

I- Introduction

Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif électronique capable de convertir l'énergie lumineuse en un courant continu. Réellement, c'est une diode à jonction dont la surface est plus grande que l'épaisseur.

Dans ce premier chapitre, nous présentons un exposé détaillé sur les notions fondamentales liées à la structure cristalline des semiconducteurs, à leurs propriétés électriques, et plus spécialement au silicium cristallin et aux différents types de défauts cristallographiques.

Un rappel sur les cellules solaires est nécessaire pour entamer en détail les paramètres importants et critiques dans une cellule solaire, c'est ce que nous présentons par la suite.

Tout en sachant que le rendement des cellules solaires est très dépendant d'une multitude de paramètres intrinsèques du matériau utilisé ; dont une durée de vie des porteurs minoritaires élevée et des contacts métalliques très fins de manière à réduire le taux d'ombre de la cellule, collectant ainsi le maximum d'énergie lumineuse, nous aborderons en détail, ces propriétés.

Quant au rendement de collecte, qui est un des facteurs importants limitant le rendement de la cellule, il est détaillé et les différents types de recombinaison des porteurs dans le volume ou à la surface de la cellule sont expliquées.

Ensuite les technologies pour la réduction des pertes dues à la recombinaison sont décrites, ainsi que l'influence du dopage sur la qualité de transport des semiconducteurs, sur la densité d'états d'interface, sur la mobilité des porteurs minoritaires et la longueur de diffusion.

En fin de chapitre, nous présentons les propriétés électriques d'une cellule solaire, à savoir : le courant de saturation, la réponse spectrale, le rendement quantique et la caractéristique courant-tension de la cellule solaire.

II- Notions fondamentales sur la structure cristalline des semiconducteurs

Les composants électroniques mettent à profit les propriétés des électrons dans les semiconducteurs. Par conséquent, il est judicieux de définir quelques unes de ces propriétés avant d'introduire l'effet de la conversion photovoltaïque.

Les paramètres fondamentaux sont bien évidemment l'état de la population électronique à l'équilibre thermodynamique et l'évolution de cette population lorsque le matériau semiconducteur est soumis à une excitation extérieure, telle que les rayonnements lumineux par exemple.

II-1. Structure cristalline

L'arrangement des atomes, divise l'état solide d'un matériau en deux types :

- L'état « amorphe », dans lequel l'arrangement est aléatoire ;
- L'état « cristallisé », caractérisé par un arrangement périodique des atomes aux nœuds d'un réseau.



Fig. I-1 : Micrographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM. [14]

Dans le cas de la conversion solaire photovoltaïque, les cristaux sont covalents et les électrons de valence sont liés avec une énergie de liaison plus faible que dans le cas des cristaux ioniques. Cette énergie de liaison a une valeur intermédiaire entre celle du carbone diamant (isolant) et celle de l'étain (conducteur), ce qui fait de ce type de matériau des « *semiconducteurs* ».

II-2. Semiconducteur intrinsèque

C'est un semiconducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier ses propriétés électroniques.

Les électrons de la bande de conduction ne pouvant résulter que de l'excitation thermique des électrons de la bande de valence, les trous et les électrons existent nécessairement par paires ($n = p = n_i$).

La bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC) d'un semiconducteur ne se chevauchent pas, mais sont séparées d'un gap énergétique.

Pour transformer le semiconducteur photosensible de composant passif en composant actif, il faut pouvoir générer un courant de porteurs, donc apporter une force qui obligera les électrons et les trous à s'écouler dans deux directions opposées. Cette force sera réalisée par un champ électrique interne provenant du *dopage* du semiconducteur. [13]

Les propriétés de ces semiconducteurs dépendent de la quantité de porteurs de charges (électrons et trous) qu'ils contiennent. Ainsi, le dopage consiste à introduire des atomes d'un autre élément dans le semiconducteur, qui apportera un excès d'électrons pour un dopage de type N (usuellement on utilise du phosphore) ou de trous pour un dopage de type P (généralement du bore) ce qui rendra le semiconducteur électriquement actif.

