

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



Mémoire

Présenté à

L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique
Département de Physique

Pour obtenir le Diplôme de
Magister en Physique

Option : Conversion Photovoltaïque.

Par

MEKEMECHE Abdelkader

Sujet

**Etude à deux dimensions de cellules solaires en silicium
monocristallin à émetteur sélectif à l'aide de PC2D.**

Soutenu le 30 /06 /2013

Devant le jury composé de

Pr. SENOUCI Khaled	Professeur, Université de Mostaganem	Président
Pr KADOUN Abd-Ed-Daïm	Professeur, Université de Sidi Bel Abbès	Examineur
Dr.BENACHENHOU Abdelhalim	M.C.A, Université de Mostaganem	Examineur
Dr. BEGHADAD Mohammed	M.C.A, Université de Mostaganem	Encadreur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- *A la mémoire de ma mère*
- *A mon père, à ma belle mère*
- *A ma femme, à mes deux filles*
- *A tous les membres de ma grande famille*
- *A tous mes amis*

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent mémoire.

Ce travail a été effectué au Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

Avant tout propos, je tiens Profondément à remercier Monsieur Beghdad Mohammed, Maître de Conférences classe A à l'université de Mostaganem, d'avoir été durant cette période de recherches mon encadreur de mémoire, dont la considération et la confiance qu'il m'a accordée, m'ont grandement soutenu. Il a su durant cette période partager ses connaissances scientifiques et Pédagogiques. J'ai été très sensible aux idées qu'il m'a prodigué, à la sollicitude avec laquelle il m'a orienté, et aux conseils avisés qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur Senouci Khaled pour l'honneur qu'il fait en présidant le jury de ce mémoire. Et puisse-t-il trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons également à remercier chaleureusement Monsieur Benachenhou Abdelhalim, Maître de Conférences classe A à l'université de Mostaganem pour nous avoir fait l'honneur de participer à mon jury de mémoire.

Merci à Monsieur le Professeur Kadoun Abd-Ed-Daïm de l'Université de Sidi Bel Abbès qui a bien voulu être membre de ce jury, nous lui exprimons nos sincères remerciements pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Ce travail n'aurait pu être effectué sans l'aide du Dr Paul A. Basore , directeur du laboratoire de « Hanwa Solar America » aux Etats-Unis et l'auteur de PC2D. Je le remercie vivement pour ses conseils concernant la programmation.

Un grand Merci au Dr Bachir Semmache d'Irysolar et de Semco Engeneering de Montpellier (France) pour sa coopération de nous avoir fourni les données expérimentales des cellules photovoltaïques étudiées dans ce travail et de nous avoir enrichis par sa grande expérience internationale dans le domaine malgré ses nombreuses occupations.

Que Dr Yvan Cuminal, de L'Institut d'Electronique du Sud de l'Université II de Montpellier soit également remercié ici pour sa coopération scientifique dans le sujet.

Enfin, un grand merci pour ceux que je n'ai pu désigner par leurs noms et qui m'ont aidé de près ou de loin à l'accomplissement ce travail.

Table de matière

Remerciements

Table de matière

Résumé

Introduction générale	1
I-Gisement solaire	5
I-1 -Le soleil	5
I-2-Constante solaire hors atmosphère	5
I-3- Influence de l'atmosphère.....	6
I-3-1- Structure de l'atmosphère.	6
I-3-2 - Composition de l'atmosphère.	7
I-4- Rayonnement solaire au sol.	8
I-4-1 -Nombre d'Air Masse.....	8
I-4-2-Effet de l'absorption.....	9
I-4-3-Effet de la diffusion	10
I-4-4-Rayonnement solaire au sol.....	11
I-4-5-Spectre de référence	12
I-5-Position du soleil.....	12
I-6-Eclairement d'un capteur plan	13
I-6-1-Rayonnement global.....	13
I-6-2-Rayonnement diffus pour une surface d'orientation quelconque.....	14
I-6-3-Rayonnement direct reçu sur un plan quelconque.....	14
II-Physique de la cellule solaire	16
II-1- Principe général.....	16
II-2- Choix du matériau.....	16
II-3- Structure de base.....	16
II-4-La jonction PN sous obscurité.....	17
II-4-1-Physique des semi-conducteurs	17
II-4-1-1-Définition.....	17

II-4-1-2- Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique.....	18
II-4-1-3- Semi-conducteur intrinsèque.....	19
II-4-1-4-Semi-conducteur extrinsèque.....	20
II-4-1-5-Notion de quasi-niveau de Fermi.....	22
II-4-1-6- Courants dans le semi-conducteur.....	23
II-4-1-7- Génération-Recombinaison.....	24
II-4-1-8 Equations de continuité.....	26
II-4-1-9- La jonction PN à l'équilibre.....	27
II-4-1-10. La jonction PN polarisée.....	30
II-4-1-11-Courant de génération-recombinaison.....	32
II-4-1-12-Courant tunnel.....	33
II-5-La jonction PN sous éclairnement	34
II-5-1- Photocourant I_{Ph}	35
II-5-2- Réponse spectrale.....	37
II-5-3-Caractéristique I(V)	38
II-5-3-1-Effet résistif.....	40
II-6- Fonctionnement d'une cellule solaire.....	41
II-6-1-Paramètres physiques	42
II-6-1-1-Tension de circuit ouvert.....	42
II-6-1-2-Courant de court circuit.....	42
II-6-1-3-Facteur de forme	42
II-6-1-4-Rendement.....	43
II-6-2-Point de fonctionnement	43
II-6-3-Pertes fondamentales limitant le rendement.....	44
II-6-4-Réduction de pertes.....	45
II-6-4-1-Passivation face avant et arrière	45
II-6-4-2-Couche AntiReflét.....	45
II-6-4-3-Texturation de la surface.....	45
II-6-4-4-Contacts face avant et arrière.....	46

II-6-4-5- Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field)	46
II-6-5-Procédé standard de réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	47
II-7-Cellule solaire au silicium à émetteur sélectif.....	47
II-7-1-introduction.....	47
II-7-2-Principe et avantages.....	48
II-7-3-Procédés pour la réalisation d'émetteurs sélectifs.....	49
II-7-3-1-Les encres dopées.....	49
II-7-3-2-L'implantation ionique.....	49
II-7-3-3-Le dopage laser.....	50
III- Présentation des programmes PC1D et PC2D.....	52
III-1-Aperçu sur le logiciel PC1D.....	52
III-1-1-Les paramètres du dispositif (Device).....	52
III-1-2-Les paramètres des régions.....	53
III-1-3-Les paramètres d'excitation.....	53
III-1-4-Les résultats.....	54
III-2-De PC1D à PC2D.....	54
III-3-Méthode numérique.....	55
III-4-Feuilles de calcul.....	57
III-4-1-Feuilles de ϕ_n et de ϕ_p	57
III-4-2-Feuille du potentiel électrostatique ψ	60
III-4-3-Feuille « Excès »	60
III-4-4-Feuilles « électrons » et « trous »	62
III-4-5-Feuille « Courant »	63
III-5-Simulation.....	64
III-5-1-Feuilles de la définition des paramètres de la cellule solaire	64
III-5-1-1 -Feuille « Device »	64
III-5-1-2-Feuille « Recombinaison »	67
III-5-1-3-Feuille « Photogénération »	68
III-5-2-Feuille d'exécution (excitation)	69
IV-Applications et simulations.....	72

IV-1 –Méthode de simulation.....	72
IV-2- Calculs intermédiaires avec PC1D.....	72
IV-2-1- Résistance de couche « Sheet Resistance »	72
IV-2-2-Transmittance en fonction de la longueur d'onde.....	73
IV-2-3-Courant de recombinaison J_{01} (surfaces avant et arrière)	73
IV-2-4-Courant de recombinaison J_{02}	74
IV-3 -Paramètres de la cellule d'IRYSOLAR.....	75
IV-3 -1-Géométrie de la cellule.....	75
IV-3 -2-Paramètres physiques de la cellule.....	75
IV-3 -3-Résistance série.....	76
IV-4-Données à introduire dans PC2D.	80
IV-5-Résultats	81
IV-5-1-Caractéristiques I(V) et P(V)	81
IV-5-2-Réponse spectrale.....	81
IV-5-3-Densité des porteurs.....	82
IV-5-4- Influence de la résistance de couche sur les performances de la cellule.....	85
IV-5-4-1-Comparaison avec une cellule à émetteur homogène de référence..	85
IV-5-4-2-Influence de la résistance de couche sous les contacts.....	88
IV-5-4-3-Influence de la résistance de couche entre les contacts.....	90
IV-6-Conclusion.....	91
Conclusion générale	93
Bibliographie	97

Résumé

Les recherches concernant les cellules solaires à émetteur sélectif en silicium ont suscité de nombreux travaux dans les laboratoires de recherche spécialisés dans le domaine, notamment au cours de ces dernières années par l'intérêt de l'amélioration du rendement due à l'introduction de l'émetteur sélectif.

Les performances de ce genre de cellule dépendent de la qualité et de la géométrie de ses différentes parties ainsi que de la technologie utilisée.

C'est pour ces raisons que nous nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude à deux dimensions d'une cellule solaire en silicium à émetteur sélectif par le simulateur PC2D, que nous avons comparé avec celle à émetteur homogène. Ensuite, nous avons optimisé les paramètres de l'émetteur sélectif, tout en comparant nos résultats avec ceux expérimentaux.

Mots-clefs : cellule solaire-émetteur sélectif-émetteur homogène-silicium-PC1D-PC2D-rendement.

Abstract

Research on the selective emitter solar cell silicon have attracted numerous studies in specialized research laboratories in the field, especially in recent years by the interest of amelioration of the efficiency due to the introduction of selective emitter.

The performance of this type of cell depends on the quality and geometry of its parts and the technology used.

It is for these reasons that we are interested in this work the two-dimensional study of a silicon solar cell with selective emitter used the simulator PC2D, we compared it with the homogeneous emitter cell. Then we optimized the parameters of the selective emitter, while comparing our results with experimental ones.

Keywords: solar cell-selective emitter- homogeneous emitter-silicon-PC1D- PC2D- efficiency.

ملخص

البحوث المتعلقة بالخلايا الشمسية للسليكون ذات الباعث الانتقائي جذبت العديد من الدراسات في مختبرات الأبحاث المتخصصة في هذا المجال، وخاصة في السنوات الأخيرة باهتمام تحسين مردودها نظرا لإدخال الباعث الانتقائي. أداء هذا النوع من الخلايا يعتمد على نوعية وهندسة أجزائها والتكنولوجيا المستخدمة. لهذه الأسباب نحن مهتمون في هذا العمل بدراسة ثنائية الأبعاد للخلايا الشمسية للسليكون ذات الباعث الانتقائي بواسطة المبرمج PC2D و مقارنتها مع الخلايا الشمسية للسليكون ذات الباعث المتجانس. ثم تحسين الباعث الانتقائي من أجل أفضل أداء لها ، مع مقارنة نتائجنا بالنتائج المخبرية.

كلمات البحث: خلية شمسية- باعث انتقائي- باعث متجانس- سيلكون- PC1D -PC2D- مردود.

Introduction générale

La production mondiale d'énergie actuelle est constituée à 80% d'énergies fossiles. Mais la fin proche de ces ressources énergétiques et la lutte contre le réchauffement climatique imposent à nos sociétés de repenser leurs modes de production et de consommation énergétique, donc le développement des énergies renouvelables représente un des défis majeurs des générations futures.

Le soleil est une énergie propre, silencieuse et inépuisable quoiqu'elle soit d'origine nucléaire. La conversion électrique de ce formidable potentiel énergétique s'obtient en utilisant des matériaux semi-conducteurs dans le domaine de la conversion photovoltaïque. Ces matériaux conduisent aux meilleurs rendements obtenus à l'heure actuelle et de coûts du kilowatt de plus en plus compétitifs surtout pour les pays ne disposant pas des ressources énergétiques non renouvelables.

La principale difficulté étant de trouver un équilibre entre une technologie efficace et un prix raisonnable, tout en contrôlant l'impact environnemental du procédé de fabrication.

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 50 ans pour la fabrication de cellules photovoltaïques est le silicium cristallin (80% de la production mondiale) qui allie à la fois ses qualités intrinsèques (son abondance sur terre, la maîtrise de son dopage, sa non toxicité, etc...) et surtout son coût moins onéreux par rapport aux autres semiconducteurs.

la production mondiale d'électricité d'origine photovoltaïque a connu un essor fulgurant depuis les années 1990. Ainsi, en dépit de la crise économique, l'industrie photovoltaïque continue de connaître une croissance importante (voir la figure 1).

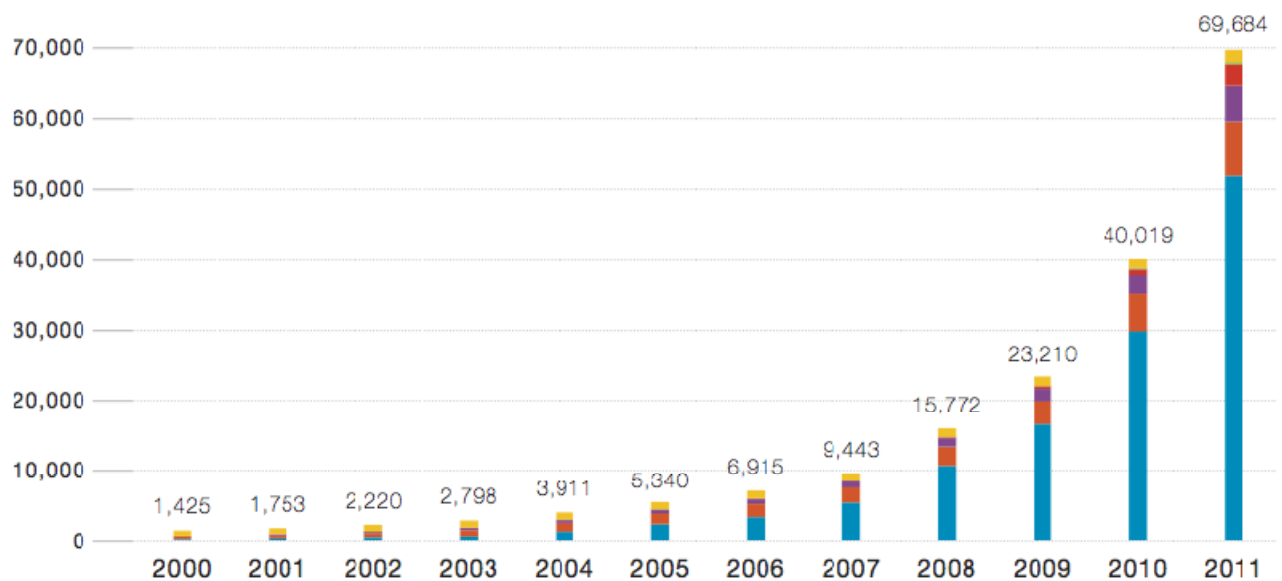


Figure 1 –Évolution de la puissance (MW) installée en photovoltaïque dans le monde [12].

La recherche dans le domaine photovoltaïque est motivée principalement par l'amélioration du rendement de conversion énergétique et par la réduction du coût de réalisation.

Les performances de la cellule peuvent être améliorées par l'optimisation de ses paramètres physiques internes pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension de circuit ouvert élevés.

Plusieurs logiciels ont été utilisés pour l'étude et la simulation de la cellule solaire, notamment le simulateur PC1D de « **New South Wales of Sydney** » de l'Australie, conçu par P. Basore et son équipe ainsi que d'autres tels que Afors, Amps, Scaps...etc. Mais la plupart de ces programmes ont été conçus qu'à une dimension, or certaines structures telles par exemple la cellule solaire à émetteur sélectif ainsi que celle à contacts arrières interdigités nécessitent la simulation en deux dimensions afin d'exploiter tous les

paramètres physiques tout en donnant plus de précisions et de performances aux résultats.

Ce mémoire a pour objectif l'étude d'une cellule solaire en silicium à émetteur sélectif fournie par l'entreprise de fabrication de cellules solaires Irysolar de Montpellier (France) en utilisant le nouveau simulateur à deux dimensions PC2D. Nous rappelons que ce programme a été présenté pour la première fois en août 2011 par P. Basore et K. Cabanas [1].

Ce travail se compose de quatre principaux chapitres :

Dans le premier chapitre, il est question de présenter un rappel sur le gisement solaire.

On parle du rayonnement solaire hors atmosphère, les différents effets de l'atmosphère sur le spectre solaire et les différentes composantes du rayonnement arrivé au sol.

Dans le deuxième chapitre, on présente une étude détaillée concernant la physique de la cellule solaire sous obscurité et sous éclairage avec toutes les équations qui décrivent cette physique. Ce chapitre décrit également la cellule à émetteur sélectif et sa technologie.

La présentation, la description détaillée et illustrée ainsi que l'utilisation de PC1D et de PC2D font l'objet d'un troisième chapitre.

Un quatrième chapitre est consacré à la méthode de la simulation avec ses étapes intermédiaires, les données et les résultats de la programmation. On présente aussi dans ce chapitre les comparaisons, les interprétations ainsi que les conclusions obtenues de la simulation.

Chapitre I

Gisement solaire

Chapitre I-Gisement solaire

I-1 -Le soleil :

Le soleil est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce nuage est composé essentiellement d'hydrogène, d'hélium et d'autres éléments comme le carbone et l'azote. Son rayon est de **696 000** [2] kilomètres.

Sa température au centre est de l'ordre de 10^7 °K. Les réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène libèrent une énergie de masse considérable de 4.10^9 kg/s se transformant ainsi en hélium [3].

La distance séparant le soleil de notre terre est de **150** millions de kilomètres. Malgré cette distance considérable, le soleil fournit une énergie importante, cette puissance est d'environ $1,8.10^{17}$ [2] Watts reçue par la surface éclairée de la terre à la limite de l'atmosphère.

Cette énergie est sous forme d'un rayonnement dont le spectre se répartit essentiellement entre les longueurs d'onde **0,2 et 4 μm** .

Mais cette répartition spectrale est perturbée par l'atmosphère. L'intensité du rayonnement incident est modifiée par la réflexion, l'absorption et la diffusion par les gaz, les aérosols et les nuages. Alors cette puissance arrive au niveau du sol à environ **1000** Watts/m².

I-2-Constante solaire hors atmosphère :

On considère que le soleil rayonne globalement comme un corps noir à la température d'environ **5800** °K. L'irradiance spectrale est la puissance émise par unité de surface et par unité de longueur d'onde, elle est donnée selon la loi de Stefan-Boltzman du corps noir par l'équation suivante [3]

$$E(\lambda, T) = A\lambda^{-5} \cdot (e^{B/\lambda T} - 1)^{-1} \text{ (W/m}^2 \cdot \mu\text{m)} \quad (\text{I-1})$$

Avec $A=3,74.10^{-10} \text{ W/m}^2.\mu\text{m}$ et $B=1,44.10^{-3} \text{ m}.\text{°K}$

λ en mètres et T en $^{\circ}\text{K}$

Le tableau suivant donne les pourcentages dans les tranches du spectre solaire hors atmosphère d'après Thekaekara [3].

Constante solaire hors atmosphère	Ultra-Violet (UV)	Visible	Infra-Rouge (IR)
0,1 à 5 μm	0.1 à 0.4 μm	0.4 à 0.75 μm	0.75 à 5 μm
1350 W/m^2	9%	42%	49%

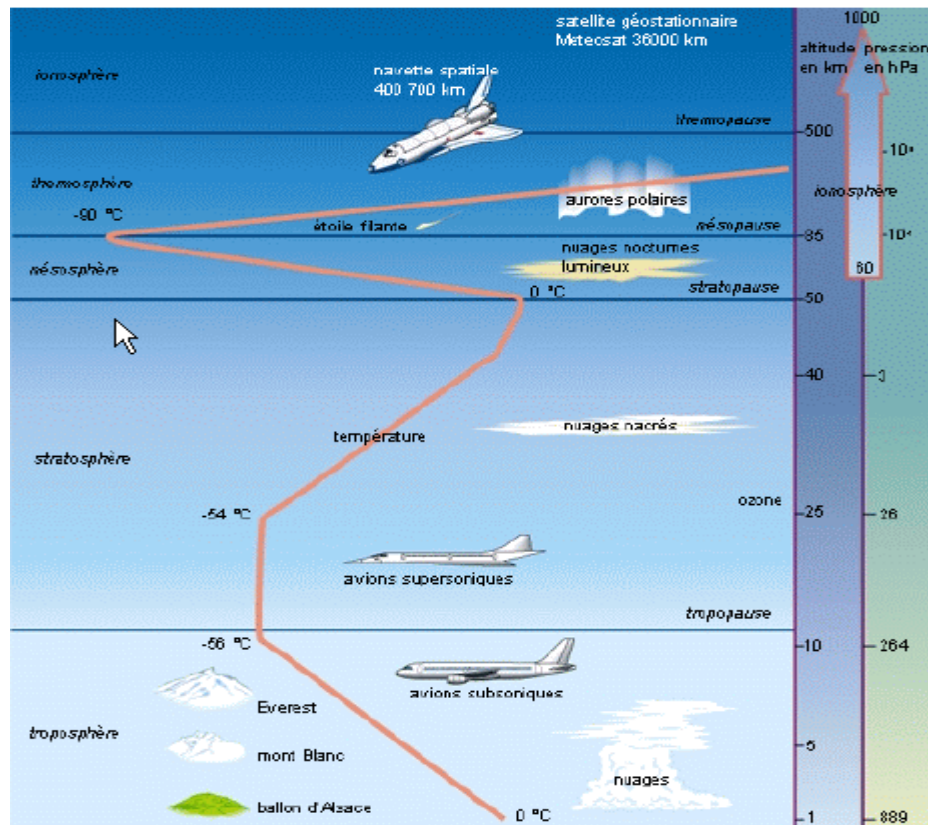
Tableau I-1-Répartition énergétique du spectre solaire hors atmosphère (AM0)

I-3- Influence de l'atmosphère :

I-3-1- Structure de l'atmosphère

L'atmosphère est composée de cinq principales couches qui sont :

- **La troposphère** : Elle s'étend jusqu'à **10 à 12 km** d'altitude.
- **La stratosphère** : Elle s'étend de **12 à 55 km**, elle contient une mince couche d'ozone.
- **La mésosphère** : Elle s'étend de **50 à 85 km**.
- **L'ionosphère** : Elle contient les couches réfléchissantes pour les ondes radio, elle s'étend jusqu'à **700 km** d'altitude.
- **L'exosphère** : au-delà de **700 km**.



FigI-1 : Structure de l'atmosphère[4]

I-3-2 - Composition de l'atmosphère [4]:

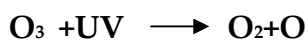
Pour les trois premières couches, la composition de l'atmosphère est de : **78%** d'azote, **21%** d'oxygène, **0.9%** d'argon, **0.03%** de CO₂, de traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une couche mince d'ozone dans la stratosphère dont le rôle important est d'absorber les rayons ultraviolets (UV).

Le rayonnement solaire est modifié essentiellement par la couche de la troposphère par **diffusion**, **diffraction**, **absorption** et **réfraction**. La masse gazeuse totale traversée est de **10 tonnes /m²** qui équivaut à **7,8 km** d'atmosphère à la température et la pression normales (T=0 °C- P=1013 mbars).

- **L'eau** : La grande quantité de la vapeur d'eau se trouve dans la troposphère. La hauteur d'eau condensable (hauteur d'eau liquide si toute la vapeur était condensée) est donnée par la formule empirique de Hahn : $W(\text{cm}) = 0.17t$ où t est la tension de la vapeur d'eau au sol en mbars.
- **L'ozone** : La liaison moléculaire de l'oxygène est cassée par le rayonnement énergétique ultraviolet. L'élément d'oxygène(O) réagit avec le gaz d'oxygène(O₂) donnant l'ozone(O₃).



Une partie de cet ozone est dissocié en absorbant les rayons UV donnant l'oxygène :



Cela filtre les rayonnements solaires dangereux pour les micro-organismes et les végétaux.

I-4- Rayonnement solaire au sol :

I-4-1 -Nombre d'Air Masse :

On prend comme unité de référence, l'épaisseur moyenne réduite de l'atmosphère qui est de 7,8 km (conditions normales).

La longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale est donnée géométriquement par:

$$OM = OA / \sin h \quad (\text{FigI-2}) \quad (\text{I-2})$$

A une pression P (en mbars) différente de **1013 mbars** et à une altitude z (en km), le nombre d'Air Masse est donné par l'expression :

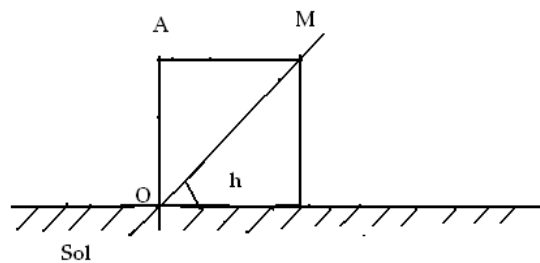
$$m = \frac{p}{1013} \cdot \frac{1}{\sinh} \cdot e^{-\frac{z}{7.8}} \quad (\text{I-3})$$

Par exemple :

AM1: $h=90^\circ$, soleil au Zénith

AM1.5 : $h=42^\circ$ sur l'horizon

AM2 : $h=30^\circ$ sur l'horizon



FigI-2: Nombre d'air masse

I-4-2-Effet de l'absorption :

Les molécules responsables de l'absorption sont principalement l'ozone (O_3), la vapeur d'eau (H_2O) et d'une manière moins sensible l'oxygène (O_2) et le gaz carbonique (CO_2) (**FigI-3**).

L'ozone absorbe l'UV moyen ($0,2 \mu\text{m}-0,7\mu\text{m}$). La vapeur d'eau a 7 bandes d'absorption dont 3 importantes dans l'IR moyen. L'oxygène est à l'origine de 2 bandes d'absorption étroites à $0,69 \mu\text{m}$ et $0,76 \mu\text{m}$. Le gaz carbonique absorbe dans 3 bandes étroites dans l'IR au-delà de $1,5 \mu\text{m}$.

