



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

---

**Développement et optimisation d'un modèle numérique pour la simulation d'une cellule solaire à base silicium**

---

Présenté par :  
REGUIG Meriem

Soutenu le: 30 juin 2025      devant le jury composé de:

TABET Ismail	MCA	Université de Skikda	Président
LABIOD Samir	MCA	Université de Skikda	Rapporteur
CHELIREM Tayeb	MCB	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

## **Remerciement**

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Monsieur Samir  
LBIOD.*

*Professeur de Physique à l'université de 20 août 1955, Skikda, pour sa patience, sa  
disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, toutes les personnes qui par  
leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de répondre à mes  
questions durant mes recherches.*

*Je remercie mes très chers parents, Abdelkader et Farida, qui ont toujours été là pour moi. Je  
remercie ma sœur Amina, et mes frères Fouzi, Mehdi Omar et Zakaria pour leurs  
encouragements.*

*Enfin, je remercie tous mes Collègues qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien  
inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.*

*À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

# Sommaire

## Table des matières

Introduction général	1
<b>Chapitre I : état de l'art sur les cellules photovoltaïques</b>	
I.1 Introduction	2
I.2 Histoire du photovoltaïque	2
I.3 Le rayonnement solaire	4
I.3.1 Composition du rayonnement solaire	5
I.3.1.1 Rayonnement direct	5
I.3.1.2 Rayonnement diffus	5
I.3.1.3 Rayonnement réfléchi (l'albéro)	5
I.3.1.4 Rayonnement global	6
I.4 Spectre du rayonnement	7
I.5 Avantage et inconvénients du système solaire photovoltaïque	8
I.6 Cellule photovoltaïque	8
I.6.1 La cellule photovoltaïque	8
I.6.2 La structure	8
I.6.3 Principe de fonctionnement	9
I.7 Caractéristique de photovoltaïque	10
I.7.1 Les cellules monocristallines	10
I.7.2 Les cellules poly-cristallines	11
I.7.3 Les cellules amorphes	11
I.8 Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV	12
I.8.1 La courbe courant-tension d'une cellule PV	12

I.8.2 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	12
I.8.3 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )	12
I.8.4 La puissance caractéristique d'une cellule PV	13
I.8.5 La puissance max	13
I.8.6 Facteur de forme	14
I.8.7 Rendement de conversion d'énergie	14
I.8.8 Réponse spectrale	14
I.9 Caractéristique électrique d'une cellule PV	16
I.9.1 Circuit électrique idéal	16
I.9.2 Schéma équivalent d'une cellule	16
I.9.3 Schéma bloc d'une cellule PV	18
I.10 Conclusion	18

## **Chapitre II : modélisation et optimisation numérique d'une cellule PV**

II.1 Introduction	19
II.2 Résolution des problèmes aux dérivées paratielles	19
I.2.1 Méthodes partiels	19
I.2.1.1 La méthode des éléments finis	19
I.2.1.2 La méthode des différences finis	19
I.2.1.3 Principe de la méthode des différences finis	20
II.3 Normalisation du modèle dérive-diffusion	21
II.4 Conditions aux limites	23
II.4.1 Conditions aux contacts	23
II.4.2 Conditions aux autres frontières	23
II.5 Discrétisation du modèle semi-conducteur	23

II.6 Solution du Newton-Raphson de l'équation de poisson	24
II.6.1 Système d'équations obtenues	26
II.6.2 Solution initiale	26
II.6.3 Solution finale	27
II.7 Conclusion	30

### **Chapitre III : simulations numérique d'une cellule PV et résultats obtenus**

III.1 Introduction	31
III.2 Structure considérée	31
III.3 Elaboration du maillage	31
III.4 Résultats obtenus	32
III.5 Les courbes caractéristiques électrique I(V) et P(V)	34
III.6 Les caractéristiques électrique de la cellule	35
III.7 Extraction des paramètres intrinsèques	36
III.8 Conclusion	37
Conclusion général	38
Références bibliographiques	39

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.3</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire	4
<b>Figure I.3.1</b> : Différents composants de rayonnement	5
<b>Figure I.3.1.4</b> : Appareils de mesure	7
<b>Figure I.4</b> : Spectre solaire hors atmosphère	8
<b>Figure I.6.2</b> : La structure de cellule PV	9
<b>Figure I.6.3</b> : Principe de l'énergie photovoltaïque	9
<b>Figure I.6</b> : principe de fonctionnement d'une cellule PV	10
<b>Figure I.7</b> : Monocristallines	11
<b>Figure I.7</b> : Cellule Poly-cristallines	11
<b>Figure I.7</b> : Cellule amorphes	11
<b>Figure I.8.4</b> : Puissance d'une cellule photovoltaïque	13
<b>Figure I.8.5</b> : Puissance max d'une cellule PV	14
<b>Figure I.8.8</b> : Réponse spectrale	15
<b>Figure I.9.1</b> : Schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque	16
<b>Figure I.9.2</b> : Schéma électrique équivalent de cellule photovoltaïque	17

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Évaluation d'une dérivée	20
<b>Figure II.2</b> : Algorithme de base pour la détermination de la solution initiale au niveau de cellule photovoltaïque	27
<b>Figure II.3</b> : Algorithme de base pour la détermination de la solution finale au niveau de cellule photovoltaïque	29

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Structure simulée	31
---	----

<b>Figure III.2 :</b> Erreur relative des électrons dans l'échelle logarithmique	32
<b>Figure III.3 :</b> Structure simulée	33
<b>Figure III.4 :</b> Distribution du potentiel électrostatique	33
<b>Figure III.5 :</b> Concentration des électrons normalisée dans l'échelle logarithmique	34
<b>Figure III.6 :</b> <i>Concentration des trous normalisée dans l'échelle logarithmique</i>	34
<b>Figure III.7 :</b> Caractéristique courant-tension, $I(V)$	35
<b>Figure III.8 :</b> <i>Caractéristique puissance-tension, <math>I(V)</math></i>	35

#### **Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1 :</b> Longueurs d'ondes et spectre lumineux	5
<b>Tableau I.3 :</b> Quelques valeurs d'albédo	6
<b>Tableau II.1 :</b> Tableau des normalisations des constantes	22
<b>Tableau III.1 :</b> Les caractéristiques électriques de la cellule	36
<b>Tableau III.2 :</b> Les paramètres de la cellule	36

# Introduction générale

## Introduction générale

### Introduction générale

L'énergie renouvelable occupe aujourd'hui une place essentielle dans la transition énergétique mondiale. Elle se distingue par sa capacité à se régénérer naturellement à un rythme au moins équivalent à celui de la consommation, permettant ainsi de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les émissions polluantes dans l'atmosphère. Parmi les différentes formes d'énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque s'impose comme l'une des solutions les plus prometteuses. Elle repose sur la conversion directe de la lumière du soleil en électricité grâce à des matériaux semi-conducteurs, offrant ainsi une alternative propre et durable aux sources d'énergie traditionnelles.

La modélisation des dispositifs photovoltaïques (PV) constitue un outil essentiel pour optimiser le rendement des composants PV tout en réduisant les coûts de fabrication. Grâce à ces modélisations, il est possible d'analyser l'impact de différents paramètres physiques sur les performances des dispositifs et de concevoir de manière optimale divers types de structures, afin d'obtenir un rendement théorique maximal. Actuellement, plusieurs logiciels de simulation des dispositifs PV, accessibles librement, sont disponibles. Dans ce travail, nous commençons par une étude de l'état de l'art sur la simulation bidimensionnelle des dispositifs solaires, en mettant l'accent sur les outils utilisés par la communauté scientifique. Ensuite, nous détaillons les étapes du transport dans les semi-conducteurs, en abordant les phénomènes d'absorption, de diffusion, ainsi que l'interface entre les différentes couches qui constituent la structure. Nous abordons également le développement du modèle numérique de la simulation des dispositifs PV, en nous focalisant sur le modèle général. Nous présentons les équations mathématiques indispensables à la simulation, ainsi que les conditions aux interfaces et aux frontières. Enfin, la solution auto-cohérente du problème non linéaire couplé sera exposée, de même que les méthodes linéaires associées employées pour résoudre les systèmes obtenus.

Dans ce troisième chapitre, nous présenterons le développement d'un modèle numérique rapide destiné à la simulation bidimensionnelle d'une cellule photovoltaïque, en s'appuyant sur la méthode de Newton-Raphson. L'objectif principal de cette simulation est de résoudre les équations permettant de déterminer la concentration des électrons et des trous libres. À partir de ces résultats, nous pourrons ensuite calculer les paramètres essentiels tels que les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V). Par la suite, nous déterminerons, à partir de ces caractéristiques, la tension de circuit ouvert, le courant de court-circuit, la puissance maximale, le facteur de forme ainsi que les paramètres intrinsèques du circuit équivalent.

Chapitre I :  
Etat de l'art sur les cellules  
photovoltaïques

### I.1 Introduction

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation. Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère. Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle.

L'une des sources d'énergie les plus utilisées à l'heure actuelle est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure.

C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez. En France il existe un prix du kilowattheure solaire et vous pouvez consommer et vendre du courant photovoltaïque. L'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires.

### I.2 Histoire du Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en **1839** par Alexandre Edmond Becquerel, un physicien français. Edmond a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein se pencha sur ce travail en **1905**, il publie un papier sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil.

## Chapitre I.....état de l'art sur les cellules photovoltaïque

Ce document explore l'effet photovoltaïque, technologie sur laquelle est fondé le panneau solaire. En **1913**, William Coblentz a posé le premier brevet pour une cellule solaire, mais il ne pourra jamais la faire fonctionner. En **1916**, Robert Millikan a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques avaient un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie [1].

Le premier panneau solaire a été construit en **1954** par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire. Ceux sont les satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années **1960** lors la course à l'espace. Les satellites ont besoin d'une source d'énergie fiable. L'énergie solaire est parfaite car c'est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite. L'industrie spatiale mis beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'était la première utilisation importante de la technologie solaire. Grâce à l'espace, les panneaux solaires ont prouvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué.

L'énergie solaire a eu un second élan au cours de la crise de l'énergie dans les années **1970**. Quand le prix du pétrole a augmenté de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques ont commencé à être utilisés pour la première fois dans les maisons. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies alternatives. L'énergie solaire est de nouveau en pleine essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts. L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays.

Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises investissent également. Les entreprises d'électricités et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans les panneaux solaires pour leur maison. De nouveaux types de panneaux solaires ont été développés : panneau solaire très fins et flexibles, des peintures solaires. L'objectif est de réduire très fortement le coût de l'énergie solaire. L'énergie solaire est l'énergie du futur.

### I.3 Le Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2  $\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain (2,5  $\mu\text{m}$ ). [2] L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de :

-9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 $\mu\text{m}$ ).

-47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ ).

-44% dans la bande des infrarouge (>0,8 $\mu\text{m}$ ).