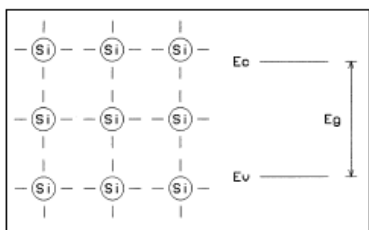


Fig. I-2 : Schéma du silicium pur

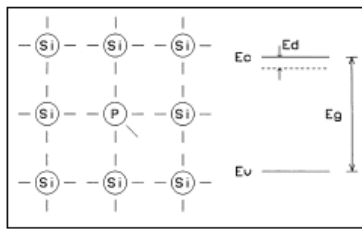


Fig. I-3 : Silicium de type n

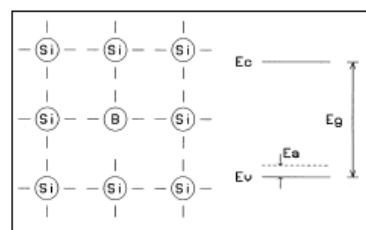


Fig. I-4 : Silicium de type p

II-3. Le silicium cristallin

Le silicium cristallin reste le matériau principal du photovoltaïque. En effet l'absorption optique du silicium permet une exploitation satisfaisante du spectre du soleil. Le silicium est aussi un élément abondant sur terre et sans doute le mieux connu des scientifiques suite aux recherches sur les technologies de fabrication pour l'industrie de la micro-électronique.

Le silicium apparaît sous différentes formes selon son mode d'élaboration : monocristallin, multi-cristallin, poly-cristallin ou amorphe. La différence entre ces types réside dans leur régularité cristallographique.

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet ainsi d'obtenir un meilleur rendement. Cependant, son coût est élevé à cause de son processus d'élaboration.

Pour le silicium multicristallin, les techniques d'élaboration sont moins onéreuses, mais sa qualité photovoltaïque est moins bonne, à cause de la présence des joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ceci a pour effet de réduire la durée de vie des porteurs minoritaires, et ils sont à l'origine des courants de fuite dans la cellule solaire.



Fig. I-5 : Photo d'un substrat de silicium multi-cristallin [15]

III- Les impuretés dans le silicium

Les impuretés peuvent occuper différents sites dans le réseau du silicium, des sites interstitiels (généralement pour les impuretés métalliques), ou des sites substitutionnels (pour les dopants B, P, Al...).

Les études sur l'activité électrique des impuretés dans le silicium cristallin divise les impuretés en quatre classes : [56]

- Les dopants (B, P, Al,...)
- Les diffuseurs rapides (Fe, Cr, Cu, ...)
- Les diffuseurs lents (Al, Ti, Au, ...)
- Les éléments légers (O, C, N, ...)

Concernant les défauts cristallographiques, on peut distinguer deux types :

III-1. Les défauts intra-granulaires

Le plus important vient des impuretés, telles que le Carbone ou l'oxygène, introduites essentiellement pendant la croissance du lingot. Leur influence sur les propriétés électroniques du silicium est cependant faible, bien qu'elles existent en concentration élevée. Elles peuvent toutefois devenir électriquement actives en s'associant avec d'autres défauts.

III-2. Les défauts inter-granulaires

Ces défauts correspondent aux joints de grains et sont une source importante de recombinaisons dans le volume du matériau.

IV- Rappel sur les cellules solaires

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire à l'aide d'un dispositif appelé : *Cellule Solaire*.

Le principe de cette cellule est de forcer les électrons et les trous du matériau semiconducteur la constituant, à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en volume. Ainsi, il apparaîtra une tension entre les deux faces, comme une pile. Pour cela, on s'arrange à créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction P-N entre deux couches dopées respectivement p et n. [19]

Dans cette jonction, il y a deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite du semiconducteur communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et *le courant électrique circule*.

L'effet photovoltaïque repose donc, sur trois principes : [46]

- L'absorption de photons;
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres;
- et, la collecte de ces particules dans un circuit électrique.

V- Paramètres importants et critiques dans une cellule solaire photovoltaïque

L'amélioration du rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque passe par une multitude de paramètres intrinsèques du matériau utilisé ; dont :

- La *durée de vie des porteurs minoritaires*, qui doit être la plus élevée possible.
- La surface de l'émetteur, quant à elle, doit présenter une *densité d'états la plus faible possible*.

- D'autre part, le *rendement de collecte* est un des facteurs important limitant le rendement, et qui est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photo-générés.

VI- Les différents types de recombinaisons

D'une façon très générale, on distingue deux types de recombinaisons dans un semiconducteur : [16]

- La recombinaison dite *directe bande à bande* où un électron de la bande de conduction franchit la bande interdite vers un état inoccupé de la bande de valence ;
- Et la *recombinaison indirecte* où l'électron de la bande de conduction transite par un niveau profond dans la bande interdite avant de se recombiner avec un trou de la bande de valence.

