

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE
Spécialité : Génie Mécanique
Option : Energétique
Mémoire de master Intitulé

***ETUDE THEORIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE
ORGANIQUE***

Présenté par :

CHAFI Wassila.

CHIKHAOUI Abir Mouna.

Soutenu publiquement le : /05/2018, devant le jury :

M. BADAoui Abdelhamid	CU Naâma	Président
	CU Naâma	Encadreur
	CU Naâma	Examinateur

Année universitaire 2017-2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

*Nous dédions ce mémoire à nos chères familles, spécialement
A nos très chers parents qu'ils représentent pour nous le
Symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et
L'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de nous
encourager et de prier pour nous. Ce travail est le fruit de vos
sacrifices.*

*Nous dédions aussi ce modeste mémoire à nos enseignants
auxquels nous exprimons toute notre gratitude pour le soutien
qu'ils nous ont apporté, sans oublier nos chers amis ainsi que
notre promotion de Master 2 génie mécanique et toutes les
personnes de notre connaissance.*





Remerciement

*Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal Espérant un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis jour et nuit, nous mène vers le bonheur fleuri.*

*Au terme de ce modeste travail nous voudrions exprimer notre gratitude et reconnaissances à
toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation*

*A nos très chers parents et frère, Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement,
l'amour et l'affection que nous portons pour vous. Nos anges gardiens et nos fidèles
accompagnants dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse.*

*Un remerciement particulier a : Sara, Ikram, Khawla, Latifa, Houda et Rafika. Quand on
vous a connus, on a trouvées l'amies et les sœurs de notre chemin. Notre vie à vôtres cotés est
remplie de belles surprises*

*A nos grands parent et à toute la famille Chikhaoui, Guerinike et Chafi. En témoignage de
l'attachement, de l'amour et de l'affection que nous portons pour vous. On vous remercie
pour votre générosité sans égal. Vous avez toujours été présents pour les bons conseils.*

*A notre cher collègue Bouighi Habib, notre professeur Mr Kaid, et au membre de jury et tout
le département science technique sans exception : Je ne peux pas trouver les mots justes et
sincères pour vous exprimer nôtres affection et nôtres pensées.*

*Un profond respect et un remerciement particulier pour notre encadreur Dr.Badaoui
Abdelhamid. Pour la bonne contribution de ce travail. Nous avons eu le privilège de
travailler parmi votre équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs.*

Que dieu le tout puissant vous en récompensent au centuple

Wassila, Abir Mouna

Tables des Matières

Didicaces

Remerciements

Tables des Matières v

Liste des Figures viii

Liste des tableaux : x

La liste d'abréviation : xi

INTRODUCTION GENERALE : 2

I. Introduction : 4

I.1 L'énergie solaire..... 4

I.1.1 Le soleil :..... 4

I.1.2 Le spectre solaire :..... 5

I.1.3 Le rayonnement solaire :..... 6

I.2 Le photovoltaïque :..... 7

I.2.1 La cellule PV :..... 7

I.2.2 L'effet photovoltaïque :..... 8

I.3 Les différents types de cellules solaires 9

I.3.1 Silicium :..... 9

I.3.1.1 Silicium monocristallin :..... 10

I.3.1.2 Silicium multi-cristallin (poly-cristallin):..... 10

I.3.2 Les couches minces :..... 11

I.3.3 Les cellules amorphes : 12

I.3.4 Les cellules solaires organiques 12

II. Cellule solaire organique :..... 14

II.1 Définition :..... 14

II.2 Cellule photovoltaïque inorganique[13] :..... 14

II.3	Semi-conducteur organique :	15
II.3.1	Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs :	15
II.3.2	Polymères semi-conducteurs les plus étudiés :	17
II.4	Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque organique :	18
II.4.1	La densité de courant de court-circuit J_{cc} :	18
II.4.2	Tension de circuit ouvert V_{co} :	18
II.4.3	Facteur de forme FF :	19
II.4.4	Rendement de conversion d'énergie η :	19
II.4.5	Rendement quantique QE :	19
II.5	Fonctionnement des cellules photovoltaïque organique :	20
II.5.1	Absorption des photons avec création d'excitons :	20
II.5.2	Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur :	21
II.5.3	Dissociation des excitons :	22
II.5.4	Transport des charges et collecte aux électrodes :	23
II.6	Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques[31] :	24
III.	Définition d'un polymère :	27
III.1	Le matériau donneur : P3HT	27
III.2	Le matériau accepteur PC60BM.....	28
III.3	La couche active : P3HT : PC60BM	29
III.4	Equations fondamentales dans les semi-conducteurs :	30
III.4.1	Equation de Poisson :	30
III.4.2	Equations de continuité :	31
III.4.3	Equations de transport :	31
III.4.4	Diffusion :	32
III.5	Les différentes structures de cellules organiques [49] :	33
III.5.1	Structure monocouche (jonction Schottky) :	33

III.5.2	Structure bicouche :.....	34
III.5.3	Structure de type hétérojonction en volume :.....	35
III.5.4	Structure inverse :.....	35
III.5.5	Structure « Tandem » :.....	36
IV.	Bilan des études intérieures :.....	38
IV.1	Simulation des cellules solaires :.....	44
IV.1.1	Simulation :.....	44
IV.1.2	Logiciel de simulation :.....	44
IV.2	Utilisation du logiciel SCAPS :.....	46
IV.3	Résultats et discussion de la cellule étudiée sous-SCAPS	49
IV.4	Introduction	49
IV.5	Propriétés de la cellule solaire :.....	49
IV.6	Etude de l'effet de la température sur les performances de la cellule étudiée.....	50
IV.7	L'influence de la température sur le rendement quantique $QE=f(\lambda)$:.....	52
IV.8	L'effet de l'épaisseur sur les performances de la cellule étudiée	53
IV.9	L'influence de l'épaisseur sur la caractéristique $QE=f(\lambda)$	56
IV.10	Amélioration de la cellule	56
IV.11	Conclusion	59
V.	Conclusion générale :.....	61
	Références bibliographiques :.....	62

Liste des Figures

Figure 1: Coupe schématique du soleil	5
Figure 2: Spectre du rayonnement solaire.....	6
Figure 3: Rayonnement solaire transmis à la terre.....	7
Figure 4: Structure basique d'une cellule solaire.....	8
Figure 5: L'effet photovoltaïque.....	9
Figure 6: Silicium.....	9
Figure 7: Silicium monocristallin.....	10
Figure 8: Silicium multi cristallin (poly cristallin).	10
Figure 9 : Couche mince.	11
Figure 10: Cellules photovoltaïques organique dans un film plastique.	12
Figure 11: Cellule solaire organique à base de Fullerène.	14
Figure 12: Différents types des semi-conducteurs organiques [14]......	16
Figure 13: Structures chimiques des principales familles de polymères conjugués.	17
Figure 14: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque..	18
Figure 15: Les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique.	20
Figure 16: Absorption des photons avec création des d'excitons.	20
Figure 17: Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur.....	21
Figure 18: Le diagramme énergétique à la jonction Donneur/Accepteur et les conditions de Dissociation.....	23
Figure 19: Transport des charges et collecte aux électrodes.....	23
Figure 20: Spectre solaire de référence et absorption d'une couche mince de P3HT.....	28
Figure 21: Structure du P3HT (a) et du PC60BM (b).....	28
Figure 22: Spectres d'absorption d'un film de P3HT, de PC60BM et d'une hétérojonction en volume P3HT : PC60BM (ratio 2:1 m/m) [43]......	29

Figure 23: Structure d'une cellule monocouche de structure ITO/matériau organique/AL. ...	33
Figure 24: Structure et représentation des niveaux d'énergie d'une cellule bicouche.	34
Figure 25: Structure d'une cellule à réseau interpénétré.	35
Figure 26: Schéma d'une structure conventionnelle de cellule photovoltaïque (à gauche) et d'une structure inverse (à droite).	35
Figure 27: Schéma d'une cellule tandem.	36
Figure 28: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	47
Figure 29: Définition de la structure d'une cellule solaire.	48
Figure 30: Paramètres d'une couche PCBM d'une cellule.	48
Figure 31: Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage.	49
Figure 32: Caractéristique $I=f(V)$ pour les différentes températures.	51
Figure 33: Variation en fonction de la température de : a) la tension de circuit ouvert V_{CO} . b) le courant de court-circuit J_{CC} . c) le facteur de forme FF et d) le rendement η pour la cellule PCBM/P3HT.	52
Figure 34: Caractéristique $QE=f(\lambda)$ pour différentes température.	53
Figure 35: Caractéristique $I=f(V)$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur.	54
Figure 36: Variation en fonction de l'épaisseur de : a) la tension de circuit ouvert V_{CO} . b) le courant de court-circuit J_{CC} . c) le facteur de forme FF et d) le rendement η pour la cellule PCBM/P3HT.	55
Figure 37: Caractéristique $QE=f(\lambda)$ à épaisseur variable.	56
Figure 38: Caractéristique $QE=f(\lambda)$ de la cellule améliorée PCBM/P3HT/PEDOT : PSS et PCBM/PCPDTBT:PSS.	58

Liste des tableaux :

Tableau 1: Caractéristiques principales du soleil [1]. 4

Tableau 2: Les paramètres de la simulation de la cellule. 50

Tableau 3: les caractéristiques de la cellule solaire pour différentes températures. 51

Tableau 4: Les caractéristiques de la cellule solaire pour différentes valeurs de l'épaisseur de chaque couche. 54

Tableau 5 : Les paramètres des polymères utilisés pour la simulation de la cellule. 57

Tableau 6: Les caractéristiques de la cellule solaire modifiée..... 58

La liste d'abréviation :

AE	Affinité électronique.
AM 1.5	Conditions d'éclairement qui correspond à ciel parfaitement clair et dégagé
BC	Bande de Conduction
BHJ	Bulk hétérojonction
BV	Bande de Valence
C	La vitesse de la lumière $c = 3 \times 10^8 m. S^{-1}$
CdS	Surface de cadmium
CIGS	Cuivre indium /gallium sélénium
CIS	Cuivre, d'indium et de sélénium
CIGS	Cuivre indium/gallium sélénium
CdTe	Tellure de Cadmium
CuInSe	Cuivre d'indium et de sélénium
C₆₀	Fullerène
D/A	Interface Donneur/Accepteur
D_N,D_P	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement
E	L'énergie transportée par les photons
E_f	Energie de Fermi
E_g	Gap du matériau semi-conducteur
E_{CT}	L'énergie de séparation de l'électron et du trou juste après de transfert de charge à l'interface donneur-accepter
EQE	rendement quantique

\vec{F}	Le flux de particules
FF	Facteur de Forme
GaAs	gallium Arsenic
H	Constant de Planck $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{J.s}$
HJV	Hétérojonction en volume
HOMO	Orbitale moléculaire la plus haute occupée (HighestOccupiedMolecular Orbital)
I	Courant électrique
ITO	Oxyde d'étain et d'indium $(\text{In}_2\text{O}_3)_{90}(\text{SnO}_2)_{10}$ (Indium Tin Oxide)
I_{PD}	L'énergie d'ionisation du donneur
JCC	Densité de courant de court-circuit
J_N, J_P	Densité de courant des électrons et des trous
$J(v)$	Caractéristique courant-tension
J_{ph}	Densité de photo-courant
K	Constant de Boltzmann
L_D	La longueur de diffusion
LUMO	Orbitale moléculaire la plus basse vacante (LowestUnoccupiedMolecular)
N_C, N_V	Densité effective d'états à la bande de conduction (valence)
OPV	Cellule photovoltaïque organique (Organic photovoltaiccell)
PA	Trous-poly-acétylène
PCBM	Le méthano-fullerène [6,6] phényphényl- C_{61} -butyrate deméthyle ($PC_{60}BM$)
PCPDTBT	Poly [2,6-(4,4-bis-(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta [2,1-

	b;3,4-b']dithiophene)-alt-4,7(2, 1,3-benzothiadiazole)].
PSS	poly (styrènesulfonate) de sodium (PSS).
PEDOT	Poly (3,4-éthylènedioxythiophène)
PI	Potentiel d'ionisation
Pm	Puissance maximale
PPP	Poly (paraphénylène)
PT	Poly thiophène
PPV	Poly (p-phénylènevinylène)
PPy	Poly pyrrole
PV	cellule photovoltaïque
P3HT	Poly (3-hexylthiophène)
R_N, R_P	Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement
R_{Sh}	Résistance shunt
R_S	Résistance série
S-C	Semi-conducteur
SCAPS	solarcell capacitance simulator
SI	Silicium
V	Potentiel d'une jonction PN
V_{CO}	Tension de circuit ouvert
X_A	L'affinité électronique de l'accepter
λ	La longueur d'onde
μ_n, μ_p	Mobilité des électrons et des trous respectivement
ε	La permittivité
ε_r	La permittivité relative respectivement
ε₀	La permittivité du vide

ρ

La densité volumique

η

Rendement de conversion d'énergie

INTRODUCTION GENERALE :

De nos jours, la problématique énergétique se révèle être de plus en plus urgente. Notre société a besoin d'énergie peu dispendieuse, ce qui nous a malheureusement amené à exploiter, pour combler 85% de nos besoins, des combustibles fossiles qui s'avèrent très polluants.

Cette problématique nous a ainsi entraîné à chercher des solutions durables ayant à la fois un impact moindre sur l'environnement et un faible cout.

Comme nous le savons, les rayons du soleil sont une source qui, si nous réussissions à bien l'exploiter, nous donneraient plus d'énergie que notre besoin ne le demande : dans ce contexte, la technologie des panneaux photovoltaïque organique aurait des chances de devenir une solution à notre problème. Dans ce dossier, il sera plus que naturel et nécessaire de comparer cette technologie avec le photovoltaïque inorganique.

Notre but sera de montrer comment le panneau photovoltaïque organique (PVO) pourrait dépasser les principales problématiques et nous évoquerons aussi dans quelles mesures le PVO apparait comme étant une solution « verte » cependant, ce système connait des limites que nous exposerons.

Les moyens de production sont principalement issus des énergies renouvelables, c'est-à-dire dont les ressources sont inépuisables par nature. Ce dernier terme recouvre en réalité de nombreuses technologies, parmi lesquelles l'énergie photovoltaïque organique, qui transforme directement la lumière du soleil en électricité, sans intermédiaire, directement grâce à un matériau semi-conducteur.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques type polymère semi-conducteur. L'objectif principal est de définir l'influence de la (température, l'épaisseur de la couche active) sur la caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque organique et par la suite sur ses paramètres.

La présentation de ce travail va donc s'articuler autour des chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïques et son effet. Nous présentons aussi les différents types de cellules solaires.
- Le deuxième chapitre porte une élaboration d'une cellule (OPV) :P3HT/PCBM et son principe de fonctionnement, quelque généralité sur la cellule photovoltaïque inorganique les

semi-conducteurs organiques et les mécanismes physiques mis en jeu dans la production d'électricité d'origine photovoltaïque sont ensuite présentés dans ce chapitre.

- Le troisième chapitre est plus particulièrement axé sur la conception des polymères conjugués et les différentes filières technologiques des cellules solaires. Le principe de base de la conversion photovoltaïque est expliqué et les différentes structures des cellules photovoltaïques organiques à base de polymères sont présentées.
- La quatrième partie de ce travail de mémoire sera consacrée pour la présentation du logiciel "SCAPSS" et les étapes abordées, ainsi que les résultats de la simulation numérique de la structure D/A qui sont présentés pour les différents paramètres influant sur les performances de ces cellules photovoltaïques organiques et sur les caractéristiques courant-tension à base de polymère. Plusieurs exemples de matériaux ont été considérés dans le but de comparer les différents types de cellules et de montrer le matériau qui présente les meilleures caractéristiques.
- En conclusion nous passerons en revue les paramètres qui contribuent directement aux performances photovoltaïques des cellules étudiées, et des perspectives d'amélioration parachèvent ce travail.

I. Introduction :

L'électricité photovoltaïque est une source incontournable pour l'avenir, et plusieurs efforts considérables se font pour rendre cet apport d'énergie plus performant.

Ce premier chapitre est consacré à une étude générale pour mettre en évidence la cellule solaire.

I.1 L'énergie solaire

I.1.1 Le soleil :

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent, des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie.

Et Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

Tableau 1: Caractéristiques principales du soleil [1].

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>
<i>Masse</i>	$1,989 \times 10^{30} \text{ Kg}$
<i>Diamètre</i>	$1,392 \times 10^9 \text{ m}$
<i>Masse volumique moyenne</i>	1410 Kg m^{-3}
<i>Puissance rayonnée</i>	$3,83 \times 10^{26} \text{ W}$
<i>Température superficielle</i>	5770 K

La structure du soleil est schématisée sur la (Figure1) ou on distingue quatre zones particulières : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [1]

➤ **Le noyau** : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée ($15 \times 10^6 \text{ K}$) ainsi que sa pression ($2 \times 10^{11} \text{ bars}$) et sa densité ($\sim 10^5 \text{ Kg m}^{-3}$), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre. L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

- **La photosphère :** est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.
- **La chromosphère :** est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ

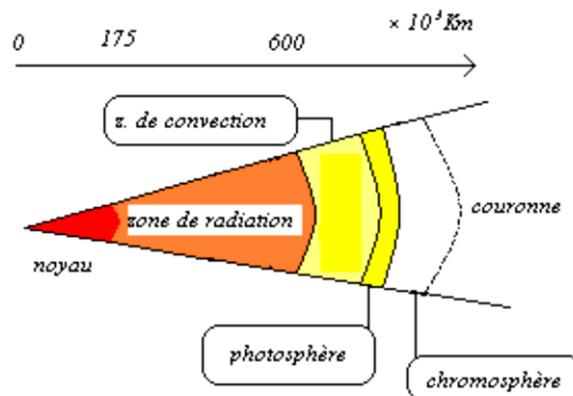


Figure 1: Coupe schématique du soleil

- La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [2] de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [2] 150×10^6 Km ; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient [1] 8 minutes après avoir été émise.