I-4-3-Effet de la diffusion

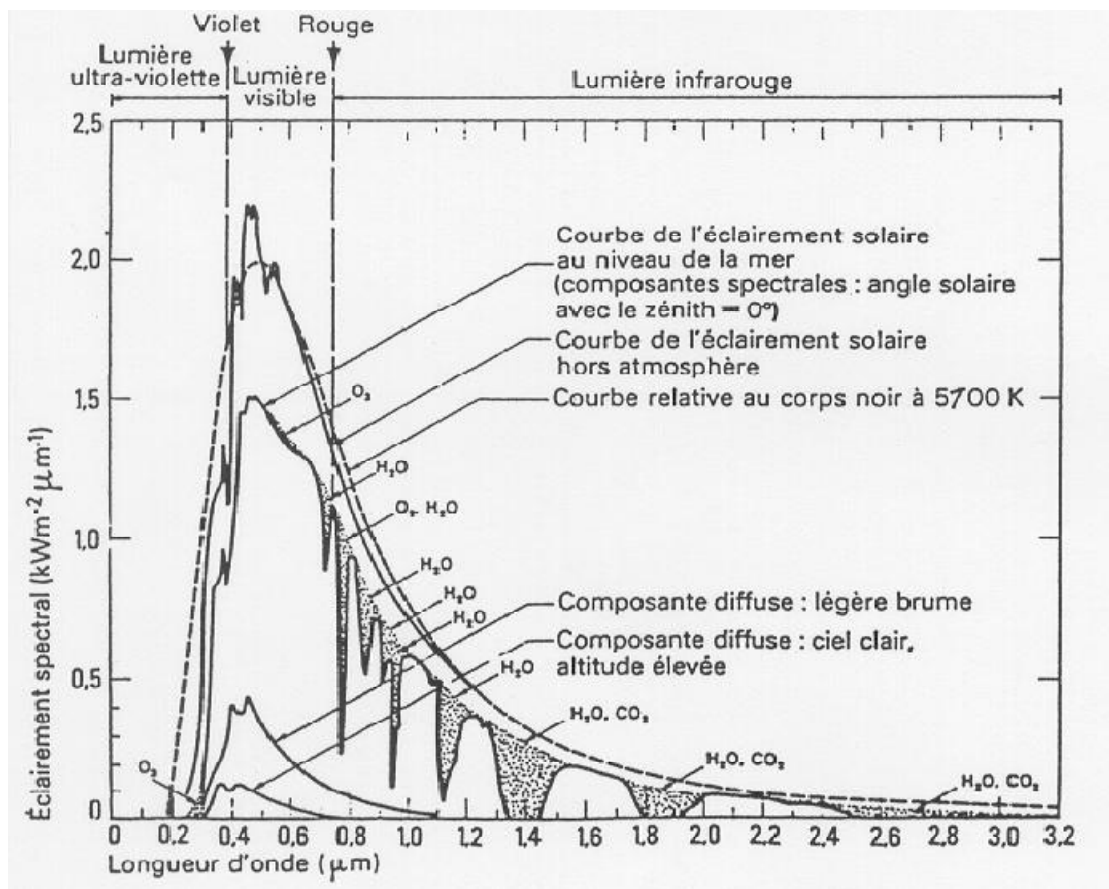
La diffusion de la lumière est une redistribution spatiale du rayonnement par des particules matérielles. C'est un phénomène complexe car il prend en compte en même temps la diffraction, la réfraction et la réflexion. Le coefficient de diffusion suit la loi générale du type exponentielle:

$$\beta = \beta_0 \lambda^{-p} \quad (I-4)$$

Où β_0 et p sont des constantes dépendant de la nature des particules responsables de la diffusion, λ est la longueur d'onde du rayonnement.

Exemple : Pour les molécules d'air : $\beta = \frac{32\pi^3}{3N} \cdot (n - 1)^2 \cdot \lambda^{-4}$ (loi de Rayleigh) (I-5)

N est le nombre de molécules par unité de volume, n est l'indice de réfraction.



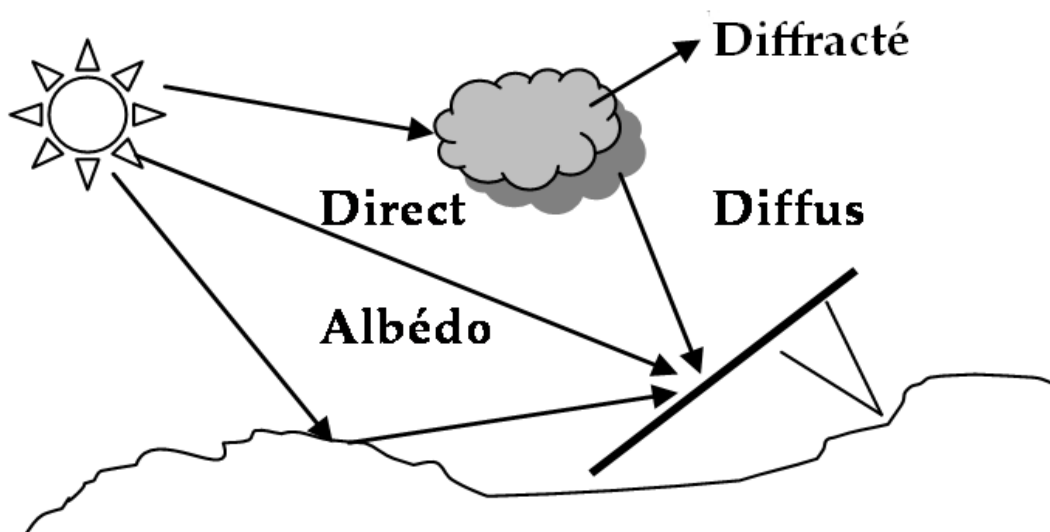
FigI-3 : Le corps noir à 5700 °K et les spectres solaires AM0 et AM1 (d'après W. Palz, Solar Electricity, UNESCO, Butterworths, 1978 [4])

I-4-4-Rayonnement solaire au sol :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire qui arrive au sol a trois composantes : une composante **directe**, une composante **diffuse** provenant de toute la voûte céleste, elle n'a pas d'orientation précise, elle est riche en spectre bleu. La composante est importante quand le ciel est couvert, donc il est inutile dans ce cas d'orienter les panneaux solaires dans la direction du soleil, on préfère les monter à l'horizontale. La troisième composante s'appelle **l'albédo** : c'est la fraction du rayonnement incident diffusée ou réfléchie par un obstacle (sol, nuage). Il est mesuré par rapport au rayonnement incident.

Il atteint une valeur de **0.8** pour une surface enneigée, **0.4** pour le sable, **0.2** pour les sols cultivés.

La somme de ces trois composantes forme le rayonnement global.



FigI-4: Rayonnement solaire au sol

I-4-5-Spectre de référence

Il correspond à la répartition de l'éclairement solaire total (global) normalisée à 1000w/m^2 , d'Air Masse **AM1.5**.

I-5-Position du soleil

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires : la **latitude L** et la **longitude λ** (voir **fig 1-5**). L'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre s'appelle la **déclinaison** solaire δ qui varie au cours de l'année de **23°27'** (-23,45°) (21 décembre) à **23°27'**(+23,45°)(21 juin), et elle est donnée par la formule :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284+n}{365} \right) \quad [2] \quad (\text{I-6})$$

n est le nombre du jour compté à partir du **1^{er} janvier**.

L'angle horaire ω est donné par: $\omega=15^\circ(\text{TS}-12)$ et est compté positivement l'après-midi. **TS** (Temps Solaire) est l'heure solaire en fixant **TS = 12 h** lorsque la hauteur du soleil est maximale (le soleil est à son « zénith »).

Le repérage du soleil s'effectue alors par l'intermédiaire de deux angles :

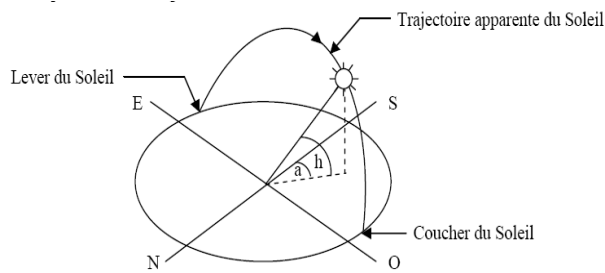
- **L'azimut a** : c'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'ouest.

- **La hauteur h** : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu d'observation.

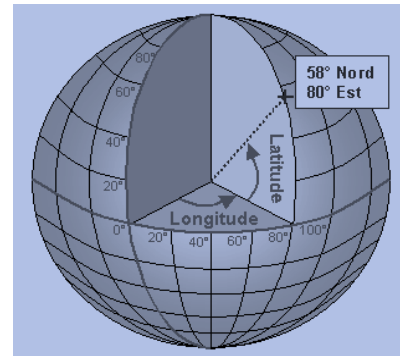
Ces deux coordonnées solaires sont données par les expressions suivantes:

$$\sin(h)=\sin(L).\sin(\delta)+\cos(L).\cos(\delta).\cos(\omega) \quad (\text{I-7})$$

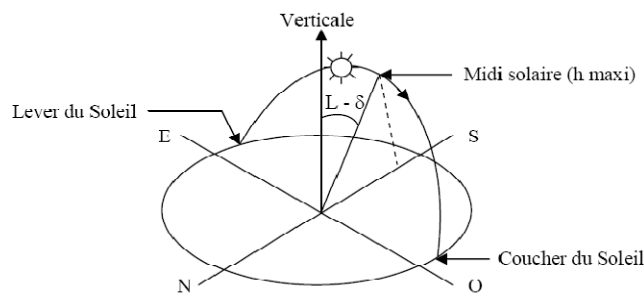
$$\sin(a)=\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)/\cos(h). \quad (\text{I-8})$$



FigI-5: Position du soleil



FigI-6: coordonnées angulaires



FigI-7: Déclinaison solaire

I-6- Eclairage d'un capteur plan

I-6-1- Rayonnement global

Le rayonnement global G reçu sur une surface horizontale a deux composantes ; le rayonnement direct I et le rayonnement diffus D , donc on a :

$$G_h = I \sin h + D_h \quad (\text{I-9}) \quad \text{avec } h \text{ est la hauteur angulaire}$$

La composante diffuse est pour sa part donnée par :

$$D_h = G_h(0,9 - 0,8\sigma) \quad 0,15 < \sigma < 0,75 \quad (\text{I-10})$$

σ est la fraction d'insolation qui représente le nombre d'heures de soleil sur la durée du jour.

I-6-2-Rayonnement diffus pour une surface d'orientation quelconque

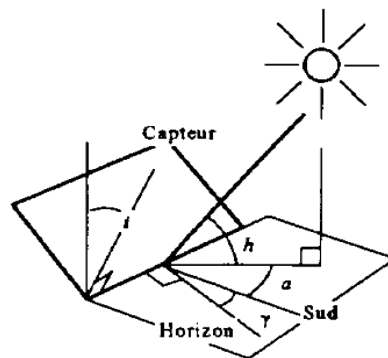
Pour une inclinaison quelconque i , la composante diffuse est donnée par :

$$D = \frac{1+\cos i}{2} D_h + \frac{1-\cos i}{2} \alpha G_h \quad (\text{I-11}) \quad \text{où } \alpha \text{ est le coefficient de l'albédo du sol.}$$

I-6-3-Rayonnement direct reçu sur un plan quelconque

Pour un plan incliné d'inclinaison i et d'orientation γ , la composante directe est donnée par l'expression:

$$I_i = I(\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (\gamma - a) \cdot \sin i) \quad (\text{I-12})$$



FigI-8 Eclairage d'un capteur plan (orientation quelconque)

Chapitre II

Physique de la cellule solaire

Chapitre II-Physique de la cellule solaire

II-1- Principe général

La conversion de l'énergie solaire en électricité se fait en présence en même temps d'au moins trois phénomènes physiques de base:

- L'absorption du maximum possible de photons,
- La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres,
- La collecte sans perte de ces charges dans un circuit électrique extérieur.

La cellule solaire doit être composée :

- d'un matériau absorbant dans la bande optique du spectre solaire, possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie, transformant l'énergie lumineuse sous forme potentielle et non thermique,
- d'une structure de collecte de faible résistance électrique.

II-2- 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 laissant derrière eux des vacances ; des trous ; qui à leur tour, peuvent se déplacer dans le matériau. Le matériau qui vient à l'esprit est le matériau semi-conducteur car il a une bande interdite convenable au spectre solaire (1-1,5 eV).

II-3- Structure de base

Les porteurs de charge ainsi créés doivent être séparés rapidement avant de se recombiner et entraînés vers les électrodes collectrices. Cette séparation est obtenue par

un champ électrique (permanent et indestructible), cela est possible avec les structures suivantes :

- une jonction de deux semi-conducteurs de natures et de types différents (hétérojonctions),
- une barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diode Schottky),
- une jonction de deux semi-conducteurs de même type mais de dopages différents (homojonction PN).

II-4-La jonction PN sous obscurité

II-4-1-Physique des semi-conducteurs

II-4-1-1-Définition

Un semi-conducteur est un matériau où les électrons périphériques se répartissent entre deux bandes d'énergie séparées par un intervalle d'énergie appelé bande interdite (en anglais **gap**) de l'ordre de **1 eV** à une température supérieure à **0 °K**. Sa conductivité est intermédiaire entre les isolants et les métaux. On peut les classer en :

- Eléments simples : **Si - Ge - C ...**
- Composés minéraux binaires : **GaAs - InSb ...**
- Composés organiques : **Tétracène- Fullerène ...**

-Le silicium

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre et le troisième du manteau terrestre après l'oxygène et le magnésium [12]. Il appartient à la colonne IV, troisième ligne du tableau périodique des éléments, situé respectivement entre le carbone et le germanium, et l'aluminium et le phosphore. Il est semiconducteur avec une énergie de gap égale à 1,12 eV à 300 K dans l'état cristallin.

Allant du silicium polymorphe au microcristallin, Cette flexibilité en fait un bon candidat pour les applications de conversion photovoltaïque terrestres et spatiales.

II-4-1-2- Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique

Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction à l'équilibre thermodynamique est donné par l'intégrale

$$n = \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f_n(E) d(E) \quad (\text{II-1})$$

$N_c(E)$ est le nombre d'états possibles entre les niveaux E et $E+dE$ de la bande de conduction :

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (\text{II-2})$$

$f_n(E)$ est la probabilité d'occupation d'un état d'énergie E par un électron au dessus du niveau de Fermi et qui est donnée par la statistique de Fermi-Dirac :

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (\text{II-3})$$

D'où finalement :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (\text{II-4})$$

$$N_c = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_c^* kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (\text{II-5})$$

N_c est la densité effective des électrons dans la bande de conduction.

Identiquement, le nombre de trous dans la bande de valence à l'équilibre thermodynamique est donné par l'intégrale :

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} N_v(E) f_p(E) d(E) \quad (\text{II-6})$$

$N_v(E)$ est le nombre d'états possibles entre les niveaux E et $E+dE$ dans la bande de valence.

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{m_v^*}{\hbar} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (\text{II-7})$$

$f_p(E)=1-f_n(E)$ est la probabilité de trouver une place libre (vacante) de niveau d'énergie E au dessous du niveau de Fermi.

D'où de la même façon :

$$p = N_v \exp \frac{E_v - E_F}{kT} \quad (\text{II-8})$$

$$N_v = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_v^* kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (\text{II-9})$$

N_v est la densité effective des trous dans la bande de valence

Avec :

m_c^* : masse effective d'électron

m_v^* : masse effective du trou

E_c : niveau du bas de la bande de conduction

E_v : niveau du haut de la bande de valence

\hbar : constante de Planck, $\hbar = h/2\pi$

k : constante de Boltzman

T : température absolue du matériau (en °K)

E_F : niveau de Fermi: énergie de référence pour laquelle la probabilité d'occupation $f(E_F)$ est égale à 0.5

II-4-1-3- 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. Il en résulte que :

$$n = p = n_i \quad \text{donc} \quad np = n_i^2$$

n_i est appelé densité de porteurs intrinsèques, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée.

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (\text{II-10})$$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (\text{II-11})$$

La position du niveau de Fermi est obtenue en écrivant : $n=p$

$$N_c \exp\frac{E_F - E_c}{kT} = N_v \exp\frac{E_v - E_F}{kT} \quad (\text{II-12})$$

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (\text{II-13}) \quad \text{en remplaçant } N_v \text{ et } N_c \text{ par leur expression, il}$$

vient alors :

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_v^*}{m_c^*} \quad \text{puisque } m_v^* \simeq m_c^* \quad (\text{II-14})$$

$$E_{fi} \simeq \frac{E_c + E_v}{2} \quad (\text{II-15})$$

Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est donc presque au milieu de la bande interdite à la température ambiante (*Fig II-1*).

II-4-1-4-Semi-conducteur extrinsèque

Lorsque le semi-conducteur est dopé d'une façon contrôlée par des atomes spécifiques (donneurs ou accepteurs), ses propriétés électriques sont considérablement modifiées.

Si la densité des donneurs est supérieure à la densité d'accepteurs ($N_d > N_a$), cela veut dire que $n > p$ car $n + N_a^- = p + N_d^+$ (équation de neutralité (II-16)), on dit dans ce cas que le semi-conducteur est de type **n**. Pour le cas inverse, le semi-conducteur est de type **p**.

Pour un semi-conducteur de type **n**, on a :

$$n = N_d - N_a \text{ En négligeant la densité de trous.}$$

Avec la condition $np=ni^2$, on trouve :

$$p = \frac{ni^2}{N_d - N_a}$$

Le niveau de Fermi est donné par :

$$E_F = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_d - N_a} \quad (\text{II-17})$$

Le niveau de Fermi monte vers le haut de la bande de conduction (*Fig II-1*)

Pour un semi-conducteur de type **p**, on a :

$$p = N_a - N_d$$

$$n = \frac{ni^2}{N_a - N_d}$$

$$E_F = E_v + kT \ln \frac{N_v}{N_a - N_d} \quad (\text{II-18})$$

Le niveau de fermi descend vers le bas de la bande de valence (*Fig II-1*)

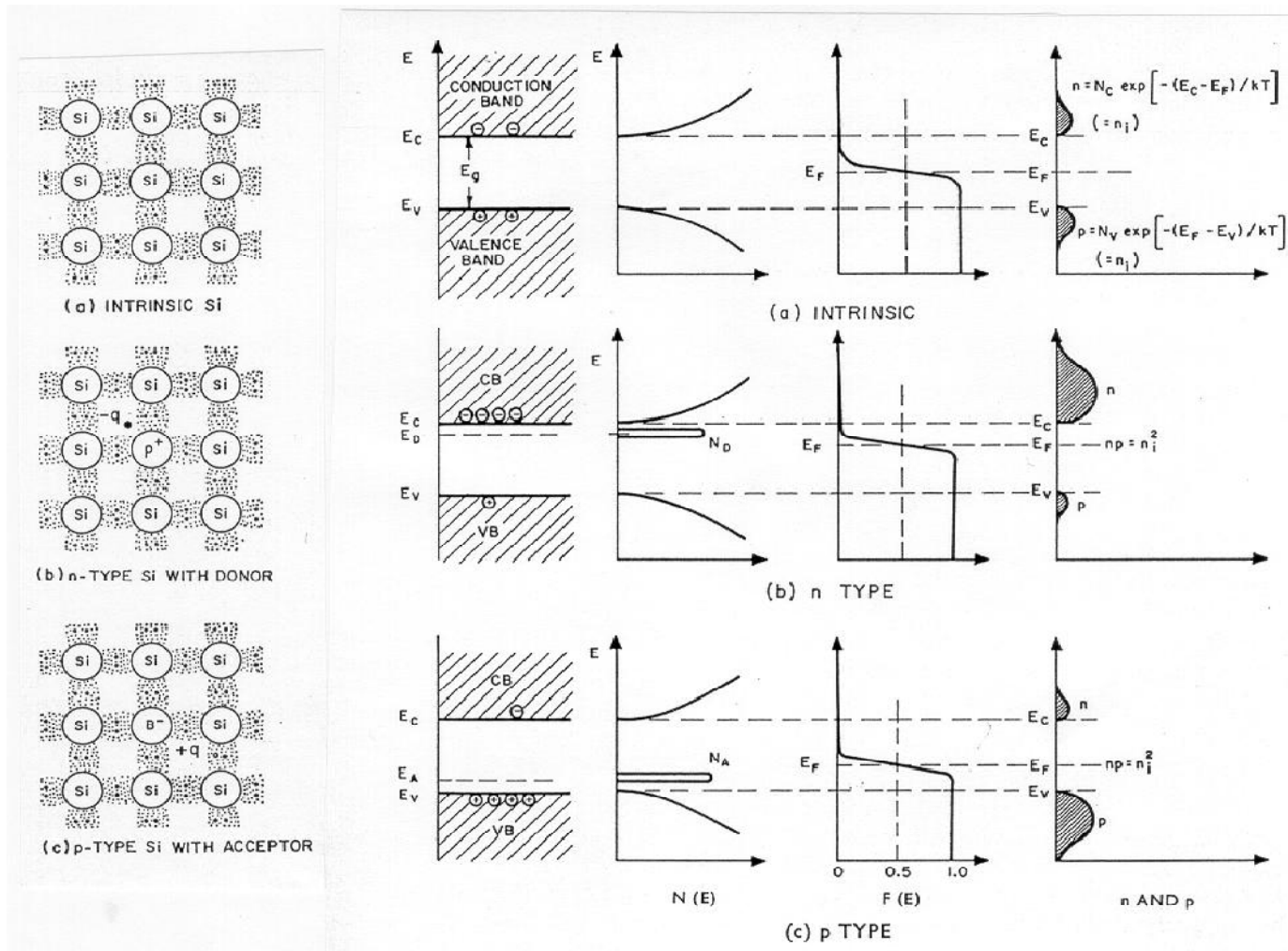


Fig II-1 : Position du niveau de Fermi dans différents types de semi-conducteur

II-4-1-5-Notion de quasi-niveau de Fermi

En régime d'équilibre thermodynamique, le produit ($n.p=n_i^2$) est constant et les densités de porteurs sont données par les relations vues précédemment :

$$n = N_c \exp \frac{E_F - E_C}{kT} \quad \text{et} \quad p = N_v \exp \frac{E_V - E_F}{kT}$$

Hors équilibre (injection ou extraction des porteurs), le produit peut différer notablement de n_i^2 ($n.p \neq n_i^2$) et le niveau de Fermi n'est pas le même, donc on parle de

quasi-niveau de Fermi E_{Fn} pour les électrons et de E_{Fp} pour les trous. Ils sont donnés par les relations suivantes :

$$n = N_c \exp \frac{E_{Fn} - E_c}{kT} \quad (\text{II-19}) \quad \text{et} \quad p = N_v \exp \frac{E_v - E_{Fp}}{kT} \quad (\text{II-20})$$

On peut démontrer que

$$E_{Fn} = E_F + kT \ln \left(1 + \frac{\delta n}{n_0} \right) \quad \text{et} \quad E_{Fp} = E_F - kT \ln \left(1 + \frac{\delta p}{p_0} \right)$$

n_0 et p_0 sont les densités d'électrons et trous à l'équilibre thermodynamique.

δn et δp sont les variations des densités d'électrons et trous hors équilibre.

II-4-1-6- Courants dans le semi-conducteur

Sous l'effet d'un champ électrique \vec{E} , il y aura un déplacement des porteurs de charges donc un **courant de conduction** \vec{J}_c donné par la loi d'ohm $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ où σ est la conductivité du semi-conducteur.

Pour les électrons : $\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E}$ avec μ_n est la mobilité des électrons (II-21)

Pour les trous : $\vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E}$ avec μ_p est la mobilité des trous (II-22)

q est la valeur absolue de la charge d'électron.

Ainsi le courant total de conduction : $\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E}$ (II-23)

Sous l'effet d'un gradient de concentration, il y aura un **courant de diffusion** \vec{J}_D selon la loi de Fick

Pour les électrons : $\vec{J}_n = qD_n \vec{\nabla} n$ (II-24) ; D_n est la constante de diffusion des électrons.

Pour les trous : $\vec{J}_p = -qD_p \vec{\nabla} p$ (II-25) ; D_p est la constante de diffusion des trous.

Ainsi le courant total de diffusion : $\vec{J}_D = q(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p)$ (II-26)

D'après les expressions ci-dessus (II – 21 – 22 – 24 – 25) , les courants d'électrons et de trous s'écrivent donc :

$$\vec{J}_n = q(n\mu_n\vec{E} + D_n\nabla n) \quad (\text{II} - 27)$$

$$\vec{J}_p = q(p\mu_p\vec{E} - D_p\nabla p) \quad (\text{II} - 28)$$

II-4-1-7- Génération-Recombinaison

La génération G est la création des porteurs dans le semi-conducteur, elle est caractérisée par un paramètre qui mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et par unité de temps ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$).

La génération peut être due à l'agitation thermique ou d'une excitation du semi-conducteur par une source extérieure (optique, électrique...).

La recombinaison est le processus inverse, elle est caractérisée par un paramètre R ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) propre au matériau.

-Recombinaison directe (inter bandes) :

L'excès de l'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme optique. Le processus est important dans les semi-conducteur à gap direct (**ex: GaAs**). Le taux de recombinaison est donné par :

$$R = K(np - n_i^2) \quad (\text{II} - 29), \text{ K est une constante de proportionnalité}$$

En régime de faible injection où la densité des porteurs majoritaires reste inchangée et seul la densité des porteurs minoritaires est affectée, les taux de recombinaison sont données par :

$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (\text{II} - 30) \quad ; \quad R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (\text{II} - 31)$$

τ_n, τ_p sont les durées de vie des porteurs minoritaires.

-Recombinaison Auger :

La recombinaison Auger se produit 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. Cette énergie se libère sous forme de phonons. Ce type de recombinaison se produit surtout dans les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est alors donné par :

$$R = \beta(n^2p - nn_0p_0) \quad (\text{II} - 32)$$

β est une constante de proportionnalité,

n_0, p_0 sont les densités respectives des électrons et des trous à l'équilibre,

n, p sont les densités respectives des électrons et des trous hors équilibre.

-Recombinaison par piège (Hall-Shockley-Read) (HSR):

Pour un matériau moins dopé, les défauts et les pièges situés à des niveaux profonds (bande interdite) limitent la durée de vie. Le taux de recombinaison est donné par

$$R = \frac{c_n c_p N_R (np - n_i^2)}{c_n (n + n_i e^{-(E_i - E_R)/kT}) + c_p (p + n_i e^{(E_i - E_R)/kT})} \quad (\text{II} - 33)$$

N_R est la concentration de centres recombinants d'énergie E_R

E_i niveau d'énergie intrinsèque

C_n, C_p sont les probabilités de capture des électrons et des trous.

-Recombinaison en surface

La surface du semi-conducteur est perturbée à cause des traitements mécaniques et chimiques qu'elle subit. La recombinaison au niveau de la surface est plus importante que celle du volume donnant naissance à un courant de diffusion. Par exemple, dans le cas d'un semi-conducteur de type **n**, on a :

$$D_p \frac{\delta \Delta p}{\delta x} (x = 0) = s \Delta p \quad (\text{II} - 34)$$

S est la vitesse de recombinaison.

