



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° :

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Thème

Modélisation numérique de l'effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire en utilisant la méthode des différences finis

Présenté par :
Oumarou Ibrahima Safiyane

Soutenu le : 30/06/2024

devant le jury composé de :

I. TABET	MCA	Université de Skikda	Président
S. LABIOD	MCA	Université de Skikda	Rapporteur
	MRA		Co- Rapporteur
M.CHELIREM	MAB	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Mes sincères et profonds remerciements vont à Monsieur « Samir Labiod » mon encadrant, que je remercie pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de m'encadrer avec un intérêt constant et une grande compétence ainsi pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

Mes respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur mon travail et d'avoir accepté de l'évaluer.

Au terme de ce modeste travail je tiens à remercier chaleureusement mes parents et les autres membres de ma famille de m'avoir énormément encouragé et soutenu dans ma carrière d'étude depuis le début jusqu'au jour d'aujourd'hui.

Enfin je remercie toute personne ayant participé de loin ou de près pour l'aboutissement de ce modeste travail je prie Dieu, de leurs accorder longue vie et bonne santé.

Dédicace

*Louange à ALLAH qui nous a dotés de la merveilleuse faculté de raisonnement.
Louange à notre Créateur qui nous a incités à acquérir le savoir.*

Je voudrais dédier cet humble travail à mes chers parents, vous avez veillé sur moi depuis ma naissance jusqu'à ce que je suis, vous m'avez assuré une vie digne.

Aujourd'hui, vient mon tour pour vous remercier en vous offrant ce travail qui est le fruit de vos sacrifices, à mes frères et sœurs et à tous les membres de notre famille.

Enfin je dédie également ce travail à mes amis et à l'ensemble de mes enseignants depuis l'école primaire jusqu'à ce niveau, je suis reconnaissant pour tout ce que j'ai appris grâce à eux.

Résumé

Dans les années à venir, l'électricité photovoltaïque jouera un rôle très croissant dans les apports énergétiques (domestiques, industriels, transport et spéciaux). La technologie la plus couramment employée dans ce domaine est celle des cellules solaires photovoltaïques à base de silicium (semi-conducteur). Toutefois, les résultats actuels de ces cellules sont encore en dessous des attentes et l'absorption d'une grande partie du spectre lumineux est difficile.

Ceci est la raison pour laquelle l'industrie de l'énergie solaire s'efforce d'augmenter le rapport coût-performance des cellules solaires grâce à des investissements importants et à des recherches approfondies.

En effet un système photovoltaïque n'est concurrentiel lorsque la demande est importante, alors pour cela une modélisation numérique est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec le moindre coût.

Ce travail porte les détails sur la modélisation numérique d'une cellule solaire photovoltaïque dont la technologie est du type silicium poly-cristallin, cette cellule est un choix arbitraire. Pour effectuer cette modélisation nous sommes partis sur un circuit équivalent comportant une seule diode, l'identification des paramètres caractéristiques de la cellule nécessite préalablement la détermination du courant prédit par le modèle considéré.

Celle-ci peut être assurée via la résolution d'un système d'équations non linéaires, c'est pourquoi nous avons choisi d'étudier le modèle de dérive-diffusion auquel nous avons appliqué la méthode de différences finies qui est une méthode très utilisée dans la résolution des équations aux dérivées partielles.

En programmant les systèmes matriciels obtenus issus de la résolution de ces équations dans MATLAB, nous avons pu représenter non seulement les courbes de la distribution du potentiel électrostatique et de la concentration des porteurs mais aussi la courbe de la caractéristique courant-tension à partir de laquelle nous avons déterminé les caractéristiques électriques de la cellule. Grâce à ces caractéristiques et via la résolution du système I.1 par la méthode de Newton-Raphson, nous avons pu obtenir les 5 paramètres inconnus.

Mots clés :

Cellule photovoltaïque, modélisation numérique, méthode des différences finies, modèle de dérive-diffusion.

Abstract

Photovoltaic electricity will constitute an exponentially major component of energy supplies (domestic, industrial, transport and special) in the years to come. Silicon-based photovoltaic solar cells represent the most used technology in this area. However, the current performance of these cells is still lower than expected, and it is difficult to absorb a large part of the light spectrum.

This is the reason why the solar energy industry is striving to increase the cost-performance ratio of solar cells through significant investment and extensive research.

In fact, a photovoltaic system is only competitive when demand is high, so digital modeling is necessary to make the best, most efficient choice with the lowest cost.

This work covers the details of the digital modeling of a photovoltaic solar cell whose technology is of the poly-crystalline silicon type, this cell is an arbitrary choice. To carry out this modeling we started with an equivalent circuit comprising a single diode, the identification of the characteristic parameters of the cell requires first determining the current predicted by the model considered.

This can be ensured via the resolution of a system of nonlinear equations, which is why we chose to study the drift-diffusion model to which we applied the finite difference method which is a widely used method. In solving partial differential equations.

By programming the matrix systems obtained from the resolution of these equations in MATLAB, we were able to represent not only the curves of the distribution of the electrostatic potential and the concentration of the carriers but also the curve of the current-voltage characteristic from which we determined the electrical characteristics of the cell. Thanks to these characteristics and via the resolution of system I.1 by the Newton-Raphson method, we were able to obtain the 5 unknown parameters.

Key words :

Photovoltaic cell, numerical modeling, finite difference method, drift-diffusion model.

ملخص

ستشكل الكهرباء الفوتوفلطية مكوناً رئيسياً متزايداً في إمدادات الطاقة (المنزلية، الصناعية، النقل والخاصة) في السنوات القادمة. تمثل الخلايا الشمسية الفوتوفلطية القائمة على السيليكون التكنولوجيا الأكثر استخداماً في هذا المجال. ومع ذلك، فإن الأداء الحالي لهذه الخلايا لا يزال أقل من المتوقع، ومن الصعب امتصاص جزء كبير من طيف الضوء. لهذا السبب تسعى صناعة الطاقة الشمسية إلى زيادة نسبة الأداء إلى التكلفة للخلايا الشمسية من خلال استثمارات كبيرة وأبحاث مكثفة. في الواقع، يكون النظام الفوتوفلطائي تنافسياً فقط عندما يكون الطلب عاليًا، لذا فإن النمذجة الرقمية ضرورية لاختيار الخيار الأفضل والأكثر كفاءة بأقل تكلفة. يغطي هذا العمل تفاصيل النمذجة الرقمية لخلية شمسية فوتوفلطية من نوع السيليكون متعدد الكريستالات، وهذه الخلية هي اختيار عشوائي. لتنفيذ هذه النمذجة بدأنا بدائرة مكافئة تضم ديودًا واحدًا، يتطلب تحديد الخصائص المميزة للخلية أولاً تحديد التيار المتوقع بواسطة النموذج المدروس. يمكن ضمان ذلك عبر حل نظام من المعادلات غير الخطية، ولهذا السبب اخترنا دراسة نموذج الانجراف-الانتشار والذي طبقنا عليه طريقة الفروق المحدودة، وهي طريقة مستخدمة على نطاق واسع في حل المعادلات التفاضلية الجزئية. من خلال برمجة الأنظمة المصفوفية الناتجة من حل هذه المعادلات في MATLAB، تمكنا من تمثيل ليس فقط منحنيات توزيع الجهد الكهروستاتيكي وتركيز حاملات ولكن أيضًا منحنى الخصائص الحالية-الفولتية الذي منه حددنا الخصائص الكهربائية للخلية. بفضل هذه الخصائص وعبر حل النظام I.1 بطريقة نيوتن-رافسون، تمكنا من الحصول على الخمسة معالم المجهولة.

الكلمات المفتاحية:

خلية فوتوفلطية، نمذجة رقمية، طريقة الفروق المحدودة، نموذج الانجراف-الانتشار.

SOMMAIRE

Table des matières

1.Introduction générale.....	1
Chapitre. I	
Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque	
I.1.Introduction.....	2
I.2.L'effet photovoltaïque.....	2
I.2.1.Définition et Historique.....	2
I.3.Le rayonnement solaire.....	3
I.3.1.Rayonnement direct.....	3
I.3.2.Rayonnement diffus.....	3
I.3.3.Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	3
I.3.4.Le rayonnement global.....	4
I.4.Le spectre du rayonnement solaire.....	4
I.5.Dualité de la lumière.....	5
I.6.Cellule solaire photovoltaïque.....	6
I.6.1.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.6.2.Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	7
I.6.3.Paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque.....	7
I.6.3.1.Courant de court-circuit I_{sc}	7
I.6.3.2.Tension de circuit ouvert V_{oc}	8
I.6.3.3.Puissance maximale.....	8
I.6.3.4.Le facteur de forme.....	8
I.6.3.5.Rendement de conversion η	9
I.6.4.Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.6.4.1.Circuit électrique équivalent.....	9
I.6.4.2.Points significatifs sur les courbes I-V et P-V.....	10
I.6.4.3. Les équations des paramètres du circuit équivalent considéré.....	11
I.7.Conclusion.....	13
Chapitre. II	
Développement d'un modèle numérique	
II.1.Introduction.....	14
II.2.Modèle de dérive-diffusion.....	14

II.2.1.Système d'équations des semi-conducteurs.....	14
II.2.2.Modèles physiques considérés.....	16
II.2.2.1.La densité de charge.....	16
II.2.2.2.Les mobilités.....	17
II.2.2.3.Génération-Recombinaison.....	17
II.2.3.Résolution des problèmes aux dérivées partielles.....	17
II.2.3.1.La méthode des différences finies.....	18
II.2.3.2.Principe de la méthode des différences finies.....	18
II.2.4.Normalisation du modèle dérive-diffusion.....	19
II.2.4.1.Normalisation de l'équation de Poisson.....	20
II.2.5.développement numérique des équations de continuités.....	22
II.2.6.Conditions aux limites.....	25
II.2.7.Organigramme pour le solveur du modèle dérive-diffusion en 1D.....	25
II.3.Conclusion.....	27

Chapitre. III

Simulation et Résultats

III.1.Introduction.....	28
III.2.Simulation d'une cellule photovoltaïque.....	28
III.2.1. Définition du domaine de calcul.....	28
III.2.2.Elaboration du maillage.....	28
III.3.Résultats de la simulation numérique.....	29
III.3.1.Résultats de la solution initiale.....	29
III.3.2.Résultats de la solution finale.....	30
III.3.3.Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	31
III.3.3.1.Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	32
III.3.3.2.Effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	32
III.3.4.Effet de la température sur la concentration de porteurs de charges.....	33
III.4 Les caractéristiques électriques de la cellule.....	34
III.5. Résultats de la résolution du système paramétrique.....	34
III.5.1 Les courbes caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$	34
III.5.2. Influence de la température sur les courbes caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$	35
III.6. Conclusion.....	36
2.Conclusion générale.....	37
3.Références bibliographiques.....	38

Liste des tableaux

Tableau (I.1): Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.....	6
Tableau (I.2): différentes technologies des cellules solaire photovoltaïque.....	7
Tableau I.3: Paramètres du modèle et points significatifs de la cellule photovoltaïque A à 25°C...	10
Tableau (II.1) : Tableau des paramètres de la mobilité.....	17
Tableau (II.2) : Tableau de normalisation des constants.....	19
Tableau (III.1) : les caractéristiques électriques de la cellule.....	34
Tableau (III.2) : les paramètres de la cellule.....	34

Liste des figures

Figure (I.1): l'effet photovoltaïque.....	3
Figure (I.2): Les types de rayonnement solaire reçus au sol.....	4
Figure (I.3): Spectre du rayonnement solaire en haute atmosphère.....	4
Figure (I.4): Absorption et réflexion du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	5
Figure (I.5): Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	7
Figure (I.6): Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure (I-7): Notion de facteur de forme (FF) pour une cellule photoélectrique.....	9
Figure (I.8): Modèle de circuit équivalent à diode unique solaire.....	10
Figure (I.9): Characteristics of an arbitrary PV cell.....	11
Figure (II.1) : Evaluation d'une dérivée.....	18
Figure (III.1) : Schéma d'une structure de la jonction P-N d'une cellule photovoltaïque.....	28
Figure (III.2) : maillage 1D.....	29
Figure (III.3) : Distribution du potentiel électrostatique.....	30
Figure (III.4) : Concentrations des porteurs des charges en fonction de la position.....	30
Figure (III.5) : La courbe de la caractéristique courant-tension, $I(V)$	31
Figure (III.6) : La courbe de la caractéristique puissance-tension, $p(V)$	31
Figure (III.7) : Influence de la température sur la courbe $I=f(V)$	32
Figure (III.8) : Influence de la température sur la courbe $P=f(V)$	32
Figure (III.9) : effet de la température sur la concentration des électrons.....	33
Figure (III.10) : effet de la température sur la concentration des trous.....	33
Figure (III.11) : Influence de la température sur la courbe $I=f(V)$	35
Figure (III.12) : Influence de la température sur la courbe $P=f(V)$	35

Figure (III.13) : *Effet de température sur la courbe caractéristique courant-tension, $I(V)$36*

Figure (III.14) : *Effet de température sur la courbe caractéristique puissance-tension, $p(V)$36*

Nomenclature

V : Est le potentiel électrostatique (V).

\tilde{E} : Energie d'un photon (eV).

E : Champ électrique (V/cm).

h : Constante de Planck (J. s).

c : Vitesse de la lumière dans le vide (m.s-1).

ν : Fréquence (s-1).

λ : Longueur d'onde (μm).

V_{oc} : La tension de circuit ouvert (volte).

T : La température (K).

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

q : Charge électrique (en coulomb).

I_0 : Courant inverse de saturation de la diode (mA).

I_{ph} : Courant photonique (A).

P_{mpp} : Puissance maximale (watt)

I_{mpp} : Courant au point maximal (mA).

V_{mpp} : Tension au point maximal (V).

I_{sc} : Courant de court-circuit (mA).

FF : Facteur de forme (sans unité)

η : Rendement de conversion (%).

P_l : Puissance lumineuse (watt)

I : Courant de la cellule (ampère)

I_D : Courant de la diode (mA).

u_T : La tension thermique (V).

I_p : Est le courant qui traverse la résistance R_p (A).

R_s : Résistance série (Ω).

R_p : Résistance parallèle (Ω).

n : Facteur d'idéalité de la diode.

ρ : Est la densité volumique des charges (At/cm^3).

ϵ : Est la permittivité diélectrique du matériau (F/cm).

J_n : Est la densité de courant des électrons (A/cm^2).

μ_n : Est la mobilité des électrons ($cm^2/V/s$).

μ_p : La mobilité des trous ($cm^2/V/S$).

n : Est la densité d'électrons ($At./cm^3$).

p : La densité de trous ($At./cm^3$).

D_n : Est le coefficient de diffusion des électrons (cm^2/s).

D_p : Le coefficient de diffusion des trous (cm^2/s).

ND : Concentration des atomes donneurs (At/cm^3).

NA : Concentration des atomes accepteurs (At/cm^3).

Ct : Représente une constante due aux centres recombinants (cm^3/s).

G_n et G_p : Sont les taux de génération des électrons et des trous, respectivement ($At/cm^3/s$).

R_n et R_p : Sont les taux de recombinaison des électrons et des trous, respectivement ($At/cm^3/s$).

μ_{n0} et μ_{p0} : Sont les mobilités des électrons et des trous à l'équilibre thermodynamique (cm^2/Vs).

V_{satN} et V_{satP} : sont des vitesses de saturation des électrons et des trous (cm/s).

n_{in} : représente la concentration intrinsèque (At/cm^3).

τ_n et τ_p : sont les durées de vie des électrons et des trous respectivement (s).

L_D : Longueur de diffusion (m).

r_{SRH} : Génération recombinaison due aux interfaces ($At/cm^3/s$).

Introduction générale

1. Introduction générale

Aujourd'hui, l'énergie joue un rôle très crucial dans notre mode de vie contemporain, elle est employée pour alimenter nos foyers, nos transports, nos industries et nos avancées technologiques. À l'échelle mondiale, les principales sources d'énergie sont les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz), l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Chacune de ces types d'énergies possède des particularités propres en ce qui concerne sa disponibilité, ses coûts, son impact sur l'environnement et sa durabilité.

