



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des Sciences Exactes et Informatique

Département de Physique

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Master en Physique

Présenté par :

YOUCEF Fadila

Sujet :

**« Rôle et influence des effets résistives et d'ombrage
et, leur amélioration dans le rendement des cellules
solaires. »**

Soutenu le :31/05/2016

Devant le jury composé de :

M. Mounir TERKI HASSAÏNE,	M.C.A., Université de Mostaganem,	Président.
M. Miloud BOUATTOU,	M.C.B., Université de Mostaganem,	Examineur.
M. Mohammed.BEGHDAD,	M.C.A., Université de Mostaganem,	Encadreur.

Année universitaire : 2015-2016

Remerciements :

Louange à notre Seigneur "Allah" qui nous a dotés de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre Créateur qui nous a incités à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons toute notre gratitude en premier lieu.

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur BEGHADAD Mohammed, Maître de Conférences, classe A, à l'Université de Mostaganem.

Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, de ses qualités humaines et de sa constante disponibilité.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur TERKI HASSAÏNE Mounir, Maître de Conférences, classe A, à l'université de Mostaganem, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur BOUATTOU Miloud, Maître de Conférences, classe B, d'avoir accepté d'être examinateur de notre travail.

Je n'oublierai jamais de remercier mes chères amies Zahira, Kahloucha et Fatima pour m'avoir accompagné dans cette période et Leur présence à rendre les difficultés passables.

Je voudrai enfin remercier tous ceux qui m'ont accordée leurs aides et leurs encouragements et dont les conseils m'ont été forts utiles.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère qui est pour mon corps mieux qu'un cœur,

Mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous,

Mes frères : Mostapha, Benaouda, Moussa et Sid ahmed,

*Mes chers : Zahira, Fatima, Kahloucha, Houaria et
Mohamed,*

Toute ma grande famille Youcef et Agboubi,

Mes amis et mes collègues des études,

Et Tous ceux qui me sont chers.

Fadila

Sommaire :

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Le gisement solaire

I.1. Le soleil.....	4
I.2 Rayonnement solaire	4
I.2.1 Rayonnement direct.....	4
I.2.2 Rayonnement diffus.....	4
I.2.3 Albédo.....	5
I.2.3 Rayonnement global.....	5
I.3 Masse d'air.....	5
I.4 Absorption de la lumière.....	6
I.5 Spectre solaire.....	7
I.6 Zone utile du spectre solaire.....	8
I.8 Rayonnement solaire en Algérie	9

Chapitre II : Physique des semi-conducteurs

II.1. Définition.....	11
II.1.1 Isolant.....	11
II.1.2 Conducteur.....	11
II.1.3 Semi-conducteur.....	11
II.2. Types de semi-conducteurs.....	12
II.2.1. Semi-conducteurs intrinsèques.....	12
II.2.2. Semi-conducteurs extrinsèques.....	14
II.2.2.1. Semi-conducteurs N.....	14
II.2.2.2. Semi-conducteurs P.....	15
II.3. Création de porteurs.....	16
II.4 Recombinaisons	18
II.4.1 Recombinaison directe (bande à bande).....	19
II.4.2 Recombinaison indirecte.....	20
II.4.3 Recombinaison Auger.....	21
II-4-4 Recombinaison en surface.....	22

II.5 Courants dans un semi-conducteur.....	22
II.6 Jonction PN	24
II.6.1. Jonction polarisée.....	27
II.6.1.1 Polarisation directe.....	27
II.6.1.2 Polarisation inverse	27

Chapitre III : Notions sur les cellules solaires

III.1 Historique sur l'effet photovoltaïque.....	32
III.2 La cellule solaire.....	33
II.2.1 Définition.....	33
II.2.2 Principe de fonctionnement.....	33
III.3 Choix du matériau.....	34
III.4 Silicium.....	34
III.5 La fabrication de cellules solaires	35
III.5.1 Extraction et purification de silicium.....	35
III.5.2 Obtention des lingots de silicium.....	35
III.5.3 Obtention des wafers photovoltaïques.....	36
III.5.4 Dopage du silicium.....	37
III.5.5 Traitements de surface.....	37
III.5.5.1 Texturisation.....	37
III.5.5.2 Couche antireflet.....	37
III.5.5.3 Passivation.....	37
III.5.5.4 Bords des plaques.....	38
III.5.5.5 Champ en face arrière BSF (Back Surface Field).....	38
III.6 Les caractéristiques d'une cellule solaire.....	40
III.6.1 Caractéristique électrique d'une cellule solaire.....	40
III.6.2 Tension de circuit ouvert V_{CO} (pour $I=0$).....	41
III.6.3 Courant de court-circuit I_{CC}	41
III.6.4 Puissance	42

III.6.5 Puissance maximale	42
III.6.6 Facteur de forme.....	42
III.6.7 Rendement.....	43
III.6.8 Réponse spectrale.....	43
III.7 Influence de la résistance série et la résistance shunt.....	44
III.8.Limitations du rendement.....	44
III.9 Type de cellules.....	45

Chapitre IV : Résultats et discussions d'étude des pertes résistives

IV.1 Pertes résistives dues à la métallisation.....	47
IV.2 Pertes électriques.....	48
IV.3 Métallisation dans une cellule.....	48
IV.4 Direction du flux du courant dans une cellule.....	49
IV.5 Résistances séries.....	50
IV.5.1 Résistance de la base R_b	50
IV.5.2 Résistance de l'émetteur R_e	50
IV.5.3 Résistance d'une ligne de la grille face avant R_l	52
IV.5.4 Résistance de la métallisation en face arrière (R_m) _{ar}	53
IV.5.5 Résistance des busbarres R_{bus}	53
IV.5.6 Résistances des contacts.....	54
IV.5.6.1 Résistance de contact avant (R_c) _{av}	54
IV.5.6.2 Résistance de contact arrière (R_c) _{ar}	54
IV.6 Ombrage (pertes optiques).....	54
IV.7 Pertes résistives.....	56
IV.8 Simulation et l'optimisation des paramètres.....	57
IV.8.1 L'influence de d et de p sur R_e	57

IV.8.2 Effet de d sur la résistance de la grille avant R_1	58
IV.8.4 Effet de d sur $(R_c)_{av}$	59
IV.8.5 Impact de d et de p sur la résistance totale en série.....	60
IV.8.6 Influence de d et de p sur le taux d'ombre F	61
IV.8.7 Comparaison entre F et R_s en fonction de d	61
IV.8.8 Influence de d sur les différentes puissances.....	62
IV.8.9 Effet de d sur la puissance totale en pourcentage.....	62
IV.8.10 Impact de la largeur des lignes w sur les puissances en watts.....	63
IV.8.11 Effet de w sur la puissance totale en pourcentage	63
IV.8.12 Impact de R_{sh} sur les puissances en watts.....	64
Conclusion générale	65

Introduction générale

Depuis le début du XX^{ième} siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et d'autre part de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant. Actuellement, la production de l'énergie domestique dans l'industrie est basée, en grande partie, sur une ressource limitée : les énergies fossiles. Les sources de ces énergies deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'accroissent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers le milieu du siècle présent si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation. Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais.

Le but est d'utiliser une source d'énergie économique, renouvelable et peu polluante, parce que les sources d'énergie conventionnelles telles que le nucléaire ou les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont issues de stocks limités de matières extraites du sous-sol de la terre. Chacune d'elles provoquent dans leurs utilisations des conséquences à long terme plus ou moins importantes sur l'environnement : pollution atmosphérique, changement climatique, contamination radioactive...

De nos jours, beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire. Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

La recherche est très active dans le domaine du solaire photovoltaïque. Les prix diminuent constamment et les rendements progressent.

En 20 ans, les rendements dans les laboratoires sont passés de 15 % à 46 % pour les hétérostructures dans les laboratoires. Ce dernier chiffre serait celui atteint sur terre par les cellules solaires utilisées surtout dans les satellites envoyés dans l'espace.

L'amélioration du rendement de cellules solaires nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans la construction de ces cellules, en faisant un bon choix pour sa structure et pour ces conditions de fabrication.

L'objectif dans ce travail est d'optimiser les bons paramètres résistifs d'une cellule solaire conventionnelle.

Notre travail se compose de trois chapitres. Dans le premier chapitre, on présente les notions sur l'ensoleillement et le spectre solaire en particulier au voisinage de l'atmosphère terrestre et au sol, les longueurs d'onde du rayonnement qu'il le compose et notamment ses parties utiles pour la cellule.

Dans le deuxième chapitre, on a rappelé la physique des semi-conducteurs plus précisément la jonction P-N, partie nécessaire à la compréhension du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Le troisième chapitre concerne les étapes successives de la réalisation d'une cellule photovoltaïque typique. À savoir, sa définition, son fonctionnement physique, ses conditions de mise en œuvre, ses caractéristiques,...

La partie de notre travail qui est l'étude des paramètres résistifs et géométriques d'une cellule solaire sera détaillée dans le quatrième chapitre où on présente leurs définitions, leurs expressions ainsi que la problématique de l'optimisation de ces pertes. Les résultats et les discussions seront développés en fin de ce chapitre.

Enfin, on termine notre étude par une conclusion générale qui englobe tout notre travail et en citant les perspectives qui peuvent en découler.

Chapitre I
Gisement solaire

I-Gisement solaire

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, son énergie, son répartition, ses types...

I.1 Le soleil :

Le soleil est l'étoile du système solaire. Autour de lui gravitent la terre et les autres planètes dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150×10^6 km de nous. Sa masse est de 330 000 fois celle de la terre ($1,99 \times 10^{30}$ kg).

Le soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz. Sa lumière nous parvient en 8 minutes après avoir été émise. Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du soleil.

- Son énergie :

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable : $3,82 \times 10^{26}$ Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes par seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm^2 de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur terre que 5 milliardièmes (5×10^{-9}) de cette puissance.

Cette énergie provient de son centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection.

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du soleil.

I.2 Rayonnement solaire :

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

I.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.

I.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.

I.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 environnant, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles.

I.2.4 Rayonnement global :

C'est le rayonnement qui regroupe tous ces rayonnements cités précédemment.

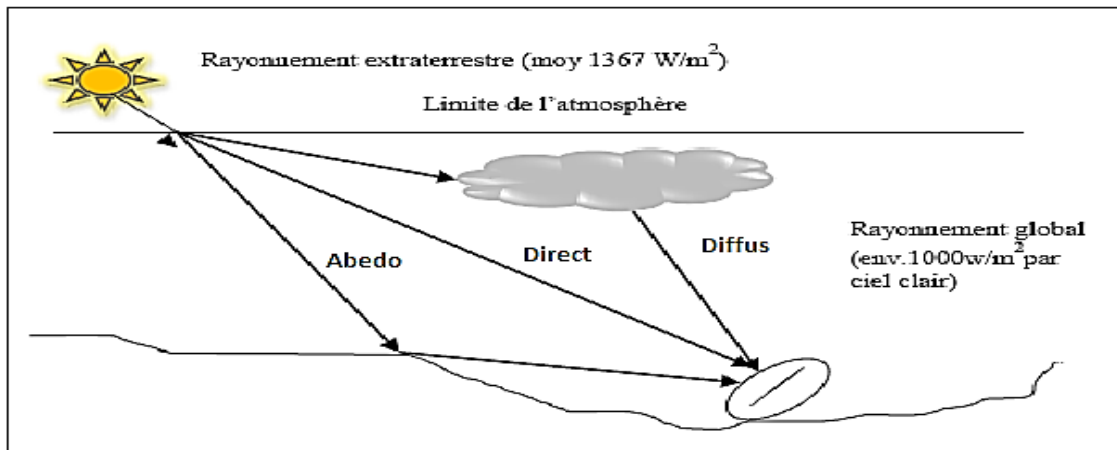


Figure I-1 : Les composantes du rayonnement solaire au sol.

I.3 Masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié.

On appelle le nombre « masse d'air », m , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h).

À l'aide des points O, A et M (figure I-2), la longueur du trajet du soleil traversant l'atmosphère s'exprime par :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} = \frac{OA}{\cos(OA, OM)} \quad (I.1)$$

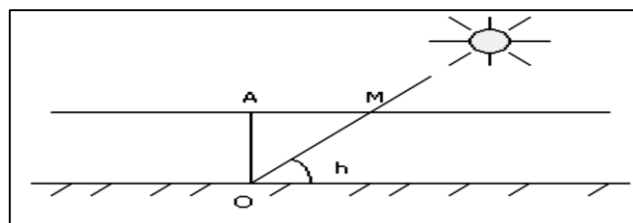


Figure I-2 : La notion du nombre d'air masse.

Par exemple : AM_1 : $h=90^\circ$, soleil au zénith,

AM_{1,5} : h=42°, sur l'horizon,

AM₂ : h=30°.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair, lorsque le soleil est au zénith, est plus de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air « 1 » (ou AM₁). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est 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/m². Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil et à T=25°C, sur la surface de la terre°: AM_{1,5}G ou AM_{1,5}D.

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).

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

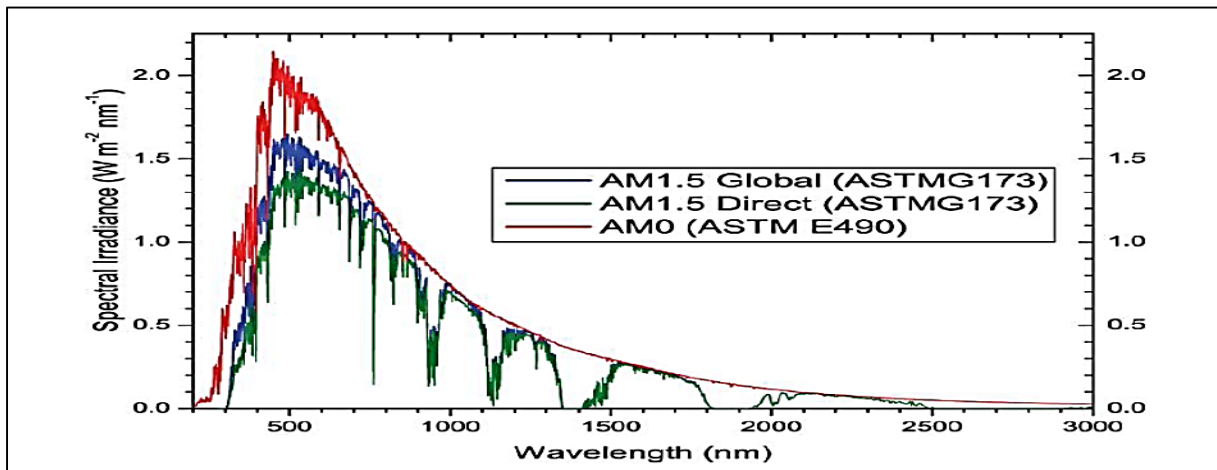


Figure I-3 : Les spectres solaires AM₀ (hors atmosphère), AM_{1,5}G et AM_{1,5}D.

Comme une référence, on se base sur le spectre global AM_{1,5} avec une puissance de 1000 W/m².

Si on se place dans un endroit où la pression est différente de 1013 mbar avec une altitude z, la relation de la masse d'air est donnée :

$$m = \frac{p}{1013 * \sin h} \exp\left(-\frac{Z}{7.8}\right) \quad (I.2)$$

I.4 Absorption de la lumière :

La lumière se compose de photons, «grains de lumière», chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon).

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières même et au travers les objets transparents pour notre œil.

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- ✓ **Réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- ✓ **Transmission** : la lumière traverse l'objet.
- ✓ **Absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas l'énergie qui est restituée sous une autre forme.

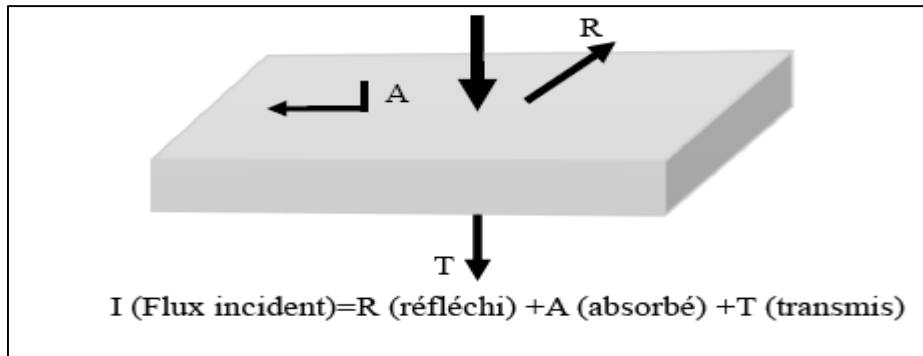


Figure I-4 : Réflexion, transmission et absorption.

I.5 Spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'onde est appelée spectre électromagnétique. Il est en effet composé de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons qui sont des grains de lumière composant ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (I.3)$$

Avec :

h : la constante du Planck ($h=6,62 \times 10^{-34}$ J.s),

ν : la fréquence,

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

λ : la longueur d'onde (m).

Le spectre solaire arrivant au sol s'étend de la lumière de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible du spectre électromagnétique. L'irradiante solaire la plus importante est aux longueurs d'onde visibles et un pic dans le bleu-vert.

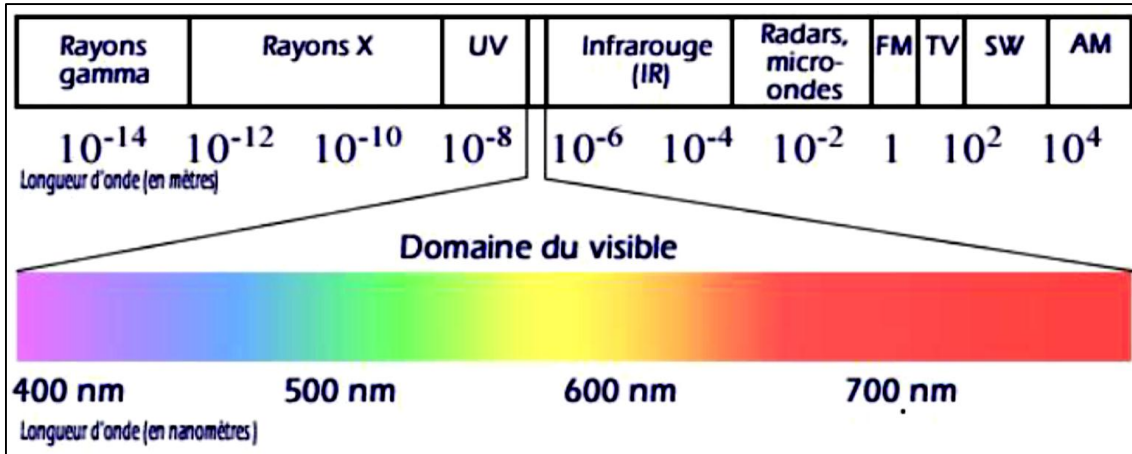


Figure I-5 : Spectre solaire.

I.6 Zone utile du spectre solaire :

La zone utile du spectre solaire dépend de l'énergie incidente du rayonnement solaire et contrôlée par l'énergie du gap du matériau de la cellule solaire.

La longueur d'onde est liée à l'énergie de gap par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \Rightarrow \lambda(\mu\text{m}) = \frac{1,24}{E_g(\text{eV})} \quad (\text{I. 4})$$

Les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisables pour la génération des paires électrons-trous. Si $E_{\text{ph}} < E_g$, le photon n'est pas absorbé par le semi-conducteur qui est donc transparent pour cette longueur d'onde. Si $E_{\text{ph}} > E_g$, le photon va être absorbé. Mais une partie de son énergie sera perdue par thermalisation si elle dépasse l'énergie du gap.

La figure ci-dessous résume le spectre de référence, sous formes d'aires :

- ✓ Photons non absorbés (I) (environ 20%),
- ✓ Photons perdus par thermalisation (II) (environ 32%),
- ✓ La zone 'utile' du spectre (III) (environ 48%), mais dont l'énergie totale correspondante ne pourra pas être toute transformée en énergie électrique.

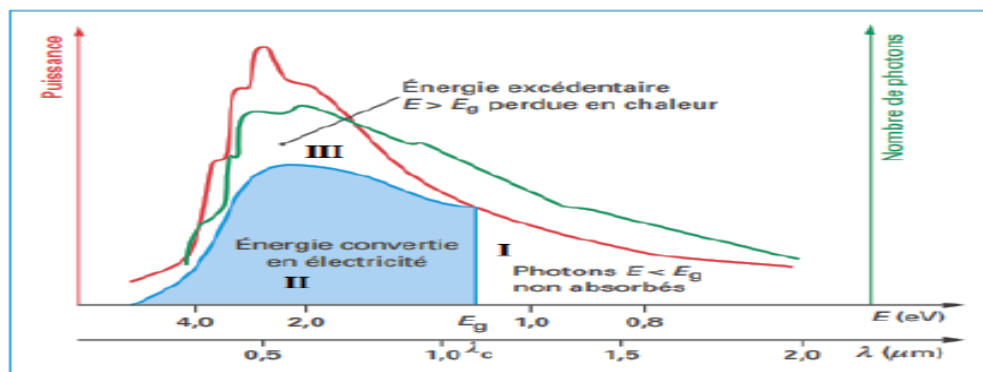


Figure I-6 : Les différentes zones du spectre solaire et la génération correspondante de photons.

