programmé en utilisant le logiciel MATLAB.

La répartition des charges (électrons et trous) à l'intérieur de la cellule photovoltaïque a été calculée et tracée, ainsi que le potentiel électrostatique. A partir de ces résultats, le courant électrique et la puissance de la cellule photovoltaïque ont été calculés pour différentes valeurs du potentiel. A partir de cette dernière, nous avons pu calculer d'autres paramètres de base comme le courant court-circuit et le potentiel circuit ouvert.....

Mots Clés :

Cellule photovoltaïque, Modèle de dérive-diffusion, La méthode de Gummel, La méthode des différences finies.

Abstract

The work of this thesis focused on the study of the efficiency of a photovoltaic cell using numerical methods to solve the physical model describing the movement of charges and the distribution of potential in semiconductor devices.

The programming of the photovoltaic cell was carried out using a two-dimensional simulation. This program is based on Gummel's algorithm for sequential solving of semiconductor equations which is based on the finite difference method. The numerical model was programmed using MATLAB software.

The distribution of charges (electrons and holes) inside the photovoltaic cell was calculated and plotted, as well as the electrostatic potential. From these results, the electric current and the power of the photovoltaic cell were calculated for different values of the potential. From this latter, we were able to calculate other basic parameters such as the short-circuit current and the open-circuit potential.....

Key Words:

Photovoltaic cell, Drift-diffusion model, Gummel's method, Finite differences method.

Résumé

ملخص

تركز العمل في هذه الأطروحة على دراسة الكفاءة لخلية ضوئية ودالك باستعمال طرق رقمية لحل النموذج الفيزيائي الذي يصف حركة الشحنات والتوزيع الكموني في مركبات أنصاف النواقل.

برمجة الخلية الضوئية تمت بواسطة برنامج محاكاة ثنائي الأبعاد. يرتكز هذا البرنامج على خوارزمي Gummel للحل المتتابع للمعادلات الخاصة بأنصاف النواقل التي تمت معالجتها وفقا لطريقة الفروق المنتهية. تمت برمجة النموذج الرقمي بواسطة البرنامج *MATLAB*.

تم حساب ورسم توزيع الشحنات (لإلكترونات والبوزيترونات) داخل الخلية الضوئية وكذلك الكمون الثابت، ومن هاته النتائج تم حساب التيار الكهربائي واستطاعة الخلية الضوئية بدلالة الغير في فرق الكمون وهاته الأخيرة، قمنا بحساب معايير أساسية أخرى مثل التيار الكهربائي في حالة الدارة القصيرة و فرق الكمون الموافق للدارة المفتوحة.....

الكلمات المفتاحية:

خلية الضوئية، نموذج الاشتقاق والانتشار، طريقة *Gummel*، طريقة الفروق المنتهية.