Tandis que les énergies fossiles sont couramment employées mais jouent un rôle important dans le changement climatique de notre planète, le nucléaire représente une source d'énergie à faible émission de carbone, mais soulève des inquiétudes quant à sa sécurité. Les énergies renouvelables, de leur côté, proposent une solution durable et respectueuse de l'environnement.

Le mix énergétique mondial accorde de plus en plus d'importance aux énergies renouvelables. Ces énergies proviennent de sources naturelles comme le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie. Par exemple, l'énergie solaire est transformée en électricité grâce à des panneaux solaires, tandis que l'énergie éolienne est prélevée grâce à des turbines éoliennes. Les énergies renouvelables présentent de multiples bénéfices, tels que la diminution des émissions de gaz à effet de serre, la durabilité à long terme et la variété des sources d'énergie disponibles. Toutefois, leur disponibilité peut varier et dépendre des conditions météorologiques, ce qui demande des systèmes de stockage d'énergie afin de garantir une alimentation constante.

Le rayonnement solaire est la ressource énergétique la plus répandue et la plus abondante sur Terre. En une heure, la quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la Terre pourrait couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le rayonnement solaire peut être exploité pour produire de la chaleur directement ou de l'électricité à l'aide de cellules solaires (effet photovoltaïque). Actuellement, des recherches sont menées pour optimiser le rendement énergétique et le coût des cellules solaires, en réduisant leur poids et leur prix tout en augmentant leur surface et leur flexibilité. C'est ainsi que les cellules solaires en couches minces ont été développées.

Le travail présenté dans ce mémoire est porté sur la modélisation numérique de l'effet de la température sur une cellule solaire photovoltaïque, ce travail est constitué de trois chapitres pour se faire nous allons les présenter de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous commençons par décrire brièvement l'énergie photovoltaïque, le principe de la conversion photovoltaïque, le schéma électrique descriptif pratique, et ainsi que les différentes technologies les plus disponibles de cellules solaires photovoltaïques.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous présenterons les diverses formulations mathématiques nécessaires à l'analyse des phénomènes de transport dans les matériaux semi-conducteurs et puis nous essayons de développer un modèle mathématique qui permettra de décrire la relation entre le rayonnement solaire et la génération des paires électrons-trous. Ce modèle s'appuiera sur les équations de dérive-diffusion auxquelles nous appliquerons la méthode des différences finies pour leur résolution.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation en utilisant l'environnement MATLAB et aux résultats portés sur tout ce qui est évoqué dans les deux chapitres précédents de ce travail.

Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale qui synthétise tous les résultats trouvés.

Chapitre I :
Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

I.1. Introduction

L'énergie issue du rayonnement solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies qui sont : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique.

D'abord conçue ou développée pour des applications autonomes, telles que les satellites de télécommunication ou les habitations isolées, l'énergie solaire photovoltaïque est maintenant intégrée au réseau public de distribution d'électricité ou aussi utilisée dans des nombreuses applications des différentes puissances, telles que les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courants.

En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté, plus récemment avec l'émergence des installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiation et la température, de ce fait il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public.

Ce chapitre est consacré à des notions générales sur l'énergie solaire photovoltaïque, à savoir le rayonnement solaire et ses spectres, l'effet photovoltaïque, les cellules solaires photovoltaïques avec leur mode de fonctionnement et leurs paramètres caractéristiques et ainsi les différentes technologies existentielles les plus répandues. Le schéma électrique équivalent et ainsi les relations nécessaires permettant la modélisation d'une cellule photovoltaïque seront aussi évoqués dans cette partie.

I.2. L'effet photovoltaïque

I.2.1. Définition et Historique

Le terme « photovoltaïque » (PV) est formé de deux mots ; « Photo » qui symbolise la lumière et « Voltaïque », qui tire son origine au nom du physicien italien Alessandro Volta inventeur de la première batterie électrochimique, qui signifie électricité. Donc la conversion photovoltaïque consiste à la transformation directe de la lumière en électricité, en se servant d'une cellule photovoltaïque. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil.

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Il disposait dans un récipient contenant un électrolyte deux électrodes enrobées de platine et a mesuré un courant qui circulait entre elles. Ensuite, il a observé que l'intensité du courant a varié à l'exposition à la lumière. En 1883, Charles Fritts, inventeur américain, fabrique un petit module de cellules de sélénium en les recouvrant d'une électrode d'or très fine. Cependant, ce n'est qu'en 1887 que le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz a mis au jour l'effet photovoltaïque. Albert Einstein décrivit la théorie de cet effet en 1904, ce qui en fit le premier physicien à expliquer le principe photovoltaïque (prix Nobel de physique en 1921).

En 1955, les chercheurs américains Chapin, Fuller, Pearson et Prince, travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (actuellement : Alcatel-Lucent Bell Labs), ont pu développer une cellule

photovoltaïque avec un rendement de 7 %. Par la suite, les Américains lancent en 1959 le satellite Van Guard totalement alimenté par des piles photovoltaïques qui ont un rendement de 9%.

Les exploitations domestiques des cellules solaires ont vu le jour, en 1973, par la première maison avec une installation photovoltaïque à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique, et en 1983 (en Australie), par la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque et capable de faire parcourir 4000 kilomètres. Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 25%.

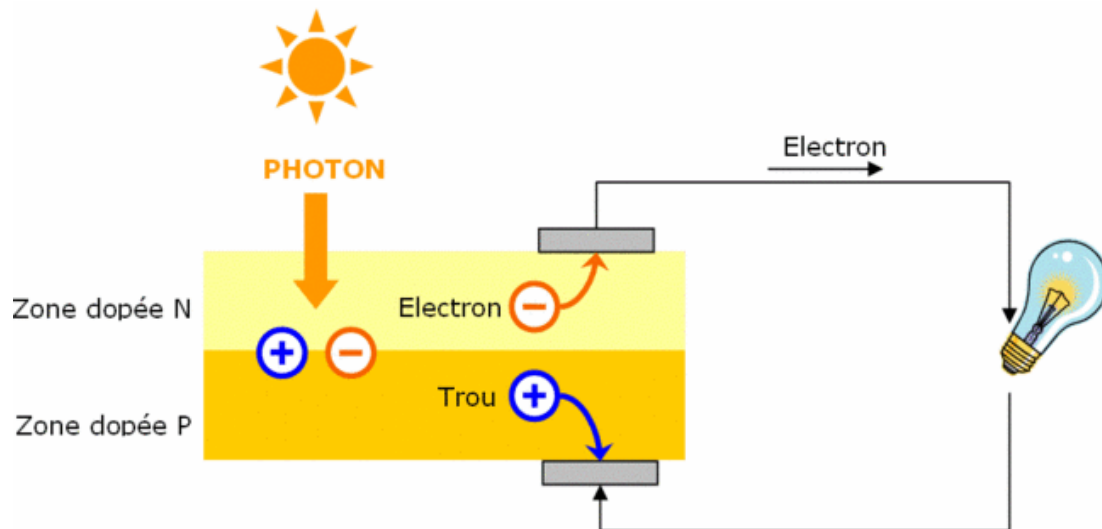


Figure (I.1): l'effet photovoltaïque

I.3. Le rayonnement solaire

Le Soleil émet un rayonnement constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient à atteindre en permanence la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température de surface du Soleil (environ 5 800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme des longueurs d'ondes de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et du proche infrarouge (de 0,75 à plus de 0,75 μm et jusqu'à environ 4 μm).

Afin d'estimer l'énergie produite ou développée par un générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur le sol. En effet, il existe quatre types de rayonnement solaire qui sont :

I.3.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil et constitue un flux lumineux uniforme, parallèle les uns aux autres et ayant une puissance incidente de I (W/m^2). Il s'agit d'un flux de photons qui n'a pas interagi avec les composants atmosphériques et conserve une direction commune et une énergie qui lui sont propres.

I.3.2. Rayonnement diffus

Parmi les particules de lumière qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse D (W/m^2) provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer.

I.3.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

I.3.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous, il est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre. La figure (I.1) représente le rayonnement solaire et les différents changements qu'ils subissent depuis l'espace jusqu'à la surface terrestre.

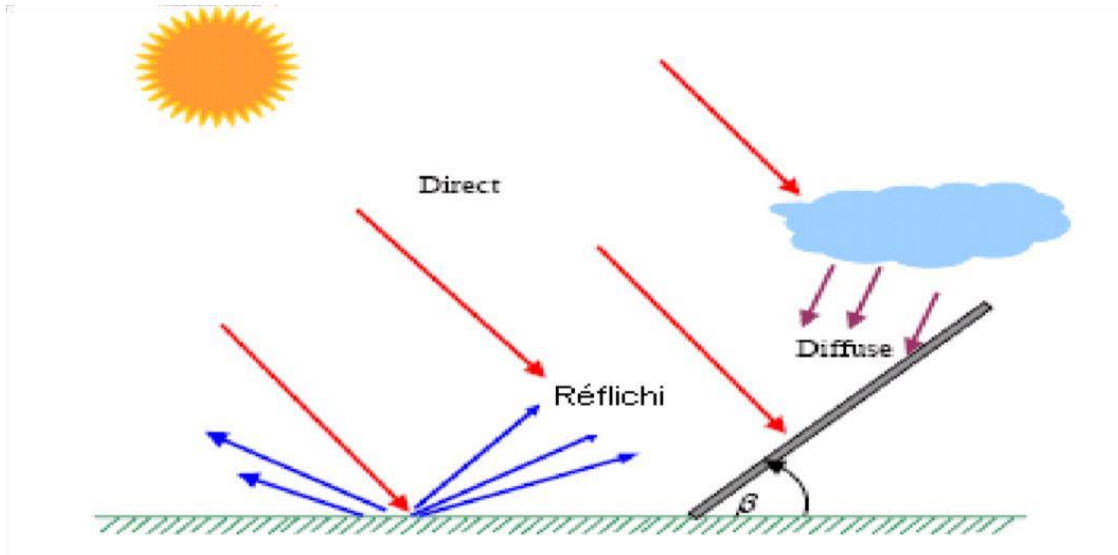


Figure (I.2): Les types de rayonnement solaire reçus au sol

I.4. Le spectre du rayonnement solaire

L'énergie solaire se présente sous la forme d'un rayonnement qui comprend les longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet à l'infrarouge, avec une concentration maximale autour de 550 nm, ce qui correspond à une teinte jaune-verte. Le spectre de ce rayonnement varie en fonction de l'espace et de la surface du sol. En général, on distingue un spectre continu qui ressemble à celui d'un corps noir à environ 6000°K et ainsi qu'un spectre réel d'émission du soleil.

La figure ci-dessous représente la courbe du spectre de la radiation solaire en fonction de longueur d'onde en haute atmosphère. D'après cette figure, on peut remarquer que 7 % de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 46 % correspond au domaine du visible et 47 % pour les infrarouges.

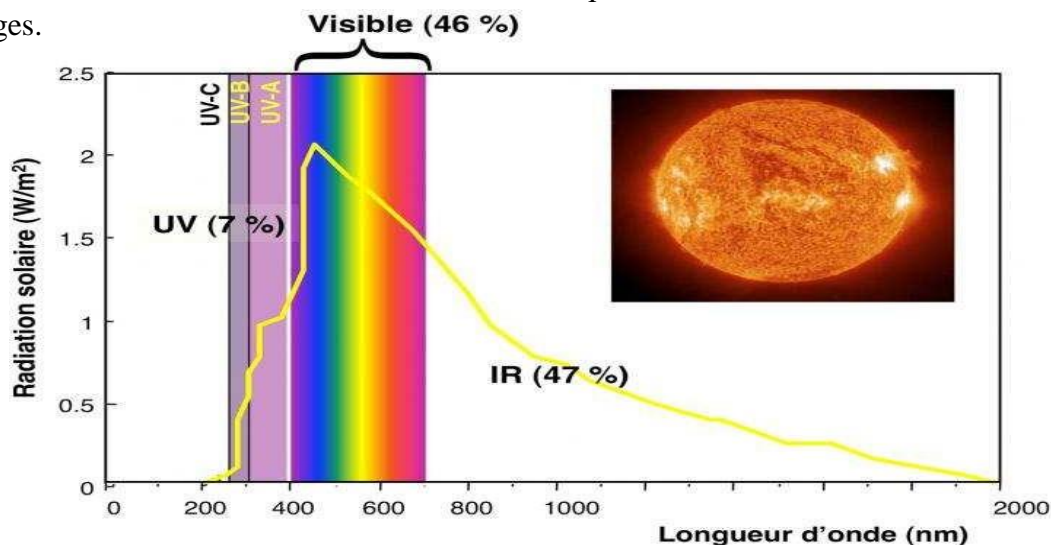


Figure (I.3): Spectre du rayonnement solaire en haute atmosphère

Le spectre du rayonnement solaire parvenant au niveau de la mer se diffère quelque peu, car les constituants de l'atmosphère absorbent sélectivement dans certaines bandes de longueurs d'onde.

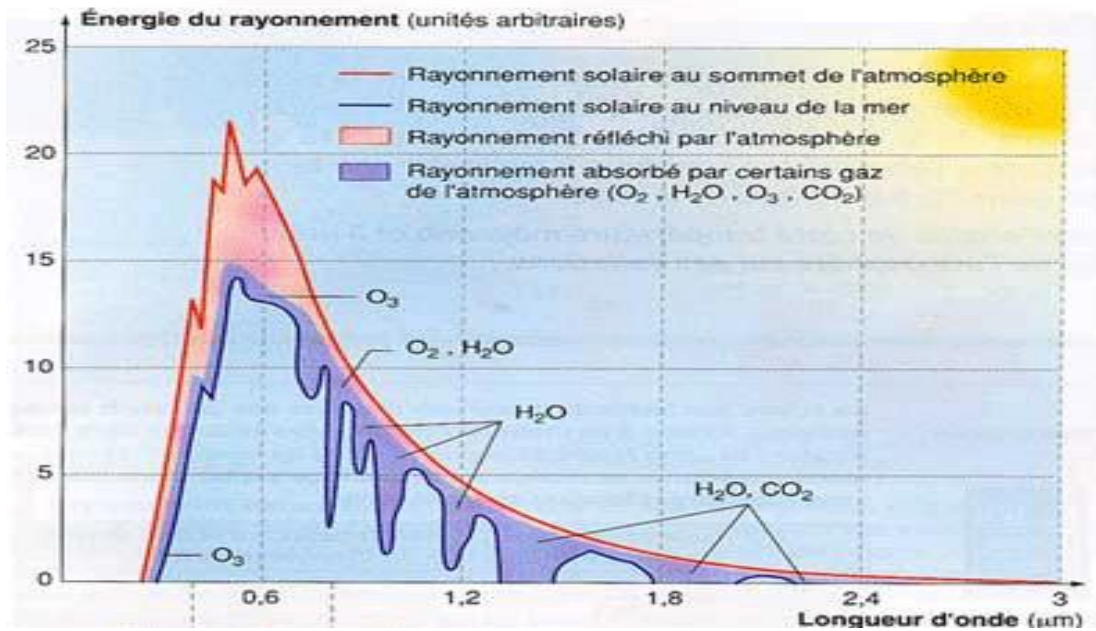


Figure (I.4): Absorption et réflexion du rayonnement solaire par l'atmosphère

L'image ci-dessus montre le spectre du rayonnement solaire au niveau de la mer, et on constate que ce rayonnement peut être réfléchi, diffusé ou absorbé par l'atmosphère et ses composants (notamment l'oxygène, l'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone,). Pour tenir compte de ces différences et enfin de comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, nous introduisons un coefficient appelé masse d'air (AMX), dont l'expression est : $x=1/\sin\theta$, où θ est l'angle formé par le soleil à son zénith.

La puissance reçue hors atmosphère est en moyenne de 1350 W/m² (plus précisément 1366 W/m², variant entre 1320 et 1410 W/m²) et est orientée perpendiculairement au rayonnement. Il convient de noter AM0 (pour "qualité de l'air 0"). Après passage dans l'atmosphère, cette puissance est réduite et une nouvelle référence est définie comme :

AM1 (épaisseur normalisée de l'atmosphère traversée par le rayonnement à l'équateur), AM1.5 et AM2 (le rayonnement traverse 1,5 ou 2 fois l'épaisseur de l'atmosphère). La puissance standard AM1.5 (soit 1000 W/m²) est la référence pour les calculs d'énergie du sol.