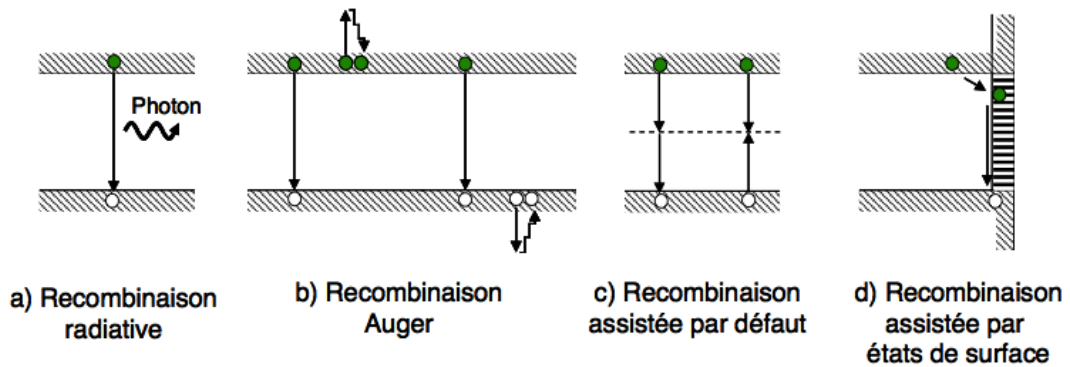


Fig II-2 – Représentation des différents mécanismes de recombinaisons.

II-4-1-8 Equations de continuité

Hors équilibre, la conservation du nombre de particules permet d'écrire les équations de continuité des électrons et des trous sous la forme :

$$\frac{dn}{dt} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_n \quad (\text{II} - 35)$$

$$\frac{dp}{dt} = G_p - R_p + \frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_p \quad (\text{II} - 36)$$

L'étude d'un dispositif à semi-conducteur consiste à résoudre ce système d'équations, avec celui des équations du courant :

$$\left. \begin{aligned} \vec{J}_n &= q(n\mu_n\vec{E} + D_n\vec{\nabla}n) \\ \vec{J}_p &= q(p\mu_p\vec{E} - D_p\vec{\nabla}p) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Equations de courants} \quad (\text{II} - 37) \\ (\text{II} - 38) \end{array}$$

Ainsi que l'équation de Poisson :

$$\text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = (p - n + N_d - N_a) \quad (\text{II} - 39)$$

La solution générale de ce système se fait numériquement, mais dans des cas plus simples elle peut être résolue analytiquement.

II-4-1-9- La jonction PN à l'équilibre

L'une des structures de base très utilisée pour fabriquer une cellule solaire est la jonction PN.

Une jonction PN est la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur.

Lorsque le contact est réalisé, les électrons de la région N, où ils sont majoritaires, vont diffuser vers la région P où ils sont minoritaires.

De même, les trous de la région P vont se déplacer par diffusion vers la région N. Le départ de ces électrons et de ces trous va provoquer l'apparition, de part et d'autre de la jonction, de deux zones non neutres l'une comprenant des impuretés ionisées positivement (zone N) et l'autre comprenant des impuretés ionisées négativement (zone P).

La présence de ces charges positives et négatives donne naissance à un champ électrique interne dont le sens est tel qu'il s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires.

À l'équilibre, tout se passe comme si deux courants identiques et opposés se superposaient, donnant un courant résultant nul : l'un est provoqué par la diffusion de gradients de concentration et l'autre de conduction dû à la présence du champ électrique.

La zone comprenant des charges non compensées est dite zone de charge d'espace (ZCE) ou zone désertée.

Pour le modèle simple de la jonction abrupte, on a :

$$\rho(x) = 0 \quad \text{Pour } x > x_n \text{ et } x < x_p$$

$$\rho(x) = -qN_a \quad \text{Pour } 0 > x > x_p$$

$$\rho(x) = qN_d \quad \text{Pour } 0 < x < x_n$$

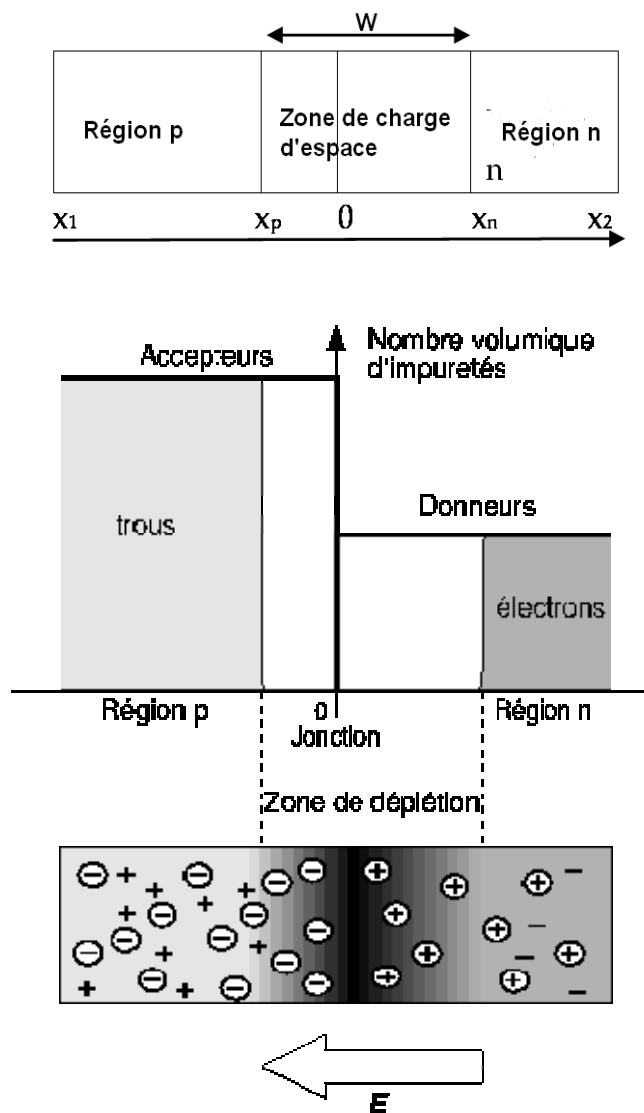


Fig II-3 : La jonction PN à l'équilibre (abrupte)

En intégrant l'équation de poisson pour une dimension, on obtient le champ électrique et le potentiel à travers la structure.

$$E = -\frac{qN_a}{\varepsilon}(x - x_p) \quad x_p < x < 0 \quad (\text{II} - 40)$$

$$E = \frac{qN_d}{\varepsilon}(x - x_n) \quad 0 < x < x_n \quad (\text{II} - 41)$$

$$V = \frac{qN_a}{2\varepsilon}(x - x_p)^2 + V_p \quad x_p < x < 0 \quad (\text{II} - 42)$$

$$V = -\frac{qN_d}{2\varepsilon}(x - x_n)^2 + V_n \quad 0 < x < x_n \quad (\text{II} - 43)$$

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon kT}{q^2 N_d}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II} - 44)$$

$$x_p = -\left(\frac{2\varepsilon kT}{q^2 N_a}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II} - 45)$$

La largeur de la ZCE est : $w = x_n - x_p \quad (\text{II} - 46)$

La tension de diffusion est : $V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\varepsilon}(N_d w_n^2 + N_a w_p^2) \quad (\text{II} - 47)$

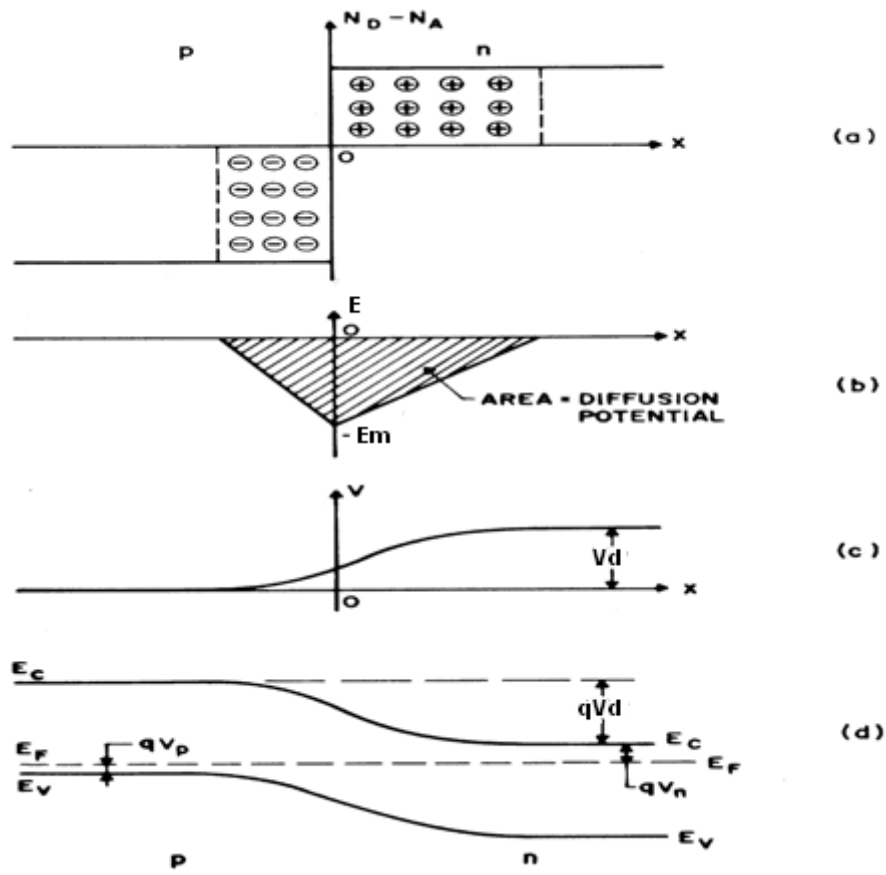
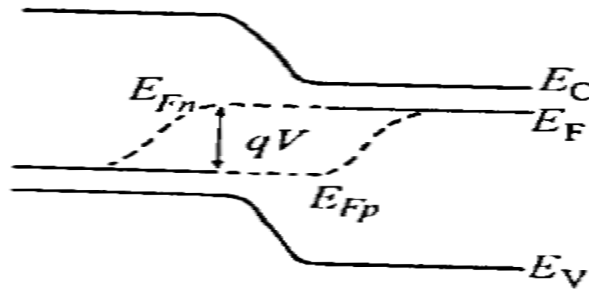


Fig II-4 : Jonction PN (abrupte) à l'équilibre : a) distribution des impuretés ionisées ; b) distribution du champ électrique ; c) variation du potentiel ; d) diagramme des bandes d'énergie

II-4-1-10. La jonction PN polarisée

Si la jonction est connectée à une source extérieure de tension V , il y aura un décalage des niveaux de Fermi. Dans la zone de charge d'espace, les niveaux de Fermi des électrons et des trous vont dédoubler en deux quasi-niveaux de Fermi E_{fn} et E_{fp} s'appliquant respectivement aux électrons et aux trous (FigII-5).



FigII-5 jonction PN polarisée (hors équilibre)

En utilisant les équations de continuité et de courant en régime de faible injection, les équations se simplifient davantage :

$$\frac{d^2n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_n} = 0 \quad ; \quad L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad ; \quad J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$\frac{d^2p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p} = 0 \quad ; \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad ; \quad J_p = qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J = J_n + J_p$$

L_n, L_p sont respectivement la longueur de diffusion des électrons et la longueur de diffusion des trous.

La résolution analytique simplifiée de ces équations nous donne la caractéristique $J=f(V)$

$$J = J_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (\text{II} - 48) \quad \text{avec} \quad J_s = \frac{qni^2 D_p}{N_d L_p} + \frac{qni^2 D_n}{N_a L_n} \quad (\text{II} - 49) \quad \text{courant}$$

de saturation

-Jonction PN à profil de dopage quelconque

Pour une jonction à profil de dopage quelconque, le courant de saturation est donné par la relation générale :

$$J_s = \frac{qni^2D_p}{\int_{x_n}^{x_2} N_d(x)dx} + \frac{qni^2D_n}{\int_{x_1}^{x_p} N_a(x)dx} \quad (\text{II} - 50)$$

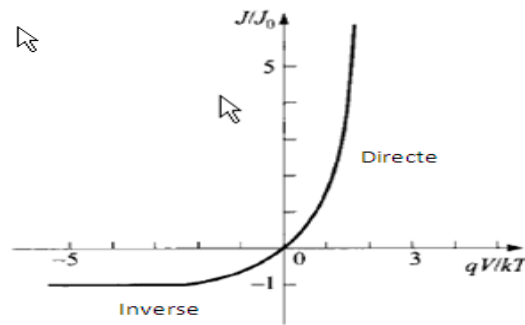


Fig II-6 : Caractéristique J(V)

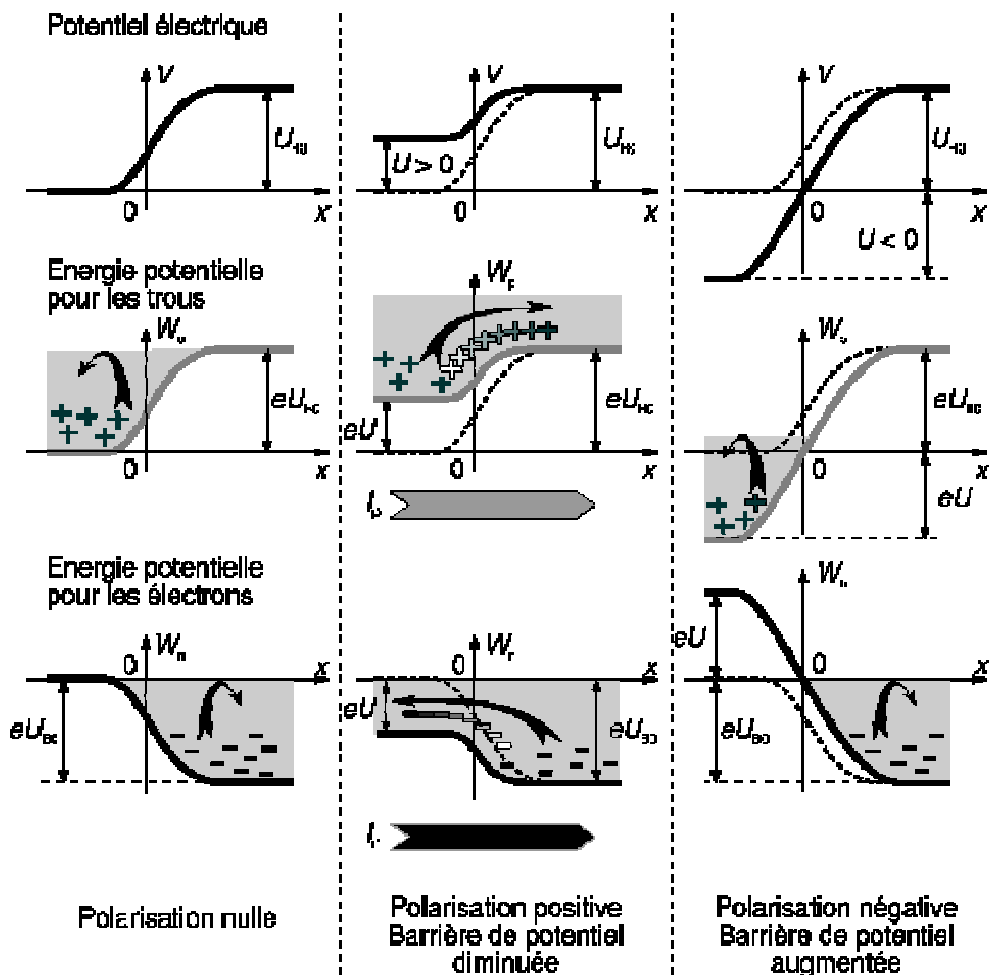


Fig II-7 : La jonction PN polarisée (directe (positive) et indirecte (négative))

II-4-1-11-Courant de génération-recombinaison :

Le mécanisme de recombinaison-génération dans la zone de charge d'espace

provoque un courant supplémentaire qui peut être supérieur au courant de diffusion. Il est donné par :

$$J_{rg} = q \int_{x_p}^{x_n} R dx \quad \text{R est le taux de recombinaison maximum}$$

$R = \frac{1}{2} q \sigma v_{th} N_R n_i \left(\exp \frac{qv}{2kT} - 1 \right)$ (II - 51) où σ est la section efficace de capture , v_{th} la vitesse thermique.

$$J_{rg} = \frac{1}{2} e w \sigma v_{th} N_R n_i \left(\exp \frac{qv}{2kT} - 1 \right) \quad \text{(II - 52)}$$

II-4-1-12-Courant tunnel :

Il peut exister un troisième courant d'obscurité correspondant au passage par effet tunnel des électrons et des trous d'une bande à l'autre. Il apparait dans les jonctions de mauvaise qualité et dans les hétérojonctions. Il est de la forme :

$$J_t = A. \exp(BV) \quad \text{(II - 53)}$$

A et B sont des constantes, V la tension de polarisation

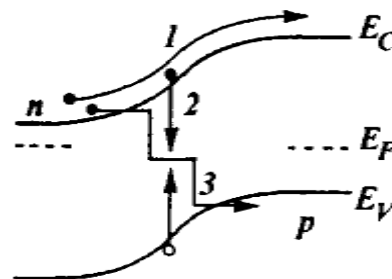


Fig II-8 : Les trois mécanismes du courant d'obscurité

II-5-La jonction PN sous éclaircissement :

Lorsque le semi-conducteur est excité par un rayonnement $h\nu$, il existe deux types de transitions directe (gap **direct** comme **GaAs**) et indirecte (gap **indirect** comme **Si**) (Fig II-9)

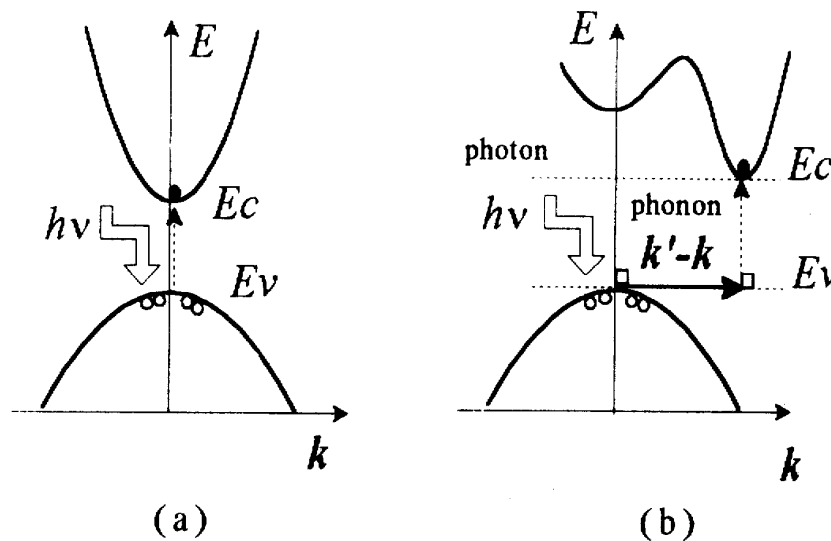


Fig II-9 : Absorption d'un photon dans un matériau semiconducteur : a) structure de bande à gap direct ; b) structure de bande à gap indirect

Si $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion pour le rayonnement de longueur d'onde λ , $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption pour la même longueur d'onde, alors le flux de photons $\Phi(\lambda, x)$ de longueur d'onde λ à la profondeur x du semi-conducteur est donné par :

$$\Phi(\lambda, x) = \Phi_0(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II} - 54)$$

$\Phi_0(\lambda)$: (photons/s⁻¹.cm⁻²) le nombre de photons incidents par unité de temps et par unité de surface.

$$R(\lambda) = \left(\frac{n(\lambda)-1}{n(\lambda)+1} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r(\lambda)}-1}{\sqrt{\epsilon_r(\lambda)}+1} \right)^2 \quad (\text{II} - 55)$$

n est l'indice de réfraction du matériau et ϵ_r sa constante diélectrique relative et qui dépendent de la longueur d'onde du rayonnement.

Le taux de génération de paires électron-trou est égal au taux de disparition de photons donné par :

$$G(\lambda, x) = -\frac{d\Phi(\lambda, x)}{dx} \quad (\text{II} - 56)$$

$$G(\lambda, x) = \Phi_0(\lambda)\alpha(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II} - 57)$$

Pour un rayonnement d'un spectre d'onde continu (ex. AM1.5), la génération est donnée par :

$$G(x) = \int G(\lambda, x)d\lambda$$

En remplaçant cette expression dans l'équation de continuité, on peut résoudre le système d'équations de la jonction **PN** sous éclairage pour déterminer le photocourant I_{ph} .

II-5-1-Le photocourant I_{ph} :

Pour avoir une idée sur l'allure du photocourant et par conséquent la réponse spectrale, on peut effectuer des approximations et des simplifications dans le but d'obtenir une forme analytique du photocourant. En résolvant le système d'équations dans chaque région de la jonction simple abrupte, on obtient :

Pour la région N (Emetteur):

$$J_p = [q\Phi_0(1-R)\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \left[\frac{\left(\frac{s_p L_p}{D_p} + \alpha L_p\right) \exp(-\alpha x_j) \left(\frac{s_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p}\right)}{\left(\frac{s_p L_p}{D_p}\right) \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p}} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right]$$

(II - 58)

Pour la région P (base) :

$$J_n = [q\Phi_0(1-R)\alpha L_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \exp(-\alpha(x_j + w))] \left[\alpha L_n - \frac{\frac{s_n L_n}{D_n} [\cosh(\frac{H'}{L_n}) - \exp(-\alpha H')] + \sinh \frac{H'}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{s_n L_n}{D_n} \sinh(\frac{H'}{L_n}) + \cosh \frac{H'}{L_n}} \right]$$

(II - 59)

Avec les conditions :

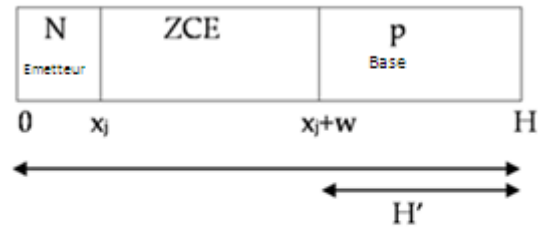
$$\begin{aligned} x=0 & \quad D_p \frac{d\Delta p}{dx} = s_p d\Delta p \\ x=x_j & \quad \Delta p = 0 \\ x=x_j+w & \quad \Delta n = 0 \\ x=H & \quad -D_n \frac{d\Delta n}{dx} = s_n d\Delta n \end{aligned}$$

Pour la région ZCE :

$$J_d = q\Phi_0(1-R) \exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha w)] \quad (\text{II} - 60)$$

Le courant total est alors la sommation des trois contributions de ces trois zones:

$$J_{ph}(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_d(\lambda)$$



FigII-10 Limites de la jonction

II-5-2- Réponse spectrale

Elle est appelée aussi le rendement quantique ou de collecte interne, elle est donnée par

$$R_{si} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (\text{II} - 61)$$

Si on ne prend pas compte de la réflexion, on parle du rendement quantique externe. Il est donnée par

$$R_{se} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)} \quad (\text{II} - 62)$$

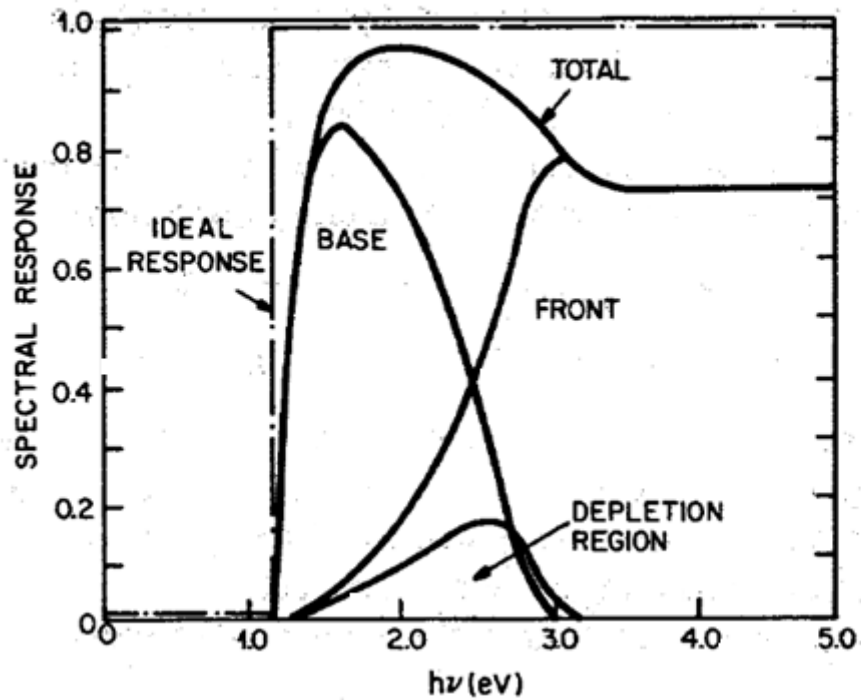


Fig II-11 : Exemple de courbe de réponse spectrale

II-5-3-Caractéristique I(V)

La caractéristique idéale $I(V)$ de la cellule contient deux composantes, la première est la caractéristique sous obscurité, la seconde étant le photocourant :

$$I = I_s(e^{qV/kT} - 1) - I_{ph} \quad (\text{II} - 63) \quad (\text{Modèle à une diode})$$

Si on considère le courant de génération-recombinaison dans la ZCE, la caractéristique $I(V)$ devienne :

$$I = I_{s1}(e^{qV/kT} - 1) + I_{s2}(e^{qV/2kT} - 1) - I_{ph} \quad (\text{II} - 64) \quad (\text{Modèle à deux diodes})$$

Si on tient compte des résistances série et parallèles (shunt), on aura la caractéristique réelle de la cellule (**Fig II-12**) et on aura :

$$I = [I_{s1} \left(e^{\frac{qV-IR_s}{n_1kT}} - 1 \right) + I_{s2} \left(e^{\frac{qV-IR_s}{n_2kT}} - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_{sh}} - I_{ph}] \quad (II - 65)$$

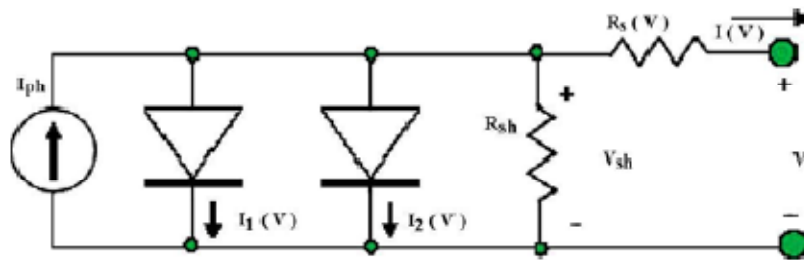
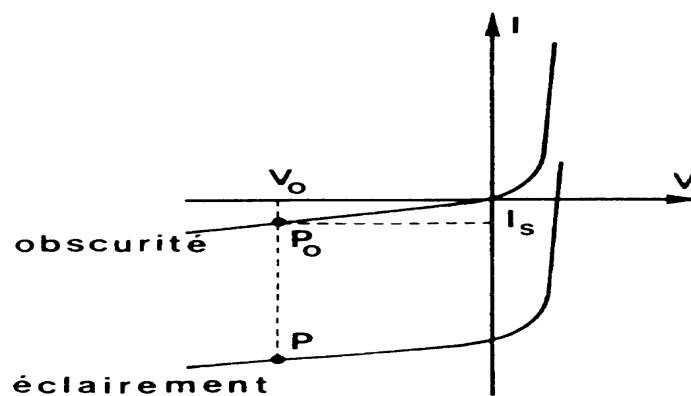


Fig II-12 : Schéma électrique équivalent

Le modèle électrique réel d'une cellule solaire, est constitué donc d'une source de courant modélisant l'éclairement, d'une diode D1 en parallèle (de facteur d'idéalité $n_1=1$) spécifiant le courant de diffusion dans l'émetteur et la base de la cellule solaire, d'une résistance série, qui modélise la résistance des contacts et les pertes résistives dans la base et l'émetteur ; d'une résistance shunt qui tient en considération les pertes et les courants de fuites dans l'émetteur et la base, enfin d'une seconde diode D2 également en parallèle (de facteur d'idéalité $n_2=2$) tenant compte de la recombinaison des porteurs dans la Zone de Charge Espace.



