

Dopage des semi-conducteurs

Face au tarissement des énergies fossiles (pétrole, charbon, nucléaire) et au réchauffement climatique, mais également face à la croissance mondiale de la demande énergétique, le développement des sources d'énergie propre semblent de plus en plus nécessaire.

Ainsi, la prise de conscience de l'enjeu que constitue l'énergie pousse les scientifiques à mener des recherches dans le domaine des énergies renouvelables et plus précisément dans l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectrique. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Il a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel et présenté à l'académie en 1839. [1]

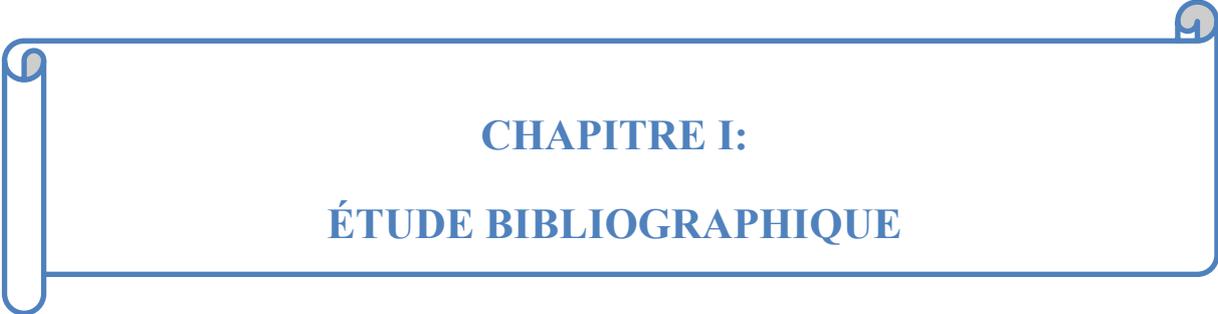
L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiode, phototransistor ou photopiles. Avec un rendement de 10% à 20% [2], l'énergie solaire constitue la source d'énergie la plus rentable parmi les autres énergies renouvelables car il présente des avantages tels que : l'abondance, l'absence de toute pollution et sa disponibilité. Quand une photopile est éclairée par une énergie supérieure à l'énergie de « gab », il se produit un processus de génération, de diffusion des paires- électron trous et de recombinaison. Le processus de recombinaisons [3] réduit la collecte des porteurs de charges photogénérés et par conséquent aussi le rendement de la cellule solaire. Pour avoir une cellule solaire de meilleur rendement de conversion, les scientifiques ont accentué leur recherche sur plusieurs axes de fabrication et de conception des cellules solaire (substrat, réduction de la taille et de la forme) [4][5]. Pour une meilleure étude des photopiles, trois axes de recherche ont été développés [18] en régime dynamique transitoire [6], en régime dynamique fréquentiel [7] et en régime statique [8].

Ainsi, on passe des cellules solaires monofaciales au silicium monocristallin, polycristallin et amorphe aux cellules solaires bifaciales [9][10] au silicium monocristallin et polycristallin [11][12][13]. Pour réaliser, ensuite, des cellules solaires à faible coût et toujours au meilleur rendement, des cellules à multijonction verticales (VMJ) ont été fabriquées [14]. Il existe deux types de VMJ [15] en fonction de la connexion entre les cellules, afin d'améliorer, soit le courant photogénéré ou la tension. Ainsi, VMJ connecté en série [16] et VMJ connecté en parallèle [17] ont été traités. Ce qui a permis aux porteurs de charges minoritaires en excès de faible longueur de diffusion d'être mieux collectés, indépendamment de la cristallinité du silicium utilisé (polycristallin ou monocristallin).

L'objectif de notre étude est d'augmenter le rendement de la photopile à jonction verticale série, sous éclairage polychromatique et en régime statique, en réduisant au maximum les pertes par recombinaison à la face arrière. Pour cela, nous allons optimiser l'épaisseur de la base par la méthode de l'intersection des courbes des vitesses de recombinaison à la face arrière.

Dans le premier chapitre, nous ferons une étude bibliographique sur les méthodes de caractérisations et de détermination des paramètres électriques d'une photopile. Dans le second chapitre, après une présentation de la photopile à jonction verticale série, nous ferons une étude théorique de la photopile à jonction verticale série sous éclairage polychromatique. Puis, nous déterminerons l'épaisseur optimale de la base par la méthode de l'intersection des courbes des vitesses de recombinaison à la face arrière.

Pour cela, grâce au logiciel matlab, nous représenterons les courbes de la densité des porteurs minoritaires de charges en fonction de l'épaisseur de la base, pour différentes valeurs de S_f , du nombre de soleil, en court-circuit et en circuit ouvert; du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) pour différentes épaisseurs de la base, du nombre de soleil (n) et du coefficient de diffusion D ; le profil des courbes des vitesses de recombinaison à la face arrière sera aussi tracé en fonction de la longueur de diffusion et de l'épaisseur de la base. Ce dernier nous permettra de déterminer les épaisseurs optimales correspondants à chaque coefficient de diffusion, c'est-à-dire chaque taux de dopage. Et pour finir ce travail, nous allons dégager une conclusion et proposer quelques perspectives sur la suite de cette étude.



CHAPITRE I:
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

La photopile, appareil transformant directement un rayonnement lumineux en énergie électrique, est un élément essentiel de la chaîne de conversion photovoltaïque et toute amélioration de ses performances est un gain pour la production d'énergie. C'est dans le but d'améliorer leur rendement que de nouvelles générations de cellules solaires appelées photopiles à jonction verticale voient le jour. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord quelques généralités sur les semi-conducteurs, ensuite nous parlerons du dopage de ces derniers et enfin nous terminerons par faire l'état de l'art des travaux dans la caractérisation de photopiles.

I.1. Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible est suffisamment importante. Pour résumer, un semi-conducteur, comme son nom l'indique possède des caractéristiques électriques intermédiaires entre celles des métaux et des isolants. Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des «trous» qu'ils laissent dans la bande de valence. Les semi-conducteurs typiques sont le silicium et le germanium. Ils appartiennent à la colonne IV du tableau périodique des éléments. Certains cristaux composés de différents éléments peuvent également présenter des propriétés semi-conductrices. Il existe notamment des semi-conducteurs dits III-V et II-VI. Les semi-conducteurs composés III-V comprennent des éléments des colonnes III et V du tableau périodique des éléments, comme par exemple l'arséniure de gallium GaAs (largeur du gap 1,424 eV) ou le phosphore d'indium InP. Les semi-conducteurs composés II-VI sont constitués par des éléments des colonnes II et VI comme le sulfure de cadmium CdS. Beaucoup de ces semi-conducteurs composés restent à l'heure actuelle des sujets de recherche, car ils sont difficiles et coûteux à fabriquer, et leurs propriétés et capacités encore mal maîtrisées. En outre, leur application est rarement l'électronique logique ou petit signal, mais bien souvent l'optoélectronique (diodes laser, photorécepteur...) ou l'électronique de puissance.