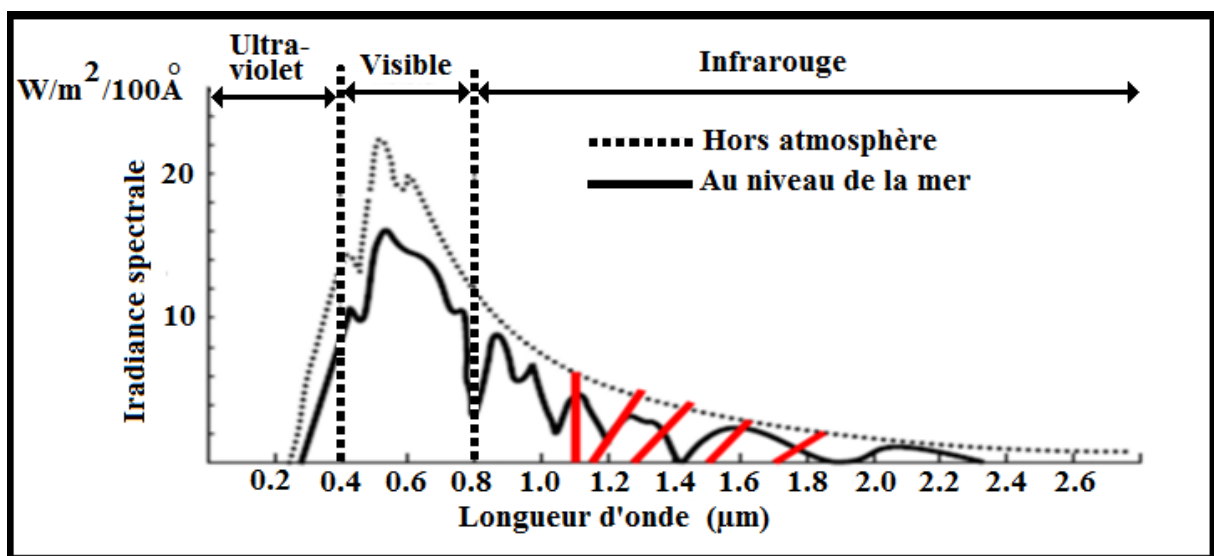


Figure I.3 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [2]

Le tableau 1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photos pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

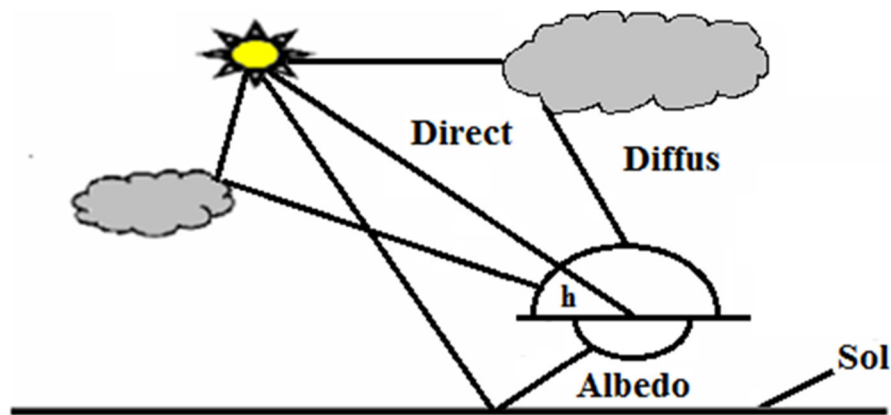
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{ph}(ev)$	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

**Tableau I.1 : Longueurs d'ondes et spectre lumineux [2]**

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photos et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

### I.3.1 Composition du rayonnement solaire

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit :



**Figure I.3.1 : Différents composants de rayonnement [3]**

#### I.3.1.1 Rayonnement direct

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [4].

#### I.3.1.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale [4]. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol.

#### I.3.1.3 Rayonnement réfléchi (L'albédo)

Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$L' \text{ albédo } ALB = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

## Chapitre I.....état de l'art sur les cellules photovoltaïque

Il y a quelques valeurs de L'albédo selon la surface du sol :

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

**Tableau I.3 :** *Quelques valeurs d'albédo [4]*

### I.3.1.4 Rayonnement global

Une surface horizontale : C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. [3] Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus.

Une surface inclinée : Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : Direct, Diffus et Réfléchi.

$$\text{Rayonnement Globale} = \left\{ \begin{array}{l} \text{rayonnement direct} \\ + \\ \text{rayonnement diffus} \\ + \\ \text{rayonnement réfléchi} \end{array} \right.$$

La figure suivante présente les appareils de mesure pour les différents types de rayonnement :



Figure I.3.1.4 : Appareils de mesure

## I.4 Spectre du Rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  : Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, [5] compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$  6.4%

Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  48.0%

Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$  45.6%

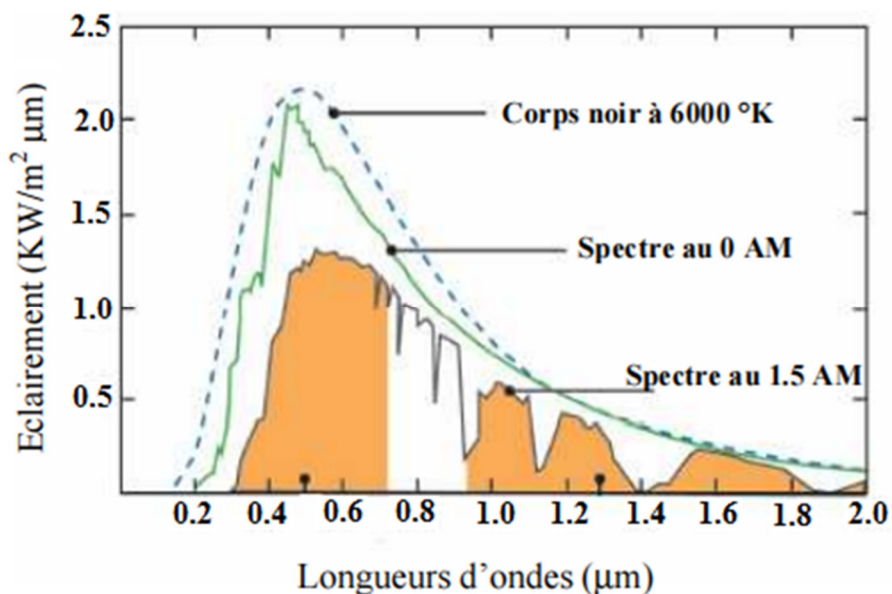


Figure I.4 : Spectre solaire hors atmosphère [5]

## I.5 Avantages et inconvénients du système solaire photovoltaïque

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>-Énergie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable</li><li>-Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine</li><li>-Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Coût dépendant de la puissance de crête</li><li>-Le rendement actuel des cellules photovoltaïque reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance</li><li>-Marché très limité mais en développement</li><li>-Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte [6]</li><li>-Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé)</li></ul>

## I.6 Cellules Photovoltaïque

### I.6.1 La cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, [7] produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

### I.6.2 La structure

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. [8] Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée.

Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont

incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.

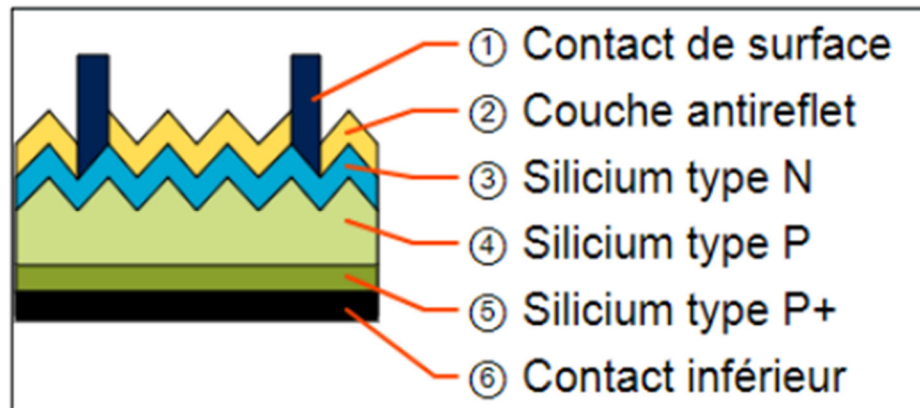


Figure I.6.2 : La structure de cellule PV [8]

### I.6.3 Principes de fonctionnement

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière » [9]. Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres «trous» où repositionner.

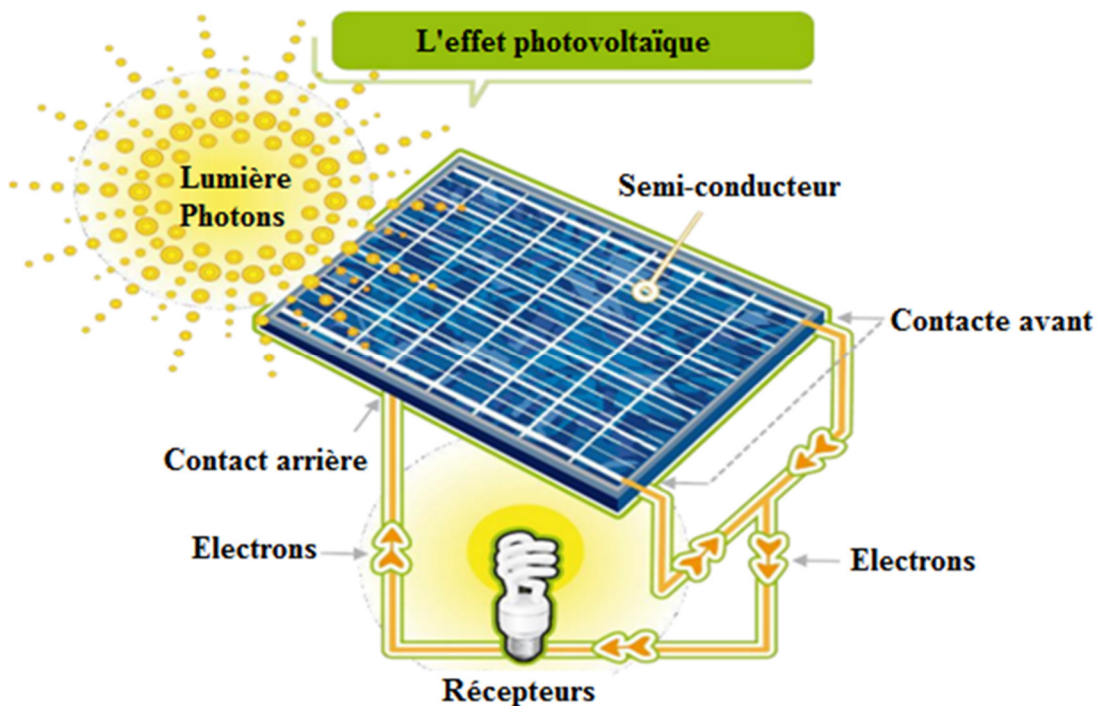


Figure I.6.3 : principe de l'énergie photovoltaïque [9]

## Chapitre I.....état de l'art sur les cellules photovoltaïque

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium.