Lors de la recombinaison, une énergie égale à l'énergie de la paire électron-trou est réémise dans le réseau cristallin, soit sous forme de radiation par émission d'un ou plusieurs photons ; soit sous forme de chaleur par émission de phonons.

Ces types de recombinaisons se manifestent selon plusieurs mécanismes :

- La recombinaison radiative ;
- La recombinaison Auger ;
- Et, la recombinaison Schokley Read Hall (SRH).

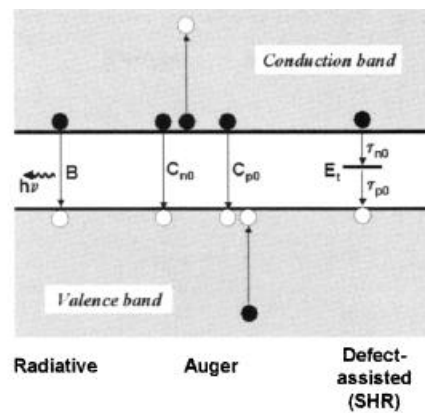


Fig. I.6 : Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semiconducteurs. Les directions des flèches indiquent la transition des électrons. [57]

VI-1. Les recombinaisons radiatives

Le processus de la recombinaison radiative ou inter-bandes est défini comme l'inverse du processus de la photo-génération. Ce processus est faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Silicium. De ce fait, ce mécanisme n'influe pas considérablement sur la durée de vie des porteurs minoritaires. [14]

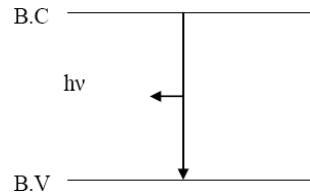


Fig. I-7 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif.

VI-2. Les recombinaisons Auger

Ce type de recombinaison est décrit comme un mécanisme à trois entités. En effet, l'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont considérées comme quasi-libres et n'interagissant pas entre elles.

La recombinaison Auger prédomine aux forts niveaux de dopage ($N > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) et elle réduit rapidement la durée de vie. Comme l'illustre la figure I-7, le mécanisme de recombinaison Auger est proportionnel au carré du dopage et il intervient surtout dans les zones fortement dopées de la cellule photovoltaïque comme l'émetteur (n+) ou la zone de champ de surface arrière (p+). [4]

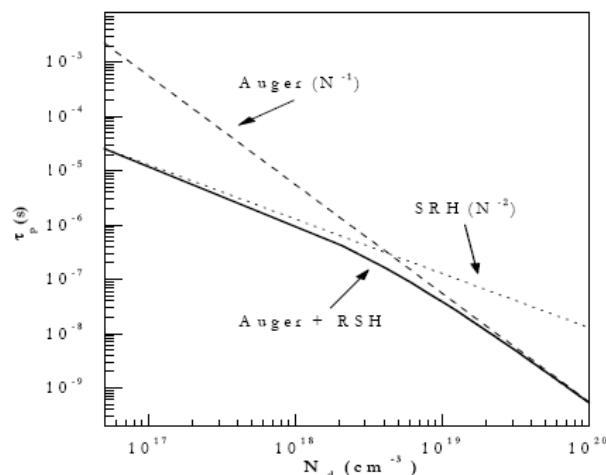


Fig. I-8 : Influence du dopage sur les durées de vie Auger et SRH dans le volume du silicium monocristallin. [4]

On peut citer aussi, les recombinaisons bande à bande assistées par phonons, qui impliquent deux électrons et un trou, et sont valables pour un semi conducteur indirect (cas du silicium) où, la participation de phonons à ce mécanisme est imposée par les lois de la conservation de l'énergie. D'autres part les recombinaisons Auger assistées par des niveaux peu profonds causées par l'augmentation des donneurs dans le silicium qui a la propriété d'augmenter la solubilité des lacunes, introduisant des niveaux d'énergies proches de la bande de conduction.

VI-3. Modèle de recombinaisons Schokley Read Hall (SRH)

Commençons tout d'abord par un rappel sur les niveaux profonds :

Les niveaux profonds sont des états permis dans la bande interdite par lesquels des porteurs libres excités peuvent transiter et retourner à leurs états d'équilibre [16]. Ils sont principalement dus à la présence d'impuretés métalliques (Cu, Fe, Au, ...), ainsi qu'à la présence

des dislocations dans le réseau cristallin. Ces niveaux sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs, en créant des centres de recombinaisons.