Cependant, le silicium est le matériau semi-conducteur le plus courant à l'échelle mondiale, le plus utilisé commercialement (représentant plus de 90% des cellules PV mises sur le marché **[I-1]**), du fait de ses bonnes propriétés (il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V et il peut se doper facilement **[I-2]**), de son abondance naturelle, et il est très facile à extraire et à traiter. Le silicium, étant isolé en 1824 par le Suédois Jöns Jacob Berzelius, ce n'est qu'en 1854 que le français Henri Sainte-Claire-Deville obtient un échantillon pur et cristallisé. Le silicium est un élément chimique (symbole : Si) non métallique, de numéro atomique 14, de

masse atomique 28,08. Il existe trois isotopes naturels stables ^{28}Si (92,3%), ^{29}Si (4,7%), ^{30}Si (3%). Le silicium abonde dans toutes les roches courantes (excepté les calcaires); sa teneur dans la croûte terrestre est estimée à 27 % en masse, ce qui le classe au second rang, après l'oxygène. On ne le trouve jamais à l'état natif, mais plutôt sous forme de silice (dioxyde de silicium, SiO_2 , composant principal du sable) et de silicates (en particulier d'aluminosilicates). Les feldspaths, constituants prédominants de la plupart des roches magmatiques (tels les granites) et métamorphiques, sont des aluminosilicates.



Figure I- 1: Centrale de 20 mégawatts-crête inaugurée par le président, Bokhol, Sénégal [1]

[1]<http://www.rfi.fr/afrique/20161023-senegal-bokhol-macky-sall-inaugure-plus-grande-centrale-solaire-afrique-ouest>

I.2. Dopage des semi-conducteurs

Le dopage consiste à introduire des impuretés à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque. Le silicium intrinsèque a en effet des applications pratiques limitées: photorésistance, thermistance. La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Les matériaux ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques.

I.2.1. Rôle du dopage

On dope les semi-conducteurs pour le contrôle local de la résistivité, l'ajustement de la tension seuil, la création de barrières de potentiel ou jonctions et la réalisation de couches d'arrêt de gravure (etch-stop)

I.2.2. Les types de dopage

On distingue le dopage homogène (au tirage du monocristal), homogène en surface (pendant l'épitaxie) et localisé en profondeur et en volume.

I.3.4. Silicium dopé N

On obtient un semi-conducteur de type N en dopant le cristal de silicium avec des atomes pentavalents. On utilise ainsi le phosphore ou l'arsenic appartenant à la colonne V dans le tableau de classification périodique des éléments. Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons covalentes. Le 5^{ème} électron inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

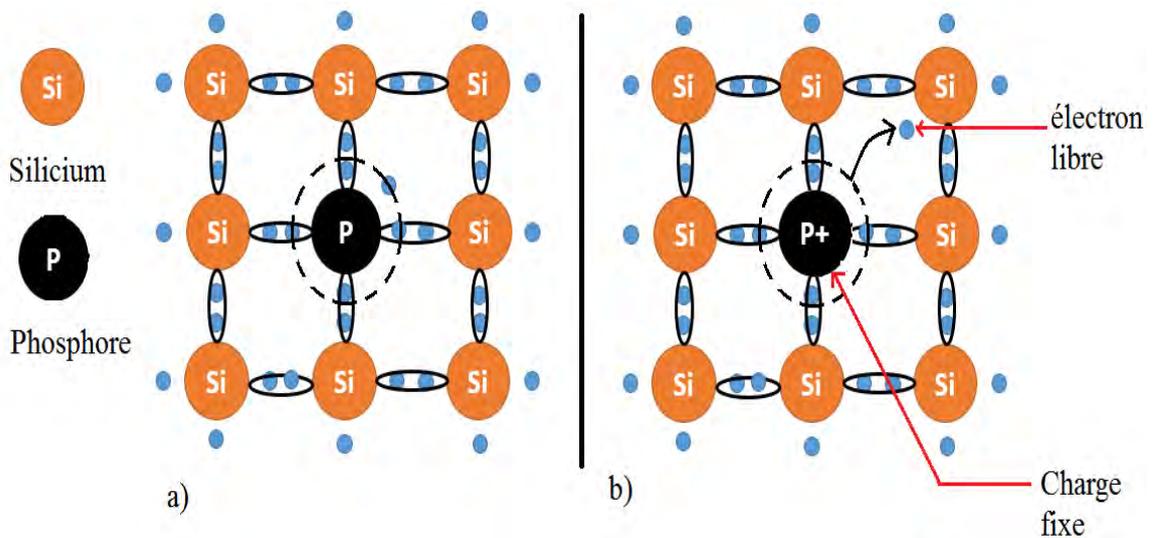


Figure I- 2: Silicium dopé au phosphore. a) $T=0\text{ K}$. b) $T \neq 0\text{ K}$

I.3.5. Silicium dopé P

On obtient un semi-conducteur P en injectant dans le silicium des atomes trivalents comme le bore (ou l'indium). Il manque un électron à l'atome de bore pour réaliser des liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entoure. En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout se passe alors comme si un des atomes de silicium voisins avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium. L'atome de bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin est appelé accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

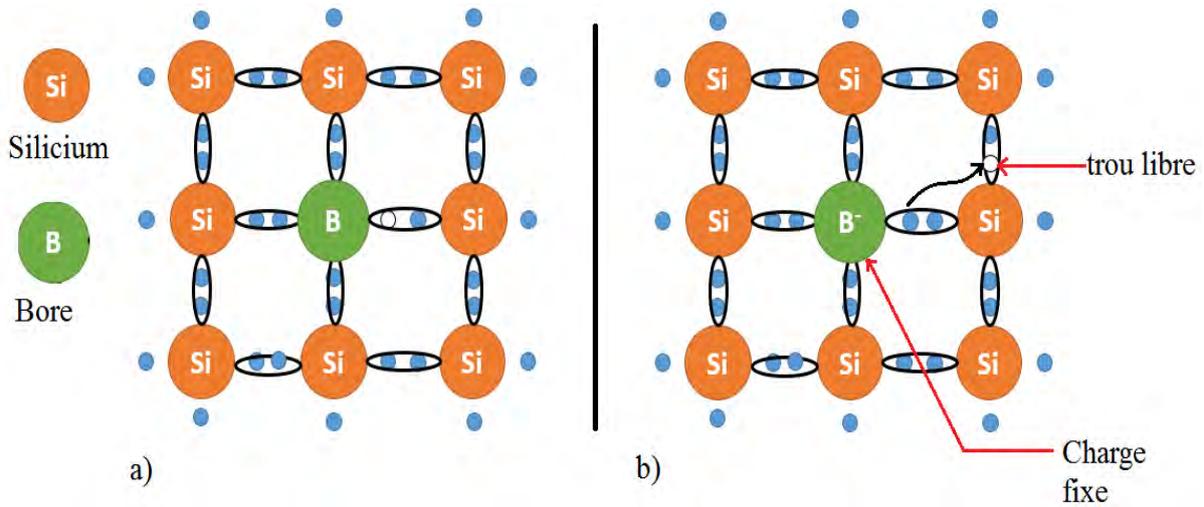


Figure : Silicium dopé au bore. a) $T = 0 \text{ K}$. b) $T \neq 0 \text{ K}$

Lorsqu'un semi-conducteur N (respectivement P) contient une importante proportion de dopants, sans être, pour autant, dégénéré, il est parfois dit dopé N^+ (respectivement P^+)