I.1.2 Le spectre solaire :

La Figure 2 représente la gamme de rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible ainsi que les longueurs d'ondes correspondantes [3].

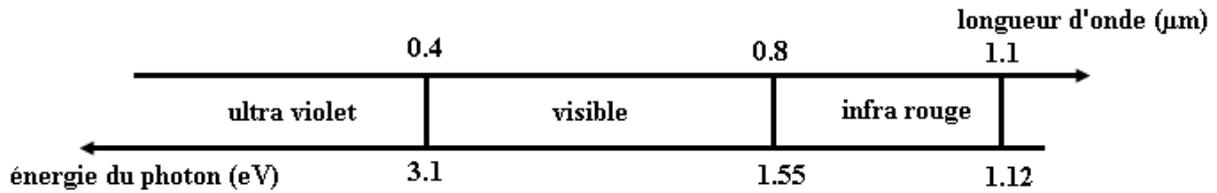


Figure 2: Spectre du rayonnement solaire.

On rappelle la relation permettant de passer de la longueur d'onde λ à l'énergie du photon associé (en eV) :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec h : constante de Planck. ($h=6,62 \times 10^{-34} \text{Js}$)

c : vitesse de la lumière. ($c= 3 \times 10^8 \text{m.s}^{-1}$)

Donc pour qu'il y ait une création de paires électrons-trous, il faut que l'énergie transportée par les photons qui arrivent sur le dispositif soit supérieure ou égale au gap du matériau semi-conducteur c'est-à-dire $E \geq E_g$.

I.1.3 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0.4 et 0.75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0.75 et jusqu'à 4 μm environ).

L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 340 W.m^{-2} (Figure 3). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre atmosphère, environ 100 W.m^{-2} sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [4.5].

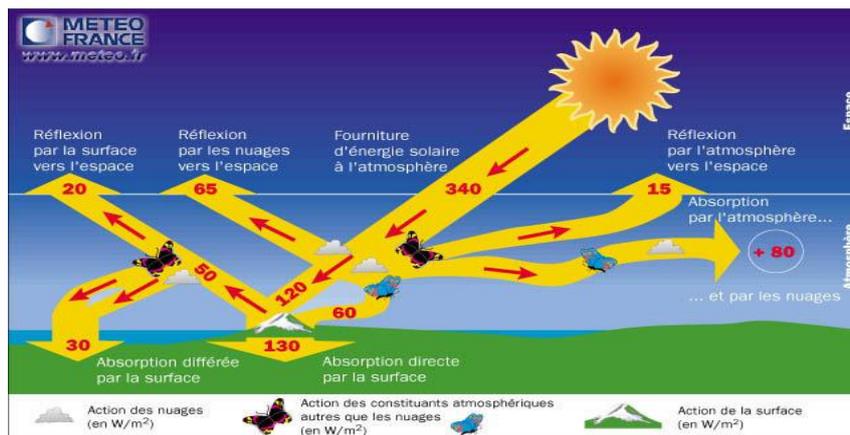


Figure 3: Rayonnement solaire transmis à la terre.

La Figure 3, publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages ($65W.m^{-2}$), le reste ($15W.m^{-2}$) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols.

Il reste donc $180W.m^{-2}$ qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers ($120W.m^{-2}$) se font directement, le reste ($60W.m^{-2}$) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les $180W.m^{-2}$ incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ $50W.m^{-2}$.

En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux $180-50=130W.m^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis pour constituer approximativement les $160W.m^{-2}$ qu'absorbe la surface terrestre [4].

I.2 Le photovoltaïque :

I.2.1 La cellule PV :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules PV sont constituées :

1. D'une fine couche semi-conducteur (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
2. D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
3. D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
4. Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement[6].

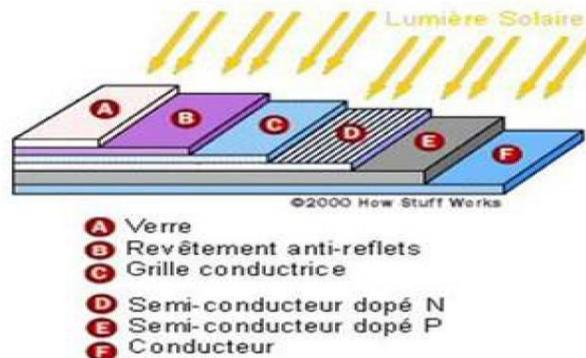


Figure 4: Structure basique d'une cellule solaire.

I.2.2 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [7].

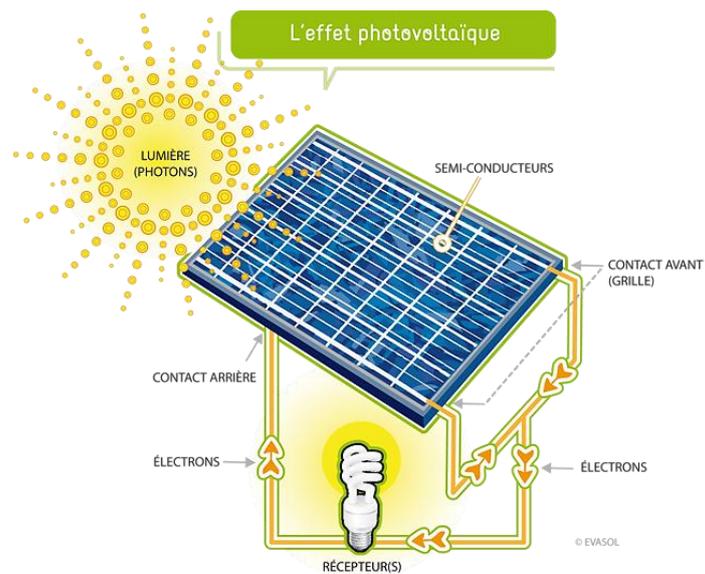


Figure 5: L'effet photovoltaïque.

I.3 Les différents types de cellules solaires

Sur le plan technologique, plusieurs types de cellules solaires sont distingués [1]:

I.3.1 Silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïque. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant sable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologie distincte de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : silicium monocristallin et le silicium multi cristallin [8.9].



Figure 6: Silicium.

I.3.1.1 Silicium monocristallin :

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [10] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

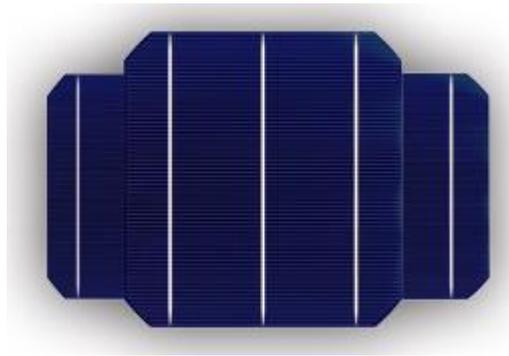


Figure 7: Silicium monocristallin.

I.3.1.2 Silicium multi-cristallin (poly-cristallin):

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13% (autour de 18 % en laboratoire) [10].



Figure 8: Silicium multi cristallin (poly cristallin).

I.3.2 Les couches minces :

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

- Cuivre-Indium-Diséléniure (CIS) ou Cuivre-Indium-Gallium-Séléniure (CIGS) : leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire), 99 % d'absorption, dégradation minimale, mais fabrication très délicate [10].
- Cadmium-Tellure (CdTe) : rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [10].
- Gallium-Arsenic (GaAs) : leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [11]. Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :
 - une absorption très élevée. Ces cellules ne sont pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
 - leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer.

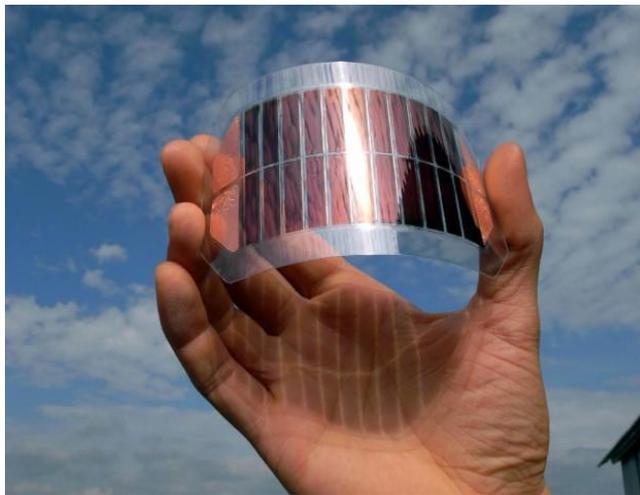


Figure 9 :Couche mince.

I.3.3 Les cellules amorphes :

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie [10] entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée).

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types).

On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres.

Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagira la lumière diffuse et a la lumière fluorescente et d'être plus performants a des températures élevées [10].

I.3.4 Les cellules solaires organiques

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [11].

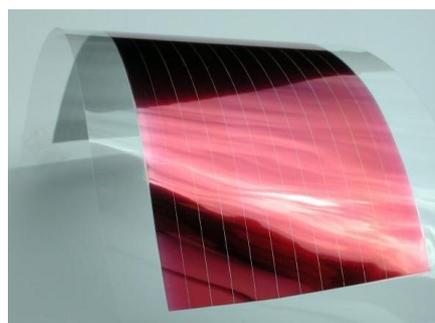


Figure 10: Cellules photovoltaïques organique dans un film plastique.

II. Cellule solaire organique :

II.1 Définition :

Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organiques, tel que les polymères. Leurs rendement est de 5%[12]. La structure de la cellule organique est démontrée dans la (Figure 11).

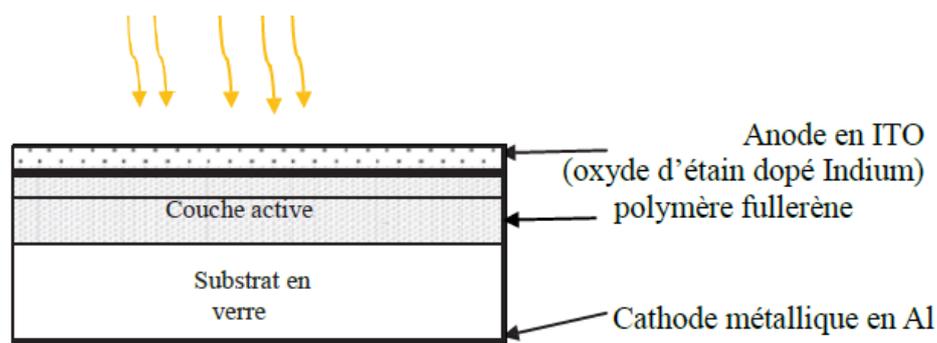


Figure 11: Cellule solaire organique à base de Fullerène.

La couche active est composée de deux matériaux l'un donneur d'électron comme une chaîne de polymère et l'autre accepteur d'électron comme le fullerène. Quand on éclaire la cellule on a un transfert d'électrons du polymère à la molécule de fullerène. L'avantage de ces cellules c'est qu'on peut réaliser des grandes surfaces, elles sont légères, flexibles et leur coût de fabrication est faible.

II.2 Cellule photovoltaïque inorganique[13] :

À l'heure actuelle, les cellules photovoltaïques présentant les meilleurs rendements de photo conversion reposent sur l'utilisation de matériaux inorganiques. Il convient d'en distinguer plusieurs types :

- **Les cellules à base de silicium :**

On distingue au sein même de cette famille, plusieurs types de cellules utilisant des "qualités" de silicium différentes : les cellules à base de Si monocristallin (rendement de l'ordre de 25%, coût de fabrication élevé), les cellules à base de Si poly-cristallin (rendement de l'ordre de 20%, coût de fabrication moindre) et les cellules à base de Si amorphe (rendement et coût plus faibles que le mono ou le poly-cristallin).

- **Les cellules à base d'arséniure de gallium :**

Il convient de distinguer deux types de cellules incorporant l'arséniure de gallium. D'un côté, les cellules de type " III.V " dont le composant principal est l'arséniure de gallium (rendement de l'ordre de 18 à 25%). De l'autre côté, les cellules multi jonctions (de type GInP/GaAs/Ge) qui constituent les cellules les plus efficaces (rendement de l'ordre de 32%) mais présentent un coût de mise en forme très élevé.

- **Les cellules CIS ou CIGS :**

Les premières sont composées de di-séléniure de cuivre et d'indium (CuInSe) alors que les deuxièmes font intervenir en plus, du gallium. Ce type de cellules présente un faible coût de fabrication.

- **Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) :**

L'avantage de ces cellules réside dans la forte absorption du tellure de cadmium, cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 17%.

II.3 Semi-conducteur organique :

Un semi-conducteur organique est un composé organique sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques, ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique ou électronique des plastiques. Par organique on entend que les molécules utilisées sont à base de carbone, comme les molécules à la base de la vie.

II.3.1 Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs :

Les matériaux organiques semi-conducteurs peuvent être classés en trois catégories selon leurs propriétés mécaniques :

Solubles, insolubles et cristaux liquides qui sont classés à leurs tours en oligomères (molécules avec une structure qui se répète régulièrement et constituée que quelques unités) ou en monomères (molécules avec une structure constituée d'une seule unité) ou en polymères (molécules qui ont plus de 10 unités) [14].

Les oligomères et les monomères absorbent de la lumière visible, ceux sont des chromophores, soit ils sont des colorants (solubles) soit des pigments (insolubles). Ce classement est montré sur la figure ci-dessous :

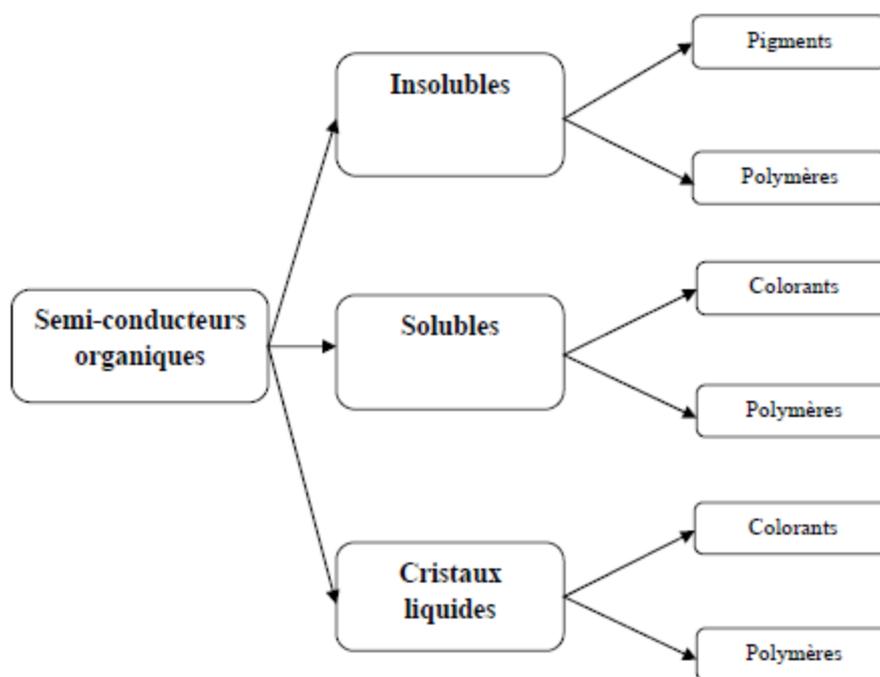


Figure 12: Différents types des semi-conducteurs organiques [14].

Pigments :

Dans l'industrie la fabrication des cellules solaires organiques à base de ces pigments nécessite une technique très compliquée, alors ces pigments peuvent être synthétisés par l'ajout des solubles adaptés aux chaînes de molécules (colorants).

Colorants :

Comme les dérivées de fullerène soluble tel que le PCBM peuvent être synthétisés et utilisées dans les cellules solaires organiques.

Polymères :

Selon leur structure moléculaire et leur composition chimique, ils peuvent être : solubles, insolubles ou des cristaux liquides, ils sont utilisés aussi dans les cellules solaires organiques comme donneur ou accepteur d'électrons.

Cristaux liquides :

Pour la nouvelle technologie, ces matériaux sont plus avantageux pour les cellules solaires organiques à cause de leur mobilité de charge suffisamment grande et une importante longueur de diffusion des excitons.

II.3.2 Polymères semi-conducteurs les plus étudiés :

L'obtention, en 1977, de poly acétylène présentant une conductivité de l'ordre de 10³ S/cm [15], a déclenché un véritable engouement pour ce matériau. Cependant, ce dernier présente une faible stabilité environnementale et thermique limitant son utilisation. A la suite de ces observations, de nombreux polymères conjugués ont été étudiés comme le poly (*para* phénylène) (PPP) [16], le poly pyrrole [17], le poly thiophène (PT) [18],... (Figure13). De nombreux polymères conjugués issus de ces structures parentales ont été synthétisés comme par exemple le poly (3- hexylthiophène), sur lequel nous reviendrons par la suite, et qui constitue le polymère conjugué conduisant aux meilleurs rendements photovoltaïques organiques.

