

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Physique

Filière : Physique

MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique

Option : **Physique des matériaux**

Présenté par :

SADOK Maroua

THEME :

**« Étude et comparaison de différentes formes de grilles
métalliques de cellules solaires »**

Soutenu le : 23 juin 2022

Devant le jury composé de :

M. SENOUCI Khaled,	Professeur,	Université de Mostaganem,	Président,
M. BENOTSMANE Ahmed,	M.C.A.,	Université de Mostaganem,	Examineur,
M. BEGHADAD Mohammed,	Professeur,	Université de Mostaganem,	Encadrant.

Année Universitaire 2021-2022

Dédicaces

Ce projet de fin d'études est dédié :

A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices,

A mon père, pour son soutien et la confiance qu'il m'a accordée,

A mes chères sœurs,

A toutes mes amies de promotion de la 2^{ème} année master en physique des
matériaux.

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la force et la patience.

Ce modeste travail a été effectué sous la direction de monsieur BEGHADAD Mohammed, Professeur, à l'université de Mostaganem.

Je le remercie également pour l'encadrement, l'aide et ses précieux conseils qu'il me les a donnés durant tout le long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury :

-Monsieur SENOUCI Khaled, Professeur à l'Université de Mostaganem pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire,

-Monsieur BENOTSMANE Ahmed, Maître de Conférences, classe A, à l'Université de Mostaganem pour avoir bien accepté d'examiner le contenu du présent travail,

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Liste des figures

Figure I.1 :	Compositions du rayonnement solaire.....	6
Figure I.2 :	Définitions de l'air masse.....	8
Figure I.3 :	Représentation graphique des spectres solaires AM_0 , $AM_{1,5G}$ et $AM_{1,5D}$	8
Figure I.4 :	Représentation des rayons visibles et invisibles.....	10
Figure II.1 :	Diagramme énergétique des semi-conducteurs.....	14
Figure II.2 :	Représentation des différents mécanismes de recombinaisons.....	22
Figure II.3 :	Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium de type p.....	26
Figure II.4 :	Diagramme des bandes d'énergies.....	27
Figure II.5 :	La jonction PN.....	28
Figure II.6 :	Jonction PN à l'équilibre thermodynamique.....	29
Figure II.7 :	Paramètres géométriques de la jonction PN.....	30
Figure II.8 :	La jonction PN en polarisation direct et inverse.....	31
Figure II.9 :	Caractéristiques J-V sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.....	33
Figure II.10 :	Les 3 zones de générations des paires électron-trou de la structure simple d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	34
Figure II.11 :	Caractéristiques J-V et P-V d'une cellule PV sous éclairage.....	36
Figure II.12 :	Schéma électrique équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.....	37
Figure III.1 :	Paramètres de la cellule solaire.....	39
Figure III.2 :	Paramètres géométriques d'une partie de la cellule PV.....	41
Figure III.3 :	Cellule solaire à base de silicium mono et poly cristallin.....	43
Figure III.5 :	Schéma d'une cellule photovoltaïque en silicium de structure.....	44
Figure III.6 :	Organigramme des pertes limitant le rendement de la conversion PV.....	46

Figure IV.1 :	Différentes contributions de la résistance série de la cellule PV	49
Figure IV.2 :	Représentation de la face avant d'une cellule PV à géométrie rectangulaire.....	50
Figure IV.3 :	Représentation des paramètres géométriques de la cellule élémentaire 1	51
Figure IV.4 :	Représentation des paramètres géométriques des cellules élémentaires 2 et 3.....	52
Figure IV.5 :	Exemple de la géométrie de la métallisation face arrière d'une cellule PV.....	53
Figure IV.6 :	Représentation schématique de la circulation inverse du flux de la densité du courant à travers une partie de la cellule PV	55
Figure IV.7 :	Représentation schématique de la face avant d'une cellule PV à géométrie conique.....	56
Figure IV.8 :	Paramètres de la cellule unitaire à géométrie conique.....	57
Figure IV.9 :	Capture d'écran du site PV Lighthouse.....	59
Figure IV.10 :	Capture d'écran de la feuille de calculs d'Excel.....	59
Figure IV.11 :	Caractéristique J-V et P-V de la cellule PV de géométrie rectangulaire ..	61
Figure IV.12 :	Variation des pertes puissances en fonction de la distance d.....	62
Figure IV.13 :	Caractéristique J-V et P-V de la cellule photovoltaïque à géométrie conique.....	65
Figure IV.14 :	Variation des pertes des puissances en fonction de la distance d.....	66
Figure IV.15 :	Variation des pertes en puissance résistives des deux cellules au voisinage de leurs distances interlignes optimisées.....	67
Figure IV.16 :	Comparaison de la variation de perte en puissance résistive en fonction de d des deux cellules étudiées.....	68
Figure IV.17 :	Comparaison de la perte en puissance totale des deux cellules étudiées au voisinage de leurs distances interlignes optimisées.....	69

Figure IV.18 : A gauche : géométrie de la grille de la face avant d'une cellule solaire réalisée expérimentalement au sein de l'université de San Antonio (Usa) ; à droite : le masque qui a permis la réalisation de 9 cellules identiques..... 71

Liste des tableaux

Tableau II-1 :	Mobilités des électrons et des trous de semi-conducteur Silicium à la température ambiante.....	24
Tableau III-1 :	Description et rôle des étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque.....	45
Tableau IV-1 :	Les paramètres initiaux pour le calcul des différentes contributions résistives et optiques de la cellule.....	55
Tableau IV-2 :	Les expressions des diverses contributions à la résistance série	56
Tableau IV-3 :	Expressions des contributions résistives et d'ombrage d'une cellule à géométrie conique.....	60
Tableau IV-4 :	Paramètres de la cellule à étudier.....	62
Tableau IV-5 :	Les paramètres obtenus par la simulation de la caractéristique J-V.....	64
Tableau IV-6 :	Les valeurs obtenues après la simulation.....	65
Tableau IV-7 :	Paramètres identifiés par la méthode de calcul à partir de PV Lighthouse.....	66
Tableau IV-8 :	Les différents paramètres obtenus de la cellule photovoltaïque à géométrie conique.....	67
Tableau IV-9 :	Valeurs obtenues après la simulation des deux cellules.....	68
Tableau IV-10 :	Comparaison entre les paramètres des deux cellules.....	72

Liste des abréviations

CAR (ARC)	Couche Anti-Reflet (Anti-Reflective Coating)
BSF	Champ de Surface Arrière (Back Surface Field)
PV	Photovoltaïque
ZCE	Zone de Charge d'Espace
PECVD	(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)
PFM	Point de Fonctionnement Maximal

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Le rayonnement solaire.....	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	5
I.2.1 Rayonnement direct	6
I.2.2 Rayonnement diffus	6
I.2.3 Albédo	6
I.2.4 Rayonnement global.....	6
I.3 La masse d'air	7
I.3.1 Spectre solaire	9
I.3.2 Les principaux types de rayons qui parviennent sur la terre et leurs effets	10
I.4 Conclusion	11
Chapitre II : Principe et généralités sur la cellule photovoltaïque	12
II.1 Introduction.....	13
II.2 Définition	13
II.3 Types des semi-conducteurs	14
II.3.1 Semi- conducteur compensé semi-Isolant	16
II.3.2 Semi-conducteur de type n	16
II.3.3 Semi-conducteur de type p	17
II.4 Différentes formes de recombinaisons des porteurs :	17
II.4.1 Recombinaisons volumiques	17
II.4.2 Recombinaison radiative (ou directe ou bande à bande)	18
II.4.3 Recombinaison volumique Auger	19
II.4.4 Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)	19
II.4.5 Durée de vie en volume	21
II.4.6 Recombinaison surfacique.....	21
II.4.7 Durée de vie effective	22
II.5 le courant dans les semi-conducteurs :.....	23
II.6 Jonction PN.....	25
II.6.1 Charge d'espace.....	27
II.6.2 Jonction polarisée	30
II.6.3 La polarisation directe.....	31
II.6.4 La polarisation inverse.....	31

II.7	Caractéristique J-V et performance d'une cellule photovoltaïque	32
II.7.1	Modèle à deux diodes	34
II.7.2	Schéma électrique équivalent	35
II.8	Performance d'une cellule solaire.....	36
II.8.1	Courant de court-circuit J_{cc}	36
II.8.2	La tension de circuit ouvert V_{co}	37
II.8.3	Le facteur de forme FF	37
II.8.4	Le rendement de conversion d'énergie η	37
II.9	Conclusion	38
Chapitre III : La cellule solaire		39
III.1	Définition de la cellule solaire	40
III.2	Présentation des paramètres géométriques de la cellule	40
III.3	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	41
III.3.1	Choix de matériau.....	41
III.3.2	Silicium.....	42
III.3.3	Fabrication d'une cellule photovoltaïque	43
III.4	Limitations du rendement.....	44
Chapitre IV : Résultats et discussions des pertes résistives et d'ombrage		46
IV.1	Pertes dues à la métallisation	47
IV.2	Pertes résistives et d'ombrage.....	47
IV.2.1	Cellule photovoltaïque à doigts et busbarres de géométrie rectangulaire	47
IV.2.2	La face avant de la cellule photovoltaïque à doigts et busbarres rectangulaires	49
IV.2.3	La face arrière d'une cellule photovoltaïque à géométrie rectangulaire	51
IV.2.4	La distribution du flux du courant photo-généré.....	55
IV.3	Cellule photovoltaïque à doigts et à busbarres de géométrie conique.....	56
IV.3.1	La face avant de la cellule photovoltaïque à géométrie conique.....	56
IV.3.2	La cellule unitaire de la cellule photovoltaïque à géométrie conique et la distribution du flux	56
IV.4	Simulation des paramètres et discussions.....	58
IV.4.1	Présentation de logiciel de simulation.....	58
IV.4.2	PV Lighthouse	58
IV.4.2	Calculs Excel.....	59
IV.5	Cellule à géométrie rectangulaire	60
IV.5.1	Influence de d sur les différentes puissances :	62
IV.6	Cellule à géométrie conique	63
IV.6.1	Influence de d sur les différentes pertes en puissance.....	65
IV.7	La comparaison des pertes des puissances entre les deux cellules étudiées.....	67

IV.7.1 Comparaison de la perte en puissance d'ombrage	67
IV.7.2 Comparaison de la perte de puissance résistive	68
IV.7.3 Comparaison entre la perte en puissance totale des deux cellules	69
IV.7.4 Comparaison des différents paramètres des deux cellules	69
IV.8 Bibliographie récente sur le sujet	70
CONCLUSION GENERALE.....	73
<i>Bibliographie.....</i>	77

INTRODUCTION
GENERALE

L'énergie solaire photovoltaïque est la source principale qui alimente la planète, et qui est considérée comme la plus répandue dans le monde.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique selon le mécanisme de conversion du rayonnement solaire en électricité par les cellules solaires (photovoltaïques), et comme on le sait, il existe certains matériaux qui effectuent le processus de conversion photoélectrique et qui sont appelés les semi-conducteurs tels que le silicium, le germanium et autres.

Ce phénomène a été découvert par les physiciens du XIX^e siècle après J-C où ils ont découvert que la lumière peut libérer des électrons et produire de l'énergie électrique.

Pour améliorer le rendement de la cellule solaire ainsi que de réduire son coût, d'influence, on étudiera divers paramètres dans ce travail comment absorber le maximum de l'intensité du rayonnement solaire à la surface de la cellule photovoltaïque.

Dans ce travail, notre but est d'étudier deux cellules solaires conventionnelles, la première à grille à géométrie rectangulaire et la seconde, à grille conique. Dans une seconde partie, nous ferons la comparaison des différentes performances entre ces deux structures photovoltaïques. Pour se faire, nous avons essayé dans cette recherche de mener une étude théorique qui comprend quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons décrit l'ensoleillement arrivant sur notre planète ainsi que ses différents spectres en fonction de la longueur de la lumière incidente notamment le spectre AM1.5 qui est l'étalon de mesures des paramètres d'une cellule solaire. L'énergie solaire et son rayonnement sont considérés comme un générateur de courant permanent pour faire fonctionner les cellules photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude globale sur les semi-conducteurs, responsables de l'absorption du rayonnement solaire.

En ce qui concerne le troisième chapitre, nous avons abordé l'étude des cellules photovoltaïques en termes de leurs réalisations technologiques.

Enfin vient le quatrième chapitre dans lequel nous avons exposé les deux cellules au Silicium à étudier plus spécialement leurs géométries de leurs grilles respectives, rectangulaires et coniques, leurs barres collectrices (busbarres) et leurs doigts (fingers) de leurs faces avant et arrière.

Nous avons effectué et étudié les calculs des pertes de puissance dus à aux résistances des grilles et aux ombrages de ces deux cellules. Nous avons analysé et discuté les résultats obtenus pour montrer les améliorations apportées aux paramètres (J_{cc} , V_{co} , η , FF, J_m , V_m , Pm) de la cellule à géométrie conique par rapport à celle rectangulaire.

*Chapitre I : Le
rayonnement
solaire*

I.1 Introduction

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux produisent de petites quantités d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Einstein a expliqué le phénomène de l'optoélectronique en 1912, mais ce n'est qu'en 1954 que des chercheurs des laboratoires Bell aux États-Unis ont mis au point la première cellule photovoltaïque. Les premières cellules photovoltaïques étaient en silicium et avaient un rendement de 6%. La première structure de la cellule solaire est simple. Elle ne peut pas fournir des performances élevées et une puissance satisfaisante à la charge. Elle présente également de nombreux inconvénients et des pertes importantes dues aux réflexions, aux contacts ohmiques et aux recombinaisons. Cette structure a subi par la suite plusieurs modifications.

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension de notre travail : le domaine photovoltaïque. Nous aborderons en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil et ses caractéristiques astronomiques dans le système soleil terre telle que la distance terre-soleil, la déclinaison solaire et la notion de la masse d'air. Nous décrirons ensuite la propagation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère qui subit une modification de son spectre solaire à cause des différents phénomènes (absorption et réflexion) jusqu'à son arrivée à la terre [1].

I.2 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un facteur important dans la conversion photovoltaïque. Ce rayonnement est celui d'un corps noir à la température 5800 K, ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de $0,5 \mu\text{m}$ pour une puissance d'environ 60 MW/m^2 soit un total de $9,5 \cdot 10^{25} \text{ W}$. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de $1,36 \text{ kW/m}^2$ pour AM_0 pour les cellules destinées à fonctionner au sol. 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].

En arrivant au voisinage de la terre, il traverse l'atmosphère pour aboutir sur notre sol, le rayonnement solaire est ainsi absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

1.2.1 Rayonnement direct

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

1.2.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des nuages, et provient de toutes les directions.

La conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus.

1.2.3 Albédo

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux obstacles environnants, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles.

1.2.4 Rayonnement global

C'est le rayonnement qui est la somme de tous ces rayonnements cités précédemment.

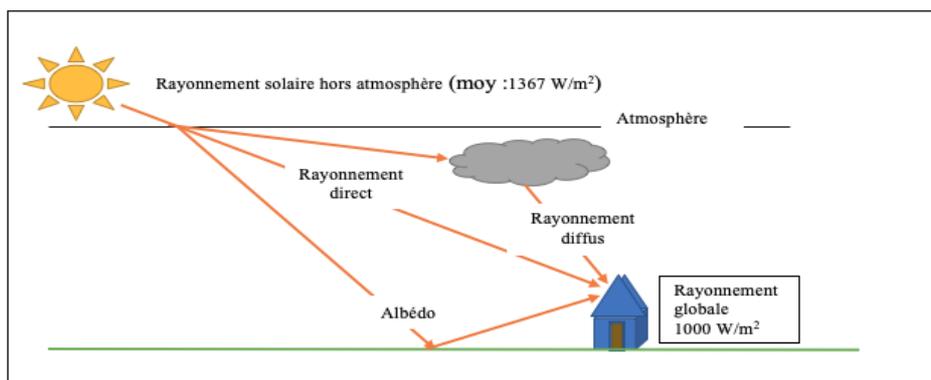


Figure I.1 : Composition du rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, et donne un spectre solaire non continu mais qui présente des bandes d'absorption et par conséquent crée une baisse globale de la puissance incidente [3].

I.3 La masse d'air

Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'Air-masse (AM_m) a été introduite. Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au Zénith (figure I.1). Sa valeur dépend de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux en plus de la pression. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $W.m^{-2}$) fournie par le rayonnement.

L'air masse est défini par :

$$AM_m = \frac{1}{\cos \theta} \quad (I-1)$$

- θ est l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale,
- AM_1 correspond au soleil au zénith ($\theta=0^\circ$),
- AM_4 quand le soleil est proche de l'horizon (à $\theta =75^\circ$),
- $AM_{1.5}$, c'est lorsque le soleil est $\theta=48,19^\circ$,
- AM_0 est l'air masse avant l'entrée du rayonnement dans l'atmosphère

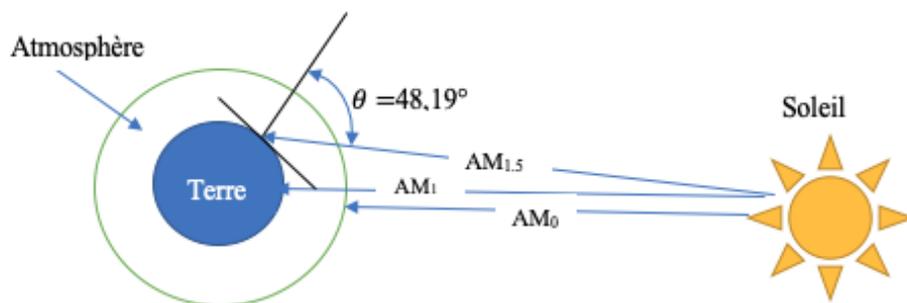


Figure I.2 : Définition de l'air masse.

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiation en fonction de la longueur d'onde (Figure I.3)

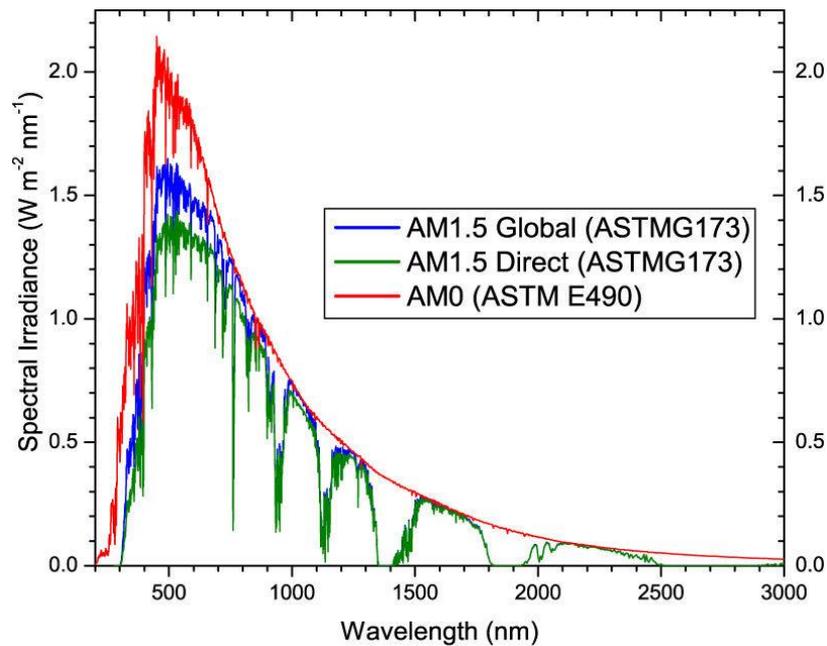


Figure I.3 : Représentation graphique des spectres solaires AM_0 , $AM_{1,5G}$ et $AM_{1,5D}$ [5].

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi par un ciel clair, lorsque le soleil est au zénith, est plus de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air « 1 » (ou AM_1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air et perd plus d'énergie. Puisque le soleil n'est pas au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 . Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil et à $T=25^\circ\text{C}$, sur la surface de la terre : $AM_{1,5G}$ ou $AM_{1,5D}$

Le « G » représente le rayonnement « Global » incluant rayonnement direct et rayonnement diffus, et la lettre « D » tient compte uniquement du rayonnement direct [6].

Le nombre « 1,5 » indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 48° par rapport au zénith).

Les parties les plus importantes du spectre solaire à la surface de la terre semblent être liées aux gammes visibles et proche infrarouge. Cependant, l'irradiation définie par le nombre AM ne

tient toutefois pas compte de la diversité des conditions climatiques et de l'altitude du lieu. En conséquence, la terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire.

1.3.1 Spectre solaire

La physique atomique nous montre que les variations d'énergie dans les atomes ne se font pas de façon continue, mais sont quantifiées. Un ensemble de nombres quantiques définit l'état initial d'énergie de l'atome, et un autre ensemble définit l'état final. Ce passage d'un état à un autre s'appelle une transition. Il s'accompagne soit de l'absorption d'énergie à une longueur d'onde précise si l'état final est plus énergétique, soit de l'émission d'énergie à une longueur d'onde précise si l'état final est moins énergétique. Un atome excité de cette façon a toujours tendance, au bout d'un temps plus ou moins long, à revenir à son état le plus stable, directement ou non, appelé état fondamental [4].

La relation entre cette variation d'énergie et la longueur d'onde de l'émission ou de l'absorption est :

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I-2})$$

Où

h : est la constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s),

ν : la fréquence (Hz),

λ : la longueur d'onde (m),

c : la vitesse de la lumière ($c= 3 \cdot 10^8$ m/s).

En remplaçant les grandeurs h et c par leurs valeurs , on trouve l'énergie en électron volt (eV) :

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

On définit également le flux de photons qui est un paramètre important pour calculer la densité du nombre de paires électron-trou générées et donc le photo-courant produit par une cellule solaire.

Le flux optique est défini comme le nombre de photons incidents par seconde et par unité de surface [8] :

$$\Phi = \frac{\text{nombre de photons}}{m^2 s} \quad (\text{I-3})$$

Le flux de photons est nécessaire pour le calcul de la densité de puissance qui peut être obtenu en multipliant le nombre de photons frappant une surface par unité de temps par l'énergie du photon :

$$H = \Phi \cdot E = \Phi \cdot \frac{hc}{\lambda} (W m^{-2}) \quad (\text{I-4})$$

En remplaçant hc par sa valeur on obtient :

$$H = \Phi \cdot q \cdot \frac{1240}{\lambda(nm)} (W m^{-2}) \quad (\text{I-5})$$

Avec : $q=1,602 \cdot 10^{-19}$, ici, q est un facteur de conversion d'unité.

La formule générale de l'irradiance spectrale est définie par la formule générale :

$$I_{\lambda} = \Phi \cdot q \cdot \frac{1240}{\Delta\lambda(nm)} (W m^{-2}) \quad (\text{I-6})$$

1.3.2 Les principaux types de rayons qui parviennent sur la terre et leurs effets

Le soleil émet un rayonnement constitué de particules appelées photons, en très grandes quantités. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. On distingue par leur longueur d'onde les différents types de rayons : c'est le spectre solaire. [7].

Les rayons de longueurs d'onde très courtes (les rayons x, gamma,) ont une grande énergie et qui sont extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère.

Les rayons de longueurs d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles à la surface de terre.