Recombinaison SRH

Elles sont liées à la présence d'impuretés ou de défauts (dislocations, lacunes, ...) au sein de la structure cristalline du silicium. Cela induit la présence de niveaux d'énergies discrets au sein du gap du matériau. Ces niveaux (pièges) facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes (voir figure).

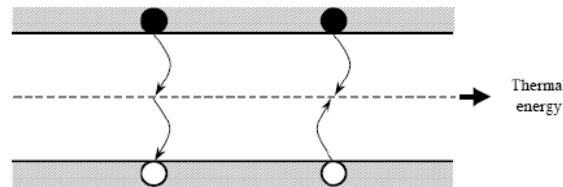


Fig. I-9 : Mécanisme de recombinaison SRH. [15]

Un électron va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence. C'est sur ce type de recombinaisons que la passivation par hydrogène ou le gettering pourront avoir effet en neutralisant les pièges.

VI-4. Recombinaisons de surface

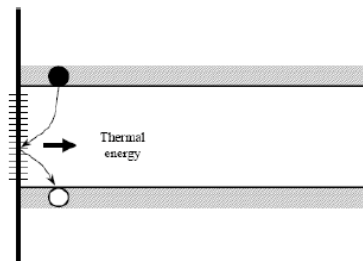


Fig. I-10 : Mécanisme de recombinaison de surface. [15]

La surface représente une forte discontinuité de la structure cristalline du silicium. L'interruption brutale de la périodicité du cristal entraîne de nombreux défauts structuraux, introduisant dans le gap du silicium des niveaux énergétiques qui vont assister les phénomènes de recombinaison. Ces défauts sont principalement des liaisons pendantes, c'est-à-dire des atomes de silicium auxquelles il manque une liaison covalente et qui ne sont donc pas dans une configuration électronique stable.

On peut dire dans ce cas que les recombinaisons sont formulées par unité de surface et non pas par unité de volume. D'autre part, on peut considérer que ces défauts du fait de leur grand nombre, sont distribués d'une façon continue dans tout l'intervalle d'énergie du gap. Il existe deux manières pour réduire les recombinaisons à la surface du semiconducteur : [15]

- La première consiste à réduire la portée des états de surface en minimisant la densité d'état d'interface D_{it} ainsi que l'amplitude des sections de capture efficaces.

- La deuxième consiste à une passivation par effet de champs afin de réduire la concentration de porteurs minoritaires en surface (cas du BSF 'back surface field' par exemple).

En pratique, pour le silicium cristallin, on a recours à des dépôts d'un oxyde SiO_2 ou des surfaces de nitrures de silicium SiN_x .

VI-5. Technologie pour la réduction des pertes dues à la recombinaison

Les pertes dues à la recombinaison des porteurs affectent à la fois le courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{oc} . On différencie en général les phénomènes de recombinaison ayant lieu en surface de ceux ayant lieu dans le volume de la cellule. Les moyens de réduction ces recombinaisons passent nécessairement par la neutralisation de l'activité électrique des défauts en utilisant la passivation surfacique/volumique et le gettering.

VII- Influence du dopage sur la qualité de transport des semiconducteurs

VII-1. Effet du dopage sur la densité d'états d'interface

Des travaux menés par Snel [16] ont montré que les valeurs de densité des états d'interface sont fonction croissante de la concentration de dopage dans le matériau.

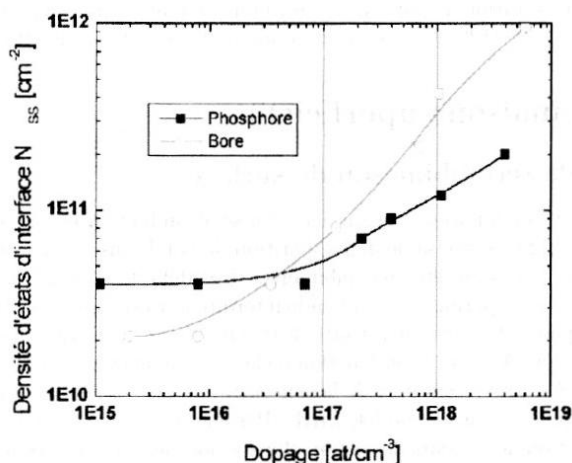


Fig. I-11 : Densité d'états d'interface (à 0,8eV) en fonction de la concentration de bore et de phosphore à l'interface oxyde-silicium [16]

La dépendance suit le type de dopant utilisé. Ainsi le bore introduit une densité d'états d'interface plus grande que le phosphore, ce qui rend la passivation plus facile pour une surface dopée n que p. Ceci explique, entre autres, l'utilisation des émetteurs de type n.