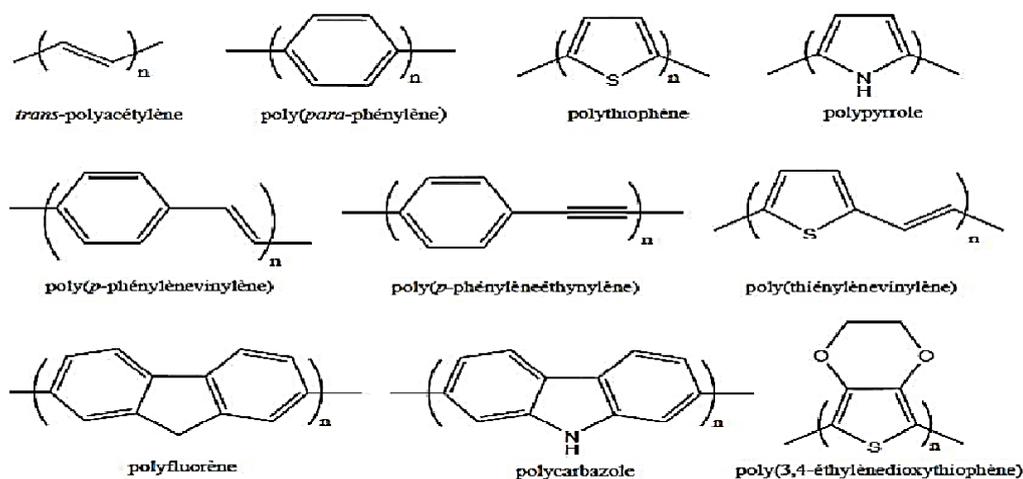


Figure 13: Structures chimiques des principales familles de polymères conjugués.

II.4 Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque organique :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (J_{cc} , V_{co} , FF et η), extraits des caractéristiques densités de courant-tension, permettent de comparer les différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

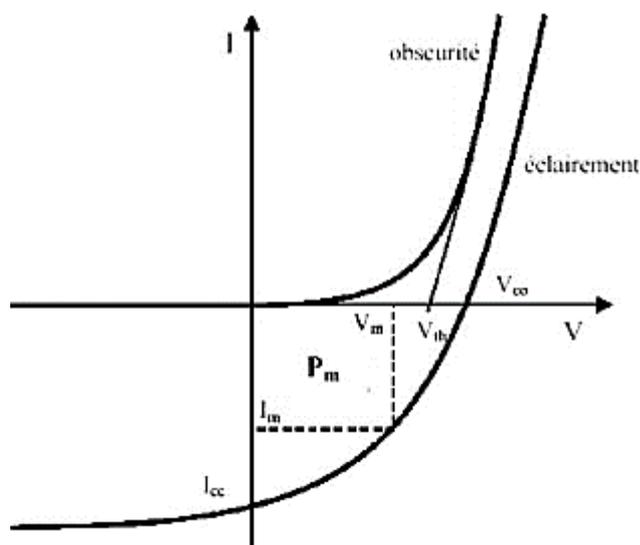


Figure 14: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque..

II.4.1 La densité de courant de court-circuit J_{cc} :

Il s'agit de la densité de courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V = 0$ V dans le schéma équivalent). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [19].

II.4.2 Tension de circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Dans le cas de cellules solaires organiques, la V_{co} est linéairement dépendante du niveau de la HOMO du matériau donneur et du niveau de la LUMO du matériau accepteur [20.21]. De plus, les pertes de charges aux interfaces matériaux-électrodes peuvent également affecter la valeur de la V_{co} [22]. Enfin, cette valeur décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo courant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q} \right) \ln \left[\frac{J_{cc}}{J_s} + 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

II.4.3 Facteur de forme FF :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, nous renseigne sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée $V_m \times J_m$ et la puissance idéale $V_{co} \times J_{cc}$ on le note :

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{J_{max} \cdot V_{max}}{J_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.2})$$

Où :

J_{cc} : est la densité de courant de court-circuit.

V_{co} : est la tension de circuit ouvert.

II.4.4 Rendement de conversion d'énergie η :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_{in} . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale P_{max} et la puissance P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{max} \cdot V_{max}}{P_{in}} = FF \cdot \frac{J_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II.3})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, la densité courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

II.4.5 Rendement quantique QE :

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion et ceux qui sont transmis (absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette valeur s'appelle le rendement quantique interne, IQE (Internal Quantum Efficiency). Dans le cas contraire, le rendement quantique externe, EQE (External Quantum Efficiency) et se définit comme suit :

$$QE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{hc}{e} \quad (\text{II.4})$$

où J_{cc} est la densité de courant de court-circuit, φ le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E_{ph} l'énergie du photon (avec $E_{ph} = hc/\lambda$, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide et λ la longueur d'onde).

Le rapport $J_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$ est appelée « réponse spectral » de la cellule, elle est noté $SR(\lambda)$. Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit :

$$QE = SR \cdot \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

II.5 Fonctionnement des cellules photovoltaïque organique :

Dans les cellules photovoltaïques organiques, le passage du photon à l'électron peut-être décomposé en quatre étapes. Elles sont schématisées sur la figure ci-dessous.

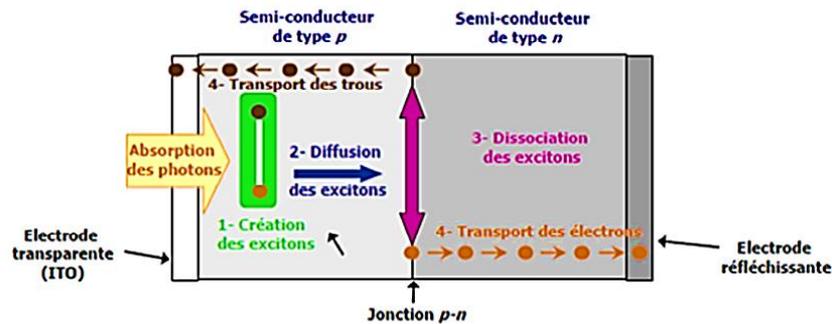


Figure 15: Les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique.

II.5.1 Absorption des photons avec création d'excitons :

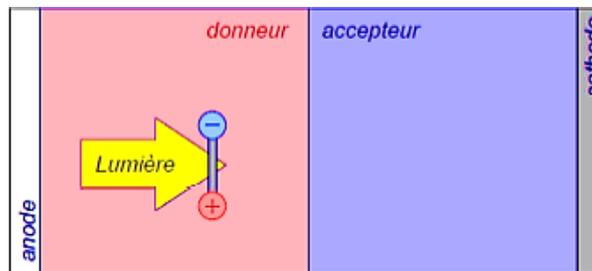


Figure 16: Absorption des photons avec création des d'excitons.

L'absorbance (ou densité optique) d'un film organique à une longueur d'onde donnée est égale au coefficient d'absorption du matériau multiplié par l'épaisseur du film. Elle doit être

suffisamment grande pour que toute la lumière soit absorbée à travers la cellule. Si le coefficient d'absorption est relativement grand ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$) dans les matériaux organiques utilisés alors l'épaisseur des films considérée de l'ordre de 100 nm est insuffisante pour assurer une absorption intégrale de la lumière incidente [23]. Il faut ajouter que le spectre d'absorption des matériaux choisis doit couvrir au maximum le spectre d'émission solaire. Ainsi le contrôle de la bande interdite (gap) des semi-conducteurs est important [24].

L'absorption des photons entraîne la formation d'exciton : des paires électron-trou corrélées par des forces de coulomb. Dans le silicium l'énergie nécessaire pour dissocier un exciton est de 14.7 MeV. Cela signifie qu'à température ambiante, l'énergie thermique est suffisante pour séparer les charges. C'est pour cela que, dans les cellules photovoltaïques en silicium, on ne s'intéresse pas à la dissociation des excitons [25].

Dans les matériaux organiques, l'énergie de liaison EL est beaucoup plus élevée (Comprise entre 0.4 et 1.4 eV) ; l'agitation thermique ne suffit pas à séparer des paires électrons-trous [26].

Ces porteurs liés ne peuvent pas directement rejoindre les électrodes. Ils doivent d'abord être dissociés par le champ électrique qui règne au niveau de la jonction entre le donneur et l'accepteur.

II.5.2 Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur :

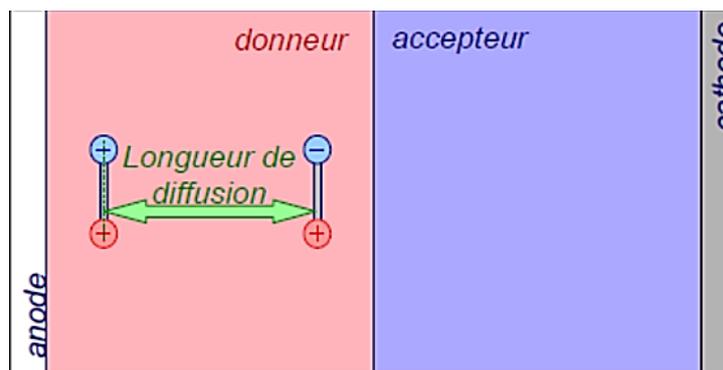


Figure 17: Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur.

Les excitons ont une durée de vie τ très courte, de l'ordre de la nanoseconde pour les singlets, mais beaucoup plus longue pour les triplets (quelques millisecondes).

Si rien ne se produit pendant ce temps τ , l'électron et le trou se recombinent et l'énergie de l'exciton se transforme en un nouveau photon (désexcitation radiative) ou en chaleur. Tout est

perdu pour le processus de conversion photovoltaïque. Il faut donc dissocier les charges liées avant leur recombinaison [27].

Les excitons ne sont pas localisés sur une molécule. Pendant leur durée de vie, ils diffusent sur une longueur L_D dont la valeur se situe entre quelque nanomètre (7,7 nm dans le C_{60}) et quelques dizaines de nanomètres (30 ± 10 nm dans le ZnPc, 12 ± 3 nm dans le PPV, 68 ± 20 nm dans le CuPc), exceptionnellement elle atteint plusieurs micromètres dans des matériaux fortement ordonnés. Pour que les excitons puissent atteindre un site de dissociation (c'est-à-dire la jonction Donneur/Accepteur), il faut que ceux-ci soient générés à une distance inférieure à la longueur de diffusion (L_D) de cette jonction. C'est pour cela que, dans les cellules mettant en œuvre le concept bulk hétérojonction (BHJ), chaque couche organique a une épaisseur de l'ordre de 50 nm.

II.5.3 Dissociation des excitons :

Lorsque les excitons rejoignent la jonction D/A, les deux charges qui les composent se séparent à condition que l'une d'entre elles passe (soit transférée) de l'autre côté de la jonction. On obtient alors une paire de polirons : un positif pour le donneur et un négatif pour l'accepteur.

La figure suivante illustre ce processus et permet d'établir la condition de transfert en fonction de l'énergie de la bande HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) et de celle de la bande LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). On parle parfois de la bande de valence (HOMO) et de la bande de conduction (LUMO).

Puisqu'il n'y a pas d'apport d'énergie au moment du transfert, celui-ci ne peut s'effectuer que si l'énergie finale (celle de la paire de polarons ($E_{CT} = I_{PD} - X_A$)) est inférieure à l'énergie initiale (celle de l'exciton E_{EX}) [28]. en d'autres termes, l'énergie de l'ensemble des deux charges séparées doit être plus petite que celle de l'exciton. (La Figure 18) schématise le cas où les excitons sont générées dans le matériau donneur.

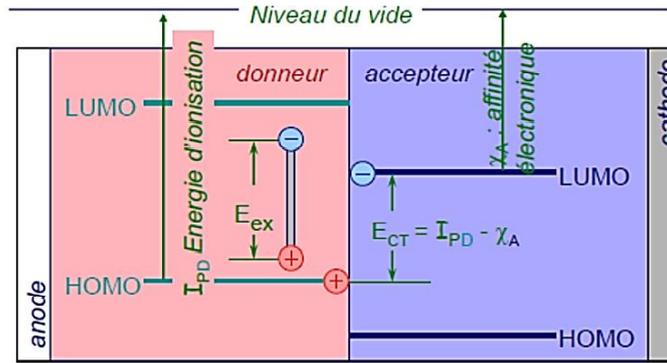


Figure 18: Le diagramme énergétique à la jonction Donneur/Accepteur et les conditions de Dissociation.

Il y a transfert de l'électron du donneur vers l'accepteur. A l'opposé, lorsque les excitons sont générés dans l'accepteur, c'est le trou qui doit passer de l'accepteur vers le donneur avec la même condition sur les énergies :

$$E_{CT} = I_{PD} - X_A \lesssim E_{EX} \quad (\text{II.6})$$

Où

I_{PD} : est l'énergie d'ionisation du donneur

X_A : est l'affinité électronique de l'accepteur

E_{CT} : est l'énergie de séparation de l'électron et du trou juste après le transfert de charge à l'interface donneur-accepteur.

II.5.4 Transport des charges et collecte aux électrodes :

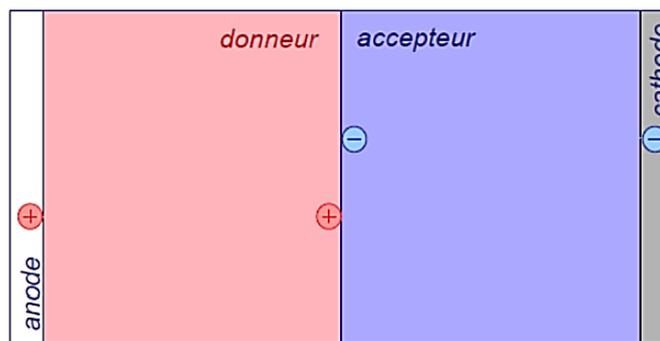


Figure 19: Transport des charges et collecte aux électrodes.

Dans cette quatrième étape les porteurs de charge, situés au voisinage de l'interface Donneur/Accepteur, doivent rejoindre les électrodes en traversant le film donneur ou accepteur. Le processus de transport est généralement contrôlé par un mécanisme de saut

entre sites (conduction de type Poole-frenkel). Pour cela les mobilités des électrons μ_e et des trous μ_h doivent être les plus grandes possibles, au moins égales à $10^{-3} \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$, pour des épaisseurs de film de 100 nm [29].

De plus, il est important que leurs valeurs soient proches de celles des deux matériaux donneur et accepteur utilisés, de sorte que les charges n'arrivent pas plus vite à une électrode par rapport à l'autre.

Les valeurs des mobilités sont inhérentes à de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci, nous citons les pièges d'origine chimique liés à la structure et aux impuretés et la différence entre LUMO et HOMO (gap). Il a été montré que dans le cas du pentacène, une mobilité de $35 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$ pouvait être déduite des caractéristiques courant-tension, à température ambiante, après purification de matériau [30]. Par ailleurs, si la valeur de la mobilité des électrons mesurée dans le silicium mono cristallin ($\mu_e = 1500 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$), semble hors de portée dans les matériaux organiques, l'exemple ci-dessus montre que les mobilités rencontrées dans le silicium amorphe peuvent être atteintes. Lorsque les porteurs ont traversé les couches organiques, ils arrivent aux interfaces avec les électrodes. Ils doivent être collectés pour rejoindre le circuit électrique extérieur. Des précautions doivent être prises pour éviter une diminution de la tension de circuit ouvert V_{co} et une résistance série R_S trop élevée.

II.6 Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques[31] :

a) **Avantage :**

D'abord, une haute fiabilité elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du mW au MW.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b) Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

III. Définition d'un polymère :

Un polymère est une macromolécule, organique ou non organique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif appelé monomère, tous reliés entre eux par de liaison dites «covalentes». Ces chaînes sont principalement constituées d'atomes **de carbone** sur lesquels sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou l'oxygène, d'autres éléments peuvent intervenir dans la composition de la chaîne (le chlore l'azote ou le fluor) [32].

III.1 Le matériau donneur : P3HT

Les premiers dérivés solubles du poly-thiophène ont été synthétisés au milieu des années 1980 par ajout d'un substituant alkyle sur le noyau thiophénique [33.34]. Une amélioration de ces composés a été apportée par l'obtention des premiers poly (3-alkylthiophènes) entièrement régioréguliers [35].

Le poly (3-hexylthiophène) s'est donc imposé en tant que matériau donneur d'électrons pour la réalisation de cellules photovoltaïques organiques pendant de nombreuses années (Figure 20).

Un tel engouement pour ce matériau s'explique par sa bonne solubilité dans les solvants usuels ainsi que par ses bonnes propriétés de conduction [36]. Toutefois ces propriétés dépendent fortement de sa masse moléculaire, de sa régiorégularité et de l'état de structuration dans lequel il se trouve au sein de la couche active de la cellule.

Parmi les polymères conjugués, le P3HT possède un gap énergétique assez faible, de l'ordre de 1,9 eV, malheureusement un tel gap ne permet pas une absorption optimale du rayonnement solaire, comme on peut le voir sur la (Figure 21.a).