La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. Voir le schéma :

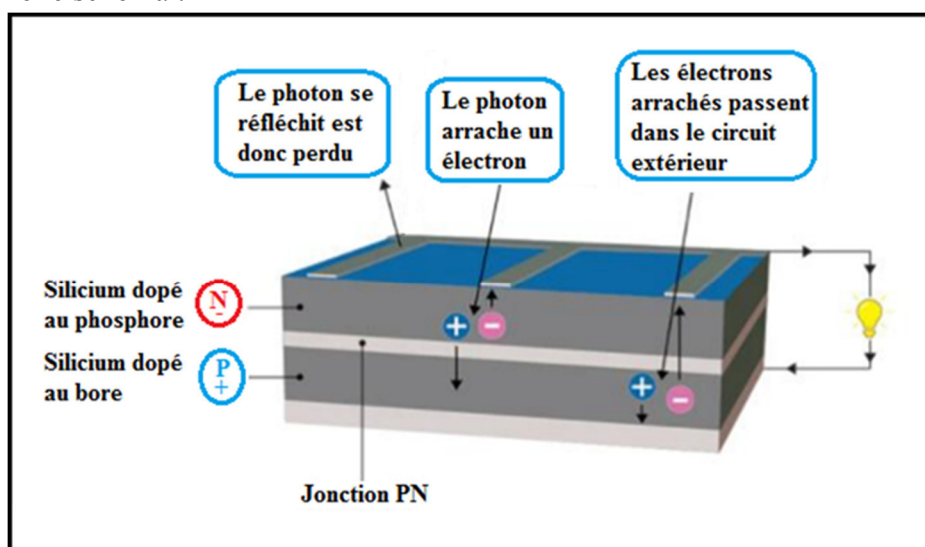


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [9]

### I.7 Caractéristique de Photovoltaïque

Les différents types des cellules solaires : Il existe trois types principaux de cellules :

#### I.7.1 Les cellules monocristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, [11] de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

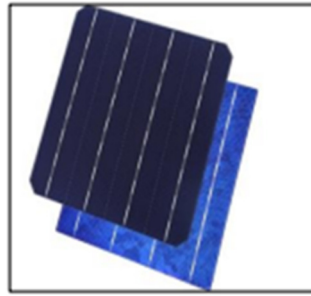


Figure I.7 : Monocristallines [11]

### I.7.2 Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors Hétérogènes. [12] Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo

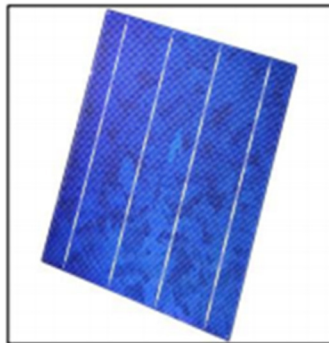


Figure I.7 : Cellule Poly-cristallines [12]

### I.7.3 Les cellules amorphes

Le silicium amorphe, est apparu en 1976. [10] Sa structure atomique est désordonnée, cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.



Figure I.7: cellules amorphes [10]

## I.8 Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque

### I.8.1 La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La courbe caractéristique  $I(V)$  d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le courant de court-circuit  $I_{cc}$  jusqu'au courant de la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  [14].

### I.8.2 Courant de court-circuit( $I_{cc}$ )

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) qui correspond à la photo courant ( $I_{ph}$ ) généré par le rayonnement [15].

Le courant de court-circuit (obtenu pour  $V = 0$ ). Pour une distribution spectrale donnée, cette photo courant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de pair électron trou générée  $G$  qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion  $L_n$  et  $L_p$ , donné par la relation :

$$I_{cc} = I_{ph} = q.G(L_n + L_p)$$

### I.8.3 Tension de circuit ouvert( $V_{co}$ )

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, [16] induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo-courant.

La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left( \frac{KT}{q} \right) \ln \left[ \left( I_{cc} / I_0 \right) + 1 \right]$$

### I.8.4 La puissance caractéristique d'une cellule Photovoltaïque

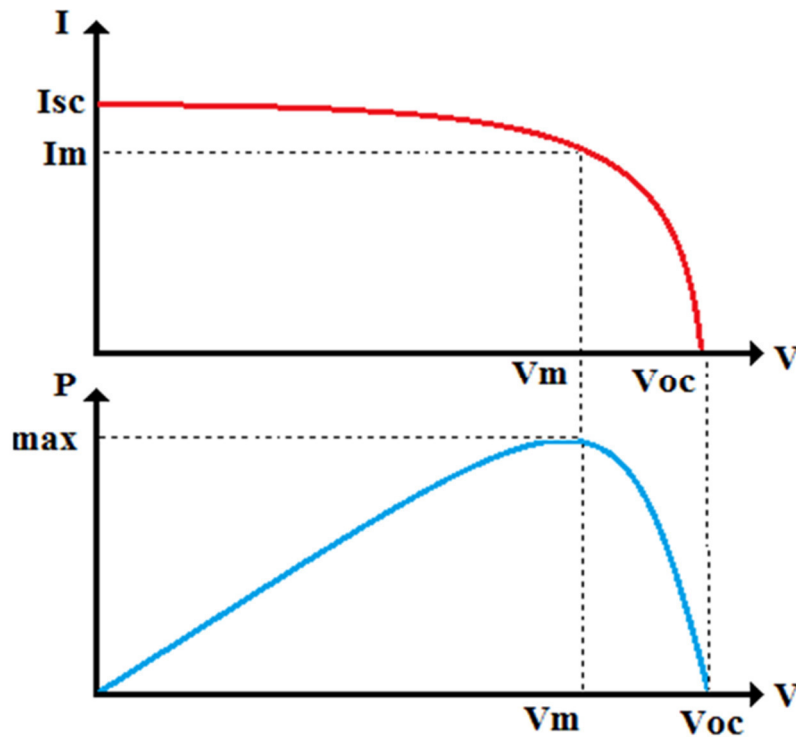


Figure I.8.4 : Puissance d'une cellule photovoltaïque

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant,...etc.), [17] la puissance électrique  $P$  disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni  $I$  par une tension continue donnée  $V$  :

$$P = V \cdot I$$

$P$  : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

$V$  : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I$  : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

### I.8.5 La puissance max

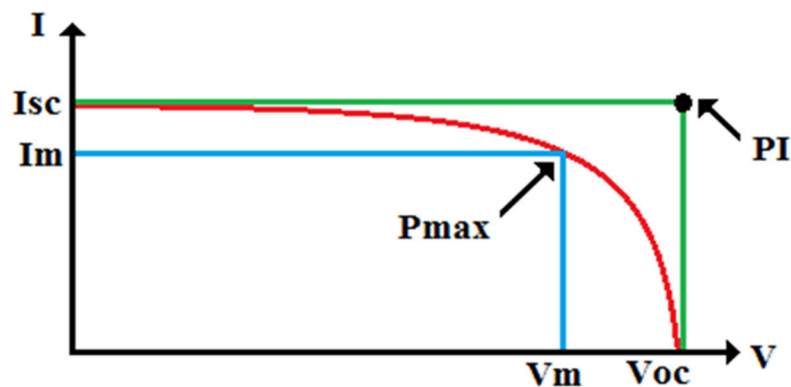


Figure I.8.5 : Puissance max d'une cellule PV

## Chapitre I.....état de l'art sur les cellules photovoltaïque

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale PI correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (Figure (I.8.5) :

$$PI = P_{\max} \text{ idéale} = V_{co} \cdot I_{cc}$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum  $V(P_{\max})$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I(P_{\max})$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{cc}$ .

$$P_{\max} = V_m \cdot I_m$$

### I.8.6 Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée  $P_{\max}$  et la puissance idéale PI, on le note :

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_I} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

### I.8.7 Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_0$ . [18] On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance  $P_0$  :

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_0} = FF \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_0}$$

### I.8.8 Réponse spectrale

La sensibilité des cellules solaires à la lumière traduite par la réponse spectrale, chaque longueur d'onde génère un photo-courant correspond au nombre de photons incidents ayant la même énergie sur la surface. La réponse spectrale est le rapport entre la densité de courant collecte et la densité de photons incidente, pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux. La réponse spectrale dépend beaucoup plus des propriétés optiques des matériaux solaires que de la distribution spectrale de la lumière reçue, [19,20] son optimisation exige une amélioration au niveau de la surface avant et même arrière (Light Trapping).

Les deux formes de la réponse spectrale (IQE, EQE) sont fortement liées à la recombinaison en surface et en volume, à la longueur de diffusion des porteurs et à l'épaisseur de la région concernée. Supposons que le flux de photons incidents est  $F(\lambda)$ , une portion de ce flux se réfléchit, si  $R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde  $\lambda$  et la partie  $F(\lambda)[1-R(\lambda)]$  pénètre dans le matériau.

La réponse spectrale interne est définie comme le nombre de paires électron-trou collectés sous les conditions de court-circuit relatif au nombre de photons pénétrant dans le matériau :

$$SR(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} = \frac{Jp(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{Jn(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{Jdr(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]}$$

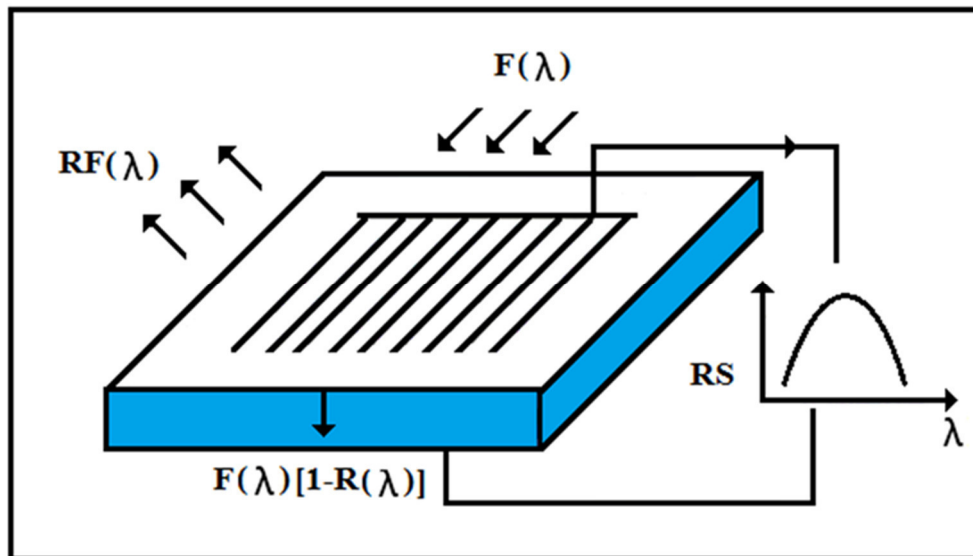


Figure I.8.8 : Réponse spectrale [19]

Cependant, la réponse spectrale externe n'est autre que la réponse interne, mais prend en compte la réflexion de la lumière au niveau de la surface avant, c'est-à-dire, le rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées par la jonction par unité de temps et de surface et le nombre de photons incidents par unité de temps et de surface .

$$SR(\lambda)_{ext} = SR(\lambda)[1 - R(\lambda)] = \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)}$$

$$SR(\lambda)_{ext} = (1 - R - T)SR(\lambda)_{int}$$

Où :

T : représente la transmission des photons à travers le matériau solaire. On introduit aussi la notion de sensibilité spectrale  $SS$  (A /W), définie comme suit :

$$SS_{int}(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{F(\lambda)[1 - R(\lambda)]h\nu}$$

$$SS_{ext}(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{F(\lambda)h\nu}$$

La plupart des porteurs génèrent dans la base issue de longueurs d'onde longues à cause des mauvaises propriétés optiques du silicium. La contribution de la région de déplétion est considérable dans l'intervalle [2.0 - 2.9] eV pour une cellule de 1 Ohm-cm, mais n'atteint jamais la contribution de l'émetteur même si la résistivité de la base est plus élevée et la jonction plus étroite.