I.5. Dualité de la lumière

On peut envisager la lumière en tant qu'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou en tant que photons, des corpuscules dont l'énergie \ddot{E} est liée à λ par la relation suivante :

$$\ddot{E} = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \tag{I.1}$$

Avec :

h : constante de Planck (j. s).

c : vitesse de la lumière dans le vide (m.s⁻¹).

ν : Fréquence (s⁻¹).

λ : Longueur d'onde (μm)

Il est crucial de comprendre la dualité ou la double nature de la lumière (onde/corpuscule) afin de saisir les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Le rayonnement solaire à la surface de la Terre a des longueurs d'ondes allant de 0,2 μm (ultra-violet) à 4 μm (infra-rouge), avec un maximum d'énergie pour 0,5 μm . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2 μm et 2,5 μm . De 0,4 μm à 0,78 μm , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau (I-1) nous donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

λ (μm)	\dot{E} (ev)	Zone
0,2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau (I.1): Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

I.6. Cellule solaire photovoltaïque

On appelle cellule solaire photovoltaïque un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, la photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

I.6.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif composé d'un matériau semi-conducteur extrinsèque qui capte l'énergie lumineuse en la transformant directement en un courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs.

Ainsi le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains des leurs électrons susceptibles d'être libérés par leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC).

La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fém.) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

La figure (1.5) illustre la constitution d'une cellule solaire photovoltaïque en silicium et ainsi le principe de la conversion photovoltaïque.

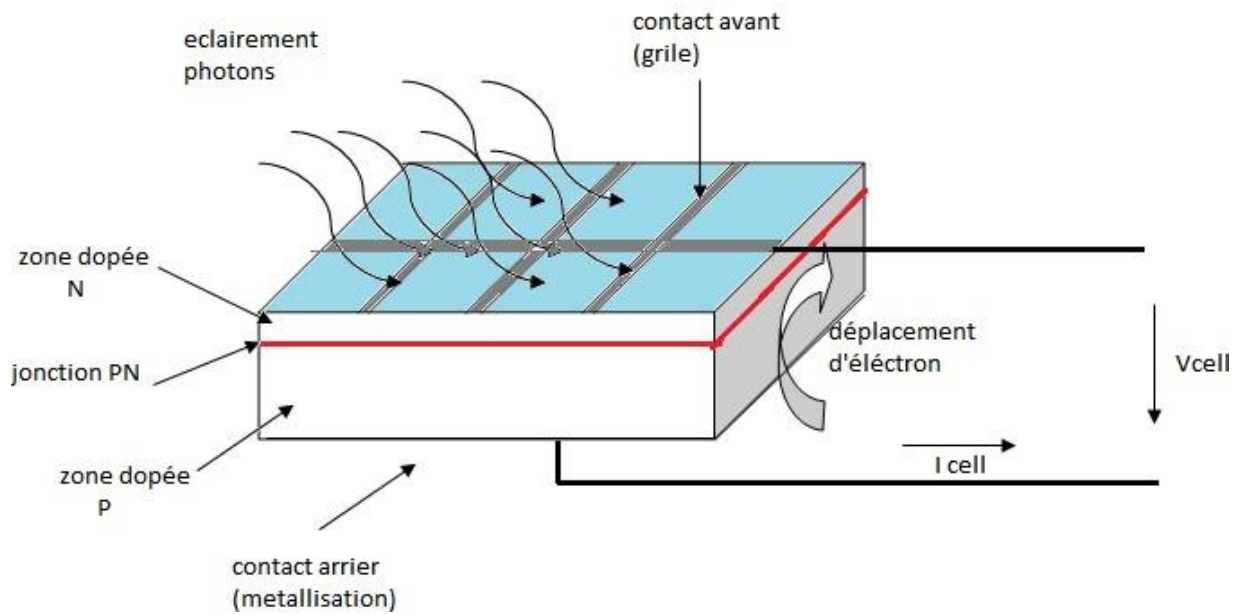


Figure (I.5): Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

I.6.2. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Les photopiles au silicium cristallin sont les plus répandues. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudos carrés. Si l'on parle de matériaux cristallins, c'est parce que le silicium a les propriétés d'un cristal, avec un arrangement parfait des atomes. On distingue trois grandes filières technologiques des cellules solaire au silicium cristallin qui sont: les cellules au silicium poly-cristallins, mono-cristallins et amorphes, le tableau (I.2) présente un récapitulatif de ces trois filières technologiques.

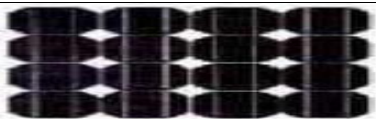
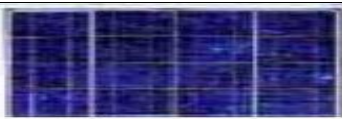
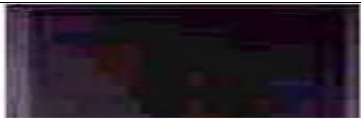
Silicium mono-cristallin	Silicium poly-cristallin	Silicium amorphe
 <p>Pendant le refroidissement, la quantité du silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension, on découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donnent les cellules. Le rendement de conversion du silicium monocristallin est le plus élevé il est compris entre 12 et 20 % pour les industries mais avec un coût plus élevé.</p>	 <p>Le silicium poly-cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée, cette technologie représente à elle seule 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur à celui du silicium mono cristallin (10 à 14%) mais avec un coût faible.</p>	 <p>La technologie au silicium amorphe présente un faible rendement (6 à 9%), mais ne nécessitent que des très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût très peu élevé sur le marché. Cette technologie est aussi utilisée couramment dans les petits produits tels que les calculatrices solaires ou encore les montres.</p>

Tableau (I.2): différentes technologies des cellules solaire photovoltaïque

I.6.3. Paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par un certains nombres des paramètres qui sont :

I.6.3.1. Courant de court-circuit I_{sc}

Ce courant est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, la longueur d'onde ainsi que la température.

I.6.3.2. Tension de circuit ouvert V_{oc}

On obtient la tension de circuit ouvert (V_{oc}) lorsque le courant à travers la cellule est nul, cette tension dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle est surtout affectée par la variation de la température et de l'intensité lumineuse, son expression est donné par:

$$V_{oc} = \frac{K T}{q} \text{Log}\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \tag{I.2}$$

Avec :

V_{oc} : La tension de circuit ouvert

T : La température

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

q : Charge électrique (d'électron) (en coulomb)

I_0 : Courant inverse de saturation de la diode

I_{ph} : Courant photonique

I.6.3.3. Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur, par une cellule solaire photovoltaïque éclairée dépend directement de la résistance de charge. Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement de la caractéristique courant-tension P_{mpp} tel que :

$$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \tag{I.3}$$

Où V_{mpp} représente la tension correspondant à la puissance maximale fournie et I_m le courant correspondant à la puissance maximale fournie (voir figure I.9).

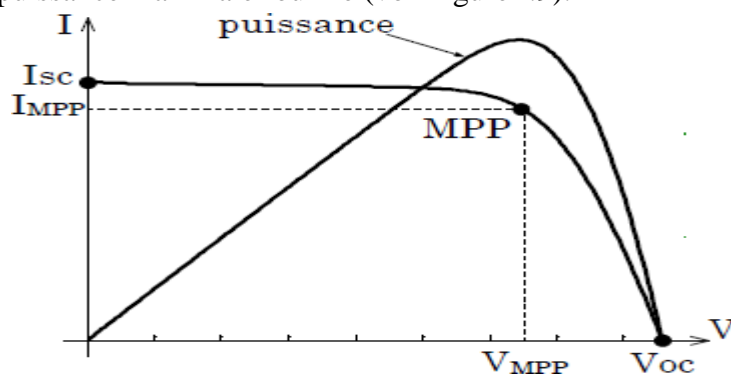


Figure (I.6): Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.

I.6.3.4. Le facteur de forme

La qualité d'une cellule ou d'un générateur PV est souvent évaluée en utilisant un paramètre clé à partir de la caractéristique I(V) : c'est le facteur de forme (facteur de remplissage) ou fill factor (FF), comme le montre la Figure (I-7). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{mpp} , et la puissance formée par le rectangle $I_{sc} * V_{oc}$, plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

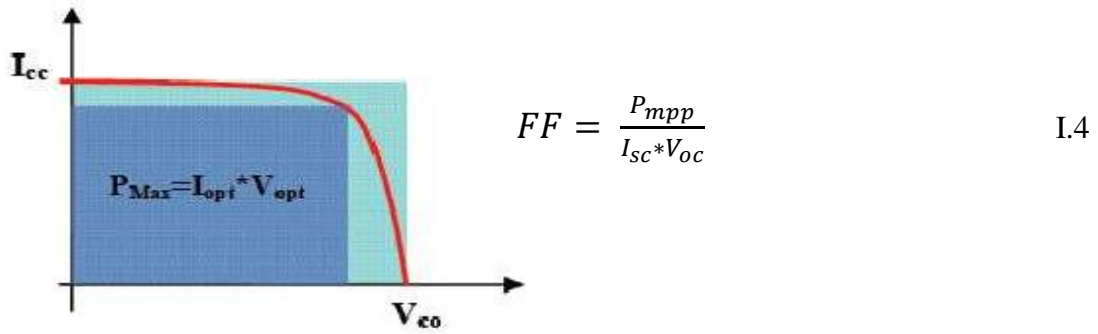


Figure (I-7): Notion de facteur de forme (FF) pour une cellule photoélectrique

I.6.3.5. Rendement de conversion, η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire photovoltaïque est le rapport entre la puissance maximale pouvant être extraite et la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_l} \tag{I.5}$$

Avec :

P_l : La puissance lumineuse du rayonnement incident

I.6.4. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

Cet article s'intéresse principalement aux cellules photovoltaïques dont la technologie est basée sur le silicium poly-cristallin, d'autres technologies telles que cellules solaires à couche mince ou les cellules organiques ne sont pas prises en compte.

I.6.4.1. Circuit électrique équivalent

Le modèle mathématique utilisé dans cet article est le modèle à une diode. La figure (I.8) montre un circuit équivalent constitué d'une source de courant, d'une diode et de deux résistances. L'intensité de la source est proportionnelle à la lumière incidente, la diode simule la capacité d'absorption du rayonnement solaire par le semi-conducteur, la résistance parallèle R_p modélise le courant de fuite tandis que la résistance série R_s représente les pertes internes dues au passage du courant et aux fils de connexion. Le courant produit par la cellule photovoltaïque peut être déterminé directement à partir de la figure (I.8) par l'équation ci-dessous.

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \tag{I.6}$$

Où I_{ph} est la composante du courant cellulaire photonique, I_D est déterminé à l'aide de l'équation de la diode de Shockley et I_p est le courant qui traverse R_p . En remplaçant les deux derniers termes par leurs valeurs correspondantes, l'équation du modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque est obtenue comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nu_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \tag{I.7}$$

Où V est la tension aux bornes, I_0 est le courant de saturation inverse de la diode, n est la constante d'idéalité de cette même diode, $u_T = \frac{KT}{q}$ est le voltage de la jonction.

De l'équation (I.7), en utilisant la condition de court-circuit ($I=I_{sc}$, $V=0$) l'équation résultante est :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{n u_T}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_p} \tag{I.8}$$

Lorsque I_{ph} , I_0 , n , u_t et R_p restent fixent, sous cette hypothèse, il est claire que R_s affecte le courant de court-circuit, mais par contre cette résistance dite serie (R_s) n'affecte pas la tension en circuit ouvert.

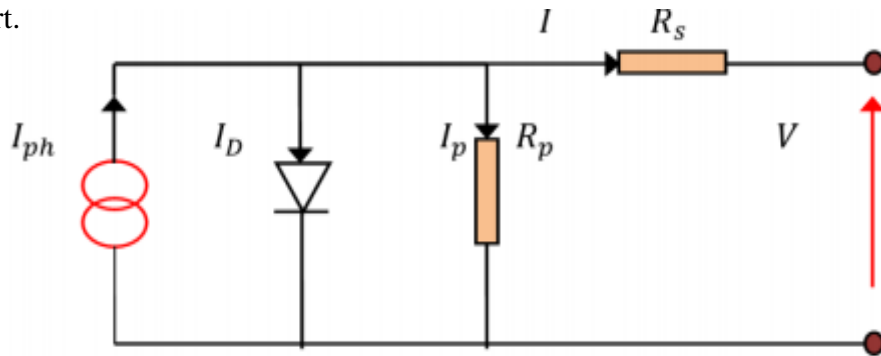


Figure (I.8): Modèle de circuit équivalent à diode unique solaire

I.6.4.2. Points significatifs sur les courbes I-V et P-V

Considérons les paramètres d'une cellule photovoltaïque arbitraire(A) obtenus à une température fixe de 298,15 K (25 °C), avec des valeurs idéales des deux résistances indiquées dans le tableau I.3. Ses caractéristiques I-V et P-V sont indiquées sur la figure I.9 où cinq points significatifs peuvent être visualisés.

I_{sc} : Est le courant de court-circuit produit lorsque la tension aux bornes est nulle.

V_{oc} : Est la tension en circuit ouvert produite lorsque le courant circulant à travers la charge est nul.

MPP : Est le point de puissance maximale produit lorsque $V*I$ atteint leur maximum.

I_{mpp} : C'est le courant généré au point de fonctionnement maximal.

V_{mpp} : Est la tension au point de fonctionnement maximal.

Tableau I.3: Paramètres du modèle et points significatifs de la cellule photovoltaïque A à 25°C

Paramètres	valeurs	points	valeurs
I_{ph}	5 A	I_{sc}	5 A
R_s	0 Ω	V_{oc}	0,5152 V
R_p	1000 Ω	MPP	1,9826 W
I_0	10^{-6} A	I_{mpp}	4,6364 A
n	1,3	V_{mpp}	0,4276 V

La figure I.9 ci-dessous permet de visualiser les différents points significatifs, deux courbes sont représentées sur cette figure à savoir la courbe de l'intensité en fonction de la tension (I V) et celle de la puissance en fonction de la tension.

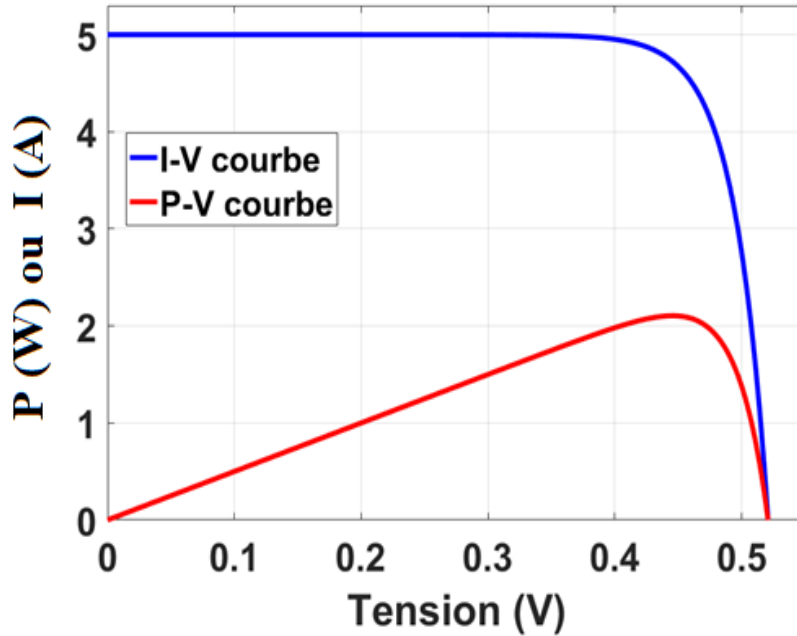


Figure (I.9): Characteristics of an arbitrary PV cell

I.6.4.3. Les équations des paramètres du circuit équivalent considéré

Le circuit équivalent de la cellule considérée est un circuit a une diode avec 5 paramètres qui sont : le courant photonique, le facteur d'idéalité de la diode, la résistance série, la résistance parallèle, et le courant inverse de la diode. Ces paramètres représentent des inconnus dans ce travail et dont la détermination peut se faire à partir des 5 équations non linéaires dont la déduction se fait de la manière suivante :

- ✓ Le courant photonique I_{ph}

En appliquant la condition de court-circuit ($I=I_{sc}$ et $V=0$) sur l'équation I.7 on aura a :

$$I_{ph} = I_{sc} + I_0 \left(e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot u_T}} - 1 \right) + \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \tag{I.9}$$

A noter que cette relation I.9 peut être tirée à partir de l'équation I.8.