FigII-13 : Caractéristique I(V)

II-5-3-1-Effet résistif :

La caractéristique $I(V)$ est affectée par les pertes résistives qui diminuent le rendement. Elles sont dues aux résistances parallèles (résistances Shunt), telles que les fuites sur les bords de la cellule photovoltaïque ou lorsque le métal de la face avant court-circuite l'émetteur, elle est de l'ordre de quelques kilo-Ohms. Il y a aussi les pertes de puissance dues à la résistivité des différents éléments de la cellule solaire, ce sont les résistances séries qui sont de l'ordre de quelques ohms.

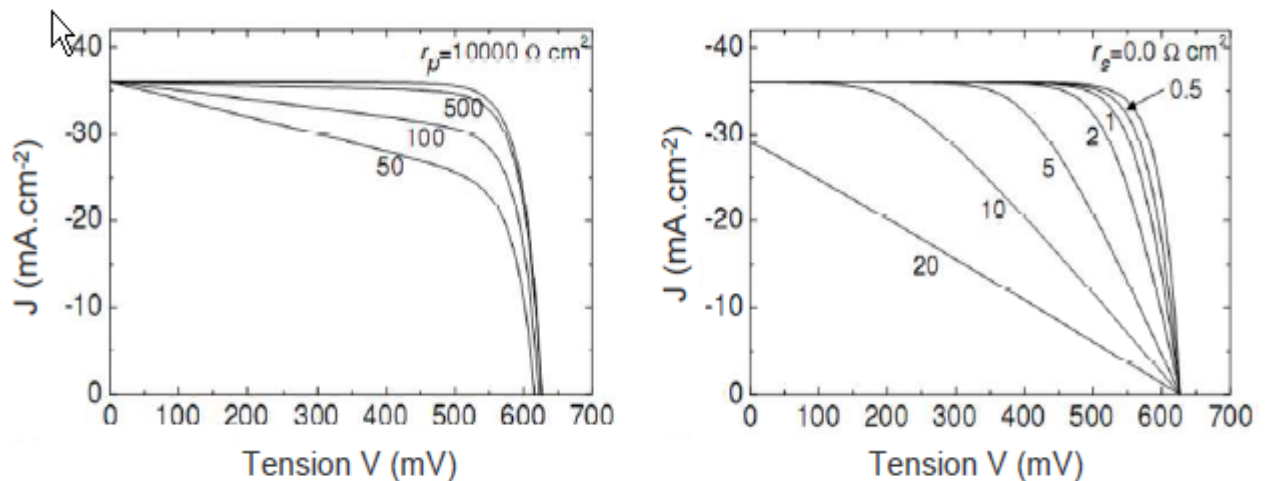


Fig II-14: Effets résistifs [13]

La résistance série 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 (voir section II-6-1-1)

La résistance shunt doit être grande car elle influe considérablement sur la tension de circuit ouvert.

II-6- Fonctionnement d'une cellule solaire

Les schémas de principe de fonctionnement d'une cellule solaire sont représentés sur la figure (*Fig II-15*). Une cellule solaire standard en silicium est constituée d'un substrat de type **P** (appelé **base** dont les porteurs de charge majoritaires sont les trous) et d'une zone en face avant fortement dopée **n+** (appelée **émetteur** où les porteurs majoritaires sont les électrons).

La jonction de ces deux zones va entraîner la création de la zone de charge d'espace (ZCE) où les porteurs sont séparés. Les charges positives (trous) minoritaires dans l'émetteur, si elles arrivent au bord de la ZCE, sont entraînées par le champ E puis se retrouvent dans la base où elles sont majoritaires. Le phénomène inverse se produit pour les électrons, minoritaires dans la base. Enfin, les contacts métalliques permettent la collecte des charges vers le circuit extérieur : ils se présentent sous forme de grille sur la face avant, et généralement pleine plaque sur la face arrière.

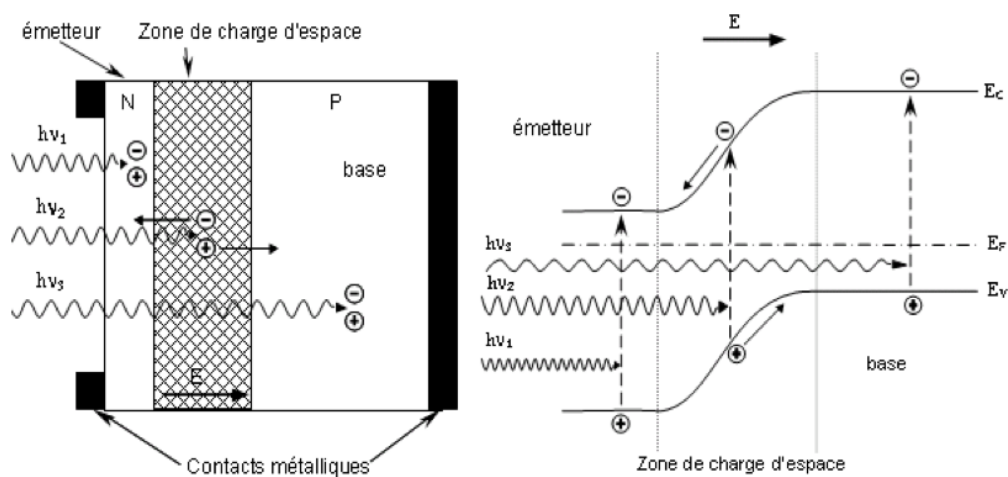


Fig II-15-Schémas de principe du fonctionnement d'une cellule solaire.

II-6-1-Paramètres physiques :**II-6-1-1-Tension de circuit ouvert :**

Elle caractérise la différence de potentiel entre les deux bornes de la cellule sous éclairement, lorsque le circuit extérieur est ouvert, on a

$$I = I_{s1}(e^{qV/kT} - 1) + I_{s2}(e^{qV/2kT} - 1) - I_{ph} \quad ; \quad I = 0$$

$$I_{s1}(e^{qV/kT} - 1) + I_{s2}(e^{qV/2kT} - 1) - I_{ph} = 0$$

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{s1}} + 1 \right) \quad (e^{qV/2kT} \ll e^{qV/kT}) \quad (\text{II} - 66)$$

La tension de circuit ouvert est sensiblement liée au courant de saturation.

II-6-1-2-Courant de court circuit :

Il caractérise le courant circulant lorsque la cellule est en court circuit, alors on a pour $V = 0$

$$I_{cc} = -I_{s1} - I_{s2} - I_{ph} \approx -I_{ph} \quad (\text{II} - 67)$$

Le courant de court circuit est sensiblement égal au photocourant.

II-6-1-3-Facteur de forme :

Il nous renseigne sur la qualité de la cellule solaire, On s'éloigne du cas idéal (100%) lorsque la résistance série est trop élevée, ou encore quand la résistance parallèle est faible. Le facteur de forme est donné par

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc}V_{oc}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc}V_{oc}} \quad (\text{II} - 68)$$

P_m est la puissance maximale fournie par le composant au point optimal (I_m, V_m).

II-6-1-4-Rendement

Le rendement de conversion de la photopile η est défini par le rapport de la puissance générée sur la puissance initiale reçue (éclairage de 100 mW/cm² pour des conditions standards (AM1.5), soit :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_i} \quad (\text{II} - 69)$$

P_i étant la puissance incidente.

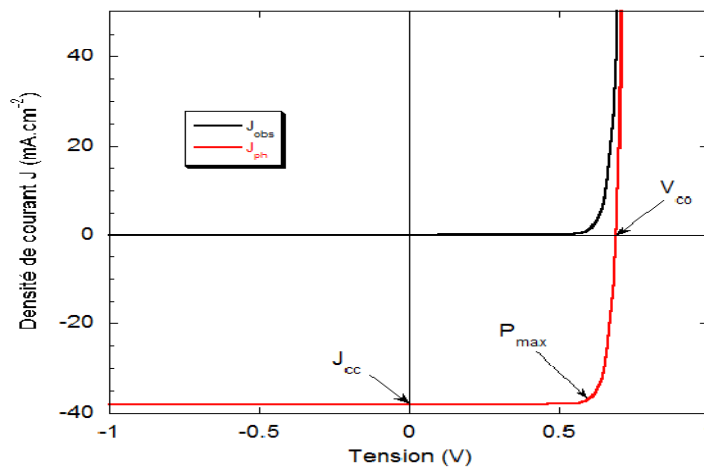


Fig II-16-Paramètres de la cellule

II-6-2-Point de fonctionnement

La puissance fournie par la photopile est donnée par :

$$P = VI = V[I_{s1}(e^{qV/kT} - 1) + I_{s2}(e^{qV/2kT} - 1) - I_{ph}]$$

Cette puissance P_m fournie est maximum au point optimal (V_m, I_m) définie par $\frac{dP}{dV} = 0$

$$\begin{cases} I_{s1}e^{qV_m/kT} \left(1 + \frac{qV_m}{kT}\right) + I_{s2}e^{qV_m/2kT} \left(1 + \frac{qV_m}{2kT}\right) = I_{s1} + I_{s2} + I_{ph} \\ I_m = I_{s1}(e^{qV_m/kT} - 1) + I_{s2}(e^{qV_m/2kT} - 1) - I_{ph} \end{cases}$$

La résolution numérique ou graphique (FigII-16) de ce système nous donne les valeurs V_m et I_m qui déterminent la puissance maximale:

$$P_m = V_m \cdot I_m$$

La résistance de charge permettant d'utiliser la puissance maximale est donnée par :

$$R_c = \frac{V_m}{I_m}$$

II-6-3-Pertes fondamentales limitant le rendement

En pratique, la conversion photovoltaïque n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule solaire. Les principaux facteurs de pertes sont les suivants:

- Absorption incomplète des photons (Fig II-17, zone A, environ 27%)
- Excès d'énergie par rapport au gap (Fig II-17, zone B, environ 28%)
- Réflexion par la surface
- Ombrage de la surface active par les grilles de collecte
- Rendement de collecte
- Chute de tension en circuit ouvert
- Facteur de forme comprenant dans le cas d'une photodiode (Résistance série, Résistance shunt, Facteur d'idéalité)

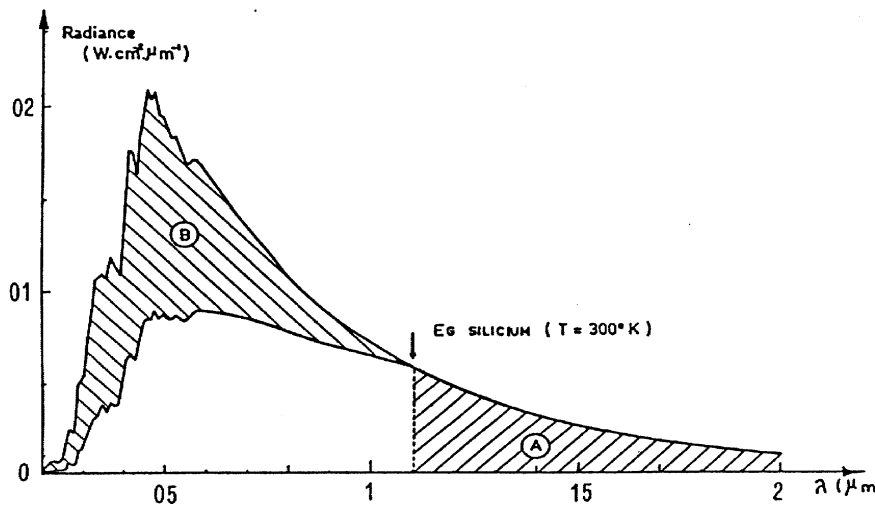


Fig II-17- Irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde

II-6-4-Réduction de pertes

Pour améliorer le rendement de conversion, on passe par plusieurs opérations qui sont les suivantes (Fig II-18)

II-6-4-1-Passivation face avant et arrière

La surface d'un semi-conducteur comporte une très grande quantité de défauts entraînant des pertes liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électroniquement actifs. Pour cela, on ajoute une couche de passivation comme SiO_2 , SiN_x .

II-6-4-2-Couche AntiReflet

La couche antireflet (CAR) est utilisée pour minimiser la réflexion de la lumière. Les différentes CAR utilisées en photovoltaïque sont: TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc.

II-6-4-3-Texturation de la surface

Pour améliorer davantage la réflectivité, on texturise la surface, c'est-à-dire former des

pyramides à la surface du silicium par attaque chimique basique (KOH , NaOH) . Le but étant de piéger le rayon incident dans la structure de la cellule.

II-6-4-4-Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. La résistance des contacts est un paramètre très important car une trop forte résistance des contacts augmente la résistance série et baisse le facteur de forme et par conséquent le rendement. Il existe plusieurs procédés pour réaliser les contacts: par exemple pour les cellules photovoltaïques industrielles en silicium, les contacts sont généralement réalisés par **sérigraphie** (dépôt d'une pâte métallique sur un écran de soie où est imprimée la géométrie de la grille puis on chauffe le motif de grille). Pour les cellules à haut rendement, la **pulvérisation cathodique** (pulvérisation du métal par pression contrôlée puis séchage) ou **l'évaporation sous vide** (évaporation du métal à travers un masque métallique plaqué contre la surface du semiconducteur.) sont utilisées.

II-6-4-5- Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field)

Il est utilisé pour passiver la face arrière de la cellule. En ajoutant une couche plus dopée à l'arrière, il y aura donc création d'une barrière de potentiel supplémentaire qui fait diminuer la vitesse de recombinaison sur la face arrière.

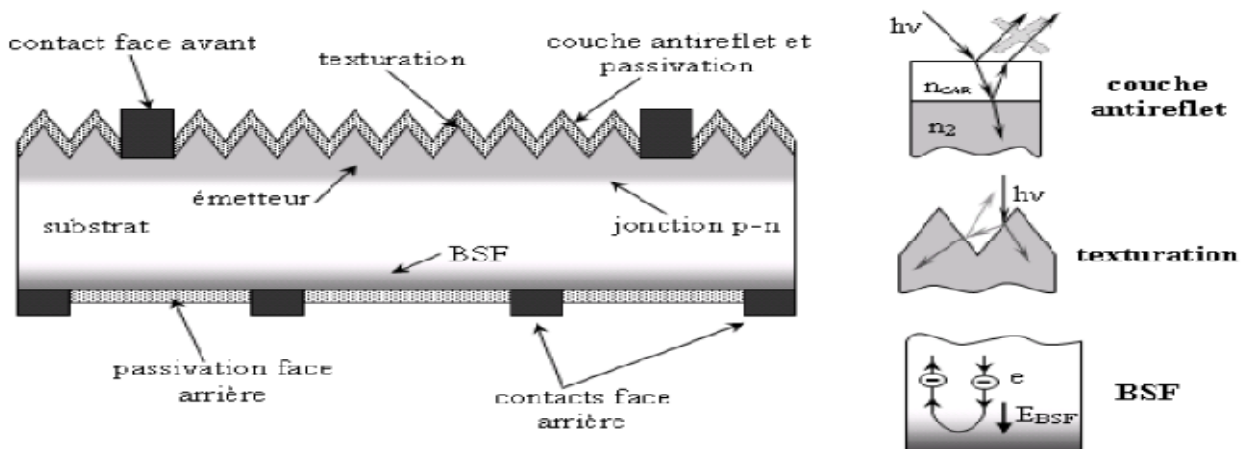


Fig II-18- Structure de la cellule solaire

II-6-5-Procédé standard de réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium [13]

La figure *Fig II-19* résume le procédé standard de réalisation d'une cellule solaire dans l'industrie actuelle. Le matériau de base est une plaquette de silicium.

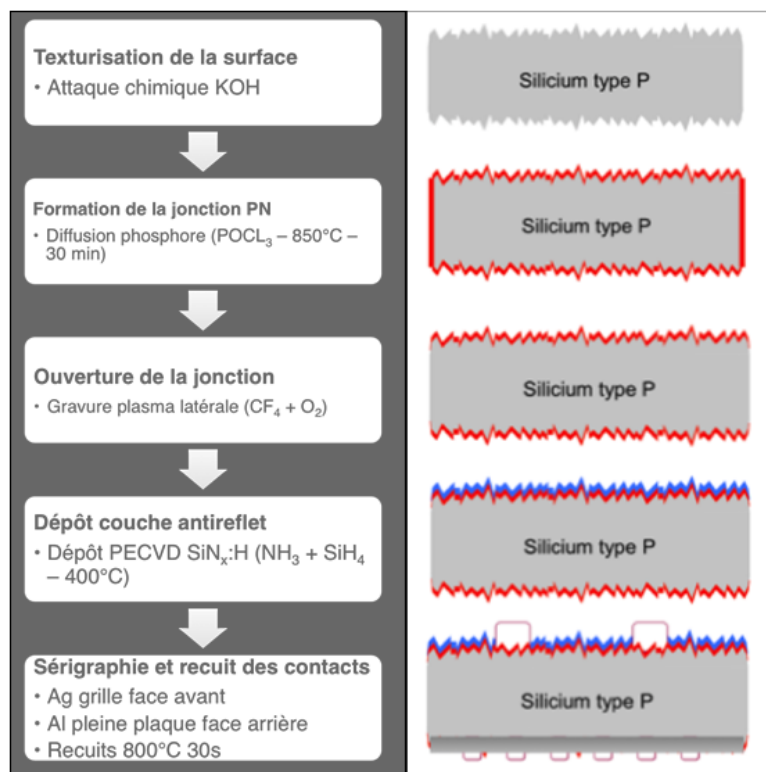


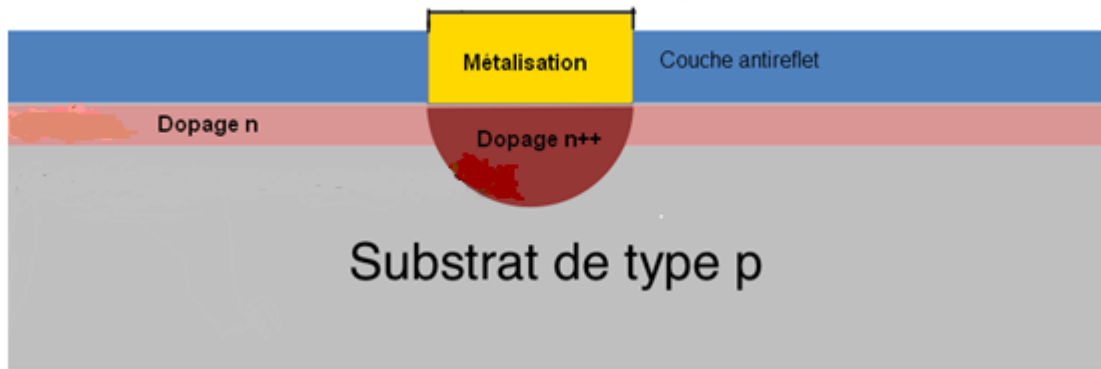
Fig II-19-Étapes de procédés de fabrication de cellules photovoltaïques industrielles en silicium de première génération. (Utilisé par Irysolar filiale de SEMCO Eng de Montpellier-France-.)

II-7- Cellule solaire en silicium à émetteur sélectif

II-7-1- Introduction

De nouvelles architectures permettant de remédier aux limitations des cellules solaires au silicium cristallin sont aujourd'hui activement recherchées. Parmi celles-ci, la cellule à «émetteur sélectif » apparaît depuis longtemps comme une solution la plus indiquée, apportant une amélioration notable du rendement de conversion.

Néanmoins, la réalisation d'une telle structure s'avère coûteuse et complexe, ce qui freine considérablement son industrialisation.



FigII-20- cellule à émetteur sélectif

II-7-2-Principe et avantages

Le dopage de l'émetteur d'une cellule solaire doit répondre aux deux conditions contradictoires : limiter les recombinaisons, donc un dopage faible tout en obtenant une faible résistance série, donc un dopage fort.

Une structure photovoltaïque avec un différentiel de dopage entre l'émetteur faiblement dopé (résistance superficielle $\sim 80-120\Omega/\square$) pour la passivation et l'émetteur fortement dopé (résistance superficielle $\sim 20-60\Omega/\square$) pour une bonne qualité des contacts métal/semiconducteur serait plus appropriée. C'est la cellule à émetteur sélectif (Selectif Emitter Cell).

Ainsi un fort dopage sous les contacts autorise un meilleur facteur de forme, et un faible dopage sous les zones éclairées augmenterait la tension de circuit ouvert V_{co} avec en plus un courant de court circuit I_{cc} plus important. Le rendement quantique de la cellule sera également modifié, la meilleure passivation de la surface autorise en effet un meilleur rendement pour les faibles longueurs d'onde (absorbées en surface).

II-7-3-Procédés pour la réalisation d'émetteurs sélectifs

La technologie de la réalisation des cellules à émetteur sélectifs est encore en voie de recherche dans les laboratoires. Sa première implémentation dans un procédé de type industriel a été réalisée par la société **BP Solar (Madrid, Espagne)** par la voie des contacts enterrés. Cette approche avait le désavantage de nécessiter d'importantes modifications du procédé standard (formation de tranchées, deux diffusions thermiques, etc.) et n'était pas compatible avec les substrats multicristallins.

D'autres technologies ont été réalisées pour implémenter l'émetteur sélectif dans une production industrielle à grande échelle avec un minimum d'étapes supplémentaires et d'être facilement intégrable dans le procédé standard actuel. Parmi ces procédés nous citons :

II-7-3-1-Les encres dopées :

La société **Innovalight Inc (Sunnyvale, Californie)** a développé une technologie basée sur des micros-particules de silicium fortement dopées. Ces particules, contenues dans une encre, sont déposées sur le substrat de silicium par sérigraphie avant l'étape de diffusion thermique. L'émetteur réalisé est un émetteur faiblement dopé et l'encre sert de source de phosphore supplémentaire pour une plus forte diffusion dans les zones appelées à être sous les contacts.

II-7-3-2-L'implantation ionique

La réalisation d'émetteurs sélectifs par implantation ionique repose sur l'utilisation d'un masque physique qui réduit la dose implantée dans les zones entre les contacts. Bien que l'émetteur ne soit pas réalisé par diffusion thermique, une étape haute température est tout de même nécessaire pour guérir les défauts induits dans le réseau cristallin par le bombardement ionique et pour activer les dopants.

II-7-3-3-Le dopage laser

Un laser est utilisé pour chauffer localement la surface du silicium et ainsi autoriser la diffusion d'atomes dopants à partir d'une source préalablement déposée sur le substrat.

Toutes ces technologies permettent d'accéder à des rendements très similaires (18 à 18,5% sur substrat monocristallin de type p de grande dimension, correspondant à un gain moyen de 0,5 % sur le rendement [13]. Elles se distinguent principalement par leur compatibilité avec le procédé standard ainsi que par le nombre d'équipements et d'étapes de procédés supplémentaires qu'elles requièrent.

Chapitre III

Présentation des programmes PC1D et PC2D

Chapitre III- Présentation des programmes PC1D et PC2D

III-1-Aperçu sur le logiciel PC1D

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaires PC1D est largement utilisé dans le domaine photovoltaïque. Il a une grande réputation au sein du milieu de la recherche sur l'énergie solaire. Il a été développé à l'université « **New South Wales of Sydney** » en Australie qui est l'une des pionnières dans la spécialité. Son succès est basé sur sa vitesse d'exécution, son interface utilisatrice et ses mises à jour continues (la dernière en date étant la version **5.9**).

On peut simuler une structure photovoltaïque en introduisant ses paramètres (géométrie-dopages, paramètres électriques et optiques, etc....), en choisissant l'excitation et enfin en exécutant le programme pour l'obtention des résultats.

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la **Figure III-1**. Le logiciel se compose de quatre parties. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

III-1-1- Paramètres du dispositif (Device)

Ils sont comme suit:

- La surface du dispositif,
- La texturisation,
- La densité de charge surfacique,
- La couche de passivation,
- La réflectance externe,
- La réflectance interne,
- Les résistances séries internes,
- Les résistances shunt internes.

III-1-2-Paramètres des régions

On peut introduire plusieurs régions selon la forme et les propriétés de la structure.

Ces paramètres de région sont les suivants:

- L'épaisseur du matériau,
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (***.mat**). Ils sont fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités, la constante diélectrique (permittivité électrique), l'énergie du gap (**eV**), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque (**cm⁻³**), le coefficient d'absorption optique (**cm⁻¹**) et l'absorption des porteurs libres,
- Le type et la concentration du dopage,
- Les durées de vie des porteurs,
- Les vitesses de recombinaison dans chaque région.

III-1-3-Paramètres d'excitation

- Le logiciel contient deux fichiers intégrés :
 - le fichier « **One-Sun.exc** » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...),
 - le fichier « **Scan-qe.exc** » (intensité de chaque longueur du spectre) pour la simulation de la réponse spectrale,
- Mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire),
- Température,
- Circuit (résistance, tension),
- Eclairement (intensité, fichier d'air masse).

III-1-4-Résultats

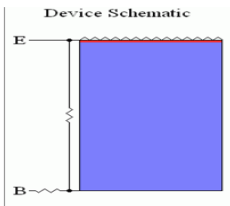
Les résultats visualisés tout à fait en bas de la page lorsqu'on utilise le fichier « **One-Sun.exc** » comme excitation, sont :

- La valeur du courant de court-circuit,
- La valeur de la tension en circuit ouvert,
- La valeur de la puissance maximale.

Ceux obtenus avec le fichier « **Scan-qe.exc** » sont :

- La valeur de courant de court-circuit,
- La valeur de la puissance maximale.

File: D:\mes documents\magister\mon sujet de magister\sujet\Thèse\PC1D v5.9\PVcell-modern.pr
 This is a silicon solar cell with parameters typical of modern commercial products, including series resistance and shunt conductance. The area has been normalized to 1 cm². It has a shallow passivated emitter that has been pyramidally textured and an aluminum back surface field. The file scans the one-sun I-V curve of the cell. To solve for the spectral response, select ScanQE for the Excitation file.