I-8 Rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie est l'un des pays qui possède un gisement solaire très important. La puissance solaire maximale en tout point de notre pays dépasse largement 1 kW/m^2 et l'énergie annuelle maximale reçue par le sol Algérien est de l'ordre de 2500 kWh/m^2 .

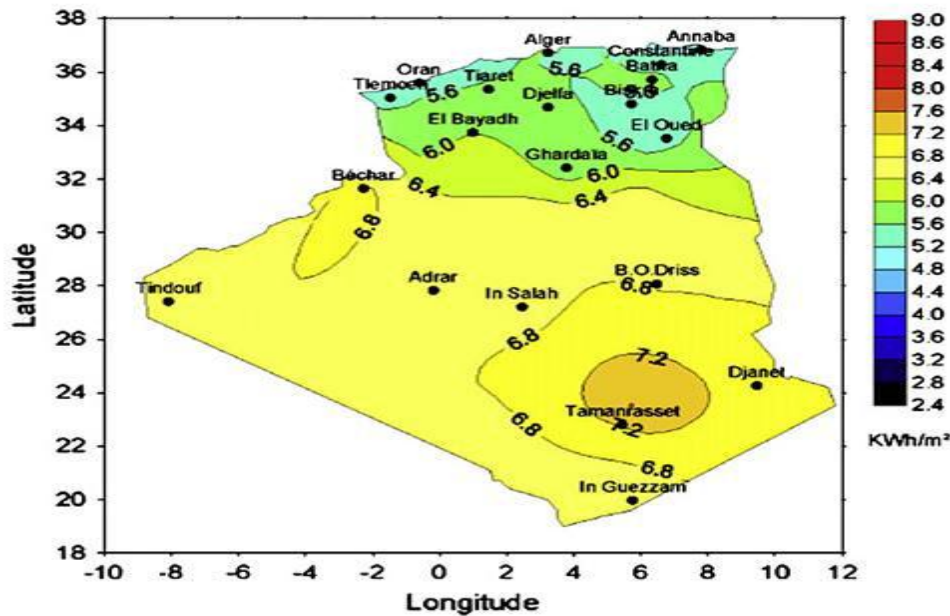


Figure I-7 : Rayonnement solaire en Algérie.

L'étude de toutes ces propriétés est très nécessaire en intégrant d'autres conditions sur la position du soleil et sa variation pour avoir un bon rendement parce qu'il faut bien localiser le panneau solaire pour qu'il reçoive le maximum du spectre solaire durant l'année.

Chapitre II
Physique des semi-conducteurs

II-Physique des semi-conducteurs

II-Physique des semi-conducteurs

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

L'objectif de cette partie 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 les mécanismes de conduction électrique.

II.1 Définitions :

II.1.1 Isolant :

La notion « isolant » peut aussi être expliquée par le phénomène des bandes d'énergies, alors dans un isolant on trouve que les bandes d'énergie les plus faibles (bande de valence) sont entièrement pleines, la bande interdite est assez grande ($\geq 5\text{eV}$). et il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction (bandes de conduction vides).

II.1.2 Conducteur :

Dans le cas où les liaisons chimiques n'utilisent pas tous les électrons de la couche périphérique. Ceux qui sont excédentaires sont alors libres de circuler et se déplacent naturellement dans la bande de conduction (même à $T=0 \text{ °K}$), ce matériau devient alors conducteur. Ceci se traduit par un gap nul ou négatif : les bandes de conduction et de valence se chevauchent.

II.1.3 Semi-conducteur :

Un matériau semi-conducteur est un isolant possédant un faible gap. Il est parfaitement isolant à $T=0 \text{ K}$, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous une forme quelconque (lumière ou tout rayonnement électromagnétique, chauffage, etc...).

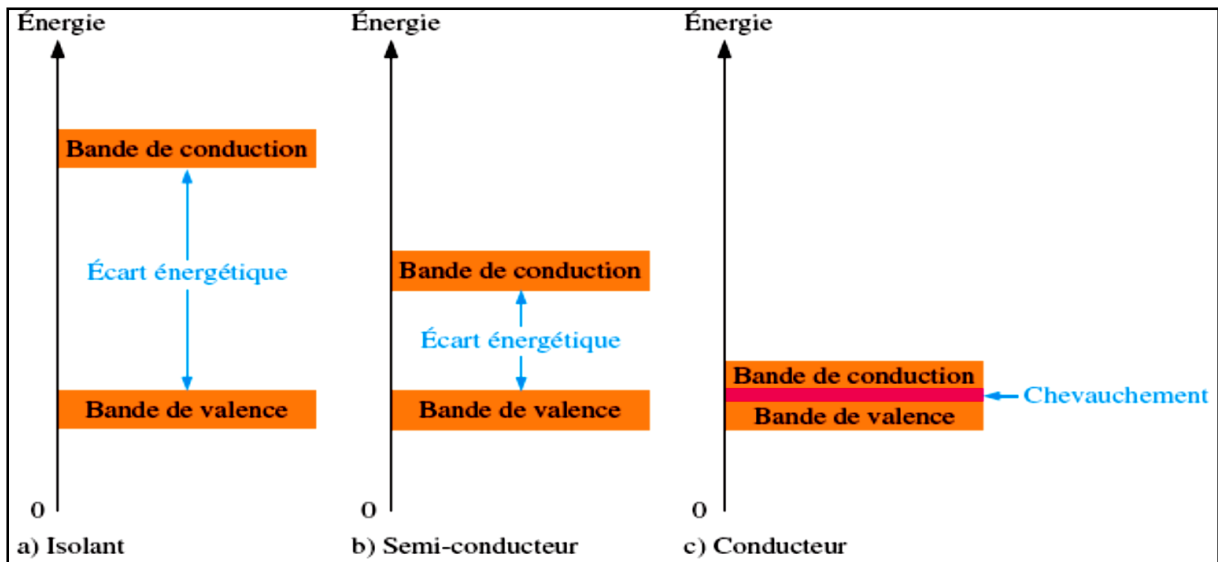


Figure II-1 : Les différents états d'un solide.

II.2 Types des semi-conducteurs :

II.2.1 Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur est dit intrinsèque s'il est dépourvu de toute impureté capable de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction sont créés par l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence, Alors la concentration intrinsèque sera donnée par :

$$n = p = n_i^2 \quad (\text{II. 1})$$

$$np = n_i^2 \quad (\text{II. 2})$$

n et p sont respectivement les concentrations des électrons et des trous, n_i est appelée densité intrinsèque, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température T donnée.

Avec :

$$\begin{cases} n = N_C \exp\left(\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \\ p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 3}) \quad \begin{cases} N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \\ N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

N_V, N_C sont respectivement les densités effectives d'états des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence.

E_C et E_V sont respectivement les énergies du bas de la bande de conduction et le haut de la bande de la bande de valence. E_F , l'énergie du niveau de Fermi.

k_B , la constante de Boltzmann égale à $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

m_n^* , m_p^* sont les masses effectives des électrons et des trous.

D'autre part, on posant :

$$q\phi_{Fi} = E_F - E_{Fi} \quad (\text{II. 4})$$

Avec E_{Fi} , le niveau de Fermi intrinsèque (du semi-conducteur intrinsèque) et q , la charge électronique.

Les expressions précédentes permettent d'écrire :

$$\begin{cases} n = n_i \exp\left(\frac{+e\phi_{Fi}}{k_B T}\right) \\ p = n_i \exp\left(\frac{-e\phi_{Fi}}{k_B T}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 5})$$

$$\text{Alors: } n p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (\text{II. 6})$$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (\text{II. 7})$$

Avec l'énergie du gap $E_g = E_c - E_v$.

Selon la formule en (II-7), on remarque que la densité intrinsèque est une fonction exponentielle du gap et de la température.

Exemple :

	Si	Ge	GaAs	InP
$n_i (\text{cm}^{-3})$	$1,45 \times 10^{10}$	2×10^{13}	3×10^6	3×10^7

Tableau II-1 : La densité intrinsèque des porteurs de quelques semi-conducteurs à la température ambiante.

Pour obtenir la position de niveau de Fermi, on fait l'égalité entre n et p :

$$n = p \quad (\text{II. 8})$$

$$N_c \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_B T}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right) \quad (\text{II. 9})$$

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad (\text{II. 10})$$

$$E_{Fi} \approx \frac{E_C + E_V}{2} \quad (\text{II. 11})$$

Il en résulte que le niveau de Fermi intrinsèque E_{Fi} est toujours très proche du centre de la bande interdite.

II.2.2 Semi-conducteur extrinsèque :

L'introduction de certaines impuretés dans un semi-conducteur permet d'y modifier le nombre de porteurs libres, de choisir le type conduction (par électrons ou par trous) et de contrôler la conductivité. Ce procédé est appelé le « dopage ».

Alors, un semi-conducteur dopé est une structure cristalline dans laquelle on a introduit des atomes étrangers de valence 3 ou 5 pour le silicium (de valence 4). L'état électronique s'en trouve modifié : le dopage accroît la conductibilité du cristal tout en le maintenant entre l'isolant et le conducteur.

II.2.2.1 Semi-conducteur de type N :

Ce semi-conducteur est obtenu par l'introduction dans la matrice du matériau des atomes d'impuretés pentavalents tels que le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb).

Chaque atome d'impureté amène un électron de valence supplémentaire. Cet électron est peu lié au noyau ($E \approx 0,01$ eV) et passe aisément dans la bande de conduction. La conductivité du matériau (conductivité extrinsèque) devient, à cause du taux de dopage, très supérieure à celle du matériau pur. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction.

Dans ce cas, la conduction dite de type N (négative) est assurée par des électrons qui constituent les porteurs majoritaires.

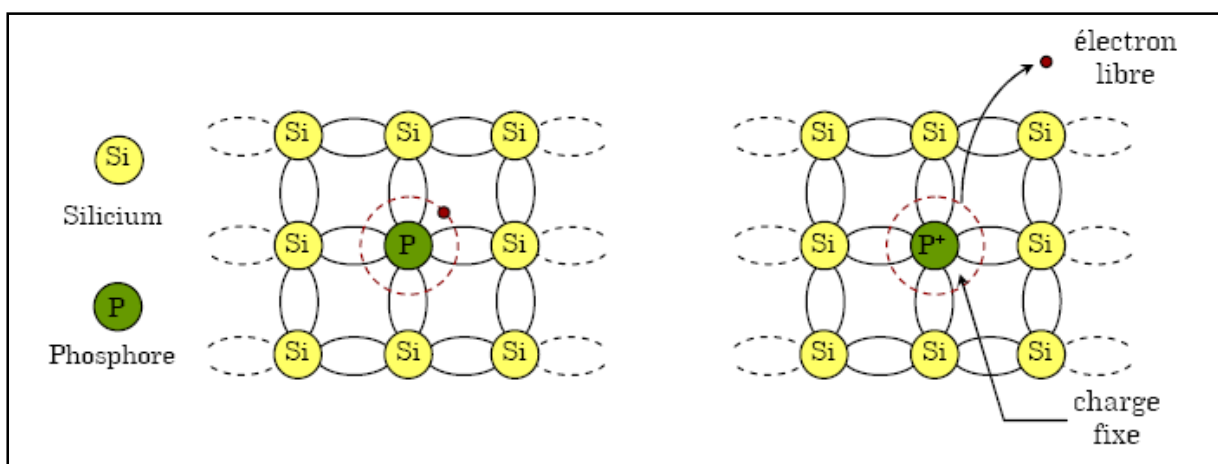


Figure II-2 : Semi-conducteur dopé N.

On peut également considérer un semi-conducteur possédant en même temps une densité N_d d'atomes donneurs et une densité N_a d'atomes accepteurs.

Pour un semi-conducteur dopé N :

$N_a = 0$ et $N_d \gg p \Rightarrow n \approx N_d$: \Rightarrow Les électrons sont les porteurs majoritaires.

Sachant que la loi d'action de masse relie, à une température T, la densité de porteurs (électrons et trous) à la densité intrinsèque du semi-conducteur donnée par l'équation (II.2)

On déduit la concentration des porteurs minoritaires :

$$p = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (\text{II. 12})$$

Et le niveau de Fermi obtenu par rapport au niveau E_C est comme suit :

$$E_{Fn} = E_C - k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_d}\right) \quad (\text{II. 13})$$

Tenant en compte le niveau de Fermi intrinsèque, on obtient une autre expression :

$$E_{Fn} = E_{Fi} + k_B T \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (\text{II. 14})$$

II.2.2.2 Semi-conducteur de type P :

Dans ce cas, on introduit dans le réseau une impureté trivalente : bore (B), aluminium (Al), gallium (Ga), indium (In). Il manque à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes voisins du cristal. Un faible apport d'énergie ($\approx 0,05 \text{ eV} \approx 2k_B T$) suffit pour qu'un électron voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (accepteurs) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron.

Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur. La conduction de type P (positive) est assurée par des trous, qui sont dans ce cas les porteurs majoritaires.

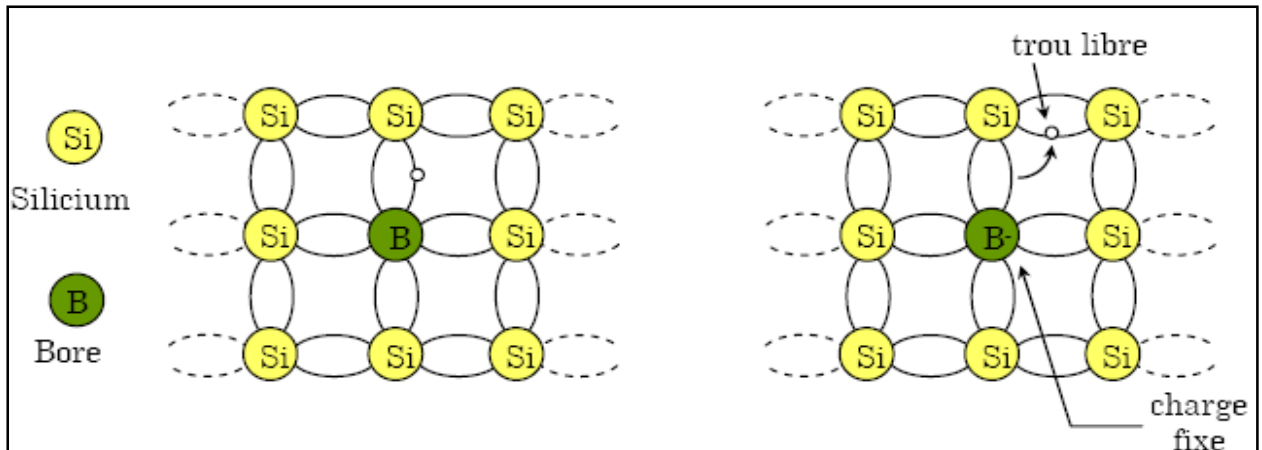


Figure II-3 : Semi-conducteur dopé P.

Pour un semi-conducteur dopé P :

$N_d = 0$ et $N_a \gg n \Rightarrow p \approx N_a \Rightarrow$ Les trous sont les porteurs majoritaires.

De même, selon la loi d'action de masse, on trouve que la concentration des porteurs minoritaires (électrons) est donnée par :

$$n = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (\text{II. 15})$$

Et le niveau de Fermi obtenu par rapport au niveau E_V est comme suit

$$E_F = E_V + k_B T \ln\left(\frac{N_V}{N_a}\right) \quad (\text{II. 16})$$

Lorsqu'on prend en considération le niveau de fermi intrinsèque, on aura alors :

$$E_{Fp} = E_{Fi} - k_B T \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (\text{II. 17})$$

II.3 Création de porteurs :

La création d'un porteur libre correspond à une transition soit entre bandes de valence (BV) et de conduction (BC) de ce porteur, soit entre un niveau d'énergie et une bande :

- Transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction qui correspond à la création d'une paire électron trou.
- Transition d'un électron d'un niveau donneur E_D (situé dans la bande interdite) vers la bande de conduction. Il reste une charge positive (atome ionisé) et un électron libre dans la bande de conduction (cas d'un semi-conducteur de type N).

- Transition d'un électron de la bande de valence vers un niveau accepteur E_A du gap. Il reste une charge négative fixe et un trou dans la bande de valence.

L'énergie nécessaire pour rendre possible de telles transitions est fournie soit par des photons (lumière) soit par des particules énergétiques (rayonnements ou porteurs).

Dans les cellules solaires, la création de paires électron-trou se fait par énergie lumineuse (photons).

Un photon ayant une énergie $h\nu$ au minimum égale à E_g , en cédant cette énergie, il peut faire passer un électron de la (BV) vers la (BC) :

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} \geq E_g \quad (\text{II. 18})$$

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \Rightarrow \lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} \quad (\text{II. 19})$$

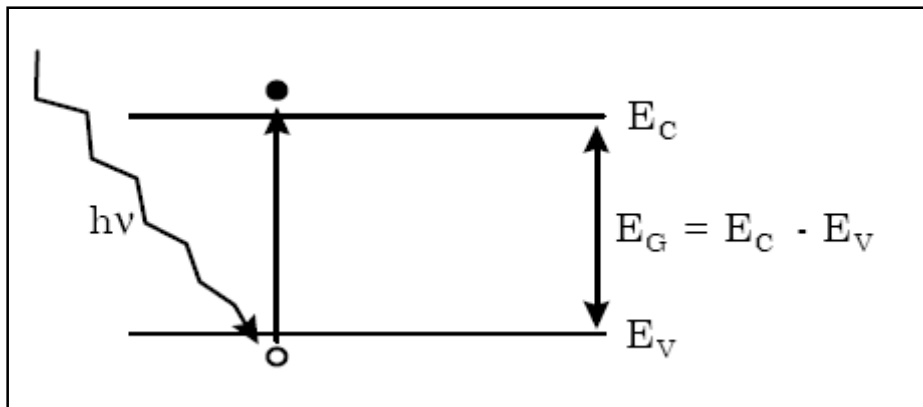


Figure II-4 : Création d'une paire électron-trou.

L'absorption de l'onde incidente sur le semi-conducteur se fait selon la loi de Beer-Lambert :

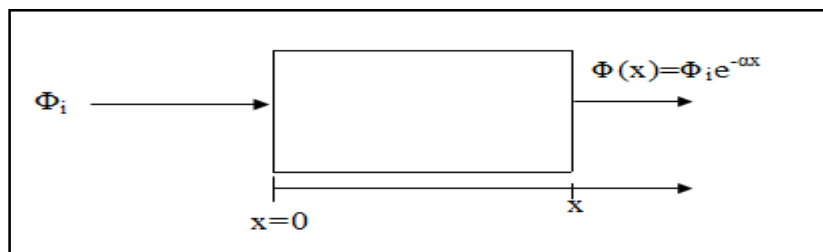


Figure II-5 : La loi de Beer Lambert.

$$\phi(x) = \phi_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{II. 20})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{II. 21})$$

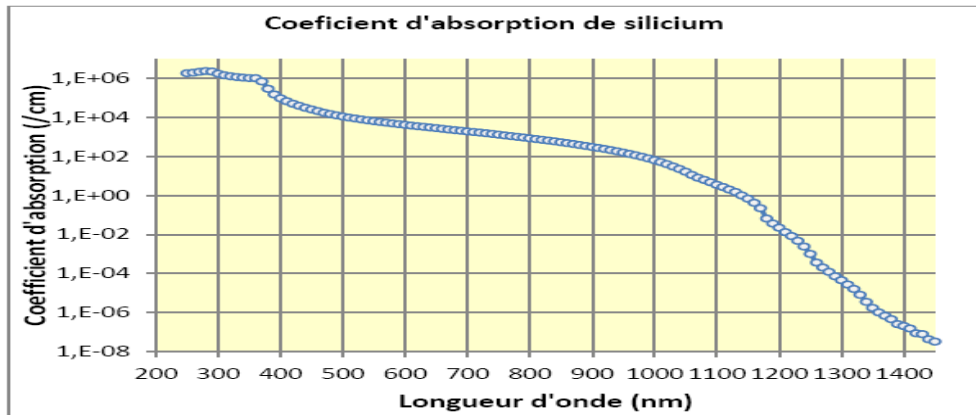


Figure II-6 : Coefficient d'absorption en fonction de λ .

Où :

$\Phi(x)$: Est le flux du photons à la distance x de la surface du matériau,

ϕ_0 : Le flux du photons incident.(en $x=0$),

α : Le coefficient d'absorption (m^{-1}),

k : Le coefficient d'extinction.

II.4 Recombinaisons :

La recombinaison (annihilation) est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires τ_n capable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel une paire électron-trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, permettant de définir les taux de recombinaison R_n pour les électrons, R_p pour les trous par :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n, p}{\tau_{n,p}} \quad (\text{II. 22})$$

Avec : $\Delta n, p$: Densité des porteurs générées.