VII-2. Effet du dopage sur la mobilité des porteurs minoritaires et la longueur de diffusion

La durée de vie des porteurs dépendra du mécanisme de recombinaison le plus dominant. Jusqu'à un certain dopage, le matériau affiche une valeur de durée de vie constante avant de diminuer rapidement en fonction de l'inverse du carré de la concentration (recombinaison Auger). C'est pour cette raison que la modélisation des émetteurs des cellules solaires rencontre des difficultés avec des paramètres qui varient avec le dopage.

La dégradation de la durée de vie a pour effet de réduire la longueur de diffusion des porteurs minoritaires L_d , elle peut s'écrire sous la forme :

$$L_d = \sqrt{D \tau} \quad \text{I-1}$$

Où : τ est la durée de vie et D (cm^2/s) est le coefficient de diffusion associé.

VIII- Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque – courant de saturation

La structure d'une cellule solaire est équivalente à une diode à jonction, sous illumination c'est une diode polarisée en direct.

La figure suivante représente une cellule solaire sous illumination débitant sur une charge. Nous pouvons diviser cette cellule en trois parties différentes :

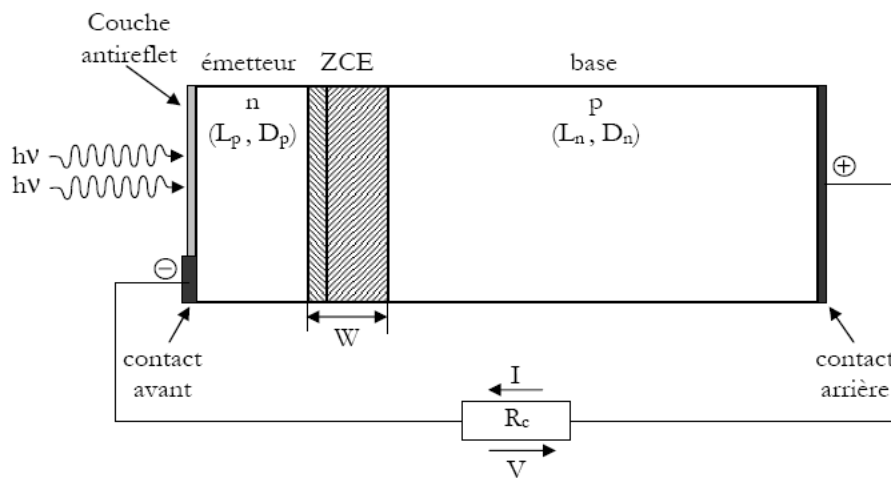


Fig. I-12 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire débitant sur une charge. [4]

- La zone de quasi-neutralité (ZQN) de l'émetteur
- La zone de charge d'espace (ZCE)
- La ZQN de la base

Dans ce cas, le courant traversant la cellule solaire est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad \text{I-2}$$

Une façon très simple d'optimiser la cellule est d'augmenter le premier terme et d'en diminuer le deuxième.

Le terme I_0 est le courant de saturation. En court circuit, la tension V s'annule et le courant I sera le courant de court circuit I_{cc} . A partir de l'équation (I-2) et en supposant que $I_{ph} \gg I_0$, la tension de circuit ouvert peut s'écrire sous la forme :

$$V_{oc} \sim \ln(I_{ph}/I_0) kT/q \quad \text{I-3}$$

On pourra facilement déduire que le courant fourni par la cellule est d'autant plus grand que I_0 est faible.

Le courant de saturation peut s'écrire sous la forme :

$$I_0 = q n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} f_e + \frac{D_p}{L_p N_D} f_b \right) = I_{0e} + I_{0b} \quad \text{I-4}$$

Les termes N, L, et D sont respectivement le dopage, la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la région considérée. f_e et f_b sont les facteurs géométriques de l'émetteur et la base.