Nous distinguons essentiellement (Figure I.4) :

- **Les Ultraviolets (UV)**, entre 200 nm à 400 nm, sont les plus énergétiques que le visible et invisibles à l'œil nu, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules,

- **La Lumière visible**, entre 400 à 800 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs,
- **Les Infrarouges (IR)**, de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent.

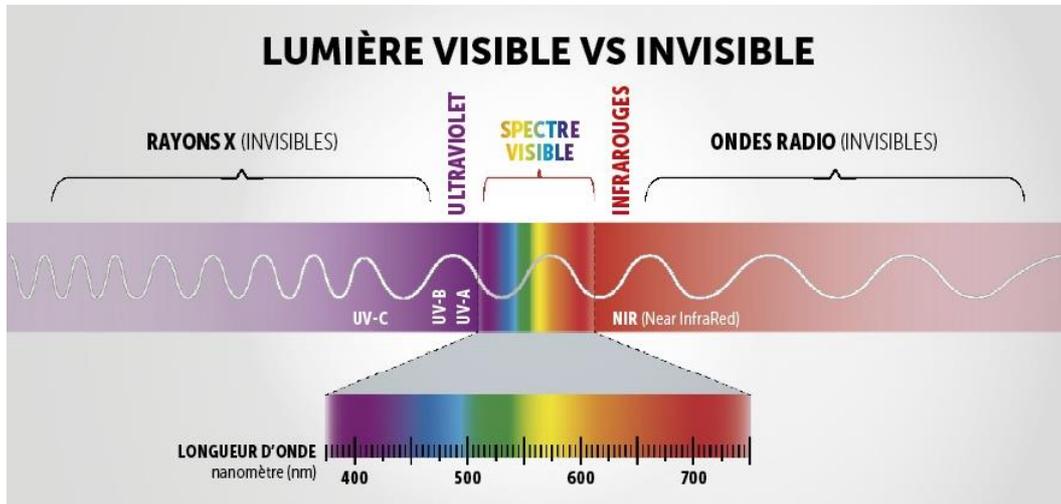


Figure I.4 : Représentation des rayons visibles et invisibles [7].

I.4 Conclusion

L'énergie solaire est l'une des énergies les plus intenses de notre planète c'est pour cela que de nombreuses études ont été faites pour l'exploiter. Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur le soleil et son pouvoir énergétique, ces coordonnées géographiques.

Chapitre II :
Principe et
généralités sur
la cellule
photovoltaïque

II.1 Introduction

Pour connaître la cellule solaire et la physique de son fonctionnement, il faut tout d'abord connaître la physique sur laquelle la cellule est basée.

L'objectif de ce chapitre est de présenter, en notions simples, le modèle physique des semi-conducteurs et de présenter les formules de base qui régissent les grandeurs telles que les concentrations de porteurs de charge, etc, et décrire l'outil de la conversion photovoltaïque constituée par la jonction PN [7].

La structure actuelle est conçue pour optimiser les performances de la structure classique. Elle se compose de plusieurs couches et l'élément de base de ces structures est la jonction PN. Elle joue un rôle majeur dans les dispositifs solaires et est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations. Pour qu'une cellule solaire fonctionne et transmette correctement l'énergie électrique qu'elle produit à travers la charge, la grille doit avoir une forme spéciale.

II.2 Définition

Les matériaux solides se divisent en trois catégories, les conducteurs (métaux), les diélectriques (isolants) et les semi-conducteurs qui peuvent avoir les deux comportements.

La différence entre les métaux, les isolants et les semi-conducteurs réside au niveau de la largeur de leurs bandes-interdites (domaines d'énergies sans états accessibles pour les électrons). Les matériaux, dont les énergies de la bande interdite (E_g) sont comprises entre 0 et 4 eV, sont appelés semi-conducteurs.

Un semi-conducteur est caractérisé par une bande de valence (BV), une bande de conduction (BC) et une bande-interdite située entre les deux (Figure II.1), on remplit les différentes bandes avec les électrons disponibles dans le matériau, en commençant par les plus basses énergies puis et en complétant les bandes supérieures avec les électrons restant, cela donne la configuration électronique de plus basse énergie, celle qu'a le matériau au zéro absolu (0 Kelvin) : on parle d'état fondamental. A partir de cet état fondamental, on peut définir l'énergie maximale que peut avoir un électron : c'est l'énergie de Fermi [8] (on parle aussi de niveau de Fermi). Ce niveau de Fermi dépendant principalement du dopage [9]

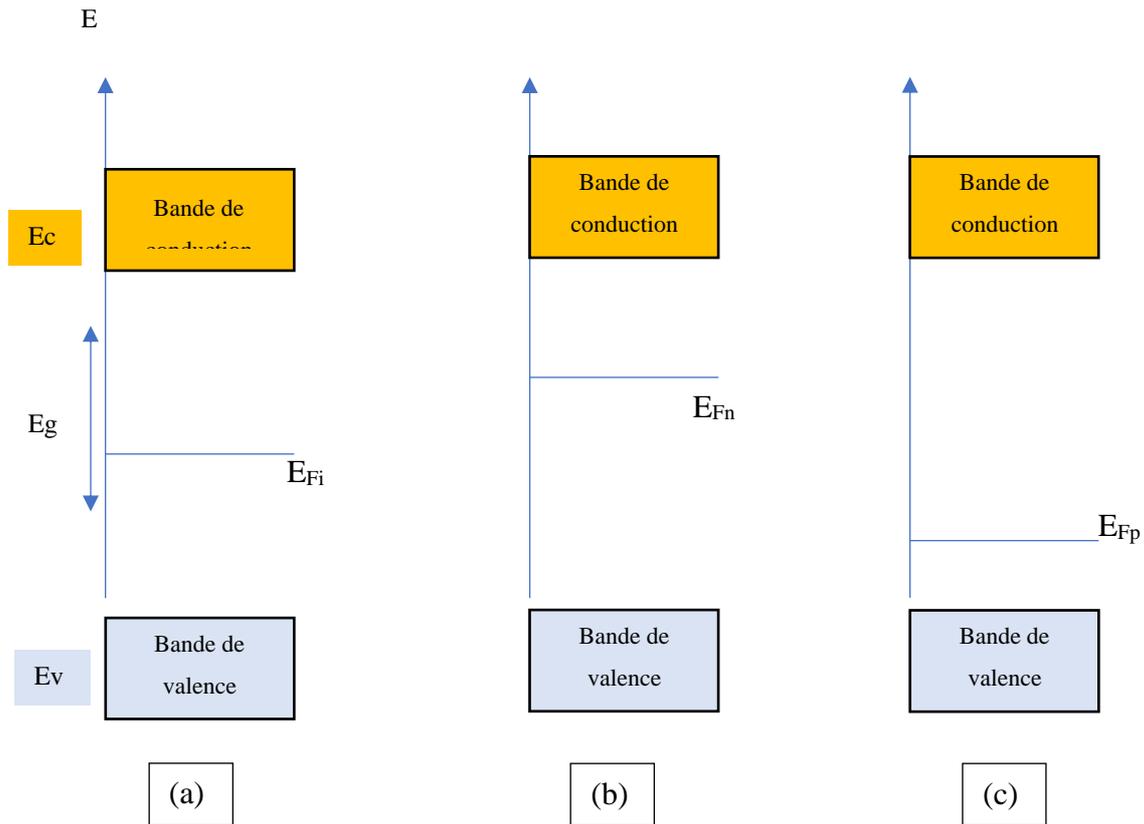


Figure II.1 : Diagramme énergétique des semi-conducteurs, (a) intrinsèque, (b) type n et (c) type p. E_{Fi} , E_{Fn} et E_{Fp} sont respectivement les niveaux de fermi des semi-conducteurs intrinsèques, de type n et de type p.

II.3 Types des semi-conducteurs

On distingue deux types de semi-conducteurs : les semi-conducteurs intrinsèques et les semi-conducteurs extrinsèques.

- Semi-conducteur intrinsèque

Dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque, les électrons de la bande de conduction proviennent seulement de l'excitation thermique et optique de ceux de la bande de valence (Figure II.1). Il en résulte l'équation suivante :

$$n = p \text{ et par conséquent } n = p = n_i$$

Où :

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)} \quad (\text{II-1})$$

Donc :

$$np = n_i^2 \quad (II-2)$$

Avec :

$$\begin{cases} n \approx N_C e^{-\frac{E_C - E_{Fi}}{k_B T}} \\ p \approx N_V e^{-\frac{E_V - E_{Fi}}{k_B T}} \end{cases} \quad (II-3)$$

$$(II-4)$$

et

$$\begin{cases} N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \\ N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \end{cases} \quad (II-5)$$

$$(II-6)$$

Où

n et p représentent, respectivement, les densités des électrons et des trous libres,

n_i est la densité des porteurs intrinsèques ($n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à la température ambiante),

N_C : La densité effective d'états dans la bande de conduction ($2,7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à 300 °K pour Si),

N_V : La densité effective d'états dans la bande de valence ($1,1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à 300 °K pour Si),

E_C : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction,

E_V : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence,

E_{Fi} : Le niveau de fermi intrinsèque,

E_g : L'énergie du gap ($E_g = 1,12 \text{ eV}$ à $T = 300 \text{ K}$),

m_n^* , m_p^* : sont respectivement les masses effectives des électrons et des trous ($m_n^* = 1,06$, m_e et $m_p^* = 0,59 m_e$ pour le silicium), m_e étant la masse de l'électron libre.

- Semi-conducteur extrinsèque

Lorsqu'on dope le semi-conducteur par une densité de donneurs (N_d) ou d'accepteurs (N_a), on parle d'un semi-conducteur extrinsèque, Le matériau étant neutre, l'ensemble des charges positives est égal à l'ensemble des charges négatives l'équation de la neutralité électrique est la suivante [9] :

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad (II-7)$$

Où n et p représentent les densités de porteurs libres et N_a^- et N_d^+ représentent respectivement, les densités de charge d'accepteurs et des donneurs ionisés.

Étudions tout d'abord le système à la température ambiante. En raison du fait que l'énergie thermique $k_B T$ est du même ordre de grandeur que les énergies de liaison de l'électron sur le donneur et du trou sur l'accepteur, tous les donneurs et accepteurs sont ionisés. L'équation de neutralité électrique se réduit donc à :

$$n + N_a = p + N_d \quad (\text{II-8})$$

Dans le cas où tous les atomes accepteurs et les donneurs sont ionisés, alors $N_a^- = N_a$ et $N_d^+ = N_d$ avec N_a et N_d sont respectivement les densités des atomes accepteurs et donneurs.

Notons que la condition $N_a = N_d = 0$ n'est jamais réalisée du fait que lors de la cristallogénèse, le semi-conducteur est toujours contaminé par des impuretés. En d'autres termes, le semi-conducteur intrinsèque n'existe pas, il existe en fait trois types de semi-conducteur [9].

II.3.1 Semi- conducteur compensé semi-Isolant

Il existe toujours dans un semi-conducteur des impuretés incontrôlées que l'on appelle impuretés résiduelles. Pour compenser ces impuretés, on dope le semi-conducteur de manière à se rapprocher le plus possible de la condition $N_a = N_d$.

Supposons que la condition soit réalisée, l'équation s'écrit alors $n = p$ et par conséquent $n = p = n_i$. La densité de porteurs libres dans le semi-conducteur est la même que s'il était intrinsèque. La densité intrinsèque n_i qui est fonction du gap du semi-conducteur, est généralement très faible à la température ambiante. Le semi-conducteur est alors, en ce qui concerne la conductivité, plus proche de l'isolant que du conducteur, on l'appelle alors semi-isolant. Le niveau de Fermi, dont la position est réglée par la population de porteurs libres, est donc situé, comme pour un semi-conducteur intrinsèque, au voisinage du milieu du gap [9].

II.3.2 Semi-conducteur de type n

Considérons un semi-conducteur dopé avec une densité de donneurs supérieure à la densité d'accepteurs, $N_d > N_a$. Il en résulte, d'après l'équation (II-8), $n > p$, on dit alors que le semi-conducteur est de type n. Les électrons sont appelés porteurs majoritaires, les trous, porteurs minoritaires.

L'équation (II-8) associée à la relation $np = n_i^2$ permet d'écrire l'équation :

$$n^2 - (N_d - N_a)n - n_i^2 \quad (\text{II-9})$$

La racine positive de cette équation donne la densité d'électrons, la valeur absolue de sa racine négative donne la densité de trous.

$$n = \frac{1}{2}[N_d + N_a - ((N_d - N_a)^2 + 4n_i^2)]^{1/2} \quad (\text{II-10})$$

$$p = -\frac{1}{2}[N_d - N_a - ((N_d - N_a)^2 + 4n_i^2)]^{1/2} \quad (\text{II-11})$$

Dans la pratique N_d, N_a et $N_d - N_a$ sont toujours très supérieurs à n_i de sorte que les densités d'électrons et de trous s'écrivent respectivement :

$$n \approx N_d - N_a \quad (\text{II-12})$$

$$p \approx n_i^2 / (N_d - N_a) \quad (\text{II-13})$$

II.3.3 Semi-conducteur de type p

Si le dopage est tel que $N_a > N_d$, les porteurs majoritaires sont les trous, le semi-conducteur est de type p. Les densités de porteurs sont données par :

$$n \approx N_d - N_a \quad (\text{II-14})$$

$$p \approx n_i^2 / (N_d - N_a) \quad (\text{II-15})$$

II.4 Différentes formes de recombinaisons des porteurs :

II.4.1 Recombinaisons volumiques

La longueur de diffusion L_d correspond à la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir avant d'être recombinés dans le substrat, L_d dépend de la qualité du matériau et de la mobilité μ (des électrons et des trous). En plus, elle décrit le phénomène de transport de charges qui donne naissance au photo-courant dans les cellules PV [5].

$$L_d = \sqrt{\tau_{n,p} \cdot D_{n,p}} = \sqrt{\tau_{n,p} \cdot \frac{k_B T}{q} \mu_{n,p}} \quad (\text{II-16})$$

L_d : longueur de diffusion,

$D_{n,p}$: coefficient de diffusion des électrons ou des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

k_B : constante de Boltzmann ($k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),

T : température en kelvins,

q : charge électronique ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$),

$\tau_{n,p}$: durée de vie des électrons ou des trous dans le matériau (s),

$\mu_{n,p}$: mobilité des porteurs (électrons ou trous) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

En général, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

II.4.2 Recombinaison radiative (ou directe ou bande à bande)

Elle correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence avec émission d'un photon d'énergie E. C'est l'inverse de la création d'une paire (électron/trou) par un photon.

La recombinaison directe est donc quand un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou de la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaisons prépondérant dans les matériaux à gap direct tels que le GaAs que dans les matériaux à gap indirect comme le Silicium. Étant donné qu'aucune quantité de mouvement (énergie de vibrations) n'est nécessaire dans un semi-conducteur à gap direct, leur taux de recombinaison est plus élevé dans ces matériaux.

La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte.

$$U_{\text{rad}} = B(pn - n_i^2) \quad (\text{cm}^{-3}/\text{s}) \quad (\text{II-17})$$

Avec :

B, le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à $9,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$ pour le silicium [10].

$$\text{Pour le semi-conducteur de type p : } R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (\text{II-18})$$

Pour le semi-conducteur de type n : $R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$ (II-19)

τ_n et τ_p sont respectivement les durées de vie des électrons et des trous minoritaires.

II.4.3 Recombinaison volumique Auger

Le processus de recombinaison non radiatif, se manifeste lorsque la densité de porteurs de charges libres (électrons et trous) dépasse $10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ [11]. Le porteur recombinant transmet son énergie bande à bande, à un porteur excité d'un niveau énergétique plus élevé. Notons que la participation de phonons (Mode de vibrations du réseau cristallin) entraîne un effet de « thermalisation » de la cellule, ce mécanisme de recombinaison, plus compliqué en réalité est dominant à fort taux d'injection et pour de fortes densités de dopants.

Le taux de recombinaison total est calculé selon la formule suivante :

$$U_{Aug} = (C_n n + C_p p)(pn - n_{ieff}^2) \quad \text{(II-20)}$$

Où :

C_n et C_p sont respectivement les probabilités de capture des électrons et des trous [12].

II.4.4 Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les niveaux profonds des défauts.

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes. L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent).

Le modèle physique décrivant les recombinaisons à travers les défauts est basé sur le modèle de Shockley-Read-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation :

$$U_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left(p + n_{ieff} e^{\frac{E_T - E_i}{k_B T}} \right) + \tau_p \left(n + n_{ieff} e^{\frac{E_i - E_T}{k_B T}} \right)} \quad (\text{II-21})$$

E_T : représente l'énergie du niveau piège dans le gap d'énergie,

n_{ieff} : est la concentration intrinsèque effective,

La durée de vie SRH des porteurs est donnée par la relation :

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{n0}(p_0 + p_1 + \Delta n) + \tau_{p0}(n_0 + n_1 + \Delta n)}{n_0 + p_0 + \Delta n} \quad (\text{II-22})$$

Où, n_0 et p_0 sont respectivement, les concentrations des électrons et des trous à l'équilibre, n_1 et p_1 sont des facteurs statistiques.

τ_{n0} et τ_{p0} sont respectivement les durées de vie des électrons et des trous lorsque les centres pièges sont complètement occupés et qui dépendent de la concentration et des sections efficaces de capture des porteurs libres par les pièges, elles sont données par les relations suivantes :

$$\tau_{n0} = \frac{1}{v_{th,n} \cdot \sigma_n \cdot N_t} \quad (\text{II-23})$$

$$\tau_{p0} = \frac{1}{v_{th,p} \cdot \sigma_p \cdot N_t} \quad (\text{II-24})$$

Où σ_n et σ_p représentent les sections efficaces de capture des électrons et trous,

N_t : la concentration des défauts,

$v_{th,n,p}$: sont les vitesses thermiques des électrons et les trous, données par :

$$v_{th,n,p} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_{n,p}^*}} \quad (\text{II-25})$$

En régime de faible injection, la durée de vie SRH se simplifie aux relations suivantes :

- Pour le silicium de type p :

$$\tau_{SRH n} = \tau_{n0} = \frac{1}{v_{th,n} \cdot \sigma_n \cdot N_t} \quad (II-26)$$

- Pour le silicium de type n :

$$\tau_{SRH p} = \tau_{p0} = \frac{1}{v_{th,p} \cdot \sigma_p \cdot N_t} \quad (II-27)$$

II.4.5 Durée de vie en volume

Le taux de recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume U_{vol} est donné par la somme des contributions de chaque taux de recombinaison vu précédemment :

$$U_{vol} = U_{Rad} + U_{Auger} + U_{SRH}$$

En conséquence, la durée de vie volumique totale est donnée par la relation suivante :

$$\frac{1}{\tau_{vol}} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (II-28)$$

II.4.6 Recombinaison surfacique

La surface d'un substrat de silicium cristallin (c-Si) représente une discontinuité du réseau cristallographique. Ceci entraîne la présence de liaisons non saturées ou liaisons pendantes. Ces défauts structuraux introduisent des niveaux énergétiques dans le gap du silicium qui vont assister les phénomènes de recombinaison en surface. Les liaisons pendantes peuvent être saturées par le dépôt d'une couche de matériau à la surface. On parle alors de passivation des défauts de surface qui réduit les recombinaisons en surface (couche passivation : SiO₂ ou SiN pour le silicium). La notion de densité d'états d'interface $D_{int}(E)$ exprimée en cm⁻² eV⁻¹ est utilisée pour caractériser les niveaux d'énergie introduits par les défauts de surface.

Le taux de recombinaison en surface U_s est proportionnel à la concentration volumique des porteurs en excès δ_n juste sous la surface.

Le coefficient de proportionnalité S est défini par :

$$U_{surf} = S\delta_n \quad (\text{II-29})$$

S : s'exprime en cm/S, pour cela, on l'appelle « vitesse de recombinaison en surface ».

Donc la qualité d'une surface est généralement donnée par la valeur de la vitesse de recombinaison de surface (contrairement à la durée de vie pour le cas de la recombinaison volumique) [10].

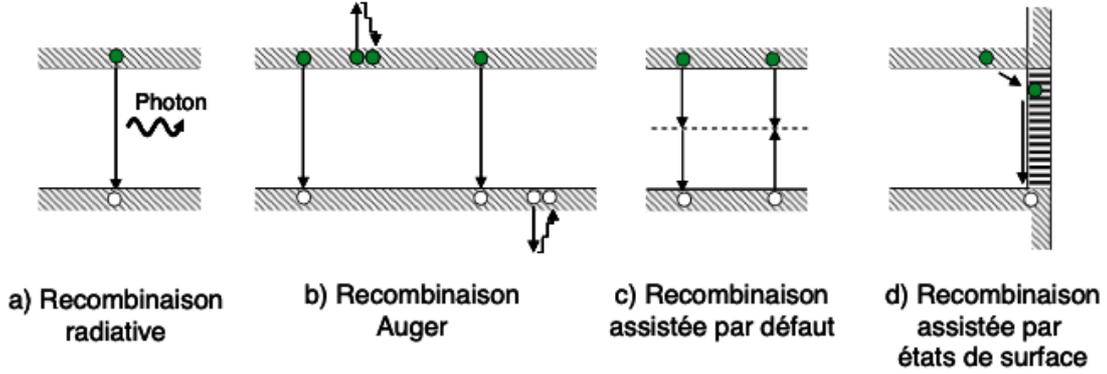


Figure II.2 : Représentation des différents mécanismes de recombinaison [14].

II.4.7 Durée de vie effective

La durée de vie effective τ_{eff} devient :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{vol}} + \frac{1}{\tau_{surf}} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{suf}} \quad (\text{II-30})$$

Exemple :

Dans un simple cas où l'échantillon d'épaisseur (W) possède une durée de vie constante (τ_{vol}) et une faible vitesse de recombinaison (S) sur chaque surface.

La recombinaison effective U_{eff} est le taux global de toutes ces contributions. Il est donné par :

$$U_{eff} = U_{vol} + U_{surf\ 1} + U_{surf\ 2} = U_{vol} + 2 U_{surf} \quad (\text{II-31})$$

Dans ce cas simplifié, la durée de vie effective est donnée par la relation suivante [9] :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{vol}} + \frac{2S}{W} \quad (\text{II-32})$$

W est l'épaisseur du substrat.

II.5 le courant dans les semi-conducteurs :

Le déplacement des porteurs de charges (électrons et trous) résulte les courants dans les semi-conducteurs, soit par l'application d'un champ électrique \vec{E} ou par l'existence d'un gradient de concentration [10].

- Le courant de conduction \vec{J}_c est donné par la loi d'ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-33})$$

Avec :

σ est la conductivité du semi-conducteur (égale à l'inverse de la résistivité ρ) et est donnée par la relation [13] :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{II-34})$$

Donc :

$$\text{Pour les électrons :} \quad \vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} \quad (\text{II-35})$$

$$\text{Pour les trous :} \quad \vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} \quad (\text{II-36})$$

Tableau II.1: Mobilités des électrons et des trous de semi-conducteur Silicium à la température ambiante.