$\tau_{n,p}$: Durée de vie de ces porteurs.

En général, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison radiative directe (de bande à bande),
- Recombinaison indirecte ou SRH (Schokley-Read-Hall) (de bande aux défauts, avec l'aide de pièges),
- Recombinaison Auger,
- Recombinaison SRH en surface.

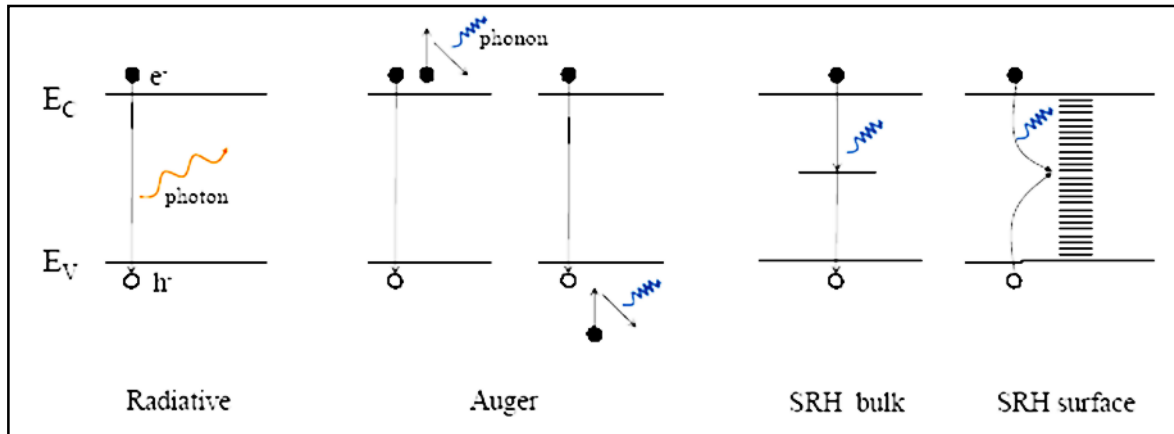


Figure II-7 : Les différents types de recombinaison.

II.4.1 Recombinaison directe (bande à bande) :

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se prépondérant dans les matériaux à gap direct tels que le GaAs. Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire, leur taux de recombinaison est le plus élevé. La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte.

$$R = B(pn - n_i^2) \quad (\text{II. 23})$$

Avec :

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

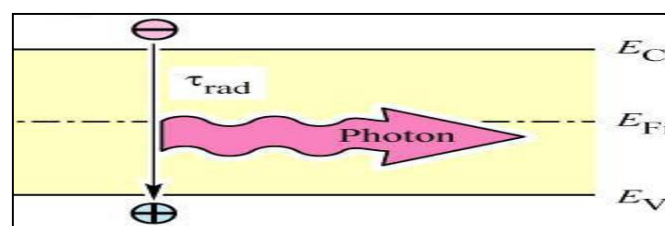


Figure II-8 Schéma descriptif du processus de recombinaison directe.

II.4.2 Recombinaison indirecte (RSH):

C'est une recombinaison assistée par un piège et qui se produit lorsqu'un électron tombe dans un « piège », ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impuretés. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états vides de la bande de valence, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou l'anéantissement de l'électron et du trou, qui se rencontrent dans le piège.

Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Schokley-Read-Hall (SRH) à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation :

$$R_{SRH} = \frac{C_n C_p N_R (np - n_i^2)}{C_n (n + n_i \exp(\frac{-(E_i - E_R)}{k_B T})) + C_p (p + n_i \exp(\frac{(E_i - E_R)}{k_B T}))} \quad (II. 24)$$

Où :

N_R : Est la concentration des centres recombinants d'énergie E_R ,

E_i : Le niveau d'énergie intrinsèque,

C_n , C_p sont les probabilités de capture des électrons et des trous par ces centres recombinants,

n : La concentration des électrons,

p : La concentration des trous,

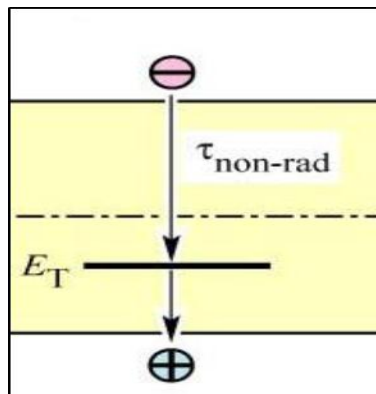


Figure II-9 : Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.

II.4.3 Recombinaison Auger :

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées du matériau. Cette recombinaison nécessite l'intervention de trois particules: au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison bande à bande, mais dont la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison.

Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (\text{II. 25})$$

Où : C_n et C_p sont des coefficients d'Auger.

Leurs valeurs sont respectivement : $C_n=2,2 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$, $C_p=9,9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$ pour le silicium.

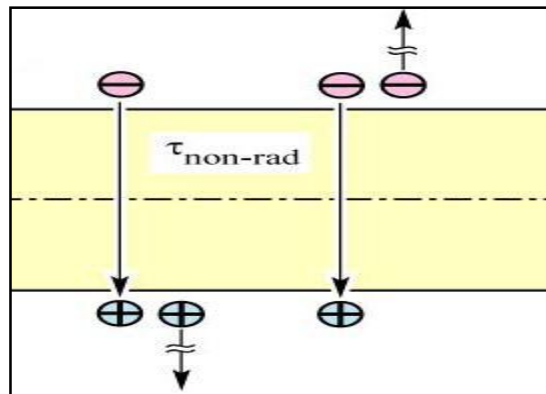


Figure II-10 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

II.4.4 Recombinaison en surface :

les surfaces et les interfaces des matériaux sont plus susceptibles de contenir des impuretés car elles sont exposées pendant le processus de fabrication du dispositif.

La vitesse de recombinaison en surface S avant et arrière des porteurs minoritaires, inhérentes aux densités de dopages, est donnée selon la relation suivante pour un semi-conducteur de type N:

$$D_p \frac{\delta \Delta p}{\delta x} (x = 0) = S \Delta p \quad (\text{II. 26})$$

D_p est le coefficient de diffusion des trous.

Δp est la variation de la concentration des trous par rapport à l'équilibre.

II.5 Courants dans un semi-conducteur :

Le mouvement des électrons et trous dans un semi-conducteur, nous donne un courant. Ce déplacement est régi par des forces différentes, l'origine de ces forces étant soit un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion).

- ❖ Le courant de conduction est le courant que l'on rencontre dans les conducteurs en présence d'un champ électrique E , ce courant est donné par la loi d'ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II. 27})$$

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

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q (n \mu_n + p \mu_p) \quad (\text{II. 28})$$

μ_n et μ_p sont respectivement les mobilités électriques des électrons et des trous.

Exemple :

	Si	Ge	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
μ_n	1 350	3 600	300	8 000	5 000	4 500	30 000	80 000
μ_p	480	1 800	150	300	1 000	100	450	450

Tableau II-2 : La mobilité des électrons et des trous en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ de quelques semi-conducteurs.

$$\begin{cases} \vec{J}_{Cn} = qn\mu_n\vec{E} \\ \vec{J}_{Cp} = qp\mu_p\vec{E} \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

Alors le courant total de conduction est :

$$\vec{J}_C = \vec{J}_{Cn} + \vec{J}_{Cp} = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} \quad (\text{II. 30})$$

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

Selon la loi de Fick, on a :

$$\begin{cases} \vec{J}_{Dn} = qD_n \overrightarrow{\text{grad}} n \\ \vec{J}_{Dp} = -qD_p \overrightarrow{\text{grad}} p \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

Où : D_n, D_p sont coefficients de diffusion respectivement des électrons. et des trous.

Ainsi, le courant total de diffusion s'écrit :

$$\vec{J}_D = q(D_n \overrightarrow{\text{grad}} n - D_p \overrightarrow{\text{grad}} p) \quad (\text{II. 32})$$

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

$$\begin{cases} \vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \overrightarrow{\text{grad}} n \\ \vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \overrightarrow{\text{grad}} p \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

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

Avec la linéarisation (à une dimension) des deux dernières équations :

$$\begin{cases} \vec{J}_n(x) = qn(x)\mu_n \vec{E}(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \vec{i} \\ \vec{J}_p(x) = qp(x)\mu_p \vec{E}(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \vec{i} \end{cases} \quad (\text{II. 34})$$

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 :

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_B T}{q} = V_t \quad (\text{II. 35})$$

Le champ \vec{E} est le résultat de l'application d'un gradient sur un potentiel donné V.

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II. 36})$$

Suivant x, on a :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II. 37})$$

L'équation de continuité est une équation locale valable en tout point du semi-conducteur et à tout instant, elle s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

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

R_n, R_p : les taux de recombinaison respectifs des électrons et des trous.

Pour connaître les propriétés d'un semi-conducteur, on doit résoudre les deux équations de courant et de continuité.

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

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} = \frac{q(p - n + N_d - N_a)}{\varepsilon} \quad (\text{II. 39})$$

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:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad (\text{II. 40})$$

Alors en utilisant toutes ces relations, on peut étudier les caractéristiques des courants dans un semi-conducteur et déterminer les propriétés de sa conductivité électrique.

II.6 Jonction PN :

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteur. Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N juxtaposées d'une façon que, pour simplifier l'étude, nous supposons abrupte c-à-d la transition de P vers N se fait brusquement.

Lorsqu'on assemble les deux régions, la différence en concentration entre les porteurs des régions N et P va provoquer la circulation d'un courant de diffusion, tendant à égaliser la concentration d'une région à l'autre, les trous dans P vont diffuser vers N laissant derrière eux

des atomes ionisés qui constituent des charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de N qui vont diffuser vers P laissant derrière eux des charges positives.

Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives, qu'on appelle zone de charge d'espace « ZCE ». Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion ultérieure des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse.

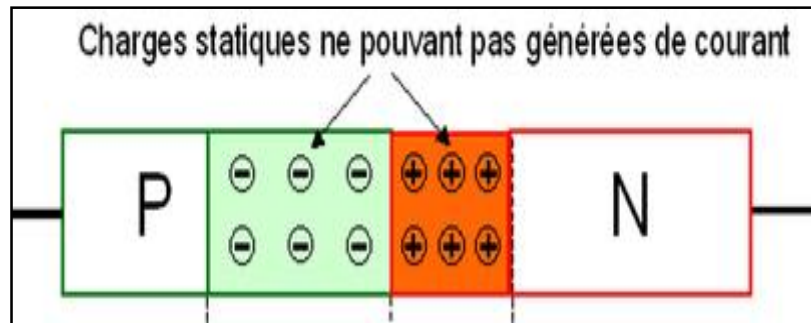


Figure II-11 :La jonction PN.

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

$$\begin{cases} \rho(x) = 0 & \text{pour } x > x_n \text{ et } x < x_p \\ \rho(x) = -qN_a & \text{pour } x_p < x < 0 \text{ (II.41)} \\ \rho(x) = qN_d & \text{pour } 0 < x < x_n \end{cases}$$

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

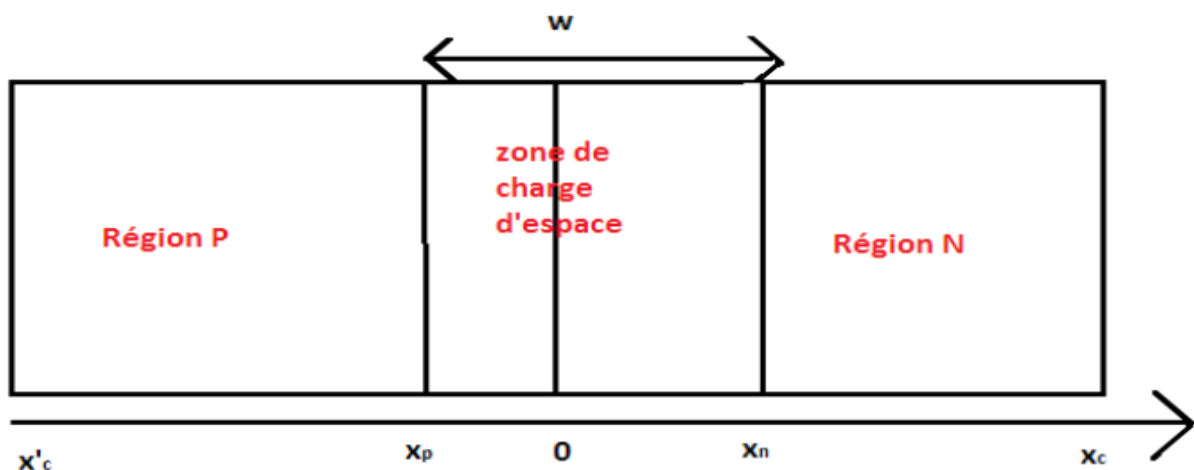


Figure II-12 : Paramètres géométriques de la jonction PN.

Le champ électrique qui traverse la jonction PN est obtenu en faisant l'intégrale de l'équation de Poisson avec la densité de charges donnée :

Sachant que la densité de charge d'espace est donnée par l'équation suivante :

$$\rho(x) = q(p(x) - n(x) + N_d^+ - N_a^-) \quad (\text{II. 42})$$

Si tous les atomes d'impuretés sont ionisés, alors : $N_d^+ = N_d$ et $N_a^- = N_a$.

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{II. 43})$$

$$\text{Pour : } x_p \leq x \leq 0 \rightarrow E = -\frac{qN_a}{\epsilon}(x - x_p) \rightarrow V = +\frac{qN_a}{2\epsilon}(x - x_p)^2 + V_p \quad (\text{II. 44})$$

$$\text{Et pour : } 0 \leq x \leq x_n \rightarrow E = +\frac{qN_d}{\epsilon}(x - x_n) \rightarrow V = -\frac{qN_d}{2\epsilon}(x - x_n)^2 + V_n \quad (\text{II. 45})$$

$$\text{Avec : } V_d = V_n - V_p = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (\text{II-46}) \quad \text{et,}$$

La largeur de zone de charge d'espace est donnée par :

$$w = x_n + x_p \quad (\text{II. 47})$$

D'autre part en prenant en considération les équations (II-44) et (II-45), on tire une autre expression de la tension de diffusion :

$$V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\epsilon}(N_d w_n^2 + N_a w_p^2) \quad (\text{II. 48})$$

$$\text{Où : } w_n = +x_n \text{ et } w_p = +x_p$$

Qui sont liées par la relation extraite de la conservation de la densité de charge :

$$x_n N_d = x_p N_a \quad (\text{II-49})$$

D'où l'on tire les expressions suivantes :

$$\begin{cases} x_n = \left(\frac{2\epsilon V_d}{qN_d}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}}\right]^{\frac{1}{2}} \\ x_p = \left(\frac{2\epsilon V_d}{qN_a}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_a}{N_d}}\right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (\text{II. 50})$$

II.6.1 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,
- Et la polarisation inverse.

II.6.1.1 La polarisation directe :

En polarisation directe $V > 0$ (où la zone P est polarisée positivement). La barrière de potentiel constituée par la zone de déplétion va être diminuée en devenant $q(V_d - V)$, et l'épaisseur de la zone de charge espace va être réduite, ce qui facilite la diffusion des porteurs de charge (électrons et trous) dans les deux sens. Dans ce cas, le courant est un courant des porteurs majoritaires

II.6.1.2 La polarisation inverse :

En polarisation inverse $V < 0$ (où la zone P est polarisée négativement). La barrière de potentiel constituée par la zone de charge espace va être augmentée, elle devient $q(V + V_d)$ ainsi que la longueur de la zone de déplétion, ce qui augmente aussi la résistance de la jonction. Par conséquent, la diffusion des porteurs de charge majoritaires devient difficile. Dans ce cas-là, le courant est un courant des porteurs minoritaires.

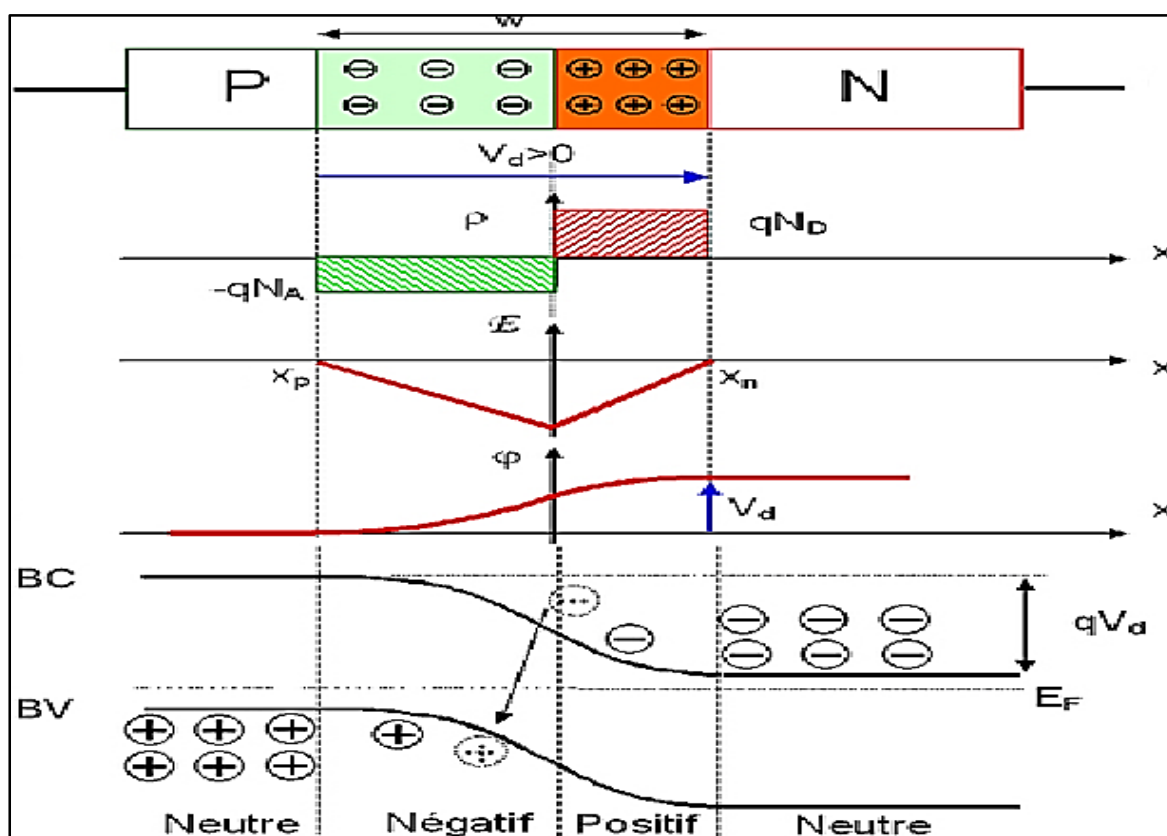


Figure II-13 : La polarisation dans la jonction PN.

En régime de faible injection où le dopage ne change de façon significative que la densité des porteurs minoritaires, les équations de continuité, citées précédemment, des électrons dans la région P et des trous dans la région N, deviennent :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} - \frac{n - n_p}{\tau_n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} - \frac{p - p_n}{\tau_p} \end{cases} \quad (\text{II. 51})$$

Quand on prend en considération que le courant de diffusion des électrons dans la zone P et des trous dans la zone N (comme c'est le cas dans les zones neutres où E est nul), ces relations deviennent :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n - n_p}{\tau_n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_n}{\tau_p} \end{cases} \quad (\text{II. 52})$$

Si la polarisation de la jonction est constante, le régime est stationnaire de sorte que : $\frac{\partial n, p}{\partial t} = 0$

Alors on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_n^2} = 0 \\ \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta n = n - n_p \\ \Delta p = p - p_n \end{cases} \rightarrow \begin{cases} L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \\ L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} J_n = q D_n \frac{dn}{dx} \\ J_p = q D_p \frac{dp}{dx} \end{cases} \quad (\text{II. 53})$$

Où :

L_n, L_p : sont respectivement les longueurs de diffusion des électrons et des trous.

Sachant que :

$$J = J_n + J_p \quad (\text{II. 54})$$

Sachant que la solution de l'équation différence du second degré est de la forme :

$$\begin{cases} n - n_p = A \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) + B \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) \\ p - p_n = C \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) + D \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 55})$$

Les constantes A, B, C et D sont déterminées par les conditions aux limites imposées à la jonction PN.

La distribution respective des électrons et des trous dans les deux régions P et N est donnée par :

$$\begin{cases} n - n_p = \frac{n_p}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) \sinh\left(\frac{x - x'_c}{L_n}\right) \\ p - p_n = \frac{p_n}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) \sinh\left(\frac{x_c - x}{L_p}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 56})$$

$$\text{Où : } d_n = x_c - x_n \text{ et } d_p = x_p - x'_c \quad (\text{II-57})$$

d_n, d_p représentent les épaisseurs des régions neutres de type N et de type P respectivement.