VIII-1. Réponse spectrale et rendement quantique d'une cellule solaire photovoltaïque

La réponse spectrale est notée R_s , elle est donnée par la relation suivante :

$$R_s = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad \text{I-5}$$

Avec h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide et q est la charge de l'électron. EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents.

La mesure de la réponse spectrale, nous permet de distinguer d'une manière plus précise les phénomènes de recombinaison aux surfaces et dans le volume de la cellule photovoltaïque.

En tenant compte des pertes par réflexion totale (R_T), nous pouvons déterminer le nombre des photons interagissant avec le silicium, ce qui définit la notion du rendement quantique interne IQE :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{(1-R_T)} = \frac{1}{(1-R_T)} \frac{hc}{q\lambda} R_s \quad \text{I-6}$$

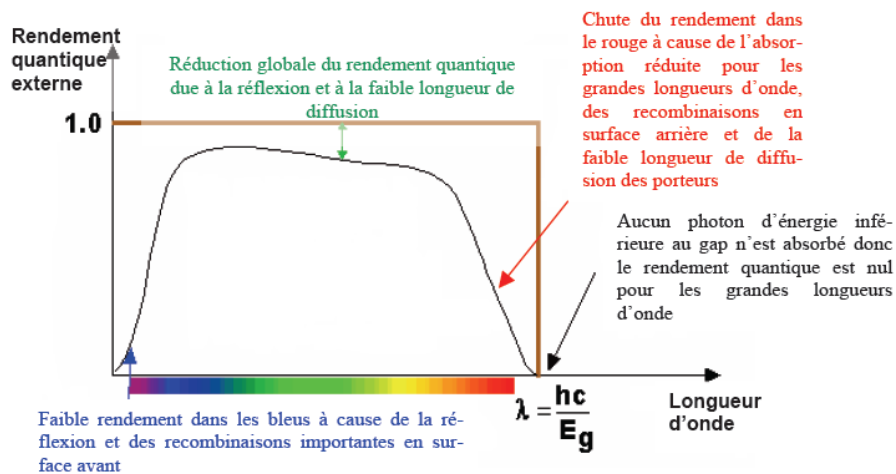


Fig. I-13 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [47]

VIII-2. Caractéristique courant – tension d'une cellule solaire

La figure suivante représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire photovoltaïque sous obscurité et sous éclaircissement. Tous les points importants (V_M , I_M , V_{co} , I_{cc}) permettant la détermination des grandeurs photovoltaïques caractéristiques sont représentés.

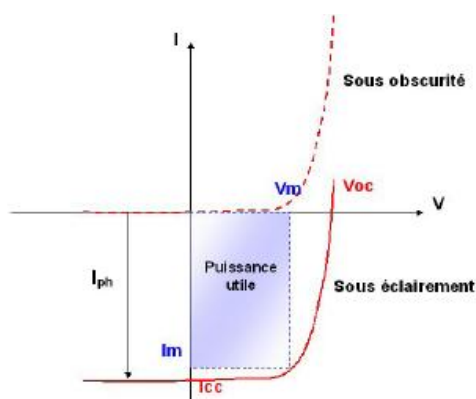


Fig. I-14 : Schéma d'une caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire photovoltaïque sous obscurité et sous illumination [49]

IX- Modélisation électrique d'une cellule solaire photovoltaïque

Nous présentons le modèle à deux diodes :

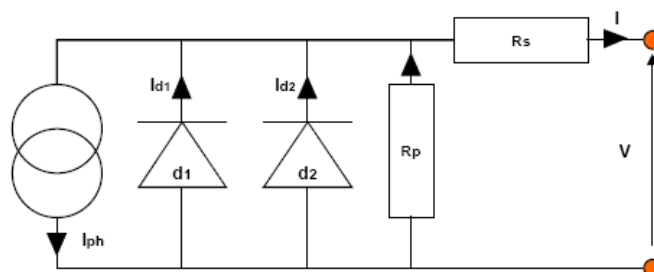


Fig. I-15 : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque [49]

Les différents paramètres de ce modèle sont :

Le générateur de courant : Il délivre le courant I_{ph} (courant photo-généré).

La résistance série R_s : Elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur la tension de la cellule.

La résistance parallèle R_p : Egalement résistance de court-circuit, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut.

Physiquement, la résistance série dépend de la géométrie de la grille de collecte et de la technique utilisée dans la réalisation des contacts métalliques (sérigraphie, évaporation sous vide, photolithographie, ...).