- ✓ Le courant inverse de la diode I_0

Lorsque le courant $I=0$ et $V=V_{oc}$; en remplaçant I et V par leurs expressions dans l'équation I.7 on obtient :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot u_T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p}$$

De cela nous pouvons déterminer l'expression de courant inverse de la diode I_0 qui est donnée par la relation I.10 ci-dessous.

$$I_0 = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot u_T}} - 1} \quad I.10$$

✓ La résistance parallèle R_p

Pour trouver l'expression de la résistance parallèle, nous allons partir de la pente de courbe caractéristique $I(V)$ lorsque $V=0$ et nous notons cette pente α tel que $\alpha = \frac{dI}{dV}$. En dérivant le courant I par rapport à tension V de l'équation I.7 on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = -I_0 \left[\frac{1}{n \cdot u_T} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot u_T}} \right] - \frac{1}{R_p} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right)$$

Maintenant en remplaçant V et α par leurs valeurs et en tirant la résistance parallèle on aboutit à :

$$\alpha = -I_0 \left[\frac{1}{n \cdot u_T} \left(1 + R_s \cdot \alpha \right) e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot u_T}} \right] - \frac{1}{R_p} \left(1 + R_s \cdot \alpha \right)$$

Alors on peut tirer l'expression de la résistance parallèle.

$$R_p = -(1 + \alpha \cdot R_s) / \left(\alpha + I_0 \cdot \left(\frac{1}{n \cdot u_T} \right) \cdot (1 + \alpha \cdot R_s) \cdot e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot u_T}} \right) \quad I.11$$

✓ La résistance série R_s

En procédant de la même manière que la résistance parallèle mais cette fois ci on remplace la pente β , on retrouve l'expression de la résistance série donnée par :

$$R_s = (-1 - \beta) / \left(\frac{1}{R_p} + I_0 \cdot \left(\frac{1}{n \cdot u_T} \right) \cdot \frac{e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot u_T}}}{\beta} \right) \quad I.12$$

✓ Le facteur d'idéalité n

Pour déterminer l'expression de ce facteur on peut partir à du point de fonctionnement maximal. Au point de fonctionnement maximal on a $I=I_{mpp}$ et $V=V_{mpp}$, en substituant I et V par leurs valeurs dans l'équation I.7 on aura :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{n \cdot u_T}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{R_p}$$

A partir de cette relation, on peut tirer l'expression du facteur d'idéalité de la diode qui est donnée par l'équation I.13.

$$n = (v_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s) / \ln\left(\frac{I_{ph} - I_{mpp} - \frac{(V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s)}{R_s}}{I_0} + 1\right) \cdot u_T \quad I.13$$

À la fin on se retrouve avec un système de 5 inconnus et 5 équations que l'on note système (I.1).

Ce système peut être résolu en utilisant des méthodes numériques se basant sur des processus itératives.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph} = I_{sc} + I_0 \left(e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot u_T}} - 1 \right) + \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \\ I_0 = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot u_T}} - 1} \\ R_p = -(1 + \alpha \cdot R_s) / \left(\alpha + I_0 \cdot \left(\frac{1}{n \cdot u_T} \right) \right) \cdot (1 + \alpha \cdot R_s) \cdot e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot u_T}} \\ R_s = (-1 - \beta) / \left(1/R_p + I_0 \cdot \left(\frac{1}{n \cdot u_T} \right) \cdot \frac{e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot u_T}}}{\beta} \right) \\ n = (v_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s) / \ln\left(\frac{I_{ph} - I_{mpp} - \frac{(V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s)}{R_p}}{I_0} + 1\right) \cdot u_T \end{array} \right.$$

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions fondamentales sur l'énergie photovoltaïque, il ne s'agit pas d'une présentation complète, mais plutôt par le biais des rappels de souligner les notions de base qui sont essentielles à connaître et les paramètres physiques et électriques importants qui entrent en jeu dans l'étude d'une cellule solaire photovoltaïque.

Plus précisément, nous avons exposé certains résultats issus de la littérature comme le principe de l'effet photovoltaïque ou celui du fonctionnement de la cellule PV, les trois technologies les plus courantes, nous avons aussi présenté un modèle mathématique et ainsi un schéma électrique équivalent à partir duquel nous avons pu déterminer les équations non linéaires permettant de trouver les valeurs des 5 paramètres du modèle mathématique présenté.

Chapitre II :

Développement d'un modèle numérique

II.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une alternative intéressante et idéale pour répondre à des besoins restreints. Bien que cette énergie soit très facile à mettre en place, qu'elle ait un impact environnemental faible et qu'elle ne nécessite pas beaucoup d'entretien, un système photovoltaïque perd sa compétitivité lorsque la demande augmente. Il est donc essentiel d'effectuer une étude assez approfondie (modélisation) afin de prendre la meilleure décision, la plus abordable possible.

La modélisation des dispositifs photovoltaïques est un domaine de recherche très actif dans le domaine de l'énergie solaire. Les cellules photovoltaïques sont des composants clés de nombreuses applications énergétiques, telles que les panneaux solaires pour la production d'électricité, leur modélisation peut être effectuée à différents niveaux d'abstraction, en fonction de l'objectif de la simulation et des ressources de calcul disponibles.

Les modèles les plus simples reposent sur des équations phénoménologiques qui décrivent les propriétés globales des cellules photovoltaïques, telles que la puissance de sortie ou le rendement, en fonction des paramètres d'entrée tels que le niveau d'éclairement solaire et la température. Cependant, les modèles les plus avancés utilisent des approches plus détaillées, telles que la résolution des équations de Maxwell pour décrire la propagation de la lumière dans le matériau, la résolution des équations de transport des porteurs de charge pour décrire leur mouvement et leur génération dans le matériau, et la résolution des équations de continuité pour décrire la variation des densités de charges dans le matériau.

Dans ce chapitre, nous développerons un modèle mathématique numérique pour la simulation unidimensionnelle d'une cellule solaire photovoltaïque 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 aux limites. La solution auto-cohérente du problème non linéaire couplé sera ensuite décrite et la méthode de résolution des systèmes linéaires résultants sera explicitée.

II.2. Modèle de dérive-diffusion

Le modèle dérive-diffusion est une méthode de simulation couramment utilisée pour modéliser le comportement des porteurs de charge (électrons et trous) dans les cellules solaires photovoltaïques. Dans le cadre de la simulation d'une cellule solaire photovoltaïque, le modèle de dérive-diffusion peut être utilisé pour prédire le comportement des porteurs de charge et les performances de la cellule. La résolution des équations de dérive-diffusion est importante pour comprendre comment les porteurs de charge se déplacent dans la cellule solaire photovoltaïque et pour prédire ses performances.

Les simulations numériques sont souvent utilisées pour résoudre ces équations et pour étudier l'effet des différents paramètres sur les performances de la cellule solaire photovoltaïque. Il existe plusieurs modèles physiques qui peuvent être utilisés pour décrire le transport des porteurs de charge (électrons et trous) dans les semi-conducteurs, ces modèles sont basés généralement sur la résolution de l'équation de transport de Boltzmann.

II.2.1. Système d'équations des semi-conducteurs

Les équations de base qui permettent de décrire les phénomènes de conduction dans les matériaux semi-conducteurs sont regrouperées comme suit :

✓ L'équation de Poisson

La relation entre les fluctuations du potentiel électrostatique v et les densités volumiques des charges électriques dans un système est établie par l'équation de Poisson. On l'emploie fréquemment pour décrire le fonctionnement électrique des matériaux et certains dispositifs.

L'équation de Poisson s'exprime généralement sous la forme suivante :

$$\nabla^2 v = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad \text{II.1}$$

Dans cette équation :

ρ est la densité volumique des charges électriques dans le système.

ε est la permittivité diélectrique du matériau.

Cette équation indique que les variations du potentiel électrostatique sont proportionnelles à la distribution des charges électriques dans le système. Une densité des charges positives (excès des charges positives) entraînera une diminution du potentiel électrostatique, tandis qu'une densité des charges négatives (excès des charges négatives) entraînera une grande augmentation du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson est une équation différentielle partielle qui peut être résolue numériquement ou analytiquement, en fonction des conditions et des symétries du système étudié.

Elle est largement utilisée en physique, en ingénierie électronique et dans d'autres domaines pour modéliser et comprendre les phénomènes électrostatiques.

✓ Equations de continuité

Les équations de continuité décrivent les variations temporelles des densités des charges des porteurs des charges (électrons et trous) dans un matériau ou un dispositif donné. Ces équations sont souvent utilisées dans le domaine de l'électrodynamique pour modéliser le transport de charges dans les semi-conducteurs.

Voici les équations de continuité pour les électrons et les trous :

Pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n = GR_n \quad \text{II.2}$$

Pour les trous :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p = GR_p \quad \text{II.3}$$

Dans ces équations :

$\partial n/\partial t$ et $\partial p/\partial t$ représentent les taux de variations temporelles de densités des électrons (n) et des trous (p), respectivement.

J_n et J_p sont les densités de courant des électrons et des trous, respectivement.

q est la charge élémentaire.

G_n et G_p sont les taux de génération des électrons et des trous, respectivement.

R_n et R_p sont les taux de recombinaison des électrons et des trous, respectivement.

Ces équations expriment le fait que les variations temporelles des densités de charge des porteurs (électrons et trous) sont influencées par les densités de courant, les taux de génération et les taux de recombinaison. Les densités de courant dépendent des gradients spatiaux du potentiel électrostatique et des mobilités des porteurs de charge.

✓ Les équations de transport

Les équations de transport décrivent le déplacement des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau sous l'effet d'un champ électrique ou d'un gradient de concentration de porteurs de charges. Ces équations sont essentielles pour comprendre le comportement électrique des matériaux et des dispositifs électroniques. Voici les équations de transport pour les électrons et les trous :

$$\vec{J}_n = -q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{\nabla} v + q \cdot D_n \cdot \vec{\nabla} n \quad \text{II.4}$$

$$\vec{J}_p = -q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{\nabla} v - q \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p \quad \text{II.5}$$

Dans ces équations :

J_n : est la densité de courant des électrons.

q : est la charge élémentaire.

μ_n : est la mobilité des électrons.

μ_p : la mobilité des trous.

n : est la densité d'électrons.

p : la densité de trous.

D_n : est le coefficient de diffusion des électrons.

D_p : le coefficient de diffusion des trous.

∇n : est le gradient de la densité d'électrons.

∇p : est le gradient de la densité des trous.

II.2.2. Modèles physiques considérés

Les composants dits semi-conducteurs sont inévitablement liés aux modèles physiques dans le système d'équations que nous avons décrit précédemment dans cette même section.

II.2.2.1. La densité de charge

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

$$\rho = q(p - n + c + ct) \quad \text{II.6}$$

D'où :

q est la charge de l'électron, c 'est la densité de charges fixes qui est donnée par $c=ND-NA$ Avec :

ND : concentration des atomes donneurs.

NA : concentration des atomes accepteurs.

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. Cette dernière est souvent négligée lorsqu'on travaille en régime statique ou bien lorsque les transitions peuvent être considérées comme instantanées.

II.2.2.2. Les mobilités

Les mobilités des électrons μ_n et des trous μ_p sont influencées par plusieurs facteurs (dopage, champ électrique, température...). Dans notre situation, notre attention se porte principalement sur sa relation avec le champ électrique. La variation de la mobilité μ en fonction du champ électrique est exprimée par les expressions ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0}E}{V_{satN}}\right)^{\beta_n}} \right]^{\frac{1}{\beta_n}} \\ \mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0}E}{V_{satP}}\right)^{\beta_p}} \right]^{\frac{1}{\beta_p}} \end{array} \right. \quad \text{II.7}$$

Les valeurs de constants V_{satN} , V_{satP} , μ_{n0} , μ_{p0} , β_n , et β_p sont notées dans le tableau ci-dessous.

	V_{satN} (cm/s)	V_{satP} (cm/s)	μ_{n0} (cm ² /V.s)	μ_{p0} (cm ² /V.s)	β_n	β_p
valeurs	1.035 10 ⁷	1.035 10 ⁷	1500	1000	2.0	1.0

Tableau (II.1) : *Tableau des paramètres de la mobilité*

II.2.2.3. Génération-Recombinaison

Il a été observé que l'écriture des équations de continuité intègre deux termes GR_n et GR_p qui décrivent les phénomènes de génération-recombinaison, et qui représentent les différents mécanismes physiques qui perturbent les densités des porteurs. Dans notre situation, nous prenons en compte le modèle de génération-recombinaison des paires électron-trous de Shockley-Read-Hall (R_{SRH}). La loi suivante fournit la vitesse de recombinaison R_{SRH} :

$$RG_n = RG_p = r_{SRH} = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_p \cdot (n + n_i) + \tau_n \cdot (p + n_i)} \quad \text{II.8}$$

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.

II.2.3. Résolution des problèmes aux dérivées partielles

II.2.3.1. La méthode des différences finies

La méthode des différences finies est une méthode permettant la résolution des EDP. Selon A. Thom, cette méthode implique la définition d'un maillage de l'espace défini par le système physique à modéliser, où chaque cellule du maillage contient les constantes physiques du matériau en jeu.

Ensuite, les EDP régissant ce système sont approximativement transformés en un système d'équations linéaires en utilisant le principe des différences finies. Enfin, les équations sont résolues en chaque point du maillage en prenant en considération les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites du système. Il est crucial de garantir la précision des calculs et la stabilité de l'algorithme pour cette méthode. Trois types d'erreurs peuvent survenir : les erreurs liées à la création du modèle du système, les erreurs liées à la discrétisation de l'espace et les erreurs d'arrondi des nombres dans le calculateur. Il convient de souligner que le recours à un maillage plus fin pour réduire le deuxième type d'erreurs entraînera une augmentation du nombre d'opérations, ce qui entraînera une augmentation des 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 celle 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.2.3.2. Principe de la méthode des différences finies

La continuité mathématique n'est pas connue par l'ordinateur, ce qui signifie que l'obtention des expressions programmables nécessite la discrétisation des formulations en question. La technique des différences finies permet de traiter les dérivées partielles, spatiales et temporelles du modèle dérive-diffusion.

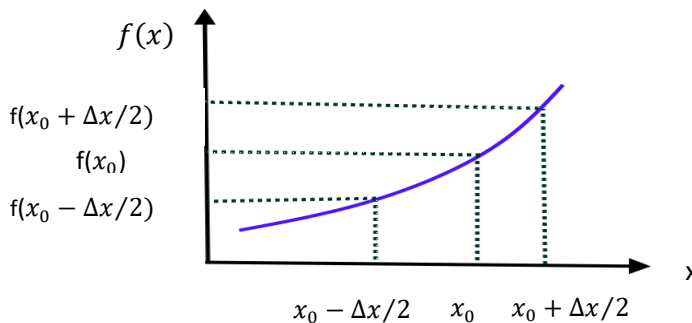


Figure (II.1) : Evaluation d'une dérivée

Pour illustrer le principe de cette méthode, considérons alors 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 :

$$f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) = f(x_0) + \frac{\Delta x}{2} f'(x_0) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x_0) + 0(\Delta x^3) \tag{II.9}$$

$$f\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right) = f(x_0) - \frac{\Delta x}{2} f'(x_0) + \frac{\Delta x^2}{8} f''(x_0) - 0(\Delta x^3) \tag{II.10}$$

La dérivée peut être obtenue des différentes manières :

- Soit par une approximation par différence «progressive» à partir de l'équation (II.9) on aura :

$$f'(x_0) = \frac{f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f(x_0)}{\Delta x^2/2} + 0(\Delta x) \quad \text{II.11}$$

- Soit par une approximation par différence «rétrograde» à partir de l'équation (II.10) on aura :

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x^2/2} + 0(\Delta x) \quad \text{II.12}$$

- Soit par une approximation par différence «milieu» La soustraction des équations (II.9) et (II.10) permet d'avoir:

$$f'(x_0) = \frac{f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x} + 0(\Delta x^2) \quad \text{II.13}$$

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 :

$$f''(x_0) = \frac{f'\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f'\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x} \quad \text{II.14}$$

Alors :

$$f''(x_0) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} - \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \right] \quad \text{II.15}$$

Ce qui permet d'écrire finalement :

$$f''(x_0) = \frac{1}{\Delta x^2} [f(x_0 + \Delta x) + f(x_0 - \Delta x) - 2f(x_0)] \quad \text{II.16}$$

II.2.4. 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, celles-ci sont résumées dans le tableau (II.2).