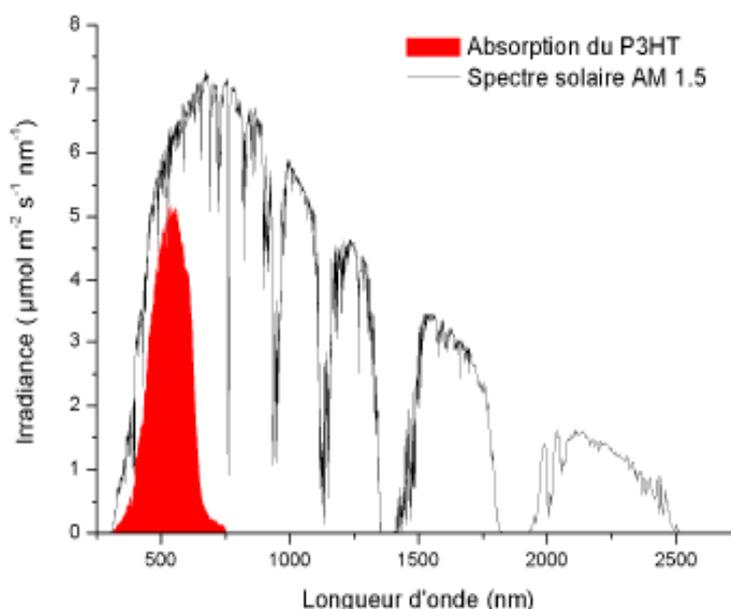


Figure 20: Spectre solaire de référence et absorption d'une couche mince de P3HT.

A l'heure actuelle, d'importants efforts sont fait pour synthétiser des polymères dits « *lowband gap* », possédant un gap énergétique plus faible, idéalement compris entre 1,3 et 1,5 eV, afin d'améliorer le recouvrement d'absorption avec le spectre solaire et ainsi augmenter les rendements de conversion énergétique [37.38].

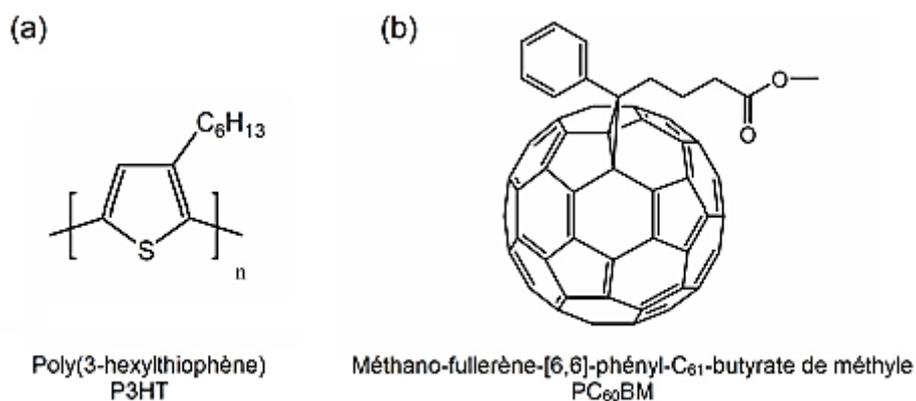


Figure 21: Structure du P3HT (a) et du PC60BM (b).

III.2 Le matériau accepteur PC₆₀BM

Le méthano-fullerène [6,6] phényphényl-C₆₁-butyrate de méthyle (PC₆₀BM) est un dérivé du Buckminster fullerène C₆₀ (Figure 21.b). Il a été développé afin d'améliorer la solubilité du C₆₀ tout en conservant ses propriétés électroniques. Sariciftci *et al.* ont mis en évidence un transfert électronique photo induit ultra-rapide entre un polymère semi-conducteur.

Le poly (phénylènevinylène) (PPV).et le C_{60} [39]. La rapidité du transfert électronique est telle (40femtosecondes pour le système PPV/ $PC_{60}BM$) que les autres processus de relaxation n'ont pas le temps de se produire. Ainsi le rendement quantique de dissociation des charges est-il proche de l'unité.

Le $PC_{60}BM$ a été largement utilisé, notamment en association avec le P3HT, du fait de ses propriétés de mobilité électronique élevée [40.41]et de sa faculté à s'organiser en structure favorable à la conductivité électronique[42].

III.3 La couche active : P3HT : $PC_{60}BM$

La couche active P3HT : $PC_{60}BM$ a fait l'objet de très nombreuses études, dont le but était de comprendre et d'améliorer les performances de ce système.

Les propriétés d'absorption de la couche active et de ses constituants sont présentées en (Figure 22). Le P3HT absorbe majoritairement entre 450 et 650 nm avec une bande d'absorption principale située à 520 nm et deux épaulements à 550 et 600 nm, leurs intensités étant directement liées à l'état d'organisation du polymère. Le $PC_{60}BM$ absorbe majoritairement dans le domaine UV, avec des bandes d'absorption situées à environ 266 et 337 nm.

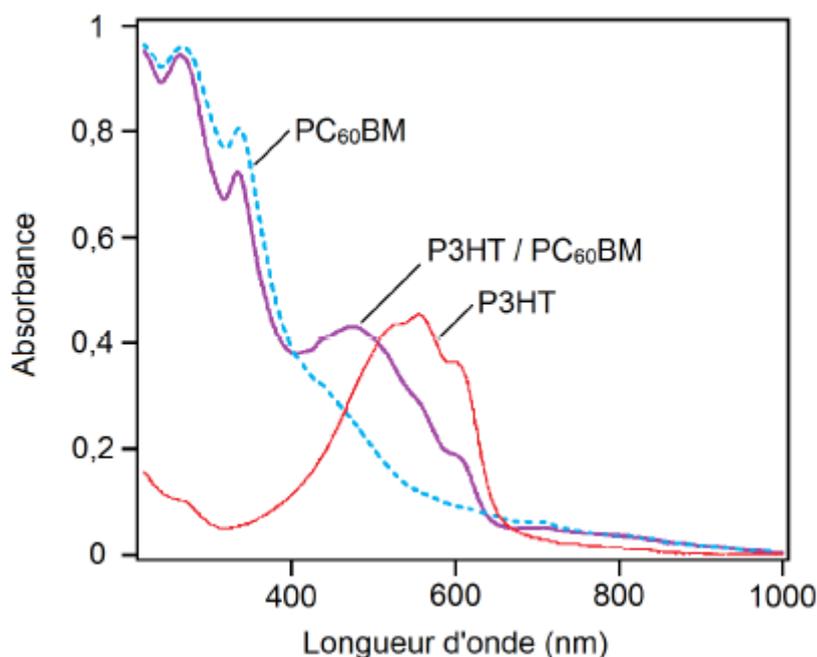


Figure 22: Spectres d'absorption d'un film de P3HT, de $PC_{60}BM$ et d'une hétérojonction en volume P3HT : $PC_{60}BM$ (ratio 2:1 m/m) [43].

Le PC₆₀BM dans la couche active ne présente pas une efficacité de conversion importante. En effet il a été montré que près de 60 % des excitons formés dans le PC₆₀BM ne sont jamais

Dissociés et collectés [44]. Toutefois, des rendements proches de 5 % ont été obtenus à l'aide de couches actives de type P3HT :PC₆₀BM[45].

III.4 Equations fondamentales dans les semi-conducteurs :

Années de recherche dans la physique des dispositifs à la base des semi-conducteurs sont conduites à la réalisation d'un modèle mathématique [46]. Ce modèle est capable d'opérer dans quasiment n'importe quel dispositif à base de semi-conducteurs. Il consiste en un ensemble fondamental d'équations qui rassemblent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charge dans un domaine de simulation bien précis. Ces équations, qui sont résolues via des logiciels spécifiques de simulation des dispositifs à la base de semi-conducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. Elles sont principalement : l'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. L'équation de Poisson lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité ou de transport décrivent le mode par lequel les densités d'électrons et des trous se comportent en fonction des processus de transport, de génération et de recombinaison.

Pour que les équations que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre soient résolues, une discrétisation doit être réalisée afin de les appliquer à une grille d'élément finis utilisés pour représenter le domaine de simulation [47].

III.4.1 Equation de Poisson :

L'équation de Poisson s'exprime par :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (\text{III.1})$$

Où ψ représente le potentiel électrostatique

ϵ : la permittivité électrique ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$)

ϵ_0 : est la permittivité du vide

ϵ_r : est la permittivité relative du matériau

ρ : est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique est donné par la relation :

$$E = -grad \psi \quad (III.2)$$

III.4.2 Equations de continuité :

Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs. Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont :

- Les générations dues aux agents externes (qui sont souvent la création de paires électron-trou) ;
- les générations-recombinaisons internes ;
- Les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion). L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} div J_n + G_n - R_n \quad (III.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} div J_p + G_p - R_p \quad (III.4)$$

G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes,

R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

III.4.3 Equations de transport :

Dans le cas des hypothèses de base des équations de la physique des semi-conducteurs (le champ magnétique extérieur est nul, la température est uniforme dans toute la structure) les causes de l'apparition des courants électriques sont le champ électrique et le gradient des concentrations des porteurs de charge. Les courants déterminés par le champ électrique s'appellent courant du champ ou courant de drift. Et les courants déterminés par le gradient de concentration des porteurs s'appellent courant de diffusion.

Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, ψ_n et ψ_p , qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états.

Ainsi les densités des courants des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de drift-diffusion [48] (modèle iso-thermique de transport). Dans ce modèle, les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions :

$$\overline{J}_n = -q \mu_n n \nabla \varphi_n \quad (\text{III.5})$$

$$\overline{J}_p = -q \mu_p p \nabla \varphi_p \quad (\text{III.6})$$

Avec q est la charge électrique μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous.

Les expressions pour les concentrations des électrons et des trous sont :

$$n = \mu_{ie} \exp \left[\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kTL} \right] \quad (\text{III.7})$$

$$p = \mu_{ie} \exp \left[\frac{q(\psi - \varphi_p)}{kTL} \right] \quad (\text{III.8})$$

Avec n_{ie} est la densité effective intrinsèque. En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient :

$$\overline{J}_n = q D_n \nabla n - q n \mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kTL \nabla (Ln n_{ie})) \quad (\text{III.9})$$

$$\overline{J}_p = q D_p \nabla p - q p \mu_p \nabla \psi - \mu_p p (kTL \nabla (Ln n_{ie})) \quad (\text{III.10})$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein qui ont pour expression :

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (\text{III.11})$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (\text{III.12})$$

III.4.4 Diffusion :

Les courants de diffusion sont générés par l'existence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semi-conducteur. Il est nettement plus probable qu'une charge d'une zone de concentration élevée se déplace vers une zone de basse concentration que l'inverse. Ce phénomène de diffusion est décrit quantitativement par la première loi de Fick qui montre la proportionnalité entre le flux de particules \vec{F} et le gradient de leur concentration ∇C selon la relation :

$$\vec{F} = D \cdot \nabla C \quad (\text{III.13})$$

Le facteur de proportionnalité D s'appelle coefficient de diffusion. En appliquant la relation (III-13) pour les électrons ($C = n$, $D = D_n$) et les trous ($C = p$, $D = D_p$) nous trouvons les densités des courants de diffusion :

$$\vec{J}_{ndiff} = -q \vec{F}_n = q \cdot D_n \cdot \nabla n \quad (\text{III.14})$$

$$\vec{J}_{pdiff} = -q \vec{F}_p = q \cdot D_p \cdot \nabla p \quad (\text{III.15})$$

Qui représentent en pratique le premier terme des équations (III.9) et (III.10).

Notons que le troisième terme des équations (III.9) et (III.10) est aussi un courant de diffusion. Mais il est dû au gradient des densités effectives d'états n_{ie} .

III.5 Les différentes structures de cellules organiques [49] :

Dans ce paragraphe sont présentées les différentes structures de cellules à base de polymères, qui se différencient essentiellement par la composition de la couche active.

III.5.1 Structure monocouche (jonction Schottky) :

Ce type de cellule utilise un semi-conducteur de type P (ou N) pris en sandwich entre deux électrodes de métal. La zone active pour la conversion photovoltaïque se situe entre une des électrodes métallique et le semi-conducteur.

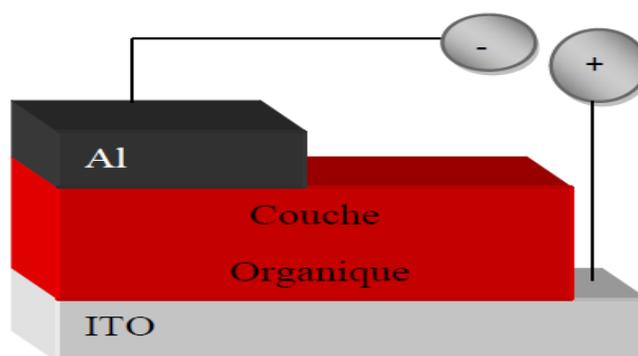


Figure 23: Structure d'une cellule monocouche de structure ITO/matériau organique/AL.

III.5.2 Structure bicouche :

Une structure bicouche, aussi appelée hétérojonction PN, se compose de deux matériaux semi-conducteurs organiques de natures différentes : accepteur et donneur d'électrons mis en contact entre deux électrodes. Les interfaces anode/donneur et cathode/accepteur présentent des contacts ohmiques ; la dissociation de l'exciton se fait donc à l'hétérojonction entre les deux semi-conducteurs grâce au champ électrique présent.

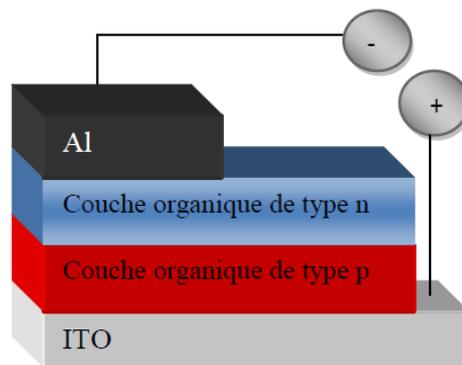


Figure 24: Structure et représentation des niveaux d'énergie d'une cellule bicouche.

III.5.3 Structure de type hétérojonction en volume :

La structure à hétérojonction D/A en volume, ou bulk hétérojonction, est un mélange physique de deux semi-conducteurs organiques. Ce type d'architecture présente l'avantage de démultiplier l'interface donneur/accepteur, zone de dissociation des excitons, et ainsi réduire le problème de pertes par recombinaisons des excitons générés loin de l'interface (dans le cas des structure bicouche).

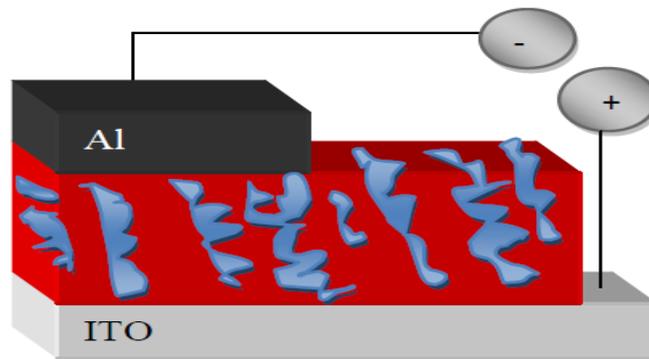


Figure 25: Structure d'une cellule à réseau interpénétré.

III.5.4 Structure inverse :

Les cellules photovoltaïques à architecture classique intégrant une couche active sous forme d'hétérojonction en volume (comme par exemple le P3HT : PCBM) sont composées par une succession de couches : substrat de verre (ou PET)/ ITO/ PEDOT : PSS/ P3HT : PCBM/ Al (Figure 26).

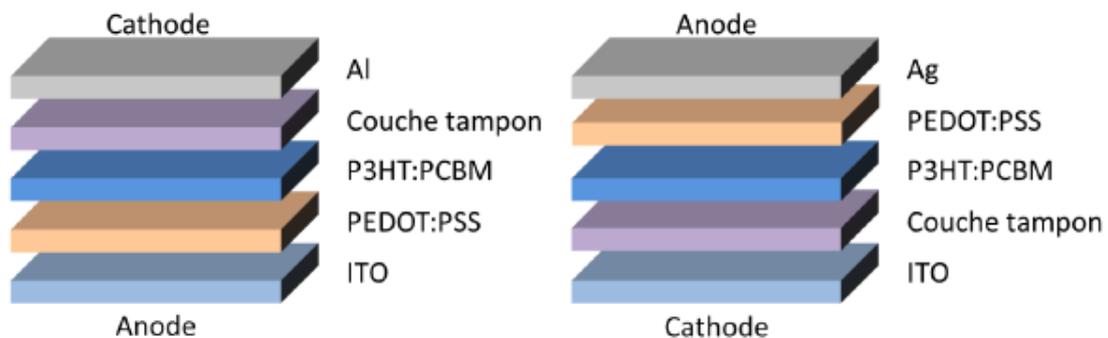


Figure 26: Schéma d'une structure conventionnelle de cellule photovoltaïque (à gauche) et d'une structure inverse (à droite).

III.5.5 Structure « Tandem » :

Une des autres limitations des cellules photovoltaïques organiques est leur gamme d'absorption du spectre solaire. Pour répondre à cette difficulté, une nouvelle architecture de cellules a été créée en 2006, il s'agit des structures tandem. Elles sont constituées de deux cellules photovoltaïques empilées l'une sur l'autre. Ces deux cellules sont mises en série par la présence d'une couche de recombinaison de porteurs de charges les séparant.



Figure 27: Schéma d'une cellule tandem.

IV. Bilan des études intérieures :

H.Lu, et all2016 (01), ont effectué une étude sur les règles de conception pour la fabrication de PSC ternaires haute performance et pour traduire les progrès récents dans ce domaine. En outre, les méthodes de caractérisation permettant de déterminer le rôle du troisième composant joué dans les PSC ternaires sont décrites[50].