Mobilités	Si
$\mu_n \left(\frac{cm^2}{V.s} \right)$	1350
$\mu_p \left(\frac{cm^2}{V.s} \right)$	480

Le courant total de conduction s'écrit :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E} \quad (\text{II-37})$$

- Le second courant qui apparaît dans les semi-conducteurs est le courant de diffusion (dû au gradient de concentration) :

Ce courant de diffusion \vec{J}_D est donné par la loi de Fick [10] :

$$\vec{J}_n = qD_n \overrightarrow{\text{grad}n} \rightarrow \text{Pour les électrons} \quad (\text{II-38})$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \overrightarrow{\text{grad}p} \rightarrow \text{Pour les trous} \quad (\text{II-39})$$

Où :

D_n et D_p sont les coefficients de diffusion respectivement des électrons et des trous. Donc, le courant total de diffusion s'écrit :

$$\vec{J}_D = qD_n \overrightarrow{\text{grad}n} - qD_p \overrightarrow{\text{grad}p} \quad (\text{II-40})$$

Alors, quand on fait la sommation des deux courants, on obtient :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \overrightarrow{\text{grad}n} \\ \vec{J}_p = qn\mu_p \vec{E} - qD_p \overrightarrow{\text{grad}p} \end{cases} \quad (\text{II-41})$$

Ces deux relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ électrique ($\vec{v} = \mu \vec{E}$).

Si on considère le modèle de type linéaire (à une dimension), les dernières équations deviennent alors :

$$\begin{cases} \vec{J}_n(x) = qn(x)D_n \vec{E}(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \vec{i} \\ \vec{J}_p(x) = qn(x)\mu_p \vec{E}(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \vec{i} \end{cases} \quad (\text{II-42})$$

Avec :

\vec{i} : le vecteur unitaire suivant l'axe des x du système linéaire à une seule dimension.

Sachant que les constantes D_p et D_n sont liées aux mobilités μ_n et μ_p par la relation d'Einstein :

$$D_{n,p} = \frac{k_B T}{q} \mu_{n,p} \quad (\text{II-43})$$

Sachant que le champ électrostatique résulte du gradient du potentiel : ($\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V}$).

Suivant x, on a :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II-44})$$

Hors l'équilibre, la variation du nombre de porteurs par seconde est donnée par les équations de continuité des électrons et des trous sous la forme [10] :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p \end{cases} \quad (\text{II-45})$$

Avec :

G_n, G_p : sont les taux de génération respectifs des électrons et des trous,

U_n, U_p : sont les taux de recombinaisons respectifs des électrons et des trous.

L'étude d'un dispositif à semi-conducteur consiste à résoudre ce système d'équations, avec celui des équations de courant (II-41)

En plus, on doit utiliser l'équation de poisson :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} = \frac{q(p-n+N_d-N_a)}{\varepsilon} \quad (\text{II-46})$$

Avec :

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, ε est la permittivité absolue du semi-conducteur, ε_r , sa permittivité relative ($\varepsilon_r = 11,7$ pour *Si*) et ε_0 la permittivité du vide,

ρ : est la densité de charge d'espace.

En régime permanent, on a :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-47})$$

II.6 Jonction PN

La dissociation des paires électron/trou photo-générées nécessite la présence d'un champ électrique permanent. Dans le cas des cellules solaires à base de silicium, la structure utilisée est une jonction PN, comme le montre la figure II.3 dans le cas d'une cellule photovoltaïque en silicium de type p.

Cette dernière est constituée d'un substrat de base en silicium de type p possédant une zone fortement dopée n^+ en face avant, appelée émetteur, d'une Couche Anti-Reflet (CAR) en face

avant limitant la réflexion des photons sur la surface et de contacts métalliques en face avant et arrière afin de collecter le photo-courant généré. L'épaisseur typique du substrat de base peut varier entre 50 μm et 300 μm et celle de l'émetteur, en général très fin, est comprise entre 0,2 μm et 2 μm [15].

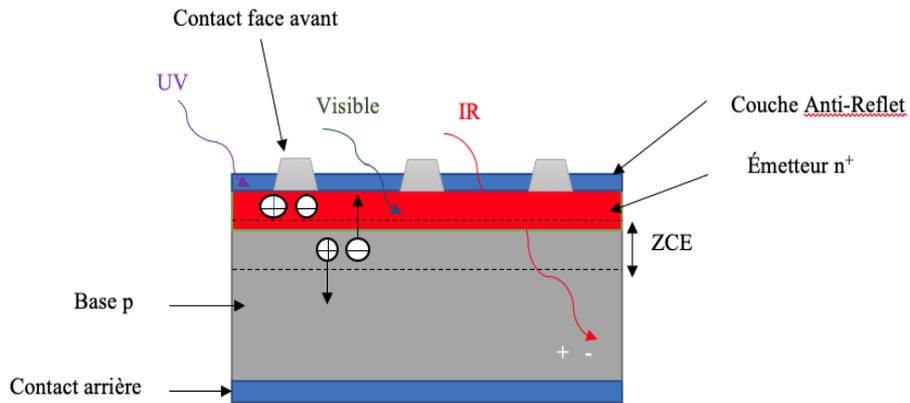


Figure II.3 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium de type p.

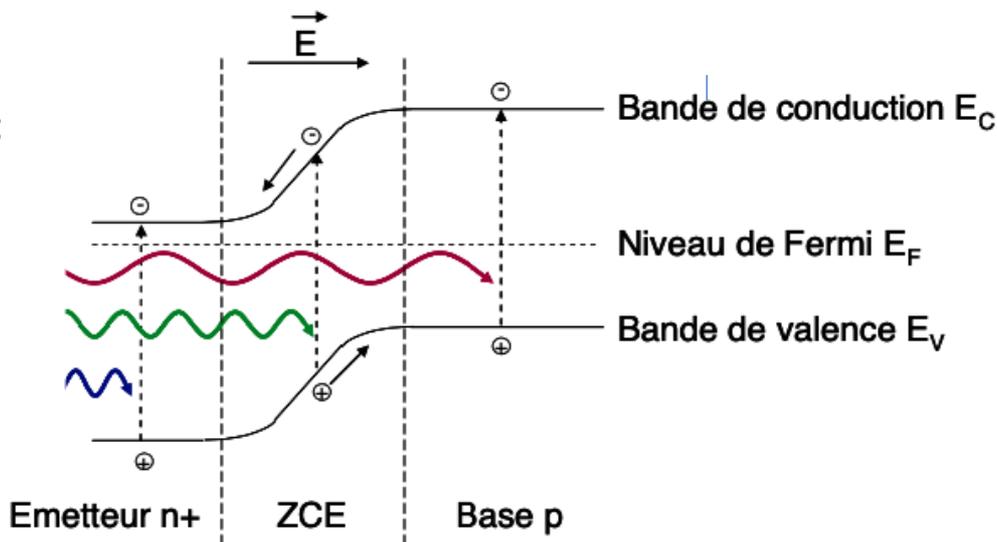


Figure II.4 : Diagramme des bandes d'énergies [16].

Le principe de base des cellules solaires est la formation de la jonction par le surdopage de silicium, créant une barrière de potentiel dans le semi-conducteur qui permet de séparer les électrons et les trous générés par l'absorption de la lumière dans le matériau et empêche tout déplacement des charges dans le sens inverse et facilitant ainsi la séparation des couples (électron/trous) et la collecte des charges libres [16].

Lorsqu'on juxtapose un semi-conducteur de type n et un autre de type p, à leur interface, les électrons du semi-conducteur de type n vont voir tout un espace libre en électrons à occuper. Ils vont donc diffuser (courant de diffusion) vers le semi-conducteur de type p et la même chose pour les trous (figure II.5). Ces électrons et ces trous vont alors se recombiner dans l'interface, laissant une zone très étroite vidée de ses porteurs majoritaires et pleine d'ions P^+ et B^- , immobiles, lorsque le silicium est dopé au phosphore et au bore de part et d'autre de la jonction PN. On appelle cette zone « Zone de Charge d'Espace » ZCE comme montrée sur la figure II.5. Sa largeur varie en moyenne entre $0,1 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$.

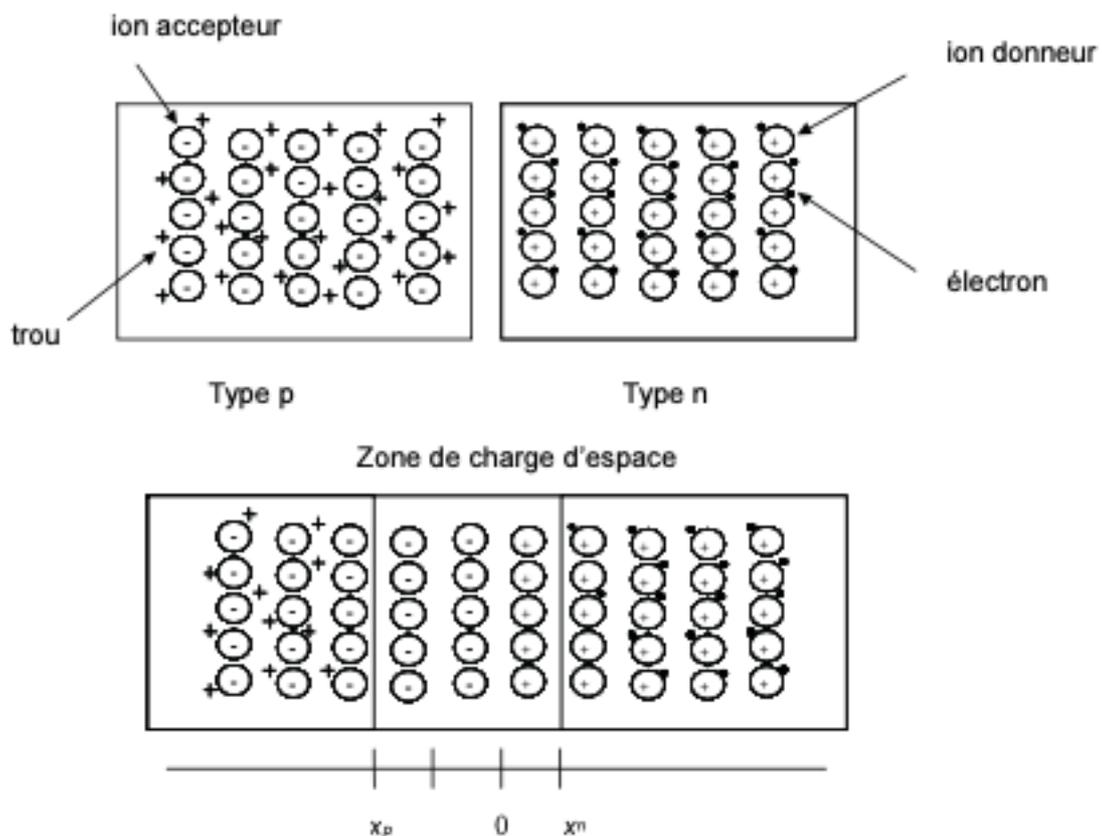


Figure II.5 : La jonction PN [10].

II.6.1 Charge d'espace

Nous supposons que dans chacune des régions, la conductivité est de nature extrinsèque, c'est-à-dire que les conditions $(N_d - N_a)_n \gg n_i$ et $(N_a - N_d)_p \gg n_i$ sont remplies dans chacune des régions. En outre, dans le but de simplifier l'écriture, nous appellerons N_d l'excédent de

donneurs dans la région de type n, $N_d = (N_d - N_a)_n$ et N_a l'excédent d'accepteurs dans la région de type p, $N_a = (N_a - N_d)_p$ [9].

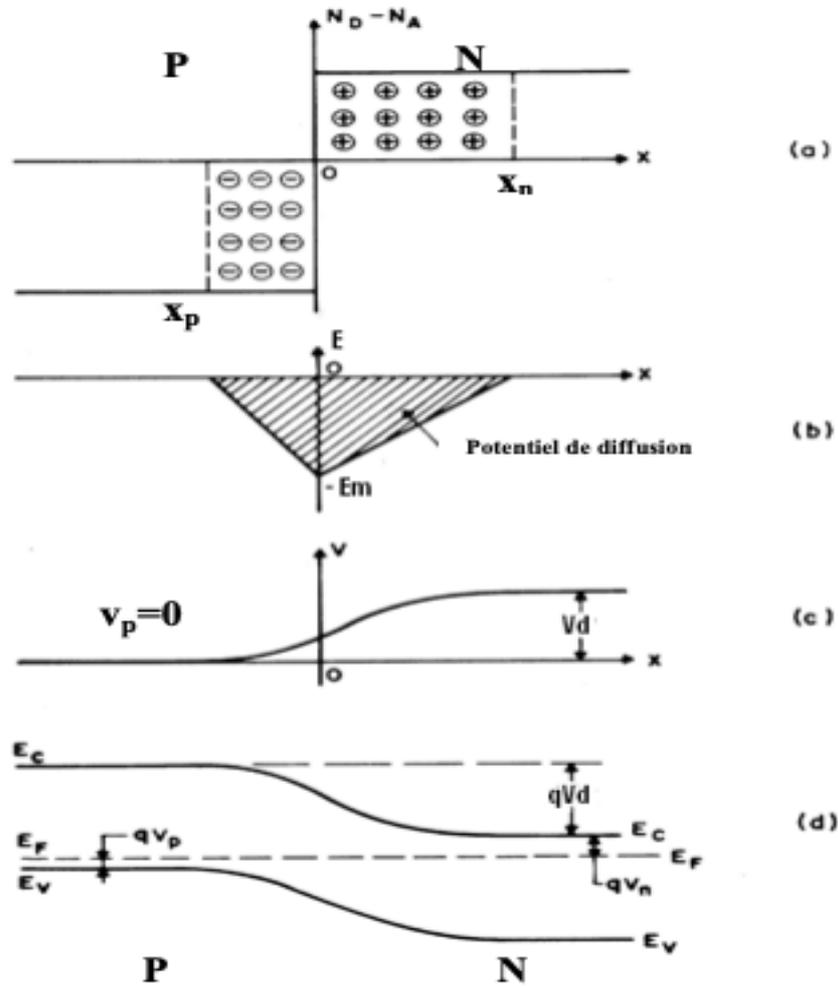


Figure II.6 : Jonction PN à l'équilibre thermodynamique [10].

Pour le modèle simple de la jonction abrupte, on a la variation de la densité de charge le long de la jonction :

$$\begin{cases} \rho(x) = 0 & \text{pour } x > x_n \text{ et } x < x_p \\ \rho(x) = -qN_a & \text{pour } x_p < x < 0 \\ \rho(x) = qN_d & \text{pour } 0 < x < x_n \end{cases} \quad (\text{II-48})$$

Avec q , la valeur absolue de la charge électronique égale à $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

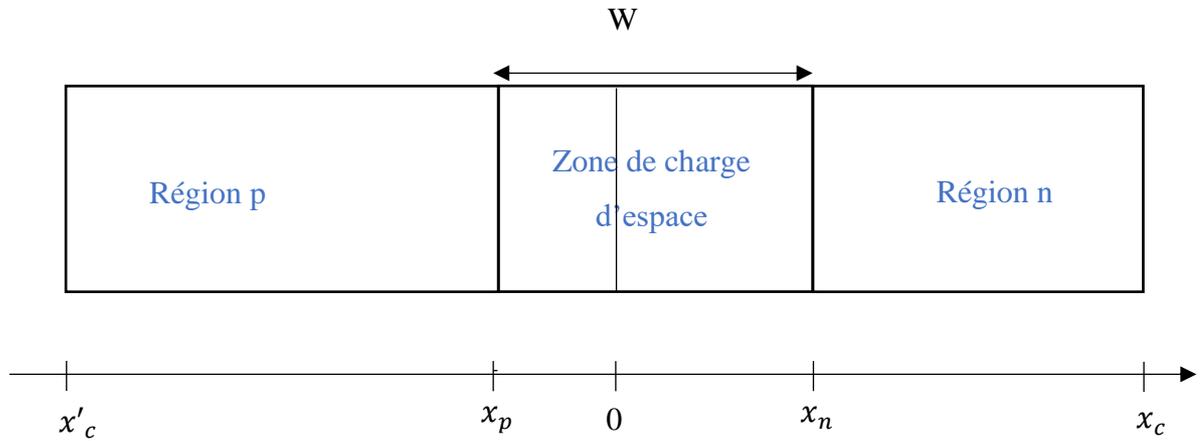


Figure II.7 : Paramètres géométriques de la jonction PN.

Cette zone de transition provoque une barrière de potentiel au niveau de la ZCE.

La valeur de la tension de diffusion V_D s'exprime en fonction des densités de dopants dans l'émetteur et la base du matériau semi-conducteur par la relation [9]:

$$V_D = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (\text{II-49})$$

Pour les dopages utilisés pour le silicium en pratique ($N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) et compte tenu des valeurs de n_i à la température ambiante, la valeur de V_D est respectivement de l'ordre de 0,7 V.

Dans notre cas, la largeur de la zone de charge d'espace est $W = W_n + W_p$. Si la jonction est très dissymétrique, avec par exemple $N_d \gg N_a$ qui va être le cas de la cellule à étudier, la zone de charge d'espace se développe essentiellement dans la région la moins dopée, sa largeur est donnée par :

$$W \approx W_p \approx 2 \sqrt{\frac{\varepsilon k_B T}{2q^2 N_a} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)} \quad (\text{II-50})$$

Il existe deux types de jonctions :

- **Une homo-jonction** est constituée par un seul substrat semi-conducteur (ce qui est le cas de la cellule étudiée) dans lequel se trouvent deux régions dopées différemment, l'une de type n et l'autre de type p,
- **Une hétéro-jonction** est la mise en contact de deux semi-conducteurs de natures différentes et de types opposés.

II.6.2 Jonction polarisée

Pour polariser une jonction PN, on doit appliquer une tension entre les extrémités de ces deux régions, on distingue deux types de polarisation :

- La polarisation directe,
- La polarisation inverse.

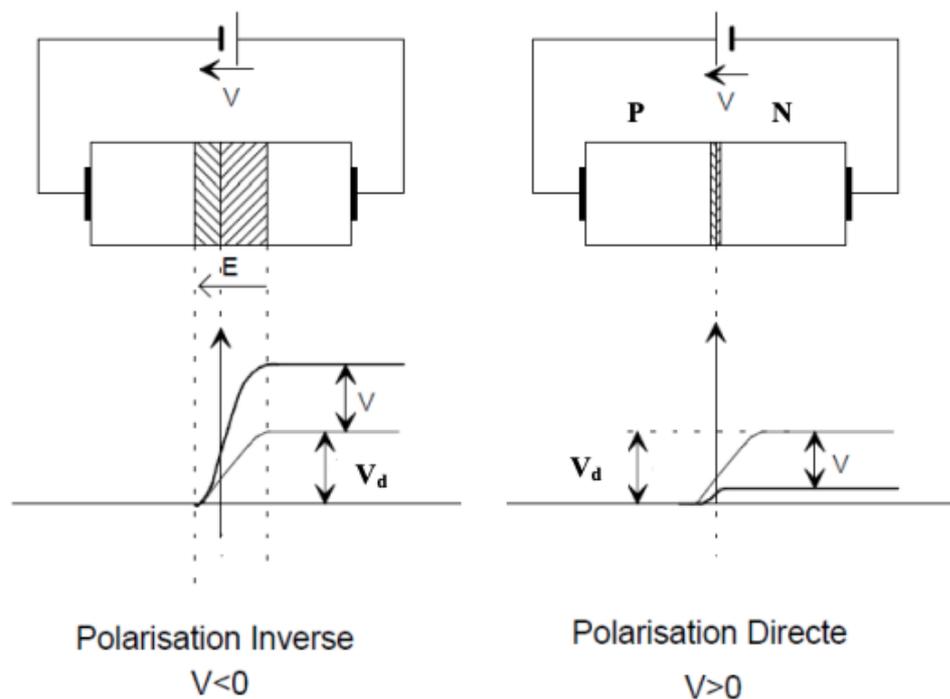


Figure II.8: La jonction PN en polarisation directe et inverse [14].

II.6.3 La polarisation directe

Lorsque la tension de polarisation $V > 0$ est positive, la différence de potentiel entre les régions n et p au niveau de la jonction, devient $V_n - V_p = V_D - V$ et la largeur W de la zone de déplétion $q(V_D - V)$ (Figure II.8). Il suffit d'observer le décalage des niveaux de Fermi dans les régions neutres pour expliquer cette modification. La différence des niveaux de Fermi dans les régions neutres est la différence de potentiel appliquée. Bande de valence et bande de conduction se positionnent dans les régions neutres par rapport au niveau de Fermi en fonction du dopage. La barrière de potentiel n'est plus suffisante pour arrêter la diffusion des porteurs majoritaires. La diode est polarisée dans le sens direct, le courant direct circule de la région p vers la région n.

L'épaisseur de la zone de charge d'espace est donnée comme suit [9] :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \ln\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} (V_D - V) \quad (\text{II-51})$$

II.6.4 La polarisation inverse

Lorsque la tension de polarisation $V < 0$ est négative, la différence de potentiel aux bornes de la zone de charge d'espace est augmentée, $V_n - V_p = (V_D + |V|)$, et la largeur de la barrière de potentiel devient $q(V_D + |V|)$ (Figure II.8).

L'équilibre entre le courant de conduction et le courant de diffusion est rompu mais cette fois au profit du courant de conduction. La diffusion des porteurs majoritaires est bloquée, seuls les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace passent dans la région opposée, propulsés par le champ électrique. La diode est polarisée dans le sens inverse, le courant inverse circule de la région n vers la région p. En raison des différences de densités entre les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires, il reste alors le seul courant inverse ou courant de saturation J_s de la diode [9].

L'épaisseur de la zone de charge d'espace est donnée comme suit :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \ln\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} (V_D + |V|) \quad (\text{II-52})$$

II.7 Caractéristique J-V et performance d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique J-V d'une cellule photovoltaïque idéale est régie par l'équation (II-53). Sous obscurité, la caractéristique J-V de la cellule est celle d'une diode. Sous éclairage, le courant photo-généré J_{ph} s'ajoute à ce courant d'obscurité J_{Obs} de la cellule tel que :

$$J(V) = J_{ph} - J_{obs}(V) = J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (II-53)$$

Avec :

J_{ph} : la densité du courant photo-généré en A/cm^2 ,

J_{obs} : la densité du courant de la diode à l'obscurité en A/cm^2 ,

V : la tension aux bornes de la diode en Volts,

J_s : la densité du courant de saturation de la diode en A/cm^2 .

La caractéristique courant-tension réelle est présentée sur la figure II.9.

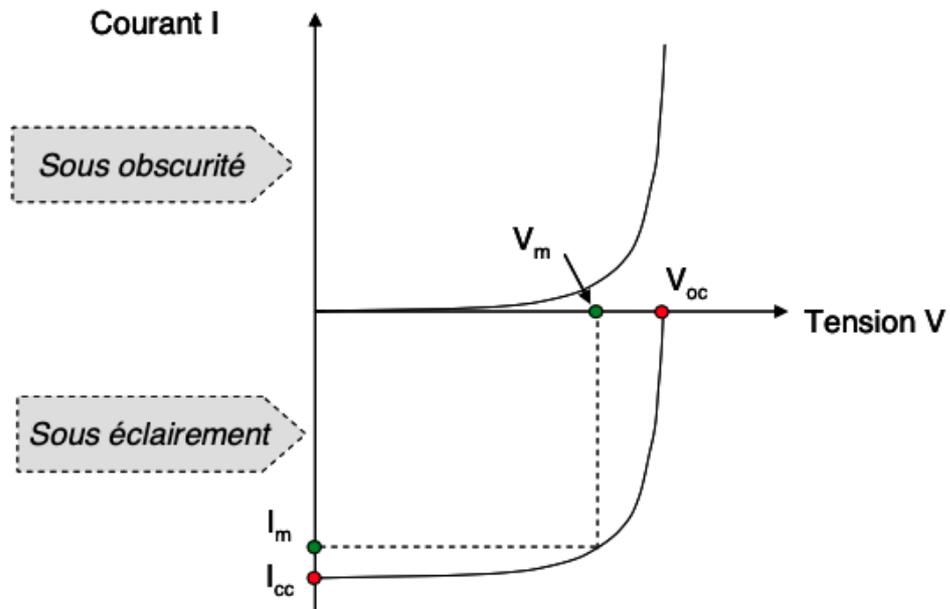


Figure II .9 : Caractéristiques J-V sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque [16].