GRANDEURS	VARIABLES	UNITE	FACTEUR DE NORMALISATION	ORDRE DE GRANDEURS
Distance	L_D	m	$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon U_T}{q n_i}}$	3.34×10^{-5}
Potentiel électrique	u_T	V	$U_T = \frac{k T}{q}$	0.0258
Concentration	n, p, N _D , N _A	At. /cm ³	n_i	$1.48 \cdot 10^{10}$
Constante de diffusion	D_n, D_p	cm ² /S	$D_0 = \frac{L_D J_0}{q n_i}$	$1.46 \cdot 10^6$

Mobilité	μ_n, μ_p	$\text{cm}^2/\text{V/S}$	$\frac{D_0}{U_T}$	$5.65.10^7$
Densité de courant	J_n, J_p	A/cm^2	$J_0 = \frac{q \cdot D_0 \cdot n_i}{L_D}$	$3.42.10^{13}$
Génération-Recombinaison	G-R	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$	$\frac{D_0 \cdot n_i}{L_D^2}$	$1.14.10^{11}$
Champ électrique	E	V/cm	$\frac{U_T}{L_D}$	$7.62.10^4$
Temps (durée de vie)	τ	S	$\frac{L_D^2}{D_0}$	$7.88.10^{-12}$

Tableau (II.2) : Tableau de normalisation des constants

En utilisant ces grandeurs de normalisation, les équations de semi-conducteur deviennent :

II.2.4.1. Normalisation de l'équation de Poisson

L'équation de Poisson s'exprime comme suit :

$$\nabla^2 v = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{avec : } \rho = q(p - n + c) \Rightarrow \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{q}{\epsilon}(n - p - c)$$

D'après la méthode de différence finie on a : $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{V_{i+1} + V_{i-1} - 2V_i}{\Delta x^2} \Rightarrow$

$$\frac{V_{i+1} + V_{i-1} - 2V_i}{\Delta x^2} = \frac{q}{\epsilon}(n - p - c) = \frac{q}{\epsilon} \Delta x^2 (n - p - c) \tag{II.17}$$

✓ La normalisation :

Pour normaliser l'équation II.17, nous procédons de la façon suivante :

$$\frac{1}{\frac{\Delta x^2 \cdot L_D^2}{L_D^2}} u_T \left(\frac{V_{i+1} - 2V_i + V_{i-1}}{u_T} \right) = \frac{q n_{in}}{\epsilon} \left(\frac{n_i}{n_{in}} - \frac{p_i}{n_{in}} - \frac{c_i}{n_{in}} \right)$$

En posant : $\varphi = \frac{V}{u_T}; N_i = \frac{n_i}{n_{in}}; P_i = \frac{p_i}{n_{in}}; C_i = \frac{c_i}{n_{in}}$

Ceci nous permet d'obtenir :

$$\frac{1}{\Delta^2} (\varphi_{i+1} + \varphi_{i-1} - 2\varphi_i) = \frac{q n_{in} L_D^2}{u_T \epsilon} (N_i - P_i - C_i) \quad \text{Avec } L_D = \sqrt{\frac{u_T \epsilon}{q n_i}}$$

L_D Représente la longueur de diffusion.

$$\frac{1}{\Delta^2} (\varphi_{i+1} + \varphi_{i-1} - 2\varphi_i) = (N_i - P_i - C_i) \tag{II.18}$$

La relation II.18 représente la forme normalisée de l'équation de poisson

✓ Mise sous la forme itérative :

Dans cette étape il est indispensable d'écrire l'équation (II.18) sous la forme itérative, car cette dernière est une équation couplée (dépend de la concentration des porteurs libres).

Alors l'équation II.18 peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\Delta^2}(\varphi_{i+1}^{n+1} + \varphi_{i-1}^{n+1} - 2\varphi_i^{n+1}) = (N_i^{n+1} - P_i^{n+1} - C_i) \quad \text{II.19}$$

Sachant que :

$$N_i^{n+1} = N_i^n + \Delta N \quad \text{et} \quad P_i^{n+1} = P_i^n - \Delta P$$

Alors l'équation II.19 devient :

$$\frac{1}{\Delta^2}(\varphi_{i+1}^{n+1} + \varphi_{i-1}^{n+1} - 2\varphi_i^{n+1}) = (N_i^n + \Delta N - P_i^n - \Delta P - C_i) \quad \text{II.20}$$

D'une part, nous avons :

$$n_i = n_{in} e^{\frac{V_i}{u_T}} \quad \text{et} \quad p_i = n_{in} e^{-\frac{V_i}{u_T}}$$

Alors la forme normalisée est donnée comme suit :

$$N_i = e^{\varphi_i} \quad \text{II.21}$$

$$P_i = e^{-\varphi_i} \quad \text{II.22}$$

Et donc : $\frac{\Delta N}{\Delta \varphi} = N$ et $\frac{\Delta P}{\Delta \varphi} = -P \Rightarrow \Delta N = N_i(\varphi_i^{n+1} - \varphi_i^n)$ et $\Delta P = -P_i(\varphi_i^{n+1} - \varphi_i^n)$

Par substitution on aura :

$$\frac{1}{\Delta^2}(\varphi_{i+1}^{n+1} + \varphi_{i-1}^{n+1} - 2\varphi_i^{n+1}) = (N_i^n + N_i^n(\varphi_i^{n+1} - \varphi_i^n) - P_i^n + P_i^n(\varphi_i^{n+1} - \varphi_i^n) - C_i)$$

Et finalement l'équation de poisson sous la forme itérative est comme suit :

$$\frac{1}{\Delta^2} \varphi_{i+1}^{n+1} + \frac{1}{\Delta^2} \varphi_{i-1}^{n+1} - \left(\frac{2}{\Delta^2} + N_i^n + P_i^n \right) \varphi_i^{n+1} = N_i^n - P_i^n - C_i - \varphi_i^n (N_i^n + P_i^n) \quad \text{II.23}$$

Si on pose :

$$G = D = \frac{1}{\Delta^2} ; \quad M_i = -\left(\frac{1}{\Delta^2} + N_i^n + P_i^n \right) \quad \text{Et} \quad L_i = N_i^n - P_i^n - C_i - \varphi_i^n (N_i^n + P_i^n)$$

En substituant les expressions ci-dessus dans l'équation II.23, ceci nous permet d'écrire le système matriciel ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ G & M_2 & D & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G & M_3 & D & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & G & M_{n_x-1} & D \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \vdots \\ \varphi_{n_x-1} \\ \varphi_{n_x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \vdots \\ L_{n_x-1} \\ V_{n_x} \end{pmatrix} \quad \text{II.24}$$

II.2.5. Développement numérique des équations de continuités

✓ Courant des électrons :

Le courant des électrons est donné par l'expression suivante :

$$j_n = q\mu_n En + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \tag{II.25}$$

Or on sait que $D_n = \mu_n \cdot u_T$, en remplaçant ce coefficient par son expression, on obtient alors :

$$j_n = q\mu_n En + q\mu_n \cdot u_T \frac{\partial n}{\partial x} = q\mu_n \left(E n + u_T \frac{\partial n}{\partial x} \right) \tag{II.26}$$

Si et seulement si on peut écrire :

$$\frac{j_n}{q\mu_n E} = n + \frac{u_T}{E} \frac{\partial n}{\partial x}, \quad n - \frac{j_n}{q\mu_n E} = -\frac{u_T}{E} \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\frac{\frac{\partial n}{\partial x}}{n - \frac{j_n}{q\mu_n E}} = -\frac{E}{u_T} \tag{II.27}$$

La relation II.27 nous donne l'expression de la dérivée d'une fonction sur elle-même, de cela nous pouvons écrire :

$$\frac{d}{dx} \ln \left(n - \frac{j_n}{q\mu_n E} \right) = -\frac{E}{u_T} \tag{II.28}$$

En intégrant l'équation II.28, on aura :

$$\ln \left(n - \frac{j_n}{q\mu_n E} \right) = -\frac{E}{u_T} x + C_1 \Rightarrow n - \frac{j_n}{q\mu_n E} = e^{(-\frac{E}{u_T} x + C_1)} = e^{-\frac{E}{u_T} x} \cdot e^{C_1} = c \cdot e^{-\frac{E}{u_T} x}$$

$$n - \frac{j_n}{q\mu_n E} = c e^{-\frac{E}{u_T} x} \tag{II.29}$$

Pour éliminer la constante C nous procédons comme suit :

$$\frac{n_{i+1} - \frac{j_{n_{i+\frac{1}{2}}}}{q\mu_n E}}{n_i - \frac{j_{n_{i+\frac{1}{2}}}}{q\mu_n E}} = \frac{c e^{-\frac{E}{u_T} x_{i+1}}}{c e^{-\frac{E}{u_T} x_i}} = e^{-\frac{E}{u_T} (x_{i+1} - x_i)} = e^{\frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta x u_T} (x_{i+1} - x_i)} \tag{II.30}$$

À partir de l'équation II.30, nous pouvons déterminer l'expression de $j_{n_{i+\frac{1}{2}}}$ et pour cela nous procédons de la façon suivante :

$$\frac{q\mu_n n_{i+1} - j_{n_{i+\frac{1}{2}}}}{q\mu_n E} = e^{\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T}} = \frac{q\mu_n n_{i+1} - j_{n_{i+\frac{1}{2}}}}{q\mu_n E n_i - j_{n_{i+\frac{1}{2}}}}, \quad q\mu_n E n_{i+1} - j_{n_{i+\frac{1}{2}}} = \left(q\mu_n E n_i - j_{n_{i+\frac{1}{2}}} \right) e^{\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T}}$$

$$j_{n_{i+\frac{1}{2}}} \left(1 - e^{-\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T}} \right) = q\mu_n E \left(n_{i+1} - n_i e^{-\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T}} \right), \quad j_{n_{i+\frac{1}{2}}} = q\mu_n \frac{u_T}{\Delta x} \left(n_{i+1} \frac{u_T}{\left(e^{\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T}} - 1 \right)} - n_i \frac{u_T}{\left(e^{-\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T}} - 1 \right)} \right)$$

$$j_{n_{i+\frac{1}{2}}} = q\mu_n \frac{u_T}{\Delta x} \left(n_{i+1} B \left(\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T} \right) - n_i B \left(-\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T} \right) \right) \quad \text{II.31}$$

Avec B la fonction de Bernoulli : $B(x) = \frac{x}{e^x - 1}$

$$J_{i+1/2}^n = \frac{qD_{i+1/2}^n}{\Delta x} \left[n_{i+1} B(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - n_i B(\varphi_i - \varphi_{i+1}) \right] \quad \text{II.32}$$

De la même manière on peut déterminer l'expression de $j_{n_{i-\frac{1}{2}}}$

$$J_{i-1/2}^n = \frac{qD_{i-1/2}^n}{\Delta x} \left[n_i B(\varphi_i - \varphi_{i-1}) - n_{i-1} B(\varphi_{i-1} - \varphi_i) \right] \quad \text{II.33}$$

Et donc :

$$-\frac{1}{q} \nabla j_n \approx -\frac{1}{q\Delta x} \left(j_{n_{i+\frac{1}{2}}} - j_{n_{i-\frac{1}{2}}} \right) = GR$$

$$-\mu_n \frac{u_T}{\Delta x^2} \left(n_{i+1} B \left(\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T} \right) - n_i B \left(-\frac{v_{i+1}-v_i}{u_T} \right) - n_i B \left(\frac{v_i-v_{i-1}}{u_T} \right) + n_{i-1} B \left(-\frac{v_i-v_{i-1}}{u_T} \right) \right) = GR$$

Alors l'équation de continuité des électrons est donnée par l'expression ci-dessous :

$$\frac{1}{\Delta x^2} D_{i+1/2}^n B(\varphi_{i+1} - \varphi_i) n_{i+1} - \left[\frac{1}{\Delta x^2} D_{i-1/2}^n B(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + \frac{1}{\Delta x^2} D_{i+1/2}^n B(\varphi_i - \varphi_{i+1}) \right] n_i + \frac{1}{\Delta x^2} D_{i-1/2}^n B(\varphi_{i-1} - \varphi_i) n_{i-1} = G_i \quad \text{II.34}$$

Avec :

$$G_i = \frac{p.n - n_{\text{int}}^2}{\tau_p (n + n_i) + \tau_n (p + p_i)} ; \quad \frac{D}{\mu} = \frac{K_B T}{q} = u_T \Rightarrow D = \mu.u_T$$

Si on pose :

$$G_{ni} = \frac{1}{\Delta x^2} D_{i-\frac{1}{2}}^n B(\varphi_{i-1} - \varphi_i), D_{ni} = \frac{1}{\Delta x^2} D_{i+\frac{1}{2}}^n B(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \quad \text{et}$$

$$M_{ni} = \frac{1}{\Delta x^2} D_{i-\frac{1}{2}}^n B(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + \frac{1}{\Delta x^2} D_{i+\frac{1}{2}}^n B(\varphi_i - \varphi_{i+1})$$

A partir de l'équation II.34, nous pouvons écrire le système suivant :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ G_{n2} & M_{n2} & D_{n2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{n3} & M_{n3} & D_{n3} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & G_{nn_x-1} & M_{nn_x-1} & D_{nn_x-1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_{n_x-1} \\ n_{n_x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ \vdots \\ G_{n_x-1} \\ n_{n_x} \end{pmatrix} \quad \text{II.35}$$

✓ Courant des trous :

De la même façon que le courant des électrons, le courant des trous est donné par :

$$J_{i+1/2}^p = \frac{qD_{i+1/2}^p}{\Delta x} [p_{i+1}B(\varphi_i - \varphi_{i+1}) - p_iB(\varphi_{i+1} - \varphi_i)] \quad \text{II.36}$$

$$J_{i-1/2}^p = \frac{qD_{i-1/2}^p}{\Delta x} [p_iB(\varphi_{i-1} - \varphi_i) - p_{i-1}B(\varphi_i - \varphi_{i-1})] \quad \text{II.37}$$

L'équation de continuité des trous est alors de la façon suivante :

$$\frac{1}{\Delta x^2} D_{i+1/2}^p B(\varphi_i - \varphi_{i+1}) p_{i+1} - \left[\frac{1}{\Delta x^2} D_{i-1/2}^p B(\varphi_{i-1} - \varphi_i) + \frac{1}{\Delta x^2} D_{i+1/2}^p B(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \right] p_i + \frac{1}{\Delta x^2} D_{i-1/2}^p B(\varphi_i - \varphi_{i-1}) p_{i-1} = G_i \quad \text{II.38}$$

Si on pose :

$$G_{pi} = \frac{1}{\Delta x^2} D_{i-\frac{1}{2}}^p B(\varphi_{i-1} - \varphi_i), D_{pi} = \frac{1}{\Delta x^2} D_{i+\frac{1}{2}}^p B(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \quad \text{et}$$

$$M_{pi} = \frac{1}{\Delta x^2} D_{i-\frac{1}{2}}^p B(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + \frac{1}{\Delta x^2} D_{i+\frac{1}{2}}^p B(\varphi_i - \varphi_{i+1})$$

Alors à partir de l'équation II.38 nous pouvons obtenir le système matriciel ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ G_{p2} & M_{p2} & D_{p2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{p3} & M_{p3} & D_{p3} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & G_{pn_x-1} & M_{pn_x-1} & D_{pn_x-1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_{n_x-1} \\ p_{n_x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ \vdots \\ p_{n_x-1} \\ p_{n_x} \end{pmatrix} \quad \text{II.39}$$