Les densités de courant d'électrons et de trous que nous avons calculées sont relatives à des régions différentes de la jonction. Le courant total traversant la jonction est la somme des courants d'électrons et de trous en un même point. Pour calculer ce courant, supposons, dans un premier temps, que la zone de charge d'espace n'est le siège d'aucun mécanisme de génération-recombinaison. Les courants J_n, J_p sont alors constants à la traversée de cette zone et on peut écrire les égalités :

$$\begin{cases} J_n(x_p) = J_n(x_n) \\ J_p(x_n) = J_p(x_p) \end{cases} \quad (\text{II. 58})$$

En supposant que le courant de conduction est constant, on a :

$$J = J_n(x_p) + J_p(x_p) = J_n(x_n) + J_p(x_n) = J_n(x_p) + J_p(x_n) \quad (\text{II. 59})$$

En posant $x = x_n$ dans l'expression de $J_p(x)$, et $x = x_p$ dans l'expression de $J_n(x)$, on obtient l'expression finale :

$$J = J_S \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (\text{II. 60})$$

Où J_S représente le courant de saturation de la diode et est donnée par la relation :

$$J_S = \frac{qn_i^2 D_p}{N_d L_p \text{th}\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} + \frac{qn_i^2 D_n}{N_a L_n \text{th}\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} \quad (\text{II. 61})$$

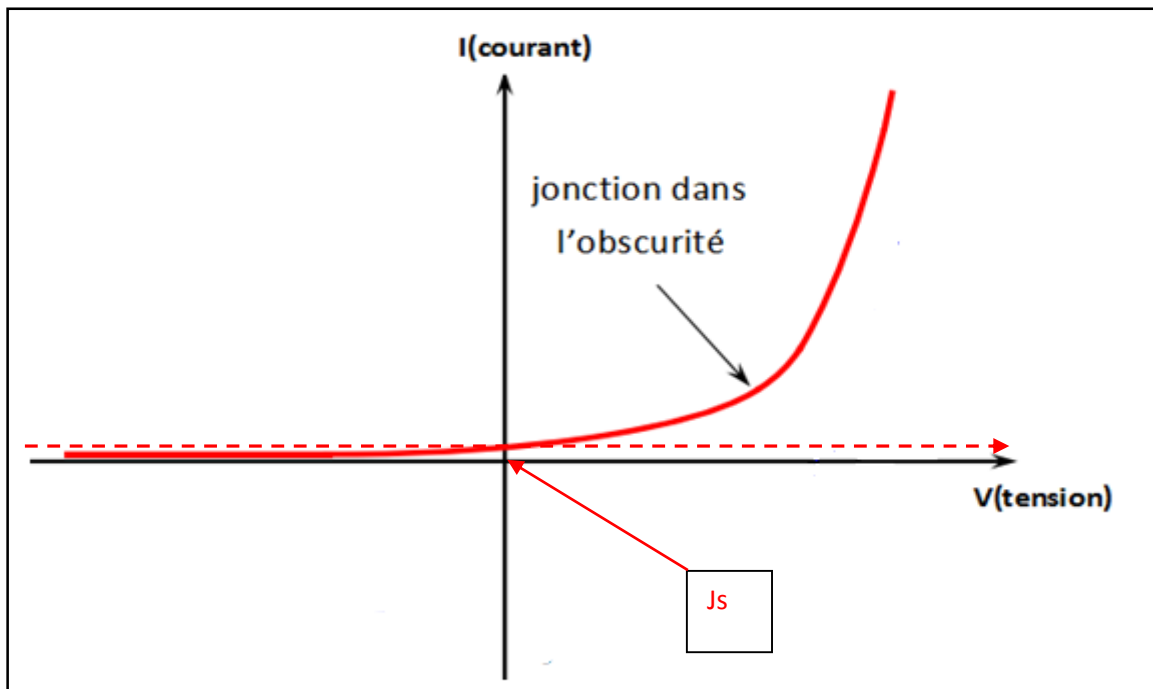


Figure II-14 : Caractéristique courant-tension d'une jonction PN polarisée sous obscurité.

Par la connaissance de ces relations, on peut mieux comprendre le fonctionnement de la cellule solaire en se basant sur les lois physiques des matériaux semi-conducteurs.

Chapitre III
Notions sur les cellules solaires

III-Notions sur les cellules solaires

III.1 Historique de l'effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « voltaïque » qui signifie électricité, désignent donc la production d'électricité à partir de la lumière.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel et son fils Alexandre Becquerel en 1839. Tandis que l'effet photoélectrique (L'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière) fût découvert quant à lui en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz mais c'est Albert Einstein qui a réussi le premier à l'expliquer intégralement, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1921.

En 1954, trois chercheurs américains (Charpin, Pearson et Price) des laboratoires Bell mirent au point la première cellule photovoltaïque en silicium avec un rendement de 4 %. Les cellules photovoltaïques virent leur première application pour fournir de l'énergie électrique au satellite Vanguard en 1958. Une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fût construite par l'université de Delaware en 1973 aux Etats-Unis.

À partir de 1975, les pompages solaires se sont développés, en particulier dans le Sahel en Afrique. À partir de 1980, des maisons photovoltaïques et des électrifications rurales ont été réalisées, en Polynésie, au Kenya, en Inde, en République Dominicaine, etc. À partir de 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et ne cessent de se généraliser jusqu'à nos jours.

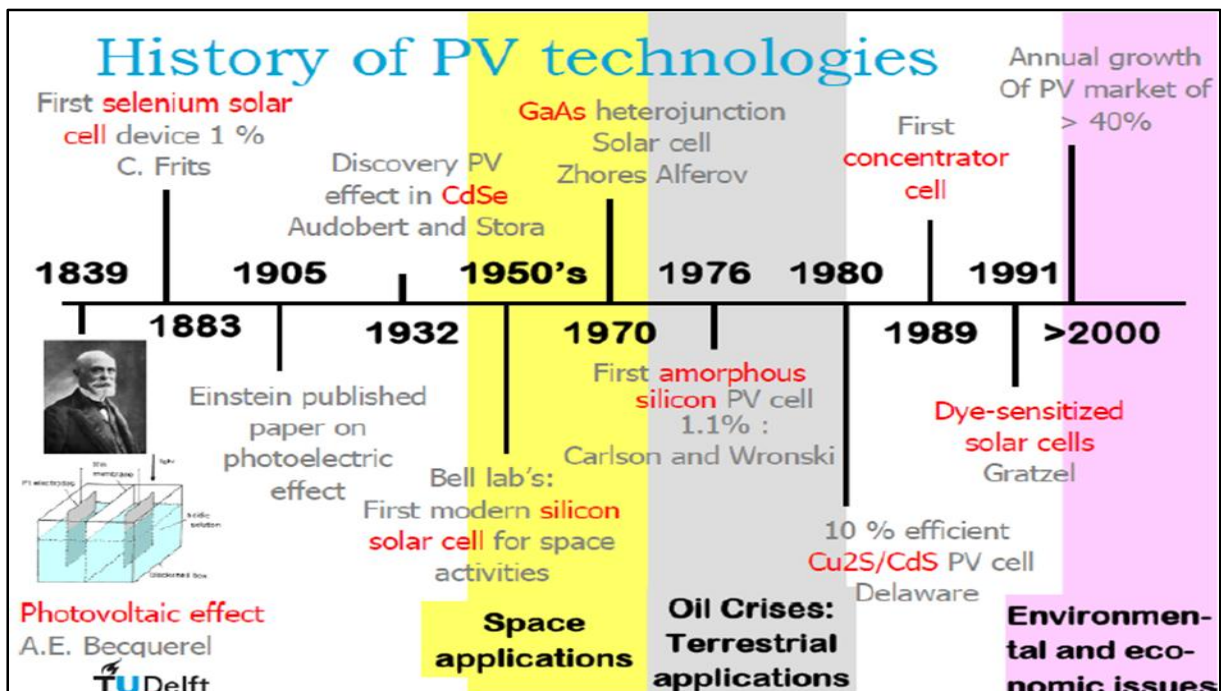


Figure III-1 : Une brève Chronologie du développement de la technologie du photovoltaïque.

III.2 Cellule solaire :

III.2.1 Définition :

Une cellule solaire est un composant électronique basée sur la jonction PN et qui est exposée à la lumière (photons), il fait convertir cette lumière en l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène.

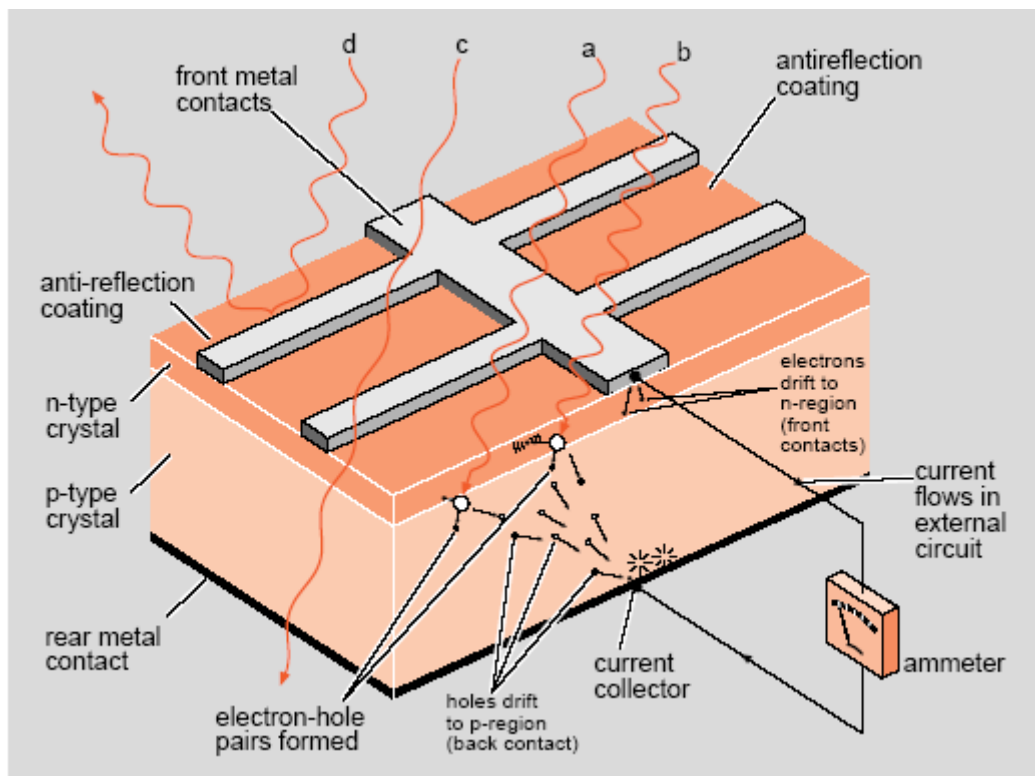


Figure III-2 : Phénomènes de création du courant dans une cellule solaire

III.2.2 Principe de fonctionnement :

La cellule fonctionne en se basant sur trois étapes essentielles :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- La collecte des charges.

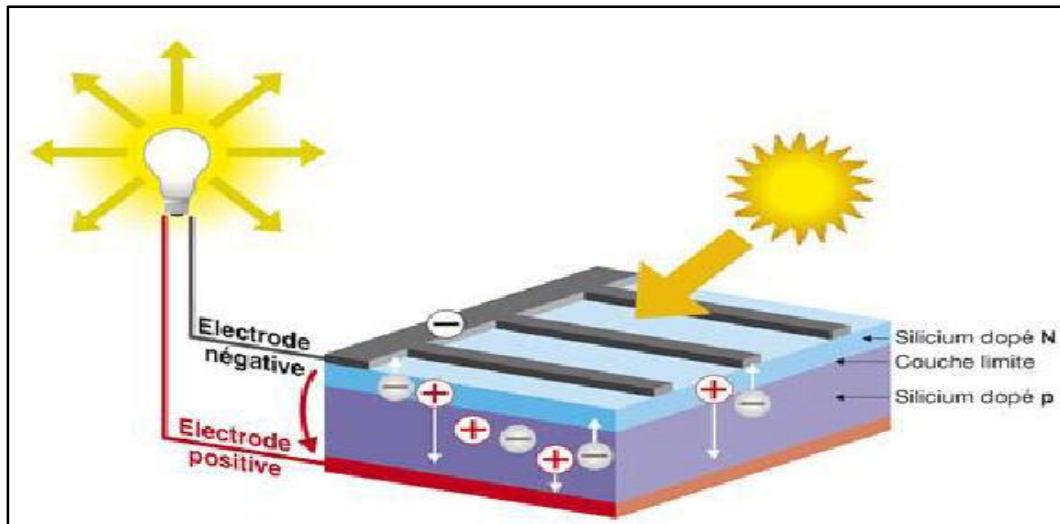


Figure III-3 : Schéma de principe de la conversion photovoltaïque.

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

III.3 Choix du matériau :

Le matériau à choisir doit être capable d'absorber le maximum d'énergie solaire (la partie la plus intense du spectre solaire) afin de libérer des électrons qui deviennent alors des porteurs de charge électrique mobiles dans la bande de conduction en laissant derrière eux des vacances ; des trous ; qui à leur tour, peuvent se déplacer dans le matériau dans la bande de valence. Le matériau qui vient le premier à l'esprit est le matériau semi-conducteur car il a une bande interdite convenable au spectre solaire (1 à 1,5 eV).

III.4 Silicium :

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence. Bien que le silicium n'est pas le matériel idéal 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 III-V,
- Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques,
- Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

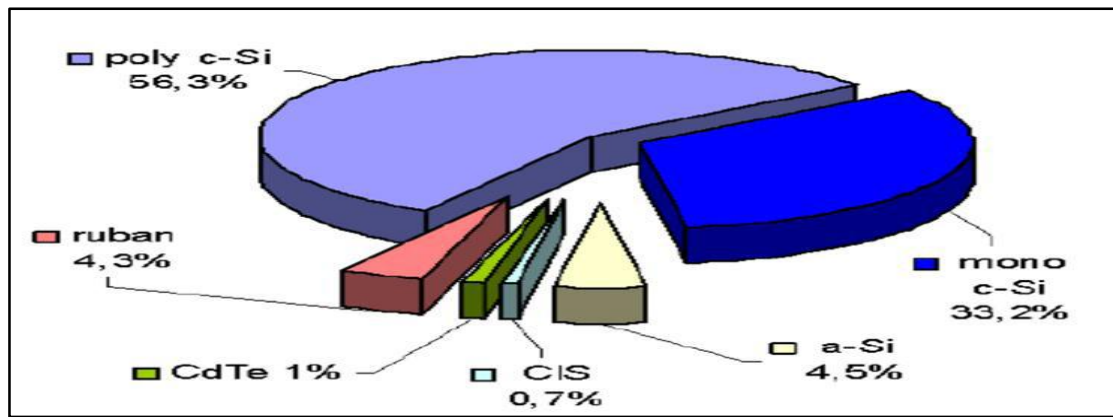


Figure III-4 : La part du marché mondial des matériaux photovoltaïques en 2003.

III.5 La fabrication de cellules solaires :

III.5.1 Extraction et purification de silicium :

La silice (SiO_2) est la matière source du silicium, il faut donc certaines méthodes pour extraire le silicium. Ces méthodes nécessitent une grande température et une grande puissance. En faisant plusieurs fois une purification chimique, on peut avoir du silicium pur. Pour ce but, de nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux du silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés de moindre qualité métallurgique à 99,99 %, soit 1 atome d'impureté pour 100 atomes de silicium.

III.5.2 Obtention des lingots de silicium :

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium poly-cristallin (composé de plusieurs cristaux). La seconde permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

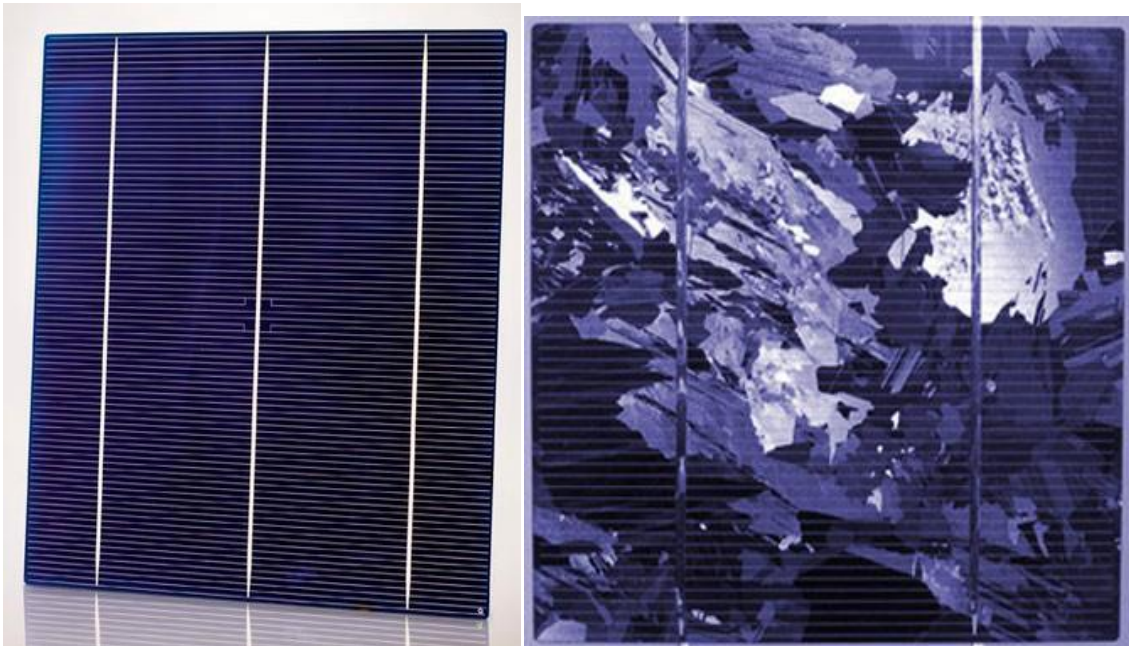


Figure III-5 : Cellule solaire de silicium monocristallin (à g.) et polycristallin (à d.).

III.5.3 Obtention des wafers photovoltaïques :

Les lingots de silicium obtenus par la solidification sont ensuite sciés en fines plaques d'environ 300 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée à l'aide d'une scie.

Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découper (300 μm), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fils. En effet, la perte de découpe (kerf) typique des scies à fil est de 200 μm à 240 μm , ce qui représente plus de 50% de perte.

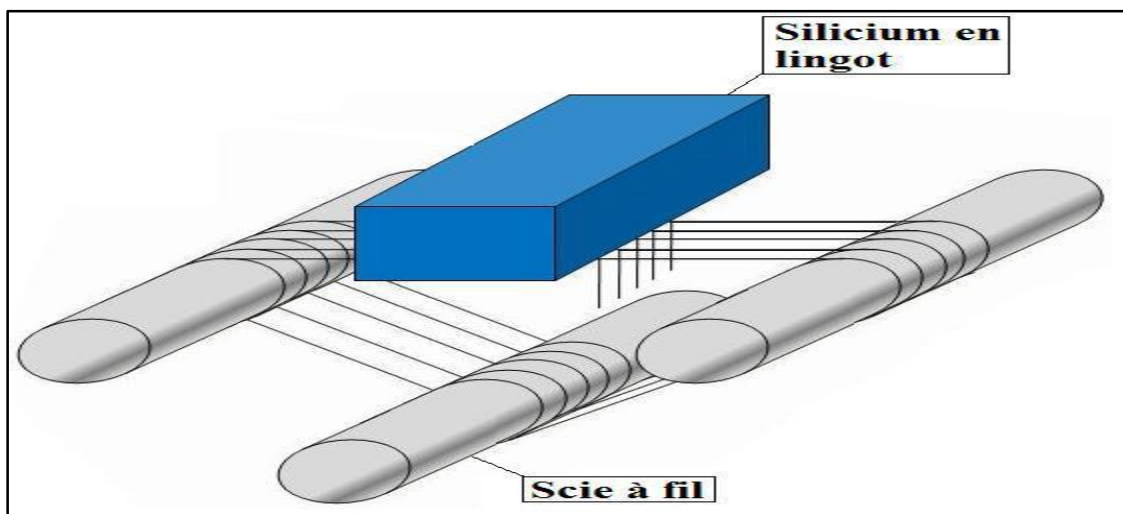


Figure III-6 : Une scie à fils.

III.5.4 Dopage du silicium :

Après nettoyage par une solution chimique, les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Le dopage, comme par exemple par la diffusion thermique, est une méthode permettant de réaliser la jonction PN qui est la base de fonctionnement de la cellule solaire.

III.5.5 Traitements de surface :

III.5.5.1 Texturisation :

La texturation de la surface en petites pyramides ou entonnoirs permet d'améliorer la collecte des photons dans toutes les directions en réduisant la réflexion. On parle aussi de confinement optique. La gravure sélective est par un bain alcalin de potasse KOH (pour le silicium monocristallin) ou de soude NaOH (pour le silicium polycristallin). Elle se fait suivant plusieurs géométries (pyramides inversées, pyramides directes,...)