La courbe J-V décrite par l'équation II- 54 est celle d'une cellule idéale et correspond à un modèle simple à une diode. Ce dernier diffère du cas réel puisqu'il ne prend en compte ni l'influence des résistances série, ni celle des recombinaisons dans la zone de charge d'espace.

On fait l'hypothèse de la présence d'un seul centre de recombinaison au milieu de la bande interdite du silicium et d'une vitesse de recombinaison constante dans la ZCE [16].

Sur la figure ci-dessous, on présente les différentes générations de paires électron-trou qui vont participer aux contributions des courants générés dans les trois zones de la cellule (émetteur, ZCE et base) qui s'ajoutent pour créer le photo-courant résultant J_{ph} et qui contribue au courant total de la cellule PV.

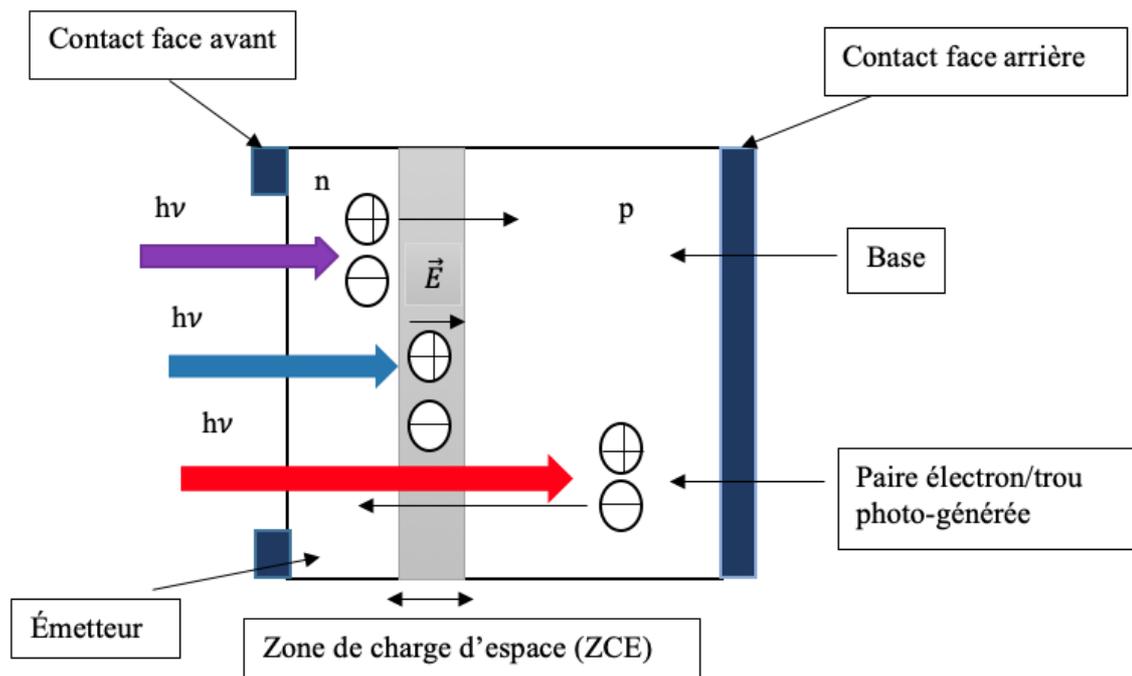


Figure II.10: Les 3 zones de générations des paires électron-trou de la structure simple d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Les particules générées dans le dispositif sont collectées entre une grille (face avant) et un contact ohmique (face arrière) et acheminées à une charge externe.

II.7.1 Modèle à deux diodes

Le modèle électrique réel d'une cellule solaire, est constitué d'une source de courant (\mathbf{J}_{ph}) modélisant l'éclairement, d'une diode \mathbf{D}_1 en parallèle (de facteur d'idéalité $n_1=1$) spécifiant le courant de diffusion (recombinaison) dans l'émetteur et la base de la cellule solaire (zones neutres), d'une seconde diode \mathbf{D}_2 également en parallèle (de facteur d'idéalité $n_2=2$) tenant compte de la recombinaison des porteurs dans la Zone de Charge d'espace, d'une résistance série \mathbf{R}_s , qui modélise les pertes résistives (grille, la base et émetteur et d'autres contributions qui vont être revues dans le chapitre suivant), et d'une résistance parallèle (shunt en anglais) \mathbf{R}_{sh} qui prend en compte les pertes et les courants de fuites dans la cellule (voir Figure III-1).

La caractéristique $J(V)$ dans le 4ème quadrant s'écrit sous la forme suivante [14] :

$$J = J_{01} \left(e^{\frac{q(V-JR_s)}{k_B T}} - 1 \right) + J_{02} \left(e^{\frac{q(V-JR_s)}{2k_B T}} - 1 \right) + \frac{V-JR_s}{R_{sh}} - J_{Ph} \quad (\text{II-54})$$

Où :

$J_{01} \left(e^{\frac{q(V-JR_s)}{k_B T}} - 1 \right) + J_{02} \left(e^{\frac{q(V-JR_s)}{2k_B T}} - 1 \right)$ sont les composantes du courant d'obscurité.

En inversant tous les courants dans le 1^{er} quadrant, on aboutit à :

$$J = J_{Ph} - J_{01} \left(e^{\frac{q(V+JR_s)}{k_B T}} - 1 \right) - J_{02} \left(e^{\frac{q(V+JR_s)}{2k_B T}} - 1 \right) - \frac{V+JR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II-55})$$

Avec :

$$J_{01} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_a L_p th \left(\frac{dn}{L_p} \right)} + \frac{qn_i^2 D_n}{N_a L_n th \left(\frac{dp}{L_n} \right)} \quad (\text{II-56})$$

J_{01} est la densité de courant de saturation dans les zones neutres,

J_{02} est la densité de courant de saturation dans la zone de charge d'espace,

dn, dp étant les longueurs des régions n et p.

Cette dernière est donnée par la relation suivante [14] :

$$J_{02} = \frac{1}{2} q n_i w \sigma v_{th} N_t \quad (\text{II-57})$$

Tous les paramètres de J_{02} ont été définis plus haut.

Exemple de caractéristiques J-V et P-V sous éclairement :

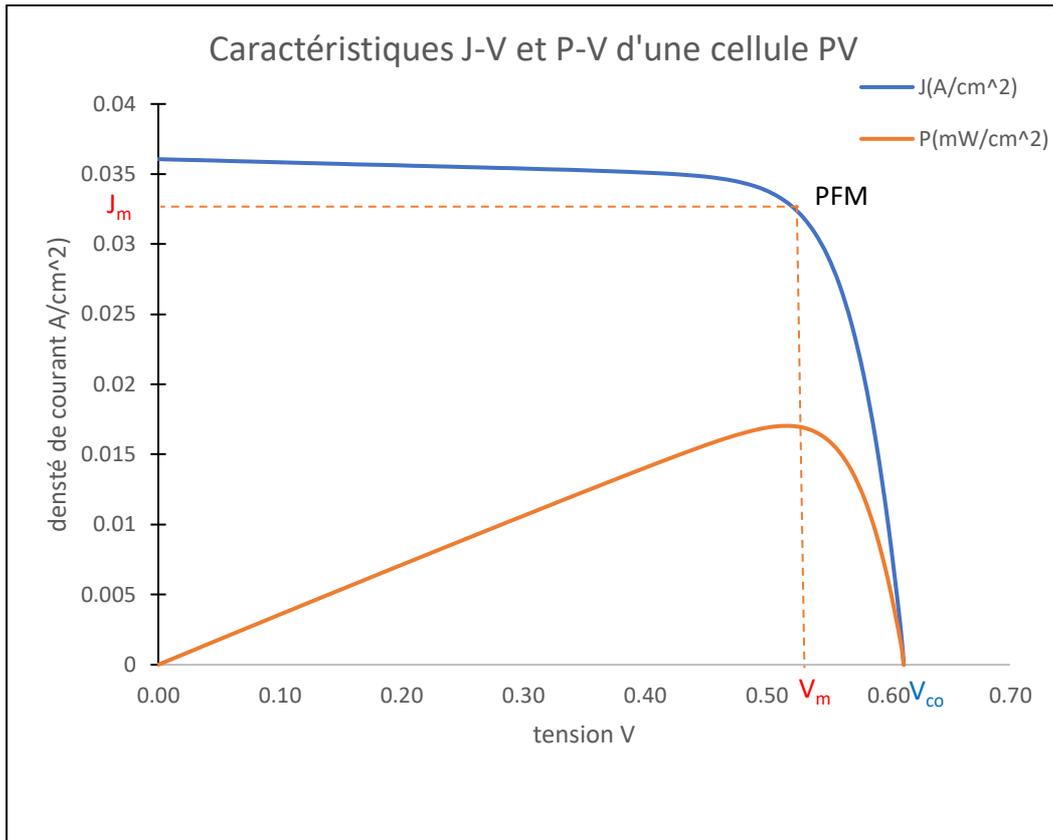


Figure II.11 : Caractéristiques J-V et P-V d'une cellule PV sous éclaircment.

II.7.2 Schéma électrique équivalent

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque basée sur un modèle à deux diodes, est représenté sur la figure II.12.

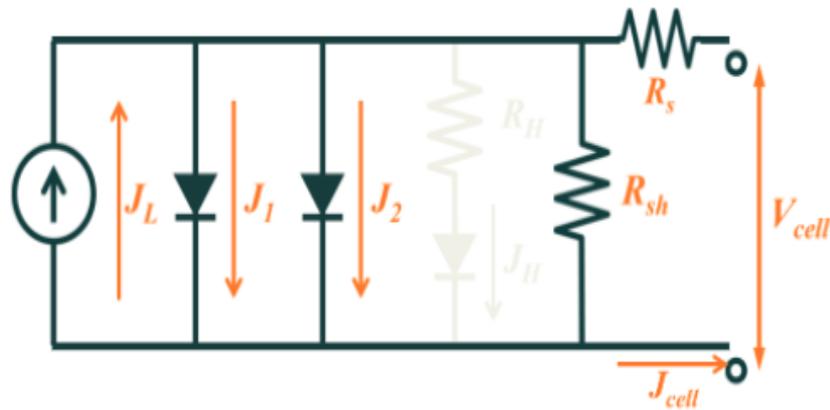


Figure II.12 : Schéma électrique équivalent à deux diodes d’une cellule photovoltaïque réelle [18].

II.8 Performance d’une cellule solaire

En utilisant les caractéristiques **J-V**, il est possible d’extraire les paramètres fondamentaux d’une cellule solaire, à savoir, le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (**FF**) et le rendement de conversion (η).

II.8.1 Courant de court-circuit J_{cc}

Il s’agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l’intensité d’illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d’onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température et est donné par la relation suivante [14] :

$$J_{cc} \approx -J_{01} - J_{02} + I_{ph} \approx I_{ph}$$

Le courant de court-circuit correspond presque au courant photo-généré I_{ph} . Pour la caractérisation des cellules photovoltaïques, le courant de court-circuit est normalisé par rapport à la surface du dispositif. La densité du courant de court-circuit J_{cc} s’exprime alors en mA/cm².

II.8.2 La tension de circuit ouvert V_{co}

Quand la tension augmente, le terme des recombinaisons dans la zone de charge d'espace devient négligeable devant le terme de diffusion ($e^{(qV/2k_B T)} < e^{(qV/k_B T)}$), le troisième terme de l'équation (II- 54) est négligé (résistance parallèle très élevée). Par conséquent, la tension de circuit-ouvert (V_{co}) qui est la valeur de la tension aux bornes du dispositif lorsque le courant s'annule ($J=0$) est exprimée par la relation suivante [14] :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_{01}} + 1 \right) \quad (\text{II-58})$$

Le courant de saturation à l'obscurité J_{01} est fonction des constantes de diffusion et des longueurs de diffusion des porteurs ainsi qu'au dopage N (N_a et N_d) pour les deux régions de la cellule (base et émetteur).

II.8.3 Le facteur de forme FF

Il nous renseigne sur la qualité de la cellule solaire, il permet de qualifier la rectangularité de la courbe $J(V)$. On s'éloigne du cas idéal lorsque la résistance série est trop élevée, ou encore quand la résistance parallèle est faible. Le facteur de forme est donné par la formule :

$$FF = \frac{P_m}{J_{cc} V_{co}} = \frac{J_m V_m}{J_{cc} V_{co}} \quad (\text{II-59})$$

P_m est la puissance maximale fournie par le composant au point optimal de fonctionnement maximal (J_m , V_m). Pour le modèle simple d'une seule diode et sans tenir compte des résistances série et shunt, le facteur de forme est donné par la relation semi-empirique suivante [14] :

$$FF = \frac{V_{co} - \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{q V_{co}}{k_B T} + 0,72 \right)}{V_{co} + \frac{k_B T}{q}} \quad (\text{II-60})$$

Cette relation montre que le facteur de forme est étroitement lié à la tension de circuit ouvert, et qui augmente lentement avec son accroissement.

II.8.4 Le rendement de conversion d'énergie η

Le rendement de conversion η d'une cellule photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance débitée au point de fonctionnement maximal (PFM) P_m et la puissance lumineuse

incidente P_i de 100 mW/cm^2 (spectre solaire AM1.5 au chapitre I (figure I.3)). Il est lié aux trois paramètres précédents et est donné par la relation [5] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot J_{cc} \cdot V_{co}}{P_i} \quad (\text{II-61})$$

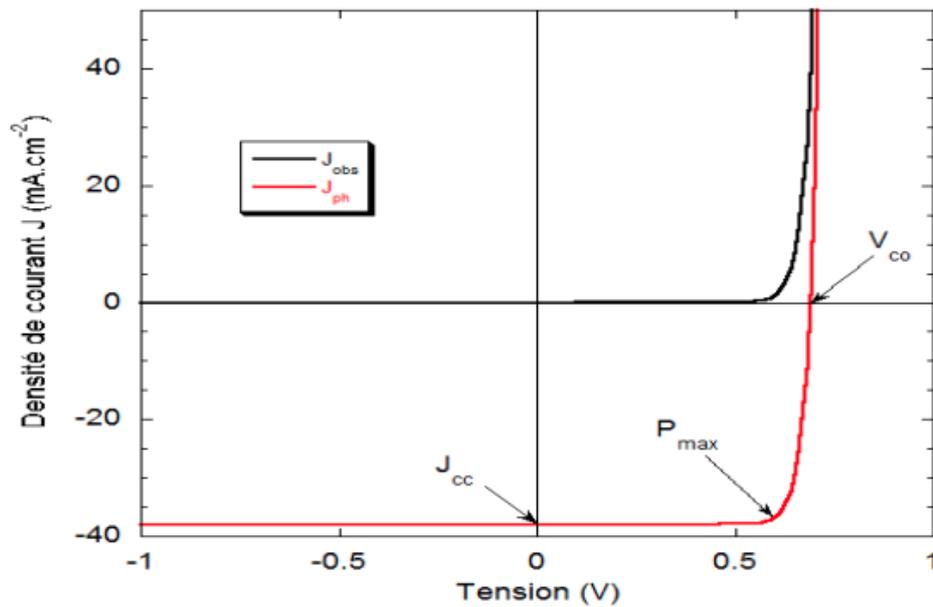


Figure II.13 : Paramètres de la cellule solaire [14].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, quelques notions sur les semi-conducteurs ainsi que les différentes recombinaisons, les grandeurs caractéristiques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre III : La cellule solaire

III.1 Définition de la cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque.

III.2 Présentation des paramètres géométriques de la cellule

Sa structure est illustrée dans la figure (III.1) ci-dessous.

Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes sont particulièrement complexes.

La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur (ici le silicium) de substrat (base) de type p et l'émetteur formé par diffusion thermique au phosphore est de type n^+ . Le tout constitue la jonction PN de la cellule qui représente le cœur de la cellule photovoltaïque ; elle représente le vrai générateur dans le dispositif.

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photo-générés, pour cela ; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant éclairée (doigts et busbarres). La géométrie de cette grille étant un compromis entre un faible ombrage du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n^+ [19].

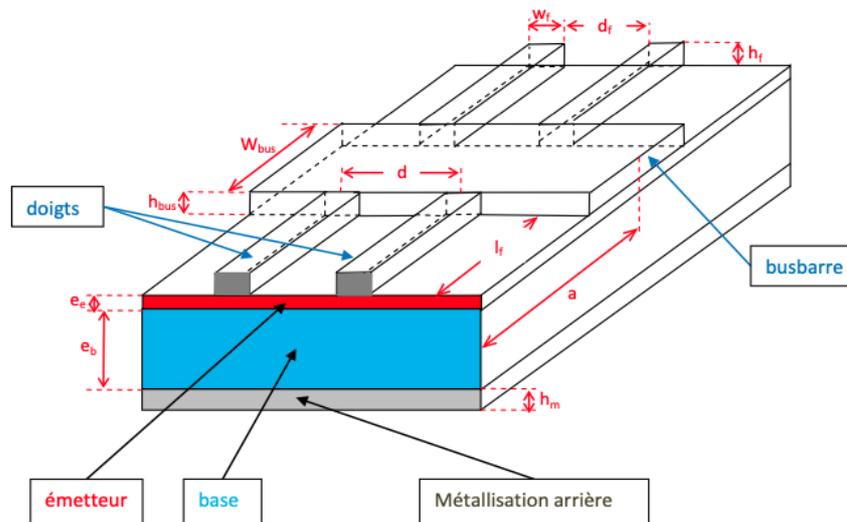


Figure III.1 : Paramètres géométriques d'une partie de la cellule PV.

Sur la figure III.I sont indiquées les différents paramètres géométriques des différentes parties de la cellule (base, émetteur, grille métallique de la face avant, face arrière métallique).

III.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption des photons,
- La conversion de l'énergie absorbée en charge électrique libre,
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

III.3.1 Choix de matériau

Le matériau utilisé dans la fabrication de la cellule doit avoir certaines propriétés électriques et optiques bien définies pour permettre la conversion photovoltaïque.

Le choix de matériau doit être capable d'absorber le maximum d'énergie solaire (plus particulièrement la partie la plus intense du spectre solaire) afin de libérer des électrons qui deviennent alors des porteurs de charges électriques mobiles dans la bande de conduction (courant d'électrons) en laissant derrière eux des vacances, les trous, qui à leur tour, peuvent se

déplacer dans le matériau dans la bande de valence (courant de trous qui s'ajoute à celui des électrons). Le matériau adéquat est le semi-conducteur car il a une bande interdite convenable au spectre solaire (1 à 1,5 eV) [12].

III.3.2 Silicium

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique des éléments de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence. Bien que le silicium ne soit pas le seul matériau pour la conversion PV, mais il est le plus utilisé à ce jour pour la réalisation des cellules solaires (plus de 90 %). Ce semi-conducteur présente en effet différents avantages :

- ◇ Il est abondant à la surface du globe terrestre,
- ◇ Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs,
- ◇ Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques,
- ◇ Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

Les cellules aux plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mc-Si) ce qui est notre cas et celles à base de silicium poly-cristallin (pc-Si). Le silicium poly-cristallin est le plus utilisé (47% contre 35 % pour le monocristallin) [12].

Dans la figure, on présente une cellule solaire à base de silicium monocristallin et une autre à base de silicium poly-cristallin.

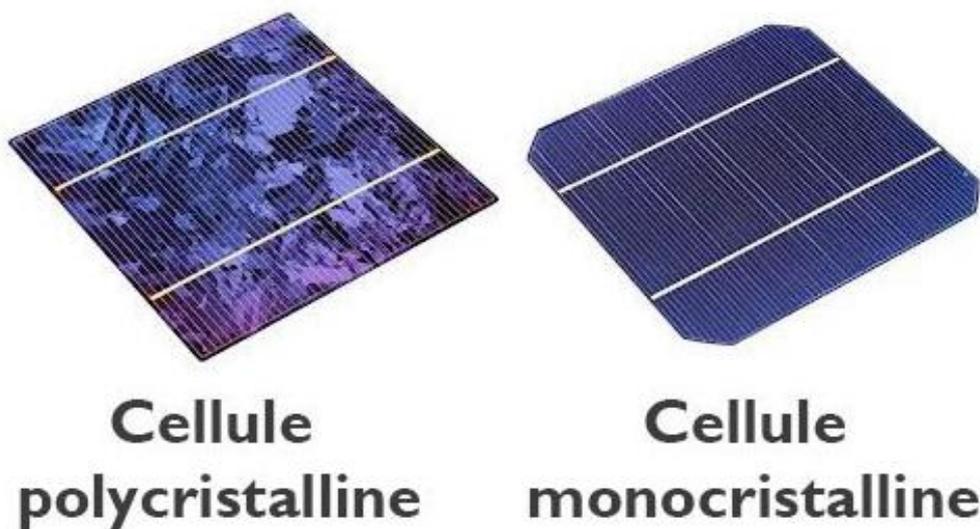


Figure III.2 : Cellule solaire à base de silicium monocristallin et poly-cristalline [20].

III.3.3 Fabrication d'une cellule photovoltaïque

La structure des cellules photovoltaïques en silicium fabriquées industriellement est représentée schématiquement sur la Figure III.2.

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une Couche Anti-Reflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (Figure III.2). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à [21] :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}}, N = 1, 2, 3 \quad (\text{III-1})$$

n_{CAR} : étant l'indice de réfraction de la couche antireflet et est donné par la relation :

$$n_{CAR} = \sqrt{n_{air} \cdot n_{Si}} \quad (\text{III-2})$$

Où :

n_{air} est l'indice de réfraction d'air,

n_{Si} , étant l'indice de réfraction de Silicium.

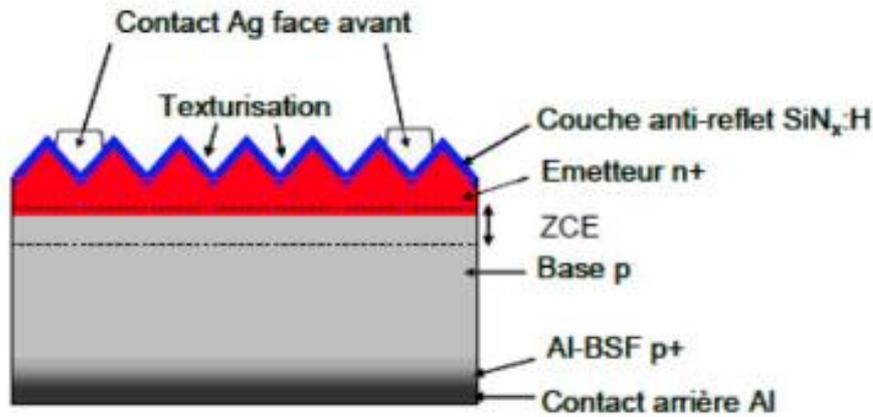


Figure III.3 : Schéma d'une cellule photovoltaïque en structure de silicium [22].