J. Zhang et all 2017 (02), [51] ont synthétisé deux molécules photovoltaïques (HEX-3TVT-ID et EH-3TVT-ID) basé sur le vinylène-un rapproché oligothiophène appliqué comme donneur (donneur) pour la plupart-hétérojonction de solution-processable des cellules solaires biologiques (organiques) (OSC). L'unité vinylène a été introduite comme pont π dans les oligothiophènes avec 1,3-indènedione comme groupe terminal et 4,4'-dihexyl-2,2':5',2'-ter-thiophène ou 3,4'-di(octan-3-yl)-2,2':5',2'-ter-thiophène comme noyau, respectivement. En raison de la position différente des substituants du groupe alkyle par rapport à l'unité vinylène dans le terthiophène, HEX-3TVT-ID et EH-3TVT-ID montrent différentes propriétés optiques et électrochimiques, correspondant aux performances photovoltaïques des dispositifs OSC. L'efficacité de conversion de puissance (PCE) des OSC basée sur un mélange de HEX-3TVT-ID et de PC 71 BM (1: 0,8, w/w^{-1} , 0,5% CN) a atteint 2,3%. En comparaison, les OSC basées sur le mélange d'EH-3TVT-ID et PC 71 BM dans le rapport pondéral de 1: 1 sans l'additif montrent une PCE plus élevée de 2,7%, avec un V_{OC} typiquement élevé de 0,93 V, sous l'illumination d'AM 1,5, 100 mW/cm^2 .

Solenn Berson et all2007 (03), Ils ont étudié la préparation de solutions de nanotubes de carbone à paroi unique ou multi-parois avec régiorégulatrice poly (3-hexylthiophène) (P3HT) et un dérivé de fullerène 1- (3-méthoxycarbonyl) propyl-1-phényl [6,6] C61 (PCBM) en utilisant une méthode de dissolution et de concentration élevée pour contrôler exactement le rapport des nanotubes de carbone (NTC) au mélange P3HT / PCBM et disperser les NTC de manière homogène dans la matrice. Les composites CNT / P3HT / PCBM sont déposés en utilisant une technique de spin-coating et caractérisée par spectroscopie d'absorption et de fluorescence et par microscopie à force atomique pour souligner la structure et le transfert de charge entre les CNT et P3HT. La performance des dispositifs photovoltaïques obtenus l'utilisation de ces composites comme couche photo active montre principalement une augmentation du courant de court-circuit et une légère diminution de la tension en circuit

ouvert qui conduit généralement à une amélioration des performances de la cellule solaire jusqu'à un pourcentage de CNT optimal. Les meilleurs résultats sont obtenus avec un mélange P3HT / PCBM (1: 1) avec 0,1% en poids de nanotubes de carbone multi-parois avec un circuit ouvert tension (V_{OC}) de 0,57 V, une densité de courant au court-circuit (I_{cc}) de 9,3 $MA.cm^{-2}$ et un facteur de remplissage de 38,4%, ce qui conduit à une efficacité de conversion de puissance de 2,0% [52].

S. Antohe et al 2017 (04), Ils ont passé en revue l'état actuel de la technique sur les cellules photovoltaïques organiques basées sur les deux petites molécules et absorbeurs polymères. Dans le cas de petites molécules, différentes des configurations avec une, deux et trois couches actives ont été synthétisées et caractérisées. Dans le cas de structures à base d'absorbeurs polymères monocouches, bicouche et mélange les configurations ont également été étudiées. Les propriétés de chaque catégorie de cellules solaire, basés sur de petites molécules et polymères, sont discutées. Mécanismes de transport et stabilité des études ont été menées sur les matériaux organiques et les structures photovoltaïques fabriqué à partir d'eux. Généralement, l'efficacité augmente pour les structures cellulaires composées de plusieurs couches petites molécules ou un mélange de polymères donneurs / accepteurs, et l'efficacité de les cellules photovoltaïques polymériques sont toujours plus grandes que celles des structures à petites molécules. Malheureusement, la stabilité de la première est plus pauvre que celle de la dernière catégorie. Facteurs influencé la stabilité du dispositif sont discutés et les méthodes technologiques utilisées pour améliorer la stabilité sont également présentés [53].

F. Ongul et al 2018 (5), ont synthétisé les nano cristaux de CdSe (NCs) de haute qualité coiffés avec de l'acide stéarique dans un solvant et puis purifié quatre fois en utilisant le processus de précipitation et de redissolution. La taille moyenne des synthétisés CdSe NCs a été déterminée ~ 3.0 nm par microscopie électronique à transmission (TEM) mesure et leur correspondant l'énergie du bord de la bande optique a également été calculée à environ 2,1 eV en utilisant la spectroscopie d'absorption ultraviolet-visible (UV-Vis). Les cellules solaires hybrides à hétérojonction en masse (BHJ) basées sur un système ternaire incluant P3HT, PCBM et CdSe Des NC à différentes concentrations en poids (0% en poids, 0,1% en poids, 0,5% en poids, 1% en poids et 2% en poids) ont été fabriquées par moulage par centrifugation Processus. L'effet de la concentration des CN CdSe sur les paramètres photovoltaïques de ces cellules solaires organiques BHJ a été étudié. La morphologie de surface de la couche photo

active modifiée par l'incorporation de CN CdSe dans P3HT: la matrice PCBM a été observée avec la microscopie électronique à balayage (MEB).[20] Il a été montré que lorsque la concentration de CN CdSe augmente au-dessus de 0,1% en poids dans ce système ternaire, la performance photovoltaïque des dispositifs de manière significative diminue. L'efficacité de conversion de puissance du dispositif photovoltaïque organique (OPV) a été améliorée ~ 20% en incorporant des CN CdSe avec 0,1% en poids par rapport à ceux sans CdSe NCs.

Yongtao.Liu et al. 2016 (06), [21] Une petite molécule de type A-D-A, DCF-2HT, a été synthétisée en utilisant le fluorène comme le bloc central et 2- (2,3-dihydro-3-oxo-1H-indén-1-ylidène) propane dinitrile comme les groupes de fin, avec un thiophène hexyl-substitué Comme un pont π , pour l'utiliser comme matériau accepteur dans les cellules solaire organique. Dispositifs basés sur DCF-2HT et les donneurs de polymères PBDB-T ou PTB7-Th ont été fabriqués et optimisés. Puissance des rendements de conversion de 5,71% et 4,83% ont été obtenus pour PBDB-T : DCF-2HT- et PTB7-Th : basé sur DCF-2HT appareils, respectivement.

Wang Z X et al. 2012 (07), ils ont résumé les progrès récents des nouveaux matériaux photovoltaïques à bande interdite étroite et les méthodes efficaces pour contrôler la morphologie du donneur et accepteur dans les films de mélange pour la haute performance des OPV. Les cellules photovoltaïques organiques (VPO) ont attiré de plus en plus l'attention en raison de leur application très potentielle pour résoudre l'énergie crise compte tenu de ses avantages, tels que le faible coût et la facilité de production de grande surface. L'efficacité de conversion de puissance (PCE) des OPV a été multipliée par plus de neuf, passant de ~ 1,0% par Tang en 1986 à 9,2% en 2010 annoncé par Mitsubishi Chimique. Les principaux défis liés à l'obtention d'OPV à haut rendement sont la synthèse de nouveaux matériaux à bande étroite, contrôlant arrangement moléculaire, conception de nouvelles cellules de configuration pour une meilleure récolte de photons dans la couche active[22].

Fu G S, et al. 2012 (08), ont présenté Une méthode pour améliorer l'efficacité des cellules photovoltaïques organiques grâce à l'inclusion d'une couche de modification ultraminces de Al_2O_3 ou pris en sandwich entre le poly (3,4-éthylène dioxy thiophène) - l'acide polystyrène sulfonique (PEDOT : PSS) et des couches d'oxyde d'indium et d'étain est développé. En raison des forts moments dipolaires de LiF et Al_2O_3 , l'un ou l'autre peut améliorer le champ électrique intégré, ce qui augmente la probabilité que les porteurs atteignent l'électrode

correspondante. En outre, la fonction de travail faible de PEDOT : PSS peut diminuer la barrière d'énergie pour la transmission de porteur. Une amélioration de 21,7% de l'efficacité de conversion de puissance de l'expérimentation des dispositifs ont été réalisés, principalement parce que le courant de court-circuit a été augmenté de près de 30% [23].

T. Adhikari et al. 2017(09), ont utilisé Les accepteurs de perylènediimide vitreux (verre PDI) et de dicétopyrrolopyrrole (DPP-verre) précédemment rapportés comme composants ternaires pour moduler la morphologie et les propriétés de transport d'électrons des hétérojonctions massives composé de poly (3-hexy thiophène) (P3HT) et de [6,6] -phényl- C_{61} -butyrique ester méthylique ($PC_{61}BM$). Les deux accepteurs ternaires montrent une forte absorption dans la gamme visible et les niveaux d'énergie intermédiaire entre celui de P3HT et PCBM. Dans les mélanges, les deux matériaux amorphes occupent l'interface entre les domaines P3HT et PCBM sans altérer significativement la morphologie du film. L'incorporation de 20% Le verre PDI et le verre DPP à 15% dans les dispositifs à mélange ternaire ont entraîné des améliorations de l'efficacité de la conversion de 38% et 36%, respectivement [24]. De plus, l'efficacité de conversion des photons incidents en électrons des dispositifs ternaires de ces matériaux a été augmenté avec photo courant supplémentaire entre 660 et 750 nm, indiquant que ces les matériaux contribuent efficacement à la récolte de la lumière. Cela justifie les améliorations de l'efficacité via la charge mécanisme de transfert. De plus, ces dispositifs ternaires présentent une grande stabilité vis-à-vis de l'humidité et de l'oxygène.

Antonio Martí et Antonio Luque 2002 (10), ont fait une réunion pour étudier de nouvelles idées qui pourraient nous conduire à mieux utiliser du spectre solaire dans le but ultime d'atteindre un photovoltaïque supérieur dispositifs et, par conséquent, une réduction de leur prix. La réunion, en dépit d'être bref, était si fructueux et intense qu'il a été considéré que les concepts discutés il devrait être conservé et rendu accessible à des tiers sous forme de livre. Le résultat est un livre qui couvre une variété de concepts : l'économie de photovoltaïque, thermodynamique, cellules solaires multi-jonctions, thermo photovoltaïque, l'application de structures de faible dimension au photovoltaïque, à l'optique et La technologie. Le temps dira si beaucoup de ces idées et concepts se rencontrent attentes. Pour le moment, ils sont présentés ici pour stimuler d'autres des chercheurs [25].

Luz Elena Peñaranda Chenche et all 2017 (11), [26] ils ont analysé les quatre méthodes utilisées pour estimer les propriétés physiques des dispositifs photovoltaïques pour un modèle

à une seule diode. Deux des technologies photovoltaïques les plus efficaces - les appareils mono- et multi-jonctions – sont utilisés sous différentes conditions de température et de rayonnement solaire pour comparer l'applicabilité de chaque méthode. Trois des quatre méthodes d'estimation des paramètres sont analytiques et la dernière utilise un algorithme pour l'optimisation de problèmes non linéaires, c'est-à-dire le gradient réduit généralisé. Les différentes méthodes sont résumées et une analyse comparative est effectuée en utilisant des données expérimentales obtenues à partir de la littérature, mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chaque méthode. Critères tels que le pourcentage absolu moyen erreur, le coefficient de détermination, l'erreur absolue dans le courant calculé au point de puissance maximale, et le coût de calcul sont utilisés.

S. Boucekouf et all 2009 (12), ont présenté le domaine des nouvelles technologies pour l'énergie, le solaire photovoltaïque organique est en train de devenir un axe de développement industriellement important. Dans ce contexte, une recherche de base est indispensable pour valider et démontrer l'intérêt d'une filière plastique par un abaissement décisif des coûts. Cette étude utilise une méthode de calcul du photo-courant délivré par la cellule solaire organique bicouche MPP/ZnPc à partir des équations de continuité et des courants par analogie aux phénomènes de transport des charges, selon le modèle d'une hétérojonction n/p. La génération principale du photo courant est localisée dans la zone active, une région très fine par rapport aux épaisseurs des couches, donneur et accepteur. Donc les excitons ne peuvent se dissocier qu'à l'interface MPP/ZnPc, alors que la zone d'absorption est considérablement plus grande que la longueur de diffusion. Les caractéristiques de cette structure sont calculées par la simulation de l'équation I-V, sous

L'illumination AM1.5. [27]L'insertion de la couche composite C60 et ZnPc à l'interface de MPP et ZnPc permet d'améliorer les performances de la cellule par une augmentation du photo courant de la valeur 2.6 mA/cm² à 5.3 mA/cm² et le rendement passe de 0.72 % à 1.49 %.

Jian He et all 2017 (13), ont parlé sur le Silicium sans dopage (Si) / cellules solaires à hétérojonction organique (HSC) qui a tiré beaucoup d'attention en raison de leur immense potentiel dans la réalisation de conversion de puissance élevée, les efficacités (PCE) avec des architectures de dispositifs simples et des procédures de fabrication. Cependant, les contacts arrière insatisfaits entravent sérieusement l'amélioration des ECP ces HSC prometteurs.

Explorer des matériaux interfaciaux cathodiques efficaces à faible fabrication de la température pour remplacer la couche de diffusion classique montre extrêmement importance de l'innovation technique. Ici, le poly [4,8-bis (2-éthylhexyloxy) benzo [1,2-b: 4,5-b] dithiophène-2,6-diyl-alt-éthylhexyle-3-fluorothiéno [3,4-b] thiophène-2-carboxylate-4,6-diyl] (PTB7) à base étroite polyélectrolytes conjugués à bande interdite, PTB7-NBr et PTB7-NSO₃, sont d'abord utilisés comme matériaux interfaciaux cathodiques efficaces dans les CSH organiques / Si pour améliorer la propriété de passivation et de transport d'électrons à l'interface n-Si / Al. La compréhension de poly électrolytes conjugués sur la modification interfaciale peut conduire à un chemin à fabriquer dispositifs à hétérojonction Si / organique haute performance avec transfert de charge efficace processus à un processus de fabrication simplifié[28].

I. Cosme et al. 2016 (14), ont effectué une étude sur les structures photovoltaïques à couches minces hybrides, à base de silicium hydrogéné (Si : H), poly (3-hexythiophène) : méthano-fullerène-phényl-C61-butyracide-méthyl-ester (P3HT: PCBM) et poly (3,4-éthylènedioxythiophène): des films de poly (4-styrènesulfonate) (PEDOT: PSS) ont été fabriqués. Biologiquement les couches minces de semi-conducteur ont été déposées par la technique de revêtement par centrifugation et ont été exposées à la radiofréquence Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (RF PECVD) de Si: H1) ITO / (p) SiC: H / P3HT: PCBM / (n) Si: H, H2) ITO / PEDOT: PSS / (i) Si: H / (n) Si: H et H3) ITO / PEDOT: PSS / P3HT: PCBM / (i) Si: H / (n) Si: H. Court-circuit la réponse spectrale de densité de courant et les caractéristiques courant-tension ont été mesurées pour le diagnostic de la performance photovoltaïque. La dépendance spectrale de densité de courant des structures hybrides contient des couches organiques a montré une réponse améliorée (50e80%) dans la gamme d'énergie photonique élevée ($h\nu \approx 3.1 \text{ e3.5 eV}$) en comparaison avec la structure de référence Si: H. Un ajustement de l'épaisseur de la couche absorbante et dans le matériau de contact pour ITO / PEDOT: PSS / (i) Si: H / (n) Si: H structure, a abouti à un remarquablement élevé densité de courant de court-circuit (aussi grande que 17,74 mA / cm²), une tension de circuit ouvert de 640 mV et une efficacité de 3,75%[29].

A. Benchaabane et al. 2017 (15), ont effectué une étude sur Les impacts de l'acide oléique plafonné ZnSe (OA-ZnSe) variation de la teneur en nanoparticules sur la microstructure et propriétés électriques de la cellule hybride ITO / PVK : OA-ZnSe / Al ont été étudiées en

utilisant une combinaison entre le FTIR et les mesures électriques. Basé sur les caractéristiques J-V des cellules hybrides étudiées dans sombre, le mécanisme de conduction pour des tensions inférieures à 1,5 V suit la loi de Richardson-Schottky. Sur les tensions au-dessus de 1,5 V, les caractéristiques J-V peuvent être modélisées avec succès par d'autres théories telles que l'espace-charge courant limité (SCLC) ou le courant limité de charge de piège (TCLC). Sous l'éclairage de la lumière blanche, les J-V caractéristiques sont clairement affectées par l'incorporation de nanoparticules d'OA-ZnSe, ce qui indique une amélioration des paramètres des cellules photovoltaïques, en particulier l'efficacité de conversion qui augmente 12 fois par rapport à la cellule à base de PVK non dopée. La densité de photo courant efficace J_{ph} des cellules hybrides avec différents contenus OA-ZnSe sont également considérés[30].

IV.1 Simulation des cellules solaires :

IV.1.1 Simulation :

La simulation numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques.

Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Ces simulations permettent de limiter le risque et d'éviter le coût d'une série d'épreuves réelles. Elles peuvent offrir un aperçu sur le développement d'un système trop complexe pour le simplifié [65].

IV.1.2 Logiciel de simulation :

Plusieurs logiciels ont été écrits avec un but précis de modélisation des cellules solaires. Ils ont de différentes possibilités et limitations, mais les principes de base sont les mêmes.

En principe, n'importe quel programme numérique est capable de résoudre les équations de base des semi-conducteurs, et il peut être employé pour modéliser les piles solaires à couches minces.