Cette contribution diminue pour des résistivités plus faibles et des jonctions plus larges. Dans un matériau solaire à gap indirect, par exemple, le silicium, la contribution majeure au courant total provient de la base. Les trois régions d'une cellule à base de silicium (gap indirect) contribuent au photo-courant comme suit :

- La base contribue par 85% photo-courant total ( $500\text{nm} < \lambda$ ).
- L'émetteur génère plus de 15% du courant total ( $\lambda < 400\text{nm}$ ).
- La contribution de ZCE est négligeable ( $400 < \lambda < 500\text{nm}$ ).

## I.9 Caractéristiques électriques d'une cellule Photovoltaïque

### I.9.1 Circuit électriques idéal

La cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique équivalent donnée par la figure (1-16) composé d'un générateur de courant et d'une diode parallèle. Le courant  $I$  généré par la cellule s'écrit alors [21].

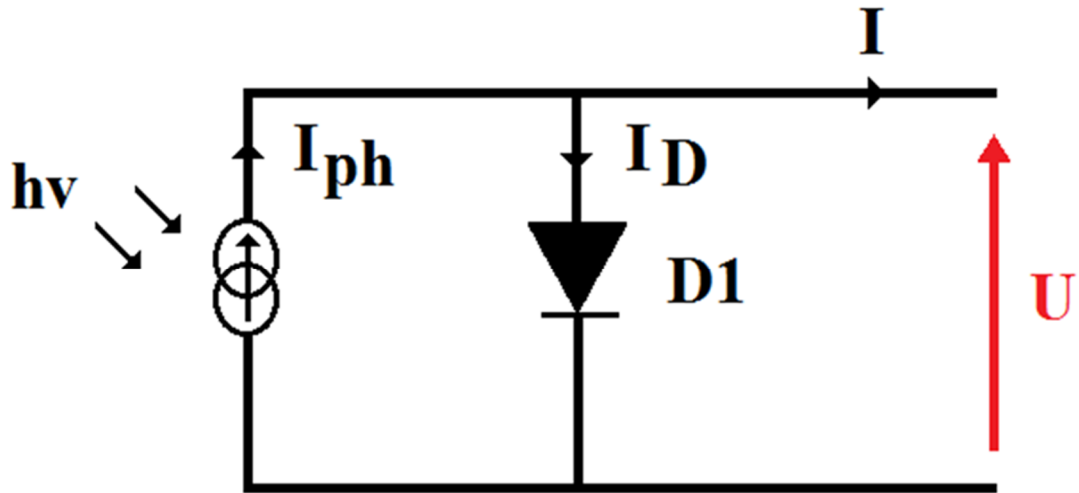


Figure I.9.1 : Schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque [21]

$$I = I_{ph} - I_D$$

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right)$$

$$I = I_{ph} - I_S \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right)$$

V : tension.

$K=1.38 \times 10^{-23}$  : constant de Boltzmann.

$Q=1.602 \times 10^{-19}$  : charge de l'électron.

T : température absolue en °K.

$I_S$  : Courant de saturation de la diode.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_D$  : Courant de la diode.

### I.9.2 Schéma équivalent d'une cellule

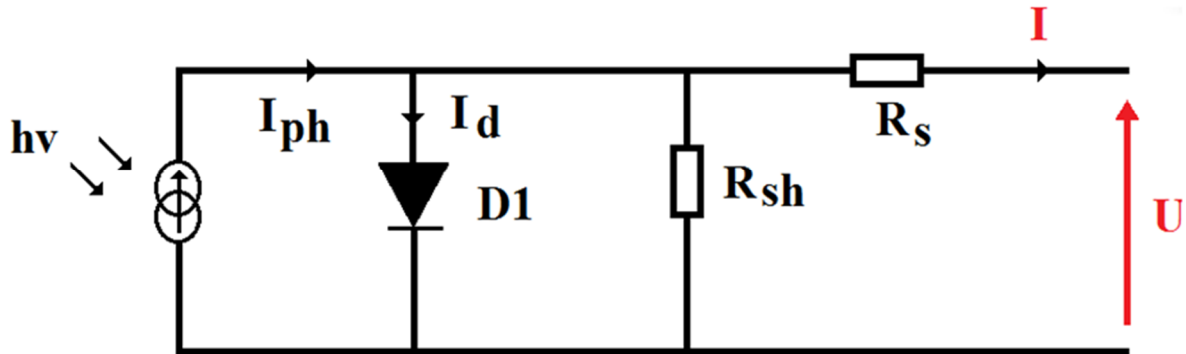
Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent

## Chapitre I.....état de l'art sur les cellules photovoltaïque

(Figure I.9.2) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant [22].

$R_s$  est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux.

$R_{sh}$  est une résistance parallèle liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques.



**Figure I.9.2 :** schéma électrique équivalent de cellule photovoltaïque

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{ph}$ , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{SC} \left( e^{\frac{q(U+R_s.I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{U + R_s.I}{R_{sh}}$$

$$I_d = I_{SC} \left( e^{\frac{q(U+R_s.I)}{KT}} - 1 \right)$$

Avec :

$U$  : tension aux bornes de la cellule.

$I_{ph}$  : photo courant, ou courant généré par l'éclairement.

$I_{SC}$  : courant de saturation de la diode.

$R_s$  : résistance série.

$R_{sh}$  : résistance shunt.

$K$  : constante de Boltzmann.

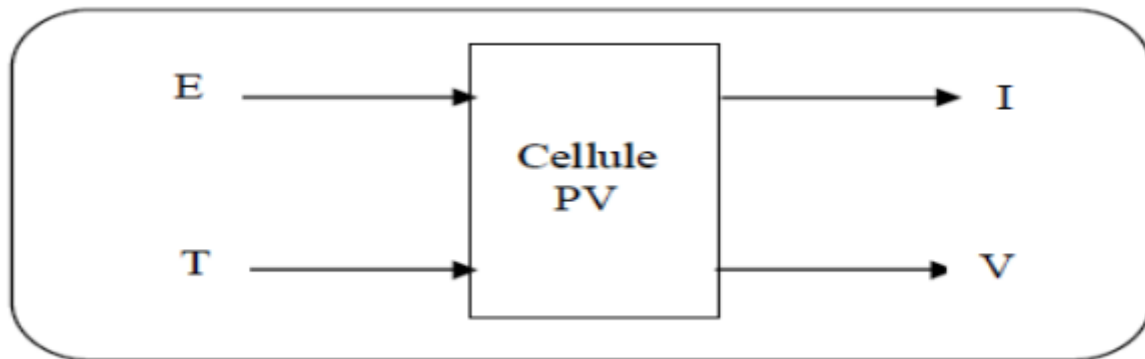
$q$  : charge de l'électron.

$T$  : température absolue de la cellule.

$I_d$  : courant de la diode.

### I.9.3 Schéma bloc d'une cellule Photovoltaïque

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres [23].



Avec deux variables d'entrée :

$E$  : ensoleillement dans le plan de la cellule ( $W/m^2$ ).

$T$  : température de la cellule ( $^{\circ}C$ ).

Et deux variables de sortie :

$I$  : intensité de courant fournie par la cellule (A).

$V$  : tension aux bornes de la cellule.

### I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque.

Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et avantages et inconvénients du système solaire photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

# Chapitre II : modélisation et optimisation numérique d'une cellule photovoltaïque

## II.1. Introduction

La modélisation de dispositifs photovoltaïques (PV) est un outil indispensable afin d'améliorer le rendement de ces cellules PV et aussi diminuer leur coût de fabrication. Ces modélisations permettent de mieux comprendre l'impact de différents paramètres physiques sur les performances de ces cellules, concevoir et optimiser différents types de cellules sans avoir systématiquement recours à des procédés expérimentaux qui peuvent s'avérer onéreux, évaluer le potentiel d'une structure et son rendement théorique maximum. Plusieurs logiciels de simulation des dispositifs PV sont actuellement disponibles, libres d'accès ou sous licence.

Dans ce chapitre, nous travaillerons sur le développement dans le modèle numérique de la simulation bidimensionnelle de la cellule solaire un logiciel MATLAB.

Nous commencerons par exposer les différentes formulations mathématiques indispensables à l'étude des phénomènes de transport dans les semi-conducteurs.

Ensuite, nous détaillerons les étapes préalables à la résolution numérique du modèle dérive-diffusion, telles que la réduction des équations à des formes sans dimensions, le choix des variables de base et la normalisation. Nous aborderons aussi le traitement des conditions aux interfaces et aux frontières.

Enfin, la solution auto-cohérente du problème non linéaire couplé sera présentée, ainsi que les méthodes employées pour résoudre les systèmes linéaires associés.

## II.2. Résolution des problèmes aux dérivées partielles

### II.2.1. Méthodes spatiales

Les équations qui décrivent le comportement des composants étudiés, en particulier la cellule photovoltaïque dans notre cas, sont posées. Nous allons utiliserons donc proposer une méthode numérique pour les résoudre.

Dans cette section, nous allons présenter différentes méthodes numériques permettant de résoudre des équations aux dérivées partielles qui modélisent des phénomènes physiques.

Pour passer d'un problème Continu exact, régit par une EDP (Équation Différentielle Partielle), à une version discrète approchée, il existe de nombreuses méthodes numériques, chacune étant mieux adaptée à un certain type de problèmes.

#### II.2.1.1. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à approximer une fonction en l'interpolant sur des sous-ensembles du domaine de calcul [24].

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

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

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

#### II.2.1.2. La méthode des différences finies

La méthode des différences finies a été développée par A. Thom [25]. Elle nécessite de définir un maillage de l'espace défini par le système physique à modéliser (chaque cellule du maillage contient alors les constantes physiques du matériau mis en jeu).

On approxime ensuite les EDP régissant ce système avec le principe des différences finies en les transformant en un système d'équations linéaire.

## Chapitre II.....modélisation et optimisation numérique d'une cellule photovoltaïque

Enfin, on résout les équations en chaque point du maillage en prenant en compte les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites du système.

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

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

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

### II.2.1.3. Principe de la méthode des différences finies

L'ordinateur ne connaît pas la continuité mathématique, alors l'obtention d'expressions programmables passe donc par la discrétisation des formulations considérées. Les dérivées partielles spatiales et temporelles du modèle derive-diffusion peuvent être traitées par la technique des différences finies [26].

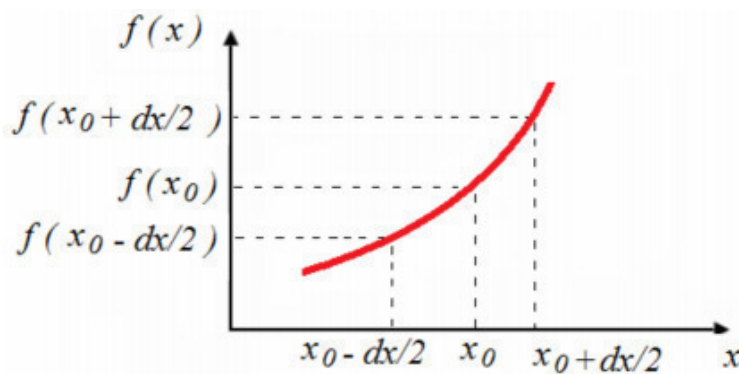


Figure II.1 : Évaluation d'une dérivée

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

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

La dérivée peut être obtenue de différentes manières :

- Soit par une approximation par différence «progressive»

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

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

- Soit par une approximation par différence «rétrograde»

## Chapitre II.....modélisation et optimisation numérique d'une cellule photovoltaïque

A partir de l'équation (2.9) on aura :

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

- Soit par une approximation par différence «milieu»

La soustraction des équations (2.8) et (2.9) permet d'avoir :

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

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

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

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

Alors

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

Ce qui permet d'écrire finalement

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

### II.3. Normalisation du modèle dérive-diffusion

Les variables choisies présentent des ordres de grandeurs très différents dont la dynamique peut être recentrée par une étape de normalisation des principales variables [27]. Celles-ci sont résumées dans le tableau (II.1).