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface de l'émetteur [21]. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau. En effet, le rayonnement incident est constitué de longueurs d'onde inférieures aux dimensions des structures réalisées (quelques μm).

Le procédé de fabrication, décrit dans le Tableau III-1, est relativement simple et permet la production de cellules.

Tableau III-1 : Description et rôle des étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque [12].

Étape	Techniques d'élaboration	Rôle
Texturisation	Gravure chimique dans un bain acide (Si poly-cristallin) ou basique (Si monocristallin)	Diminution de la réflectivité
Formation de la jonction PN	Diffusion de phosphore POCl_3 (~ 30 min à 850 °C)	Création d'un émetteur n^+ avec une certaine résistance de couche
Ouverture de la jonction	Gravure plasma latérale, gravure chimique ou découpe laser	Élimination des court-circuits entre l'émetteur n^+ et la base p
Dépôt de la couche Anti-Reflet	Dépôt PECVD de SiO_2 ou SiN_x .	Diminution de la réflectivité et amélioration de la passivation en surface et en volume
Métallisation	Face avant : généralement par sérigraphie d'une grille Ag dont les contacts doivent toucher l'émetteur.	Assurer une bonne conduction du courant
	Face arrière : sérigraphie pleine plaque Al.	
Recuit des contacts	Four à passage (30 s à 800°C)	Face avant : gravure de la couche anti-reflet et formation du contact sur l'émetteur.
		Face arrière : formation d'une couche p^+ (BSF)

III.4 Limitations du rendement

En pratique, la conversion photovoltaïque n'est pas parfaite (totale), car le rendement de la cellule solaire est influencé par plusieurs pertes. Les principaux facteurs de ces pertes sont comme suivants :

- Pertes optiques,
- Recombinaisons en volume,
- Recombinaisons en surface,
- Résistances série et résistances shunt,
- La résistance série dépend des zones neutres et des résistances de contact,
- Absorption incomplète des photons.

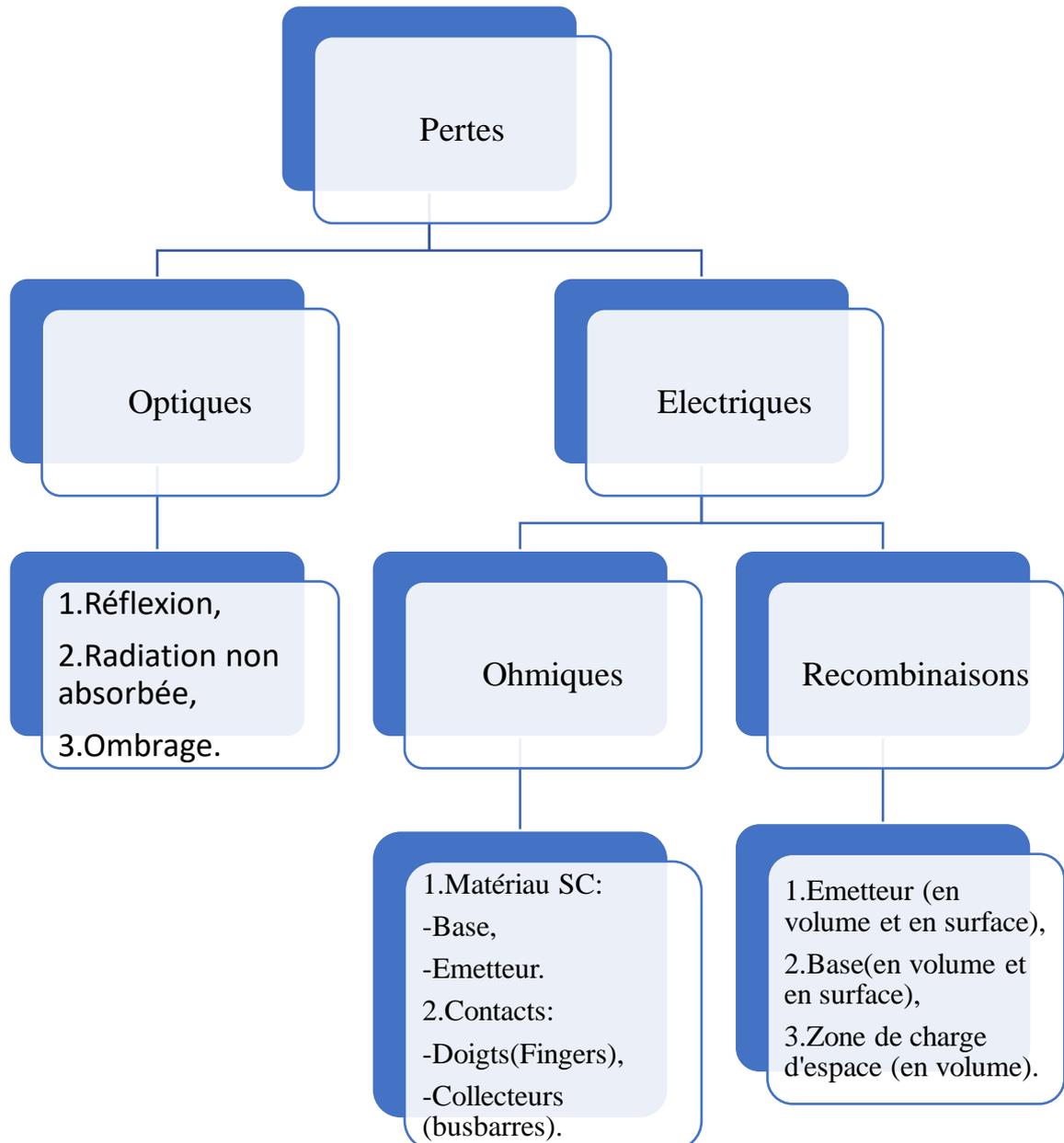


Figure III.4 : Organigramme des pertes limitant le rendement de la conversion photovoltaïque.

Chapitre IV :
**Résultats et
discussions des pertes
résistives et
d'ombrage**

IV.1 Pertes dues à la métallisation

Afin de comprendre les enjeux et les problématiques liées à l'amélioration des contacts des cellules photovoltaïques, dans cette partie, nous sommes intéressés à l'optimisation de la grille métallique à doigts et busbarres de géométrie rectangulaire et l'autre à géométrie conique, en comparant notamment les performances de ces deux cellules.

Les paramètres géométriques des grilles métalliques en face avant peuvent être optimisés en trouvant un compromis pour minimiser à la fois les pertes résistives et les pertes optiques dues à l'ombrage.

IV.2 Pertes résistives et d'ombrage

IV.2.1 Cellule photovoltaïque à doigts et busbarres de géométrie rectangulaire

Les pertes résistives (ou électriques) sont dues aux résistances série et parallèles (shunt). Ces dernières sont celles des fuites sur les bords de la cellule ou les court-circuits au niveau de l'émetteur. La résistance shunt provient donc des défauts de fabrication qui peuvent être limités lors de l'élaboration de la cellule. Une grande valeur de cette résistance indique des courants de fuite et de court-circuits faibles.

Quant aux résistances séries, elles doivent être les plus minimales possibles afin de limiter les pertes par effet joule sur le courant de la cellule.

La Figure IV.1 représente les différentes contributions des résistances série dans le cas d'une cellule standard (sans couche de passivation, ni couche Anti-Reflet, ni couche BSF) en silicium avec une grille en forme de peigne en face avant et une métallisation pleine plaque en face arrière.

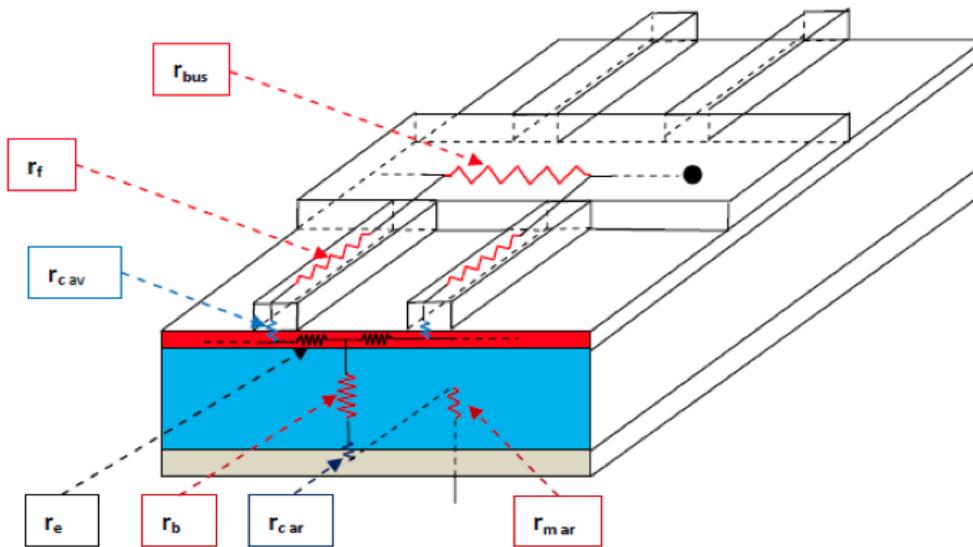


Figure IV.1 : Différentes contributions de la résistance série de la cellule PV.

Avec

r_e : résistance de l'émetteur n^+ ,

r_{bus} : résistance du busbarres (bus de collecte),

r_{fing} : résistance du doigt (finger),

r_b : résistance de la base,

r_{cav} : résistance de contact avant,

r_{car} : résistance de contact arrière,

r_{mar} : résistance du métal en face arrière.

La perte de puissance résistive totale par unité de surface est calculée à partir de l'expression de l'effet Joule :

$$P_r = r_s \cdot J_m^2 \text{ (w/cm}^2\text{)} \quad \text{(IV-1)}$$

J_m est la densité de courant de la cellule à son point de fonctionnement,

r_s , est la somme de toutes les contributions résistances résistives de la cellule.

Nous allons dans ce qui suit, détailler l'ensemble de ces contributions.

IV.2.2 La face avant de la cellule photovoltaïque à doigts et busbarres rectangulaires

Le schéma de la grille initialement envisagé pour la simulation est en forme de peigne avec trois busbarres. Pour le calcul, il est utile de découper cette grille en cellules unités, comme illustré sur la Figure IV.2, c'est-à-dire le plus petit élément de symétrie du motif de grille. La résistance série totale est déduite ensuite en connectant en parallèle la contribution de chaque cellule unité. Cette valeur peut donc être calculée en divisant la résistance d'une cellule unité par leur nombre total.

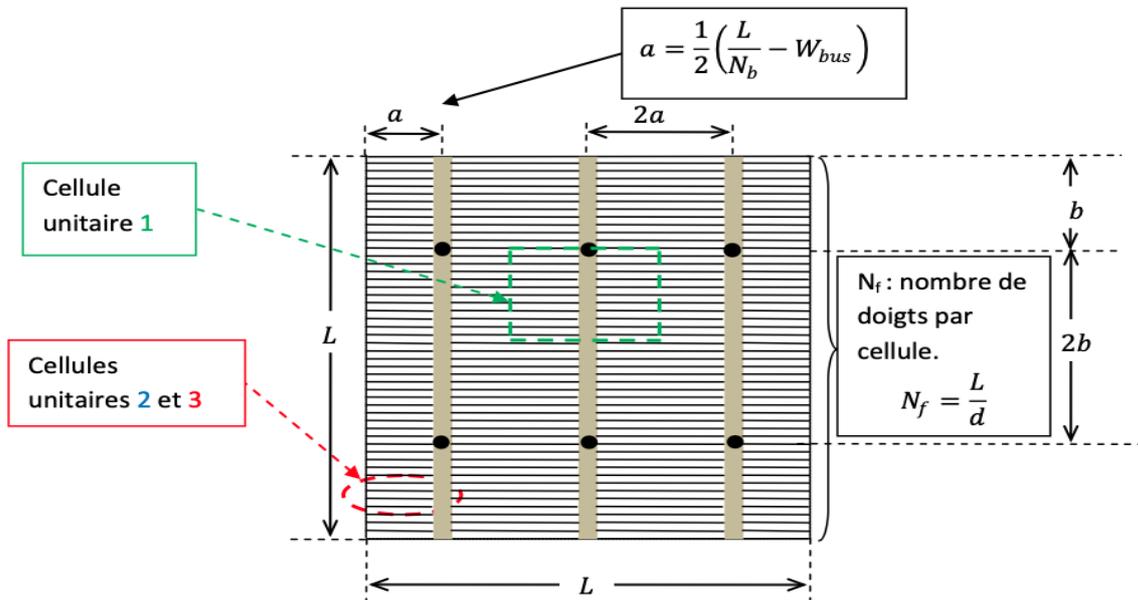


Figure IV.2 : Représentation de la face avant d'une cellule PV à géométrie rectangulaire.

C'est une cellule photovoltaïque carrée de côté L avec 3 busbarres et 2 contacts par busbarre où :

a : la distance entre le busbarre et les extrémités de la cellule est donnée par la relation :

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{N_b} - W_{bus} \right) \quad (IV-2)$$

$2a$: c'est la distance entre les busbarres intérieurs.

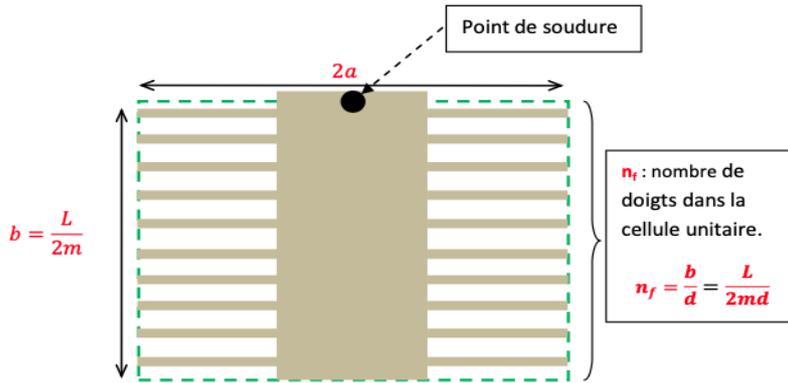


Figure IV.3 : Représentation des paramètres géométrique de la cellule élémentaire 1.

Les paramètres géométriques de la cellule unitaire 1 rectangulaire (figure IV.3 ci-dessus) est utilisée pour le calcul de la résistance du busbarre où b est la distance entre un contact et les extrémités de la cellule, donnée par son expression suivante :

$$b = \frac{L}{2m} \quad (\text{IV-3})$$

Le nombre de fingers (doigts) de la cellule unitaire s'exprime par :

$$n_f = \frac{b}{d} = \frac{L}{2md} \quad (\text{IV-4})$$

Il faut noter que le courant qui va être collecté à un point de soudure, est le courant qui passe par tous les éléments de cette cellule élémentaire.

La cellule unitaire 2 (en couleur bleue) montrée dans la figure IV.4, est utilisée pour le calcul des résistances de l'émetteur et du doigt. Enfin, la cellule unitaire 3 (rouge) est employée pour le calcul de l'ombrage.

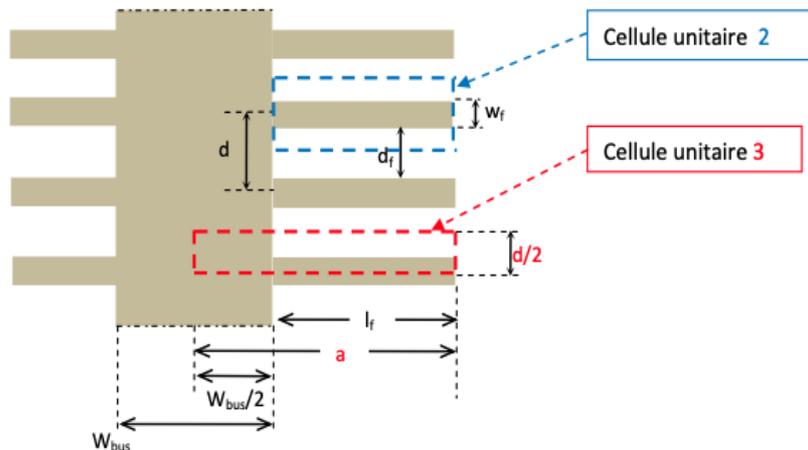


Figure IV.4 : Représentation des paramètres géométriques des cellules élémentaires 2 et 3.

Les paramètres de la figure ci-dessus sont :

w_f : est la largeur de doigt ou en anglais finger,

d : est la distance interligne,

d_f : est la distance entre les doigts (finger),

W_{bus} : est la largeur de busbarre,

l_f : est la longueur de doigt (finger) dans la cellule élémentaire 3.

IV.2.3 La face arrière d'une cellule photovoltaïque à géométrie rectangulaire

La métallisation de la face avant est une grille d'argent sous forme de peigne tandis que la face arrière est pleine plaque d'aluminium dont les pointillés représentent les surfaces en face des busbarres de la face avant (figure IV.5).

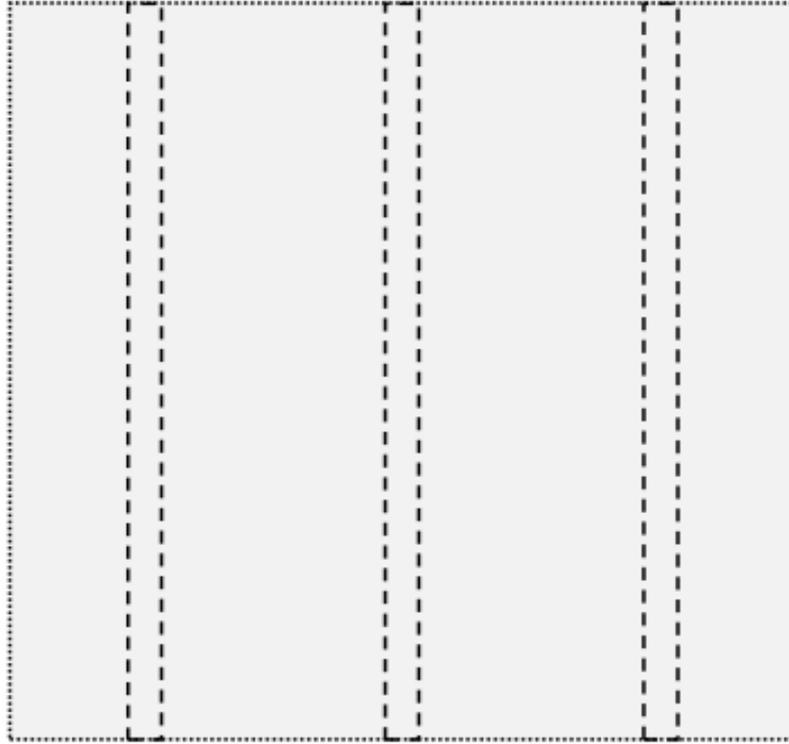


Figure IV.5 : Exemple de la géométrie de la métallisation face arrière d'une cellule PV.

Les paramètres initiaux et les expressions utiles pour le calcul des différentes contributions résistives et optiques de la cellule sont donnés dans les tableaux IV-1 et IV-2.

Tableau IV-1 : Les paramètres initiaux pour le calcul des différentes contributions résistives et optiques due à l’ombrage de la cellule.

Symbole	Description	Valeurs	Unité
L	Côté de la cellule	15,6	cm
ρ_b	Résistivité de base	0,6	$\Omega.cm$
e_b	Épaisseur de la base	0,02	cm
N_b	Nombre de busbarres	3	-
ρ_{bus}	Résistivité du busbarre Ag en face avant	$4,5.10^{-6}$	$\Omega.cm$
h_{bus}	Hauteur du busbarre en face avant	0,0015	cm
W_{bus}	Largeur d'un busbarre en face avant	0,15	cm
M	Nombre de points de soudure par busbarre	10	-
A	La distance entre le busbarre et les extrémités de la cellule	2,6	cm
B	La distance entre un contact et les extrémités de la cellule de la cellule unitaire 1	0,78	cm
n_f	Nombre de doigts dans la cellule élémentaire 1	60 (par formule)	-
N_f	Nombre total de doigts de la cellule		
l_f	Longueur de la ligne dans la cellule unité 3	2,53 (par formule)	cm
ρ_f	Résistivité du doigt Ag en face avant	$4,5.10^{-6}$	$\Omega.cm$
d_f	Distance externe entre deux lignes (doigts)	0,25 (par formule)	cm
w_f	Largeur d'une ligne en face avant	0,01	cm
d	Distance interligne	0,26	cm
h_f	Hauteur d'une ligne (doigts) en face avant	$1,5.10^{-3}$	cm
$R_{e\Box}$	Résistance de couche de l'émetteur	40	Ω/\Box
$\rho_{c\ av}$	Résistivité de contact en face avant	10^{-3}	$\Omega.cm^2$
$\rho_{c\ ar}$	Résistivité de contact en face arrière	$1,5.10^{-2}$	$\Omega.cm^2$
$\rho_{m\ ar}$	Résistivité métal en face arrière (Al)	$5,6.10^{-6}$	$\Omega.cm$
h_m	Hauteur du contact en face arrière (Al)	2.10^{-3}	cm
J_m	Densité de courant au point de puissance maximale de la cellule	30	mA/cm ²
V_m	Tension au point de puissance maximum de la cellule	0,5	V
P_m	Puissance maximale	15	mW/cm ²

Le tableau IV-2 suivant montre les expressions de ces diverses contributions à la résistance série pour la grille à géométrie rectangulaire [16].

Tableau IV-2 : Les expressions des diverses contributions à la résistance série.

Contributions résistives	Symbole	Cellule avec points de soudure ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Émetteur	r_e	$\frac{R_{e\Box} d^2}{12}$
Doigt	r_{fing}	$\frac{\rho_f d}{12 h_f w_f N_b^2 L}$
Ligne de collecte avant (busbarre)	r_{bus}	$\frac{\rho_{c\text{ av}} L d^2 n_f^2}{3 N_b h_{\text{bus}} W_{\text{bus}}}$
Contact avant	$r_{c\text{ av}}$	$\frac{d_f \sqrt{\rho_{c\text{ av}} R_{e\Box}}}{2} \coth \left(\frac{w_f}{2} \sqrt{\frac{R_{e\Box}}{\rho_{c\text{ av}}}} \right)$
Base	r_b	$\rho_b e_b$
Métal face arrière :	$r_{m\text{ ar}}$	$\rho_{m\text{ ar}} h_{m\text{ ar}}$
Contact arrière :	$r_{c\text{ ar}}$	$\rho_{c\text{ ar}}$
Taux d'ombrage	F	$\frac{l_f w_f}{2 \left(l_f + \frac{W_{\text{bus}}}{2} \right)} \cdot \left(\frac{d_f}{2} + \frac{w_f}{2} \right) + \frac{W_{\text{bus}}}{2 \left(l_f + \frac{W_{\text{bus}}}{2} \right)}$

Les pertes résistives sont la somme des différentes contributions indiquées dans le Tableau IV-2.

La puissance totale P_t dissipée due aux pertes résistives et au taux d'ombre est exprimée par l'équation suivante :

$$P_t = P_r + P_o$$

$$P_t = J_m^2 r_s + F J_m V_m \quad (\text{IV-5})$$

Avec :

P_t : la densité de puissance totale dissipée en mW/cm^2 ,

P_r : la densité de perte de la puissance résistive en mW/cm^2 ,

P_o : la densité de la puissance dissipée due à l'ombrage,

r_s : la somme des résistances séries normalisées dues aux contributions du tableau IV-2 en $\Omega.cm^2$.