I.3.6. Formation de la zone de charge d'espace ZCE (**zone de déplétion**)

Considérons deux barreaux de Silicium : l'un dopé P au bore, l'autre dopé N au phosphore. Lorsqu'une surface de cristal de semi-conducteur dopé P est mise en contact avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé N, au niveau de ce contact physique appelé jonction dite "métallurgique", les électrons (majoritaires) de la zone N diffusent vers la zone P et les trous (majoritaires) de la zone P diffusent vers la zone N. A l'équilibre, il existe donc une zone sans charge mobile, appelée **zone de déplétion** ou **zone de charge d'espace** (ZCE) constituée par les ions donneurs positifs dans la zone N et les ions accepteurs négatifs dans la zone P; une différence de potentiel entre la zone N et la zone P, appelée **potentiel de jonction** apparaît également à l'équilibre. Pour les diodes à base de Silicium, ce potentiel est de l'ordre de 0,6V. La barrière de potentiel équilibre les phénomènes de diffusion et engendre l'apparition d'un champ électrique interne permettant la séparation des paires électron-trous photogénérées. La ZCE peut être plus large d'un côté ou d'un autre selon les concentrations relatives en électrons et en trous. Si les trous sont en plus grandes proportion que les électrons, ils se diffuseront plus et la ZCE sera plus large dans la zone N que dans la zone P. Inversement, si les électrons sont majoritaires par rapport aux trous, la ZCE sera plus large dans la zone P que dans la zone N.

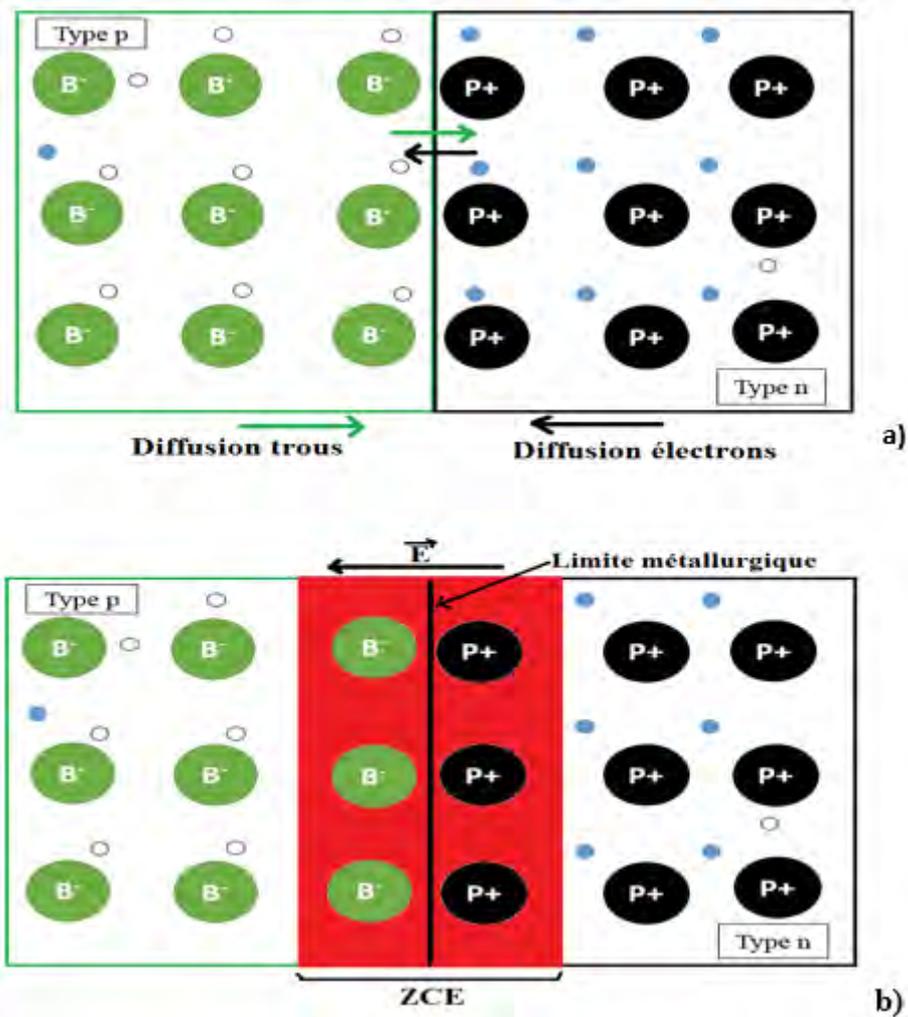


Figure I- 3 : Formation de la jonction P-N

I.2. Etat de l'art sur les techniques de caractérisation des photopiles

Les techniques de caractérisation sont les voies et moyens permettant de déterminer les paramètres de recombinaison d'une photopile. Ces paramètres de recombinaison sont de deux types : les paramètres phénoménologiques et les paramètres électriques.

VERTICAL JUNCTION CELL [1] :(Cellule à jonction verticale)

Dans cet article, différents concepts de base sur lesquels reposent les nouveaux types de photopile à multi jonction verticale sont présentés par les auteurs. Ainsi d'après eux, on distingue essentiellement deux types de photopile à multi jonction verticale : les photopiles à multi jonction connectées en parallèle et les photopiles à multi jonction verticale, éclairées par leur face avant et branchées en série représentées par les figure (I-1) et (I-2). Elles présentent des structures qui permettent de collecter le maximum de porteurs. La collecte peut être faite sur toute la section de porteurs. Leur connexion en série devrait présenter des difficultés lorsque le matériau de base est soumis à un éclairage non uniforme. Cependant, elles peuvent être surmontées grâce à une connexion en parallèle des cellules. La jonction verticale dans ces types de photopile, est obtenue par la gravure sur la surface du substrat qui constitue, comme nous l'indique les figures (I-1) et (I-2) suivantes.