Grandeurs	Variables	Unité	Facteur de Normalisation	Ordre de Grandeurs
Distance	L	m	$L = \sqrt{\frac{\varepsilon U_T}{qn_i}}$	$0.34 E^{-5}$
Potentiel électrique	$U_t$	V	$U_T = \frac{K.T}{q}$	0.0258
Concentration	$n, p, N_D, N_A$	At/cm <sup>3</sup>	$n_i$	$1.48 E^{10}$
Constante de diffusion	$D_n, D_p$	cm <sup>2</sup> /S	$D_0 = \frac{LJ_0}{q.n_i}$	$1.46 E^6$
Mobilité	$\mu_n, \mu_p$	Cm <sup>2</sup> /V.S	$\frac{D_0}{U_T}$	$5.65 E^7$
Densité de courant	$J_n, J_p$	A/cm <sup>2</sup>	$J_0 = \frac{q.D_0.n_i}{L}$	$3.42 E^{13}$

**Chapitre II.....modélisation et optimisation numérique d'une cellule photovoltaïque**

<b>Génération-Recombinaison</b>	G-R	$\text{Cm}^{-2}.\text{S}^{-1}$	$\frac{D_0.n_i}{L^2}$	$1.14E^{11}$
<b>Champ électrique</b>	E	V/cm	$\frac{U_T}{L}$	$7.62E^4$
<b>Temps (duré de vie)</b>	$\tau$	S	$\frac{L^2}{D_0}$	$7.88E^{12}$

**Tableau II.1 :** *Tableau de normalisation des constantes [27]*

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

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

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

$$\nabla^2 V = N - P + C \quad \text{II.9}$$

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

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

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

$M_n$  et  $M_p$  représentent les mobilités des électrons et des trous en quantités normalisées.  
Les équations de transport en quantités normalisées s'écrivent comme suit :

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

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

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

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

$$\frac{D_0 n_i}{L^2} \frac{\partial P}{\partial T} - \frac{J_0}{q.L} \vec{\nabla} \vec{j}_P = \frac{D_0 n_i}{L^2} .R_{SRH} \quad \text{II.15}$$

Ce qui permet d'aboutir à :

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

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

## II.4. Conditions aux limites

### II.4.1. Conditions aux contacts

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

#### Sur le potentiel électrostatique :

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

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

#### Sur les densités de porteurs :

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

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

Par conséquent, les densités de porteurs sont décrites selon :

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

### II.4.2. Conditions aux autres frontières

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

## II.5. Discrétisation du modèle semi-conducteur

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les expressions A1-5 et B1-5 dépendent du potentiel en terme normalisé

$$A_1 = \frac{M_n}{(X_i - X_{i-1})(X_{i+1} - X_{i-1})} \cdot \frac{V(i-1,j) - V(i,j)}{e^{V(i-1,j) - V(i,j)} - 1}$$

$$A_2 = \frac{M_n}{(X_{i+1} - X_i)(X_{i+1} - X_i)} \cdot \frac{V(i+1,j) - V(i,j)}{e^{V(i+1,j) - V(i,j)} - 1}$$

$$A_3 = \frac{M_n}{(Y_j - Y_{j-1})(Y_j - Y_{j-1})} \cdot \frac{V(i,j-1) - V(i,j)}{e^{V(i,j-1) - V(i,j)} - 1}$$

$$A_4 = \frac{M_n}{(Y_{j+1} - Y_j)(Y_{j+1} - Y_j)} \cdot \frac{V(i,j+1) - V(i,j)}{e^{V(i,j+1) - V(i,j)} - 1}$$

$$A_5 = -A_1 - A_2 - A_3 - A_4$$

$$B_1 = \frac{M_p}{(X_i - X_{i-1})(X_i - X_{i-1})} \cdot \frac{V(i,j) - V(i-1,j)}{e^{V(i,j) - V(i-1,j)} - 1}$$

$$B_2 = \frac{M_p}{(X_i - X_{i-1})(X_i - X_{i-1})} \cdot \frac{V(i,j) - V(i-1,j)}{e^{V(i,j) - V(i-1,j)} - 1}$$

$$B_3 = \frac{M_p}{(Y_j - Y_{j-1})(Y_j - Y_{j-1})} \cdot \frac{V(i,j) - V(i,j-1)}{e^{V(i,j) - V(i,j-1)} - 1}$$

$$B_4 = \frac{M_p}{(Y_{j+1} - Y_j)(Y_{j+1} - Y_j)} \cdot \frac{V(i,j) - V(i,j+1)}{e^{V(i,j) - V(i,j+1)} - 1}$$

$$B_5 = -B_1 - B_2 - B_3 - B_4$$

## II.6. Solution de Newton-Raphson de l'équation de Poisson

En appliquant une approximation par différences finies centrales des dérivées secondes partielles spatiales de  $\phi$ , l'équation (9) devient :

## Chapitre II.....modélisation et optimisation numérique d'une cellule photovoltaïque

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} \phi_{i+1,j} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \phi_{i-1,j} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \phi_{i,j-1} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \phi_{i,j+1} - 2 \left( \frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \phi_{i,j} = - \frac{\Delta x \Delta y q^2}{\varepsilon} (n_{i,j} - Dop_{i,j}) \quad \text{II.25}$$

Nous supposons la variable  $\gamma = (j-1)N_x + i$ . Ainsi, l'indice  $\gamma$  varie de 1 à  $N_x \cdot N_y$ .

Donc, aux points milieux  $i \in [2, N_x - 1]$  et  $j \in [2, N_y - 1]$ , l'équation (25) devient :

$$F_\gamma(\phi) = \frac{\Delta y}{\Delta x} \phi_{\gamma+1} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \phi_{\gamma-1} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \phi_{\gamma-N_x} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \phi_{\gamma+N_x} - 2 \left( \frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \phi_\gamma + \frac{\Delta x \Delta y q^2}{\varepsilon} (n_\gamma - Dop_\gamma) \quad \text{II.26}$$

Aux contacts émetteur et collecteur,  $\phi = V_E$  et  $\phi = V_C$ , les équations numérique satisfaisant les conditions limites de type Dirichlet sont données par :

$$\begin{cases} F_\gamma(\phi) = \phi_\gamma - V_a & \text{Pour le contact anode} \\ F_\gamma(\phi) = \phi_\gamma - V_c & \text{Pour le contact cathode} \end{cases} \quad \text{II.27}$$

Les itérations de Newton-Raphson peuvent être utilisées pour résoudre le problème  $F(\phi) = 0$ . Il faut alors résoudre ce problème pour le pas de vecteur Newton-Raphson  $\Delta \phi$  afin de calculer le potentiel d'énergie pour l'itération suivante  $r$ , en partant d'un vecteur d'initialisation  $\phi^0$  :

$$\phi^{r+1} = \phi^r + \Delta \phi \quad \text{II.28}$$

On obtient la version linéaire de Newton-Raphson en appliquant le développement de Taylor du premier ordre à l'équation (26), ce qui donne :

$$F_\gamma(\phi^{r+1}) = F_\gamma(\phi^r + \Delta \phi) = F_\gamma(\phi^r) + \Delta \phi \cdot J \quad \text{II.29}$$

Où  $J = \partial F_\gamma(\phi) / \partial \phi$

Puisque le vecteur  $\phi^{r+1}$  présente la solution ( $F_\gamma(\phi^{r+1}) = 0$ ), l'équation (29) devient :

$$\phi^{r+1} = \phi^r - J^{-1} F_\gamma(\phi^r) \quad \text{II.30}$$

Aux points médians, la matrice Jacobéenne  $J$  prend la forme familière à cinq diagonales, avec des éléments donnés par :

$$J = \begin{cases} J(\gamma, \gamma - N_x) = \Delta x / \Delta y \\ J(\gamma, \gamma - 1) = \Delta y / \Delta x \\ J(\gamma, \gamma) = -2(\Delta x / \Delta y + \Delta y / \Delta x) - (\Delta x \Delta y q^2 / \varepsilon \cdot V_{ref}) n_\gamma \\ J(\gamma, \gamma + 1) = \Delta y / \Delta x \\ J(\gamma, \gamma + N_x) = \Delta x / \Delta y \end{cases} \quad \text{II.31}$$

Aux frontières, les éléments de la matrice Jacobéenne ont été calculés à partir de la dérivée de la fonction vectorielle  $F_\gamma(\phi)$ .

La référence de potentiel  $V_{ref}$  a été modifiée dans le but d'obtenir un faible nombre d'itérations. Dans cette simulation, la valeur appropriée est  $V_{ref}=0.04$ .

### II.5.1. Système d'équations obtenues

Le maillage que nous considérons est représenté par m lignes et n colonnes. Ceci est possible en définissant un point du maillage non pas par ses indices i en x et j en y, mais par un indice global k défini par :

$$k = (j - 1) * n + i$$

Les équations discrètes de Poisson et de continuité des porteurs, que nous venons d'établir plus haut peuvent s'écrire sous les trois formes matricielles suivantes :

$$\begin{pmatrix} -S & D & & & H \\ G & -S & D & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & & H \\ B & & & & \\ & \ddots & & & D \\ & & B & & \\ & & & G & -S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V(1) \\ V(2) \\ \vdots \\ V(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ V(n * m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N(1) - P(1) + C(1) \\ N(2) - P(2) + C(2) \\ \vdots \\ N(k) - P(k) + C(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ N(n * m) - P(n * m) + C(n * m) \end{pmatrix} \quad \text{II.32}$$

$$\begin{pmatrix} -B_5 & B_2 & & & B_4 \\ B_1 & -B_5 & B_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & & B_4 \\ B_3 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & B_3 & & \\ & & & B_2 & \\ & & & B_1 & -B_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P(1) \\ P(2) \\ \vdots \\ P(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ P(n * m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{SRH} - R_{opt} \\ R_{SRH} - R_{opt} \\ \vdots \\ R_{SRH} - R_{opt} \\ \vdots \\ \vdots \\ R_{SRH} - R_{opt} \end{pmatrix} \quad \text{II.33}$$

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

### II.6. Solution initiale

Un problème délicat est la détermination de l'approximation initiale en V, N et P nécessaire au départ du processus itératif. Le temps de calcul dépend directement de la qualité de celle-ci. De plus, une solution trop mauvaise peut conduire à une non-convergence de l'algorithme utilisé, se traduisant par un incident arithmétique, ou des oscillations.

Ce problème a toutefois été rendu moins crucial par l'emploi des nouvelles formules de discrétisations, qui semblent moins sensibles à la qualité de la solution initiale (rayon de convergence plus grand).

Pour notre simulation, nous avons utilisé la méthode d'approximation des pseudos potentiels de Fermi [28].