II.2.6. Conditions aux limites

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 selon les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V_{app} + \ln(N) \rightarrow \text{pour une région dopée N} \\ V = V_{app} - \ln(P) \rightarrow \text{pour une région dopée P} \end{array} \right. \quad \text{II.40}$$

- ✓ 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 de contacts, alors ces hypothèses sont traduites par les équations normalisées suivantes :

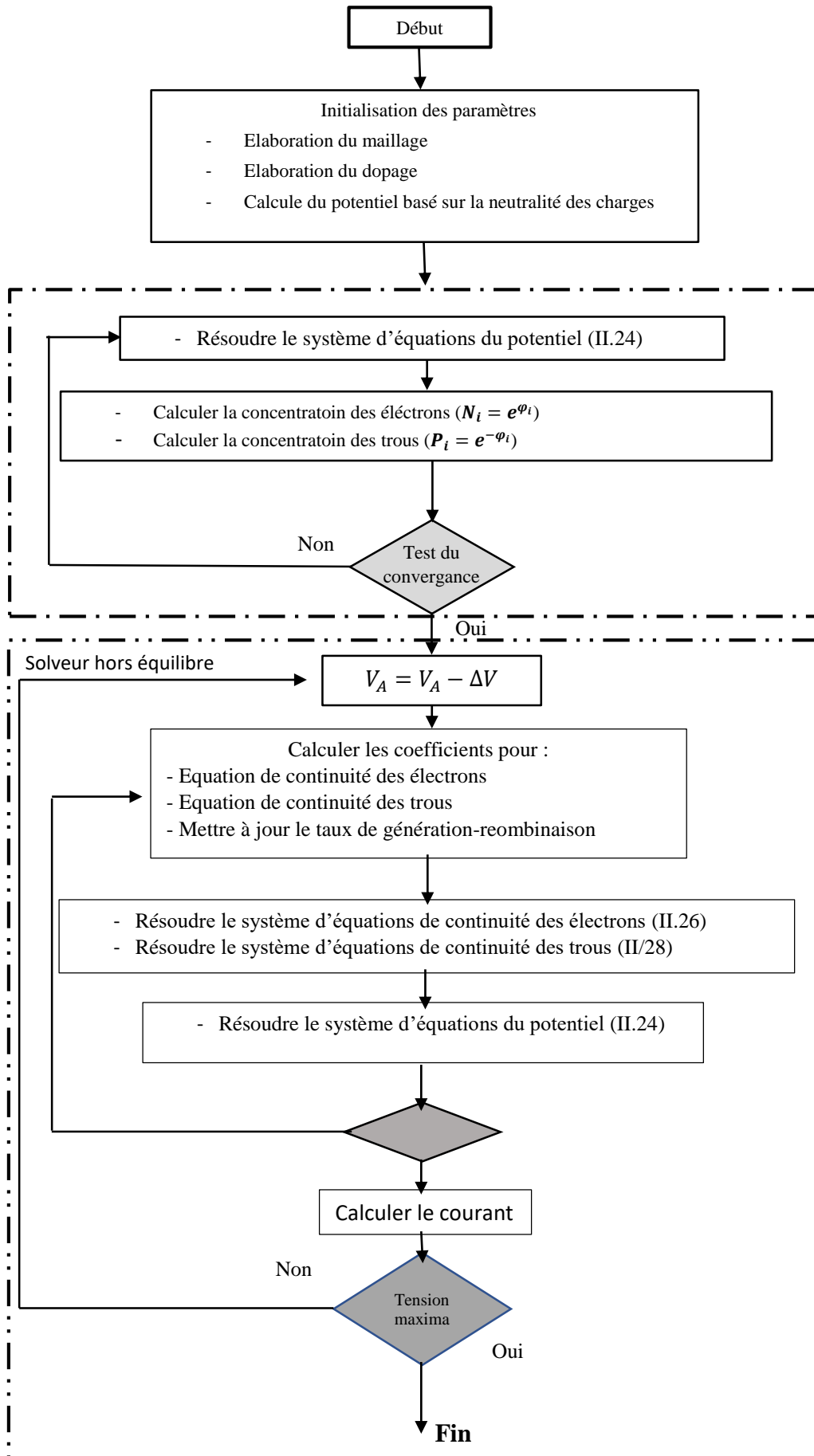
$$\left\{ \begin{array}{l} N \cdot P - C = 0 \\ N \cdot P = 1 \end{array} \right. \quad \text{II.41}$$

Par conséquent, les densités des porteurs sont décrites selon :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{c}{2} + \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 + 1} \\ P = \frac{c}{2} - \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 + 1} \end{array} \right. \quad \text{II.42}$$

II.2.7. Organigramme pour le solveur du modèle dérive-diffusion en 1D

L'organigramme pour la résolution du modèle de dérive-diffusion en une seule dimension est représenté par le schéma ci-dessous, cet organigramme montre le processus de la résolution du modèle numérique développé dans ce deuxième chapitre du début jusqu'à la fin.



II.3. Conclusion

Finalement, nous pouvons conclure de ce chapitre que nous avons effectué un développement numérique d'un modèle mathématique reposant sur les équations de dérive-diffusion auxquelles nous avons appliqué la méthode des différences finies pour la résolution de ces équations du type EDP, cette méthode a été brièvement expliquée dans ce chapitre.

Ceci nous a permis d'aboutir à des systèmes matriciels que nous pouvons au final résoudre, mais il a fallu une étape de normalisation et la mise sous la forme itérative de l'équation de poisson et ainsi un développement numérique pour les équations de continuité des porteurs de charges cela est dit au fait que ces équations présentent des ordres de grandeurs très différents.

Chapitre III :

Simulation et résultats

III.1. Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'évaluer les caractéristiques de la cellule photovoltaïque et ainsi que ses paramètres constitutants. La simulation quant à elle nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble des paramètres et de choisir la solution optimale.

Dans ce chapitre, nous effectuerons une simulation sous l'environnement MATLAB du modèle numérique développé précédemment et en même temps nous présenterons les résultats issus de cette simulation.

Le but est donc de résoudre l'équation couplée de Poisson et les équations de continuité des porteurs libres enfin de déterminer la distribution du potentiel électrostatique, la concentration des électrons et la concentration des trous, de calculer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) et ainsi que 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_{mp} , courant et tension au point de puissance maximale (I_{mp} V_{mp}) 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 à base d'un semi-conducteur du type Silicium. 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 $N_d = 10^{19} \text{ At. /cm}^3$. Concernant la région du type P, cette région a aussi une épaisseur de $5\mu m$ mais avec une concentration en atomes accepteurs de $N_a = 10^{16} \text{ At. /cm}^3$.

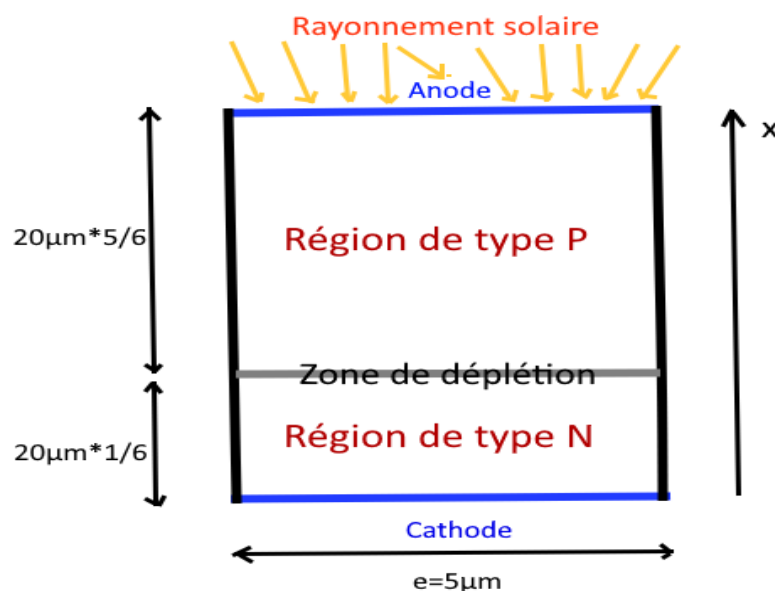


Figure (III.1) : Schéma d'une structure de la jonction P-N d'une cellule photovoltaïque

III.2.2. Elaboration du maillage

Le maillage joue un rôle crucial dans la simulation, car les calculs sont effectués à chaque point de celui-ci. Ainsi, la précision de la solution dépend de sa qualité.

Un maillage fin permettra d'obtenir davantage de précision, mais cela demandera beaucoup de temps de calcul, il est donc nécessaire de trouver une solution.

Les critères de perfectionnement d'un maillage comprennent :

-Il est essentiel de perfectionner dans les zones où le dopage est très variable (en particulier dans les zones de jonctions), dans les zones où les charges s'accumulent, et dans les zones peu dopées mais qui sont fortement polarisées.

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

Dans le cadre de notre étude, le maillage est uniforme suivant l'axe x tel que $\Delta x = 0,6667 \mu\text{m}$, le pas spatial doit être suffisamment petit par rapport à la longueur de Debye.

$$\sqrt{\Delta x^2} \ll \sqrt{\frac{u_T \varepsilon}{qn_i}} \quad \text{III.1}$$

Le maillage adopté pour simuler la cellule solaire photovoltaïque en une seule dimension est présenté sur la figure (III.2) ci-dessous.

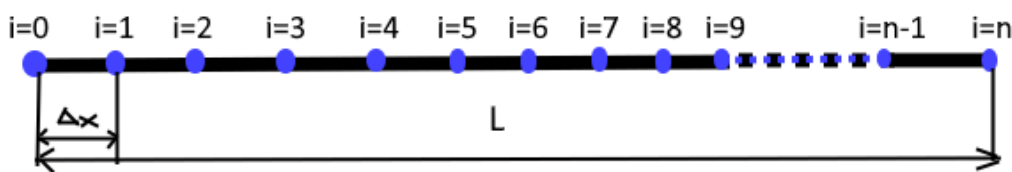


Figure (III.2) : maillage 1D

III.3. Résultats de la simulation numérique

Cette partie est consacrée aux résultats de la simulation, deux types des solutions seront explicités dans cette section à savoir la solution initiale et la solution finale.

III.3.1. Résultats de la solution initiale

La solution initiale est le résultat obtenu d'une manière itérative par la résolution du système de l'équation de poisson et par le calcul des concentrations des porteurs de charges (les électrons et les trous), c'est une solution qui converge vers la solution finale.

En effet la résolution du système d'équation (II.24) du deuxième chapitre nous a permis de donner une représentation de la distribution du potentiel électrostatique en fonction de la position, les équations normalisées des concentrations des porteurs de charge (équations II.21 et II.22) quant à elles, elles nous permettent de représenter la distribution des concentrations des électrons et des trous respectivement sur le même repère en fonction de la position.

✓ Distribution du potentiel électrostatique

La figure (III.3) représente la répartition du potentiel électrostatique en fonction de l'espace, sur cette figure on peut remarquer que de 0 jusqu'aux environs $16 \mu\text{m}$ la distribution du potentiel électrostatique se fait de la manière uniforme et constante cette région correspond à la zone de diffusion, ensuite il varie brusquement de façon exponentielle jusqu'à atteindre une valeur approximative de 0,5 V enfin de se maintenir constant, cette région correspond bien à la zone des charges d'espace appelée aussi zone de déplétion.

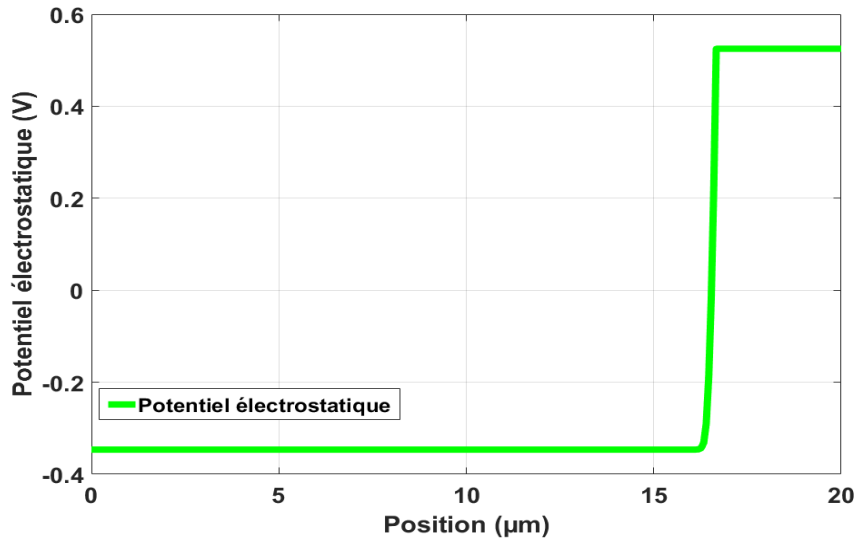


Figure (III.3) : Distribution du potentiel électrostatique

✓ Distribution des concentrations des porteurs de charges

La figure III.4 ci-dessous montre la distribution des concentrations des porteurs de charges à l'échelle logarithmique en fonction de la position, sur cette image on aperçoit que la distribution des concentrations des porteurs des charges se fait de façon uniforme dans les régions neutres qui sont de part et d'autre de la zone de déplétion tandis qu'elles varient très fortement à l'intersection de deux courbes (zone des charges d'espace).

On peut aussi en déduire de ces deux courbes que la concentration des électrons décroît de la manière significative du contact cathodique vers le contact anodique, quant à la concentration des trous, cette dernière décroît aussi mais inversement à celle des électrons c'est-à-dire que du contact anodique vers le contact cathodique.

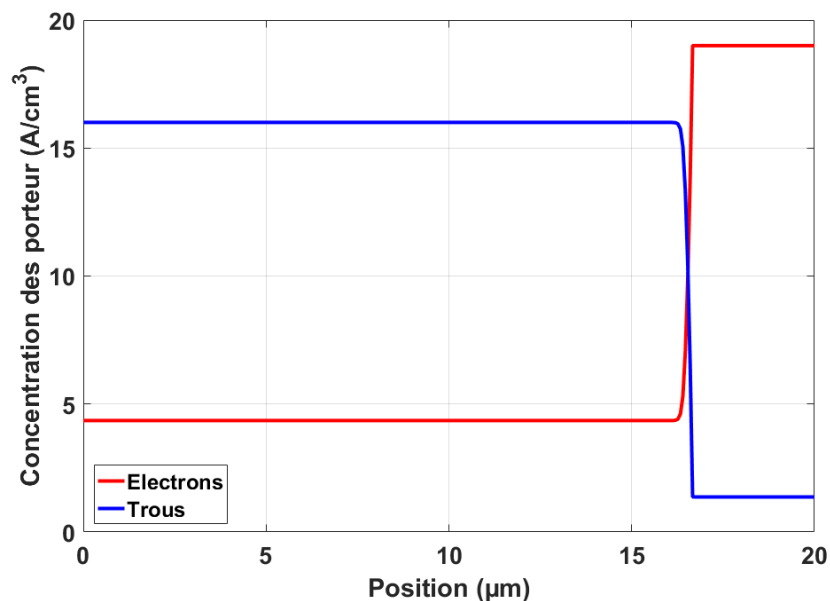


Figure (III.4) : Concentrations des porteurs de charges en fonction de la position

III.3.2. Résultats de la solution finale

La solution finale est obtenue par la résolution des systèmes matriciels II.35 et II.39 qui correspond à la densité de courants des porteurs en chaque point du maillage, cette densité de courant dépend d'une part du potentiel électrostatique et d'autre part de la concentration de porteurs de charges. La résolution de ces systèmes nous a permis de représenter la courbe caractéristique $I(V)$ et ainsi $P(V)$.

Les figures III.5 et III.6 représentent respectivement les courbes de courant en fonction de la tension ($I=f(V)$) et de la puissance en fonction de la tension ($P=f(V)$), ces courbes sont obtenues pour une température constante de 25°C.