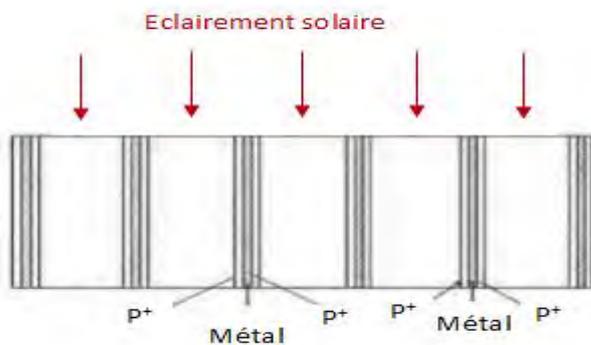
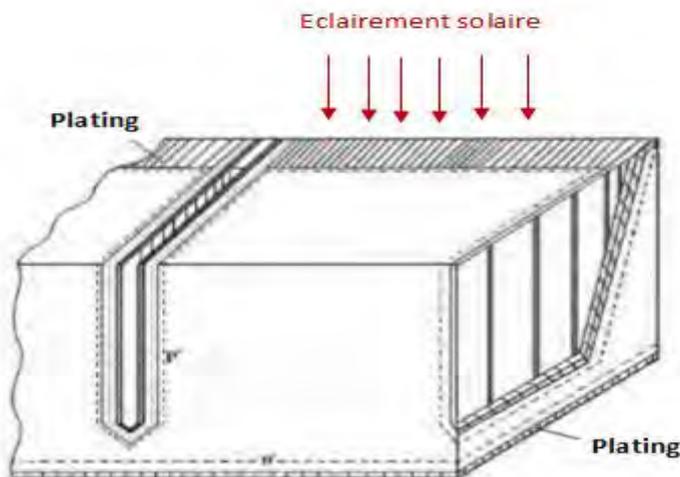


Figure I-1 : Cellules solaires à multi jonctions verticales connectées en série



FigureI-2_: Cellules solaires à multi jonctions verticales obtenues par gravures connectées en parallèle

D'après les auteurs, les points de contact sur la surface de la photopile jouent un rôle important pour le bon fonctionnement de photopiles de concentration au silicium. Ils sont directement liés au contact arrière qui sont souvent en IBC (Interdigitated Back Contact c'est-à-dire contact arrière interdigité). Cependant, les auteurs ont notés quelques différences non négligeables entre ces points de contact pour la face avant et les IBC pour la face arrière. La principale différence entre les photopiles munies de points de contact et d'IBC se trouve au niveau des zones de diffusion qui sont restreintes possédant ainsi de petites poches plutôt que les longs doigts. Ces petites poches sont arrangées sur la face arrière de la cellule sous forme de damier "chequerboars" c'est-à-dire les zones de type-n et de type-p ont des couleurs différentes d'où la structure en damier. L'autre différence est que, les zones de diffusions au niveau des contacts métalliques sont plus petites et sont limités par de petites secteur. Il faut noter que les vitesses de recombinaisons sur toute la surface de la face avant de la photopile sont faibles. Ainsi, pour collecter le maximum de porteurs, il suffit de maintenir leur épaisseur aussi faible que possible. Une telle approche a permis obtenir vers les années 1986 des rendements de 27,5%.

Paramètres électriques d'une photopile bifaciale en régime statique en fonction des vitesses de recombinaison : effet du niveau d'éclairement [3]

Dans cet article, les auteurs ont développé des concepts vitesses de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit $S_{fcc\alpha}$ et limitant le circuit ouvert $S_{fco\alpha}$ pour différent mode d'éclairement de la cellule solaire. La résolution des équations suivantes a permis aux auteurs d'obtenir les expressions des vitesses de recombinaison:

$$J_{ph\alpha}(Sf_{\alpha}) - J_{cc\alpha} = 0 \quad (I-3-1)$$

$$V_{ph\alpha}(Sf_{\alpha}) - V_{co\alpha} = 0 \quad (I-3-2)$$

Pour chaque mode d'éclairement, les auteurs ont obtenu les expressions suivantes des vitesses de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit $S_{fcc\alpha}$ et limitant le circuit ouvert $S_{fco\alpha}$ sont données par :

- éclairement par la face avant

$$S_{fcc1}(n, J_{cc}, m) = \frac{\psi(n, J_{cc}) \cdot D^2 \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \psi(n, J_{cc}) \cdot S_b \cdot L \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) - LD^2 \sum_{i=1}^3 b_i \cdot K_i}{- \left(L^2 \cdot \psi(n, J_{cc}) \cdot S_b \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right) - \psi(n, J_{cc}) \cdot L \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + LD \cdot X(m) \sum_i K_i - L \sum_{i=1}^3 K_i \cdot E_i(i, m)} \quad (I-3-3)$$

$$S_{fco1}(n, V_{co}, m) = \frac{\alpha_1 \cdot D^2 \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot S_b \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \alpha_1 - L \sum_{i=1}^3 K_i \cdot \gamma_1 - L \cdot D \cdot \Pi \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \cdot b_i}{-\alpha_1 \cdot L^2 \cdot S_b \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) - \alpha_1 \cdot L \cdot \Pi \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot \Pi \cdot \sum_{i=1}^3 K_i} \quad (\text{I-3-4})$$

Avec:

$$E(i, m) = L \cdot (S_b(m) - D b_i) \cdot e^{-b_i \cdot H} \quad (\text{I-3-5})$$

$$\psi(n, J_{cc}) = L \cdot \left[\frac{J_{cc}}{q \cdot D} - \sum_{i=1}^3 (-b_i \cdot K(i, n)) \right] \quad (\text{I-3-6})$$

$$\alpha_1(n, V_{co}) = \frac{n_i^2}{N_b} \cdot \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) + \sum_{i=1}^3 K_i \quad (\text{I-3-7})$$

$$\gamma_1(i, m) = D \cdot (S_b - D b_i) \cdot e^{-b_i \cdot H} \quad (\text{I-3-8})$$

- éclairément par la face arrière

$$S_{fcc2}(n, J_{cc}, m) = \frac{-\left[\alpha(n, J_{cc}) \cdot D^2 \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \alpha(n, J_{cc}) \cdot S_b \cdot L \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot D \cdot X(m) \sum_{i=1}^3 b_i \cdot K_i \cdot e^{-b_i \cdot H} \right]}{L^2 \cdot \alpha(n, J_{cc}) \cdot S_b \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \alpha(n, J_{cc}) \cdot L \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L^2 \cdot \sum_i^3 K_i \cdot S_b - L \cdot X(m) \sum_{i=1}^3 K_i \cdot e^{-b_i \cdot H}} \quad (\text{I-3-9})$$

$$S_{fco2}(n, V_{co}, m) = \frac{\alpha_2 \cdot D^2 \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot S_b \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \cdot \alpha_2 - L \sum_{i=1}^3 K_i \cdot \beta + L \cdot D \cdot \Pi \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \cdot b_i \cdot e^{-b_i \cdot H}}{-\alpha_2 \cdot L^2 \cdot S_b \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) - \alpha_2 \cdot L \cdot D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot \Pi \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \cdot e^{-b_i \cdot H}} \quad (\text{I-3-10})$$