<p>DEVICE Device area: 1 cm² Front surface texture depth: 3 μm <i>No surface charge</i> Exterior Front Reflectance: 5% <i>No Exterior Rear Reflectance</i> Internal optical reflectance enabled Front surface optically rough Emitter contact enabled Base contact: 0.8 Ω Internal conductor: 1×10⁻³ S</p> <p>REGION 1 Thickness: 180 μm Material modified from si.mat Carrier mobilities from internal model Dielectric constant: 11.9 Band gap: 1.124 eV Intrinsic conc. at 300 K: 1×10¹⁰ cm⁻³ Refractive index from si.inr Absorption coeff. from si300.abs Free carrier absorption enabled P-type background doping: 1×10¹⁶ cm⁻³ 1st front diff.: N-type, 2×10²⁰ cm⁻³ peak <i>No 2nd front diffusion</i> 1st rear diff.: P-type, 3×10¹⁸ cm⁻³ peak <i>No 2nd rear diffusion</i> Bulk recombination: τ_n = τ_p = 30 μs Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 100 cm/s Rear-surface recom.: S model, S_n = S_p = 1×10⁷ cm/s</p> <p>EXCITATION Excitation from light iv.exc Excitation mode: Transient, 50 timesteps Temperature: 25°C Bias circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V <i>Collector circuit: Zero</i> Primary light source enabled Constant intensity: 0.1 W cm⁻² Spectrum from am15g.spc <i>Secondary light source disabled</i></p> <p>RESULTS Short-circuit Ib: -0.0373 amps Max base power out: 0.0189 watts Open-circuit Vb: 0.6189 volts</p>	
--	--

FigIII-1-Fenêtre du PC1D

III-2-De PC1D à PC2D

La popularité et le succès de PC1D pour la simulation des cellules solaires en une dimension ont poussé ses auteurs à réfléchir à le faire évoluer vers un logiciel à deux

dimensions car la simulation de certaines structures comme par exemple celle de l'émetteur sélectif en une dimension est insuffisante pour étudier profondément certains comportements.

La perspective d'étendre PC1D à deux dimensions fût présentée en 1996 mais elle a été reportée par ses concepteurs jusqu'à ce qu'ils aient opté pour une interface simple et précise pour cette étude.

Ce qui fût donc réalisé le 19 Août 2011 où ses auteurs **Paul A. Basore et Kirsten Cabanas-Holmen** [1] ont présenté PC2D comme un nouveau simulateur à deux dimensions conçu à l'aide du tableur Excel de Microsoft.

Les équations de courant et de continuité des électrons et des trous sont résolues en utilisant une méthode numérique itérative (linéariser les différentes équations, les mettre ensuite sous forme matricielle et enfin résoudre le système). Le calcul itératif est effectué dans chaque cellule (contenant la formule numérique) de la feuille. Ces formules sont sous forme de références circulaires (En Excel, référence circulaire signifie une formule qui fait référence à sa propre cellule, directement ou indirectement), d'où le nom scientifique de PC2D (A Circular-Reference Spreadsheet Solar Cell Device Simulator).

Les résultats et les graphes sont obtenus grâce à des macros (En Excel, macro : action ou ensemble d'actions que vous pouvez utiliser pour automatiser des tâches. Les macros sont enregistrées dans le langage de programmation Visual Basic pour Applications).

Par ailleurs, PC2D ne remplace pas totalement PC1D mais le complète comme par exemple ce dernier est utilisé pour extraire certains paramètres des surfaces avant et arrière. Ces résultats sont ensuite intégrés dans PC2D comme des conditions aux limites [1] au problème posé.

III-3-Méthode numérique

La région à simuler par PC2D est la plus petite partie élémentaire, représentative de la cellule entière d'aire de 1cm^2 , d'une largeur X (Width) comptée à partir du centre du contact et le point milieu entre les centres de deux contacts quelconques, et d'une hauteur Y (Height) égale à l'épaisseur de la cellule (**Fig.III-2-a**). Cette région est divisée en une

grille de 20x20 éléments rectangulaires identiques bordés par une maille de 21x21 nœuds (Fig. III-2-b). Chaque élément aura donc comme côtés : $\Delta X = X/20$ et $\Delta Y = Y/20$.

Cette grille est représentée de façon numérique (matrice) sur la feuille d'Excel avec les équations pour chaque cellule.

Puisque les équations des porteurs sont non linéaires (existence de termes en exponentiel), on procède alors par un calcul numérique itératif. La méthode numérique doit être bien choisie pour minimiser au maximum le temps de calcul ainsi que le volume de la mémoire utilisée car il s'agit d'un calcul à deux dimensions qui nécessite un microprocesseur plus rapide et une mémoire plus importante.

On calcule ϕ_n , ϕ_p , les potentiels de quasi-niveau de Fermi d'électrons et de trous (voir chapitre II) de chaque nœud (normalisé à kT) en utilisant les équations :

$$\begin{cases} \phi_n(x,y) = V_t \ln(C_{on} + C_{xn}x + C_{yn}y + C_{xyn}xy) \\ \phi_p(x,y) = V_t \ln(C_{op} + C_{xp}x + C_{yp}y + C_{xyp}xy) \end{cases}$$

Les quatre coefficients « C » pour chaque équation sont déterminés à partir des valeurs de ϕ_n ou ϕ_p , respectivement, aux quatre coins de l'élément.

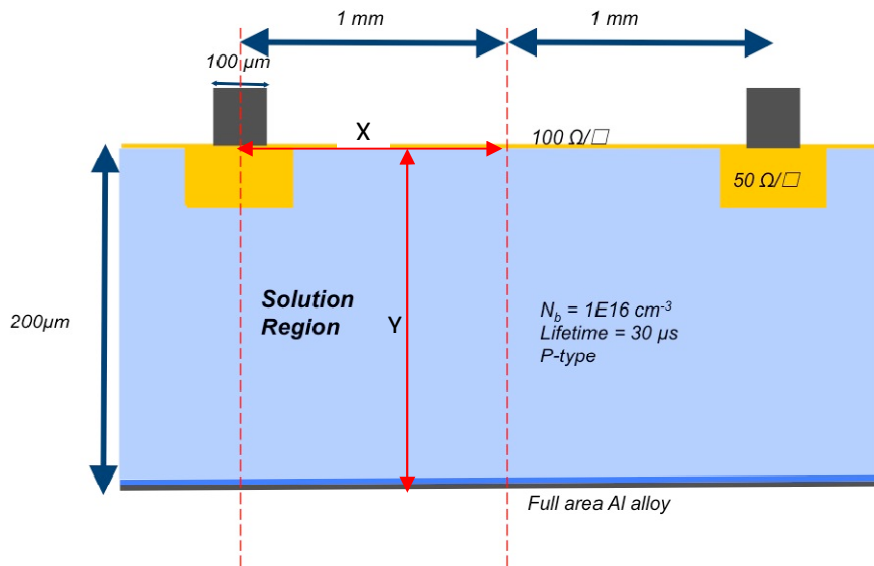
où $V_t = kT/q$

k : constante de Boltzman,

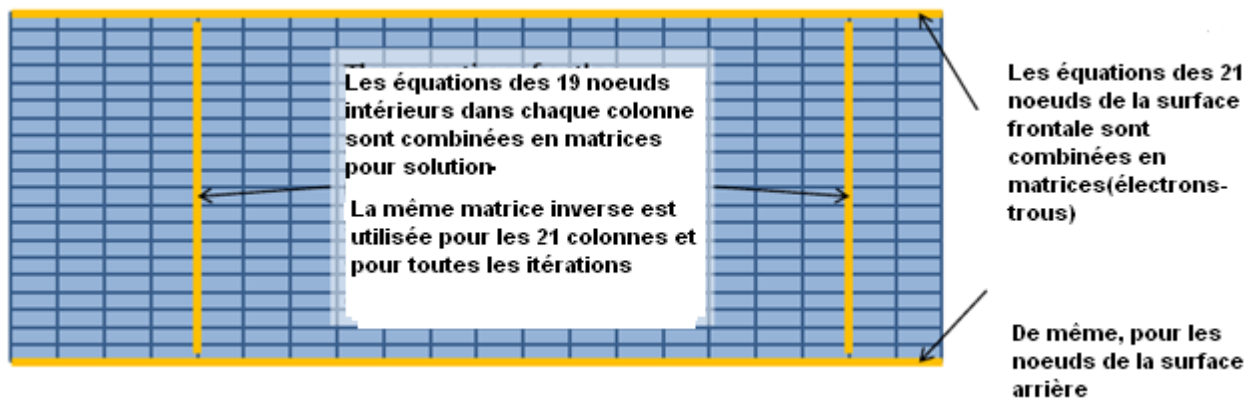
T : température absolue,

q : charge de l'électron.

Ensuite, on calcule le potentiel électrostatique ψ de chaque nœud (normalisé à kT) qui est fonction de ϕ_n , ϕ_p



FigIII-2-a Structure et région de simulation



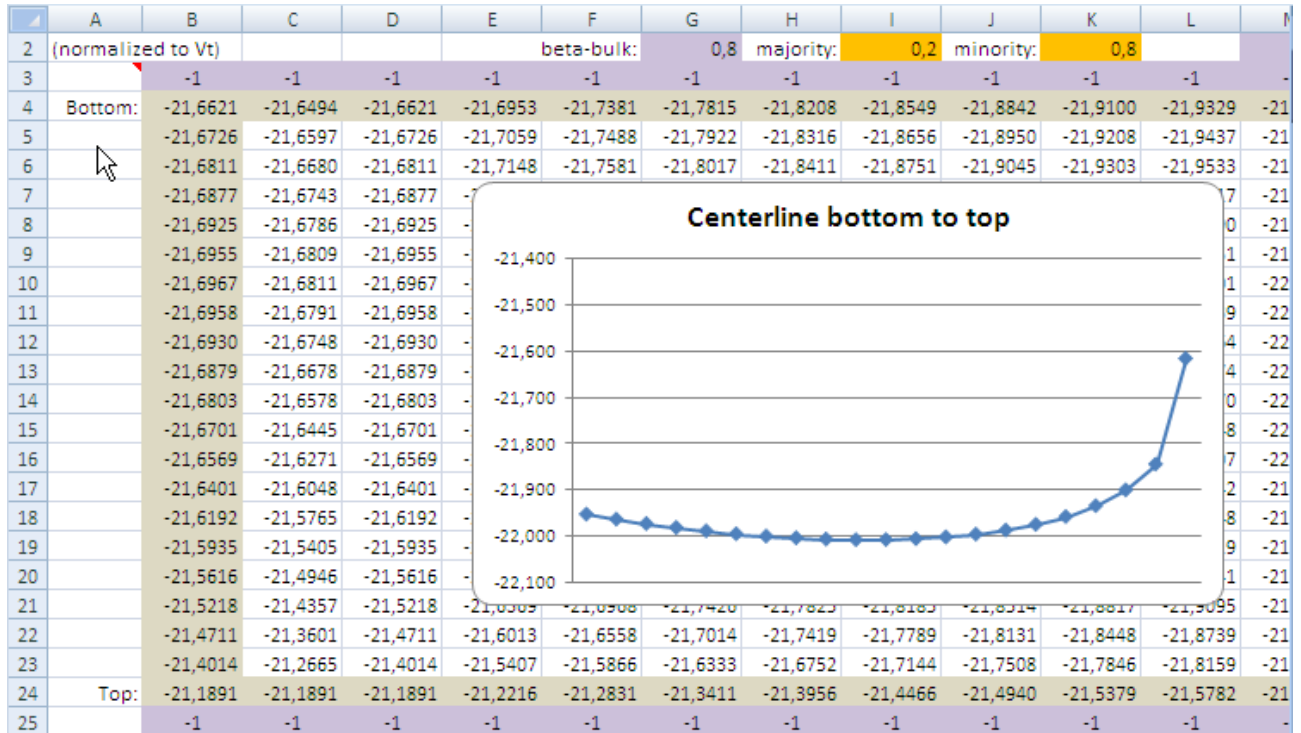
FigIII-2-b- Grille de simulation

III-4-Feuilles de calcul

III-4-1-Feuilles de ϕ_n et de ϕ_p :

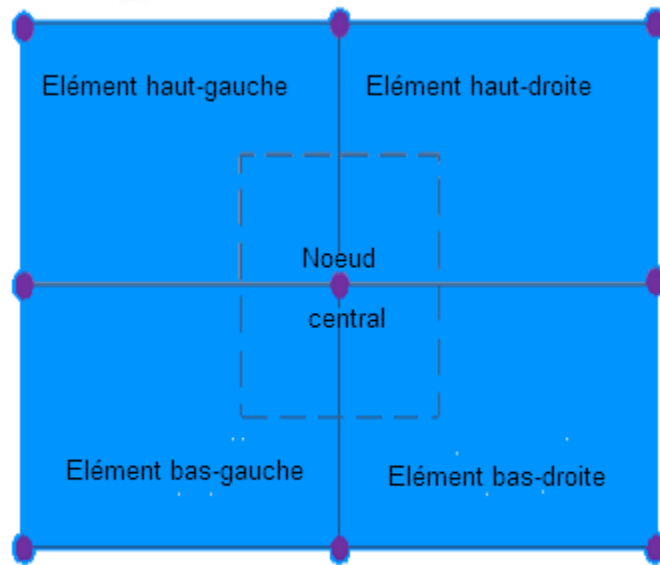
Ce sont les feuilles du calcul principal qui résolvent les équations de continuité (des électrons et des trous). Elles contiennent un tableau de valeurs du potentiel quasi-niveau

de Fermi (calculées par itération) de chaque nœud normalisées à la tension thermique ($V_i=kT/q$)(Fig III-3).



FigIII-3-Partie d'une feuilles de ϕ_n

Chaque nœud est le point d'intersection de quatre éléments finis rectangulaires qui se rencontrent en ce nœud (Fig-III-4) sauf en ce qui concerne les nœuds superficiels (haut et bas), qui ne sont que le point d'intersection de deux éléments finis rectangulaires.



FigIII-4-Présentation nodale

Avant l'exécution du programme ($B4 = B5 = -1$ sur la feuille d'Excitation ci-dessous), ϕ_n et ϕ_p prennent leurs valeurs initiales.

Lorsqu'on exécute le programme ($B4 = B5 = 1$ de la même feuille), le calcul itératif débute et on remarque les valeurs de ϕ_n et de ϕ_p converger vers la solution finale puis se maintiennent en ces résultats ($B4 = B5 = 0$ de la même feuille)(Fig III-5).

La feuille contient également tous les calculs intermédiaires pour la résolution des équations de continuité et du courant.

	A	B	C	D	E	F
1	EXCITATION					
2		Base type:	p-type		Contact voltage:	0,530
3	RUN BUTTONS					
4	Solve Generation	0	(-1=reset,0=hold,1=solve)			Open circuit:
5	Solve Electron	0	(-1=reset,0=hold,1=solve)			
6	Solve Holes	0	(-1=reset,0=hold,1=solve)			Approx V1:
7						Approx V2:
8	Set B4-B6 to -1 to recover from convergence failure					Peak minority/N:

Fig III-5-Partie d'une feuille d'Excitation

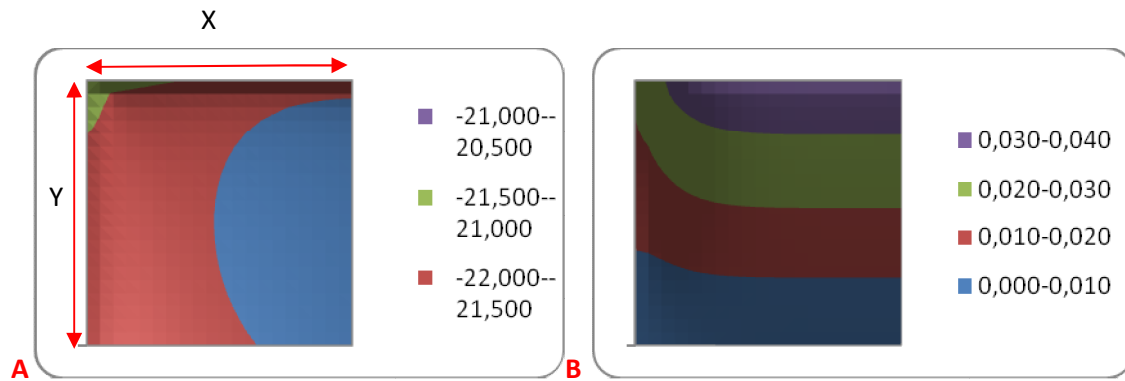


Fig III-6-Potentiel de quasi-niveau de Fermi (normalisée à V_t)

A(Electrons)-B(trous)

III-4-2-Feuille du potentiel électrostatique ψ

Le potentiel électrostatique ψ en chaque nœud (se référer au Chap II) peut être calculé à partir des valeurs de ϕ_n et ϕ_p dans ce même nœud.

La valeur d'équilibre du potentiel électrostatique (sans excitation) est donnée dans la cellule K1 normalisée à la tension thermique ($V_t = kT/q$) (**Fig III-7**).

Avant l'exécution du programme (**B4 =B5=-1** de la feuille d'Excitation), Ψ prend sa valeur par défaut dans la cellule K2 (pour les valeurs initiales de ϕ_n et ϕ_p).

Il serait possible de remplacer ψ par une formule plus simple en chaque nœud avec une solution itérative de ψ basée sur l'équation de Poisson. Celle-ci pourrait être incorporée dans une future version de PC2D.

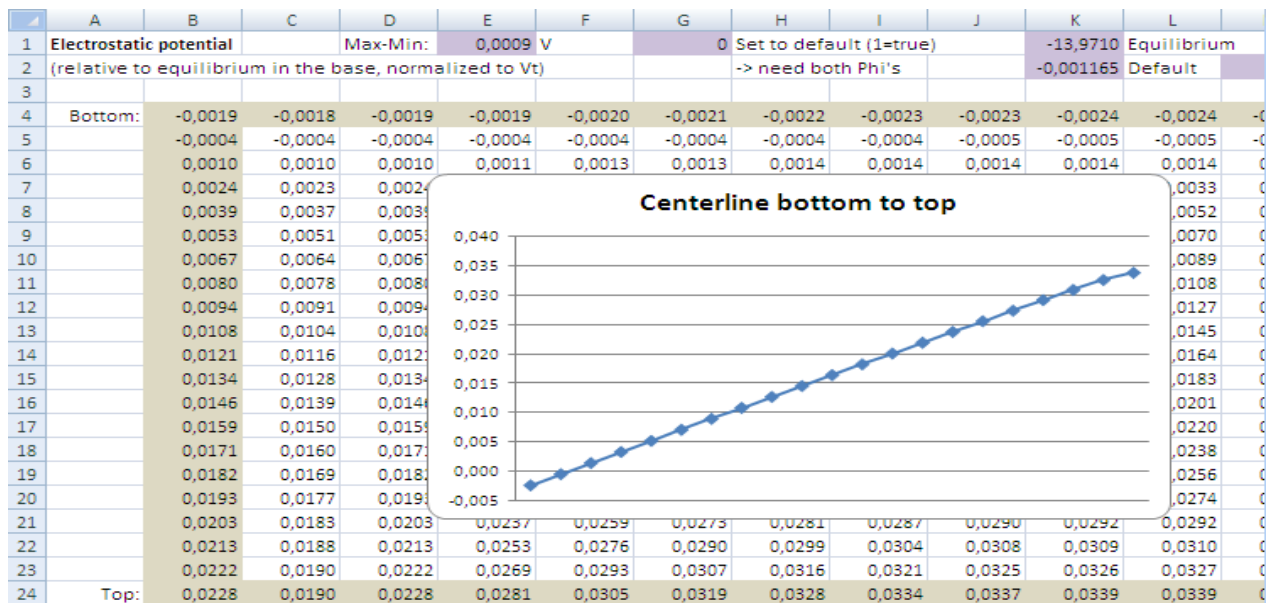


Fig III-7-Partie d'une feuille de ψ

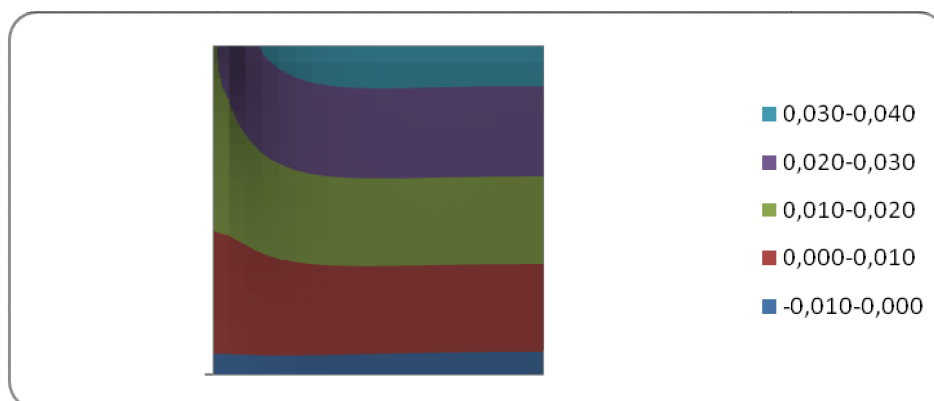


Fig III-8-Potentiel électrostatique (normalisée à Vt)

III-4-3-Feuille « Excès »

Cette feuille contient une grille nodale 21×21. À chaque nœud, la valeur montrée est l'excès p.n (le produit), normalisé à N^2 (dopage de la base élevé au carré-Voir feuille « Device » plus loin-). Cette valeur est utilisée dans les calculs de recombinaison sur la feuille « Recombinaison ».

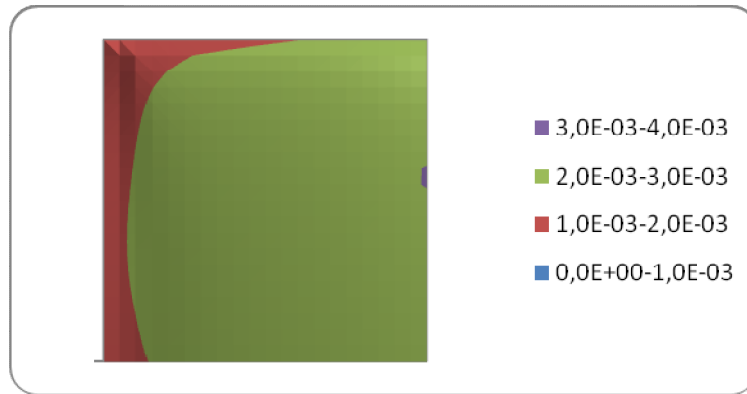


Fig III-9-L'excès p.n (normalisé à N²)

III-4-4-Feuilles « électrons » et « trous »

Ces deux feuilles calculent les densités d'électrons et des trous en chaque nœud à partir de ϕ_n , ϕ_p et Ψ à ce même chaque nœud. Les valeurs de ces densités montrées sur la Figure III-11-A et III-11-B sont normalisées à la densité de dopage de la base (N). Elles sont utilisées par la feuille « Recombinaison » dans les calculs des recombinaisons. On montre la concentration d'électrons moyenne comme une fraction de N dans la cellule F2 (Fig III-10).

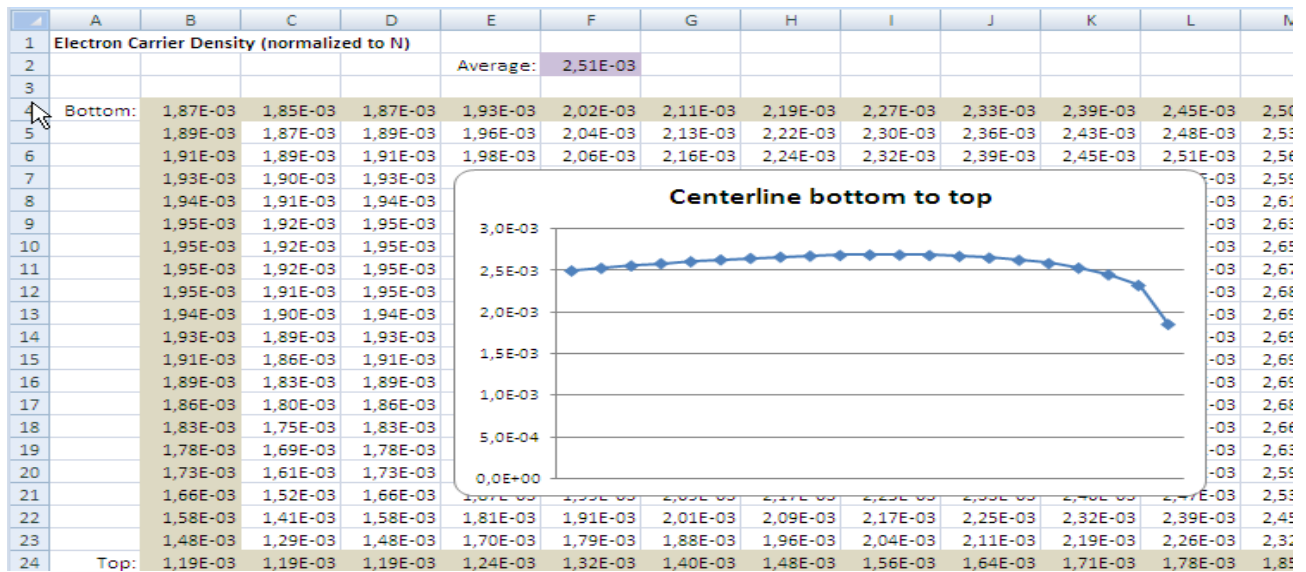


Fig III-10-Partie d'une feuille de la densité d'électrons

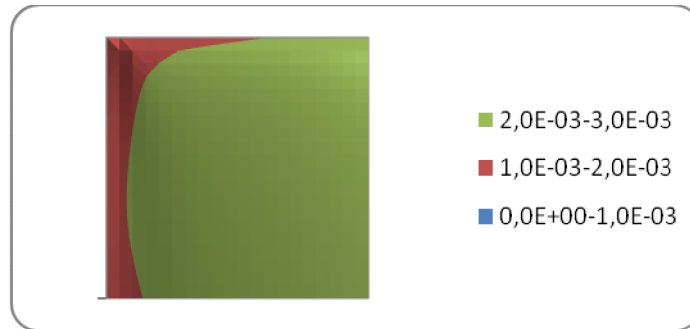
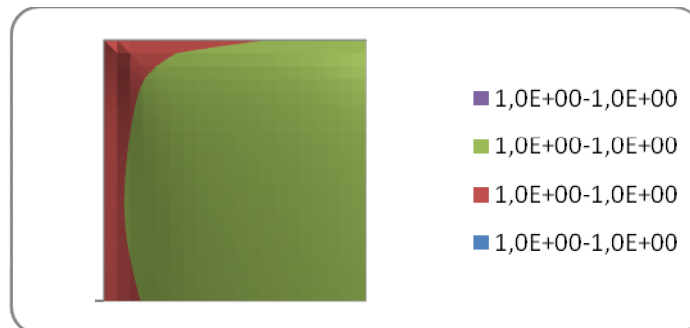


Fig III-11-A -densité d'électrons (normalisée à N)



(Fig III-11-B) densité de trous (normalisée à N)

III-4-5-Feuille « Courant »

Cette feuille détermine les courbes du flux du courant latéral sur les surfaces avant et arrière en fonction de la position X , ces courants sont mesurés en Ampères.