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

L'organigramme ci-dessous résume les étapes nécessaires qui permettent d'avoir la solution initiale des trois variables N<sub>0</sub>, P<sub>0</sub> et V<sub>0</sub>. Cette approximation est excellente en comparaison du résultat final.

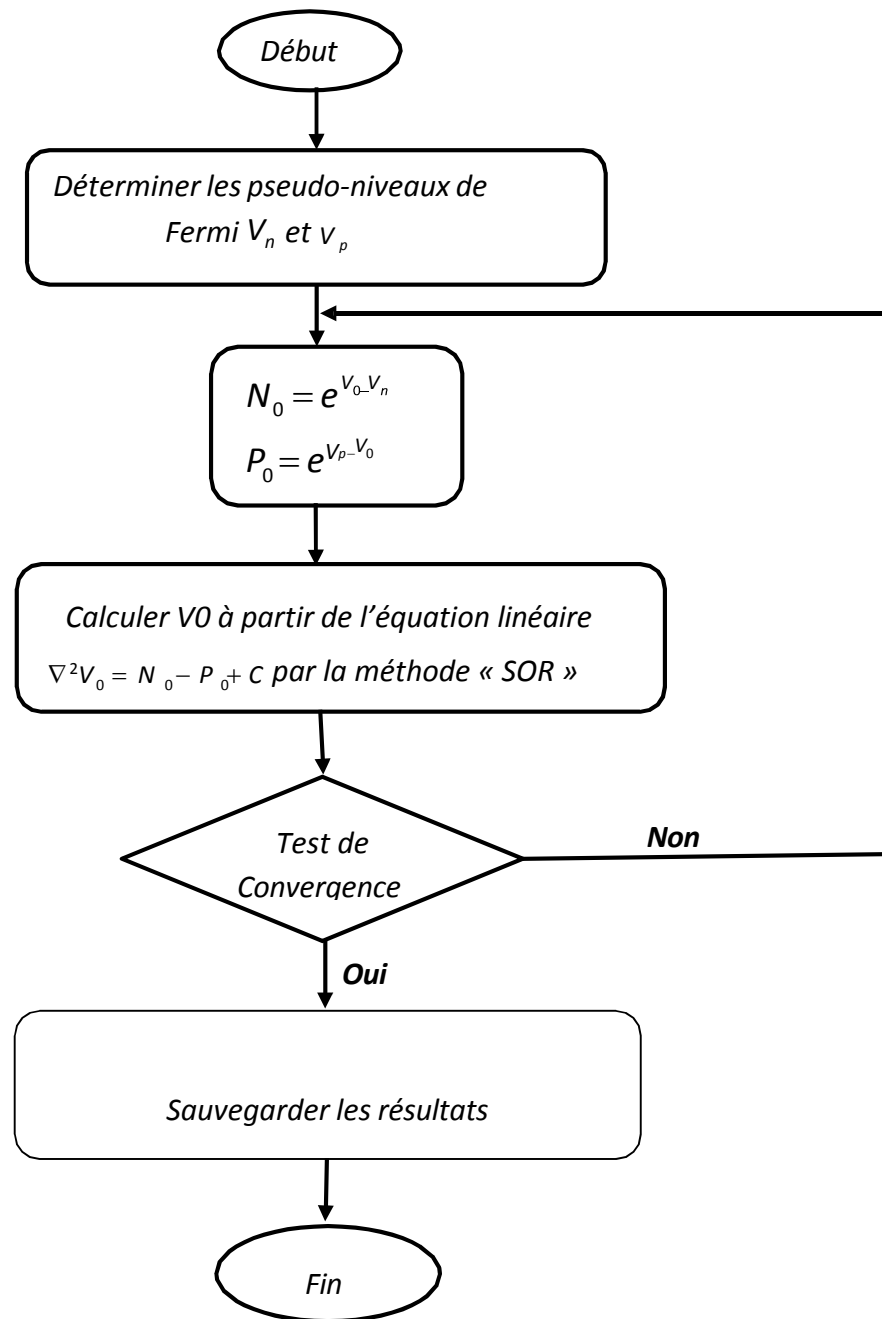


Figure II.2 : Algorithme de base pour la détermination de la solution initiale au niveau de cellule photovoltaïque.

## II.7. Solution finale

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

La méthode choisie dans le cadre de ce travail est la méthode de Gummel. Le principe du calcul itératif en analyse numérique repose sur l'utilisation d'une valeur initiale, puis de la raffiner par une succession d'approximations qui lui permettent de se rapprocher graduellement de la solution finale. La solution

## Chapitre II.....modélisation et optimisation numérique d'une cellule photovoltaïque

initiale obtenue, décide donc de l'exactitude de la solution finale. Cette méthode assure une bonne convergence très rapide.

La méthode de résolution de chaque système d'équations, est celle préconisée par SOR [29, 30]. Le choix de cette méthode a été motivé par sa bonne convergence et le gain en mémoire machine.

La méthode de résolution qui est une méthode découplée est relative au régime de faible et moyenne injection [31], elle a été proposée en premier lieu par Gummel en 1964 [32] pour résoudre numériquement les équations des semi-conducteurs dans le cas d'une géométrie unidimensionnelle. Il est cependant possible de l'étendre au cas des structures bidimensionnelles. Celle-ci présente l'avantage d'une bonne stabilité numérique alliée à une convergence linéaire et des besoins réduits en mémoire machine.

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

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

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

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

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

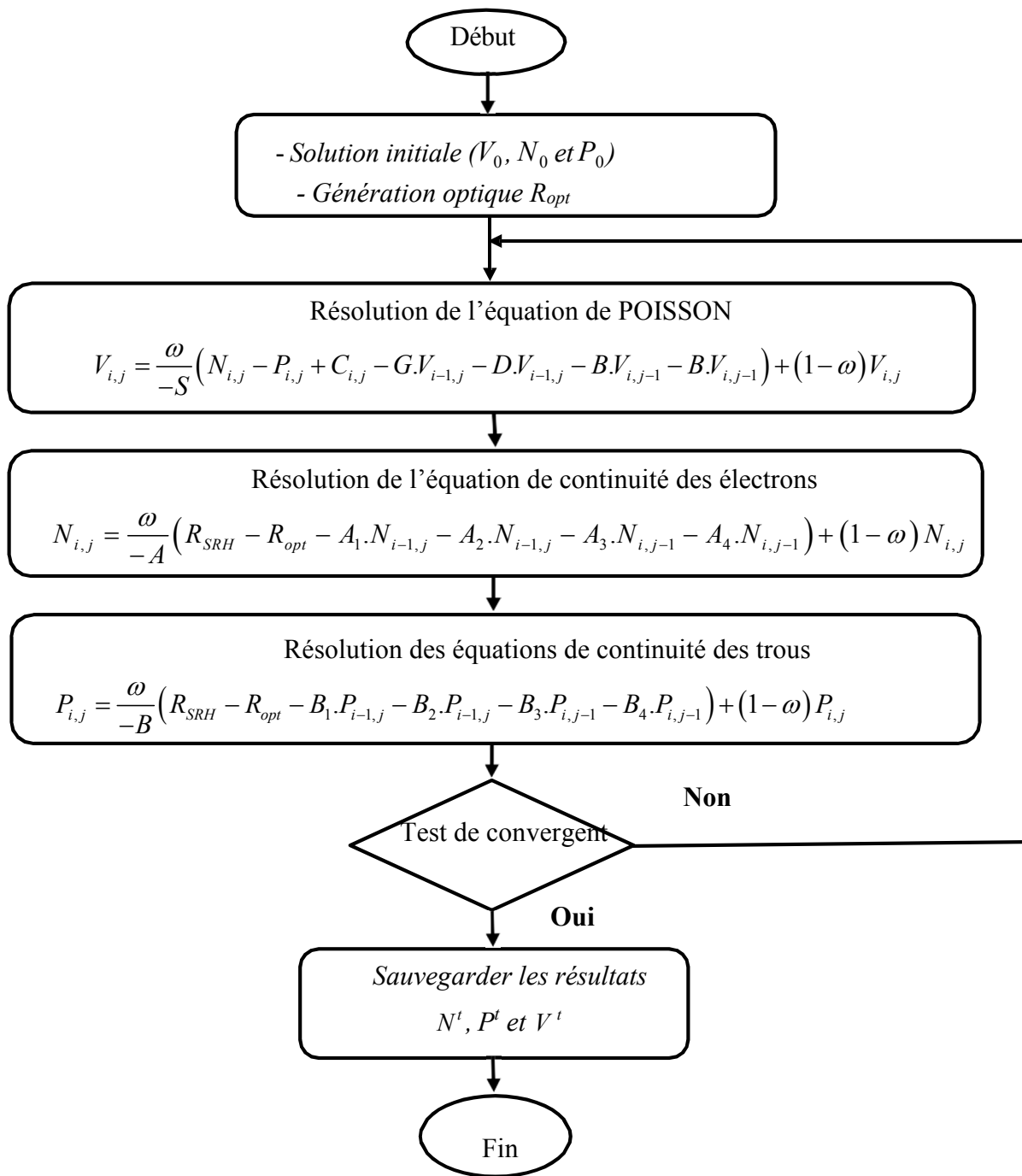


Figure II.3 : Algorithme de base pour la détermination de la solution finale au niveau de cellule photovoltaïque

## **II.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un modèle de simulation numérique pour une cellule photovoltaïque en régime statique, fondé sur la résolution bidimensionnelle des équations des semi-conducteurs. Ce modèle intègre plusieurs phénomènes physiques importants, tels que la génération, la recombinaison, la génération optique ainsi que la mobilité des porteurs de charge.

Afin de résoudre le système complexe d'équations couplées, nous avons proposé un schéma auto-cohérent. Les équations ont été discrétisées en utilisant la méthode des différences finies, puis résolues à l'aide de la méthode directe disponible dans MATLAB.

Les différentes étapes nécessaires à la résolution du système couplé ont été détaillées, permettant ainsi de valider l'approche numérique adoptée pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque.

# Chapitre III : simulation et résultats obtenus

### III.1. Introduction

Dans le troisième chapitre, nous allons développer un modèle numérique rapide pour la simulation bidimensionnelle d'une cellule photovoltaïque en se basant sur la méthode Newton-Raphson. Le but principal de cette simulation est de résoudre le couple poisson et continuité des porteurs libres. Les paramètres clés qui sont le potentiel électrostatique, concentration des électrons et la concentration des trous doivent être calculés auparavant après calculer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V). Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons calculer les le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , tension maximale  $V_m$ , courant et tension au point de puissance maximale  $I_m$  et  $V_m$  ainsi que les paramètres intrinsèque du circuit équivalent.

### III.2. Structure considérée

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

L'épaisseur de la région N est de  $0.5\mu m$  avec une concentration en atomes donneurs de  $10^{18} At/cm^3$ . Concernant la région P, l'épaisseur de cette région est de  $0.5\mu m$  avec une concentration en atomes accepteurs de  $10^{18} At/cm^3$ .