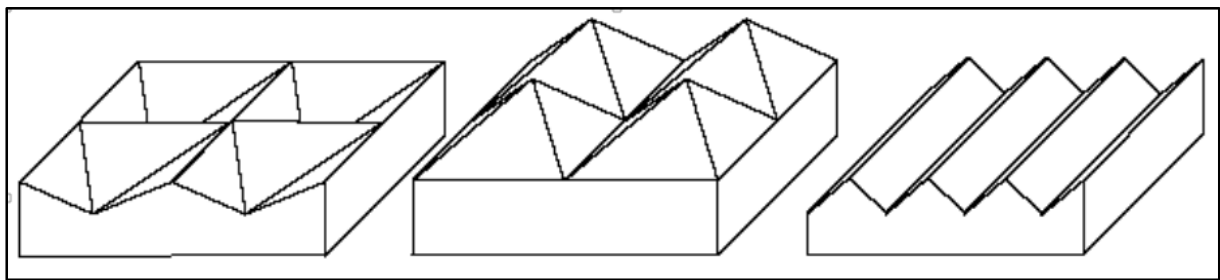


Figure III-7 : Exemples de différentes texturations géométriques.

III.5.5.2 Couche antireflet :

Une couche antireflet à base d'oxydes ou de nitrure de silicium ou d'oxydes métalliques est déposée en face avant du front. Elle sert aussi à passiver la surface en limitant les recombinaisons entre charges afin de conserver la conductivité du matériau. Le dépôt chimique est réalisé en phase gazeuse via un plasma d'une couche de Si_3N_4 à partir du silane SiH_4 et d'ammoniac NH_3 .

III.5.5.3 Passivation :

La surface de la cellule est une source de recombinaisons importantes à cause de la présence des défauts cristallins. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume du substrat, en neutralisant les sites actifs nocifs du matériau. Des matériaux tels que le SiN, le SiO_2 et le SiN_xO_y permettent de passiver une grande partie de ces défauts puisqu'ils

combinent deux effets de passivation (passivation par neutralisation et passivation par un champ).

III.5.5.4 Bords de plaque :

La couche N est retirée, si la diffusion est au phosphore, des bords de la plaque (sur la tranche) pour séparer, l'émetteur N de la face arrière. La gravure se fait soit par laser ou par plasma qui s'effectue par un mélange gazeux tétrafluoro-méthane (CF_4) et oxygène (O_2) soumis à un champ de radiofréquences.

III.5.5.5 Champ face arrière (Back Surface Field : BSF) :

La base dopé P est fortement dopée à l'arrière P^+ par diffusion partielle de l'aluminium de la métallisation arrière. Cette couche joue aussi un rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière. La diffusion thermique de l'aluminium (Al) s'effectue à $850^\circ C$ à partir d'une pâte d'aluminium déposée sur toute la face arrière.

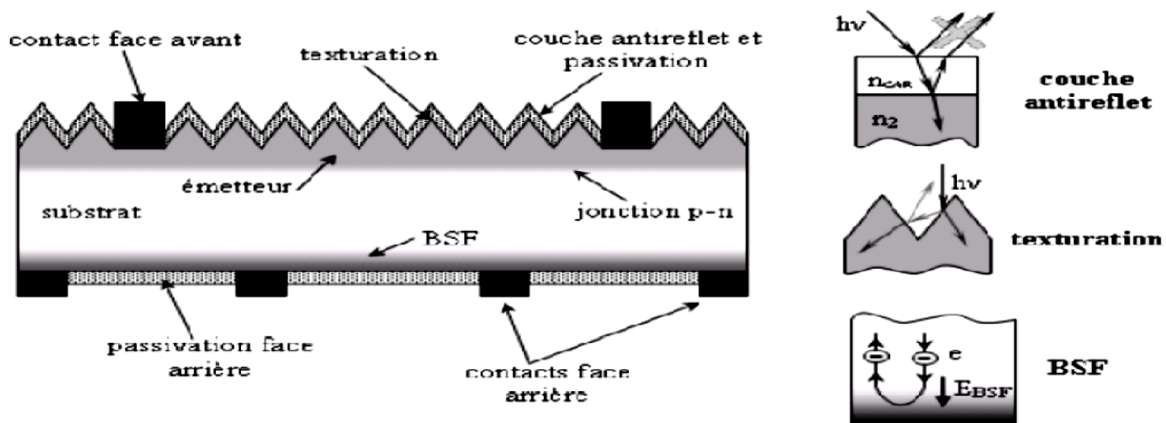


Figure III-8 : Structure de la cellule solaire

Le tableau ci-dessous englobe les étapes de la réalisation des cellules solaires et l'objectif de chaque procédé technologique :

Etape	Technique d'élaboration	Rôle
Texturisation	Gravure chimique dans un bain acide (Si multicristallin) ou basique (Si monocristallin)	Diminution de la réflectivité
Formation de la jonction PN	Diffusion au phosphore à partir de POCl_3 (~ 30 min à 850 °C)	Création d'un émetteur N^+ de résistance de couche : $50 \Omega/\square < R_{sh} < 60 \Omega/\square$
Ouverture de la jonction	Gravure plasma latérale, gravure chimique ou découpe laser	Elimination des courts circuits entre l'émetteur N^+ et la base P
Dépôt de la Couche AntiReflét	Dépôt PECVD de SiN ou $\text{SiN}_x\text{:H}$	Diminution de la réflectivité et amélioration de la passivation en surface et en volume
Métallisation	Face avant : sérigraphie d'une grille Ag	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 antireflét et formation du contact sur l'émetteur
		Face arrière : contact et formation d'une couche P^+ (BSF)

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

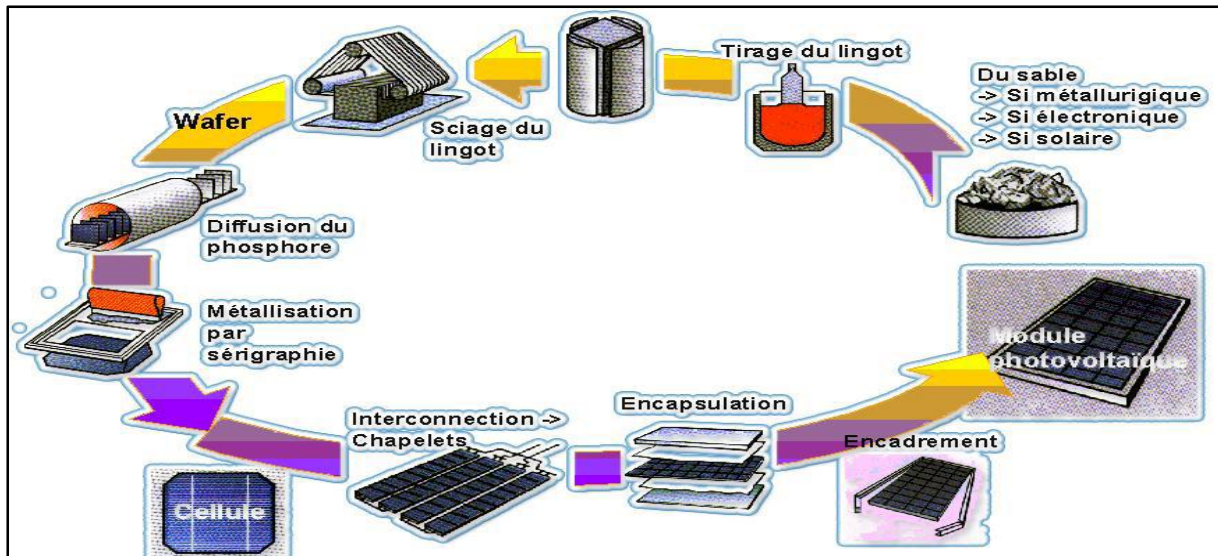


Figure III-9 : Étapes globales de fabrication d'un module photovoltaïque depuis le sable.

III.6. Les caractéristiques d'une cellule solaire :

III.6.1 La caractéristique électrique d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant-tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

$$I = I_{ph} - I_{obsc} \quad (III. 1)$$

$$I = I_{ph} - I_S \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (III. 2)$$

I_{ph} est le courant photogénéré lorsque la cellule est exposée au soleil,

I_{obsc} est le courant de la cellule lorsqu'elle est polarisée sous obscurité,

I est le courant de la cellule lorsque la cellule est polarisée sous éclaircissement.

Avec :
$$I_S = J_S \cdot S \quad (III-3)$$

J_S : La densité de courant de saturation de la cellule,

S : La surface de la cellule.

La caractéristique électrique d'une cellule sous obscurité et sous éclaircissement est représentée sur la figure ci-dessous :

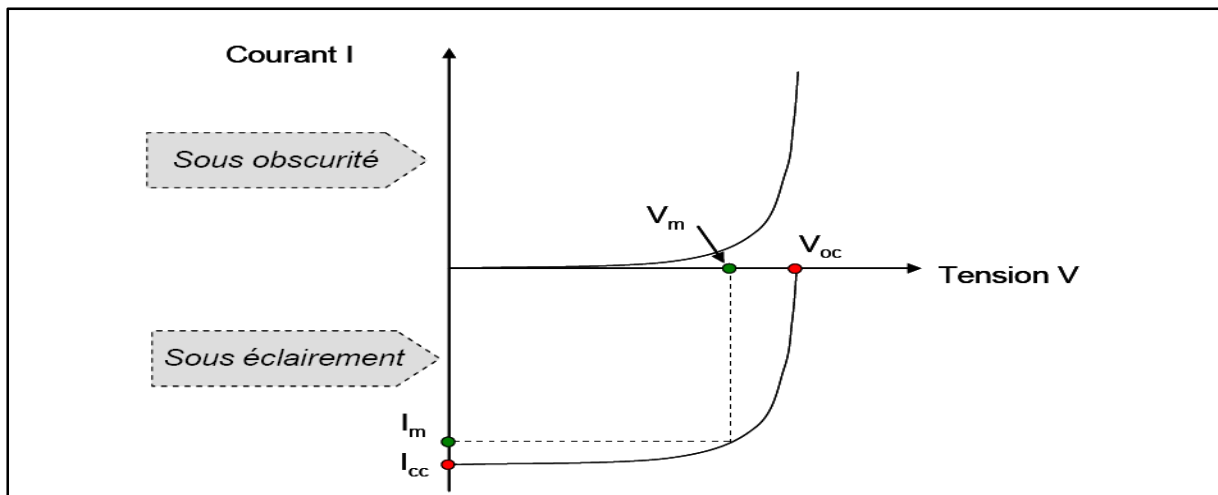


Figure III-10 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclaircissement.

III.6.2 La tension de circuit ouvert V_{CO} (pour $I=0$) :

Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.*

En posant $I=0$ dans l'équation (III-2), on obtient :

$$V_{CO} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{III} - 4)$$

III.6.3 Le courant de court-circuit I_{CC} (pour $V=0$) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V=0$). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir dans une cellule solaire.

En posant $V=0$ dans l'équation (III-2), on obtient :

$$I_{CC} = -I_{ph} \quad (\text{III. 5})$$

III.6.4 La puissance d'une cellule :

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

$$P = V I \quad (\text{III. 6})$$

III.6.5 La puissance maximale :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum P_{\max} idéale correspond donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} .

$$P_{\text{idéale}} = V_{CO}I_{CC} \quad \text{et} \quad P_{\max} = V_m I_m \quad (\text{III. 7})$$

Avec :

I_m : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

V_m : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

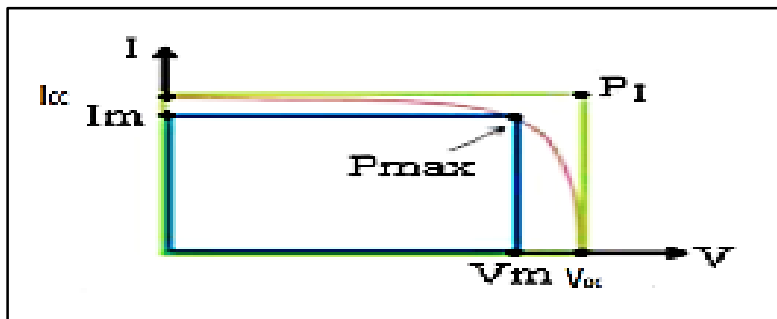


Figure III-11 : Les puissances maximale et idéale d'une cellule solaire.

III.6.6 Le facteur de forme (FF) :

Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi son vieillissement.

Le facteur de forme est défini par le rapport en les puissances maximale et idéale :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{CO}I_{CC}} = \frac{V_m I_m}{V_{CO}I_{CC}} \quad (\text{III. 8})$$

III.6.7 Le rendement η :

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} .

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{FFV_{CO}I_{CC}}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{III. 9})$$

$P_{\text{inc}}=1000 \text{ W/m}^2$ dans les conditions du spectre de référence AM1,5.

Le rendement dépend essentiellement des caractéristiques intrinsèques du semi-conducteur de base de la cellule solaire.

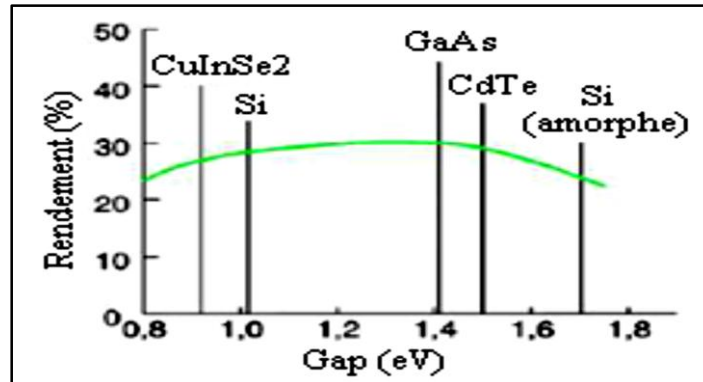


Figure III-12 : Rendements énergétiques théoriques maximum en fonction de la bande interdite (E_g).

III.6.8 La réponse spectrale :

Elle est aussi appelée le rendement quantique interne (RQI) ou de collecte interne, elle est donnée par le rapport entre la densité du courant photogénéré $J_{ph}(\lambda)$ et l'équivalent du courant photonique absorbé:

$$R_{si}(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\phi_0(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \quad (III. 10)$$

Avec $\phi_0(\lambda)$, le flux de photons incident à la longueur d'onde λ ,

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion à la longueur d'onde λ ,

Et q , la charge électronique.

Usuellement, la RQI est communément appelée réponse spectrale tout court.

Si on ne prend pas compte la réflexion, on parle du rendement quantique externe (RQE). Il est donné par le rapport entre la densité du courant photogénéré $J_{ph}(\lambda)$ et l'équivalent du courant photonique incident, soit :

$$R_{se}(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\phi_0(\lambda)} \quad (III. 11)$$

On considère de manière générale que photons de courtes longueurs d'ondes (Ultra-Violet) sont absorbés majoritairement dans les premiers μm de la cellule, alors que ceux des grandes longueurs d'ondes (Infra-Rouge) peuvent l'être au niveau de la base. L'étude du RQI aux

courtes longueurs d'ondes donne donc des indications sur la qualité de la face avant, tandis que celles des grandes longueurs d'ondes concerne plus la base de la cellule.

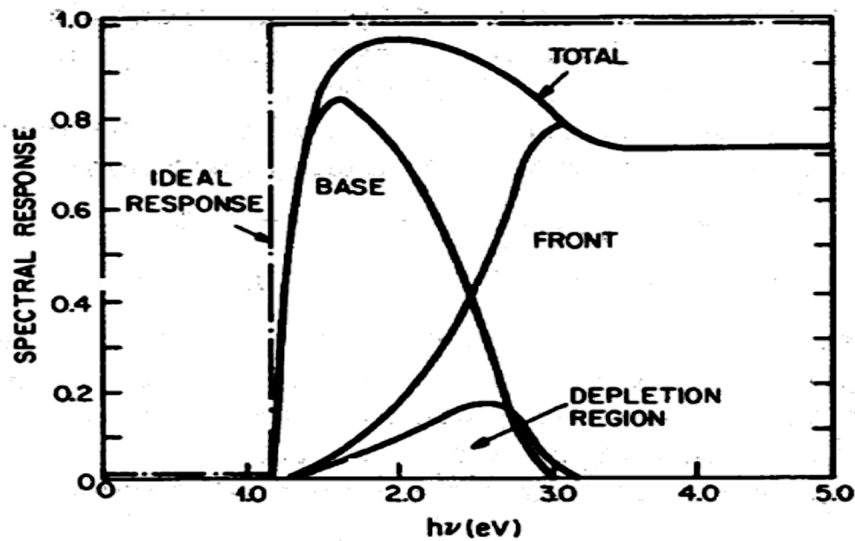


Figure III-13 : Exemple de courbes de réponse spectrale interne.

III.7 Influence des résistances série et parallèle (shunt) :

La résistance série R_s caractérise les pertes par effet Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteurs avec l'électrode à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie, ce qui va limiter le rendement de conversion.

Tandis que la résistance parallèle R_p (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau : épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomènes physiques assimilables aussi à une résistance parallèle R_p . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si : $R_p = 10^2$ à $10^4 \Omega$.

On montre sur la figure III-14 que lorsqu'on prend en considération les Résistances Série et Parallèle, les caractéristiques $I(V)$ varient selon l'expression suivante du modèle électrique à une diode de la cellule solaire de la figure ci-dessous.

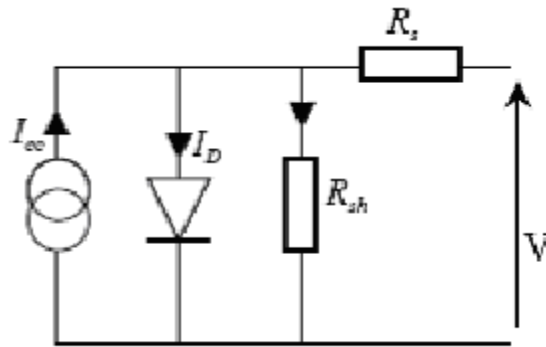


Figure III-14 Schéma équivalent du modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque.

Où I varie en fonction de v suivant l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp \left(\frac{q(V + R_S I)}{nk_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P}$$

Avec n , le facteur d'idéalité de la diode équivalente.

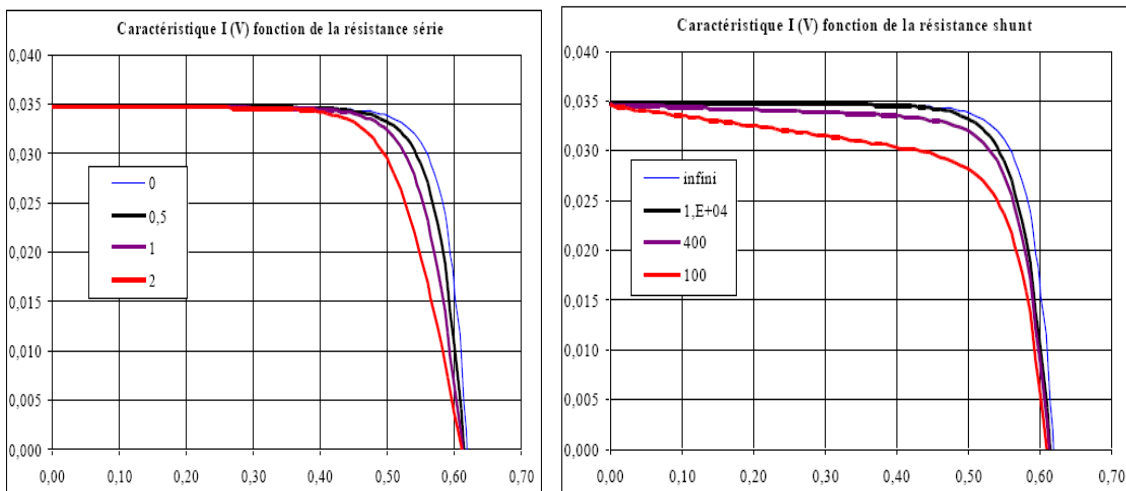


Figure III-15 : Effets résistifs (R_p et R_s en $\Omega \cdot \text{cm}^2$) sur les caractéristiques $I(V)$.

R_s agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension mais elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert. Tandis que R_p doit être grande car elle influence nuisiblement sur la tension de circuit ouvert.