Fig III-12-A - Flux du courant latéral sur la surface avant (Ampères)

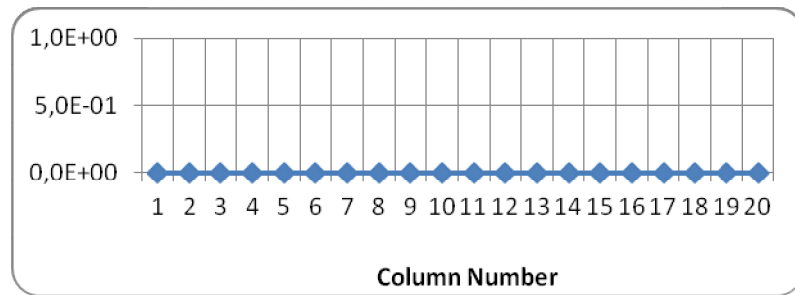


Fig III-12-B - Flux du courant latéral sur la surface arrière (Ampères)

Cette feuille contient aussi les résultats des calculs des différentes feuilles pour les utiliser ensuite à d'autres programmes.

III-5-Simulation

Le classeur de « simulation » Excel est composé de plusieurs feuilles.

III-5-1-Feuilles de la définition des paramètres de la cellule solaire

III-5-1-1 -Feuille « Device » : elle est composée de 4 parties :

1-Structure:

La structure physique de la photopile est définie par la hauteur (Y) et la largeur(X) de la région à simuler, sa surface élémentaire, son maillage (Δx , Δy , Δz) et sa symétrie : si la structure est symétrique entre les contacts, la cellule « Q3 » de la feuille prend la valeur de « -1 », si elle est asymétrique entre les contacts, « Q3 » de la feuille prend la valeur de « 1 » (Fig III-13). Cela va réduire de la moitié la simulation de la structure ce qui minimise beaucoup de calculs.

La structure est supposée uniforme à travers sa profondeur (Z).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	STRUCTURAL	Recalculate Photogeneration after any change to the Structural parameters																	
2		delta X:	5,00E-03 cm		delta Y:	1,00E-03 cm		delta Z:	1,00E+01 cm		Y/X:	0,2000 aspect ratio				Size:	20	Rows&Columns	
3		Width:	1,00E-01 cm		Height:	2,00E-02 cm		Depth:	1,00E+01 cm		Area:	1,00E+00 (Width*Depth) cm^2				Sides:	-1	-1=reflecting, +1=repeating	
4																			

Fig III-13-Partie d'une feuille « Device »(Structure de la cellule)

2-Paramètres électriques :

La densité du dopage de la base « **N** » est introduite dans la cellule « **C6** » ; une valeur positive indique un dopage de type « **p** » et une valeur négative indique un dopage de type « **n** ». Les durées de vie « **tau** » et les constantes de diffusion des électrons et des trous « **D_n, D_p** » sont choisies en fonction du dopage correspondant selon les relations qui les relient. Connaissant ces valeurs, la résistivité de la base « **Rho** » est directement calculée ainsi que le ratio de la longueur de diffusion par rapport à la hauteur de la photopile « **L/H** ».

Les paramètres sont donnés à la température ambiante de **25 °C**. Pour une autre température, l'utilisateur doit aussi ajuster les paramètres dépendants de la température tels que la concentration intrinsèque **n_i** et **V_t**.

La résistance carrée de couche est insérée à chaque emplacement le long du front ainsi que sur la surface arrière. Une valeur positive indique une surface de type **p**, une valeur négative indique une surface de type « **n** », une valeur nulle pour une surface non dopée. Cette résistance est calculée en utilisant PC1D si on connaît le profil du dopage ou bien tirée de l'expérience (**Fig III-14**).

3-Circuit :

On définit les contacts en mettant un "**1**" là où il y a un contact métallique et "**0**" là où il n'y en a pas.

On peut introduire des résistances shunt à travers la structure .On peut également rajouter des résistances extérieures (grille, busbars, résistances de contact semi-conducteur/ métal) série et shunt dans les cellules H15 et L15 (**Fig III-14**).

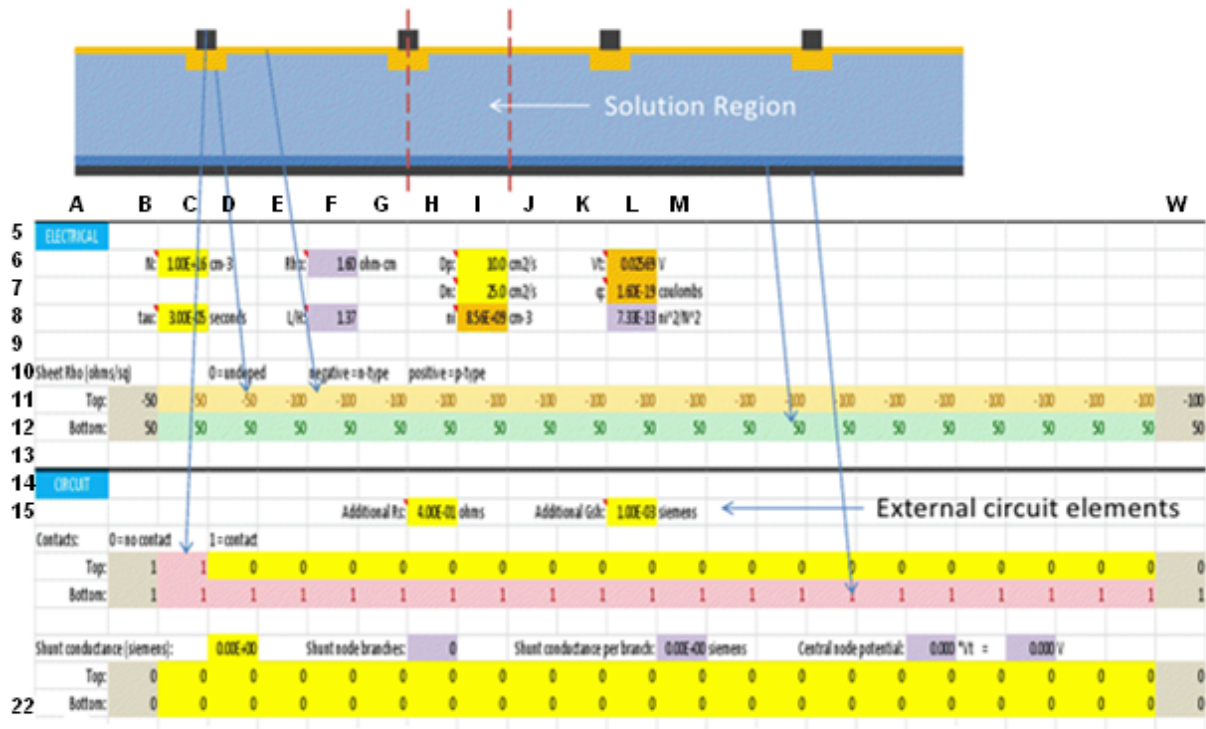


Fig III-14- Paramètres électriques

4-Paramètres optiques

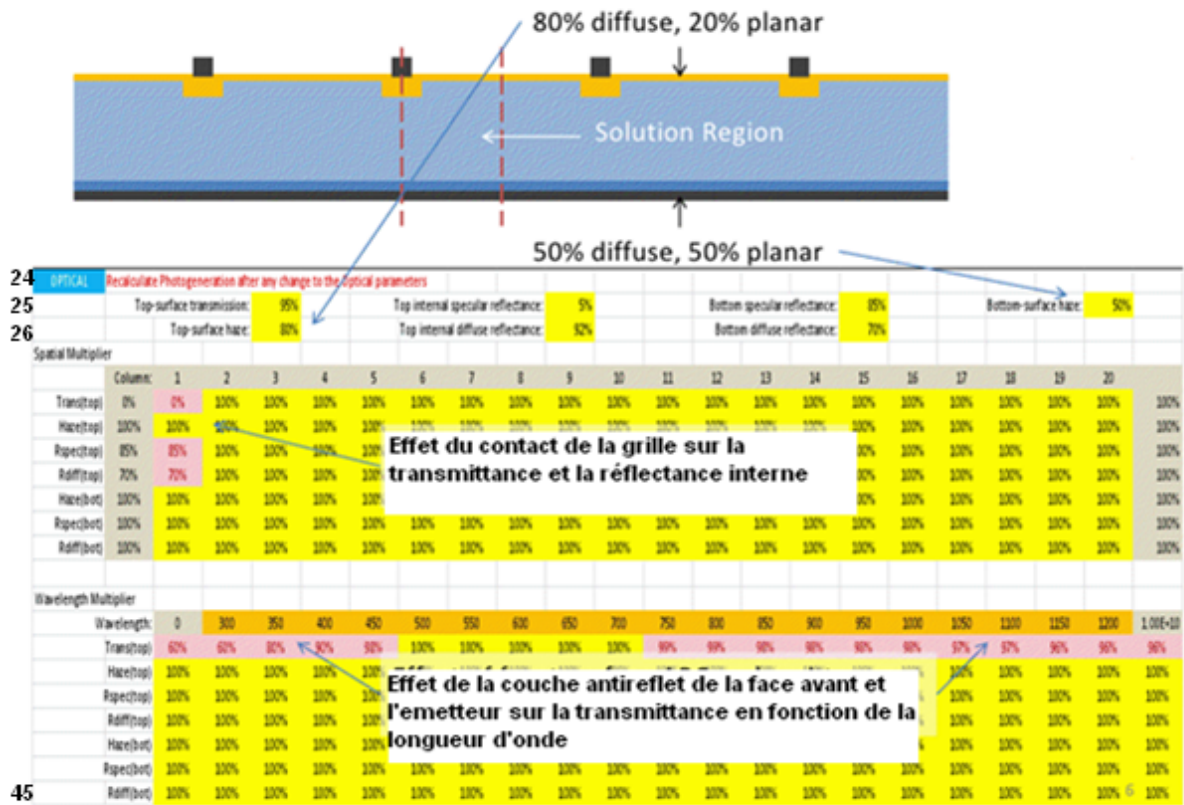
Ce sont la transmission, la réflexion spéculaire (directe ou unidirectionnelle), la réflexion diffuse (déviation d'un faisceau unidirectionnel dans de nombreuses directions), le facteur de brume (surface haze) (Fig III-15).

Le facteur de brume nous renseigne sur la nature de la surface (par exemple un facteur de brume de 80% signifie que 80% de la surface est diffuse et 20% est spéculaire).

La partie supérieure des paramètres optiques concerne les valeurs globales de ces paramètres sur les deux surfaces avant et arrière (top-bottom).

La partie suivante concerne ces valeurs optiques en fonction de la position X des surfaces (top-bottom)

La partie inférieure concerne les valeurs optiques en fonction de la longueur d'onde (top-bottom). Ces dernières valeurs sont tirées de PC1D (ces calculs seront décrits ultérieurement)



FigIII-15- Paramètres optiques

III-5-1-2-Feuille « Recombinaison »

La partie supérieure de la feuille concerne le courant de recombinaison superficielle J_{01} (top et bottom) et le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace J_{02} (FigIII-16). Ces valeurs sont calculées en utilisant PC1D dont la méthode sera décrite plus loin.

La partie inférieure concerne la recombinaison aux alentours de chaque nœud de la structure à simuler.



Fig III-17-Courant de photogénération(Ampères)

III-5-2-Feuille d'exécution (excitation)

Il y a trois modes de fonctionnement du programme : direct « Live », exécutif « Run » et « Drive ».

Le programme peut fonctionner sous le mode « Live » en prenant égales à « 1 » les cellules **B4** et **B5** de cette feuille (**Fig III-18**). On peut également changer d'autres paramètres puis ré-exécuter le programme. Le nombre d'itérations est de **5000** dans sa première version qui ne cesse d'augmenter dans les versions suivantes. Mais ce mode est très lent, notamment si on utilise le spectre **AM1.5G** ou si l'on change de nombreux paramètres.

Dans ce cas, il est préférable d'utiliser le mode « Run » : Les cellules **B4** et **B5** sont initialement mises à « -1 » ou **0** (en tenant compte de la dernière solution), ou on peut utiliser la cellule **L17** (reset) pour construire une cellule propre à notre structure, ensuite on clique sur les boutons **B4** et **B5** pour lancer les calculs dans les feuilles de la photogénération, des électrons et des trous.

On dispose aussi de macros pour l'automatisation de tâches communes comme le balayage d'une courbe de **Courant-Tension (I-V)**, le balayage d'une courbe de **la réponse spectrale**, ou par le balayage d'un **LBIC** (Laser Beam Induced Current) à travers le dispositif. L'exécution de ces macros constitue le troisième mode de fonctionnement (Drive).

Au dessus de la courbe I-V, sont portées les caractéristiques de la cellule : I_{sc} , V_{oc} , la puissance maximale de sortie (**max power out**) qui est égale au rendement (car la surface de la cellule étant égale à 1cm^2 et la puissance incidente étalonnée est à 0.1w/cm^2).

Il faut noter qu'une macro peut être interrompue par un appui sur la touche « Esc » du clavier.

Lorsqu' une macro rencontrerait une erreur ; l'exécution du programme s'arrêterait, on obtient alors un message d'erreur qui offre les choix de « Fin » du programme ou bien celui du Débogage (action d'éliminer les défauts de réalisation ou de conception se manifestant par des anomalies de fonctionnement), choisir dans ce cas la fin (à moins qu'on ne souhaite déboguer la macro !). Lorsqu'une macro est arrêtée volontairement ou en raison d'une erreur pendant l'exécution, il suffit de cliquer sur la Commande de remise à zéro dans la cellule L17 avant de continuer les étapes suivantes.

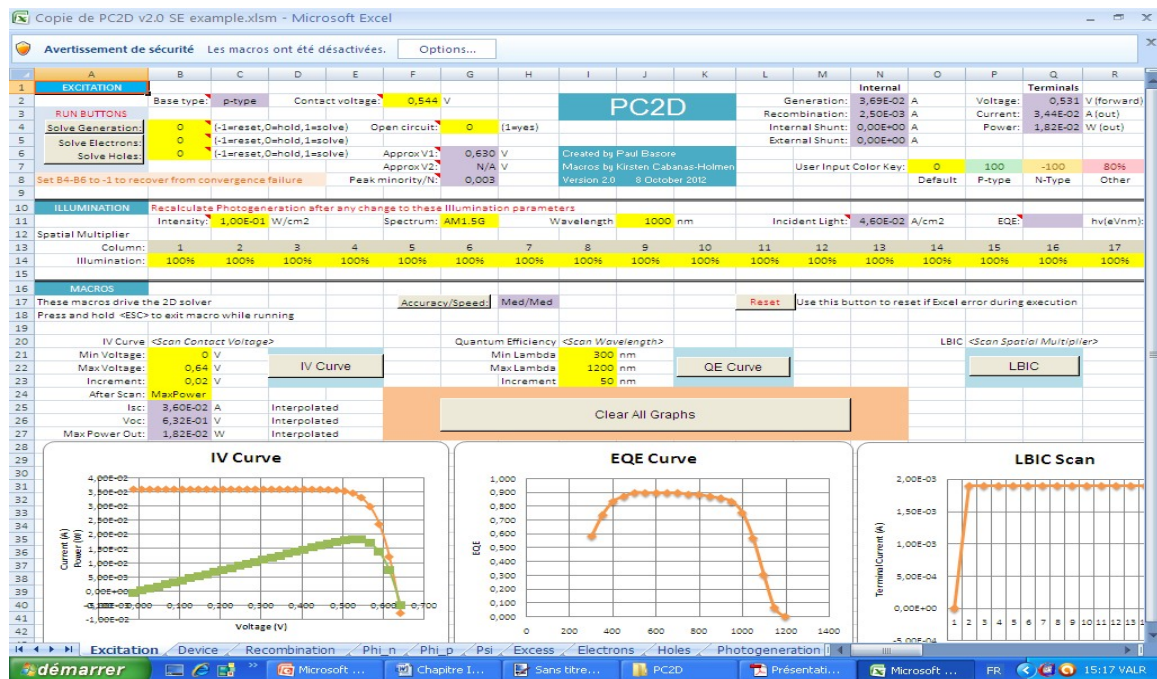


Fig III-18- Feuille d'exécution (excitation)

Chapitre IV

Applications et simulations

Chapitre IV-Applications et simulations

IV-1 –Méthode de simulation

Toute la méthode de simulation par PC2D et PC1D est décrite de manière détaillée dans le chapitre précédent. En résumé, La cellule solaire est définie à partir des deux feuilles « **Device** » et « **Recombinaison** » du fichier Excel de PC2D. Le fichier du spectre solaire **AM1.5G** choisi comme référence est intégré dans la feuille « **Photogeneration** ». Quant aux résultats de la simulation, ils sont présentés sur la feuille « **Excitation** ».

Quelques paramètres, à introduire dans PC2D, nécessitent des calculs intermédiaires qui utilisent PC1D (ou un autre programme) ou bien tirés de l'expérience.

IV-2- Calculs intermédiaires avec PC1D [30]

Ces paramètres à calculer, peuvent être extraits de l'expérience ou déterminés par d'autres programmes. Ces paramètres sont :

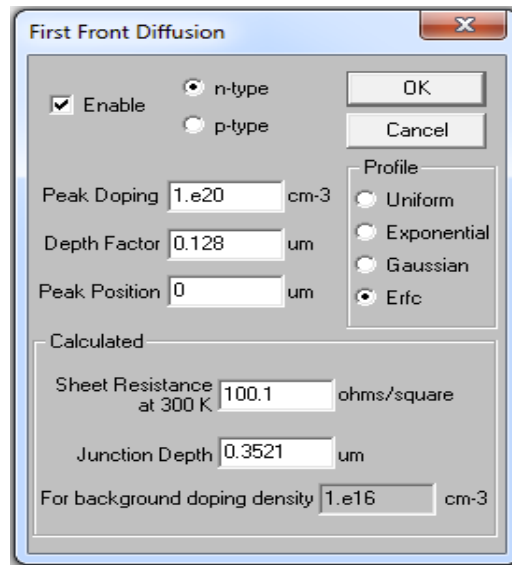
IV-2-1-La Résistance de couche « Sheet Resistance »

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 de couche (ou carrée) sera donc le paramètre permettant d'évaluer le dopage. Elle se définit comme :

$$R_{sh} = \frac{\rho}{e}$$

R_{sh} en Ω (on utilise souvent l'unité Ω/\square -ohms carrés-), ρ la résistivité en $\Omega.cm$ et e l'épaisseur de la zone dopée en cm

Elle est introduite dans la feuille « **Device** » pour les deux faces (avant et arrière). Si elle n'est pas fournie directement, on peut l'obtenir par PC1D en connaissant le type du dopage, son profil, la valeur et la position de son pic (maximum de concentration) et son facteur de profondeur (FigIV-1).



FigIV-1-Calcul de la résistance de couche

IV-2-2-Transmittance en fonction de la longueur d'onde

Elle est introduite dans la partie optique (Wavelength Multiplier) de la feuille « **Device** ».

Pour calculer ces valeurs, on procède selon les étapes suivantes :

- Définir la cellule dans PC1D avec le choix de la couche antireflet.
- Simuler pour la réponse spectrale interne (IQE) pour définir la réflectance en fonction de la longueur d'onde.
- Transposer cette réflectance dans un fichier texte en l'élevant au carré pour tenir compte de la texturisation.
- Recalculer la réponse spectrale Interne avec ces nouvelles données de la réflectance.

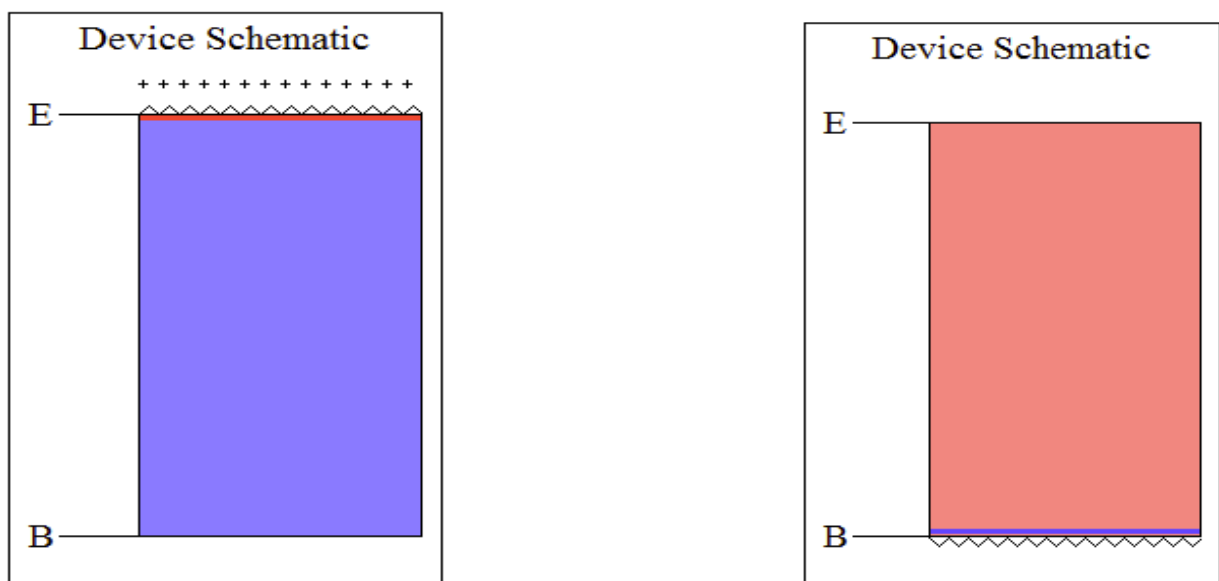
Il faut noter que la transmittance est égale à la réponse spectrale externe (EQE) pour les longueurs d'onde inférieures à 600 nm,

Pour les longueurs d'onde supérieures à 600 nm, la transmittance est égale à 100% moins la réflectance.

IV-2-3-Courant de recombinaison J_{01} (surfaces avant et arrière)

Le courant de recombinaison est saisi dans la feuille « **Recombinaison** ». Pour le calculer, on procède, pour chacune des deux surfaces, selon les étapes suivantes (**FigVI-2**):

- Faire entrer les paramètres de la surface dans PC1D : surface, texture, profil de dopage, charge de la surface et vitesse de recombinaison de la surface.
- S'assurer qu'il n'y a pas des résistances extérieures séries ou shunts.
- Entrer une durée de vie élevée (de l'ordre d'une seconde) et une vitesse de recombinaison nulle pour la surface opposée.
- Le dopage de la base est opposé au dopage de la surface pour créer une jonction.
- Appliquer une polarisation directe V dans l'obscurité d'environ **0,5 volts** (qui se trouve à proximité du point de fonctionnement), puis enregistrer le courant d'obscurité J (en utilisant PC1D)
- Calculer ce courant avec la formule $J_{01} = J e^{\frac{-V}{V_t}}$



FigIV-2- Calcul du courant de recombinaison J_{01} (surfaces avant et arrière)

IV-2-4-Courant de recombinaison J_{02}

C'est le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace. Pour le déterminer, on suit les mêmes étapes que précédemment. Mais, on applique une

polarisation directe dans l'obscurité d'environ 0,2 volts. Le courant J_{02} est calculé à partir de la formule $J_{02} = J e^{\frac{-V}{2V_t}}$

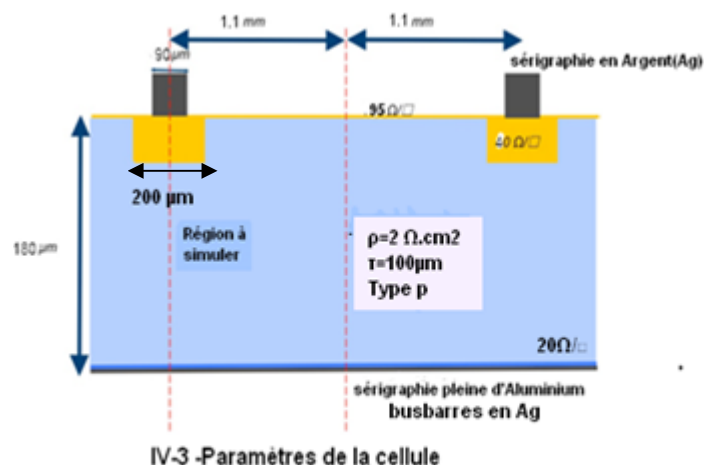
IV-3 -Paramètres de la cellule d'IRYSOLAR

IV-3 -1-Géométrie de la cellule

Il s'agit d'une cellule semi-square d'une surface réelle de **234 ,60 cm² (15,6 cmX15,6 cm)**, son épaisseur étant de **180 μm**.

La distance entre les doigts (lignes) est de **2,2 mm**. La largeur du doigt est de **90 μm**. La largeur de la zone dopée (sous les doigts) est de l'ordre de **200 μm**.

La zone à simuler est une partie élémentaire de **1cm²** de la surface du front de la cellule entière et d'une largeur comptée à partir du centre du contact et le point milieu entre les centres de deux contacts quelconques de lignes (**Fig-IV-3**).



IV-3 -2-Paramètres physiques de la cellule

Il s'agit d'une cellule solaire **n⁺pp⁺** au **silicium monocristallin** avec texturisation alcaline (**KOH**) d'épaisseur de **3 μm**. L'émetteur est dopé au **phosphore** avec un substrat qui est de type **P** de résistivité **2 Ω.cm**. La résistance de couche du front est de **40Ω/□** sous les contacts et **95Ω/□** entre les contacts. Pour la face arrière, la résistance de couche est de **20Ω/□**.

La couche antireflet est composée de nitrure de silicium SiN_x d'épaisseur de 80 nm et d'indice de réfraction de 2,03 autour de 600 nm.

La métallisation de la face avant est une grille en sérigraphie (forme de peigne) (Fig IV-4) en Argent (Ag) de résistivité $3,9 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ formé de 3 busbarres espacés de 52 mm et de 65 doigts perpendiculaires aux busbarres. La face arrière est en sérigraphie pleine d'Aluminium (Al) de résistivité $5,6 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, alternée d'Argent en face sous les busbarres. La résistance de contact (Ag/Si) est prise $2 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ [31].