A partir de cette relation, il est possible de calculer la perte de densité de la puissance totale normalisée en % et qui est donnée par l'équation suivante :

$$Perte\ totale = \frac{P_t}{P_m} = \frac{J_m^2 r_s}{J_m V_m} + F = \frac{J_m r_s}{V_m} + F \rightarrow \% \quad (IV-6)$$

IV.2.4 La distribution du flux du courant photo-généré

La figure IV.6 ci-dessous montre la distribution du flux du courant photo-généré sur la face avant à travers les doigts vers le busbarre (barre collectrice).

La circulation de ce flux part de la métallisation dans le sens du bas vers le haut puis latéralement dans l'émetteur, ensuite vers les doigts et enfin le courant passe par les busbarres pour être collecté par un point de soudure.

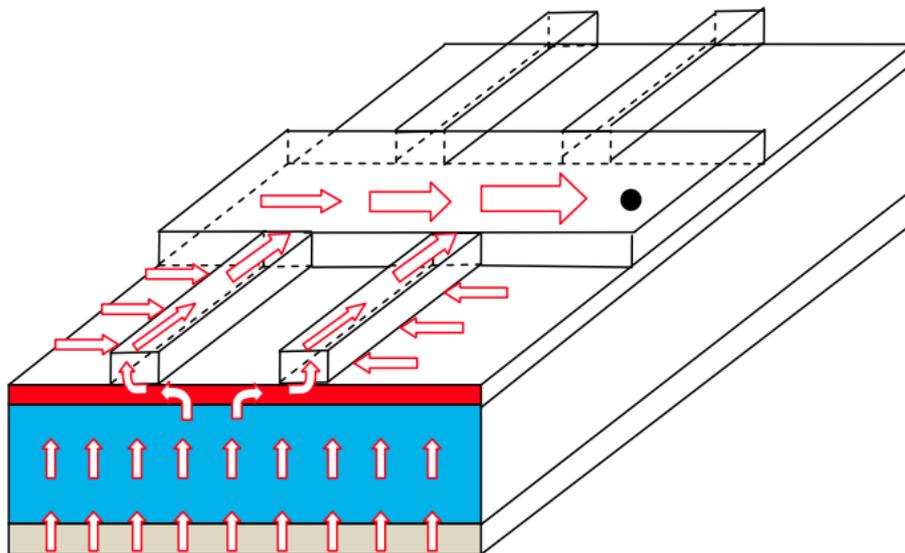


Figure IV.6 : Représentation schématique de la circulation inverse du flux de la densité du courant à travers une partie de la cellule PV.

IV.3. Cellule photovoltaïque à doigts et à busbarres de géométrie conique

IV.3.1 La face avant de la cellule photovoltaïque à géométrie conique

Comme pour la cellule précédente, la figure IV.7 présente la grille à géométrie conique de la face avant d'une cellule PV carrée de côté L , à trois busbarres et à deux points de soudures par busbarre.

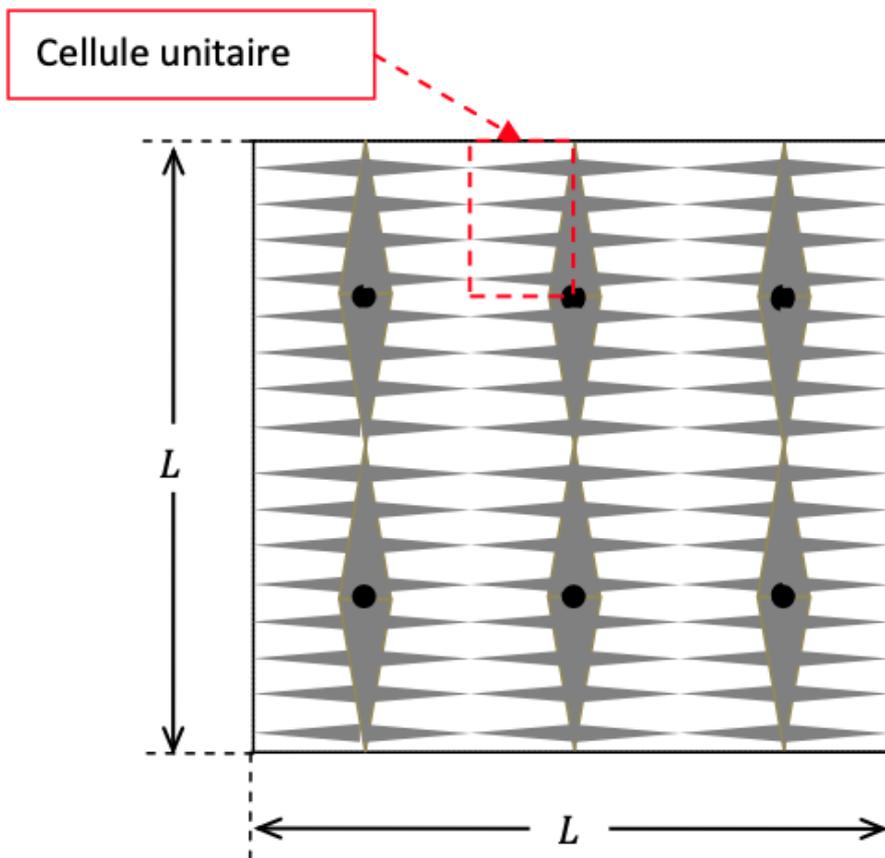


Figure IV.7 : Représentation schématique de la face avant d'une cellule PV à géométrie conique.

La cellule élémentaire est montrée (en rouge) dans cette figure IV.7. Les paramètres de cette cellule unitaire sont détaillés sur la figure IV.8.

IV.3.2 La cellule unitaire de la cellule photovoltaïque à géométrie conique et la distribution du flux

Cette cellule unitaire qui permet de déterminer les différentes contributions (émetteur, doigts et busbarres) à la résistance série ainsi que l'ombrage.

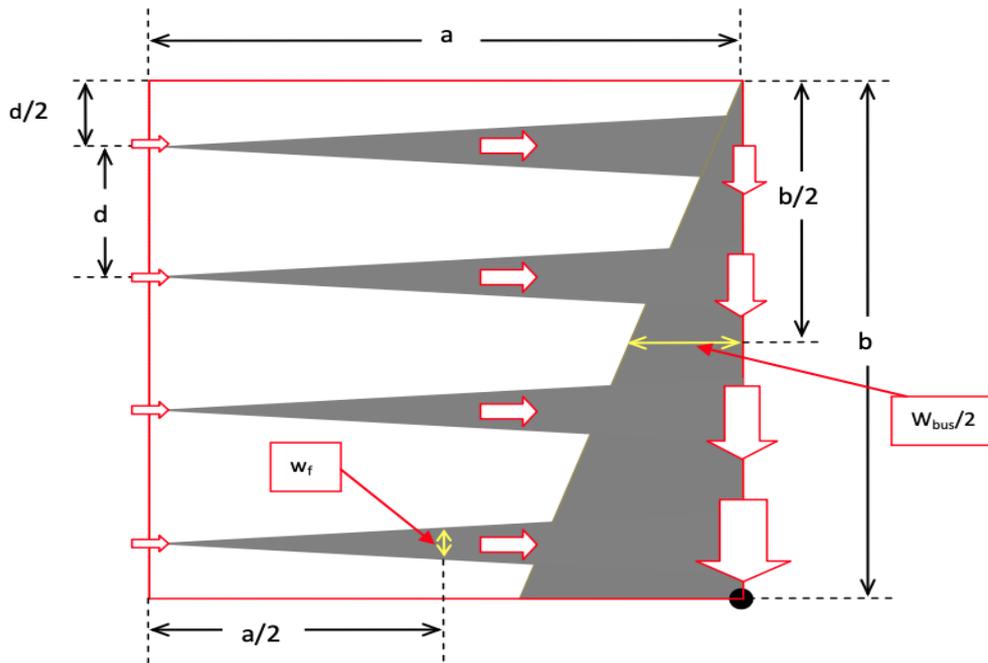


Figure IV.8 : Paramètres de la cellule unitaire à géométrie conique.

Où :

w_f : est la largeur du doigt à sa mi- longueur ,

$W_{bus}/2$: étant la largeur de cette partie du busbarre à sa mi- longueur, il faut noter que l'épaisseur maximale du busbarre est égale $2W_{bus}$.

Sur la même figure est présentée la distribution du flux du courant et qui est le même que la cellule photovoltaïque à géométrie rectangulaire.

Sur le tableau IV-3 sont présentées les expressions de ces diverses contributions à la résistance série pour la grille à géométrie conique [16], [23].

Tableau IV-3 : Expressions des contributions résistives et d'ombrage d'une cellule à géométrie conique.

Contributions résistives	Symbole	Cellule avec points de soudure ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Émetteur	r_e	$\frac{R_{e\Box} d^2}{12}$
Doigt	r_{fing}	$\frac{\rho_f d}{16 h_f w_f N_b^2 L}$
Ligne de collecte avant (busbarre)	r_{bus}	$\frac{\rho_{c\text{av}} L d^2 n_f^2}{4 N_b h_{\text{bus}} W_{\text{bus}}}$
Contact avant	$r_{c\text{av}}$	$\frac{d_f \sqrt{\rho_{c\text{av}} R_{e\Box}}}{2} \coth \left(\frac{w_f}{2} \sqrt{\frac{R_{e\Box}}{\rho_{c\text{av}}}} \right)$
Base	r_b	$\rho_b e_b$
Métal face arrière :	$r_{m\text{ar}}$	$\rho_{m\text{ar}} h_{m\text{ar}}$
Contact arrière :	$r_{c\text{ar}}$	$\rho_{c\text{ar}}$
Taux d'ombrage	F (%)	$N_b \frac{W_{\text{bus}}}{L} + \frac{w_f}{d} = N_b \frac{W_{\text{bus}}}{L} + 2 m n_f \frac{w_f}{L}$ $= \frac{1}{L} (N_b W_{\text{bus}} + 2 m n_f w_f)$

Pour les paramètres utilisés, nous avons pris les mêmes que de la cellule photovoltaïque de géométrie rectangulaire.

IV.4 Simulation des paramètres et discussions

IV.4.1 Présentation de logiciel de simulation

IV.4.2 PV Lighthouse

C'est un site web de ressources en ligne pour les ingénieurs et scientifiques en photovoltaïque. A l'aide de PV Lighthouse [24] dont la capture d'écran se trouve sur la figure ci-dessous, ce site nous a permis de calculer les différents paramètres de la cellule photovoltaïque.

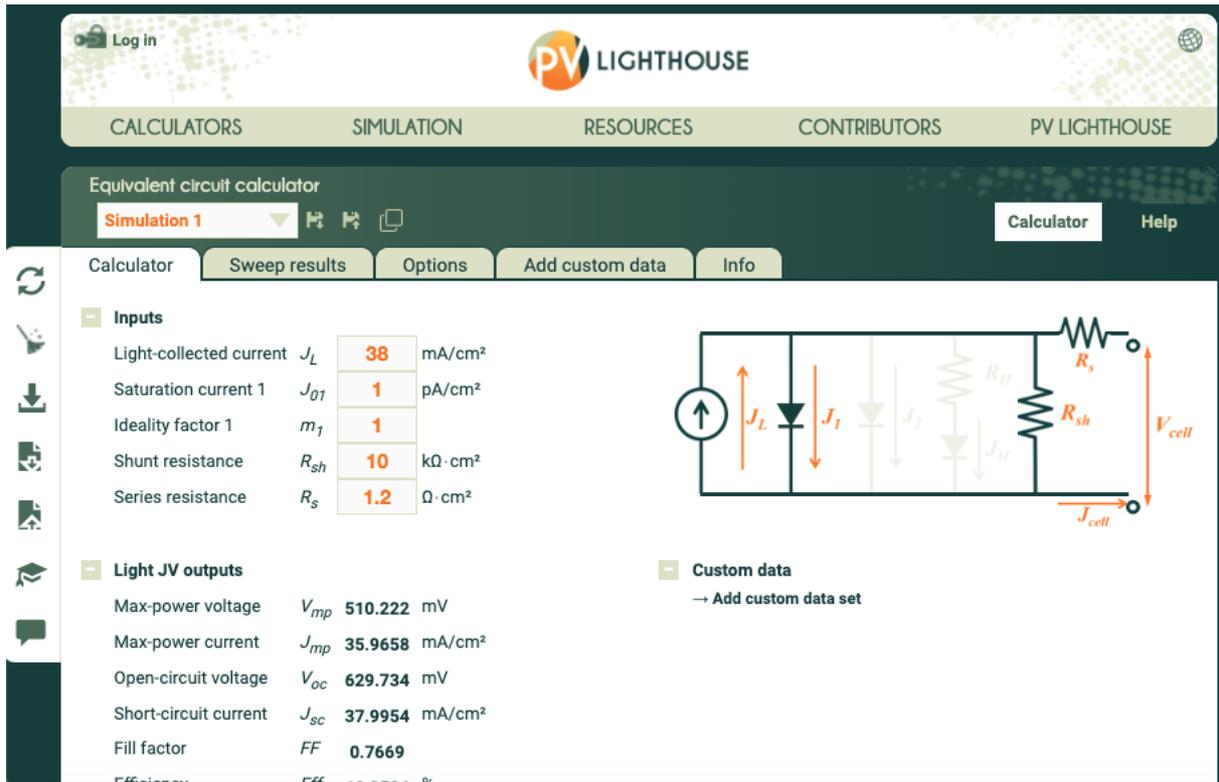


Figure IV.9 : Capture d'écran du site PV Lighthouse.

IV.4.2 Calculs Excel

A l'aide de logiciel Excel de Microsoft on a pu calculer la résistance série ainsi que l'ombrage puis tracer les différentes courbes telles que les caractéristiques J-V, P-V, les pertes totales P_t , etc...

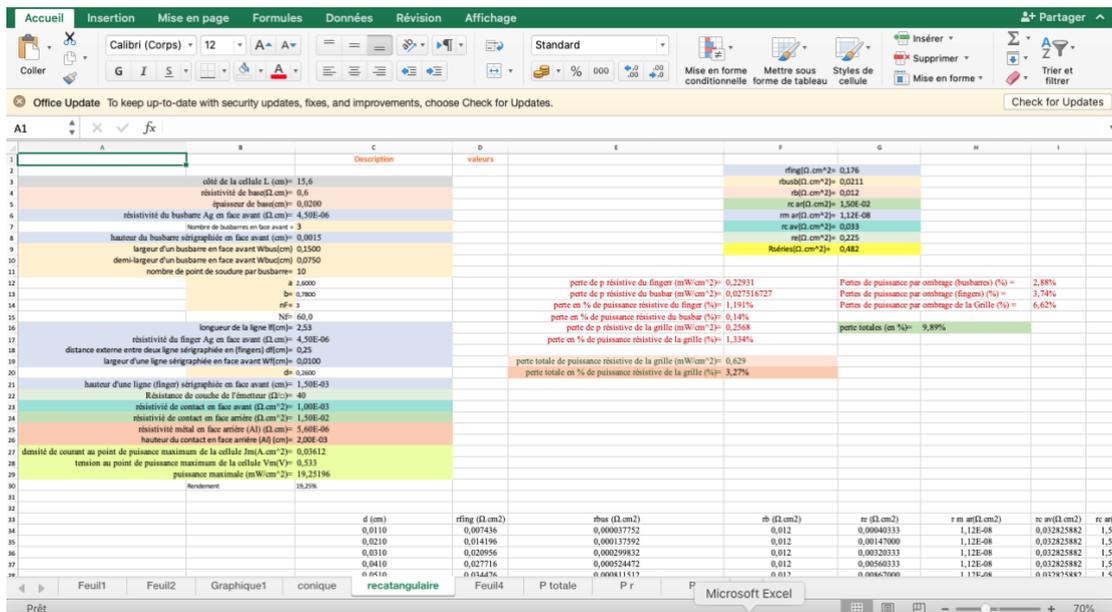


Figure IV.10 : Capture d'écran de la feuille de calcul Excel.

IV.5 Cellule à géométrie rectangulaire

A partir des valeurs initiales de la cellule à grille rectangulaire, nous avons déterminé la valeur de la résistance série totale qui est de l'ordre $r_s=0,482 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Cette résistance est intégrée dans le site de PV Lighthouse [24], ainsi que d'autres paramètres de l'équivalent électrique de notre cellule et qui sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4 : Paramètres de la cellule à étudier.

Résistance série r_s	0,482 $\Omega \cdot \text{cm}^2$
Résistance shunt R_{sh}	10 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
Courant de saturation J_{01} dans les zones neutres de la cellule	1 pA/cm^2
Facteur d'idéalité n_1 de la diode D_1	1
Courant de saturation J_{02} dans la ZCE	1 nA/cm^2
Facteur d'idéalité n_2 de la diode D_2	2

Les valeurs de J_{01} et J_{02} ont été relevées de la littérature [25]. La valeur de la résistance parallèle R_{sh} ($10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$) a été choisie de telle manière que les courants de fuite soient négligeables et leurs pertes résistives soient insignifiantes par rapport à celles de la résistance série.

Les résultats ont donné les caractéristiques J-V et P-V de la cellule qui sont indiquées sur la figure IV.11.

On note que :

$$P_{m \text{ maximale}} = V_m \cdot I_m$$

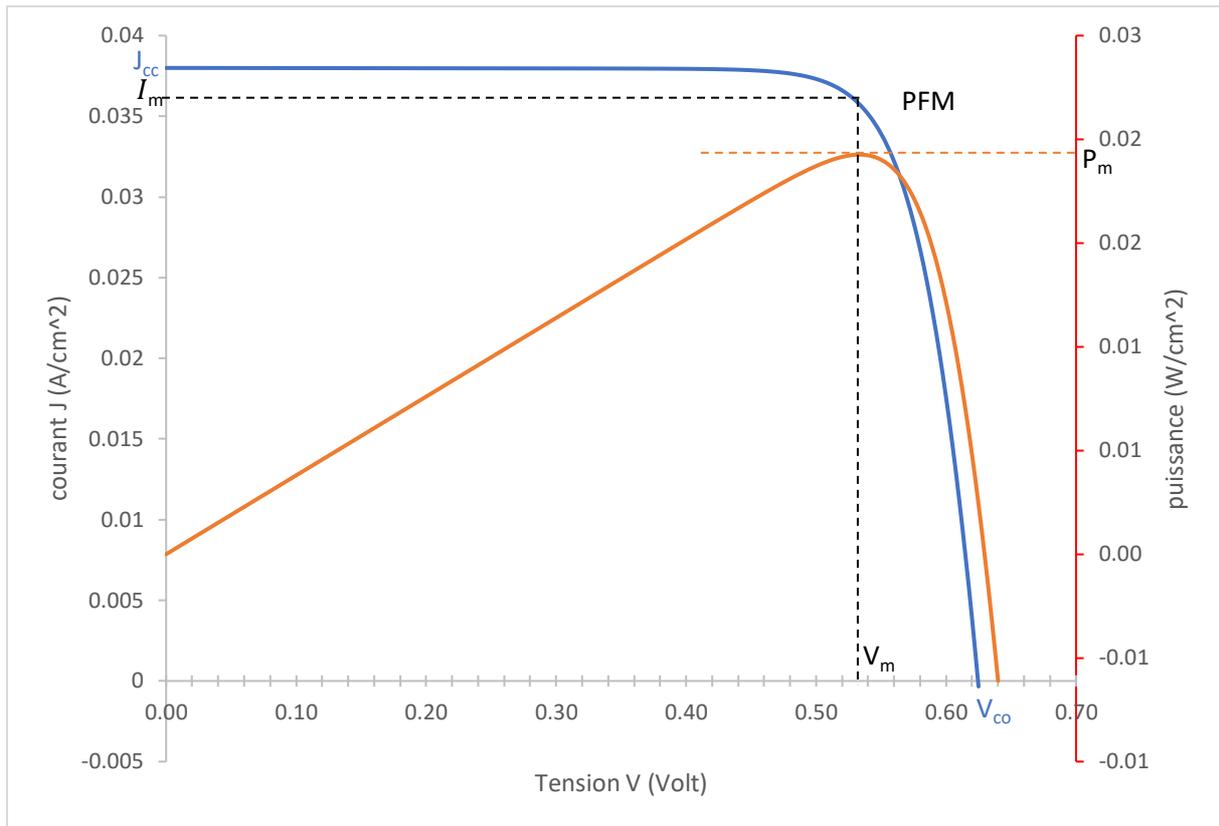


Figure IV.11 : Caractéristiques J-V et P-V de la cellule de géométrie rectangulaire.

Nous avons simulé et tracé les courbes caractéristiques J-V et P-V à l'aide de PV Lighthouse, de la cellule photovoltaïque à grille rectangulaire.

La figure IV.11 illustre ces caractéristiques qui se divisent en trois parties :

La première entre [0 V à 0,5 V] où la courbe J-V est presque constante, dans cette partie, la cellule se comporte comme un générateur de courant J_{cc} proportionnel à l'éclairement.

Ensuite, la deuxième est la partie entre [0,5 V à 0,55 V] où la densité de courant diminue dans cette zone et la cellule atteint une puissance maximale P_m à son Point de Fonctionnement Maximal (PFM).

Enfin, la troisième partie entre [0,55 V à 0,65 V], la densité de courant décroît linéairement avec la tension, dans cette partie, la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} .

Dans la même figure, on présente la variation P-V de puissance en fonction de la tension de la cellule à géométrie conique, on remarque une augmentation de la puissance jusqu'à l'atteinte

de la valeur P_m puis une décroissance. Cette caractéristique nous permet juste de trouver le PFM.

Les paramètres obtenus de la cellule extraits à partir des caractéristiques J-V et P-V sont classés dans le tableau IV-5 suivant :

Tableau IV-5 : Les paramètres obtenus par la simulation des caractéristiques J-V et P-V.

J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (mV)	FF (%)	η (%)	J_m (mA/cm ²)	V_m (mV)	P_m (mW/cm ²)
37,9982	629,601	80,51	19,2622	36,1236	533,229	19,2622

IV.5.1 Influence de d sur les différentes puissances :

Les calculs des pertes en puissance ont été effectués par le logiciel Excel de Microsoft et qui ont donné les résultats de la figure ci-dessous.