La diode $d1$: Modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur.

La diode $d2$: Modélise la génération / recombinaison des porteurs dans la ZCE.

X- Grandeurs essentielles caractérisant une cellule solaire

La connaissance des caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire est très importante car elle fournit de nombreuses informations permettant de connaître la nature et le site des différentes pertes du rendement de conversion et du facteur de forme. L'identification de

ces pertes permet de mieux les cerner et ainsi de fixer les différents axes de recherche pour un meilleur développement des performances des cellules photovoltaïques. En effet, une cellule solaire photovoltaïque peut être schématisée de la façon suivante :

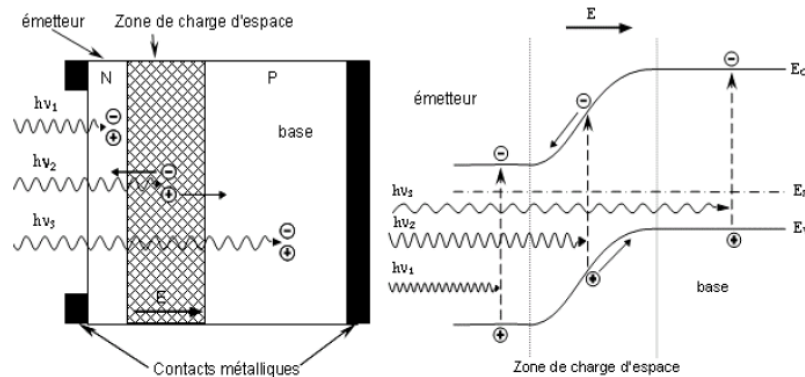


Fig. I-16 : Structure d'une cellule photovoltaïque avec son diagramme de bande [47]

a- Courant de court – circuit I_{cc}

Le courant de court circuit I_{cc} d'une cellule photovoltaïque obtenu pour une tension $V=0$, caractérise la quantité des paires électrons trous créés G qui traverse la jonction sans être recombinées et ce entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) :

$$I_{cc} = q G (L_n + L_p) \quad \text{I-7}$$

b- Tension en circuit ouvert V_{oc}

Sous obscurité ($I=0$), la cellule fournit un courant égal au courant de court circuit I_{cc} pour une tension, appelée tension en circuit ouvert V_{oc} .

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad \text{I-8}$$

I_0 : Le courant de saturation de la diode qui détermine le nombre des porteurs collectés à l'obscurité par effet de température.

T : la température en degré Kelvin. k : la constante de Boltzmann

c- Facteur de forme FF

Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement. Il est défini par le rapport de la puissance maximale P_M et de la valeur du produit $I_{cc} \cdot V_{co}$:

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad \text{I-9}$$

d- Rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0 .

$$\eta_M = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{P_0} = \frac{I_M V_M}{P_0} \quad \text{I-10}$$

XI- Conclusion

Ce premier chapitre a été réservé à un rappel sur la conversion solaire et principalement à la cellule solaire conventionnelle ainsi que son mode de fonctionnement. La structure cristalline des semiconducteurs, qui est la base de la cellule solaire et spécialement le silicium cristallin, a été présentée aussi. Etant donné, qu'il est le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires.

Les paramètres critiques et essentiels de la cellule solaire, vus leurs importances ont été présentés, en présentant aussi les facteurs influençant le rendement de la cellule photovoltaïque, et en mettant l'accent plus spécialement sur les paramètres électriques de la cellule, qui affecteront bien évidemment la durée de vie des porteurs minoritaires, dont toute la collecte du courant photo-généré dépendra.

Durant leur trajet vers les contacts métalliques, des porteurs photo-générés peuvent se recombiner dans le volume ou à la surface de la cellule, ce qui affecte la durée de vie des porteurs minoritaires. De ce fait, nous avons prêtés une très grande attention à la définition du phénomène de recombinaison ainsi que ses différents types et évidemment, les techniques de les réduire. Une partie de ce chapitre a été dédiée à l'influence du dopage sur la qualité de transport dans le silicium.

Les propriétés électriques de la cellule solaire, ainsi que les grandeurs essentielles la caractérisant ont été développées vers la fin du présent chapitre.

Dans la suite, nous allons situer la position de l'industrie photovoltaïque et plus spécialement la production du silicium destiné à cette industrie.