Avec

$$X(m) = D.\sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L.S_b.\cos\left(\frac{H}{L}\right) \quad (\text{I-3-11})$$

$$\alpha(n, J_{cc}) = L.\left[\frac{J_{cc}}{q.D} - \sum_{i=1}^3 b_i.K_i.e^{-b_i.H}\right] \quad (\text{I-3-12})$$

$$\alpha_2(n, V_{co}) = \frac{n_i^2}{N_b}.\left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1\right) + \sum_{i=1}^3 K_i.e^{-b_i.H} \quad (\text{I-3-13})$$

$$\beta(i, m) = D.(S_b + D.b_i) \quad (\text{I-3-14})$$

- double éclaircissement

$$S_{fcc3}(n, J_{cc}, m) = \frac{\Pi.L.\sum_{i=1}^3 K_i.D.b_i - L\Pi.\sum_{i=1}^3 K_i.D.b_i.e^{-b_i.H} - \theta.\sin\left(\frac{H}{L}\right)D^2 - \theta.L.D.S_b.\cos\left(\frac{H}{L}\right)}{\theta.\sin\left(\frac{H}{L}\right)L^2.S_b + L.D.\cos\left(\frac{H}{L}\right).\theta + L\sum_{i=1}^3 K_i.\gamma - L\Pi.\left[\sum_{i=1}^3 K_i + \sum_{i=1}^3 K_i.e^{-b_i.H}\right]} \quad (\text{I-3-15})$$

$$S_{fco3}(n, V_{co}, m) = \frac{\alpha_3.D^2.\sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L.S_b.D.\cosh\left(\frac{H}{L}\right).\alpha_3 - L\sum_{i=1}^3 K_i.\gamma_3 - L.D.\Pi.\sum_{i=1}^3 K_i.b_i + L.D.\Pi.\sum_{i=1}^3 K_i.b_i.e^{-b_i.H}}{L.\Pi.\sum_{i=1}^3 K_i.e^{-b_i.H} - \alpha_3.L^2.S_b.\sinh\left(\frac{H}{L}\right) - \alpha_3.L.D.\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L.\Pi.\sum_{i=1}^3 K_i}$$

(I-3-16)

Avec

$$\theta(n, J_{cc}) = L.\left[\frac{J_{cc}}{q.D} - \sum_{i=1}^3 (b_i.K_i.e^{-b_i.H} - b_i.K_i)\right] \quad (\text{I-3-17})$$

$$\gamma(i, m) = L.\left[S_b + D.b_i - (D.b_i - S_b.e^{-b_i.H})\right] \quad (\text{I-3-18})$$

$$\Pi(m) = D.\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L.S_b.\sinh\left(\frac{H}{L}\right) \quad (\text{I-3-19})$$

$$\alpha_3(n, V_{co}) = \frac{n_i^2}{N_b} \left(e^{\frac{V_{co}}{V_r}} - 1 \right) + \sum_{i=1}^3 K_i \cdot (1 + e^{-b_i \cdot H}) \quad (\text{I-3-20})$$

$$\Delta(i, m) = D \cdot [S_b + D \cdot b_i + (S_b - D \cdot b_i) \cdot e^{-b_i \cdot H}] \quad (\text{I-3-21})$$

L'effet du niveau d'éclairement sur les vitesses de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit et limitant le circuit ouvert est étudié. Ainsi, l'auteur a montré que la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit comme le courant de court-circuit croît avec le niveau d'éclairement. Ce résultat est dû à la proportionnalité entre la densité des porteurs minoritaires de charge et le niveau d'éclairement. Il a également montré que la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert et la tension de circuit ouvert croît avec le niveau d'éclairement.

Recombination parameters measurement of silicon solar cell under constant white bias light [4]

L'objectif de cet article est développé de nouveaux concepts de la vitesse de recombinaison à la jonction et à la face arrière d'une photopile à jonction horizontale sous éclairage polychromatique en régime statique. Les auteurs ont proposé des techniques expérimentales de détermination de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires et de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.

La résolution de l'équation de continuité permet d'obtenir la densité des porteurs en se basant sur les conditions aux limites. A partir de ce résultat, les auteurs en ont déduit les expressions de la densité de du photocourant et de la phototension.

Le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction donne un gradient nul pour des grandes valeurs de cette vitesse de recombinaison à la jonction.

C'est à partir de ce profil que les auteurs ont établi la relation ci-dessous qui permet de déterminer la vitesse de recombinaison à la face arrière :

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f} = 0 \quad (\text{I-4-1})$$

A partir de cette équation, l'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière est déduite et donnée par la relation suivante :

$$S_b = \sum_{i=1}^3 S_{bi} \quad (I-4-2)$$

Avec

$$S_b = D \left[\frac{-\frac{1}{L} sh\left(\frac{H}{L}\right) + b_i \left[ch\left(\frac{H}{L}\right) - e^{-b_i} \right]}{-Lb_i sh\left(\frac{H}{L}\right) + ch\left(\frac{H}{L}\right) - e^{-b_i}} \right] \quad (I-4-3)$$

Où D est le coefficient de diffusion, L la longueur de diffusion, H largeur de la base.

La technique expérimentale de détermination de la longueur de diffusion effective est donnée par la figure I7 ci-dessous qui donne le profil du courant de court-circuit théorique en fonction de la longueur de diffusion.

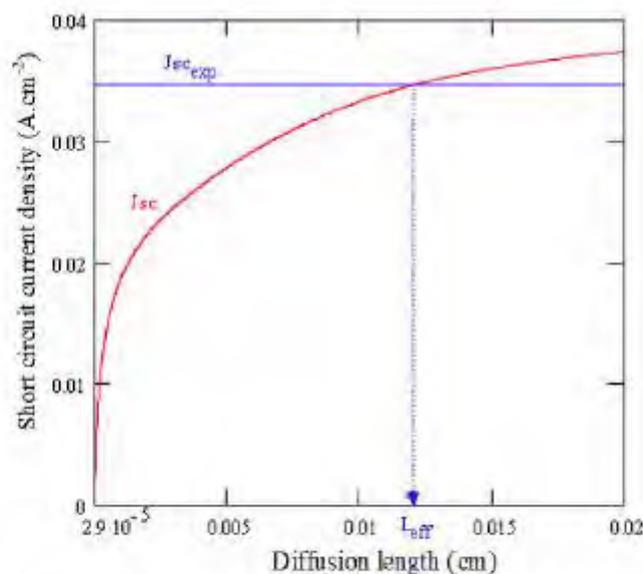


Figure I- 7: Technique de détermination de la longueur de diffusion effective

La projection du courant de court-circuit expérimentale sur la courbe du courant de court-circuit théorique donne un point d'intersection et la projection orthogonale sur l'axe des abscisses donne la

longueur effective Leff. Cette dernière est déterminée en situation de court-circuit .la technique expérimental de détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction est donnée à la figure I-8 ci-dessous qui donne le profil de la phototension théorique en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

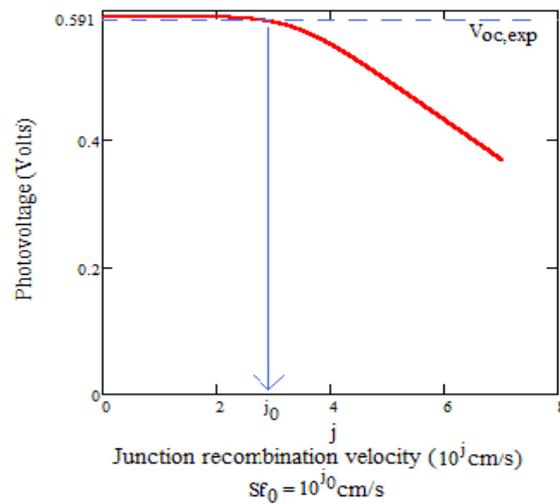


Figure I- 8: Technique de détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

Back surface recombination velocity modeling in white biased silicon solar cell under steady state [5]

Dans cet article, les auteurs ont étudié le concept de recombinaison à surface arrière en utilisant une cellule solaire mono faciale en silicium en régime statique et sous éclairage polychromatique représentée par la figure 1 ci-dessous.