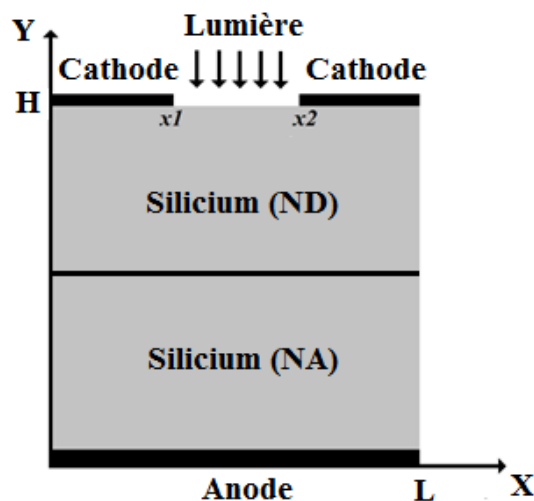


Figure III.1 : Structure simulée

### III.3. 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 les axes  $x$  et  $y$  tel que  $\Delta x = \Delta y = 0,01 \mu m$ , le pas spatial doit être suffisamment petit par rapport à la longueur de Debye.

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

### III.4. Résultats obtenus

La cellule photovoltaïque est rayonnée par une puissance optique de  $800 W/m^2$ . La figure III.2 présente l'erreur relative des électrons dans échelle logarithmique en fonction des itérations de Gummel pour deux méthodes, la première est d'utiliser des méthodes directe pour inverser les matrices, la deuxième méthode d'applique la méthode de Newton-Raphson. on observe clairement que la méthode de Newton-Raphson est mieux que la méthode directe et aussi donne une bonne convergence vers la solution finale. Le calcul itératif s'arrête automatiquement pour une précision de  $10^{-7}$  Chaque itération prend une durée de  $0.0078 s$ .

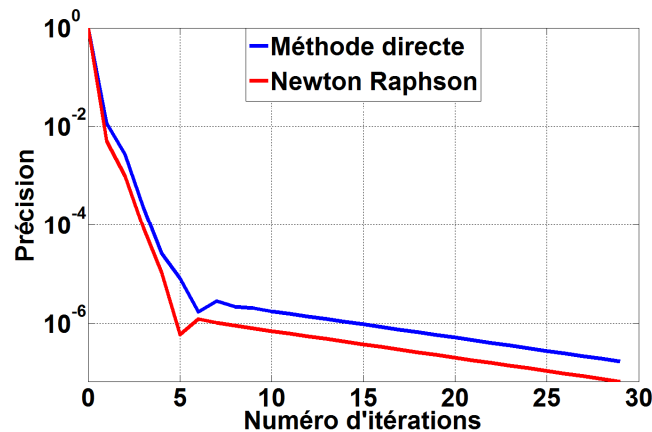


Figure III.2 : Erreur relative des électrons dans l'échelle logarithmique

Au niveau de la diffusion en atome donneur (contacte cathode), on applique un rayonnement solaire suivant la direction  $y$  avec une puissance optique de  $800 W/m^2$ .

La distribution de la génération optique est présentée dans la figure III.3.

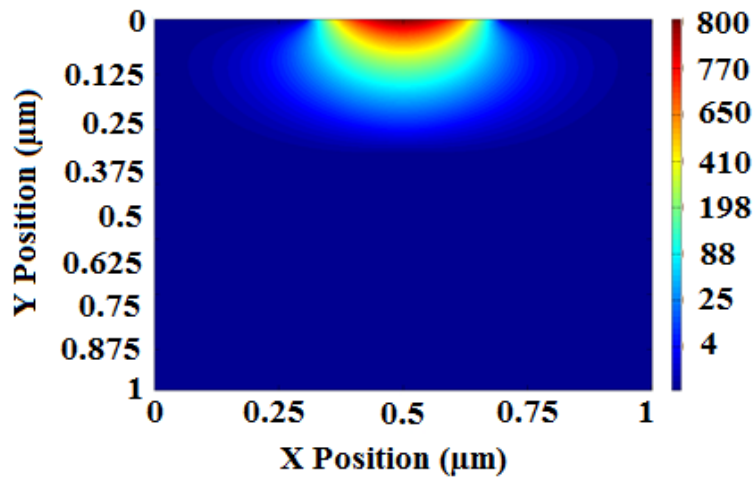


Figure III.3 : Structure simulée

La figure III.4 montre la distribution du potentiel électrostatique dans la cellule photovoltaïque, on note que le potentiel électrostatique presque constant à côté des diffusions anode est cathode, mais varie d'une manière brutale dans la zone des charges d'espace.

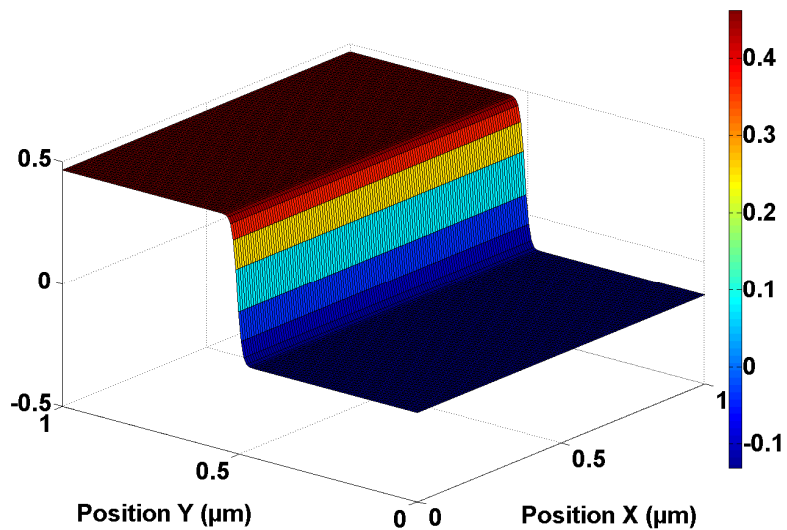
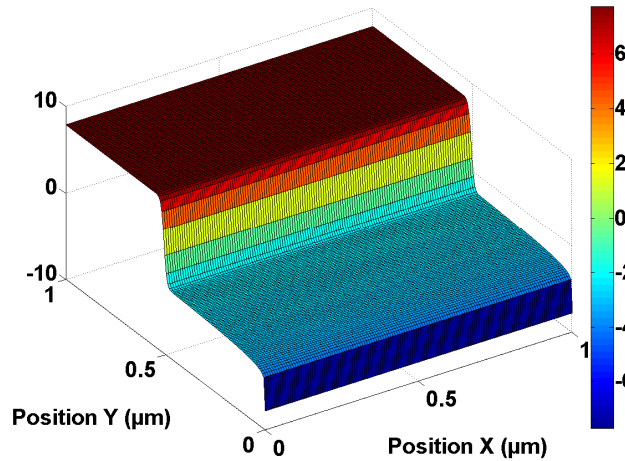


Figure III.4 : Distribution du potentiel électrostatique

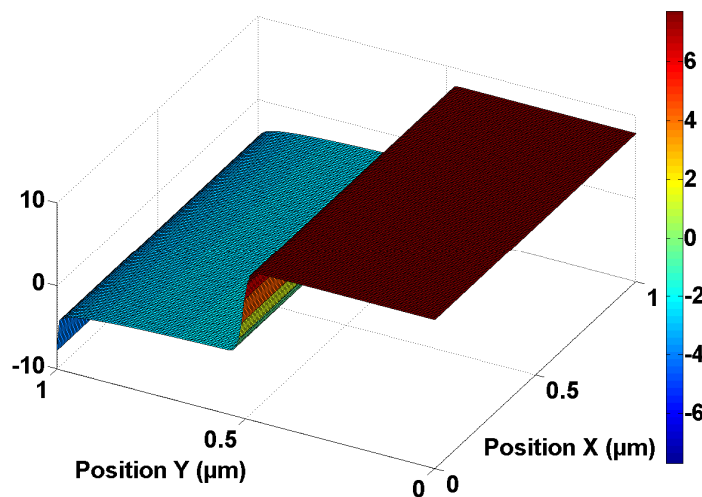
La figure III.5 représente la répartition de la densité des électrons dans l'échelle logarithmique sur toute la cellule photovoltaïque.

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



**Figure III.5 :** Concentration des électrons normalisée dans l'échelle logarithmique

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



**Figure III.6 :** Concentration des trous normalisée dans l'échelle logarithmique

### III.5. Les courbes caractéristiques I(V) et P(V)

La solution finale est obtenue par la résolution des trois systèmes matriciels du modèle dérive diffusion 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.7 et III.8 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.

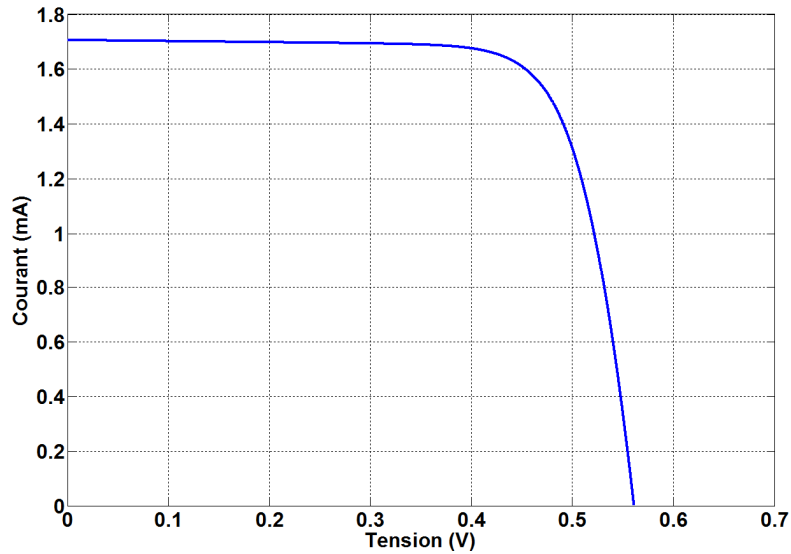


Figure III.7 : Caractéristique courant-tension,  $I(V)$

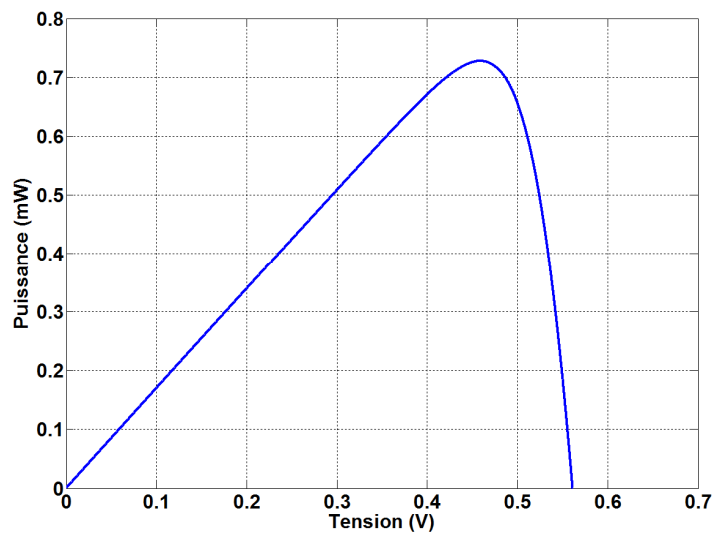


Figure III.8 : Caractéristique puissance-tension,  $I(V)$

### III.6. 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  $\alpha$  et  $\beta$ . Ces caractéristiques et ces valeurs des pentes se retrouvent dans le tableau III.1 ci-dessous.