III.8 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 les 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,

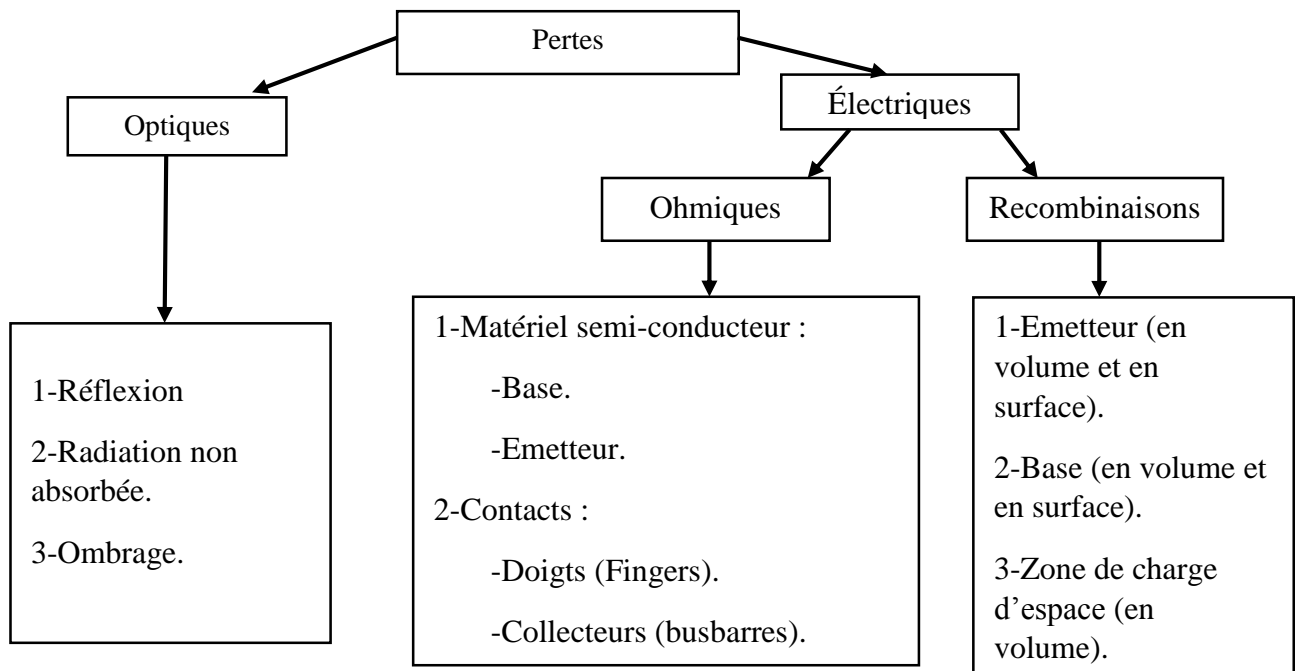


Figure III-16 : Organigramme des pertes limitant le rendement de la conversion photovoltaïque.

III.9 Type de cellules :

- **Les cellules monocristallines :**

- La première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent (15-21%) (23% en Laboratoire).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

- **Les cellules polycristallines : (qui dominent le marché mondial)**

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement 11-13% (18% en Labo).

- **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple) :**

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- Durée de vie plus faible.

Chapitre IV

Résultats et discussions des pertes résistives et d'ombrage

IV-Résultats et discussions des pertes résistives et d'ombrage

L'une des raisons majeures qui limitent le rendement d'une cellule solaire ce sont les différents types pertes résistives qui existent dans la cellule.

L'étude de ces pertes résistives et ses différents paramètres nous permet de connaître l'influence de ces derniers sur la cellule, d'avoir une idée sur son comportement, éprouver des méthodes d'amélioration du rendement.

La conversion de la puissance lumineuse éclairant une cellule photovoltaïque en énergie électrique n'est pas totale. Un certain nombre de facteurs, physiques, technologiques, optique et les pertes résistives sont susceptibles de limiter le rendement des cellules.

IV.1 Pertes résistives dues à la métallisation :

Les contacts métalliques supérieurs sont nécessaires pour collecter le courant généré par la cellule. Le busbarre est relié directement aux fils externes, alors que les "doigts" sont des secteurs plus fins de métallisation qui collectent le courant pour le délivrer au busbarre. Le point principal dans la conception des contacts avant est l'équilibre entre les pertes résistives liées à une grille largement espacée et la réflexion du rayonnement solaire provoquée par une grande partie de la surface avant de la cellule solaire couverte par le métal (effet de l'ombrage).

L'objectif de notre thème est l'étude de ces pertes qui sont divisées en deux types :

- optiques (ombrage de la surface du front dû à la grille métallique)
- et électriques.

La grille a une forme de peigne avec deux busbarres et des lignes (appelées aussi doigts ou fingers en anglais). Pour la détermination de ces pertes, il est utile de découper cette grille en cellules unités, comme illustré dans une partie grossie de la cellule sur la Figure (IV-1), c'est-à-dire le plus petit élément de symétrie du motif de la cellule solaire. 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.

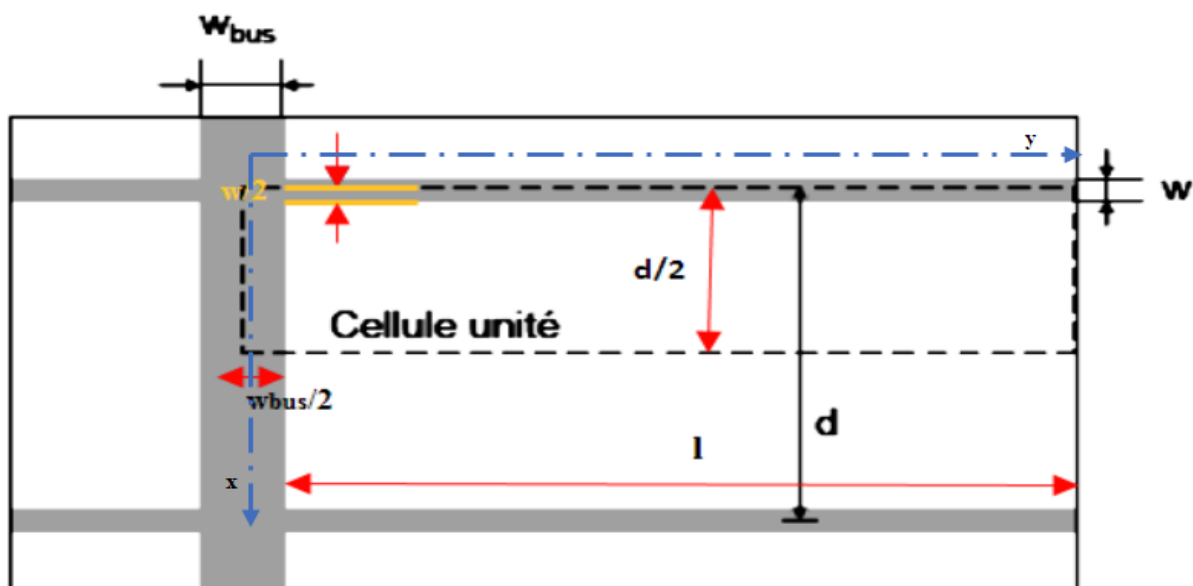


Figure IV-1 : Schéma de la cellule unité utilisée pour le calcul des pertes résistives dans le cas d'une grille métallique.

IV.2 Pertes électriques :

Les pertes électriques sont dues aux résistances parallèles (Shunt), telles que les fuites sur les bords de la cellule ou les court-circuits au niveau de l'émetteur, ainsi qu'aux résistances série.

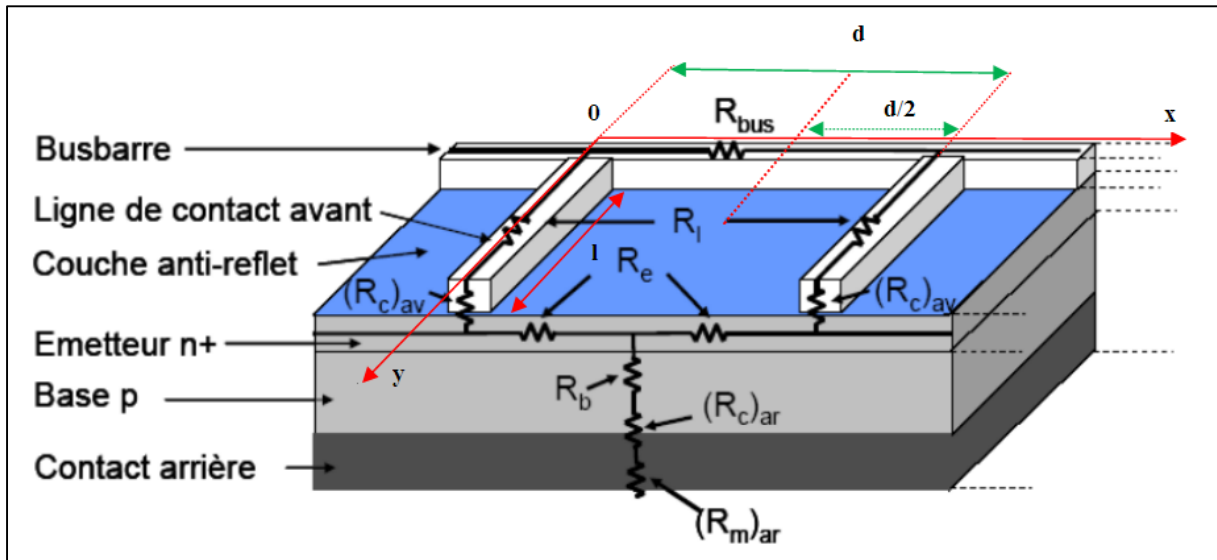


Figure IV-2 : Représentation schématique des différentes contributions de résistances à la résistance série totale dans une partie d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

R_{bus} : résistance du busbarre (bus de collecte).

R_l : résistance d'une ligne (doigt ou finger) en face avant.

$(R_c)_{av}$: résistance de contact avant.

R_e : résistance de l'émetteur N^+

R_b : résistance de la base.

$(R_c)_{ar}$: résistance de contact arrière.

$(R_m)_{ar}$: résistance du métal en face arrière.

IV.3 Métallisation dans une cellule :

Ce terme dû au métal déposé sur la cellule en intégrant les busbarres et les doigts (lignes ou bien fingers).

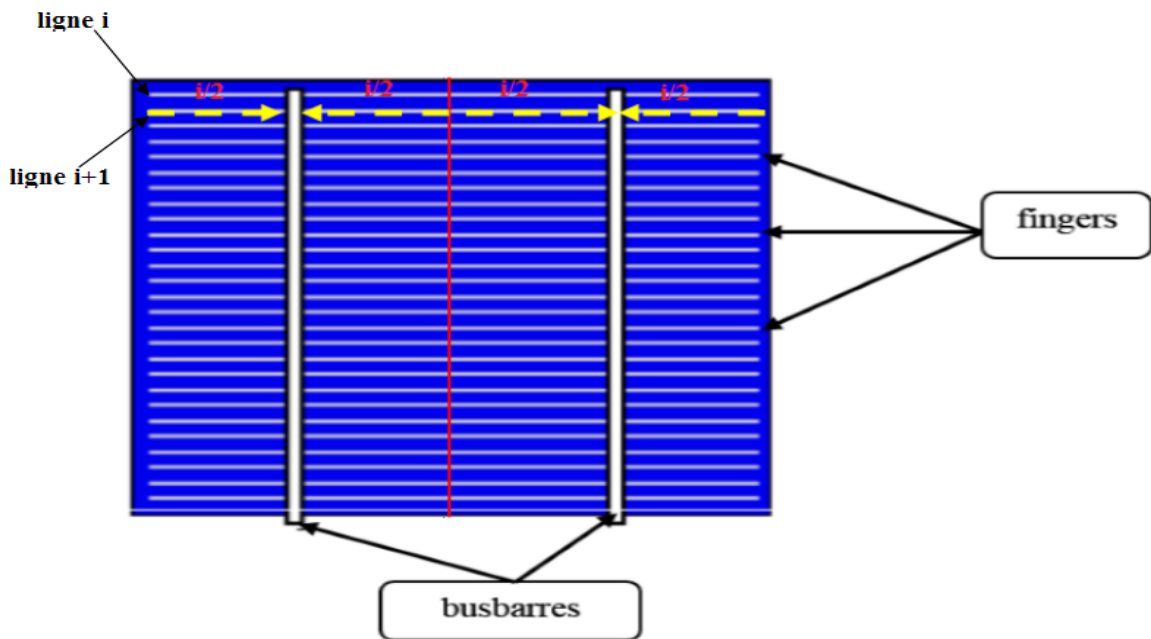


Figure IV-3 : Forme de la grille avant d'une cellule conventionnelle.

IV.4 Direction du flux du courant dans une cellule :

Pour faciliter la détermination de différentes résistances, il est nécessaire de connaître la direction du flux de courant et comment il s'assemble dans la cellule.

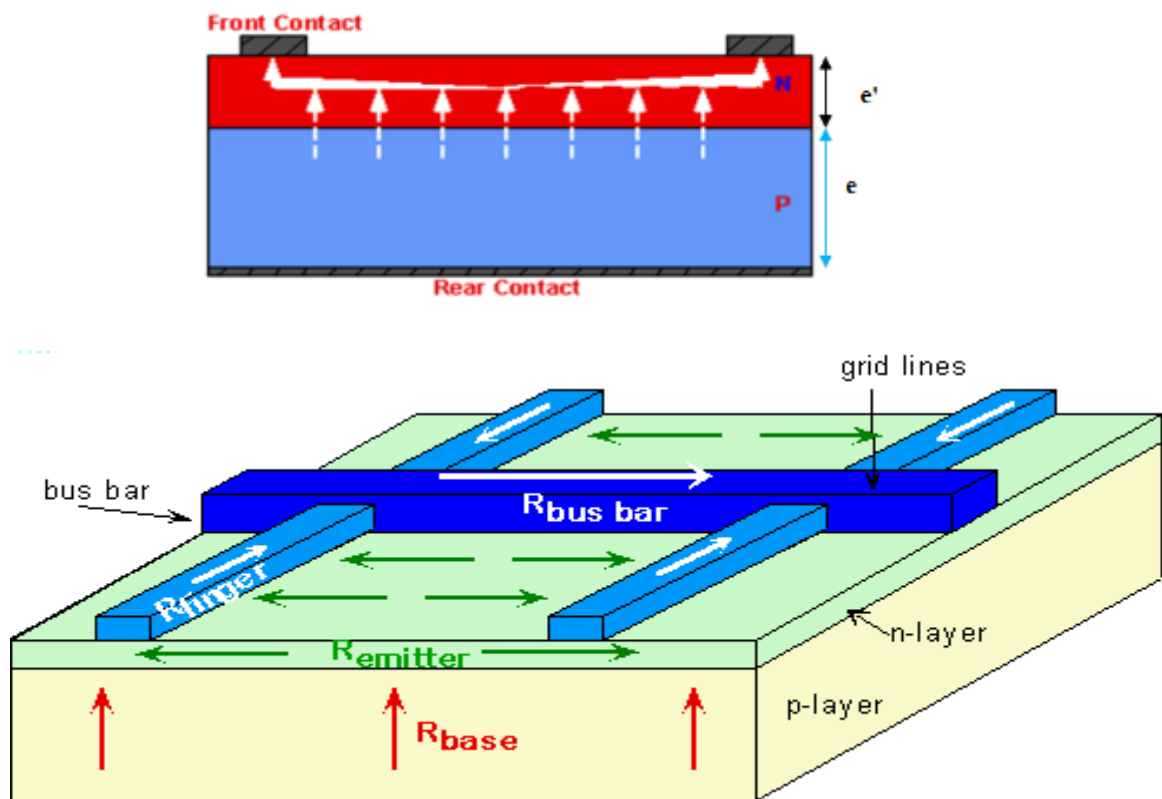


Figure VI-4 : Schémas indiquant la direction du flux du courant photo-généré dans une cellule solaire conventionnelle.

IV.5 Résistances séries :

La résistance série dans une cellule solaire a trois origines : premièrement, le mouvement dû à travers la base et l'émetteur, deuxièmement, la résistance de contact entre le métal et le silicium, et finalement la résistance du métal des contacts avant et arrière.

IV.5.1 Résistance de la base R_b :

On suppose que le courant traversant la base est constant et perpendiculaire à la surface.

La puissance dissipée par la base est donnée par la formule suivante :

$$P_b = R_b I^2 = \frac{I^2 \rho_b e}{L^2} = J^2 L^2 \rho_b e \quad (\text{IV. 1})$$

$$\boxed{\text{donc: } R_b = \frac{e \rho_b}{L^2}} \quad (\text{IV. 2})$$

Cette résistance est définie à partir de la direction du courant dans la base.

Avec :

ρ_b : Résistivité de la base ($\Omega \cdot \text{cm}$).

e : Épaisseur de la base (cm).

L : Côté de la cellule (cm).

IV.5.2 Résistance de l'émetteur R_e :

Pour connaître la résistance de l'émetteur, on part de la cellule élémentaire montrée dans la figure (VI-1).

La puissance dissipée dans l'émetteur :

$$dP = I(x) dV \quad (\text{IV. 3})$$

$$I(x) = J S = J \left(\frac{d}{2} - x \right) l \quad (\text{IV. 4})$$

$$dV = I(x) dR = \left[J l \left(\frac{d}{2} - x \right) \right] dR \quad (\text{IV. 5})$$

$$dV = \left[J l \left(\frac{d}{2} - x \right) \right] \left[R_{sh} \left(\frac{d}{x} \right) \right] \quad (\text{IV. 6})$$

-Détermination de la résistance carrée (sheet) R_{sh} de l'émetteur :

Dans le cas où la zone fortement dopée est formée seulement à la surface, il est plus difficile d'évaluer l'épaisseur et par conséquent de remonter à la résistivité et au dopage.

La résistance carrée sera donc le paramètre permettant d'évaluer le dopage. Elle se définit comme :

$$\boxed{R_{sh} = \frac{\rho_e}{e'} \rightarrow \left(\frac{\Omega}{\square} \right)} \quad (\text{IV. 7})$$

On utilise souvent l'unité « Ω/\square » ou bien « Ω/sq » pour la résistance superficielle, ce qui peut s'expliquer par la définition originelle de la résistance superficielle.

Avec

e' : L'épaisseur de la zone dopée en cm.

ρ_e : La résistivité du semi-conducteur N^+ (l'émetteur) en ($\Omega.\text{cm}$).

La résistance carrée est mesurée généralement par la méthode des 4 points.

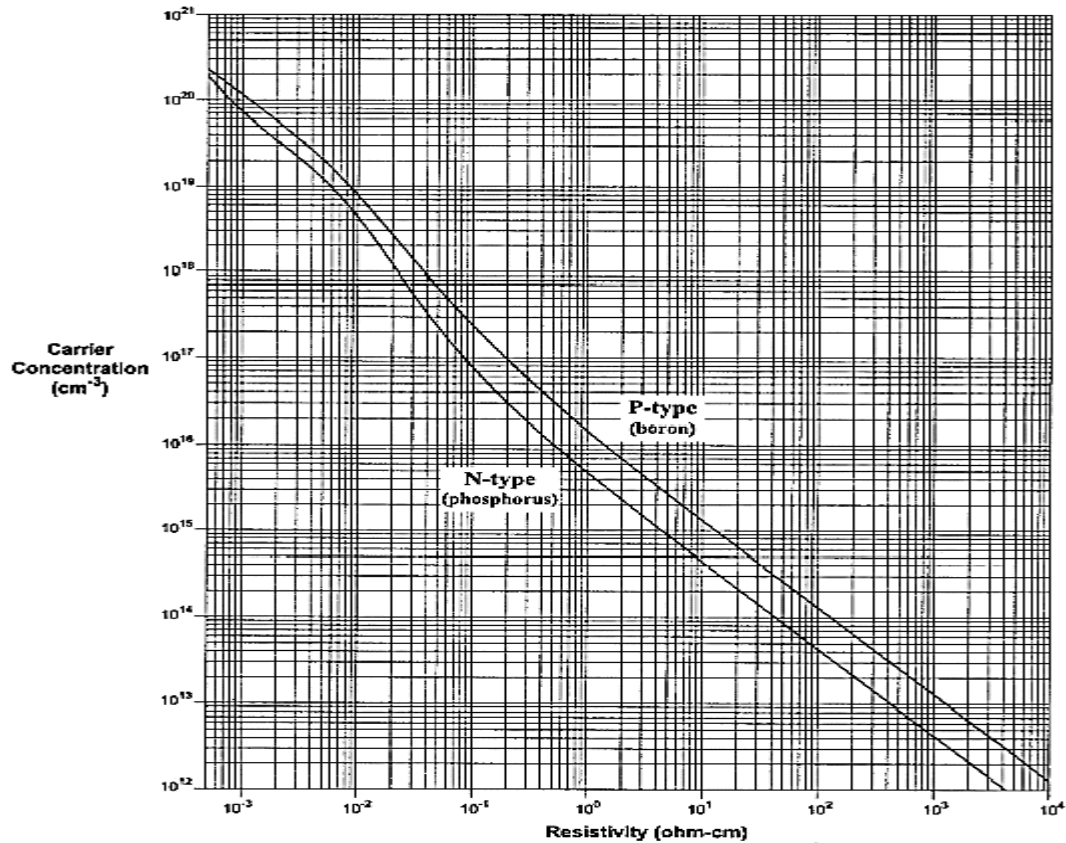


Figure IV-5 : Résistivité en fonction du dopage et du type de dopants dans le silicium.