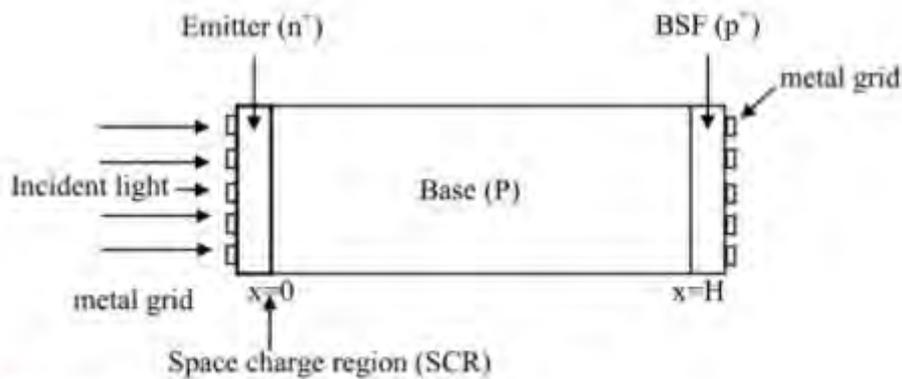


Figure 1. Solar cell illuminated by its front side.

Les auteurs ont établi plusieurs équations qui découlent de notre modèle de cellule solaire donc l'équation de continuité qui est représentée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \frac{n(x)}{L_n^2} = -\frac{\partial n(x)}{D_n} \quad (1)$$

Avec

$$L_n = \sqrt{(D_n \cdot \tau)} \quad (2)$$

Et $G_n(x)$ représente le taux de génération donné par l'équation suivante :

$$G_n(x) = \sum_{\lambda_0}^{\lambda_g} F_{0,\lambda} (1 - r_\lambda) \alpha_\lambda e^{-\alpha_\lambda x} \quad (3)$$

Ils ont ensuite déterminé l'expression de la densité des porteurs minoritaires de la base à partir de l'équation de continuité donnée ci-dessus. Les vitesses de recombinaison à la surface arrière notées S_{be} , S_{bj} et S_{br} sont aussi déterminées par la suite à partir de l'expression du photocourant donnée l'équation ci-dessous.

$$J_n(x, S_f, S_b) = q \cdot D_n \cdot \left. \frac{\partial n(x, S_f, S_b)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (4)$$

Par la suite, les auteurs ont déterminés : la puissance et la phototension à partir de ses équations données par les expressions suivantes :

$$P = J \cdot V_{ph} \quad (5)$$

Avec $J = J_{ph} \cdot J \quad (6)$

$$J_d = q.n_i S f_0 \left[\exp\left(\frac{V_{ph}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

Les auteurs ont aussi dressé le profil de la phototension représenté par les figures 2 et 3.

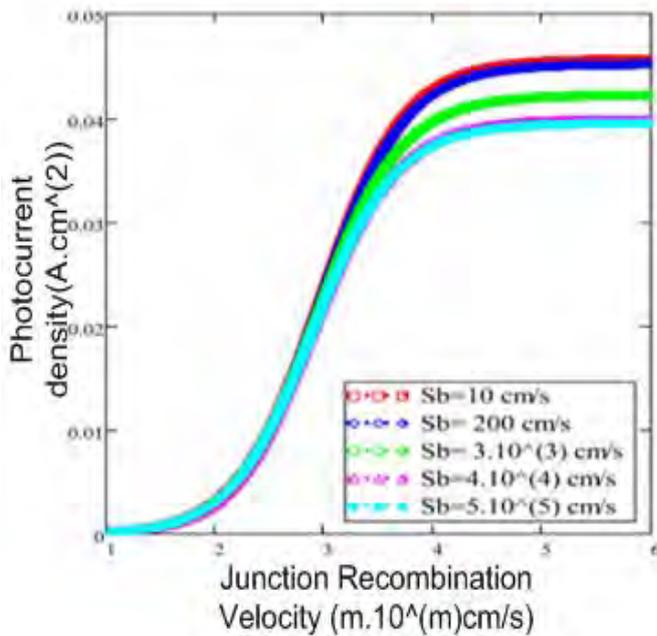
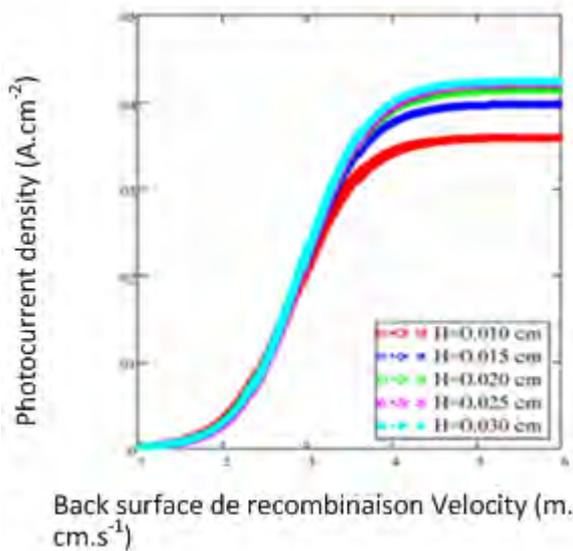
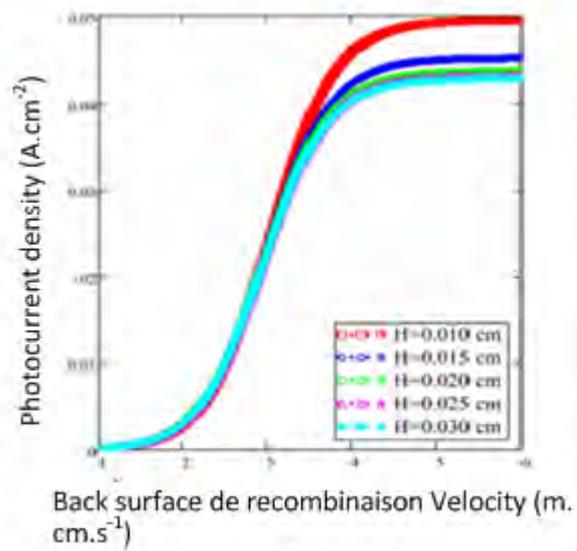


Figure2: Photocurrent density versus Junction recombination Velocity for different Sb value:
L=0.01cm; H=0.015cm;
D=26cm².s⁻¹.



(a)



(b)

Figure3: (a) Photocurrent density versus Junction recombination Velocity for Different H value and High Sb: Sb=4.10⁴cm.s⁻¹; L=0.01cm; D=26cm².s⁻¹ (b) Photocurrent density versus Junction

recombination Velocity for Different H value and for slight Sb value: $S_b=2 \cdot 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $L=0.01 \text{ cm}$; $D=26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

D'après les auteurs, les cellules solaires génèrent un photocourant plus grand lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction est plus élevée ($4 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Les cellules solaires épaisses ($H=0.025 \text{ cm}$) sont plus bénéfiques car elles génèrent une densité de photocourant plus élevée.