Un certain nombre de ces logiciels de simulation ont été développés dans des universités ou des instituts de recherche, et ceux-ci sont généralement disponibles sans frais et sans soutien. Ce groupe de programmes comprend AMPS-1D, SCAPS-1D, Sim Windows, PC-1D, ADEPT-F, ASA, ASPIN ou AFORS-HET. Tous ces éléments sont unidimensionnel et peut être utilisé pour évaluer directement ou indirectement les performances des cellules solaires.

Certains contiennent également d'autres expériences telles que la capacité liée à la caractérisation (SCAPS-1D, ASA, AFORS-HET). AMPS-1D, SCAPS-1D, ASA, et PC-1D ont été comparés dans un article de revue de Burgelman et al [66].

L'extension en deux ou trois dimensions, ce qui permet de simuler fluctuations latérales dans les cellules solaires en couches minces poly cristallin (par exemple, les limites de grains), est plus difficile à atteindre et reste dans le domaine des logiciels commerciaux, tels que APSYS, ATLAS 2D, DESSIS ou Medici.

Les équations de base sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme quand on veut simuler des piles solaires à couches minces. Il devrait être capable de prendre en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule ; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_C et E_V). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur les piles solaires à couches minces, non seulement la caractéristique $I(V)$, mais également la réponse spectrale et les mesures de capacité $C(V)$ et $C(f)$. En fin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à couches minces. Toutes ces options sont mises en application dans le programme de simulation SCAPS[67].

Pour cela on a utilisé ce logiciel de simulation numérique unidimensionnel. Il est appelé SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension), développé au laboratoire ELIS (Electronics and Information Systems) de l'université de Gent, Belgique [67].

SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces, avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire [68].

En effet, SCAPS possède une base de données contenant plusieurs types de cellules solaires, fichier data, d'extension « def » dont on peut modifier leurs différents paramètres (largeur, dopage...).

IV.2 Utilisation du logiciel SCAPS :

Afin de simuler et contrôler toutes les paramètres d'un dispositif photovoltaïque au moyen du Logiciel SCAPS nous devons passer par trois grandes fenêtres :

- Fenêtre d'exécution (« action panel ») ;
- Fenêtre de conception de dispositif et la définition du problème (« Définition panel ») ;
- Fenêtre des résultats.

a). Menu principal (Action panel) :

Après le lancement de logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution on est capable de modifier les paramètres de : la température, la résistance série et parallèle et les paramètres d'illumination.

On peut à n'importe quel moment accéder aux deux autres fenêtres, fenêtre de conception de dispositif et fenêtre des résultats comme le montre les figures ci-dessous

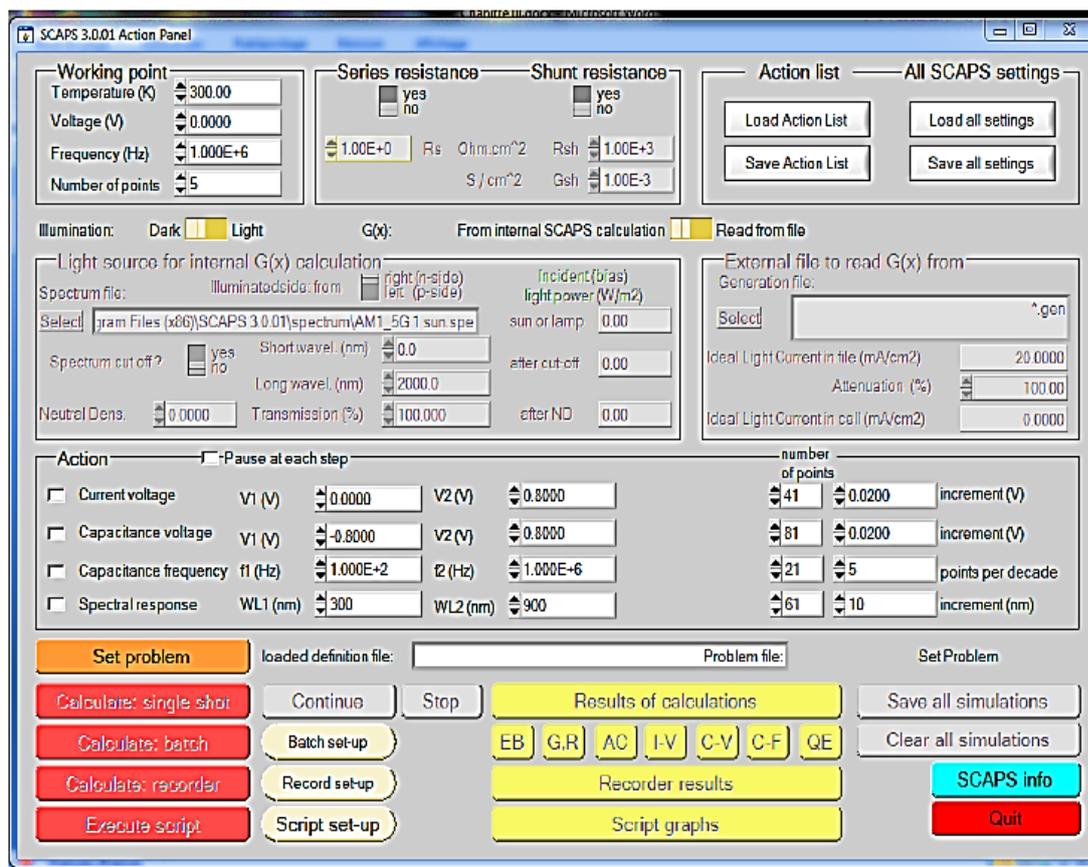


Figure 28: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

b). Choix de la cellule :

Quand on clique sur le bouton " SET PROBLEME " sur le panneau d'action le panneau " SOLAIRE DEFFINITION " s'affichera. Ce dernier paramètre permet de reproduire ou modifier les structures des cellules solaire et de les enregistrer à partir d'autres fichiers (Figure 29).

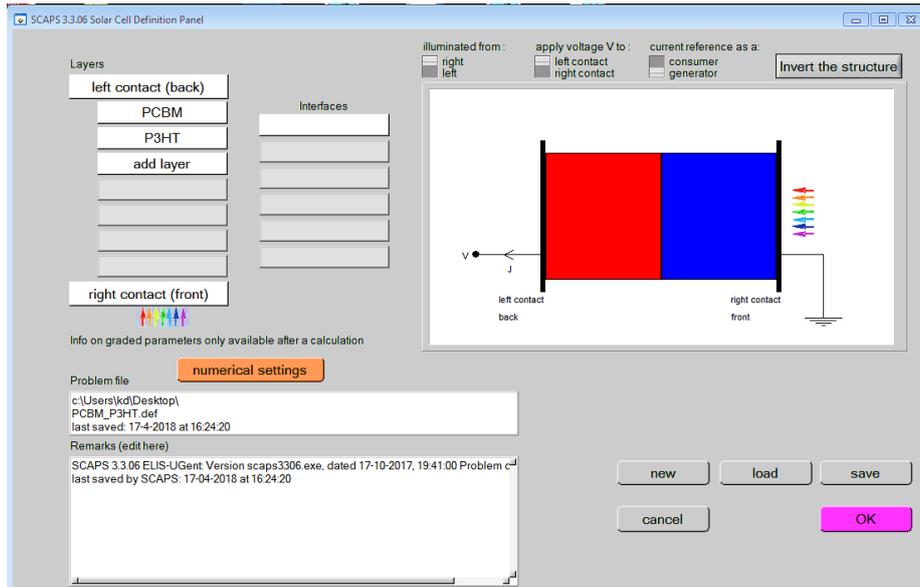


Figure 29: Définition de la structure d'une cellule solaire.

c). Les propriétés des couches :

La fenêtre représentée par la (figure 30) contient plusieurs paramètres comme l'énergie de gap, permittivité électrique, l'affinité, dopage, type de dopage. Il faut noter que l'utilisateur peut utiliser directement des valeurs standards dans les fichiers data du logiciel.

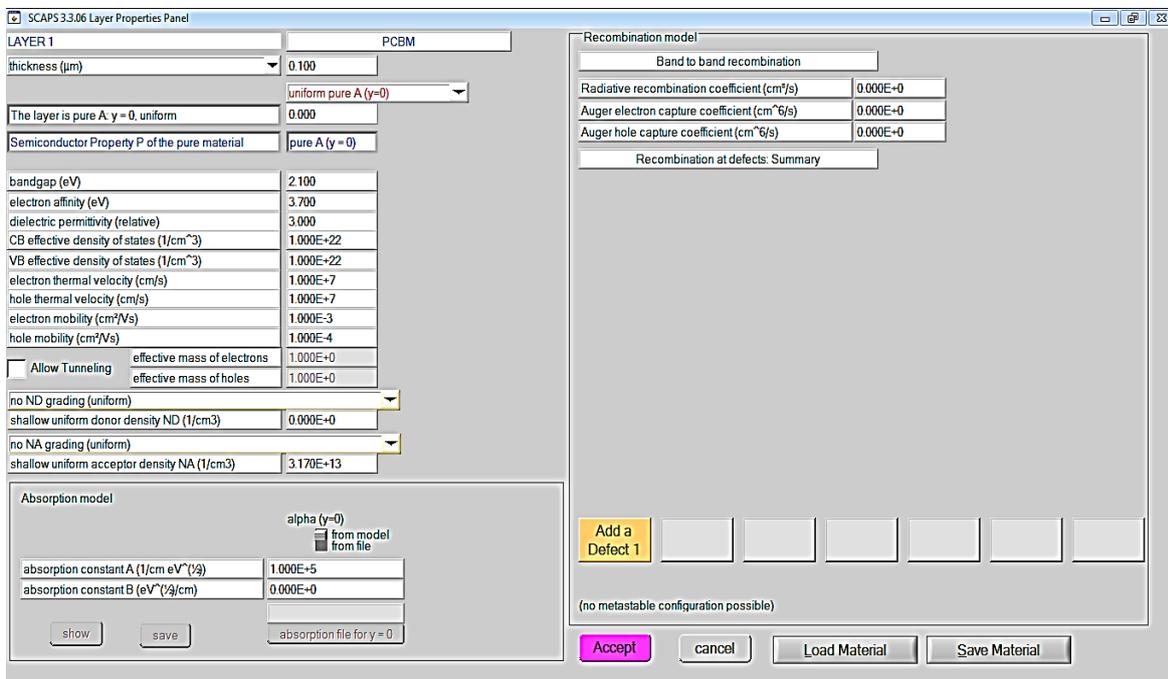


Figure 30: Paramètres d'une couche PCBM d'une cellule.

d). Résultat de la simulation (Caractéristique I(V)) :

Exécution de la simulation en cliquant sur « Calculate » qui nous donne les résultats des performances (J_{cc} , V_{co} , FF, η) dans la fenêtre « I-V panel » et les résultats de la caractéristique I-V (...etc.)

On peut afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant sur « show ».

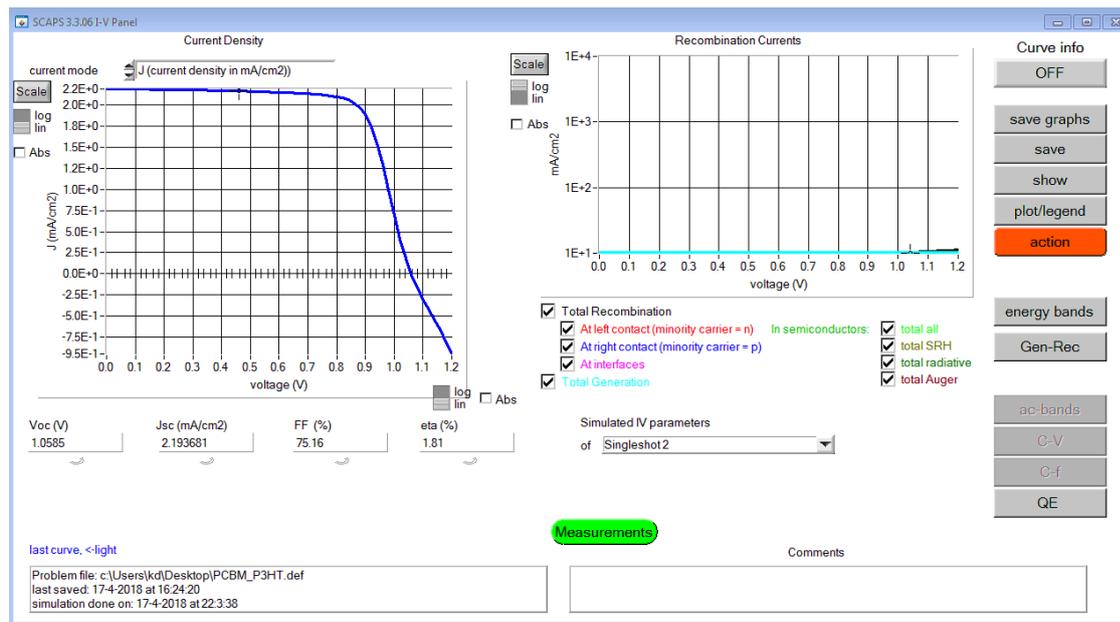


Figure 31: Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement.

IV.3 Résultats et discussion de la cellule étudiée sous-SCAPS

IV.4 Introduction

Dans cette partie nous allons étudier l'effet de la température et de l'épaisseur sur la densité de courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque (η) pour la jonction PCBM/P3HT sous éclaircissement AM1.5 G (10000 W/m^2) et à la température ambiante 300 K.

IV.5 Propriétés de la cellule solaire :

Les valeurs des paramètres des couches utilisées dans les calculs avec le logiciel SCAPS sont prises de la littérature [69] et sont listées dans le Tableau 2 :

Tableau 2: Les paramètres de la simulation de la cellule.

<i>Matériaux</i>	<i>Accepteur PCBM</i>	<i>Donneur P3HT</i>
Épaisseur (nm)	100	100
Largeur de la bande interdite (gap) E_g (eV)	2.1	1.85
Constante diélectrique	3	3
Densité d'état effective des électrons dans la bande de conduction	$1e+22$	$1e+22$
Densité d'état effective des électrons dans la bande de valence	$1e+22$	$1e+22$
Affinité d'électrons χ (eV)	3.7	3.1
Mobilité des électrons μ_n (cm/V.s)	$1e-3$	$1e-3$
Mobilité des trous μ_p (cm/V.s)	$1e-4$	$1e-4$
Concentration des accepteurs N_A (cm ⁻³)	$3.17e+13$	0
Concentration des donneurs N_D (cm ⁻³)	0	$3.17e+13$

IV.6 Etude de l'effet de la température sur les performances de la cellule étudiée

En premier lieu, nous avons fait varier la température entre 280 K jusqu'à 350 K avec un pas de 10 K et une épaisseur constante de 100 nm pour chaque couche.

L'effet de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ est représenté sur la Figure 32

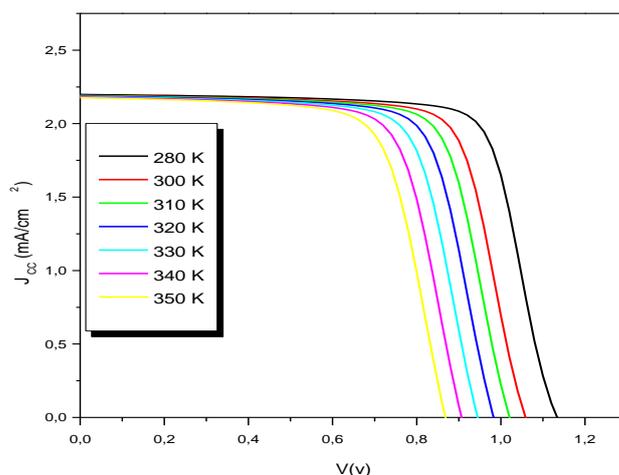


Figure 32: Caractéristique $I=f(V)$ pour les différentes températures.

D'après cette figure on voit que la tension V_{oc} diminue de 1.13 V à 0.87 V lorsque la température augmente de 280 K à 350 K, alors que le courant de court-circuit J_{cc} reste sensiblement constant.

Les résultats obtenus pour les différentes performances de la cellule solaire P3HT/PCBM sont regroupées dans le Tableau 3.

Tableau 3: les caractéristiques de la cellule solaire pour différentes températures.

$T(K)$	$V_{co}(V)$	$J_{CC}(mA/cm^2)$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
280	1.1334	2.1984	76.14	1.97
300	1.0585	2.1936	75.16	1.81
310	1.0207	2.1909	74.59	1.73
320	0.9828	2.1879	73.96	1.65
330	0.9447	2.1846	73.26	1.57
340	0.9064	2.1809	72.47	1.49
350	0.8681	2.1768	71.61	1.41

Il est clair qu'à partir du Tableau 3 : que l'augmentation de la température fait diminuer significativement les performances de la cellule étudiée.

A partir de ces valeurs, nous avons tracé les courbes des variations de ces performances en fonction de la température.