Alors :

$$dP = J^2 R_{sh} l \left(\frac{d}{2} - x \right)^2 dx \quad (\text{IV. 8})$$

$$P = \int_0^{d/2} J^2 R_{sh} l \left(\frac{d}{2} - x \right)^2 dx \quad (\text{IV. 9})$$

$$P_e = \frac{1}{3} J^2 R_{sh} \left(\frac{d}{2} \right)^3 l \quad (\text{IV. 10})$$

Ce calcul peut être généralisé à n'importe quel type de cellule.

Pour toute la cellule, on a :

$$P_e = \frac{2}{3} n J^2 R_{sh} \left(\frac{d}{2}\right)^3 L \quad (IV. 12)$$

$$P_e = \frac{1}{12} J^2 R_{sh} L^2 d^2 \quad (IV. 13)$$

$$R_e = \frac{1}{12} \frac{R_{sh} d^2}{L^2} \quad (IV. 14)$$

Avec : d: espace entre deux lignes successives (cm).

$n = \frac{L}{d}$:Nombre de lignes.

IV.5.3 Résistance d'une ligne de la grille face avant R_1 :

Pour la détermination de cette résistance, on utilise toujours comme une cellule unitaire, la cellule montrée dans la figure IV-1 ci-dessus :

Calcul de la puissance dissipée :

$$I(y) = J S = J \left(\frac{d}{2}\right) (1 - y) \quad (IV. 15)$$

$$dV = I(y)dR = \left[J \frac{d}{2} (1 - y) \right] \frac{r_m}{w/2} dy \quad (IV. 16)$$

$$dV = J(1 - y)r_m \left(\frac{d}{2}\right) dy \quad (IV. 17)$$

$$dP = J^2 r_m (1 - y)^2 \frac{d^2}{2w} dy \quad (IV. 18)$$

$$P = \int_0^1 J^2 r_m (1 - y)^2 \frac{d^2}{2w} dy \quad (IV. 19)$$

$$P_1 = J^2 r_m \frac{l^3 d^2}{3 \cdot 2w} \quad (IV. 20)$$

Où $r_m = \frac{\rho_m}{h} \rightarrow (\Omega)$

ρ_m : Résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{cm}$).

w : Largeur du doigt (cm).

h : Hauteur du doigt (cm).

Pour toute la cellule, on a p comme nombre de busbarres et dans la cellule unitaire, le courant ne parcourt que $\frac{L}{2p}$ avant d'être collecté.

Prenons en compte que pour une ligne, on a deux cellules unitaires. Alors la relation de la puissance devient :

$$P_1 = 2p2nJ^2r_m \frac{(L/2p)^3}{3} \frac{d^2}{2w} \quad (IV. 21)$$

$$P_1 = 4pJ^2r_m \left(\frac{L}{d}\right) \frac{L^3d^2}{48p^3w} \quad (IV. 22)$$

$$P_1 = J^2L^4 \frac{r_m d}{12p^2w} \quad (IV. 23)$$

$$R_1 = \frac{dr_m}{12wp^2} = \frac{d\rho_m}{12hwp^2} \quad (IV. 24)$$

Exemple : pour une cellule ayant deux busbarres on a :

$$P_1 = J^2L^4 \frac{dr_m}{48w} ; R_1 = \frac{dr_m}{48w}$$

IV.5.4 Résistance de métallisation en face arrière $(R_m)_{ar}$:

Elle est donnée par la relation suivante :

$$(R_m)_{ar} = \frac{\rho'_m h'}{L^2} \quad (IV. 25)$$

Avec :

ρ'_m : Résistivité du métal en face arrière.

h' : Hauteur du contact en face arrière.

IV.5.5 Résistance des busbarres R_{bus} :

$$P_{bus} = 2pm \frac{r_{bus}d}{w_{bus}} \sum_{i=1}^N i_i^2 \quad (IV. 26)$$

Pour notre cellule étudiée, on a : $p = 2$

$$P_{bus} = 2x2m \frac{r_{bus}d}{w_{bus}} \sum_{i=1}^N i_i^2 \quad (IV. 27)$$

Avec : $N = \frac{L}{2md}$, $r_{bus} = \frac{\rho_m}{h_{bus}} \rightarrow (\Omega)$

m : nombre de points de collecte le long du busbarres (nombre de points de soudure)

i_i : courant entre les lignes i et $i+1$.

w_{bus} : Largeur des lignes collectrices de courant (cm).

h_{bus} : Hauteur de la ligne de collecte du courant (cm).

Sachant que :

$$\sum_{i=1}^{i=N} i^2 = I^2(1^2 + 2^2 + \dots + N^2) = I^2 \frac{N(N+1)(N+2)}{6} \quad (\text{IV. 28})$$

Et :
$$I = \frac{JLd}{p} \quad (\text{IV. 29})$$

$$P_{\text{bus}} = \frac{J^2 r_{\text{bus}} d^2 L^3}{6p w_{\text{bus}}} \left(\frac{L^2}{2m^2 d^2} + 3 \frac{L}{2md} + 1 \right) \quad (\text{IV. 30})$$

$$R_{\text{bus}} = \frac{\rho_m d^2}{6p L h_{\text{bus}} w_{\text{bus}}} \left(\frac{L^2}{2m^2 d^2} + 3 \frac{L}{2md} + 1 \right) \quad (\text{IV. 31})$$

IV.5.6 Résistances des contacts :

IV.5.6.1 Résistance de contact avant $(R_c)_{\text{av}}$ est donnée par la formule empirique ci-dessous :

$$(R_c)_{\text{av}} = \frac{d \sqrt{\rho_c R_{\text{sh}}}}{2L^2} \coth \left(\frac{w}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{sh}}}{\rho_c}} \right) \quad (\text{IV. 32})$$

IV.5.6.2 Résistance de contact arrière $(R_c)_{\text{ar}}$ est donnée par :

$$(R_c)_{\text{ar}} = \frac{\rho'_c}{L^2} \quad (\text{IV. 33})$$

Où : ρ'_c , ρ_c sont les résistivités du contact en face arrière et face avant.

IV.6 Ombrage (pertes optiques) :

La grille métallique en face avant de la cellule photovoltaïque réfléchit une partie du rayonnement incident, ce qui limite le courant photo-généré. On définit le taux de recouvrement F , également appelé le taux d'ombre, comme le rapport entre la surface de recouvrement de la grille métallique et la surface totale de la cellule. Il s'agit de la somme du taux de recouvrement des busbarres et des lignes. A titre d'exemple, le taux d'ombre d'une cellule industrielle typique en silicium est compris entre 7 et 10 %.

-Calcul du taux d'ombre F :

$$F = F_{\text{bus}} + F_1 \quad (\text{IV. 34})$$

Où : F : Taux de recouvrement d'une grille métallique en forme de peigne en face avant en %.

F_{bus} : Taux de recouvrement des busbarres de la grille en %.

F_1 : Taux de recouvrement des lignes de la grille en %.

$$S = S_{\text{bus}} + S_1 \quad (\text{IV. 35})$$

Avec : S : La surface métallisée.

S_{bus} : La surface totale des busbarres.

S_1 : La surface totale des lignes

$$F = \frac{S_{bus} + S_1}{L^2} \quad (IV.36)$$

Pour une cellule avec p busbarres, on a :

$$S_{bus} = pS_{1bus} = p(w_{bus}L) \quad (IV.37)$$

Pour une seule ligne, on a :

$$s_1 = (L - pw_{bus})w \quad (IV.38)$$

Pour toute les lignes :

$$S_1 = n(L - pw_{bus})w \quad (IV.39)$$

$$F = \frac{Lpw_{bus} + n(L - pw_{bus})w}{L^2} \quad (IV.40)$$

$$F = \frac{pw_{bus}}{L} + \frac{npw}{L^2} \left(\frac{L}{p} - w_{bus} \right) \quad (IV.41)$$

En remplaçant n par sa relation, on obtient :

$$F = \frac{pw_{bus}}{L} + \frac{pw}{dL} \left(\frac{L}{p} - w_{bus} \right) \quad (IV.42)$$

$$F = \frac{1}{d} \left[\frac{pw_{bus}}{L} + \frac{pw}{L} \left(\frac{L}{p} - w_{bus} \right) \right] \quad (IV.43)$$

$$F = \frac{1}{d} \left(w + \frac{pw_{bus}(d - w)}{L} \right) \quad (IV.44)$$

Contributions Résistives	Cellule avec contacts sérigraphies (Ω)	Cellule avec contacts sérigraphies ($\Omega.cm^2$)
Emetteur	$R_e = \frac{1}{12} \frac{R_{sh}d^2}{L^2}$	$R_e = \frac{R_{sh}d^2}{12}$
Base	$R_b = \frac{e\rho_b}{L^2}$	$R_b = e\rho_b$

Grille avant	$R_l = \frac{d\rho_m}{12hwp^2}$	$R_l = \frac{d\rho_m}{12hwp^2}L^2$
Métal face arrière	$(R_m)_{ar} = \frac{\rho'_m h'}{L^2}$	$(R_m)_{ar} = \rho'_m h'$
Busbarre	$R_{bus} = \frac{\rho_m d^2}{6plh_{bus}w_{bus}} \left(\frac{L^2}{2m^2 d^2} + 3 \frac{L}{2md} + 1 \right)$	$R_{bus} = \frac{\rho_m d^2 L^2}{6plh_{bus}w_{bus}} \left(\frac{L^2}{2m^2 d^2} + 3 \frac{L}{2md} + 1 \right)$
Contact avant	$(R_c)_{av} = \frac{d\sqrt{\rho_c R_{sh}}}{2L^2} \coth \left(\frac{w}{2} \sqrt{\frac{R_{sh}}{\rho_c}} \right)$	$(R_c)_{av} = \frac{L^2 d\sqrt{\rho_c R_{sh}}}{2} \coth \left(\frac{w}{2} \sqrt{\frac{R_{sh}}{\rho_c}} \right)$
Contact arrière	$(R_c)_{ar} = \frac{\rho'_c}{L^2}$	$(R_c)_{ar} = \rho'_c$
Taux d'ombre F	$F = \frac{1}{d} \left(w + \frac{pw_{bus}(d-w)}{L} \right)$	-----

Tableau IV-1 : Expressions des contributions des résistances série et du taux d'ombrage pour les cellules solaires avec des contacts de sérigraphie.

IV.7 Pertes résistives :

Les pertes résistives sont la somme des différentes contributions indiquées dans le tableau ci-dessus. La puissance totale P_t dissipée due aux pertes résistives et au taux d'ombre est exprimée par l'équation suivante :

$$P_t = P_r + P_0 \quad (IV. 45)$$

$$P_t = I_m^2 R_s + F I_m V_m \quad (IV. 46)$$

$$P_t = J_m^2 L^4 R_s + F J_m V_m L^2 \quad (IV. 47)$$

Avec :

P_t : Puissance totale dissipée en Watts.

P_r : Puissance dissipée due aux contributions de résistances série en Watts.

P_0 : Puissance dissipée due au taux d'ombre en Watts.

R_s : Somme des résistances séries dues aux contributions du tableau IV-1 en Ω .

A partir de cette relation, il est possible de calculer le facteur de perte totale en % et qui est donné par l'équation suivante :

$$\text{pertes totales} = \frac{P_t}{I_m V_m} = \frac{P_t}{J_m V_m L^2} \rightarrow (\%) \quad (IV. 48)$$

Les paramètres utilisés pour la simulation du calcul des pertes résistives et les puissances totales sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Description	Valeurs	Unités
ρ_b	Résistivité de la base ($\approx N_d = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).	0,6	$\Omega \cdot \text{cm}$
E	Epaisseur de la base.	2×10^{-2}	cm
w_{bus}	Largeur d'un busbarre en face avant.	0,2	cm
h'	Hauteur du contact en face arrière.	2×10^{-3}	cm
ρ'_m	Résistivité du métal en face arrière (Al).	$5,6 \times 10^{-6}$	$\Omega \cdot \text{cm}$
ρ'_c	Résistivité du contact en face arrière.	$1,5 \times 10^{-2}$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
m	Nombre de points de soudure en face avant.	10	-----
P	Nombre de busbarres en face avant.	2 à 6	-----
L	Côté de la cellule.	15,6	cm
J_m	Densité de courant au point de puissance maximum de la cellule.	0,03	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$
V_m	Tension au point de puissance maximum de la cellule.	0,5	V
ρ_m	Résistivité du métal sérigraphie en face avant (Ag).	$3,9 \times 10^{-6}$	$\Omega \cdot \text{cm}$
ρ_c	Résistivité de contact de la grille sérigraphie en face avant.	10^{-3}	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
d	Espace entre deux lignes sérigraphiées.	0,02 - 0,6	cm
w	Largeur d'une ligne sérigraphiée en face avant.	$1,2 \times 10^{-2}$	cm
h	Hauteur d'une ligne sérigraphiée en face avant.	$1,5 \times 10^{-3}$	cm
h_{bus}	Hauteur d'un busbarre sérigraphié en face avant.	$1,5 \times 10^{-3}$	cm
R_{sh}	Résistance carrée de l'émetteur N^+ .	40-120	Ω/\square

Tableau IV-2 : Paramètres utilisés dans la simulation.

IV.8 Simulation et l'optimisation des paramètres :

IV.8.1 Influence de d et de R_{sh} sur R_e :

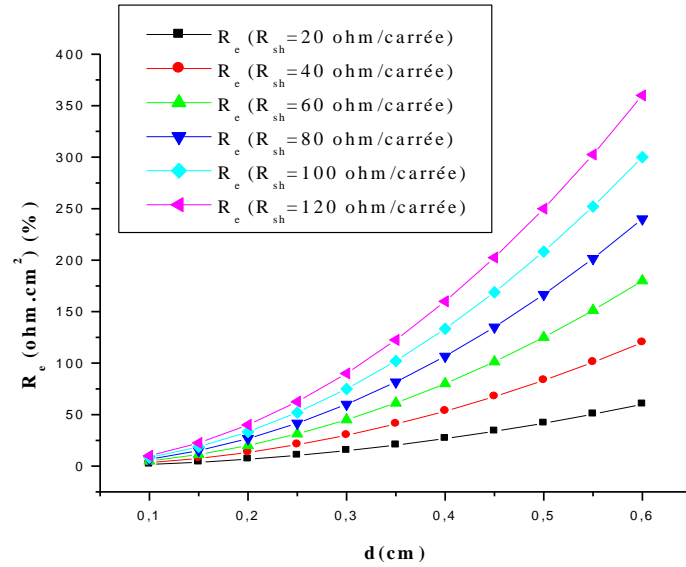


Figure IV-6 : Variation de R_e en fonction de d pour plusieurs valeurs de R_{sh} .

La résistance de l'émetteur augmente avec l'augmentation de la distance entre les lignes d et la résistance sheet R_{sh} .

IV.8.2 Effet de d sur la résistance de la grille avant R_l :

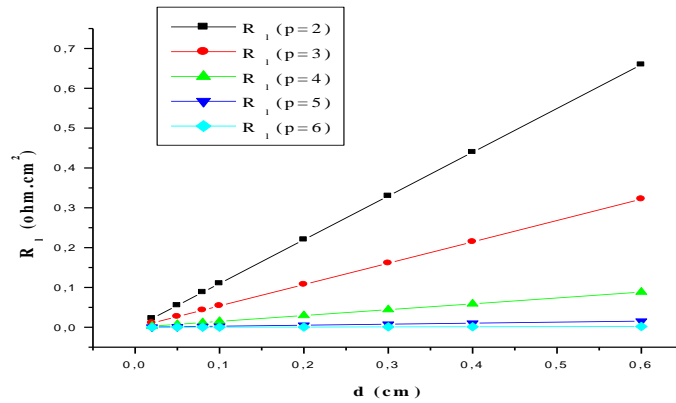


Figure IV-7 : Variation de la résistance de la ligne de la grille en fonction de d pour plusieurs nombres de busbarres p .

Selon la figure ci-dessus, on remarque que la résistance de la ligne de la grille avant croît avec la distance d et décroît avec le nombre de busbarres de la cellule.

IV.8.3 Effet de d et de p sur R_{bus} :

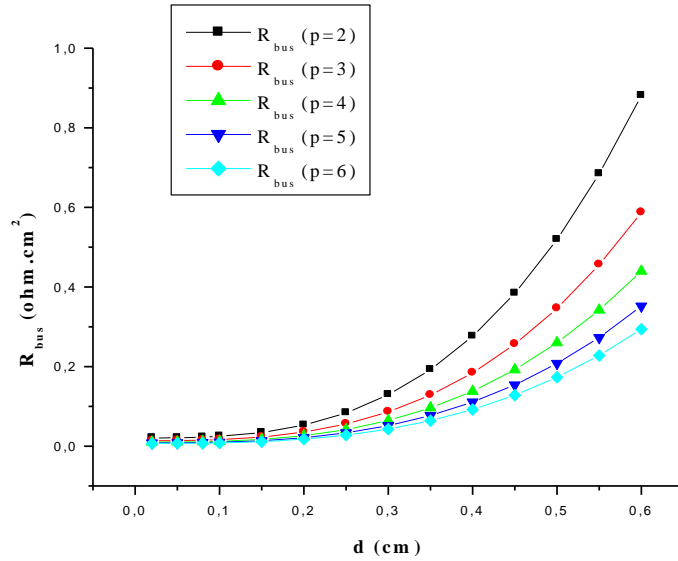


Figure IV-8 : Variations de R_{bus} en fonction de d et à plusieurs valeurs de p .

L'augmentation de la distance entre les lignes fait augmenter la résistance des busbarres, en revanche, plus le nombre de busbarres est élevé, plus que R_{bus} diminue.

IV.8.4 Effet de d sur $(R_c)_{av}$:

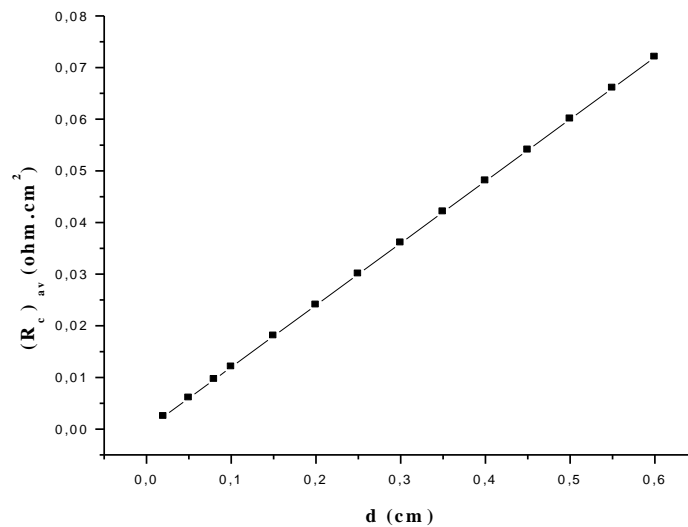


Figure VI-9 : Variation de $(R_c)_{av}$ en fonction de d .

On remarque que la résistance des contacts en face avant croît linéairement avec l'augmentation de d .

D'autre part, les résistances de la base R_b , du contact arrière $(R_c)_{ar}$ et de la métallisation arrière $(R_m)_{ar}$ sont indépendants de d et de p et dont les valeurs sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Résistances	R_b	$(R_c)_{ar}$	$(R_m)_{ar}$
Valeurs en $\Omega.cm^2$	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,12 \times 10^{-8}$

Tableau VI-3 : Valeurs des résistances séries indépendantes de d et de p

IV.8.5 Impact de d et de p sur la résistance totale en série R_s :

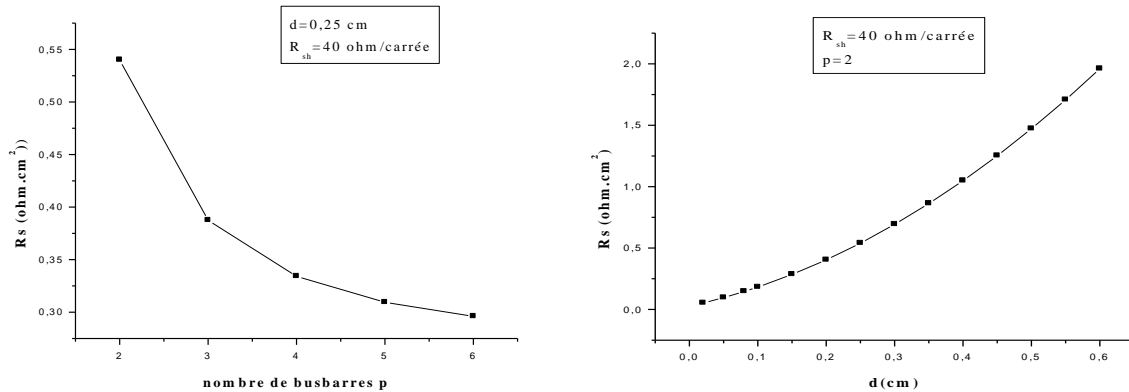


Figure IV-10 : Variation de R_s en fonction de d et de p.