Le profil de la phototension est aussi représenté par les auteurs par les figures 4 et 5

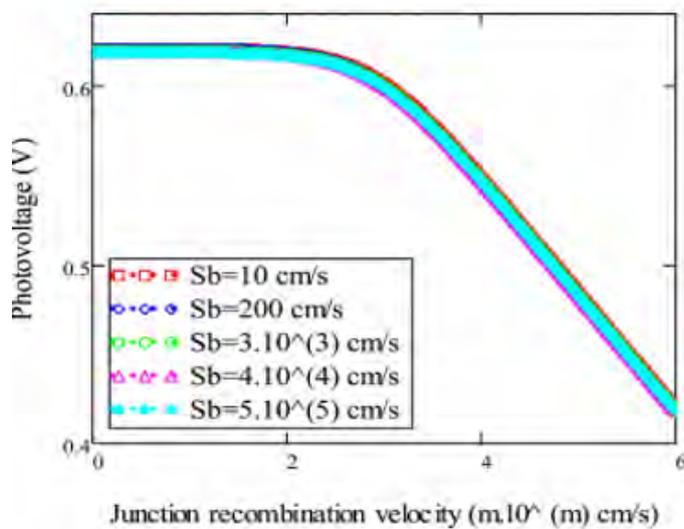


Figure 4 : photo voltage versus Junction recombination Velocity for different Sb value : $L=0.01 \text{ cm}$; $H=0.02 \text{ cm}$; $D=26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

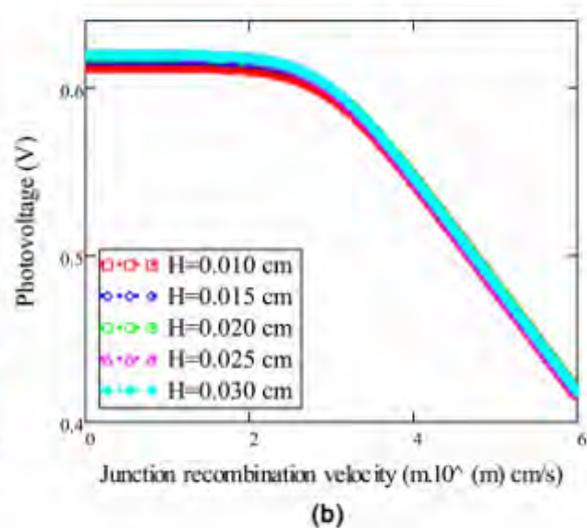
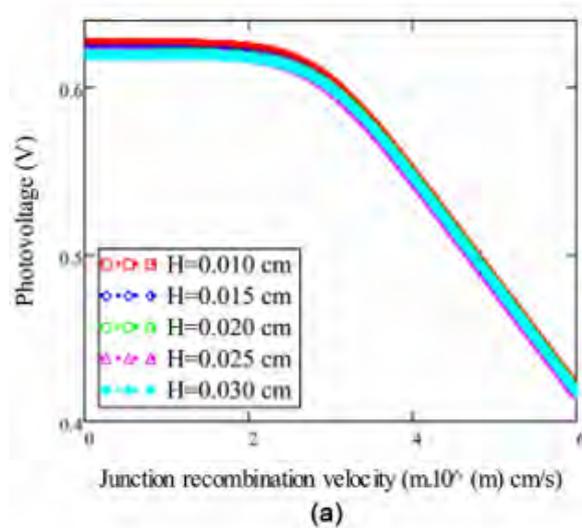


Figure5 : (a) photo voltage versus Junction recombination Velocity for different H value and for low Sb values : $S_b=200\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; $L=0.01\text{cm}$; $D=26\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. (b).photo voltage versus Junction recombination Velocity for different H value and for high Sb values: $S_b=200\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; $L=0.01\text{cm}$; $D=26\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$

D'après les auteurs, la phototension en circuit-ouvert diminue avec S_b . Elle diminue également avec l'épaisseur pour les petites valeurs de S_b .

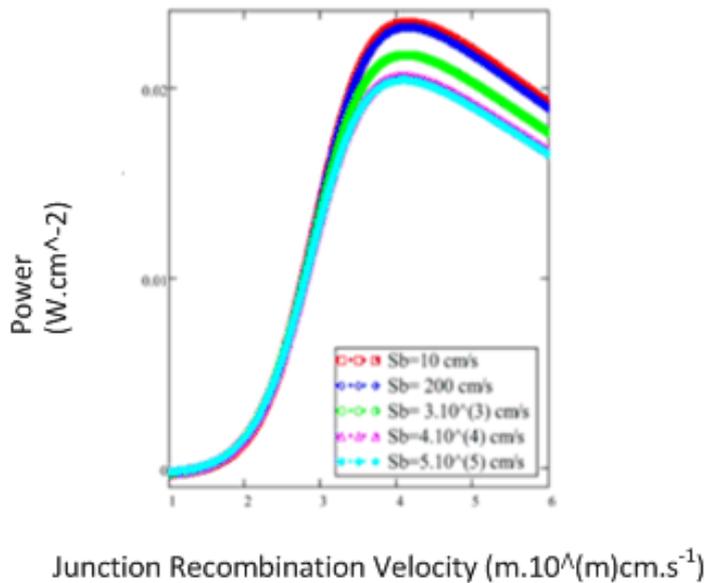


Figure6: Power versus Junction Recombination Velocity for Different S_b value: $L=0.01\text{cm}$, $H=0.015\text{cm}$, $D=26\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

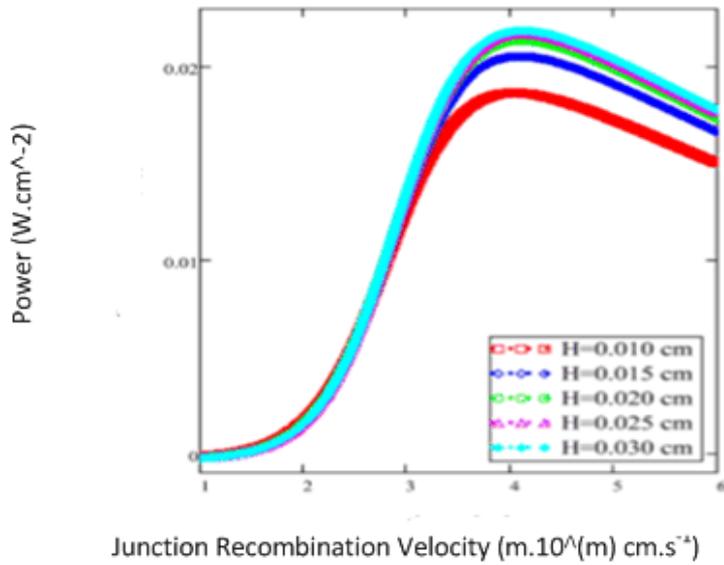


Figure7: Power versus Junction Recombination Velocity for Different H Value: $S_b=4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$; $L=0.01\text{cm}$, $H=0.03\text{cm}$, $D=26\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$.