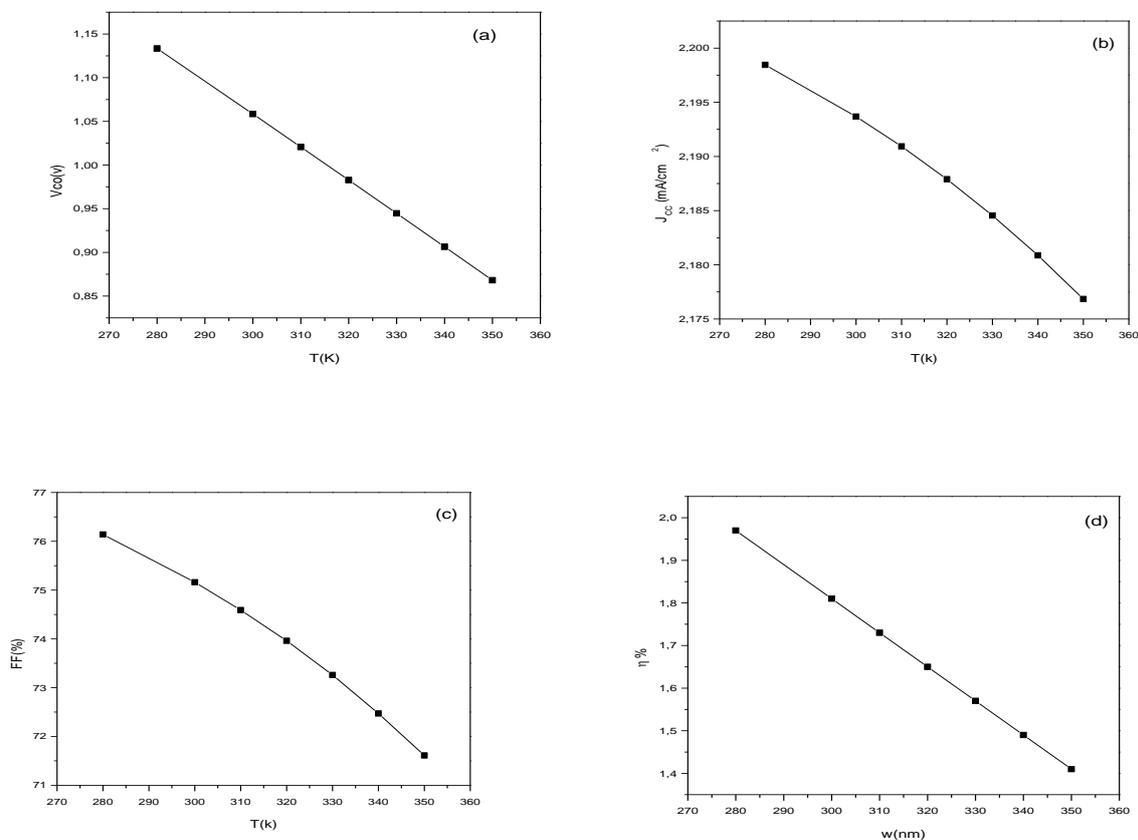


Figure 33: Variation en fonction de la température de : a) la tension de circuit ouvert V_{CO} . b) le courant de court-circuit J_{CC} . c) le facteur de forme FF et d) le rendement η pour la cellule PCBM/P3HT.

Le constat global est la diminution de toutes les performances (V_{CO} , J_{CC} , FF et η) de la cellule solaire avec l'augmentation de la température. Ainsi que le rendement subit une diminution de l'ordre de 0.08%. Donc, il est clair que la température a un effet néfaste sur la réponse de la cellule solaire.

IV.7 L'influence de la température sur le rendement quantique $QE=f(\lambda)$:

Le rendement quantique QE est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents, il dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés.

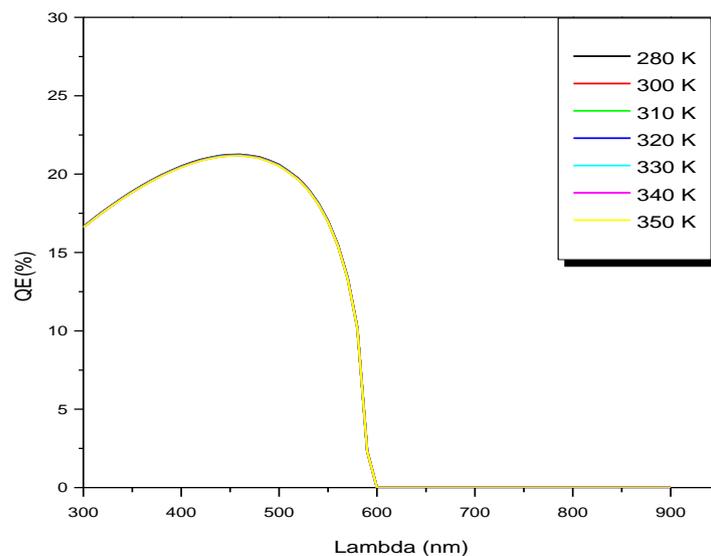


Figure 34: Caractéristique $QE=f(\lambda)$ pour différentes température.

Il est remarquable, d'après la Figure 34, que la température n'a aucun effet sur ce paramètre. De plus on peut dire que ce rendement quantique est optimal entre 300nm et 580 nm, ce qui signifie que la grande partie de l'absorption se fait dans cette gamme. La valeur maximale de ce rendement est atteinte pour une radiation de 500 nm.

IV.8 L'effet de l'épaisseur sur les performances de la cellule étudiée

En deuxième lieu, nous avons fait varier l'épaisseur de chaque couche de 60 nm jusqu'à 100 nm d'un pas de 10 nm avec une température constante de 300 K, alors nous avons obtenu les résultats des caractéristiques $I = f(V)$ pour chaque cas qui sont représentés sur la Figure 35, et celles des différentes performances de la cellule solaire sont regroupées dans le Tableau 4.

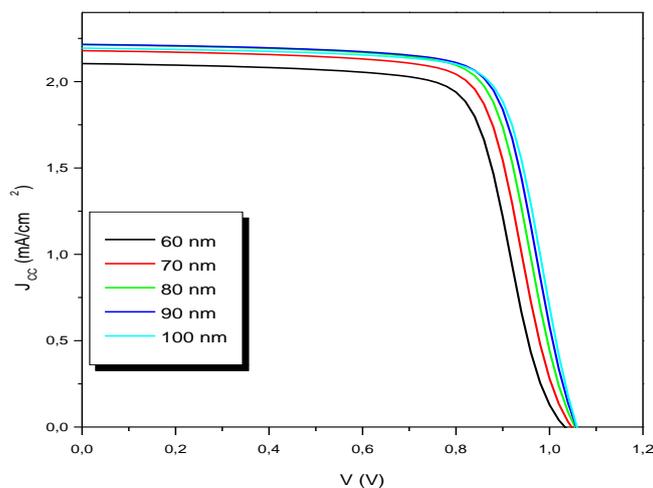


Figure 35: Caractéristique $I=f(V)$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur.

D'après cette figure on remarque une nette augmentation du courant J_{cc} et une légère augmentation de la tension V_{oc} de 1.02 V à 1.06 V lorsque l'épaisseur augmente de 60 nm jusqu'à 100 nm.

Tableau 4: Les caractéristiques de la cellule solaire pour différentes valeurs de l'épaisseur de chaque couche.

W (nm)	$V_{co}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
60	1.0321	2.10	71.45	1.61
70	1.0467	2.18	72.28	1.71
80	1.0541	2.21	73.24	1.77
90	1.0573	2.22	74.21	1.81
100	1.0585	2.20	75.16	1.81

D'après le Tableau 4, on voit que l'augmentation de l'épaisseur des couches des polymères utilisés dans la cellule solaire étudiée, donne une augmentation des valeurs des performances obtenues.

Pour mieux visualiser cette augmentation, nous avons tracé les courbes des variations de ces derniers en fonction de l'épaisseur et qui sont représentées par les (Figures 36).

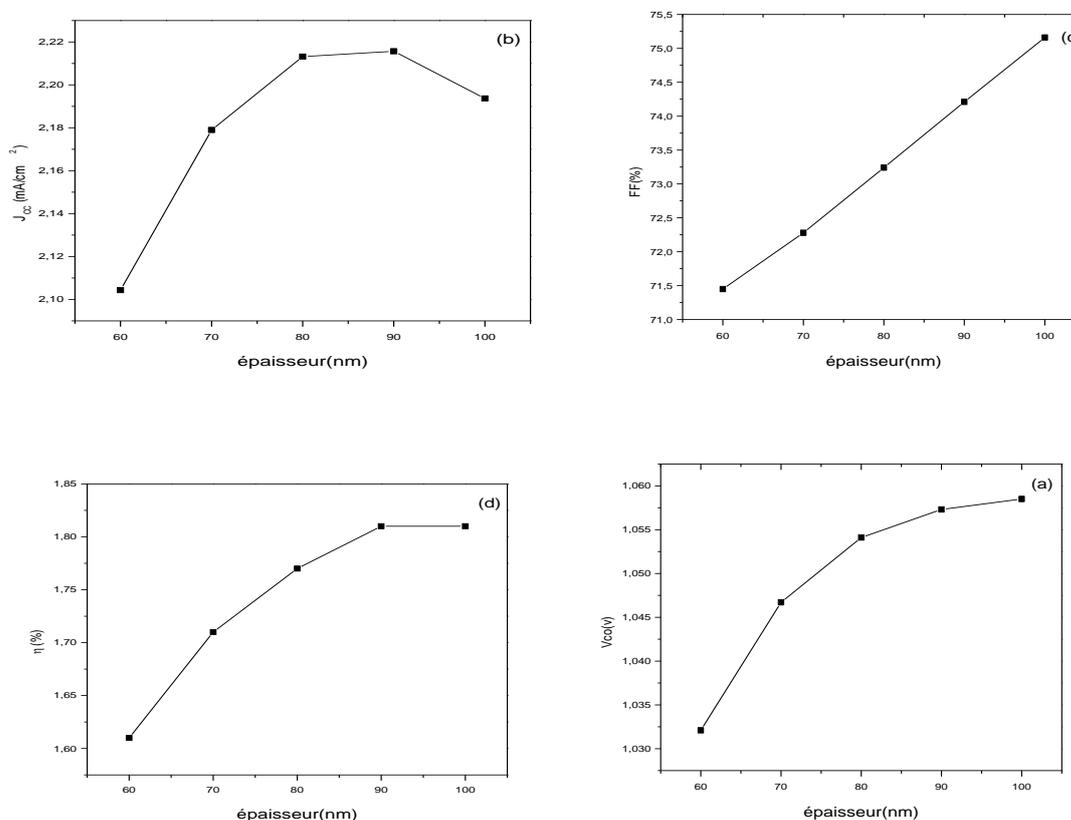


Figure 36: Variation en fonction de l'épaisseur de : a) la tension de circuit ouvert V_{CO} . b) le courant de court-circuit J_{CC} . c) le facteur de forme FF et d) le rendement η pour la cellule PCBM/P3HT.

D'après les résultats représentés sur les Figures 36, nous remarquons que lorsqu'on augmente l'épaisseur des couches utilisées, on obtient une légère croissance du courant de court-circuit, alors que la tension augmente jusqu'à un palier à environ 90nm. On remarque également que le facteur de forme et le rendement de la cellule étudiée augmentent dans la gamme de l'épaisseur étudiée.

IV.9 L'influence de l'épaisseur sur la caractéristique $QE=f(\lambda)$

La Figure 37 représente la variation du rendement quantique QE obtenue pour les différentes épaisseurs étudiées.

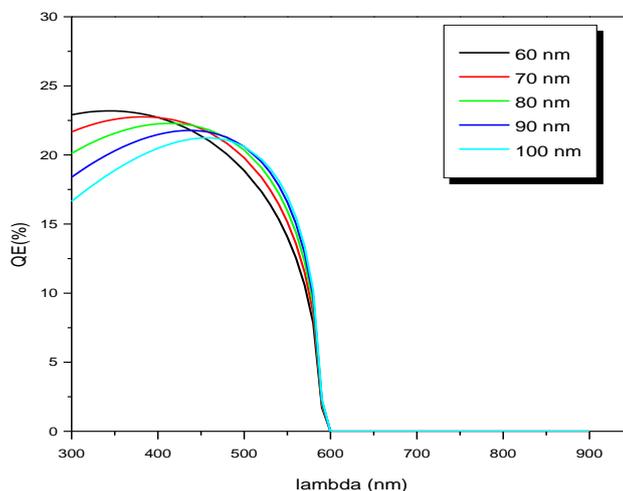


Figure 37: Caractéristique $QE=f(\lambda)$ à épaisseur variable.

On remarque que le maximum du rendement quantique diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des couches et s'effectue pour des radiations croissantes, mais l'absorption s'effectue toujours dans la gamme 300 – 570 nm

IV.10 Amélioration de la cellule

Une cellule solaire doit être capable de produire de l'électricité pendant vingt ans au moins sans baisse de rendement significatif. Pour ce là nous avons rajouté deux autres expériences ou :

En premier lieu nous avons utilisé une couche de PEDOT : PSS entre la couche supérieure et la cathode (+) avec les mêmes paramètres de PCBM/P3HT utilisés dans la première partie et à la même température 300 K.

Le PEDOT : PSS : est un polymère conducteur transparent, c'est un mélange de deux polymères, le poly (3,4-éthylènedioxythiophène) (PEDOT) et le poly (styrènesulfonate) de sodium (PSS). Le premier est un polymère conjugué dérivé du polythiophène, tandis que le second est un polystyrène sulfoné.

En deuxième lieu nous avons remplacé la couche P3HT par un autre polymère semi-conducteur donneur ; le PCPDTBT : Poly [2,6-(4,4-bis-(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta [2,1-b ; 3,4-b'] di-thiophène)-alt-4,7(2, 1,3-benzothiadiazole)]. Bien sur avec les paramètres de PCBM utilisés dans la première partie et à la même température 300 K.

Les paramètres des nouveaux polymères PEDOT : PSS et le PCPDTBT utilisées pour l'amélioration de notre cellule sont listés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Les paramètres des polymères utilisés pour la simulation de la cellule.

<i>Matériaux</i>	<i>PEDOT : PSS</i>	<i>PCPDTBT</i>
Épaisseur (nm)	2	100
Largeur de la bande interdite (gap) E_g (eV)	1.6	2.1
Constante diélectrique	3.4	3.7
Densité d'état effective des électrons dans la bande de conduction	1e22	1e22
Densité d'état effective des électrons dans la bande de valence	1e22	1e22
Affinité électronique χ (eV)	3	3
Mobilité des électrons μ_n (cm/V.s)	1e-4	1e-3
Mobilité des trous μ_p (cm/V.s)	1e-3	1e-4
Concentration des accepteurs N_A (cm ⁻³)	0	0
Concentration des donneurs N_D (cm ⁻³)	0	3.17e13

Après avoir effectué la simulation avec le logiciel SCAPS, nous avons obtenu de nouvelles performances de la cellule et qui sont regroupées dans le Tableau 6.

Tableau 6: Les caractéristiques de la cellule solaire modifiée.

Matériaux	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF(%)	$\eta(\%)$
P3HT/PCBM	1.059	2.19	75.16	1.81
PEDOT : PSS	0.98	2.38	50.02	1.20
PCPDTBT	1.07	3.06	67.91	2.30

On remarque que l'introduction de la couche PEDOT : PSS fait diminuer la tension V_{oc} de 7.5 %, le rendement de 33 % mais augmente le courant J_{cc} de 9 %.

Alors que dans le cas où on remplace la couche P3HT, nous avons obtenu une nette augmentation de différentes performances : 1 % pour V_{oc} , 46 % pour J_{cc} et 17 % pour le rendement de la cellule solaire.

La Figure 38 représente le rendement quantique pour les deux cas.

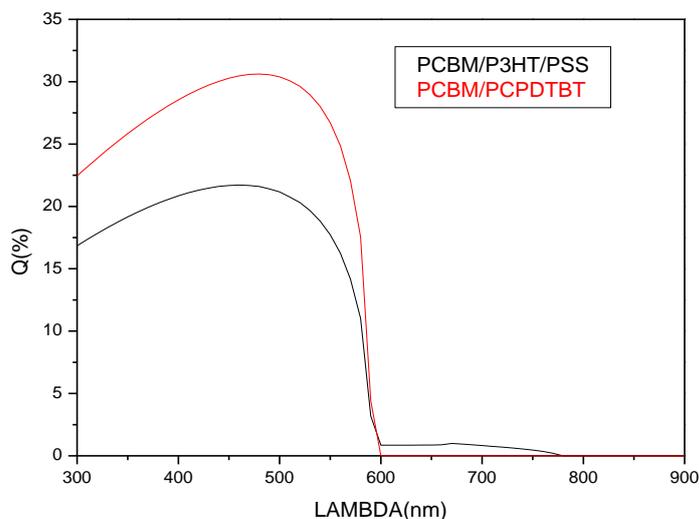


Figure 38: Caractéristique $QE=f(\lambda)$ de la cellule améliorée PCBM/P3HT/PEDOT : PSS et PCBM/PCPDTBT:PSS.

On remarque que le maximum du rendement quantique de la cellule PCBM/PCPDTBT est nettement plus élevé que celui de la cellule PCBM/P3HT/PEDOT : PSS, avec l'absorption qui

se fait dans une gamme plus proche des 600 nm et pour une radiation de 500 nm, le rendement pour les deux cas est maximal.

Pour la première courbe nous avons une augmentation du QE d'une Worth convergence de 21.72% entre l'intervalle de [300nm à 460nm] et au-delà de cet intervalle il diminue.

Pour la deuxième courbe, le QE augmente aussi jusqu'à une valeur d'a peu près 30.62 équivalent à 480 nm et au-delà de cette valeur il diminue.

IV.11 Conclusion

En conclusion, dans cette partie, nous avons simulé une cellule solaire organique bicouche avec comme polymère accepteur le PCBM et le P3HT comme donneur et ceci avec le logiciel SCAPS. Nous avons trouvé des paramètres caractéristiques de cette cellule avec surtout et comme prévu un rendement faible.