Le graphe montre que la somme des résistances séries qui reste à minimiser peut atteindre des valeurs remarquables, si la distance entre les lignes tend à augmenter. Par contre, elle décroît avec l'augmentation de nombres de busbarres. Donc il va falloir trouver un compromis entre ces deux grandeurs.

IV.8.6 Influence de d et de p sur le taux d'ombre F :

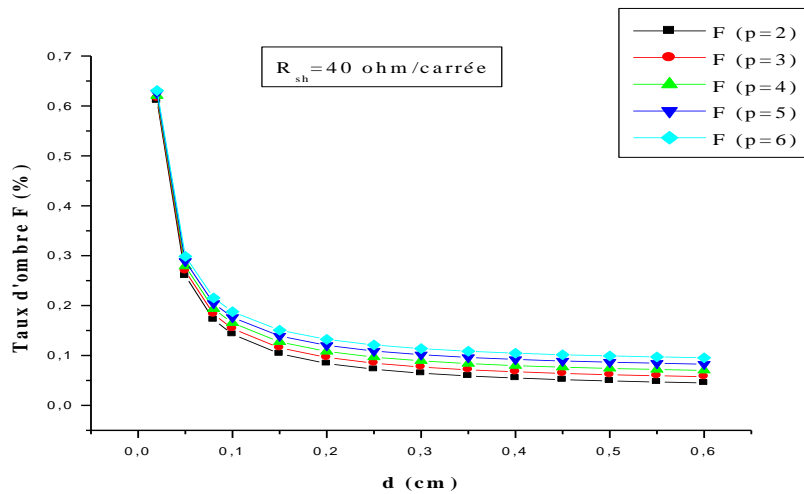


Figure IV-11 : Variation de taux d'ombre F en fonction de la distance entre les lignes d pour plusieurs nombres de busbarres p .

On remarque que le taux d'ombre diminue avec l'accroissement de la distance entre les lignes sérigraphiées et augmente avec la croissance du nombre de busbarres.

IV.8.7 Comparaison entre F et la R_s en fonction de d :

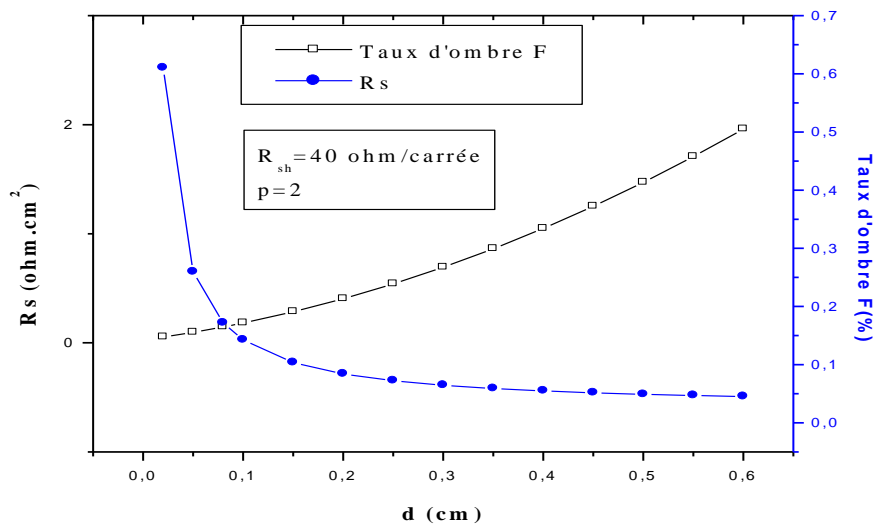


Figure VI-12 : Variation de F et R_s en fonction de d .

On constate que l'influence de d sur R_s est à l'opposé de celle de F où R_s diminue avec l'augmentation de d , tandis que le taux d'ombre augmente avec celle-ci.

IV.8.8 Influence de d sur les différentes puissances :

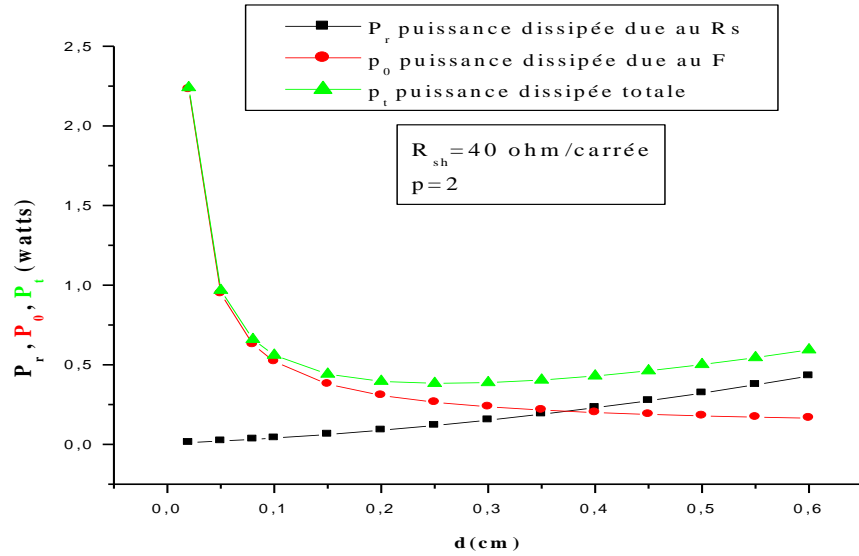


Figure IV-13 : Variation des puissances en fonction de d pour $p=2$.

On note que la puissance dissipée due au taux d'ombre diminue avec l'accroissement de d, tandis que la puissance dissipée due à la résistance série R_s augmente. Alors pour avoir un compromis entre ces deux puissances, il nous faut donc selon les résultats obtenus une valeur optimale de d voisine de 0,25 cm.

On remarque aussi que c'est l'effet des pertes dues au taux d'ombre qui l'emporte sur la celui des pertes résistives pour les petites distances entre les lignes, tandis que c'est l'effet de la résistance série qui impose la puissance totale dissipée pour les grandes valeurs de d.

IV.8.9 Effet de d sur la puissance totale en pourcentage :

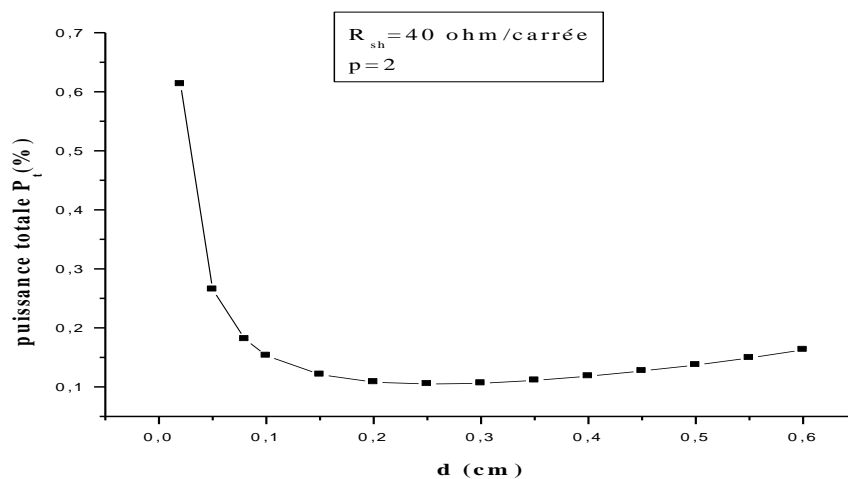


Figure IV-14 : variation de la puissance totale en fonction de d.

On note une que la puissance totale diminue avec l'augmentation de d , elle atteint une valeur minimale pour $d=0,25$ cm.

IV.8.10 Impact de la largeur des lignes w sur les puissances en watts :

On peut également voir superficiellement l'influence de la largeur de la ligne w sur les puissances dissipées comme on le voit sur la figure ci-dessous.

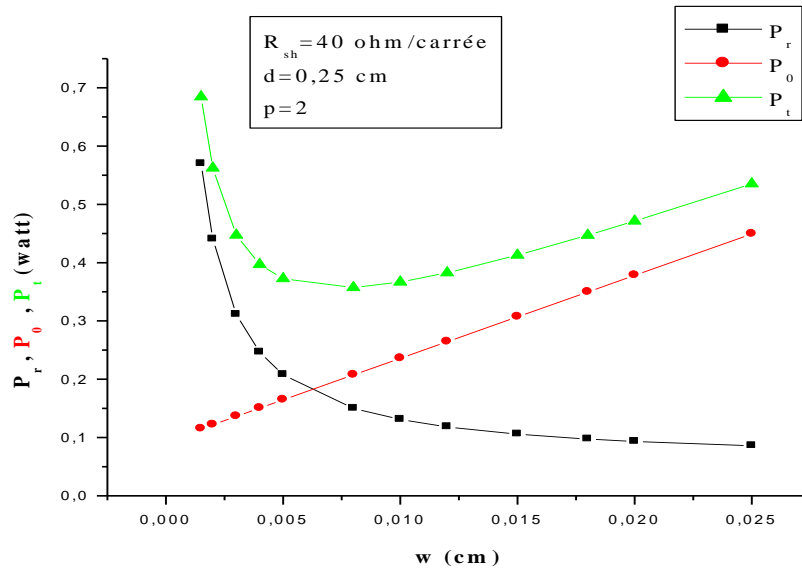


Figure IV-15 : Variation des puissances en fonction de w .

IV.8.11 Effet de w sur la puissance totale en pourcentage :

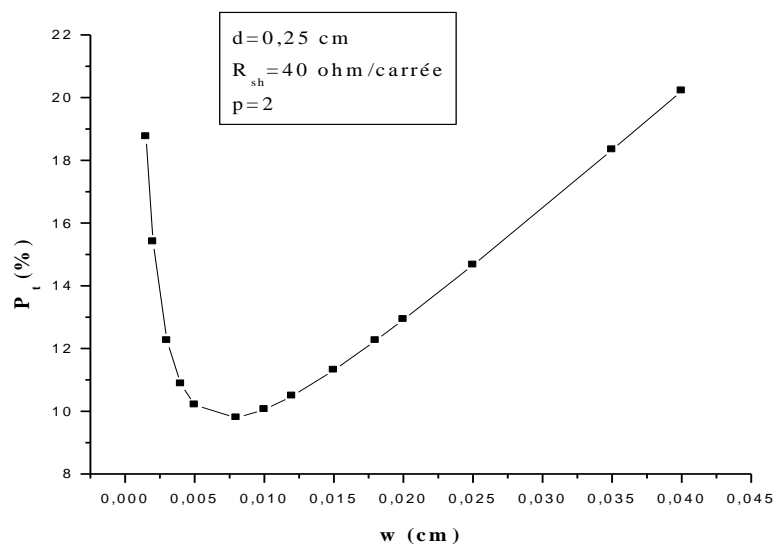


Figure IV-16 : Variations des pertes résistives totales en fonction de w .

L'évolution de la puissance totale dissipée en fonction de la largeur des lignes montre qu'il y a une valeur optimale de $w \approx 75\mu\text{m}$ où la puissance est minimisée à moins de 10 %.

IV.8.12 Impact de R_{sh} sur les puissances en watts :

La résistance carrée de l'émetteur constitue également un paramètre important et qui varie inversement proportionnellement au dopage de l'émetteur. Ce paramètre peut avoir également un effet bénéfique sur la résistance série lorsqu'il est bien choisi comme on le constate fort bien ci-dessous.

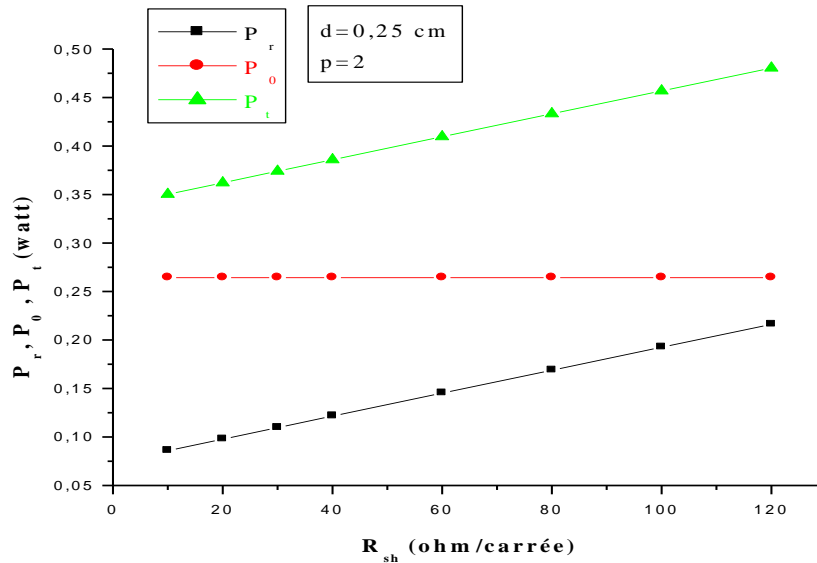


Figure VI-17 : Variation de puissances dissipées en fonction de R_{sh} .

Selon le graphe ci-dessus, on observe que la résistance sheet n'affecte pas la puissance dissipée par ombrage, mais par contre, elle influe négativement sur la puissance résistive de l'émetteur lorsque qu'elle croît.

Enfin, pour clore ce travail, d'autres paramètres pourront être étudiés et optimisés tels que la hauteur des busbarres et des lignes, la largeur des busbarres, le choix de métaux adéquats, etc. afin d'améliorer les caractéristiques des cellules solaires.

Conclusion générale

Le photovoltaïque représente aujourd'hui une solution alternative aux énergies non-renouvelables qui sont appelées un jour à se tarir. Il faut donc continuer à investir et améliorer ce domaine pour avoir une technologie durable, non-polluante et surtout à faible coût.

Comme les cellules solaires sont la base de l'énergie photovoltaïque, leurs paramètres doivent être bien choisis avant leur élaboration. Alors, l'optimisation de ces paramètres est indispensable pour l'amélioration du rendement énergétique.

L'objectif de ce travail étant d'optimiser les dimensions de la grille métallique d'une cellule conventionnelle en étudiant leurs influences sur les pertes résistives en particuliers les résistances séries et le taux d'ombrage.

Pour mener à bien notre étude, on a débuté par le premier chapitre dont lequel on a fait des rappels sur l'ensoleillement, sur la source énergétique qu'est le soleil, le rayonnement solaire et les notions sur ses différentes composantes (direct, diffus, albédo, global). Ensuite, nous nous avons donné les définitions des spectres Air-mass, notamment sur le spectre solaire de référence AM1,5.

Le deuxième chapitre est consacré à la physique des semi-conducteurs et tous les utiles rappels de ces matériaux comme le dopage, les structures de bandes, les densités des porteurs, les durées de vie, les propriétés électriques et optiques ainsi que d'autres notions. Viennent ensuite les définitions élémentaires et surtout ayant trait au fonctionnement de la jonction PN, élément de base des cellules photovoltaïques dans le cas où elle est polarisée (en directe où en inverse) ainsi qu'en obscurité.

Par la suite, on a abordé les phénomènes de générations des porteurs et leurs recombinaisons (radiatives, RSH, Auger et en surface). On a également fait des rappels sur les courants et les expressions qui décrivent leurs comportements dans les semi-conducteurs.

La cellule solaire a été traitée dans le troisième chapitre, où on a évoqué sa définition et son principe de fonctionnement. Ensuite, on a rappelé, d'une façon générale, les étapes nécessaires de fabrication de la cellule. On a décrit les caractéristiques de la cellule solaire (courant de court-circuit I_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , facteur de forme FF, puissance maximale P_m et rendement η) et on a rappelé les facteurs de limitation du rendement.

Dans le dernier chapitre, on a exposé les relations qui décrivent les pertes résistives dans la cellule solaire :

- la résistance de la base R_b ,
- la résistance de l'émetteur R_e ,
- la résistance des lignes R_l ,
- la résistance des busbarres R_{bus} ,
- les résistances des contact avant et arrière : $(R_c)_{av}$ et $(R_c)_{ar}$,
- la résistance de la métallisation de la couche arrière $(R_m)_{ar}$.

Ensuite, on est passé au taux d'ombre et aux expressions puissances dissipées maximales à leur point de fonctionnement.

Les calculs ont été élaborés dans le but d'optimiser les paramètres que sont la distance d et la largeur w entre les lignes et le nombre p de busbarres en faisant procéder à la variation d'une seule grandeur et en gardant les autres constants et ainsi de suite.

Les résultats majeurs obtenus montrent que lorsque p croît, la résistance série diminue et le taux d'ombre augmente et par conséquent leurs pertes de puissances dissipatives ont la même allure. Ce qui permet donc de garder ce nombre égale à 2 par la suite.

Par ailleurs, quand d augmente, le taux d'ombre diminue tandis la résistance série augmente. On s'attend donc à avoir une optimisation sur cette distance. Les calculs ont donné une valeur minimale de 0,25 cm pour laquelle la puissance dissipée est de l'ordre de 10%.

L'étude de la largeur w entre les lignes, c'est un effet contraire à d où c'est la puissance dissipée par ombrage qui croît contrairement à celle de la résistance série. Donc on s'attend à avoir également une largeur w optimisée qui est estimée à 75 μm .

En ce qui concerne la résistance carrée de l'émetteur, elle n'a d'effet que sur la résistance série qui augmente avec celle de l'émetteur. Plus cette valeur est minimale et plus les pertes résistivités sont basses.

Comme perspectives de ce modeste travail, d'autres paramètres peuvent être alors optimisés et dont les effets n'ont pas été abordés ici tels que :

- le dopage du semi-conducteur,
- les résistivités des métaux de la face avant et arrière,
- les hauteurs des métallisations avant et arrière,
- la longueur l des distances à parcourir par les courants des lignes avant d'atteindre le busbarre,
- le nombre de points de soudures qui collectent les courants dans les busbarres,
- la largeur du busbarre,
- les dimensions de la cellule,
- et enfin la recherche de formes géométriques adéquates des grilles.

Bibliographie :

1. Ouvrages :

- H. Mathieu et H. Fanet, « *Physique des semi-conducteurs et des composants électronique* », 6^{ème} édition, Masson, Paris, 2006.
- A. Vapaille, « *Physique des dispositifs à semi-conducteurs* », Edition Masson, 1970.
- A. Laugier et J.-A. Roger, « *Les photopiles solaires du matériau du dispositif aux applications* », Edition Lavoisier tec. & doc, Paris, France, 1981.
- M. Orgeret, « *Les piles solaires, le composant et ses applications* », édition Masson, Paris, 1985.
- A. Ricaud, « *Photopiles solaires, de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés* », Presses polytechniques et universitaires romandes (Suisse), 1997.
- A. Goetzberger, J. Knobloch & B. Voß, « *Crystalline Silicon Solar Cells* », Edit. John Wiley & Sons, 1998.
- B. Equer, « *Energie solaire photovoltaïque, physique et technologie de la conversion photovoltaïque.* », Edition Ellipses, Unesco, vol 1, 1993.
- D. K. Schroder, « *Semiconductor material and device characterization* », Third Edition John Wiley & Sons, 2006.

2. Thèses :

- V. V. Ansgar Mette, « *New Concepts for Front Side Metallization of Industrial Silicon Solar Cells* », Thesis, Fraunhofer Institut for Solar Energy system, Freiburg University (Germany), 2007.
- C. Boulord, « *Développement de techniques de métallisation innovantes pour - cellules photovoltaïques à haut rendement* », Thèse de doctorat, Insa de Lyon (France), 2011.
- B. Thuillier, « *Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à-partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin* », Thèse de doctorat, Insa de Lyon (France), 2001.

3. Mémoires de Magistères :

- A. Mekemeche, « Etude à deux dimensions de cellules solaires en silicium monocristallin à émetteur sélectif à l'aide de PC2D », Université de Mostagnem (Algérie), 2013.
- F. Benyettou, « Etude et Modélisation d'une cellule photovoltaïque au silicium polycristallin à l'aide de PSpice », Université de Mostagnem (Algérie), Mémoire de Magistère, 2013.
- F. Yacine, « *Etudes de nouvelles générations des cellules photovoltaïques* », Université d'Oran (Algérie), 2011.
- M. Lasledj, « *Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales* », Université de Sétif (Algérie), 2011.
- M. Madani, « *Réalisation des couches antis reflats dans les cellules solaires à couches minces* », Université de Tlemcen (Algérie), 2006.

4. Mémoires de Master :

- C.Messaoudi, « *Méthode de détermination des paramètres d'une cellule solaire par Excel : Perspectives pour une cellule solaire bifaciale en silicium.* », Université de Mostaganem (Algérie), 2015.
- H. Hadjer, « *Caractérisation automatisée d'une cellule solaire* », Université de Biskra (Algérie), 2014.
- C. Hasni, « *Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellule solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS* », Université de Biskra (Algérie), 2014.

5. Site Internet :

-<http://www.pveducation.org/pvcdrom>(consulté du 25 avril 2016 au 17 mai 2016).