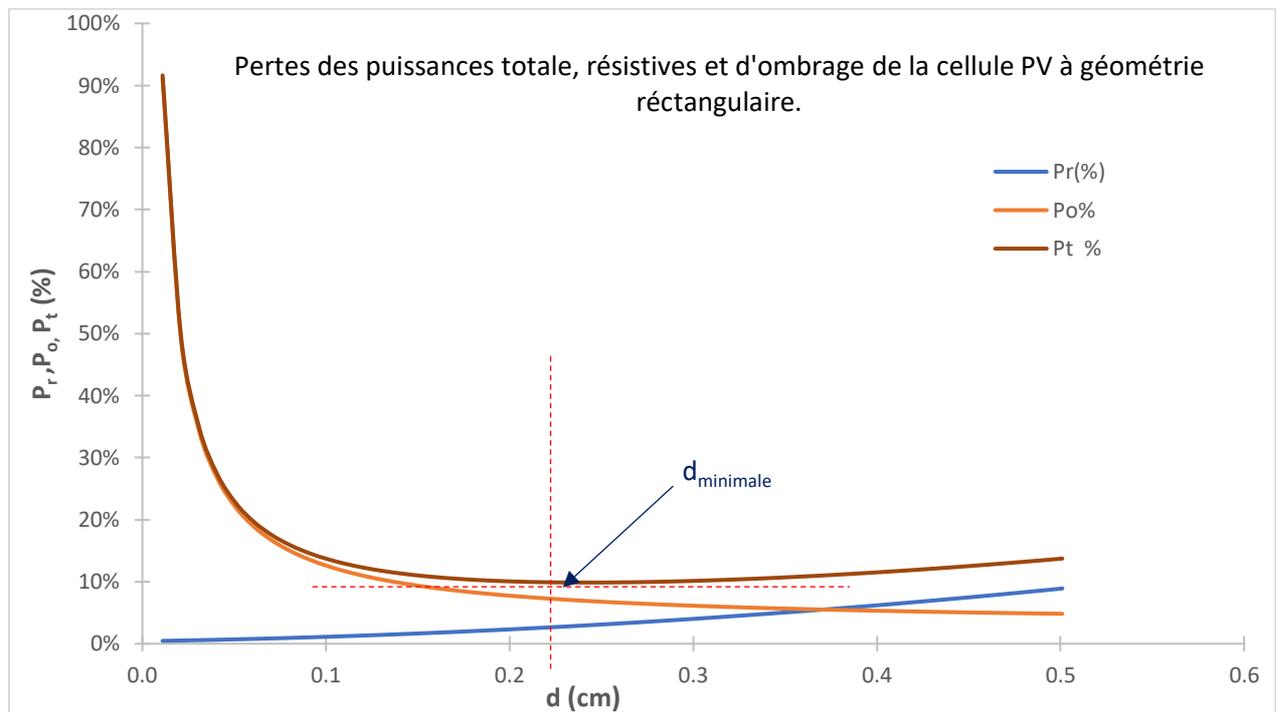


Figure VI.12 : Variation des pertes en puissances en fonction de la distance d .

On remarque que la perte en puissance dû au taux d'ombrage diminue avec l'augmentation de d , par contre, la perte de la puissance résistive due à la résistance série, augmente. Ce qui

démontre que la perte de puissance totale passe par une valeur minimale pour une valeur de la distance interligne optimisée et que l'on peut déterminer graphiquement, numériquement ou analytiquement.

Tableau IV-6 : Les valeurs obtenues après la simulation.

La distance interligne d (cm)	Résistance série r_s ($\Omega.cm^2$)	Perte de puissance résistive (%)	Perte de puissance d'ombrage (%)	Perte de puissance totale (%)	N_f (nombre des doigts par cellule)
$d_{initiale}=0,26$	$r_{s\ initial}=0,482$	$P_{r\ initi}=3,26$	$P_{o\ initi}=6,62$	$P_{t\ initi}=9,89$	$N_{f\ initi}=60$
$d_{optimisé}=0,241$	$r_{s\ optim}=0,434$	$P_{r\ optim}=2,94$	$P_{o\ optim}=6,91$	$P_{t\ optim}=9,86$	$N_{f\ optim}=62$

Pour le cas de notre cellule à grille rectangulaire, la perte de puissance totale est évaluée à 9,86% pour une distance interligne optimisée $d_{min}=0,241$ cm, valeur qui est proche de celle utilisée initialement ($d=0,26$ cm pour une perte en puissance de 9,89%).

Cette valeur optimisée pourrait être utilisée pour recalculer plus finement la résistance série et la perte de puissance maximale. Nous ne l'avons pas effectué du fait de la proximité des résultats.

Pour la distance interligne optimisée, les pertes en puissance résistives sont estimées à 2,94% et les pertes dues à l'ombrage de la grille sont évaluées à 6,91%. Les busbarres contribuent à 2,88% et les doigts à 4,03%. Ce qui laisse supposer que la géométrie de la grille reste à améliorer.

IV.6 Cellule à géométrie conique

Comme pour la cellule photovoltaïque précédente, à partir des valeurs initiales de la cellule à grille rectangulaire, nous avons déterminé la valeur de la résistance série totale qui est de l'ordre $r_s=0,433 \Omega.cm^2$ et ce, à partir des mêmes valeurs initiales que pour la cellule à géométrie rectangulaire. Néanmoins, les valeurs des largeurs du doigt w_f et du busbarre W_{bus} , sont maintenant les largeurs de ces mêmes éléments aux milieux de leurs longueurs.

La résistance série est déterminée, à l'aide d'Excel, à partir des différentes expressions du Tableau IV-3, et est ensuite intégrée dans le site de PV Lighthouse [24] pour l'obtention des caractéristiques J-V, P-V ainsi que d'autres résultats, par manque du temps, n'ont pas été exploités.

En plus de la résistance série r_s , d'autres paramètres sont intégrés dans le site de PV Lighthouse tels que les courants de saturation J_{01} et J_{02} , les facteurs d'idéalité n_1 et n_2 et la résistance parallèle et qui sont pris, comme on l'a mentionné plus haut, égaux à ceux pris dans le site. On pourrait utiliser les expressions de ces courants de saturation, vus au chapitre III, afin de les calculer. Il existe aussi une autre méthode pour les obtenir à partir du logiciel PC1D [28].

Enfin, on extrait les paramètres de la cellule (J_{cc} , V_{co} , FF, η , P_m , V_m et J_m) soit numériquement, soit graphiquement à partir de ces caractéristiques comme cela a été mentionné au chapitre III.

Les différents paramètres utilisés dans ces calculs sont indiqués dans le tableau IV-7 suivant :

Tableau IV-7 : Paramètres identifiés par la méthode de calcul à partir de PV Lighthouse.

Résistance série r_s	0,433 $\Omega.cm^2$
Résistance shunt R_{sh}	10 $k\Omega.cm^2$
Courant de saturation J_{01}	1 pA/cm^2
Facteur d'idéalité n_1	1
Courant de saturation J_{02}	1 nA/cm^2
Facteur d'idéalité n_2	2

Ces résultats ont donné les caractéristiques J-V et P-V de la cellule qui sont indiquées sur la figure IV.13.

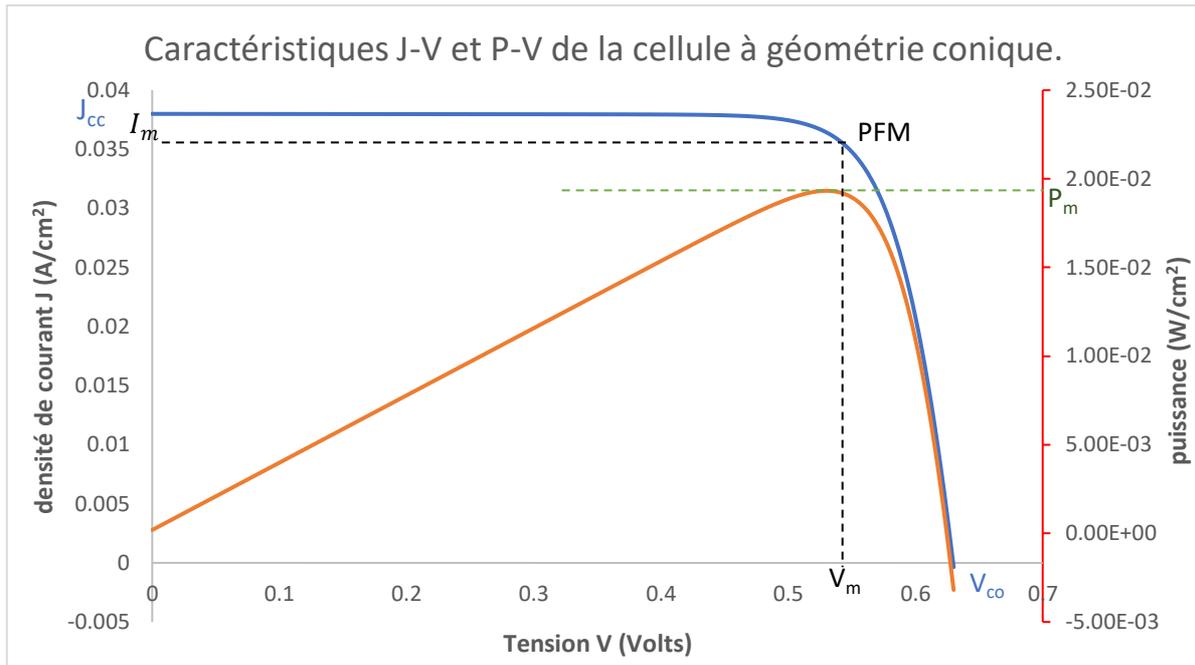


Figure IV.13 : Caractéristiques J-V et P-V de la cellule photovoltaïque à géométrie conique.

Nous avons simulé et tracé les courbes caractéristiques J-V et P-V à l'aide de PV Lighthouse, de la cellule photovoltaïque à grille conique.

La figure IV.13 illustre ces caractéristiques qui se divisent en trois parties, à l'instar de de la première cellule.

D'après ces deux caractéristiques, on tire les résultats qui sont consignés dans le tableau VI-8 suivant :

Tableau VI-8 : Les différents paramètres obtenus de la cellule photovoltaïque à géométrie conique.

J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (mV)	FF	η (%)	J_m (mA/cm ²)	V_m (mV)	P_m (mW/cm ²)
37,9984	629,601	0,8078	19,33	36,1380	534,778	19,33

IV.6.1 Influence de d sur les différentes pertes en puissance.

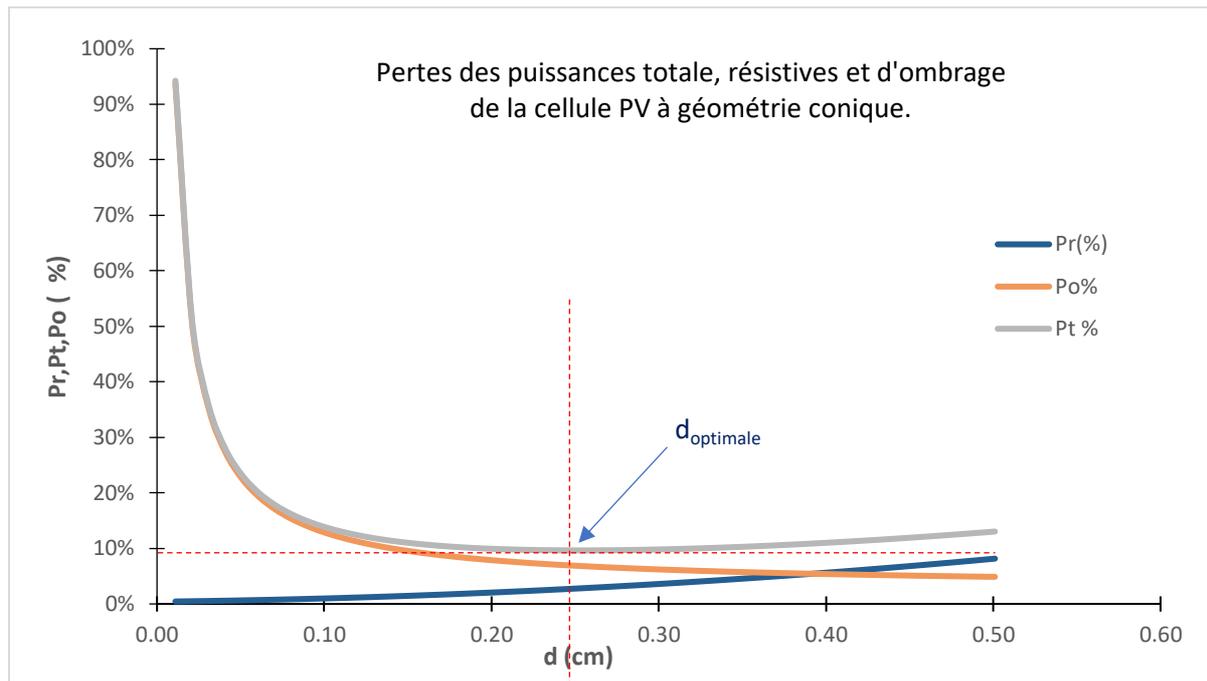


Figure VI.14 : Variation des pertes des puissances en fonction de la distance d.

A partir des valeurs fournis par le logiciel PV Lighthouse, nous avons tracé les courbes qui décrivent l'influence des pertes des puissances résistives et d'ombrage en fonction de la distance interligne d.

Tableau IV-9 : Valeurs obtenues après la simulation de la cellule.

La distance interligne d (cm)	Résistance série r_s ($\Omega.cm^2$)	Perte de puissance résistive (%)	Perte de puissance d'ombrage (%)	Perte de puissance totale (%)	N_f (nombre de doigts par cellule)
$d_{initiale}=0,260$	$r_{s\ initial}=0,433$	$P_{r\ initi}=2,97$	$P_{o\ initi}=6,73$	$P_{t\ initi}=9,71$	$N_{f\ initi}=60$
$d_{optim}=0,251$	$r_{s\ optim}=0,411$	$P_{r\ optim}=2,77$	$P_{o\ optim}=6,87$	$P_{t\ optim}=9,65$	$N_{f\ optim}=62$

Pour le cas de la cellule à grille conique, la perte de puissance totale minimale est évaluée à 9,65% pour une distance interligne optimisée $d_{optim\ (coniq)}=0,251$ cm, une valeur plus proche de l'initiale.

Pour la distance interligne optimisée, les pertes en puissance résistives sont estimées à 2,77% et les pertes dues à l'ombrage de la grille sont évaluées à 6,87%.

On remarque que la perte de puissance d'ombrage a augmenté par rapport à la valeur initiale. Ceci trouve son explication dans l'augmentation de nombre des doigts N_f qui a augmenté de 2 doigts par rapport à la valeur initiale et par conséquent l'augmentation des pertes optiques car dans les calculs, l'épaisseur du doigt w_f est restée constante.

IV.7 La comparaison des pertes des puissances entre les deux cellules étudiées

IV.7.1 Comparaison de la perte en puissance d'ombrage

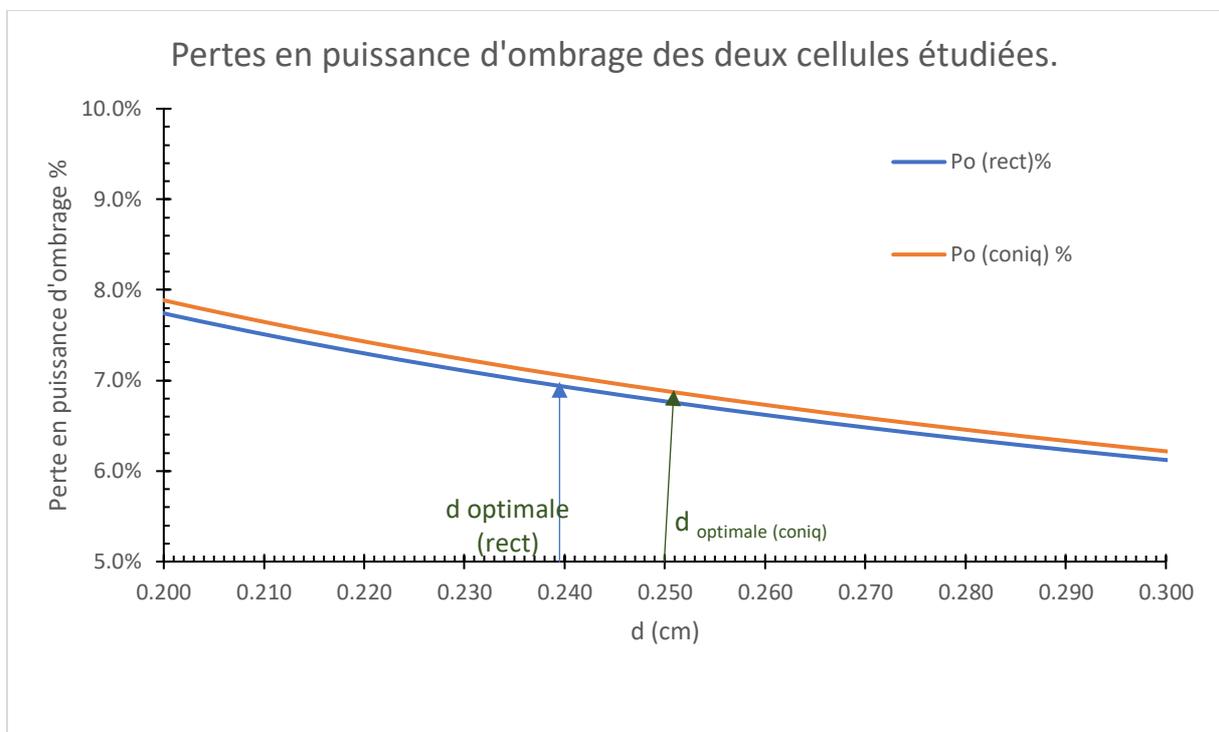


Figure IV.15 : Variation des pertes en puissance résistives des deux cellules au voisinage de leurs distances interligne optimisées.

On remarque qu'au voisinage des distances interlignes optimisées ($d_{\text{optimal (rect)}}=0,241$ cm et $d_{\text{optimal (coniq)}}=0,251$ cm), les pertes d'ombrage sont supérieures qu'à la valeur initiale pour les cellules à grille rectangulaire et conique. Ceci est dû principalement à l'augmentation du nombre de doigts N_f pour les deux cellules suite à la diminution des distances optimisées par rapport à la distance initiale ($d=0,26$ cm pour les deux cellules).

IV.7.2 Comparaison de la perte de puissance résistive

Dans cette partie, on va étudier l'influence de d sur les pertes en puissance résistives des deux cellules.

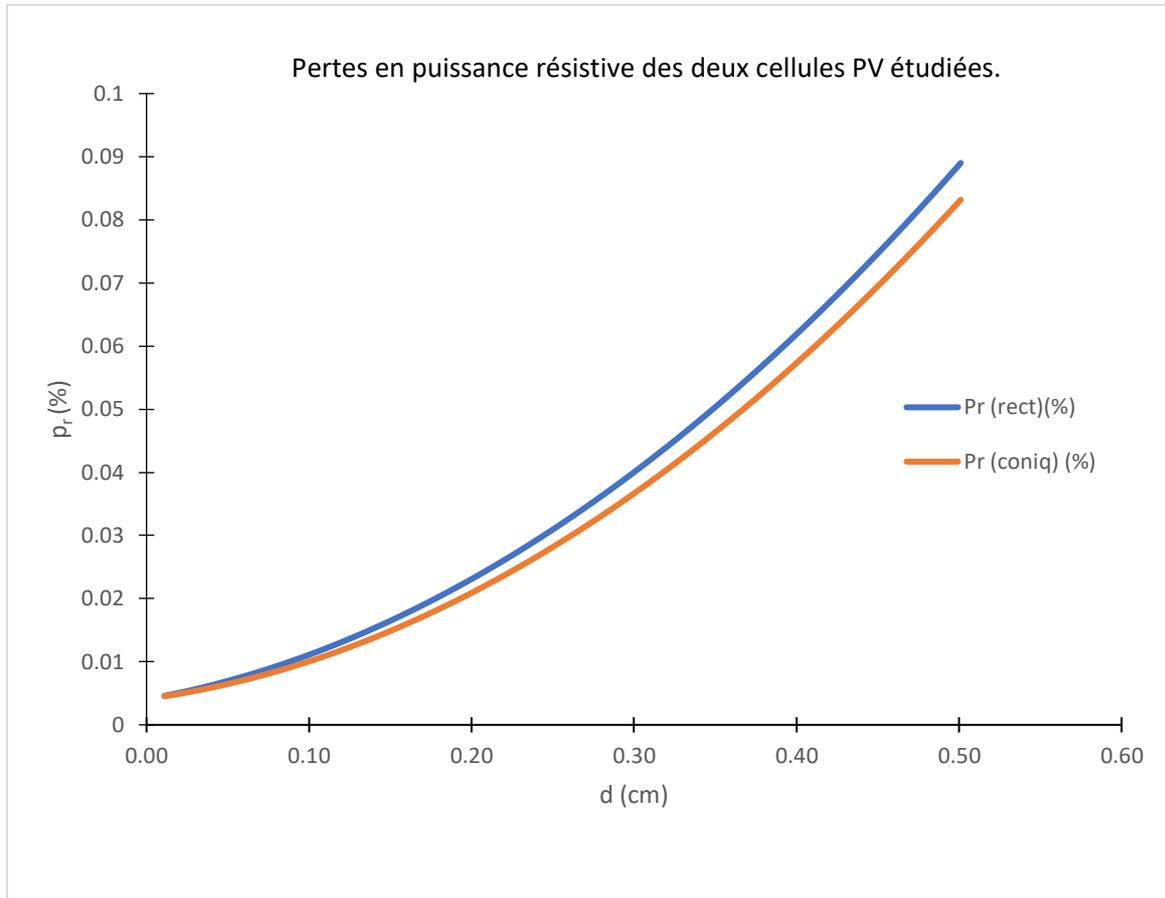


Figure IV.16 : Comparaison de la variation de perte en puissance résistive en fonction de la distance interligne d des deux cellules étudiées.

On remarque que les pertes résistives dues à la résistance série de la cellule à géométrie conique sont légèrement inférieures à celle de la cellule à géométrie rectangulaire.

IV.7.3 Comparaison entre la perte en puissance totale des deux cellules

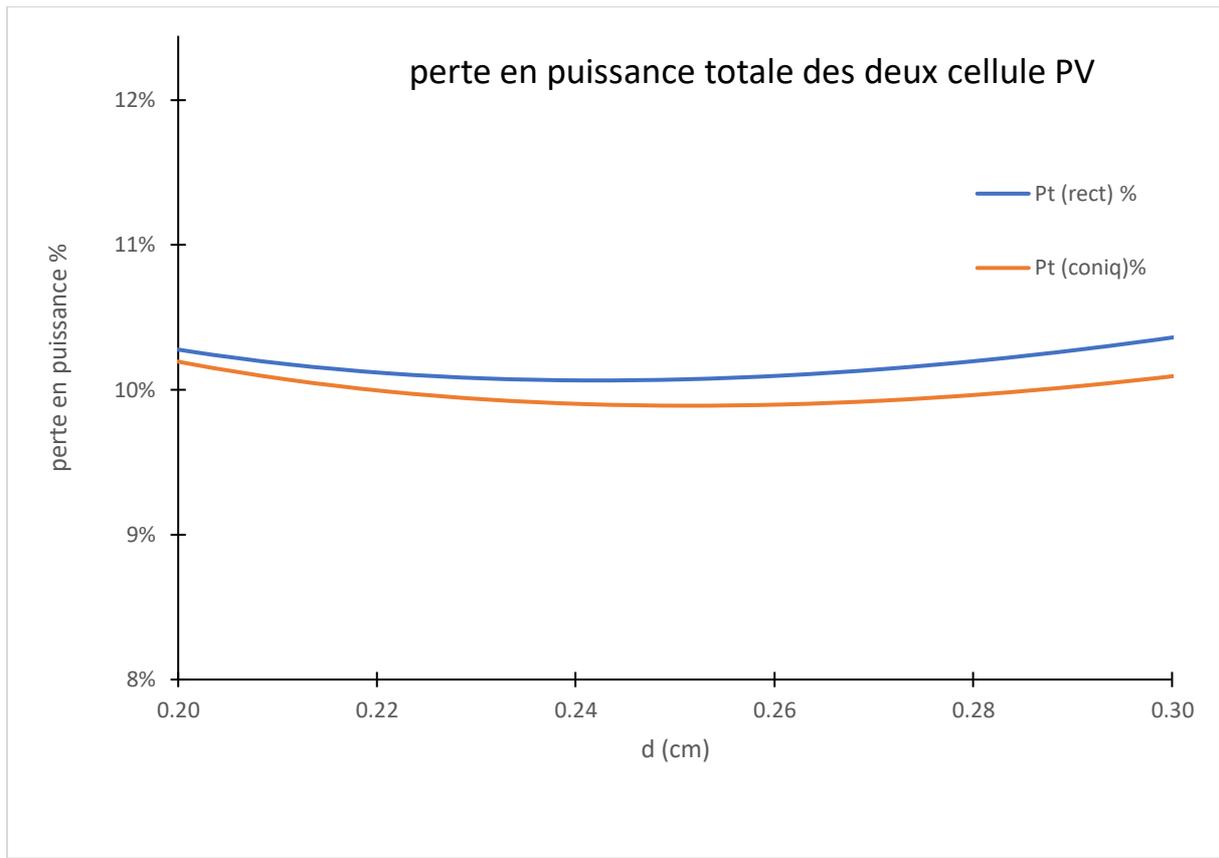


Figure IV.17 : Comparaison de la perte en puissance totale des deux cellules étudiées au voisinage de leurs distances interlignes optimisées.