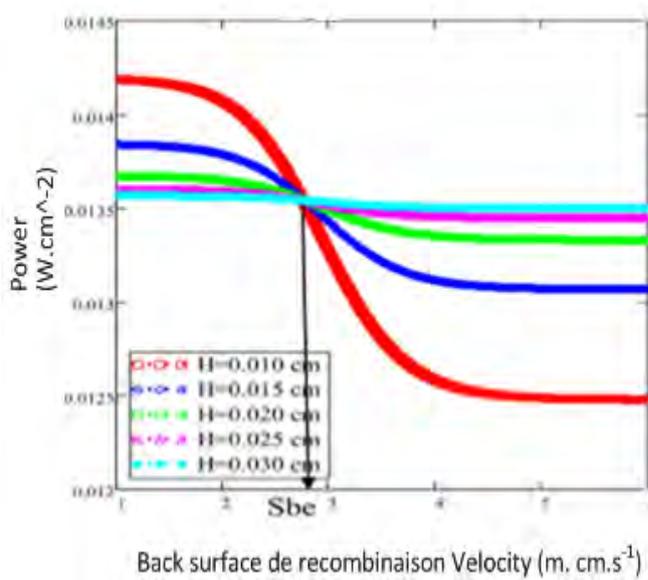


Figure 8: power versus back surface Velocity for different H value: $S_f=3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $L=0.01\text{cm}$, $D=26\text{cm}^2.\text{s}$, $S_{be}=2128 \text{ cm.s}^{-1}$.

Ils ont aussi défini le facteur de remplissage comme étant la fraction de la puissance perdue dans le matériau semi-conducteur soit par effet de résistance ou par des phénomènes de recombinaison du photo générateur du porteur. Il est donné par la relation:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot J_{sc}} \quad (6)$$

Avec P_{max} la puissance maximale pouvant être extraite, V_{co} représente la phototension en circuit ouvert et J_{sc} représente la densité de photocourant en court-circuit. Dans la figure 10, les auteurs ont

représenté la courbe du facteur de remplissage (FF) par rapport à la vitesse de recombinaison à la surface arrière pour différentes épaisseurs H.

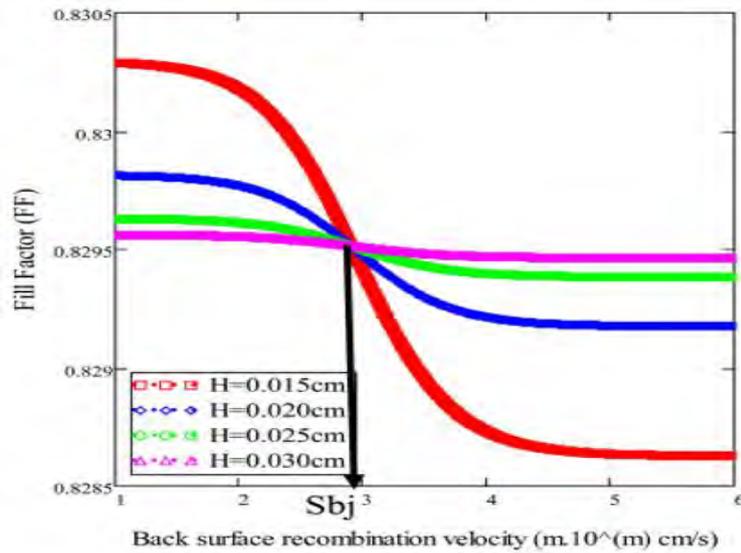


Figure10: Fill factor versus Junction recombination Velocity for different H value: $S_f=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $L=0.01 \text{cm}$; $D=26 \text{cm}^2.\text{s}^{-1}$.

Le profil du facteur de conversion est aussi représenté par les auteurs

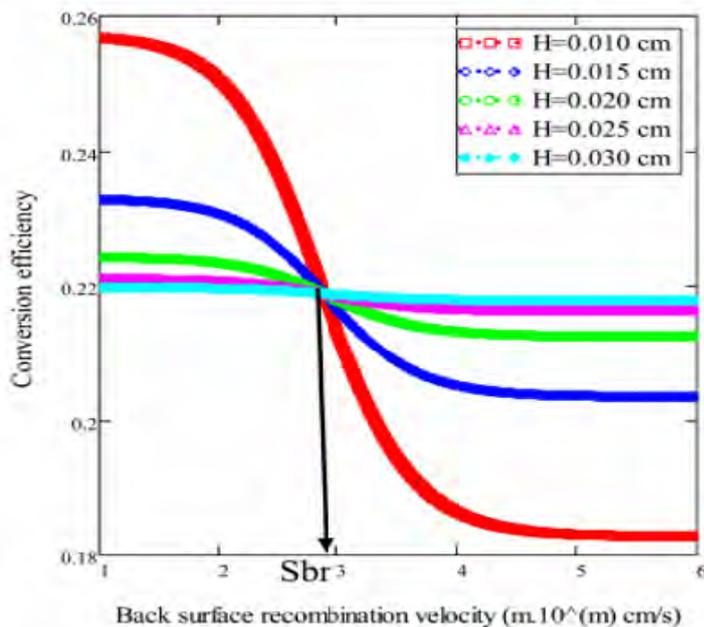


Figure 11: conversion efficiency versus Junction recombination Velocity for different H value: $S_f=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $L=0.01 \text{cm}$; $D=26 \text{cm}^2.\text{s}^{-1}$; $S_{br}=1342 \text{cm.s}^{-1}$.

L'efficacité de conversion est définie par les auteurs comme étant la fraction entre l'énergie électrique générée par la cellule solaire et la puissance du flux incident (P_{inc}) reçu par cette cellule solaire. En ce qui concerne la puissance, le facteur de remplissage et l'efficacité de conversion, les auteurs ont trouvé respectivement S_{be} , S_{bj} et S_{br} . Cette étude montre que les vitesses de recombinaison à la surface arrière sont invariables quelle que soit l'épaisseur de la cellule solaire.

I.6.Conclusion

Nous avons exposé dans cette étude bibliographique quelques généralités sur les semi-conducteurs ensuite, nous avons exposé les différentes cellules à jonction verticale et en fin, nous avons fait une étude sur les différentes méthodes de détermination des vitesses de recombinaisons en faisant varier le niveau d'éclairement, et l'épaisseur H . Il en ressort de cette étude, que la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit comme le courant de court-circuit croît avec le niveau d'éclairement. Les cellules solaires épaisses ($H=0.025$ cm) sont plus bénéfiques car elles génèrent une densité de photocourant plus élevée ; il en est de même lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction est grande. Ainsi, les vitesses de recombinaison à la face arrière sont invariables quel que soit l'épaisseur de la cellule solaire. Pour l'étude qui va suivre, nous allons déterminer l'épaisseur optimale de la base grâce aux vitesses de recombinaison à la face arrière Sb_1 et Sb_2 en faisant varier le coefficient de diffusion qui correspond à un niveau de dopage de la base.