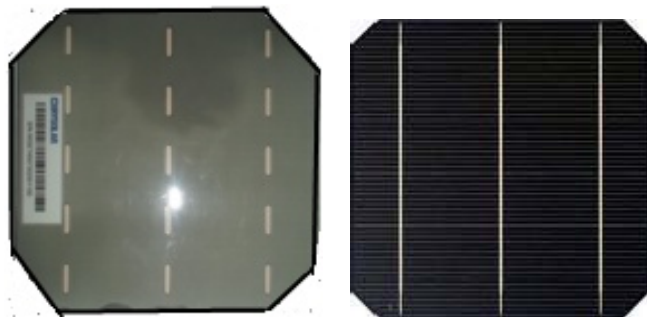


Fig IV-4-Cellule photovoltaïque monocristalline(arrière-avant)

IV-3 -3- Résistance série

La résistance série de la cellule est calculée à partir de la géométrie de la cellule si on connaît tous ses paramètres.

Elle est due à différentes contributions présentées sur la figure ci-dessous (FigIV-5). L'émetteur et la grille métallique face avant (constituée des lignes et des busbarres) contribuent majoritairement à cette résistance.

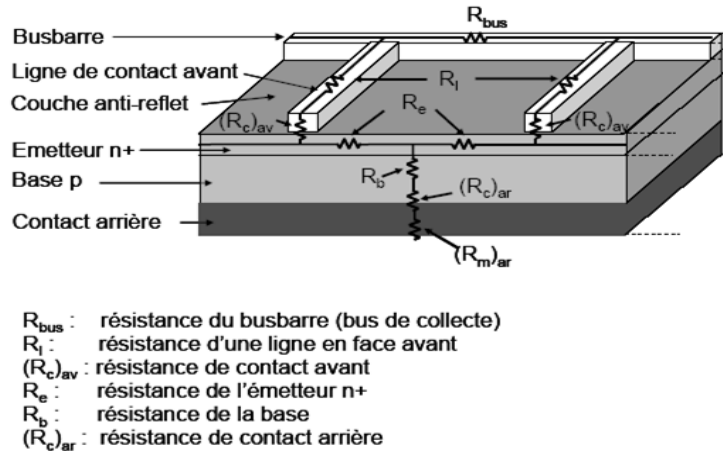


Fig-IV-5- Différentes contributions de la résistance série

- **Résistance de l'émetteur :**

Par le calcul, la contribution de l'émetteur à la résistance série est la suivante:

$$R_e = \frac{R_{sh}d^2}{12L^2}$$

Avec R_{sh} : résistance de couche ou résistance carrée de l'émetteur (à ne pas confondre avec la résistance Shunt de la cellule),

d : espace entre les lignes,

L : côté de la cellule.

- **Résistance de la base :**

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$R_b = \frac{e\rho_b}{L^2}$$

e : épaisseur de la base,

ρ_b : résistivité de la base.

- Résistance de la grille de la face avant :

Elle est donnée par :

$$R_l = \frac{d\rho_{s\acute{e}}}{12h_{s\acute{e}}w_{s\acute{e}}p^2}$$

Avec $\rho_{s\acute{e}}$: résistivité du métal sérigraphié de la face avant,

$h_{s\acute{e}}$: hauteur d'une ligne sérigraphiée en face avant ,

$w_{s\acute{e}}$: largeur d'une ligne sérigraphiée en face avant ,

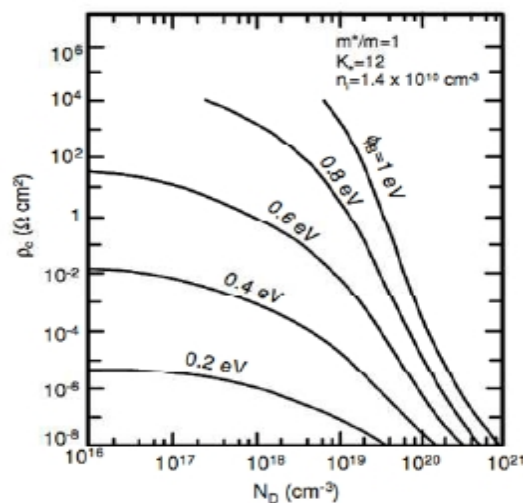
P : nombre de busbarres en face avant

- Résistance de contact avant :

C'est la résistance entre le métal (Ag) et le semiconducteur de l'émetteur(n+). Elle est donnée par la relation suivante:

$$(R_c)_{av} = \frac{d\sqrt{(\rho_c)_{s\acute{e}}R_{sh}}}{2L^2} \coth\left(\frac{w_{s\acute{e}}}{2} \sqrt{\frac{R_{sh}}{\rho_{cs\acute{e}}}}\right)$$

Avec $(\rho_c)_{s\acute{e}}$ Résistivité de contact Ag/Si de la grille sérigraphiée en face avant, elle est en fonction de la résistance de couche R_{sh} , elle est prise de la courbe de la figure (IV-6) [31].



FigIV-6-Evolution de la résistivité spécifique de contact $(\rho_c)_{s\acute{e}}$ en fonction du dopage N_D

- Résistance du busbarre :

Elle est donnée par :

$$R_{bus} = \frac{\rho_{se} d^2}{6pLh_{bus} w_{bus}} \left(\frac{L^2}{2m^2 d^2} + 3 \frac{L}{md} + 1 \right)$$

Avec h_{bus} : hauteur d'un bus barre sérigraphié en face avant,

w_{bus} : largeur d'un busbarre en face avant,

m : nombre de points de soudure en face avant.

- Résistance du métal en face arrière :

$$(R)_{ar} = \frac{\rho_m h_m}{L^2}$$

Avec ρ_m : résistivité du métal en face arrière,

h_m : hauteur du contact en face arrière,

- Résistance de contact arrière :

Elle est donnée par

$$(R_c)_{ar} = \frac{\rho_c}{L^2} \text{ (On néglige l'argent)}$$

Avec ρ_c : résistivité du contact en face arrière.

La résistance série de la cellule solaire est la somme de toutes ces contributions :

$$R_{série} = R_e + R_b + R_l + R_{bus} + (R)_{ca} + (R)_{ar} + (R_c)_{ar}$$

PC2D ne prend pas en compte les résistances des contacts ni les résistances de la métallisation [25], la résistance série introduite dans le programme au sein de la case « **Additional Rs** » est calculée à partir de la formule :

$$R_s = R_{série} - (R_e + R_b)$$

IV-4- Données à introduire dans PC2D

Le tableau suivant résume toutes les valeurs de données introduites (directement ou calculées) dans PC2D :

Paramètres	Valeurs	Unités
côté de la cellule (L)	156	mm
surface réelle de la cellule	234,60	cm ²
nombre de busbarres(m)	3	
nombre de doigts	65	
épaisseur de la cellule	180	μm
surface du front à simuler	1	cm ²
distance entre les doigts (lignes) (d)	2,2	mm
largeur du doigt (w _{sé})	90	μm
hauteur d'une ligne sérigraphiée en face avant (h _{sé})	15	μm
largeur d'un busbarre en face avant (w _{bus})	2	mm
hauteur d'un busbarre sérigraphié en face avant (h _{bus})	15	μm
largeur de la zone dopée sous les contacts	200	μm
résistivité de la base (ρ _b)	2	Ω.cm
résistance carrée de couche sous le contact	40	Ω/□
résistance carrée de couche entre les contacts	95	Ω/□
résistance carrée de couche de la face arrière	20	Ω/□
résistivité du métal sérigraphié Ag en face avant (ρ _{sé})	3,9.10 ⁻⁶	Ω.cm
résistivité de contact de la grille sérigraphié (face avant) ((ρ _c) _{sé})	2.10 ⁻⁵	Ω.cm ²
résistance série additionnelle (calculée) (R _s)	0,181	Ω.cm ²
résistance shunt additionnel (expérimentale) (R _{shunt})	735	Ω.cm ²
courant de recombinaison avant (sous le contact) (J _{o1})	1,21.10 ⁻¹²	A/cm ²
courant de recombinaison avant (couche de 40 Ω/□) (J _{o1})	2,60.10 ⁻¹³	A/cm ²
courant de recombinaison avant (couche de 95 Ω/□) (J _{o1})	6,64.10 ⁻¹⁴	A/cm ²
courant de recombinaison arrière J _{o1} (couche de 20 Ω/□) (J _{o1})	4,94.10 ⁻¹³	A/cm ²
courant de recombinaison (J _{o2})	3,28.10 ⁻¹²	A/cm ²

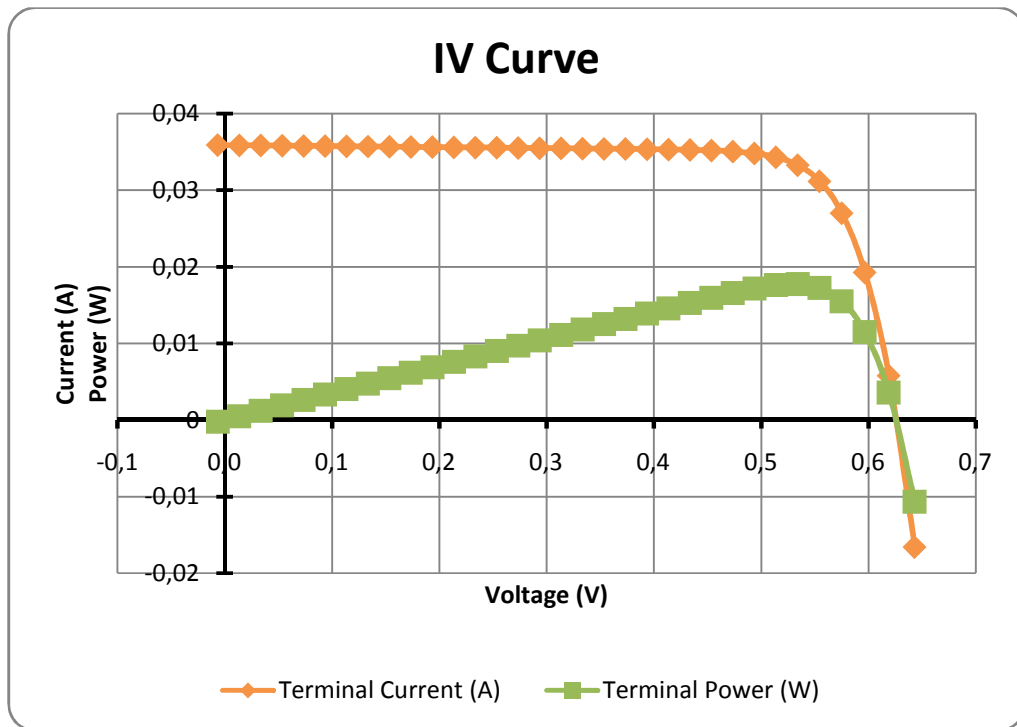
Tableau IV-1- Données à introduire dans PC2D

IV-5-Résultats :

IV-5-1-Caractéristiques I(V) et P(V) :

L'exécution du programme PC2D avec les données précédentes a donné les résultats suivants :

- Courant de court-circuit I_{cc} : **35 ,90 mA/cm²**
- Tension de circuit ouvert V_{co} : **625 ,17 mV**
- Puissance maximale (au point maximal de fonctionnement): **17,80 mW**
- Facteur de forme **FF**: **79,31%**
- Rendement η : **17,80%**



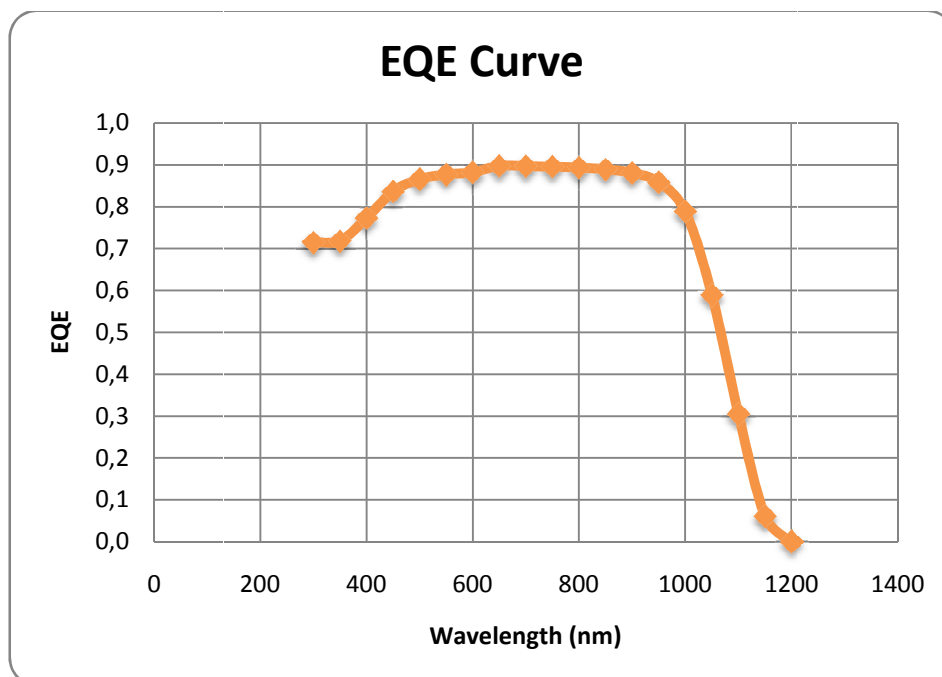
FigIV-7A- Caractéristiques I(V) et P(V)

IV-5-2-Réponse spectrale

PC2D nous permet également de déterminer la courbe de la réponse spectrale externe sur une gamme spectrale de λ comprise entre 300 et 1200 nm, avec une valeur tous les 50 nm (Fig. IV-7B)

Selon la courbe ci-dessous, la conversion photon/paires électron-trou est proche de **0,9** sur une large gamme spectrale **de 600 à 900 nm**.

Aux faibles longueurs d'ondes ($\lambda < 600 \text{ nm}$), on constate une chute du rendement quantique externe due aux réflexions de la lumière sur le front de la cellule. En se rapprochant de l'énergie de gap du silicium (à **1130 nm**), la réponse spectrale décroît brusquement de nouveau, ce qui est normal puisque au-delà de cette valeur, le matériau n'absorbe plus.



FigIV-7B-Réponse spectrale externe

IV-5-3- Densité des porteurs

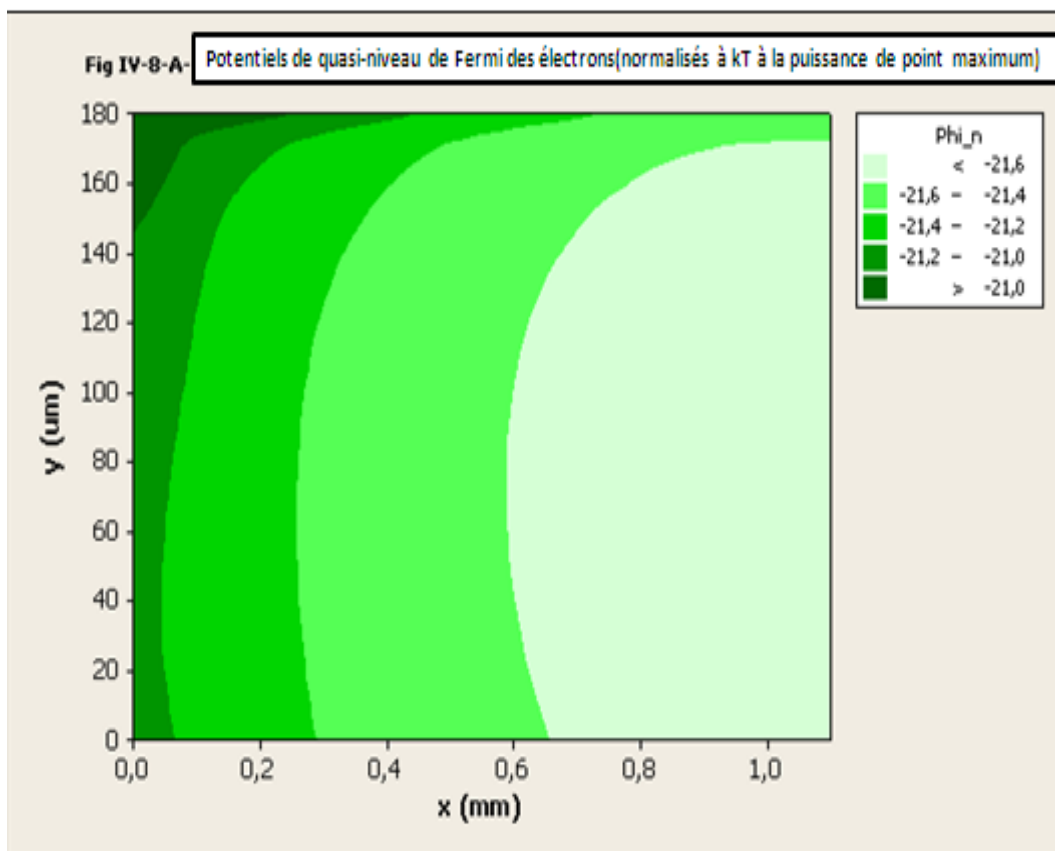
L'un des excellents avantages de PC2D est de pouvoir visualiser divers effets en deux dimensions pour mieux comprendre ce qui se passe sur la coupe de la cellule.

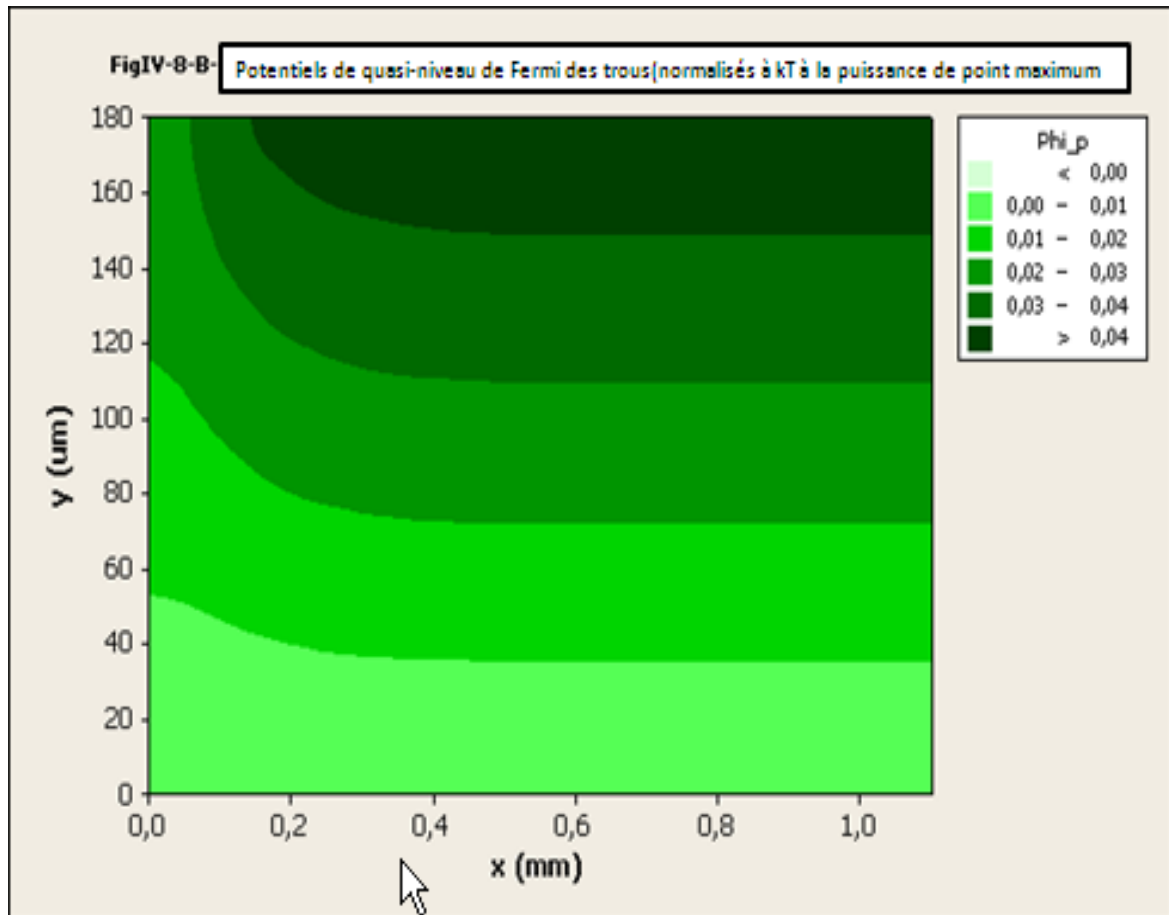
Les figures **IV-8-A** et **IV-8-B** montrent respectivement les potentiels de quasi-fermi des électrons et des trous normalisés à la tension thermique ($V_T = kT/e$) à la puissance du point maximum de fonctionnement. Le gradient de ces potentiels indique bien la direction de la circulation du courant d'électrons et des trous. Contrairement au modèle à une

dimension où l'on ne peut distinguer cette évolution, on remarque assez bien que les électrons ne diffusent pas verticalement dans le volume mais plutôt dans les deux sens.

La diffusion latérale de certains porteurs (dans la direction de X) influe donc négativement sur les performances de la cellule solaire.

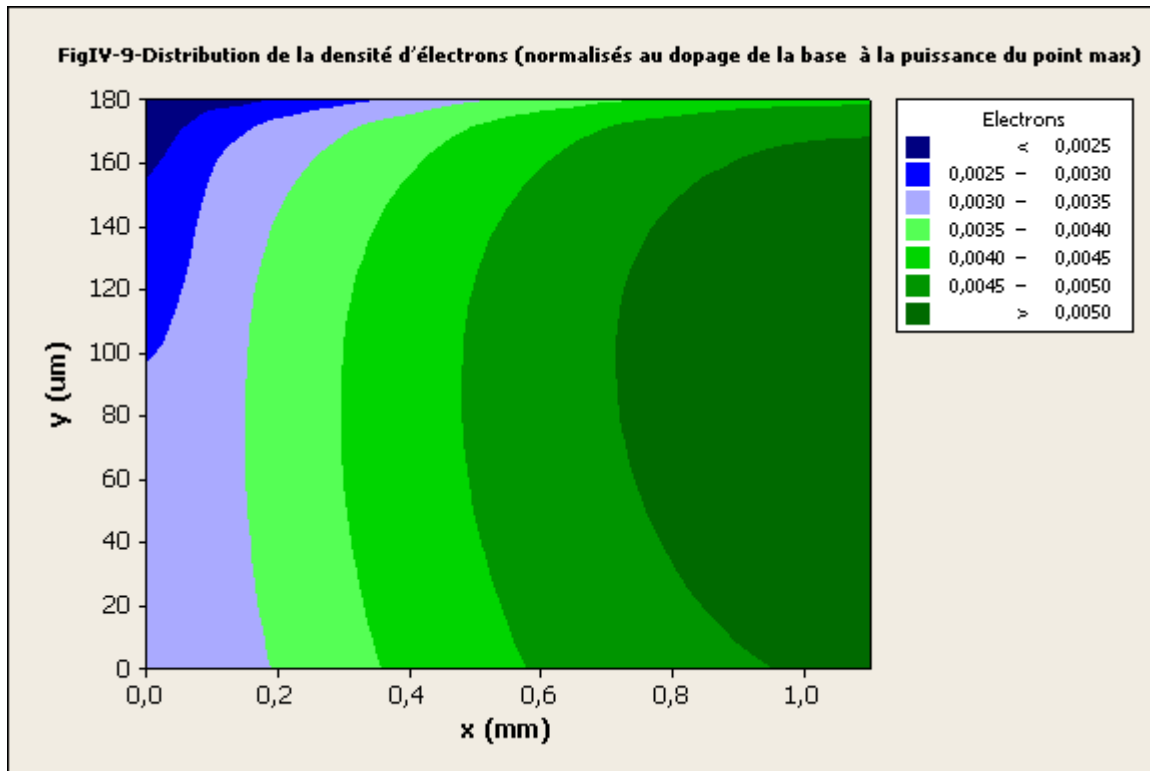
On voit aussi l'effet remarquable de la zone fortement dopée sous les contacts (au coin en haut et à gauche). Dans la zone faiblement dopée, le potentiel au point du milieu entre les contacts (coin en haut et à droite) est plus négatif qu'au contact.





La figure IV-9 montre la distribution de la densité d'électrons normalisée au dopage de la base dans la cellule à la puissance au point de fonctionnement maximum.

En suivant les résultats de l'interprétation précédente sur les potentiels de quasi-fermi, la densité d'électrons aux contacts est la plus faible dans la zone analysée, ensuite elle augmente à travers les deux sens de la zone pour atteindre son maximum à la zone inférieure du point milieu entre les contacts et plus prononcée vers le bas.



IV-5-4- Influence de la résistance de couche sur les performances de la cellule

Comme nous l'avons expliqué dans le second chapitre, la cellule à émetteur sélectif se diffère de la cellule classique (émetteur homogène) en réalisant un dopage inhomogène en surface : fort sous les contacts ($< 40\Omega/\square$) et faible ailleurs ($> 90\Omega/\square$).

Cette inhomogénéité de l'émetteur nous amène dans ce travail à étudier l'influence de la variation de la résistance de couche à travers la surface de l'émetteur en utilisant ce programme de PC2D à deux dimensions.