Caractéristiques électriques	valeurs
Tension $V_{oc}$	0.561 V
Courant $I_{sc}$	1.706 mA
Courant $I_{mpp}$	1.584 mA
Courant $V_{mpp}$	0.459 V
La pente $\alpha$	-0.0182
La pente $\beta$	-41.2502

**Tableau III.1 :** *les caractéristiques électriques de la cellule*

### III.7. Extraction des paramètres intrinsèque

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 $I_0$	$1.842 \cdot 10^{-10}$ mA
Facteur d'idéalité n	1.3704
Résistance série $R_s$	0.00378 $\Omega$
Résistance parallèle $R_p$	104.685 $\Omega$

**Tableau III.2 :** *les paramètres de la cellule*

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons résolu les trois équations de base des semi-conducteurs à l'aide d'un schéma auto cohérent en deux dimensions par la méthode de Gummel.

Nous avons pu optimiser la méthode de résolution du problème proposé par l'intégration de la méthode de Newton-Raphson, l'algorithme numérique développé converge vers la solution finale rapidement et avec une précision désirée.

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

D'autre part, les caractéristiques électriques I-V et P-V de la cellule photovoltaïque ont été calculées et présentées. A partir du modèle développé, nous pouvons déterminer les cinq paramètres intrinsèques de la cellule photovoltaïque en régime statique (résistance série, résistance parallèle, photo-courant,...), cette dernière va permettre d'étudier le fonctionnement du composant proposé d'une manière analytique.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

### **Conclusion générale**

Au terme de ce travail, nous avons présenté et approfondi les notions fondamentales relatives au fonctionnement physique et à la modélisation des cellules photovoltaïques. Dans un premier temps, nous avons exposé les bases nécessaires à la compréhension des principes physiques qui régissent les cellules photovoltaïques, en abordant le rayonnement solaire, ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes solaires photovoltaïques.

Nous avons ensuite développé un modèle de simulation numérique basé sur la résolution bidimensionnelle des équations des semi-conducteurs, intégrant des phénomènes physiques essentiels tels que la génération, la recombinaison, la génération optique et la mobilité des porteurs de charge. L'approche numérique adoptée, utilisant notamment la méthode des différences finies et des outils comme MATLAB, a permis de résoudre efficacement le système complexe d'équations couplées et de valider la cohérence du modèle proposé.

Enfin, la résolution des équations de base des semi-conducteurs à l'aide de schémas auto-cohérents et l'optimisation des méthodes numériques (Gummel, Newton-Raphson) ont permis d'obtenir des résultats précis et rapides. Les simulations numériques réalisées ont permis d'observer et d'analyser plusieurs phénomènes physiques, notamment la variation des zones de charge d'espace, l'effet de l'énergie optique sur le courant de sortie, ainsi que les caractéristiques électriques I-V et P-V de la cellule photovoltaïque. Ces résultats nous ont permis de déterminer les paramètres intrinsèques de la cellule et d'étudier son fonctionnement de manière analytique.

En résumé, ce travail a permis non seulement de mieux comprendre le comportement physique des cellules photovoltaïques, mais aussi de valider l'apport des méthodes numériques pour leur modélisation et leur analyse approfondie.

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

### Références bibliographiques :

- [1] **Becquerel, Alexandre Edmond.** « Recherches sur les Effets de la Radiation Chimique de la Lumière Solaire au Moyen de Divers Corps ». Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, vol. 9, **1839**.
- [2] Rayonnement solaire. Wikipédia, l'encyclopédie libre. Disponible sur : [fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire).
- [3] EDF solutions solaires. « Rayonnement global ». Disponible sur : [edf-solutions-solaires.com](https://edf-solutions-solaires.com).
- [4] **Otovo France** « Rayonnement solaire et panneaux photovoltaïques ». Disponible sur : [otovo.fr](https://otovo.fr).
- [5] **Claude Lahache**, “ énergie solaire”, Spectre du rayonnement solaire en haute atmosphère «Source CNRS ; Institut National des Sciences de l'Univers »
- [6] **ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ** « énergie solaire photovoltaïque », 2e édition, DUNOD
- [7] **José Miguel Navarro**, “ Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible” Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, **2008**
- [8] <https://www.palante-energie.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>
- [9] **Nicolas Richet**, « Les cellules photovoltaïques en silicium : théorie et fabrication », **2023**.
- [10] **Princy Maminirinaharimisa**, « Étude des panneaux solaires hybrides : Analyse et modélisation des caractéristiques photovoltaïques », Thèse de doctorat, École Supérieure Polytechnique, **2023**.
- [11] <https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-mono-cristallin>
- [12] **Baldwin Cortés, Roberto Tapia Sánchez, Juan J. Flores**, “ Caractérisation of a polycrystalline photovoltaïque celle using artificial neural networks ”, Solar Energy 196 157–167, **2020**.
- [13] **ZBOTEK**, « Paramètres des cellules solaires et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque »
- [14] « Caractéristique courant-tension d'une cellule », [Photovoltaïque.Guidenr.fr](https://www.photovoltaique.guidenr.fr), **2023**.
- [15] **Achouri, M. Ch.**, « Étude des paramètres d'une cellule photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Annaba, **2022**.

## Références bibliographiques

- [16] **Lincot, D.** et al. – « L'Électricité fille du Soleil », **2013**.
- [17] **Y. Bakelli** « Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque » mémoire de magister, Université de Boumerdes **2005**.
- [18] **T. ESRAM, P. L. CHAPMAN**, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Transactions On. Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439- 449. Jun. **2007**.
- [19] **Cédric CABAL**. Thèse "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque". Préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS. UNIVERSITE TOULOUSE III, **2008**.
- [20] **Slaoui, Abdelilah**, « Électricité photovoltaïque - Caractéristiques et réponse spectrale », **2020**.
- [21] **Alexander, Charles K., et Sadiku, Matthew N. O.** « Fundamentals of Electric Circuits ». New York : McGraw-Hill Education, **2020**.
- [22] **Villalva, M. G., Gazoli, J. R., et Ruppert Filho, E.** « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, **2009**, pp. 1146-1158.
- [23] **Hua, C., Shen, C., et Lin, J.** « Control of DC-DC Converters for Solar Energy System with Maximum Power Tracking ». IEEE ISIE **1996, 1996**, pp. 827-832.
- [24] **M. N. Sadiku**, "A Simple Introduction To Finite Element Analysis Of Electromagnetic Problems", IEEE TransEduc, Vol.32, No. 2, pp. 85–93, (**1989**).
- [25] **A. Thom, C. Apelt**, "Field Computations In Engineering And Physics", London-Van Ostrand, (**1961**).
- [26] **Steven E. Pav**, "Numerical Methods Course Notes", University of California at San Diego, (**2005**).
- [27] **A. DeMari**, "An Accurate Numerical Steady State One-Dimensional Solution Of The PN Junction", Solid-State Electronics, Vol. 11, pp. 33-59, (1968).
- [28] **J.W. Slotboom**, "Computer-aided two-dimension analysis of bipolar transistors", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 20, pp. 669-679, (**1973**).
- [29] **A. Quarteroni, R. Sacco, and F. Saleri**, "Méthode Numériques", Deuxième édition, Springer-Verlag press, Italy, Milano, ISBN: 13 978-88-470-0495-5, (**2007**).
- [30] **F. Jędrzejewski**, "Introduction Aux Méthodes Numériques", Deuxième

## Références bibliographiques

édition, Springer-Verlag press, France, Paris, ISBN: 978-2-287-25203-7, (2005).

[31] **D. Vasileska, and S. M. Goodnick**, “Computational Electronics”, First Edition, Morgan & Claypool, USA, ISSN: 1932-1252, (2006).

[32] **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).

[33] **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)

## **Résumé**

Dans les prochaines années, l'électricité photovoltaïque occupera une place de plus en plus importante dans les apports énergétiques de divers secteurs. La technologie dominante repose sur les cellules solaires en silicium, mais leurs performances actuelles restent en deçà des attentes, notamment en ce qui concerne l'absorption du spectre lumineux. Pour améliorer le rapport coût-efficacité, l'industrie solaire investit massivement dans la recherche.

Un système photovoltaïque n'est compétitif que si sa performance et son coût sont optimisés, ce qui nécessite une modélisation numérique précise. Ce travail se concentre sur la modélisation d'une cellule solaire en silicium poly cristallin à travers un circuit équivalent à une seule diode, afin d'identifier ses paramètres caractéristiques à partir du courant prédit.

La résolution d'un système d'équations non linéaires, en particulier le modèle dérive-diffusion résolu par la méthode des différences finies, permet cette identification. Grâce à la programmation sous MATLAB, nous avons pu visualiser la distribution du potentiel électrostatique, la concentration des porteurs et la courbe courant-tension, ce qui nous a permis de déterminer les paramètres électriques inconnus de la cellule à l'aide de la méthode de Newton-Raphson.

### **Mots clés :**

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

## **Abstract**

In the coming years, photovoltaic electricity will play an increasingly significant role in meeting energy demands across various sectors. The most widely used technology is based on silicon solar cells, yet their current performance still falls short of expectations, particularly in terms of light spectrum absorption. To enhance the cost-performance ratio, the solar industry is investing heavily in research and development. A photovoltaic system is only competitive if its performance and cost are optimized, which requires accurate numerical modeling. This work focuses on the numerical modeling of a polycrystalline silicon solar cell, using an equivalent circuit with a single diode to identify its characteristic parameters based on the predicted current.

This identification is achieved by solving a system of nonlinear equations, specifically using the drift-diffusion model and the finite difference method. By implementing these models in MATLAB, we were able to visualize the electrostatic potential distribution, carrier concentration, and current-voltage characteristics, allowing us to determine the cell's unknown electrical parameters using the Newton-Raphson method.

### **Key words:**

Photovoltaic cell, digital modelling, finite difference method, drift-diffusion model

## ملخص

في السنوات القادمة، ستلعب الكهرباء الضوئية دورًا متزايد الأهمية في تلبية الاحتياجات الطاقوية في مختلف القطاعات. وتعتمد التكنولوجيا الأكثر استخدامًا على الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون، إلا أن أداءها الحالي لا يزال أقل من التوقعات، خاصة فيما يتعلق بامتصاص الطيف الضوئي. ولهذا تسعى صناعة الطاقة الشمسية إلى تحسين نسبة الأداء إلى التكلفة من خلال استثمارات وأبحاث مكثفة.

لا يمكن أن يكون النظام الكهروضوئي منافسًا إلا إذا تم تحسين أدائه وتكلفته، مما يتطلب نمذجة رقمية دقيقة. يركز هذا العمل على النمذجة الرقمية لخلية شمسية من السيليكون متعدد البلورات، باستخدام دائرة مكافئة تحتوي على ديود واحد لتحديد معالمها المميزة انطلاقًا من التيار المتوقع.

يتم تحديد هذه المعالم من خلال حل نظام من المعادلات غير الخطية، باستخدام نموذج الانجراف-الانتشار وطريقة ، تمكنا من تمثيل توزيع الجهد الكهروستاتيكي وتركيز MATLAB الفروق المحدودة. وبرمجة هذه النماذج على برنامج الحوامل ومنحنى التيار-الجهد، مما سمح لنا باستخلاص المعالم الكهربائية المجهولة للخلية باستخدام طريقة نيوتن-رافسون.

## الكلمات المفتاحية

الخلية الكهروضوئية، النمذجة الرقمية، طريقة الفرق المحدود، نموذج نشر القيادة