Nous avons vu que la température influe négativement sur le rendement de la cellule solaire contrairement à l'effet de l'épaisseur qui le fait augmenter ainsi que les autres performances.

Nous pouvons également conclure que l'ajout de la couche active de PEDOT : PSS fait diminuer plus le rendement de conversion avec une légère augmentation de la densité de courant, mais le changement du donneur P3HT par le PCPDTBT fait augmenter les différentes caractéristiques.

V. Conclusion générale :

Les cellules photovoltaïques à base de polymères offrent des perspectives intéressantes et de nombreux avantages pratiques. Leur coût de revient est plus faible par rapport aux cellules photovoltaïques à base de Silicium. Leur nature flexible les rend même aptes à s'intégrer à des matériaux souples. Mais leur rendement reste toujours inférieurs par rapport aux cellules à base de Silicium ne dépasse pas les 10%.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de ces cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques type polymère semi-conducteur. L'objectif principal est de définir l'influence de la température et l'épaisseur sur la caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque organique et par la suite sur ses paramètres.

Pour ce faire, nous avons simulé une cellule solaire organique bicouche avec comme polymère accepteur le PCBM et le P3HT comme donneur et ceci à l'aide du logiciel SCAPS.

Nous avons déterminé la caractéristique courant-tension et les différents paramètres de cette cellule. Nous avons par la suite, étudié l'effet de la température et de l'épaisseur de chaque couche sur les performances de la cellule considérée. Les résultats obtenus sont similaires à la littérature et montrent que la température influe négativement sur le rendement de la cellule solaire contrairement à l'effet de l'épaisseur qui le fait augmenter ainsi que les autres performances.

Afin d'améliorer les performances de ces cellules, de nombreuses stratégies, tels que l'amélioration de rendement de conversion, la réduction de l'énergie du gap des polymères, pour couvrir au mieux le spectre d'irradiation solaire (sur un domaine plus important) et collecter davantage les photons émis, il convient de développer des polymères à faibles gap ou bien de changer l'un des donneur/accepteur. Cette solution constitue d'ailleurs un des nouveaux axes de recherche sur les matériaux organiques. Des rendements assez élevés ont déjà été obtenus pour des cellules de type réseaux interpénétrés à base de PCBM et de copolymère poly thiophène-benzothiadiazine.

Dans notre cas, nous avons ajouté une troisième couche du PDOT : PSS dans une première tentative, et dans une deuxième nous avons remplacé le P3HT par le PCPDTBT. Les résultats montrent une diminution du rendement dans le premier alors que dans le deuxième cas, il augmente.

Références bibliographiques :

- [1] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [2] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques Obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité Électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [3] zouka Belkacem. (2012). Etude de l'évolution des caractéristique des matériaux thermoélectronique des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité. Mémoire de magister de l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. (Spécialité : Electronique, option : micro-électronique), Tizi-Ouzou
- [4] José Miguel Navarro << cellules photovoltaïques organique transparentes dans le visible>>. Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [5] Akassewa Tchapo Singo << système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome>>. Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-1, 2010.
- [6] Angle Cid Pastor << Conception et réalisation de module photovoltaïque électronique>>.Thèse de Docteur. Institut National des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [7] <http://www.photovoltaique-energie.fr>
- [8] Vighetti Stéphane << Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : choix et dimensionnement des étages de conversion>>. Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [9] Loïc Bailly << Cellules photovoltaïques organique souple à grande surface>>. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [10] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3^{ème} édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [11] H. Matieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 1^{ère} Edition, DUNOD, Paris, 2001.
- [12] Jing-shun Huang, Chen-Yuchou, Ching-Uhlin, Solar Energy Materials-Solar Cells94 182-186 (2010).

- [13] Mr.Benahmed Abdelmoumen et Mr.Temimi Mahmoud. (2011). Etude des propriétés électriques des cellules photovoltaïques organique. Mémoire master l'université de Tlemcen. (Spécialité : physique). Tlemcen.
- [14] K. Zerga, "Modélisation et simulation de la mobilité des porteurs de charges dans les matériaux organiques". Mémoire de Magister à l'Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen (2010).
- [15] H. Shirakawa, E.J. Louis, A.G. MacDiarmid, C.K. Chiang et A.J. Heeger, Chem. Commun. 1977, 16,578
- [16] D.M. Ivory, G.G. Miller, J.M. Sowa, L.W. Shacklette, R.R. Chance et R.H. Baughman, The Journal of Chemical Physics 1979, 71, 1506
- [17] A.F. Diaz, K.K. Kanazawa et G.P. Gardini, Chem. Comm. 1979, 14, 635
- [18] G. Tourillon et F. Garnier, Journal of Electroanalytical Chemistry 1982, 135, 173
- [19] M. Oukachmih, Thèse de doctorat, Université Toulouse-Paul Sabatier, (2003).
- [20] C.J. Brabec, A. Cravino, D. Meissner, N.S. Sariciftci, T. Fromherz, M.T. Rispens, L.Sanchez et J.C. Hummelen, Advanced Functional Materials, 11, 374 (2001).
- [21] M.C. Scharber, D. Mühlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf, A.J. Heeger et C.J. Brabec, Advanced Materials, 18, 789 (2006).
- [22] S. Gunes, H. Neugebauer et N.S. Sariciftci, Chem. Rev., 107, 1324 (2007).
- [23] C. Cocoyer et al, Appl. Phys. Lett., 133108 (2006).
- [24] L. Zeng et al, Appl. Phys. Lett., 89, 111111 (2006).
- [25] G. Hill et al, chem. Phys. Lett., 327, 181, 3-4 (2000).
- [26] M. Knupfer, Appl.Phys. A : Mat. Sci. & Proe., 77, 623 (2003).
- [27] C-M. Yanget al, Appl. Phys. Lett., 90, 133509 (2007).
- [28] P. Peumans et al, J. Appl. Phys., 93, 7, 3693 (2003).
- [29] O. Haerter et al, Appl. Phys. Lett., 86, 164101 (2005).
- [30] O. D. Jurchescu et al, Appl. Phys. Lett., 84, 16, 3061 (2004).
- [31] Mr. Benahmed Abdelmoumene et Mr. Mahmoud. (2011).Etude des propriétés électrique des cellules photovoltaïques organiques. Mémoire de master de l'Université de Tlemcen. (Spécialité : Physique énergétique et matériaux).Tlemcen .

- [32] M^{elle}:Benseba Ghalia. (2013). Etude des différents paramètres influençant le rendement et la stabilité d'une cellule solaire organique. Mémoire de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (Spécialité : Electronique). Tizi-Ouzou.
- [33] R. L. Elsenbaumer, K.-Y. Jen and R. Oboodi, « Processible and environmentally stable conducting polymers* », *Synthetic Metals* **1986** ; 15(2-3) : 169-174
- [34] R. D. McCullough and R. D. Lowe, « Enhanced electrical conductivity in regioselectively synthesized poly(3-alkylthiophenes) », *Journal of the Chemical Society - Chemical Communications* **1992** ; 1 : 70-72
- [35] T.-A. Chen and R. D. Rieke, « Polyalkylthiophenes with the smallest bandgap and the highest intrinsic conductivity », *Synthetic Metals* **1993** ; 60(2) : 175-177
- [36] H. Sirringhaus, N. Tessler and R. H. Friend, « Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers », *Science* **1998** ; 280(5370) : 1741-1744
- [37] C. Soci, I.-W. Hwang, D. Moses, Z. Zhu, D. Waller, R. Gaudiana, C. J. Brabec and A. J. Heeger, « Photoconductivity of a low-bandgap conjugated polymer », *Advanced Functional Materials* **2007** ; 17(4) : 632-636
- [38] M. Koppe, H.-J. Egelhaaf, G. Dennler, M. C. Scharber, C. J. Brabec, P. Schilinsky and C. N. Hoth, « NearIR sensitization of organic bulk heterojunction solar cells: towards optimization of the spectral response of organic solar cells », *Advanced Functional Materials* **2010** ; 20(2) : 338-346
- [39] N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger and F. Wudl, « Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to Buckminsterfullerene », *Science* **1992** ; 258(5087) : 1474-1476
- [40] V. D. Mihailetschi, J. K. J. van Duren, P. W. M. Blom, J. C. Hummelen, R. A. J. Janssen, J. M. Kroon, M. T. Rispens, W. J. H. Verhees and M. M. Wienk, « Electron transport in a methanofullerene », *Advanced Functional Materials* **2003** ; 13(1) : 43-46
- [41] T. B. Singh, N. Marjanović, G. J. Matt, S. Günes, N. S. Sariciftci, A. Moutaigne Ramil, A. Andreev, H. Sitter, R. Schwödiauer and S. Bauer, « High-mobility n-channel organic field-effect transistors based on epitaxially grown C60 films », *Organic Electronics* **2005** ; 6(3) : 105-110

- [42] M. T. Rispens, A. Meetsma, R. Rittberger, C. J. Brabec, N. S. Sariciftci and J. C. Hummelen, « Influence of the solvent on the crystal structure of PCBM and the efficiency of MDMO-PPV:PCBM ‘plastic’ solar cells », *Chemical Communications* **2003** ; 17 : 2116-2118
- [43] S. Cook, R. Katoh and A. Furube, « Ultrafast Studies of Charge Generation in PCBM: P3HT Blend Films following Excitation of the Fullerene PCBM », *Journal of Physical Chemistry C* **2009**; 113(6): 2547-2552
- [44] G. F. Burkhard, E. T. Hoke, S. R. Scully and M. D. McGehee, « Incomplete Exciton Harvesting from Fullerenes in Bulk Heterojunction Solar Cells », *Nano Letters* **2009** ; 8(12) : 4037-4041
- [45] M. T. Dang, L. Hirsch and G. Wantz, « P3HT: PCBM, Best-Seller in Polymer Photovoltaic Research », *Advanced Materials* **2011**; 23(31) : 3597-3602
- [46] PINTO M. R, Conor S. Rafferty and Robert W. Dutton, "PSCES2 - Poisson and continuity equation solver", Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University, September 1984.
- [47] Y. MAROUF. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco, Mémoire de Magister. Université Med Khider Biskra, 2013.
- [48] SELBERHERR, S. Analysis and simulation of semi-conductor devices. Wien, New York: Springer-Verlag, 1984. (s.d.).
- [49] Sarah Taleb Dehkordi. (2015). Stabilisation de dispositifs photovoltaïque organique par réseaux semi-interpénétrés de polymères. Thèse doctorat de l’université de Cergy-Pontoise. (Spécialité : chimie des polymères).
- [50] H. Lu, X. Xu, and Z. Bo, “Perspective of a new trend in organic photovoltaic: ternary blend polymer solar cells,” *Sci. China Mater.*, vol. 59, no. 6, pp. 444–458, 2016.
- [51] J. Zhang *et al.*, “Photovoltaic molecules based on vinylene-bridged oligothiophene applied for bulk-heterojunction organic solar cells,” *J. Energy Chem.*, vol. 27, no. 2, pp. 426–431, 2018.
- [52] S. Berson, R. De Bettignies, S. Bailly, S. Guillerez, and B. Jusselme, “Elaboration of P3HT/CNT/PCBM composites for organic photovoltaic cells,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 17, no. 16, pp. 3363–3370, 2007.
- [53] S. Antohe, S. Iftimie, L. Hrostea, V. A. Antohe, and M. Girtan, “A critical review of

- photovoltaic cells based on organic monomeric and polymeric thin film heterojunctions,” *Thin Solid Films*, vol. 642, pp. 219–231, 2017.
- [54] F. Ongul, S. A. Yuksel, C. Allahverdi, S. Bozar, M. Kazici, and S. Gunes, “Influences of CdSe NCs on the photovoltaic parameters of BHJ organic solar cells,” *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 194, pp. 50–56, 2018.
- [55] Y. Liu, H. Zhang, Y. Sun, X. Wan, and Y. Chen, “A-D-A-type small molecular acceptor with one hexyl-substituted thiophene as π bridge for fullerene-free organic solar cells,” *Sci. China Mater.*, vol. 60, no. 1, pp. 49–56, 2017.
- [56] Z. X. Wang *et al.*, “Organic photovoltaic cells: Novel organic semiconducting materials and molecular arrangement engineering,” *Chinese Sci. Bull.*, vol. 57, no. 32, pp. 4143–4152, 2012.
- [57] G. S. Fu, W. G. Kong, L. J. Han, Q. M. Yang, L. X. Hou, and S. P. Yang, “Improving the efficiency of organic photovoltaic cells by introducing an ultrathin modification layer with a strong dipole moment,” *Chinese Sci. Bull.*, vol. 57, no. 14, pp. 1655–1658, 2012.
- [58] T. Adhikari, S. R. Bobbara, J. M. Nunzi, and O. Lebel, “Efficiency enhancement of ternary blend organic photovoltaic cells with molecular glasses as guest acceptors,” *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 53, no. August 2017, pp. 74–82, 2018.
- [59] A. Mart and A. Luque, *High efficiency through full spectrum utilization*. 2002.
- [60] L. E. Peñaranda Chenche, O. S. Hernandez Mendoza, and E. P. Bandarra Filho, “Comparison of four methods for parameter estimation of mono- and multi-junction photovoltaic devices using experimental data,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. June, pp. 2823–2838, 2018.
- [61] S. Bouchekouf and B. M. M. Benabbas-marir, “Etude numérique de la cellule photovoltaïque organique MPP / ZnPc,” *Revue*, vol. 12, pp. 163–174, 2009.
- [62] J. He, W. Zhang, J. Ye, and P. Gao, “16% Efficient Silicon/Organic Heterojunction Solar Cells Using Narrow Band-Gap Conjugated Polyelectrolytes Based Low Resistance Electron-Selective Contacts,” *Nano Energy*, vol. 43, pp. 117–123, 2018.
- [63] I. Cosme, A. Kosarev, S. Mansurova, A. J. Olivares, H. E. Martinez, and A. Itzmoyotl,

- “Hybrid photovoltaic structures based on amorphous silicon and P3HT:PCBM/PEDOT:PSS polymer semiconductors,” *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 38, pp. 271–277, 2016.
- [64] A. Benchaabane *et al.*, “Effect of OA-ZnSe nanoparticles incorporation on the performance of PVK organic photovoltaic cells,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 64, no. March, pp. 115–123, 2017.
- [65] Wikipédia L’encyclopédie libre Simulation informatique, site https://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_informatique#cite_note-1
- [66] Burgelman M, Verschraegen J, Degrave S, Nollet P. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2004; 12:143-153.
- [67] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, *Thin Solid. Films*, 361 (2000) 527-532.
- [68] <http://scaps.elis.ugent.be/>
- [69] <http://www.ampsmodeling.org/>

Résumé :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base des polymères PCBM et P3HT semble prometteur. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous avons étudié le fonctionnement des cellules photovoltaïques à base des PCBM/P3HT par la simulation numérique à deux dimensions sous éclairage avec un spectre AM1.5 effectuée avec le logiciel SCAPS. Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court-circuit JCC, la tension en circuit ouvert VCO, le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure bicouche typique de PCBM/P3HT. Par la suite nous nous intéressons à l'effet de la variation de la température et de l'épaisseur sur les paramètres de sortie, surtout le rendement électrique de la structure.

Mots Clés : Cellule solaire, photovoltaïque, PCBM, P3HT, température, simulation numérique, SCAPS.

Abstract

In the global context of the diversification of the use of the natural resources, the recourse to Renewable energies and in particular the solar photovoltaic one is done more and more loud. For this reason, the development of a new generation of photovoltaic cells based on the polymères PCBM and P3HT seems promising. In this work of modeling and simulation, we studied the operation of photovoltaic cells based on PCBM/P3HT by numerical simulation in two dimensions under illumination with an AM1.5 spectrum performed under SCAPS. We evaluate initially, the current of short-circuit JCC, the tension in open circuit VOC, the factor of form FF and the electrical efficiency η for a typical structure of PCBM/P3HT. Thereafter we are interested by the temperature and the thickness of the layer (CZTS) and thickness of the CdS to investigate the influence of these on the output parameters, especially the electrical efficiency of the structure.

Keywords : Solar cell, photovoltaic, PCBM, P3HT, temperature, numerical simulation, SCAPS.

ملخص:

في السياق العالمي لتنويع استخدام الموارد الطبيعية، أصبح استخدام الطاقات المتجددة ولا سيما الطاقة الشمسية الفولتية أقوى. على هذا النحو، فإن تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة على البوليمرات PCBM و P3HT يبدو واعدة. في هذا العمل النمذجة والمحاكاة، درسنا تشغيل الخلايا الكهروضوئية على أساس PCBM / P3HT بواسطة محاكاة رقمية ثنائية الأبعاد تحت إضاءة مع طيف AM1.5 الذي تم تنفيذه باستخدام برنامج SCAPS. نقوم أولاً بتقييم JCC الحالي ماس كهربائي، دائرة الجهد المفتوح VCO ، عامل الشكل FF والكفاءة الكهربائية η لبنية ثنائية نموذجية من PCBM / P3HT. في وقت لاحق ونحن مهتمون في تأثير درجة الحرارة وتغير سمك على المعلمات الإخراج ، وخاصة الكفاءة الكهربائية للهيكل.

الكلمات الرئيسية: الخلايا الشمسية، الضوئية، PCBM، P3HT، درجة الحرارة، محاكاة عددية، SCAPS.