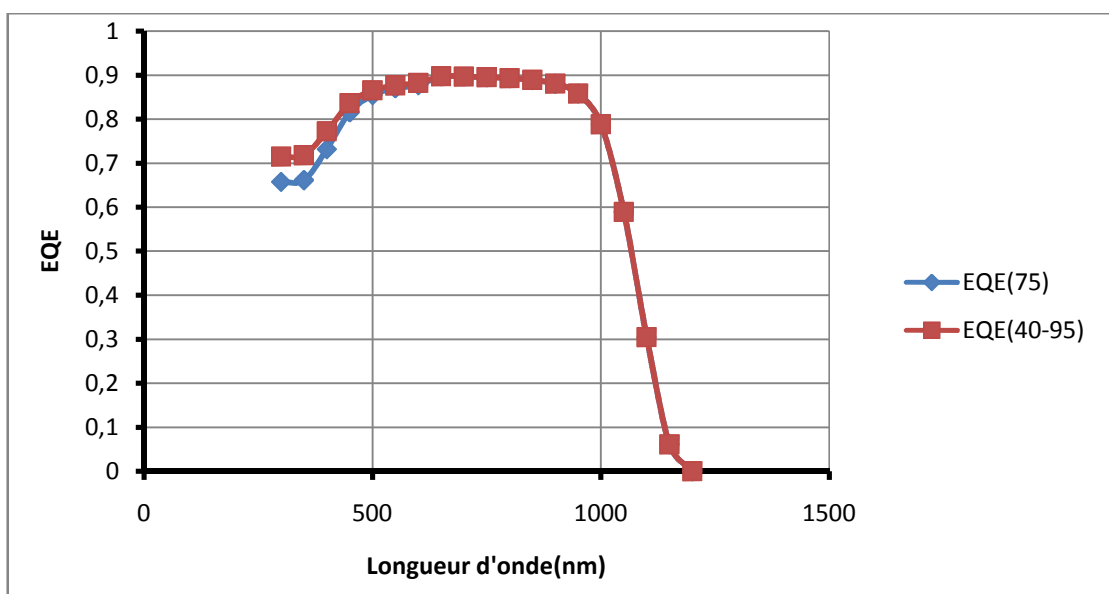
IV-5-4-1-Comparaison avec une cellule à émetteur homogène de référence

Nous allons comparer notre cellule à émetteur sélectif à celle d'une cellule à émetteur homogène d'une résistance de couche de $75\Omega/\square$ (EH75) avec les mêmes paramètres de notre cellule à émetteur sélectif (ES40-95). La simulation par PC2D de cette cellule a donné les résultats suivants :

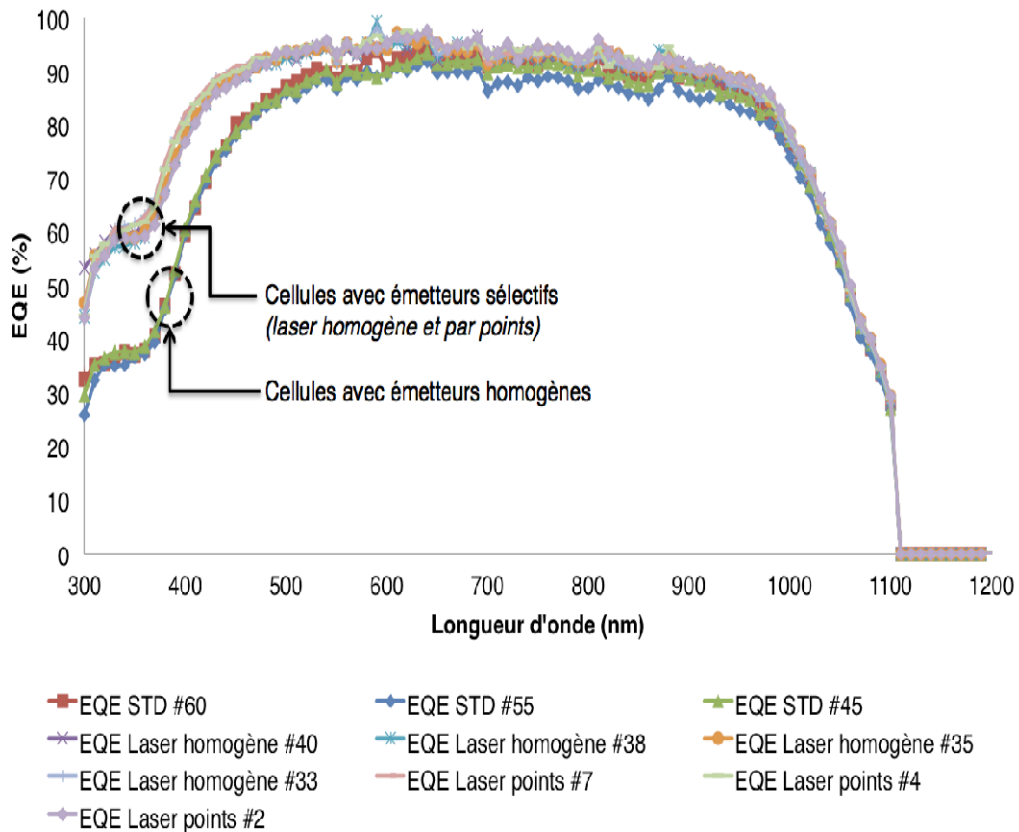
Performances	Cellule EH 75 (à émetteur homogène)	Cellule ES 40-95 (à émetteur sélectif)
Courant de court-circuit(I_{cc}) (mA/cm ²)	35,58	35,90
Tension de circuit ouvert(V_{oc}) (mV)	623,75	625,17
Puissance maximale(P_m) (mW)	17,59	17,80
Facteur de forme(FF) (%)	79,26	79,29
Rendement η (%)	17,59	17,80

Tableau IV-2- Comparaison entre deux cellules (émetteur sélectif / émetteur homogène)

L'amélioration des performances de la cellule ES40-95 par rapport à la cellule EH-75 est appréciable, le gain en rendement est de l'ordre de **0,2%**. Cela est dû à la faible résistance série de cette cellule (dopage fort sous les contacts), et au faible taux de recombinaison entre les contacts (dopage faible entre les contacts), ce qui explique donc un meilleur rendement quantique (Fig IV-10-A) pour la cellule à émetteur sélectif par rapport à celle de l'émetteur homogène



FigIV-10-A-Comparaison des réponses spectrales (homogène-sélectif)



*FigIV-10-B-Comparaison des réponses spectrales (homogène-sélectif)
(SEMCO Eng) [13]*

La figure IV-10-A montre les rendements quantiques externes des deux cellules (émetteur homogène 75, émetteur sélectif 40-95).

On constate que la structure à émetteur sélectif permet une amélioration de la réponse spectrale dans l'UV, grâce à une meilleure passivation et un plus faible taux de recombinaison Auger en raison de la plus forte résistance carrée de l'émetteur.

La réponse spectrale externe étant en effet peu sensible à une faible variation de la résistance série.

On remarque également qu'aux plus fortes longueurs d'onde, les deux cellules donnent des résultats identiques, confirmant que la zone sélective ne perturbe pas le volume et la face arrière des cellules. Ceci montre que la présence de l'émetteur sélectif n'améliore la réponse spectrale qu'au rayonnement UV du spectre solaire. Ceci peut

s'expliquer par le fait que les autres parties de ce spectre (visible et IR) pénètrent plus profondément au-delà de l'émetteur sélectif.

La figure (IV-10-B) montre les rendements quantiques externes de plusieurs cellules (homogène-sélectif) réalisées par dopage laser (courbes expérimentaux de SEMCO Eng) qui confirme nos résultats.

IV-5-4- 2-Influence de la résistance de couche sous les contacts

Afin d'étudier l'influence de cette résistance de couche R_{sh} , on la fait varier sous les contacts en gardant constante la résistance de couche entre les contacts ($95\Omega/\square$).

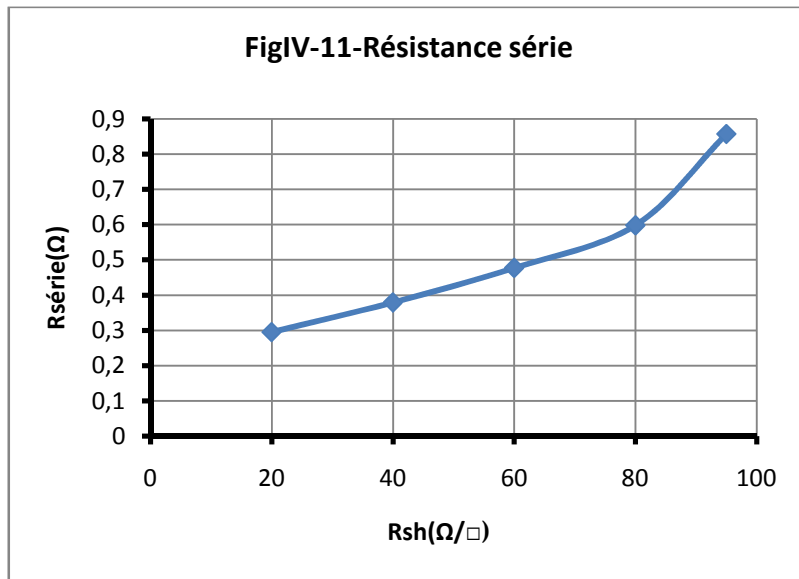
L'exécution du programme nous donne les résultats suivants :

Résistance carré (Ω/\square)	20/95	40/95	60/95	80/95	95/95
Icc (mA)	35,90	35,90	35,90	35,90	35,89
Vco(mv)	625,24	625,17	624,81	624,38	624,05
Pm(mW)	17,81	17,80	17,76	17,70	17,46
FF (%)	79,34	79,29	79,19	78,97	77,97
Rendement: η (%)	17,81	17,80	17,76	17,70	17,46

Tableau IV-3- Influence de la résistance de couche sous les contacts

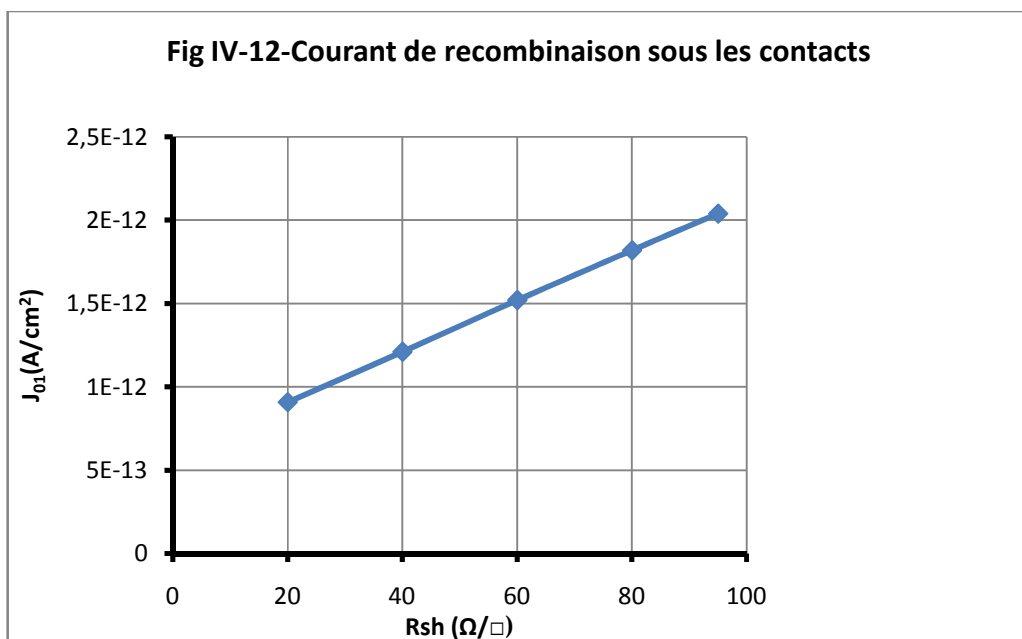
On remarque que le rendement diminue en augmentant la résistance de couche sous les contacts. Cela est dû à cause de deux facteurs essentiels : la résistance série $R_{série}$ et la recombinaison sous les contacts.

-La variation de la résistance série calculée en fonction de la résistance de couche avec le modèle présenté dans le paragraphe IV-3-3 donne la courbe suivante.



La résistance série augmente avec la résistance de couche ce qui diminue logiquement le rendement de la cellule.

-Le courant de recombinaison sous les contacts est calculé avec PC1D comme décrit dans le paragraphe VI-2-3. La figure IV-12 donne la variation de ce courant en fonction de la résistance de couche.



Le courant de recombinaison j_{01} augmente avec la résistance de couche, donc le rendement diminue avec celle-là.

IV-5-4- 3-Influence de la résistance de couche entre les contacts

On fait varier la résistance de couche entre les contacts en gardant constante la résistance de couche sous les contacts ($40\Omega/\square$).

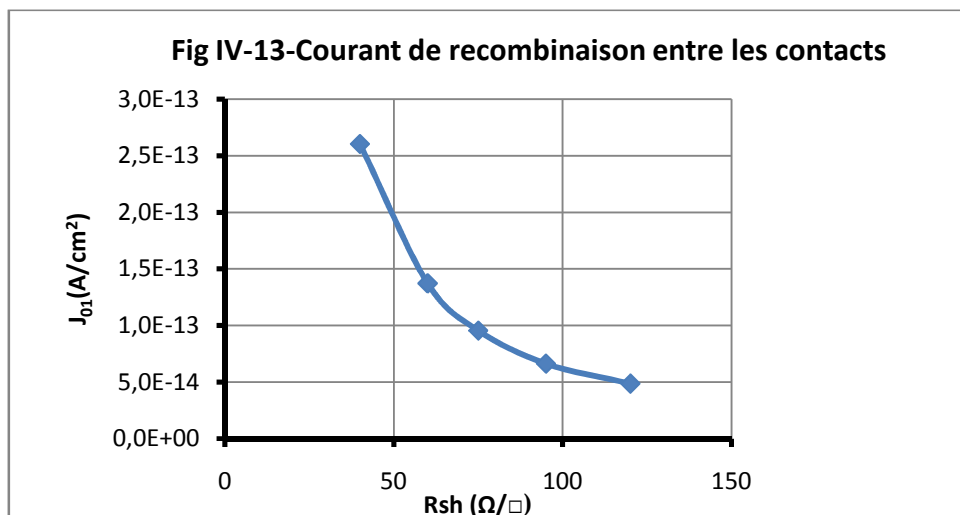
L'exécution du programme nous donne les résultats suivants :

Résistance carré (Ω/\square)	40/120	40/95	40/75	40/60	40/40
Icc (mA)	36,15	35,90	35,59	35,24	34,49
V _{co} (mv)	625,63	625,17	624,39	623,31	620,58
Pm (mW)	17,85	17,80	17,68	17,52	17,11
FF (%)	78,92	79,29	79,57	79,75	79,93
Rendement η (%)	17,85	17,80	17,68	17,52	17,11

Tableau IV-4- Influence de la résistance de couche entre les contacts

On constate que le rendement décroît avec la diminution de la résistance de couche entre les contacts. Cela est dû au courant de recombinaison.

Avec PC1D, on obtient la courbe suivante.



On remarque que le courant de recombinaison diminue avec l'augmentation de la résistance de couche, ce à quoi on s'attend à une élévation du rendement.

IV-6-Conclusion

Pour avoir un bon rendement, on a intérêt à :

- Augmenter le dopage sous les contacts (résistance carrée faible) pour avoir une faible résistance de contact et par conséquent une diminution de la résistance série.
- Diminuer le dopage entre les contacts (résistance carrée grande) pour avoir un faible taux de recombinaison entre ces contacts.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est l'étude, dans un premier temps, d'une cellule solaire au silicium monocristallin à émetteur sélectif dont les paramètres obtenus sont à comparer avec une cellule à émetteur homogène. Dans un second temps, on a étudié l'influence de la variation des résistances de couche de l'émetteur (entre et sous les lignes) qui caractérise ce genre de cellules.

Afin de voir l'évolution de certains paramètres à deux dimensions notamment les densités et les quasi niveaux de Fermi des porteurs afin de mieux comprendre certains phénomènes dans l'introduction de l'émetteur sélectif, nous avons opté pour le Programme PC2D développé récemment et présenté en fin de 2011 qui complète le fameux PC1D élaboré par la même équipe de Paul A. Basore.

De plus, la simulation à deux dimensions permet d'introduction des paramètres de la cellule avec plus de précisions et l'obtention de résultats plus conséquents avec des courbes en 2D.

Dans ce travail, on a présenté ce logiciel avec tous les outils l'accompagnant tout en assimilant l'ensemble de ces mécanismes physiques et numériques. Un chapitre entier a été consacré à ce programme avec tous les détails possibles.

Dans cette étude, nous avons essayé de montrer l'utilité de l'introduction d'un émetteur sélectif dans une cellule PV par rapport à un émetteur homogène. Nos calculs ont montré une assez bonne concordance avec l'expérimental fourni par l'équipe d'Irysolar de Montpellier. Ainsi les calculs effectués par PC2D sur une cellule à émetteur sélectif (**40/90 Ω/\square : 40 Ω/\square** sous les contacts avec **90 Ω/\square** entre les lignes) nous ont permis de trouver un rendement de **17,80 %** proche de la valeur expérimental avec un gain de **0,2 %** par rapport à la cellule étalon à émetteur homogène de **75 Ω/\square** .

En conséquence de cette étude, nous avons constaté également des améliorations au niveau des paramètres caractéristiques de la cellule à savoir le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le facteur de forme comme l'atteste la caractéristique $I(V)$. Ces améliorations, comme nous les avons nettement remarquées dans le gain du rendement quantique des deux cellules comparées, sont dues essentiellement à des absorptions supplémentaires du spectre solaire dans la gamme Ultra-violette grâce à l'émetteur dont on sait déjà sa préférence à absorber les photons les plus énergétiques. Celles-ci sont donc augmentées favorablement par l'introduction de l'émetteur sélectif. Les courbes en 2D des potentiels des quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous ainsi que celles de leurs densités, consolident notre étude.

Dans une seconde partie de nos calculs, nous avons aller un peu loin en étudiant l'optimisation de la cellule en fonction de ses paramètres résistifs de son émetteur sous les contacts et ceux entre les lignes afin de trouver les meilleurs compromis possibles pour de futures applications dans ce domaine.

Ainsi, on a remarqué une diminution du rendement lorsque la résistance carrée sous les contacts tend vers celle entre les lignes, dépassant au maximum les **0.3 %** pour la cellule à **95-95 Ω/\square** dont le facteur de forme décroît, dans ce cas, d'environ **0.2 %**

Par ailleurs, nous avons observé qu'entre les contacts, le rendement s'abaisse avec la décroissance de la résistance carrée car le fort dopage de cette zone signifie un fort taux de recombinaison, le rendement peut s'amoinrir alors jusqu'à **17,11 %** pour la cellule **40/40 Ω/\square**).

Donc, on a plus intérêt à diminuer la résistance carrée sous les contacts pour avoir une résistance série plus faible et à l'augmenter dans les autres zones pour avoir un taux

de recombinaison moins élevé. Théoriquement, le rendement peut atteindre le **18 %** pour une cellule de **(20-120 Ω/\square)**.

Enfin, on s'attendrait que ce travail puisse être d'un bon support pour l'étude d'autres structures de cellules dans le domaine de la recherche photovoltaïque. En sus, on souhaiterait que cette étude soit d'une aide précieuse pour tout travail ultérieur que ce soit pour tous ceux qui se lanceront dans le programme PC2D ainsi que pour toute étude se rapportant à cette nouvelle technique de l'introduction de l'émetteur sélectif dans les cellules solaires dont on espère apporté notre petite contribution.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Paul A. Basore and Kirsten Cabanas-Holmen, « **PC2D: A Circular-Reference Spreadsheet Solar Cell Device Simulator** », *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10.1109/JPHOTOV.2011.2166376
- [2] M. Orgeret, « **les piles solaires** » Edition Masson, Paris 1985.
- [3] A. Ricaud, « **Photopiles solaires** », Presses polytechniques et universitaires romandes,1996.
- [4] A. Ricaud, « **Gisement solaire et transferts énergétiques** », master Energies, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [5] N. Poize , «**Le gisement solaire** », CNFPT - Rhônealénergie-Environnement, 21-23 février 2007.
- [6] A. Ricaud, «**Les convertisseurs photovoltaïques** », European Master in Renewable Energy, Valbonne, Septembre 2011.
- [7] K. Emery, «**Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules**», Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, USA, 2003.
- [8] B. Flèche et D. Delagnes « **Energie solaire photovoltaïque** », juin 2007
- [9] Go. Boyle « **Solar photovoltaics** », Renewable Energy (3rd Edition), Oxford University Press,2012.
- [10] <http://pveducation.org/pvcdrom> (consulté en mai 2013)
- [11] S. Brigand , « **Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque** », complément technique, mars/avril 2008.
- [12] W. Favre, « **Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations** », thèse de doctorat, École Doctorale « Sciences et Technologies del'Informatique des Télécommunications et des Systèmes » ,Université de Paris - Sud11, Septembre 2011 .

- [13] G. Poulain « **Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement** », Thèse doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon (France), 2012.
- [14] H. Mathieu et H. Fanet, «**physique des semiconducteurs et des composants électronique**», Editions Dunod, Paris, 2009.
- [15] J. ENCINAS «**Diodes et transistors bipolaires discrets** », Technique de l'ingénieur.
- [16] S. M. Sze and Kwok K. Ng « **Physics of semiconductor devices** », Wiley-Blackwell, 2007.
- [17] J. Faist « **Introduction à la physique des semi-conducteurs** », Neuchâtel (Suisse), mai 2001.
- [18] A. Vapaille & R.Castagné, « **Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs physique et technologie** »,1ère édition, DUNOD, 1987.
- [19] Very Florian « **Montage d'un système de révélation de shunts électriques sur les cellules photovoltaïques au Silicium** », Rapport de stage, Master1EAA, IRYSolar et Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon (France), Mai 2011
- [20] J. S. Scheperts. ,M . Blackmer, W. W. Wilhelm, M. Resende, « **Transmittance and Reflectance Measurements of Corn Leaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply** », J. Plant Phyriol Vol 148. pp. 523-529 (1996).
- [21] Simeon C. Baker-Finch and Keith R. McIntosh ,« **Reflection distributions of textured monocrystalline silicon: implications for silicon solar cells** », Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/pip.2186, 2012.
- [22] J.D. Lacoste, « **Vers une ingénierie des bandes de cellules solaires à hétérojonctions a-Si :H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène** », Thèse doctorat, Ecole polytechnique, Juillet 2007 .
- [23] Paul A. Basore and Kirsten Cabanas-Holmen, «**From PC1D to PC2D** » Presented at the ISFH Characterization and Modeling Workshop, Oct. 3, 2012.

- [24] Rolf Brendel, « **Modeling solar cells with the dopant-diffused layers treated as conductive boundaries** », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Mars 2010.10.1002/pip954.
- [25] Kirsten Cabanas-Holmen and Paul A. Basore , « **Comparison Of 1d And 2d Model Results For Selective Emitter And Interdigitated Back Contact Cells** » Presented at the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Frankfurt, 25 September 2012 – 2BV.5.42 Copyright 2012 WIP .
- [26] Aide PC1D V5.9 (www.hanwhasolar.us consulté en mai 2013)
- [27] Aide PC2D V2.2 (www.hanwhasolar.us consulté en mai 2013)
- [28] Robert Bock,a_ Susanne Mau, Jan Schmidt, and Rolf Brendel, « **Back-junction back-contact n-type silicon solar cells with screen-printed aluminum-alloyed emitter** », Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal (ISFH), Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Germany, 28 June 2010.
- [29] Andrés Cuevas, Paul A. Basore, Gadlle Giroult-Matlakowski and Christiane Dubois, « **Surface Recombination Velocity And Energy Bandgap Narrowing Of Hightly Doped N-Type Silicon** » 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference 23-27 October 1995 Nice. France.
- [30] Kirsten Cabanas-Holmen, Paul A. Basore, « **PC2D: Applied to a Selective Emitter Cell** », SiliconPV: April 03-05, 2012, Leuven, Belgium.
- [31] C. Boulord, « **Développement de techniques de métallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à haut rendement** », Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 2012.
- [32] M. Hilali, A. Rohatgi, and B. To, « **A review and understanding of screen-printed contacts and selective-emitter formation** », in 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules, vol. 1617, pp. 80401–3393, 2004.
- [33] J. Lelièvre, « **Elaboration de SiNx :H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques** », Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 2007.

- [34] Nichiporuk Olksity, « **Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités** », Thèse doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon (France), Mai 2005.
- [35] P. Papet, « **Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts arrière sur substrats minces en silicium cristallin** », Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), Décembre 2007.
- [36] A. Y. C. YU and E. H. SNOW , « **Minority Carrier Injection Contacts Of Metal-Silicon** », Solid-State Electronics Pergamon Press 1969. Vol. 12, pp. 1.55-160. Printed in Great Britain.
- [37] A. Mouhoub , «**Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin** », Rev. Energ. Ren. Vol. 4 (2001) 11-22
- [38] Mohamed M. Hilali, Ajeet Rohatgi, Chandra Khadilkar, Steve Kim, Tung Pham, Jalal Salami, Aziz Shaikh, Srinivasan Sridharan, « **Understanding And Development Of Ag Pastes For Silicon Solar Cells With High Sheet-Resistance Emitters** », 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France
- [39]D.Salles, E.Fogarassy, R.Stuck et P.Siffert , «**Recuit laser de cellules solaires fonctionnant sous concentration** »,Revue Phys.Appl .15 (1989), 889-893
- [40] D. L. Meier, E. A. Good, R. A. Garcia. B. L. Bingham, S. Yamanaka, V. Chandrasekaran and C. Bucher, «**Determining Components Of Series Resistance From Measurements On A Finished Cell** », Solar Power Industries, Inc. , PA 15012 USA
- [41] F. Chelli, R. Tala-Ighil, S. Sali, S. Oussalah, M. Boumaour, F. Tayour et Y. Si-Ahmed, « **Mesure statistique de la résistance de contact d'une grille sérigraphiée pour cellules solaires au silicium multicristallin** », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 633 – 638.
- [42] Ismail Kashkoush, Gim Chen, and Dennis Nemeth, « **Characterization Of C-Si Texturization In Wet Koh/Ipa And Its Effect On Cell Efficiency** », Akrion Systems LLC6330 Hedgewood Drive, Allentown, PA 18106, USA.

- [43] Martin Wolf And Hans Rauschenbacht, « **Series Resistance Effects On Solar Cell Measurements** », Advanced Energy Conversion. Vol. 3, pp. 455-479. Pergamon Press, 1963. Printed in Great Britain.
- [44] Thomas Maeder ,« **Introduction aux pâtes / encres de sérigraphie en technologie des couches épaisses** »,080203.doc, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne(Suisse), 2008
- [45] Ching-Hsi Lin, Shih-Peng Hsu and Wei-Chih Hsu, « **Silicon Solar Cells: Structural Properties of Ag-Contacts/Si-Substrate** », Solar Cells - Silicon Wafer-Based Technologies, Prof. Leonid A. Kosyachenko (Ed.), (2011) ISBN: 978-953-307-747-5, InTech, Available from:
<http://www.intechopen.com/books/solar-cells-silicon-waferbased-technologies/silicon-solar-cells-structural-properties-of-ag-contacts-si-substrate>
- [46] Geraldine C. Schwartz Kris V. Srikrishnan , « **Handbook of Semiconductor Interconnection Technology** », Second Edition Published in 2006 by CRC Press
- [47] Benahmed Benabdallah Nadia, « **Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe** »,Thèse de magister , Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen , Juillet 2006
- [48] A.Allaoui, « **Simulation numérique des caractéristiques des cellules solaires en GaAs** », Thèse de magister , Université de Bechar, Année Universitaire : 2008 - 2009
- [49] Jürgen Otto Schumacher, «**Numerical Simulation of Silicon Solar Cells With Novel cells Structure** »,Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg (Allemagne) ,2000
- [50] M. Lipiński And P. Panek, «**Optimisation Of monocrystalline Silicon Solair cell** », Opto-Electronics Review **11**(4), 291–295 (2003).
- [51] A.Bouyelfane et A.Zerga, « **Effet de la résistance carrée de l'émetteur diffusé pocl3 et de la largeur des doigts sérigraphiés d'une cellule solaire conventionnelle au mc-Si** », Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 (2010).