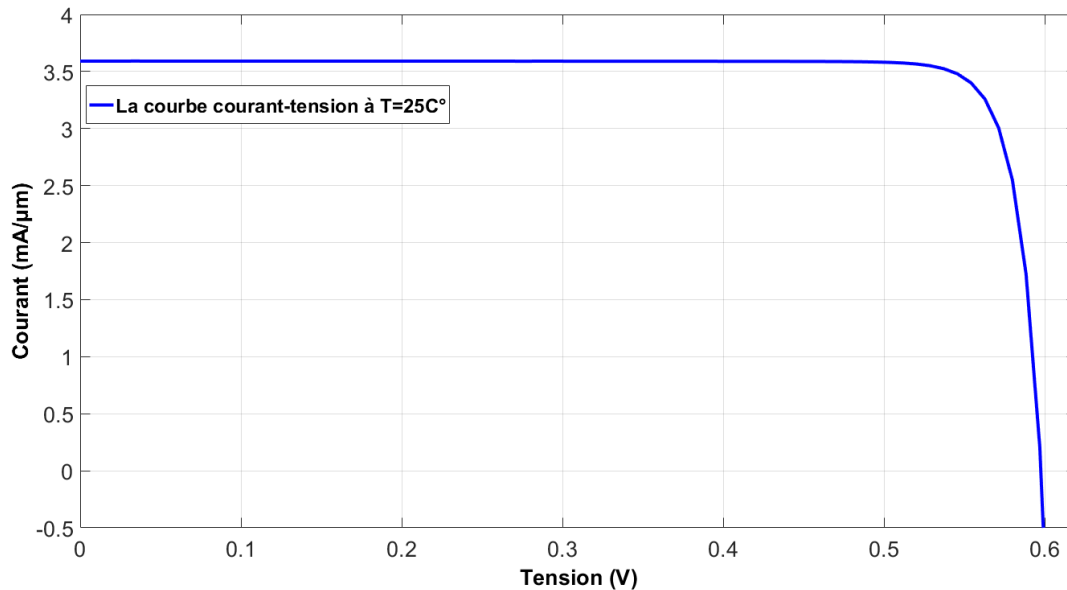


Figure (III.5) : La courbe de la caractéristique courant-tension, $I(V)$

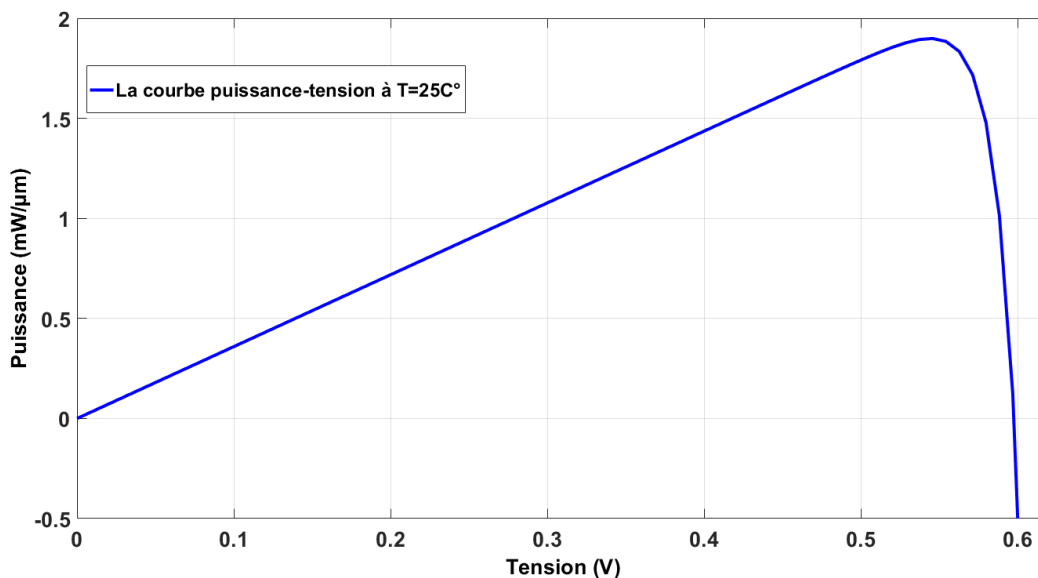


Figure (III.6) : La courbe de la caractéristique puissance-tension, $P(V)$

III.3.3. Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La production d'une cellule photovoltaïque dépend des conditions météorologiques notamment la température qui un paramètre très influent sur les caractéristiques de cet équipement.

Dans cette partie nous discuterons de l'effet de l'influence de variation de la température sur une cellule photovoltaïque.

III.3.3.1. Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

En faisant varier la température ambiante entre 25°C et 50°C, on constate que l'influence de la variation de celle-ci n'est pas négligeable sur la caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque, la figure III.6 ci-dessous nous montre que l'effet de l'augmentation de la température sur la cellule PV entraîne une réduction de la valeur de courant produit par cette dernière alors on peut en conclure qu'une cellule photovoltaïque génère la plus grande quantité d'énergie à l'endroit le plus froid.

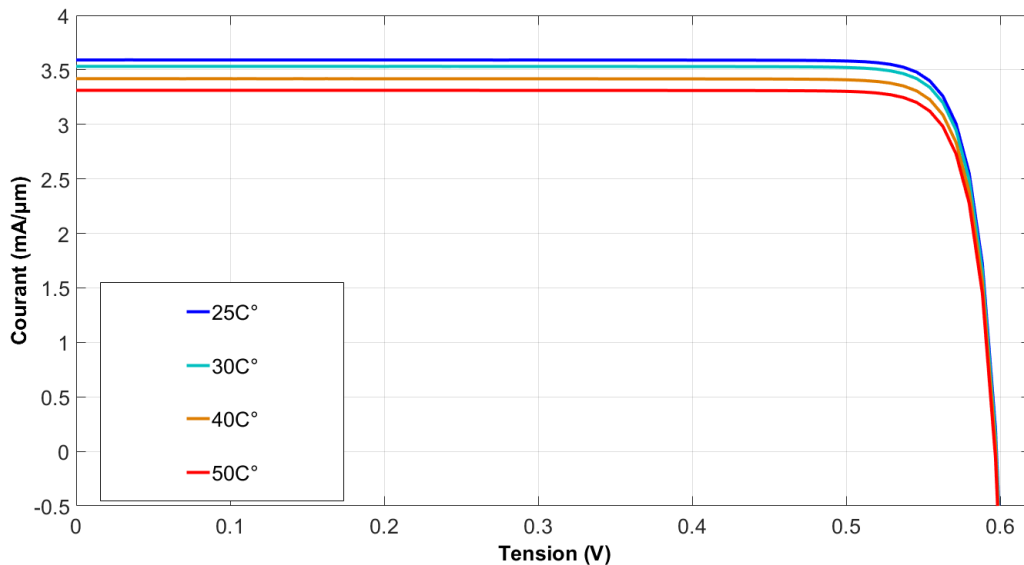


Figure (III.7) : Influence de la température sur la courbe $I=f(V)$

III.3.3.2. Effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

D'après la figure III.7, l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ fait diminuer légèrement la puissance du circuit ouvert délivrée par la cellule photovoltaïque.

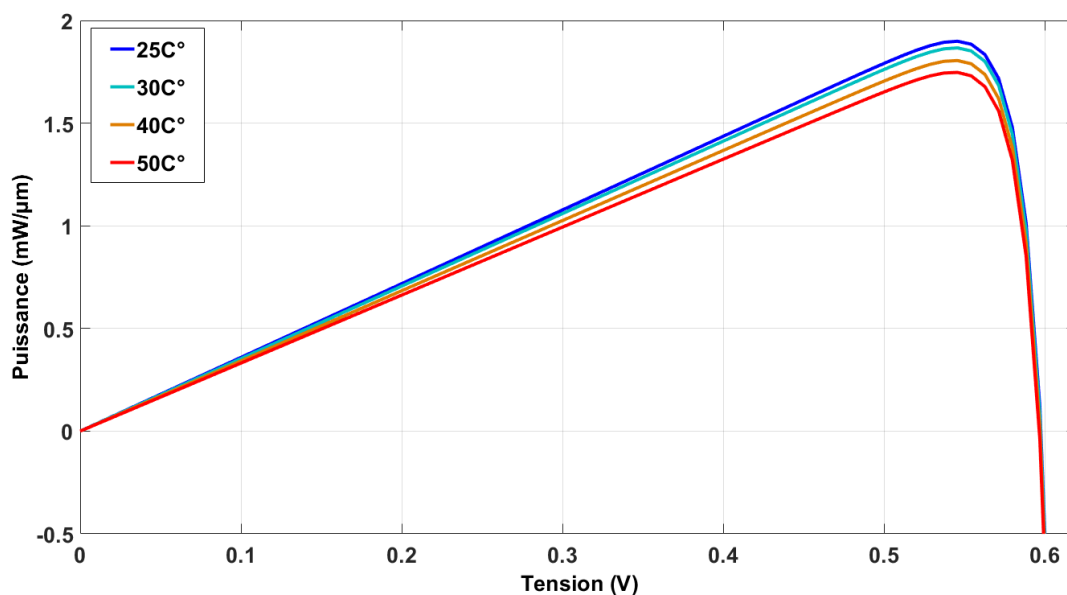


Figure (III.8) : Influence de la température sur la courbe $P=f(V)$

III.3.4. Effet de la température sur la concentration des porteurs des charges

La température est un facteur très influent sur la concentration des porteurs des charges, elle agit de manière significative sur leur mobilité. En effet la mobilité des porteurs est une fonction de la température lorsque cette dernière augmente, elle entraîne une diminution de mouvement superficiel des porteurs des charges. Les figures III.9 et III.10 montrent les variations des concentrations des porteurs (électrons-trous) sous l'effet de la température, d'après ces figures les concentrations des électrons et des trous diminuent lorsque la température augmente.

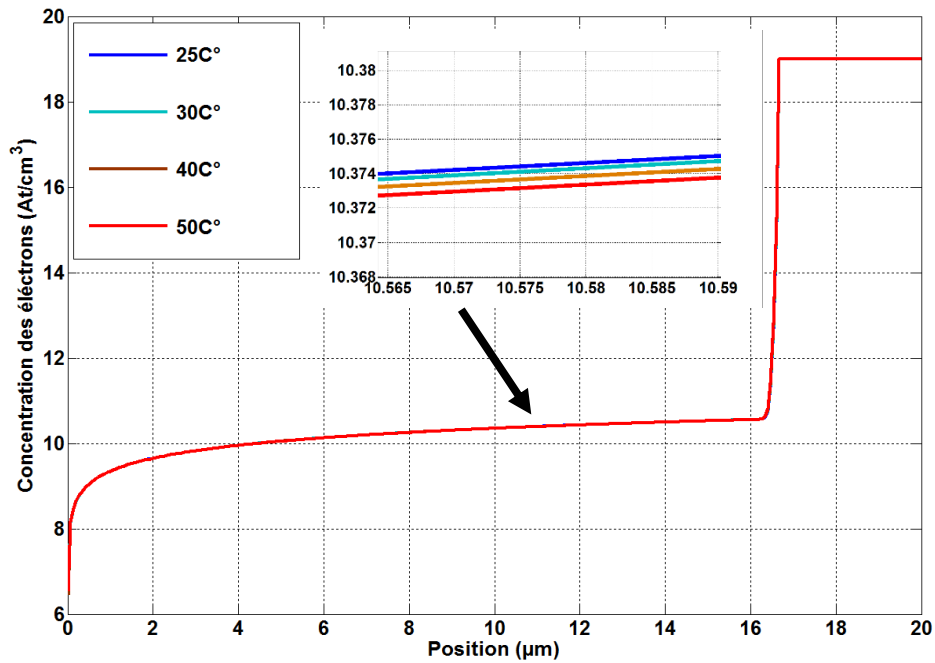


Figure (III.9) : effet de la température sur la concentration des électrons

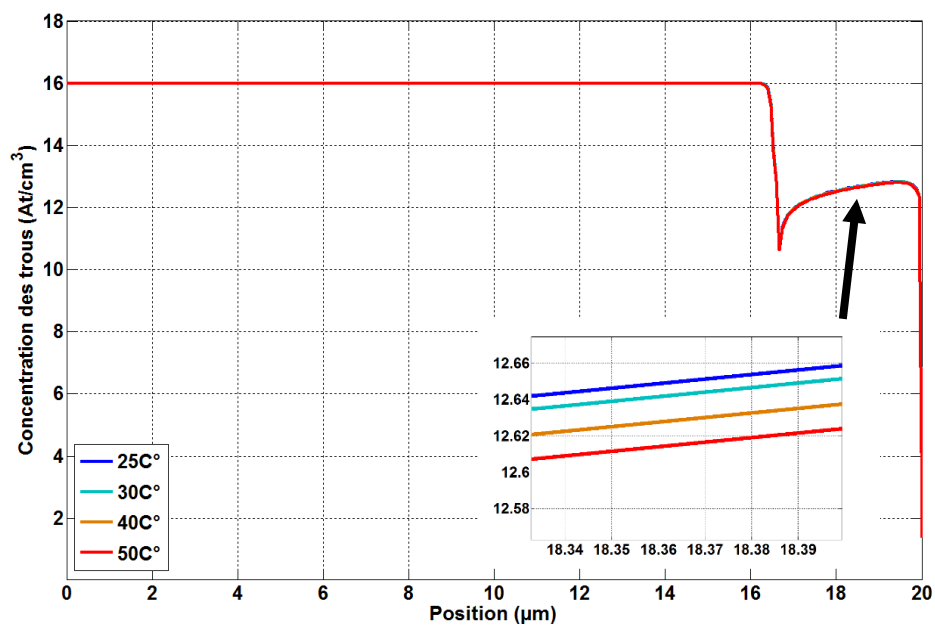


Figure (III.10) : effet de la température sur la concentration des trous

III.4. Les caractéristiques électriques de la cellule

A partir de la courbe courant-tension obtenue à 25°C représentée par la figure (III.5), nous avons pu énumérer les caractéristiques électriques de la cellule modélisée et ainsi les valeurs des pentes α et β . Ces caractéristiques et ces valeurs des pentes se retrouvent dans le tableau III.1 ci-dessous.

Caractéristiques électriques	valeurs
Tension V_{oc}	0.597 V
Courant I_{sc}	3.59 mA
Courant I_{mpp}	3.4775 mA
Courant V_{mpp}	0.5458 V
La pente α	-0.02
La pente β	-39.0237

Tableau (III.1) : les caractéristiques électriques de la cellule

III.5. Résultats de la résolution du système paramétrique (I.1)

Le système (I.1) présenté dans le premier chapitre, est un système d'équation non linéaire dont la résolution nous permettra d'obtenir les 5 paramètres de la cellule photovoltaïque modélisée. En effet en programmant ces équations dans MATLAB par la méthode de Newton-Raphson, nous avons pu déterminer les valeurs de ces 5 paramètres qui se résument dans le tableau (III.2) et en même temps nous avons retracé les courbes caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule.

Paramètres	Valeurs
Courant I_{ph}	3.5913 mA
Courant I_0	$2.9002 \cdot 10^{-10}$ mA
Facteur d'idéalité n	1.2067
Résistance série R_s	0.0184 Ω
Résistance parallèle R_p	49.9819 Ω

Tableau (III.2) : les paramètres de la cellule

III.5.1. Les courbes caractéristiques I(V) et P(V)

Les courbes de courant en fonction de la tension et de puissance en fonction de la tension dont nous évoquons dans cette section s'agissent des courbes issues de la résolution du système I.1 par la méthode de Newton-Raphson dans le logiciel MATLAB. Ces courbes sont présentées respectivement par les figures III.11 et III.12 ci-dessous.