La perte totale de la cellule conique qui est égale à 9,65 % est légèrement inférieure à celle de la cellule photovoltaïque rectangulaire qui est égale à 9,86%.

D'après les résultats obtenus, nous considérons que la distance interligne optimale est de 0,251cm pour la cellule solaire à géométrie conique.

IV.7.4 Comparaison des différents paramètres des deux cellules

Sur le tableau IV-10, on présente les divers paramètres de la cellule à géométrie rectangulaire et la deuxième à géométrie conique afin de pouvoir les comparer à leurs distances interlignes optimisées d_{optimale} .

Tableau IV-10 : Comparaison entre les paramètres des deux cellules à la distance interligne optimale.

Paramètres des cellules	Cellule PV de géométrie rectangulaire	Cellule PV de géométrie conique
$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	37,9984	37,9984
$V_{co}(\text{mV})$	629,601	629,601
$J_m(\text{mA}/\text{cm}^2)$	36,1378	36,1425
$V_m(\text{mV})$	534,745	535,503
$P_m(\text{mW}/\text{cm}^2)$	19,33	19,36
FF (%)	80,78	80,90
η (%)	19,33	19,36
$d_{\text{optimale}}(\text{cm})$	0,241	0,251
$r_s \text{ optimale } (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	0,433	0,411
$P_t(\%)$	9,86	9,65
N_f	64	62

On remarque une légère amélioration de la densité de courant de court-circuit J_{cc} , du facteur de forme FF et du rendement η ainsi que la perte en puissance totale dans la cellule à grille conique.

IV.8 Bibliographie récente sur le sujet

Afin de montrer d'avoir traité un sujet d'actualité technologique et scientifique, à peine deux mois après avoir entamé le sujet de ce master, qu'un papier est présenté à la conférence SPIE aux états unis [26] le 4 mars 2022 qui s'est déroulée à Sans Francisco (Usa) et publié le 22 mars suivant dans les « proceedings » de cette conférence.

Ce papier présente un travail sur les grilles à géométrie conique de cellules photovoltaïques [27] effectué par une équipe de recherche à l'université Sans Antonio dans l'état du Texas aux états unis.

Sur la figure IV.17 suivante est présentée la grille de la cellule conique ainsi le masque de la métallisation avec lequel a été réalisée expérimentalement cette cellule.

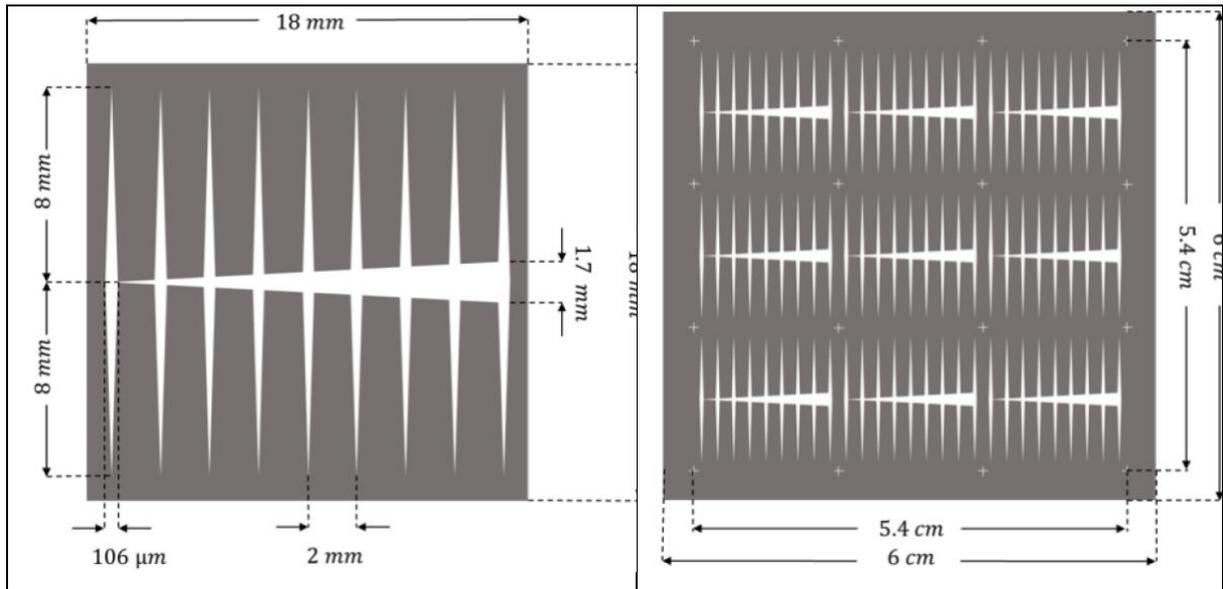


Figure IV.18 : à gauche : géométrie de la grille de la face avant d’une cellule solaire réalisée expérimentalement au sein de l’université de San Antonio (Usa) ; à droite : le masque qui a permis la réalisation de 9 cellules identiques [27].

La cellule réalisée dans ce laboratoire est de surface carrée, de côté 1,8 cm. Elle est petite par rapport à la cellule de type industrielle comme celle que nous avons étudiée ($L=15,6$ cm).

La distance interligne est de $d=2$ mm, proche de la cellule étudiée dans notre travail. La largeur maximale du busbarre est de 1,7 mm tandis que celle du doigt, est égale à 0,106 mm. Les cellules solaires élaborées par l’équipe de San Antonio sont élaborées au Silicium monocristallin et sont de substrat de type n contrairement à la nôtre qui est de type p et à émetteur n^+ . Les contacts électriques sont fabriqués à l’aluminium d’épaisseur de 400 nm, sont réalisés par évaporation thermique de chaque côté de la cellule à une vitesse de dépôt de 10 \AA/s suivi d’un recuit à $585 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 10 min pour réaliser le contact ohmique Al/Si. Il faut souligner que les contacts de la grille de notre cellule conventionnelle ont été choisis à l’argent. Les cellules fabriquées par le laboratoire de San Antonio ont des rendements de 11 à 12 % avec un facteur de forme FF de 68 % sans revêtement antireflet, ni de passivation de surface comme la nôtre.

D’autre part, une autre étude a été effectuée par cette même équipe en optimisant la largeur de doigt ainsi que la distance inter-doigts, tandis que dans notre travail, nous n’avons optimisé que la distance interligne.

La nette différence entre la cellule réalisée expérimentalement et la nôtre s'explique par de nombreux paramètres qui sont différents par rapport aux nôtres et qui ne sont pas publiés dans le papier en question.

Dans un autre papier publié le 28 mars dernier, une autre étude a été effectuée sur une grille à géométrie rectangulaire de cellules photovoltaïques où ont été optimisés les distances interlignes, la largeur et le nombre de busbarres et qui montre les mêmes allures des pertes de puissances obtenus par nos soins [28].

CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire est une énergie renouvelable la plus intense ou « énergie verte » entièrement alimentée par le soleil.

Dans ce travail constitué de quatre chapitres, nous avons mené une étude théorique sur les cellules solaires à deux différentes formes géométriques de la grille métallique réalisée avec des busbarres et des doigts en forme de peigne.

Concernant le premier chapitre, nous avons expliqué les notions préliminaires sur le rayonnement solaire et particulièrement l'air masse AM.1,5 utilisé comme étalon de mesure des cellules solaires.

Ensuite dans le deuxième chapitre, on a rappelé quelques notions sur les semi-conducteurs, et présenté les caractéristiques J-V et P-V de la cellule PV dont les paramètres électriques (J_{cc} , V_{co} , FF, η , J_m, V_m, P_m) de la cellule sont extraits.

Puis vient le troisième chapitre dans lequel on a décrit le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque dont il faut rappeler que nos cellules sont au Silicium monocristallin et pour lesquelles on a développé succinctement ses étapes de fabrication.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre consiste à la simulation et aux discussions des résultats des deux cellules à différentes formes géométriques de grille (barres collectrices et doigts), une à une géométrie rectangulaire et la seconde conique, nous avons notamment caractérisé les différentes performances tels que le rendement et les pertes (résistives, le taux d'ombrage) afin de les comparer.

L'objectif de cette étude était de calculer les pertes en puissance résistives et optiques. Les pertes résistives qui sont dues principalement aux résistances séries des deux cellules. Afin de négliger les pertes résistives dues aux résistances parallèles, nous les avons prises comme étant très grandes, de l'ordre de $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$. Quant aux pertes optiques, nous avons seulement étudié celles dues à l'ombrage tandis que les autres pertes n'ont pas été étudiées dans ce travail.

Dans un premier temps, nous avons d'abord calculé les résistances séries des différents éléments des deux cellules dont leurs grilles métalliques. Pour les déterminer, nous avons choisi

pour les deux cellules, des paramètres initiaux (géométriques, électriques, ...) issus de la littérature. A la suite de l'optimisation des distances interlignes pour les deux cellules, les premiers résultats effectués à l'aide du logiciel Excel de Microsoft, ont donné les valeurs suivantes de la résistance série à leurs distances optimales : $0,433 \Omega \cdot \text{cm}^2$ et $0,411 \Omega \cdot \text{cm}^2$ respectivement pour les cellules à géométries rectangulaire et conique. Ce qui a montré une légère diminution de la résistance série.

Ces résistances ont été introduites dans le site PV Lighthouse, dédié à la technologie du photovoltaïque afin de déterminer les caractéristiques J-V et P-V des deux cellules.

Pour la cellule à géométrie rectangulaire, nous avons obtenu les paramètres électriques suivants : la densité du courant de circuit $J_{cc}=37,9984 \text{ mA/cm}^2$, la tension de circuit ouvert $V_{co}=629,601 \text{ mV}$, le facteur de forme $FF=80,78\%$, le rendement énergétique $\eta=19,33\%$, la tension maximale $V_m=534,745 \text{ mV}$, la densité du courant maximal $J_m=36,1378 \text{ mA/cm}^2$ et la puissance maximale $P_m=19,33 \text{ mW/cm}^2$ au point de fonctionnement maximal.

Ainsi, pour la distance optimale $d_{\text{optimale (rect)}}=0,241 \text{ cm}$, les calculs ont donné les résultats suivants : $P_t=9,86\%$ dont $P_r=2,94\%$ et $P_o=6,91\%$ (2,88% pour les busbarres et 3,74% pour les doigts).

Pour la seconde cellule à géométrie conique, nous avons fait la même simulation et à l'aide de PV Lighthouse, on a obtenu les résultats à la distance optimale $d_{\text{optimale (coniq)}}=0,251 \text{ cm}$: $J_{cc}=37,9984 \text{ mA/cm}^2$, $V_{co}=629,601 \text{ mV}$, $FF=80,90\%$, $\eta=19,36\%$, $V_m=535,503 \text{ mV}$, $J_m=36,1425 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19,36 \text{ mW/cm}^2$.

Les pertes en puissance résistives et d'ombrage calculées sont les suivants : $P_t=9,65\%$ qui est la somme de $P_r=2,78\%$ et de $P_o=6,87\%$ (pour les busbarres, elle reste constante à 2,88% et 3,98% pour la contribution des doigts).

En comparant, les paramètres des deux cellules, à leurs distances interligne, on a constaté des améliorations des paramètres des deux cellules lorsqu'on passe de la distance d choisie initialement aux distances optimisées. Mais à ces distances optimisées, la cellule à géométrie conique présente de légères améliorations avec un rendement de 19,36% contre un rendement 19,33% pour la cellule rectangulaire. Nous constatons également des pertes totales de 9,65% et

de 9,86%, respectivement pour les cellules à grille de géométrie conique et rectangulaire. Les résultats obtenus montrent que la variation de la distance interligne a une influence sur les pertes résistives et optiques sur les deux cellules.

Ces résultats peuvent être encore améliorés si on optimise séparément d'autres paramètres des deux grilles.

En perspective, on souhaite que ce travail puisse être repris en optimisant d'autres paramètres comme les largeurs des doigts w_f et W_{bus} des busbarres, ainsi que le nombre de ces derniers N_b dans l'objectif d'obtenir de meilleures améliorations.

Bibliographie

- [1] B. Bouanani, « Etude technologique et électrique des cellules solaires en couches minces à hétérojonctions ZnO/cdS/CIGS utilisant le logiciel Atlas de Silvaco », Mémoire de Magister en électronique, Université DjillaliLiabes de Sidi Bel Abbés (2015).
- [2] <https://quizlet.com/ch/602144282/phys-le-rayonnement-solaire-flash-cards/> (consulté le 08/03/2022)
- [3] https://www.researchgate.net/figure/Spectre-solaire-3_fig3_267096072 (consulté le 08/03/2022)
- [4] K. Amara, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension », Mémoire de Magister en électronique, Université MOULOUD Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [5] Z. Abdi, « Étude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base de silicium », Mémoire de Master en électronique, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2017.
- [6] https://www.socol.ch/app/uploads/2017/01/la_degradation_des_molecules_organiques.pdf (consulté le 11/03/2022)
- [7] <https://eyecaremore.be/fr/linfluence-la-lumiere-et-des-couleurs-sur-votre-vue>(consulté le13/03/2022).
- [8] S. Barazzouk, « Caractérisation des états excités de pinacyanol et de la cellule photo-électrochimique utilisant le pinacyanol comme sensibilisateur », Thèse et mémoire, Université du Québec à Trois-Rivières (Canada), 2000.
- [9] H. Mathieu et H. Fanet, 2006. « Physique des semi-conducteurs et des composants électronique », 6^{ème} Edition, Masson, Paris.
- [10] N. Djellil, « Optimisation des paramètres photovoltaïques de cellules solaires bifaciales au silicium à base de type N et leur comparaison avec celles de type P », Mémoire de Master en physique, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,2017.
- [11] A. Goetzberger and C. Hebling, « Photovoltaic materials, past present, futur. ». Solar Energy Materials & Solar Cells, 2000, vol.62, pp. 1-19.
- [12] F. Youcef, « Rôle et influence des effets résistives et d'ombrage et, leur amélioration dans le rendement des cellules solaires. », Mémoire de Master en physique, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,2016.
- [13] <https://www2.pvlighthouse.com.au/calculators/Recombination%20calculator/Recombination%20calculator.aspx> (consulté 29/04/2022).

- [14] A. Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat en physique, Université de Mostaganem (Algérie), 2017.
- [15] P. Hake et al, 2005. «Application of a boron source diffusion barrier for the fabrication of back contact silicon solar cells», published in Conf. Rec.13thIEEE Photovoltaic. Spec. Conf.,Lake BUENA VISTA,FL ,USA,
DOI :<https://doi.org/10.1109/PVSC.2005.1488349>
- [16] C. Boulord, « Développement de techniques de métallisation innovantes pour - cellules photovoltaïques à haut rendement », Thèse de Doctorat, Insa de Lyon (France), 2011.
- [17] A. Zerga, « Modélisation, Simulation et Caractérisation des Cellules Solaires au silicium », Synthèse des travaux de recherche de l'habilitation universitaire présentée à l'Université de Tlemcen (2009).
- [18] <https://www.pvlighthouse.com.au/equivalent-circuit>(consulté 28/03/2022)
- [19] S. Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Thèse de Magistère, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2011.
- [20] <https://Solar-kit.com/Panneau-Solaire-polycristallin-ou-monocristallin>(11/05/2022)
- [21] R. Arndt, J. Allison, J. Haynos, and A. Muellenberg, Proc. 11th Intl, Photovoltaic Specialists Conf. IEEE, New York, 1975, p. 40.
- [22] C. Hasni, « Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellule solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS », Mémoire de Master en physique, Université Med Khider Biskra ,2014.
- [23] H.B. Serreze,1978. «Optimizing Semi-Conductor performance by simultaneous consideration of grid pattern design and interconnect configuration», Conf. Rec.13thIEEE Photovolt. Spec. Conf,
- [24] <https://www.pvlighthouse.com.au> (consultée le 04/03/2022).
- [25] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>(consultée le 14/04/2022).
- [26] <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-photonics>
- [27] J.R. Montes-Bojorquez et A. A. Ayon, « Optimization of n-type silicon solar cell front side contacts » presented in Proc. SPIE 11996, 2022, San Francisco, California, United States, Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices XI, 119960F (4 March 2022).
<https://doi.org/10.1117/12.2610535>
- [28] A. Mekemeche, « Étude à deux dimensions de cellules solaires en silicium monocristallin à émetteur sélectif à l'aide de PC2D », Mémoire de magistère, Université de Mostaganem (Algérie), 2013.

[29] T. Panda et al, « Impact of multi-busbar front grid patterns on the performance of industrial type c-Si solarcells », Solar energy 236 (2022) 790-801.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.051>

Résumé

Dans ce mémoire de master, nous avons présenté une étude théorique et de simulation entre deux cellules solaires de différentes formes de grille métallique (barres collectrices et doigts) rectangulaire et conique et de les comparer.

En se servant du site PV Lighthouse et du logiciel Excel de Microsoft, nous avons effectué les simulations de ces deux cellules étudiées pour calculer les caractéristiques J-V et P-V, la résistance série ainsi les pertes résistives dues à la résistance série et à l'ombrage, où on a déterminé l'influence de la distance interligne sur les performances des paramètres de ces deux cellules : V_{co} , J_{cc} , FF, η , V_m , J_m , P_m et la perte en puissance totale P_t .

Les résultats optimaux des différentes performances obtenu dans notre simulation sont comme suit : $J_{cc}= 37,9984 \text{ mA/cm}^2$, $V_{co}=629,601 \text{ mV}$, $FF= 80,78\%$, $\eta =19,33\%$, $V_m=534,745 \text{ mV}$, $J_m=36,1378 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19,33 \text{ mW/cm}^2$ et des pertes en puissance $P_t=9,86\%$ pour une distance interligne optimisée de 0,241cm de la cellule photovoltaïque à géométrie rectangulaire. Et $J_{cc}= 37,9984 \text{ mA/cm}^2$, $V_{co}=629,601 \text{ mV}$, $FF=80,90\%$, $\eta =19,36\%$, $V_m= 535,503 \text{ mV}$, $J_m=36,1425 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19,36 \text{ mW/cm}^2$ et des pertes en puissance $P_t=9,65\%$ pour une distance interligne de 0,251cm de la cellule photovoltaïque à géométrie conique.

Nous avons constaté de légères améliorations de la cellule à grille de géométrie conique en comparaison avec la cellule à géométrie rectangulaire.

Mots-clés : grille métallique, busbarres, doigts, cellule solaire, silicium, résistance série, ombrage.

Abstract

In this master's thesis, we presented a theoretical and simulation study between two solar cells of different shapes of metal grid (busbars and fingers) rectangular and tapered, then compared them.

Using the PV Lighthouse site and Microsoft Excel software, we performed simulations of these two cells studied to calculate the J-V and P-V characteristics, the series resistance as well as the resistive losses due to series resistance and shading, where we determined the influence of the interline distance on the performance of the parameters of these two cells : V_{oc} , J_{sc} , FF, η , V_m , J_m , P_m and the total power loss P_t .

The optimal results of the different performances obtained in our simulation are as follows: $J_{sc}= 37.9984 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=629.601 \text{ mV}$, $FF=80.78\%$, $\eta =19.33\%$, $V_m=534.745 \text{ mV}$,

$J_m=36.1378 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19.33 \text{ mW/cm}^2$ and power losses $P_t=9.86\%$ for an optimized interline distance of 0.241 cm of the photovoltaic cell with rectangular geometry. And $J_{sc}=37.9984 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=629.601 \text{ mV}$, $FF=80.90\%$, $\eta=19.36\%$, $V_m=535.503 \text{ mV}$, $J_m=36.1425 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19.36 \text{ mW/cm}^2$ and power losses $P_t=9.65\%$ for an interline distance of 0.251cm of the photovoltaic cell with conical geometry.

We found slight improvements of the conical geometry grid cell in comparison to the rectangular geometry cell.

Keywords: metal grid, busbars, fingers, solar cell, silicon, series resistance, shading.

الملخص

في رسالة الماجستير هذه، قدمنا دراسة نظرية ومحاكاة بين خليتين شمسيتين مختلفتين من الشبكة المعدنية (القضبان والأصابع) مستطيلة ومدببة، ثم قمنا بمقارنتها.

باستخدام موقع PV Lighthouse وبرنامج Microsoft Excel، أجرينا محاكاة لهاتين الخليتين اللتين تمت دراستهما لحساب خصائص $J-V$ و $P-V$ ، ومقاومة السلسلة وكذلك الخسائر المقاومة بسبب مقاومة السلسلة والتظليل، حيث حددنا تأثير

المسافة على أداء معلمات هاتين الخليتين V_{oc} : J_{cc} و FF و η و V_m و J_m و P_m وإجمالي فقد القدرة P_t . النتائج المثلى للأداء المختلف الذي تم الحصول عليه في المحاكاة لدينا هي كما يلي، $J_{cc}=37,9984 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19,33 \text{ mW/cm}^2$, $V_{co}=629,601 \text{ mV}$, $FF=80,78\%$, $\eta=19,33\%$, $V_m=534,745 \text{ mV}$, $J_m=36,1378 \text{ mA/cm}^2$ ، وفقدان الطاقة $P_t = 9.86\%$ لمسافة خط داخلي محسنة تبلغ 0,241cm للخلية الكهروضوئية ذات هندسة مستطيلة. و $J_{cc}=37,9984 \text{ mA/cm}^2$, $V_{co}=629,601 \text{ mV}$, $FF=80,90\%$, $\eta=19,36\%$ ، و $V_m=535,503 \text{ mV}$, $J_m=36,1425 \text{ mA/cm}^2$, $P_m=19,36 \text{ mW/cm}^2$ ، وفقدان الطاقة $P_t = 9.65\%$ لمسافة خط داخلي 0.251cm من الخلية الكهروضوئية مع هندسة مخروطية.

وجدنا تحسينات طفيفة لخلية شبكة الهندسة المخروطية بالمقارنة مع خلية الهندسة المستطيلة.

الكلمات المفتاحية: الشبكة المعدنية،القضبان،الأصابع، الخلايا الشمسية، السيليكون، المقاومة المتسلسلة، التظليل.