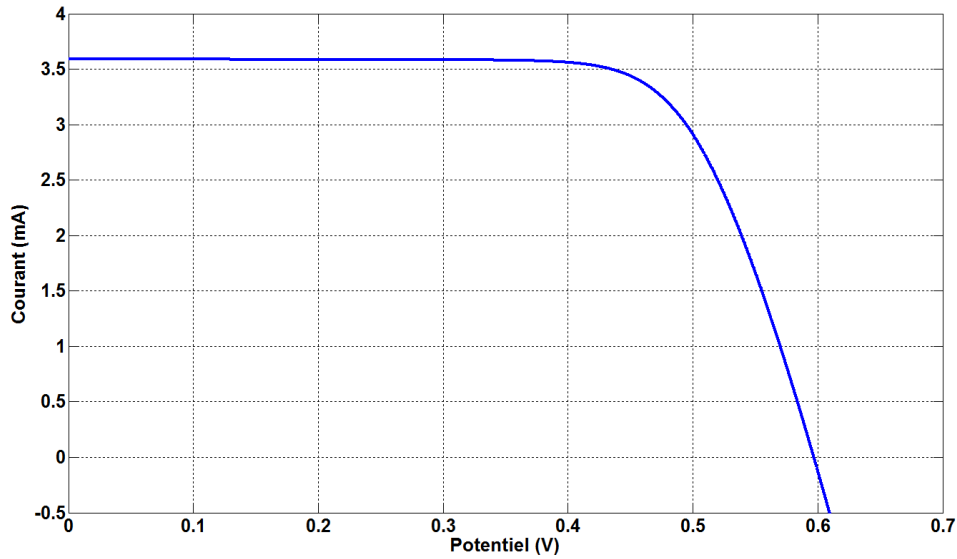


Figure (III.11) : La courbe caractéristique courant-tension, $I(V)$

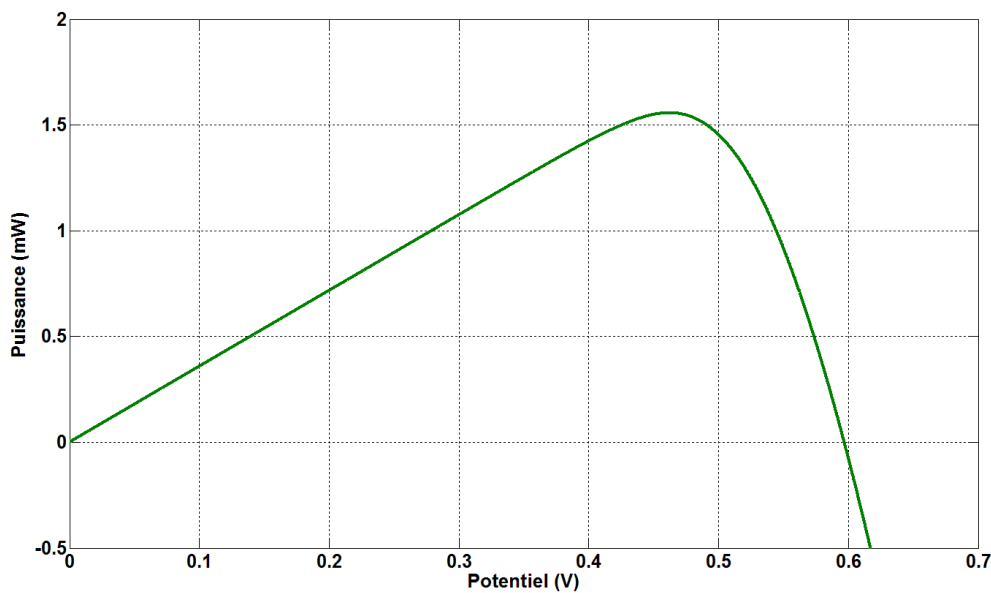


Figure (III.12) : La courbe caractéristique puissance-tension, $P(V)$

III.5.2. Influence de la température sur les courbes caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$

Dans cette section, nous discutons de l'influence de la température sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$ issues de la résolution du système I.1. La température est un facteur très influent sur le rendement d'une cellule solaire photovoltaïque, les figures III.13 et III.14 décrivent l'effet de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule. La figure III.13 décrit l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension, d'après cette figure on peut remarquer que lorsqu'on fait varier la température de 25°C à 50°C, la tension circuit-ouvert de la cellule subit une réduction considérable. Quant à la figure III.14, elle décrit l'effet de la température sur la courbe puissance-tension, d'après cette figure on constate que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension circuit-ouvert qui s'accompagne d'une chute du point de fonctionnement maximal de la photopile.

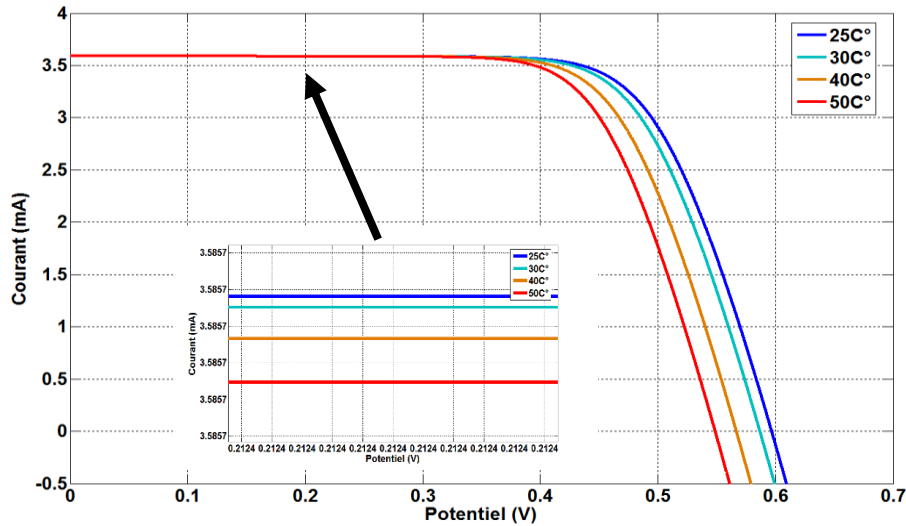


Figure (III.13) : Effet de températures sur la courbe caractéristique courant-tension, $I(V)$

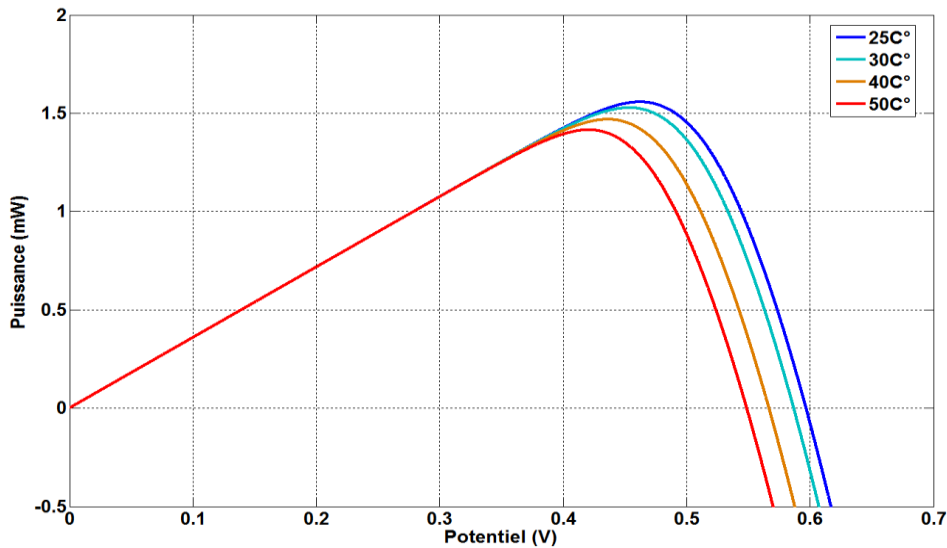


Figure (III.14) : Effet de températures sur la courbe caractéristique puissance-tension, $P(V)$

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué la simulation de la cellule photovoltaïque choisie, cette simulation nous a permis d'obtenir les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension de deux façons différentes. Premièrement ces courbes ont été déterminées à partir de l'approximation par différence finie grâce à laquelle nous avons pu déduire les caractéristiques électriques de la photopile, et deuxièmement nous avons utilisé le système paramétrique issu de circuit équivalent ce qui a permis de retrouver les 5 paramètres du modèle mathématique présenté dont la détermination est l'objectif principal de ce travail.

A noter que les courbes caractéristiques du courant en fonction de la tension et de la puissance en fonction de la tension issues de l'approximation par différence finie sont beaucoup moins précises que celles obtenues à partir de la résolution du système paramétrique des équations non linéaires I.1. Cela est dû au fait que la méthode des différences finies est une méthode approximative ce qui fait en sorte que ses résultats sont moins précis.

Conclusion générale

2. Conclusion générale

L'intérêt porté sur les énergies renouvelables nous a amené à nous intéresser à l'énergie solaire photovoltaïque. Le travail présenté dans ce mémoire de master concerne la modélisation numérique d'une cellule solaire photovoltaïque, le modèle utilisé est celui de dérive-diffusion sur lequel est appliquée une méthode purement numérique qui est celle des différences finies.

Avant d'aborder proprement cette problématique dite de modélisation numérique, nous avons effectué un rappel de base sur l'énergie solaire photovoltaïque, ce rappel concerne non seulement le principe de la conversion d'une cellule photovoltaïque mais aussi les différentes technologies de ces cellules avec leur potentiel. Il était en effet important pour notre projet de recherche de connaître les différents types des cellules solaires, cela nous permettra d'avoir une vision globale des avancées technologiques actuelles et futures afin de pouvoir anticiper les besoins et ainsi donner notre propre avis sur le développement photovoltaïque.

Pour pouvoir effectuer la modélisation numérique d'une cellule photovoltaïque qui est l'objet de notre travail, la première des choses à faire c'est de définir un circuit électrique de la cellule à modéliser dans notre cas nous sommes partis sur un circuit équivalent à une diode, c'est le circuit sur lequel s'appuient les constructeurs enfin de tirer les caractéristiques électriques de leurs photopiles. Ensuite vient le choix de modèle physique considéré pour la modélisation, pour notre cas nous avons choisi d'utiliser le modèle de dérive-diffusion qui est une méthode de simulation couramment employée pour décrire les comportements des porteurs des charges dans les matériaux semi-conducteurs.

Ce modèle s'appuie sur la résolution des équations de dérive-diffusion qui sont des équations aux dérivées partielles auxquelles nous avons appliqué la méthode des différences finies enfin de les résoudre, l'application de cette méthode à ces équations nous a permis d'aboutir à des systèmes matriciels après une étape de normalisation et de discrétisation ou de la mise sous la forme itérative.

Enfin nous avons programmé ces systèmes dans le logiciel MATLAB ce qui nous a permis de tracer d'une part la distribution du potentiel électrostatique et les concentrations des porteurs des charges en fonction de la position et d'autre part les courbes de la caractéristique courant en fonction de la tension et de la puissance en fonction de la tension.

Comme que les caractéristiques électriques d'une cellule solaire photovoltaïque sont très dépendantes des conditions météorologiques, nous avons pu étudier l'influence de l'une de ces conditions à savoir la température sur ces courbes. De la courbe caractéristique courant-tension à 25°C nous avons déterminé les caractéristiques électriques de la cellule. Grâce à ces caractéristiques et via la résolution du système I.1 par la méthode de Newton-Raphson, nous avons pu obtenir les 5 paramètres inconnus et en même temps retracer les courbes I-V et P-V de la cellule, ces dernières sont beaucoup plus précises que les précédentes. Cela est dit d'une part à la précision de la méthode de Newton-Raphson et d'autre part à l'approximation par différence finie qui ne donne que des résultats approchés.

Références bibliographiques

3. Références bibliographiques

- 1- **Baldwin Cortés*, Roberto Tapia Sánchez, Juan J. Flores**, “ Caractérisation of a polycrystalline photovoltaic cell using artificial neural networks ”, *Solar Energy* 196 157–167, (2020).
- 2- **S. Labiod**, “ Contribution à l’étude de perturbations électromagnétiques sur des composants MOS en Utilisant la méthode FDTD ”, Thèse de doctorat, Université Constantine 1, (2013).
- 3- **Shuijia. Li, Qiong Gua, Wenyin Gong, Bin Ninga**, “ An enhanced adaptive differential evolution algorithm for parameter extraction of photovoltaic models ”, *Energy Conversion and Management* 205, 112443, (2020).
- 4- **K.Nishioka, N.Sakitani, K.Kurobe, Y.Yamamoto. Y.Ishikawa, Y.Uraoka, T.Fuyuki**, “ Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells using modified equivalent circuit model ”, *Journal Appliqué de physique*, vol. 42, pp: 7175-7179, (2003).
- 5- **Claude Lahache**, “ énergie solaire”, *Spectre du rayonnement solaire en haute atmosphère* « Source CNRS ; Institut National des Sciences de l’Univers ».
- 6- **Claude Lahache**, “ énergie solaire”, *Absorption et réflexion du rayonnement solaire par l’atmosphère* « Source CNRS ; Université de Lyon ; Géosciences ».
- 7- **Driss Saadaoui, Mustapha Elyaqouti, Khalid Assalaou, Driss Ben hmamou, Souad Lidaighbi**, “ Parameters optimization of solar PV cell/module using genetic algorithm based on non-uniform mutation”, *Energy Conversion and Management: X* 12 (2021) 100129.
- 8- **José Miguel Navarro**, “ Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible” Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- 9- **Inj. Meziane Zahra**, “ Modélisation de modules photovoltaïque”, Mémoire master, Université de Batna, (2012).
- 10- **Helali Kamelia**, “ Modélisation d’une cellule solaire photovoltaïque et étude comparative”, Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, (2012).
- 11- **Manel meciad**, “ Modélisation et optimisation d’une cellule solaire à base de SiGe en utilisant la méthode des différences finies ”, Mémoire de master, Université de Skikda, (2023).
- 12- **Zouache Foudil**, “ Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques”, Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, (2009).
- 13- **Derbal**, “Cellules solaires photovoltaïques plastiques nanostructurées”, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d’Angers, (Juillet 2009).
- 13-**H. Mathieu**, “Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques”, 2ème Edition, Masson, (1990).
- 14- **SAFA Nacira**, “ Résolution numérique de l’équation de type dérive-diffusion et l’équation de Poisson: Application à l’étude d’une jonction PN ”, Mémoire de magister, Université Ibn Khaldoun - Tiaret, (2019).
- 15- **S. M. Ph.D**, “ Numerical Methods for Partial Differential Equations: Finite Difference and Finite Volume”, *Methods* 1 edition. Amsterdam: Academic Press, 2016.
- 16- **C.M. Snowden**, “Introduction To Semiconductor Device Modelling”, World Scientific, (1986).

- 17- P. A. Markowich**, “Semiconductor equations”, Wien-New York, Springer-Verlag, ISBN: 3211821570, (1989).
- 18- D. Hadjli**, “ Modelisation et Simulation Tridimensionnelle des Tomposants a Semiconducteur de Taille Submicronique ”. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, (1999).
- 19- M. M. Nadjib, H.C. Eddine** “ Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ”. Master académique, université Kasdi Merba-Ouargla, (2013).
- 20- Kwok K. Ng**, “Physics Of Semiconducteur Devices”, Third Edition, A John Wiley& Sons, Inc, Publication, ISBN: 0-471-14323-5, (2007).
- 21- S. Selberherr**, “Analysis And Simulation Of Semi-Conducator Devices”, New York, Springer-Verlag, (1984).
- 22- K. Yamaguchi**, “Field-Dependent Mobility Model For Two-Dimensional Numerical Analysis Of MOSFET’s”, IEEE Trans Electron Devices, Vol. 26, pp. 1068–1074, (1979).
- 23-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).
- 24- Dr. BELAID LALOUNI Sofia** “ Cours Energie Solaire Photovoltaïque”, Université A.MIRA de BEJAIA, (2015).
- 25- 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).
- 26- 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, (1975).
- 27- H. Mohamed**, “ Etude simulation d’un générateur de panneau photovoltaïque ”, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar de Annaba (2019).
- 28- D. L. Schafetter and H. K. Gummel**, “Large-Signal Analysis Of A Silicon Read Diode Oscillator”, IEEE Transaction on Electron Devices, pp. 64-77, (1969).
- 29- Dieter K. Schroder**, “Semiconductor Material And Device Characterization”, Third Edition, A JOHN WILEY& SONS, INC, Publication, ISBN: 0-471-73906-5, (2006).
- 30- Cours, cellules solaire photovoltaïque**, “ Document, chapitre 1 - 2024-03-04T163054.638 (1)289 ”.
- 31- Chapitre I, Modélisation d’un panneau solaire**, “ Document, unlicensed-introduction-gc3a9nc3a9rale-flash-disc (1)550-(2012).