

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté de génie électrique et d'informatique  
Département d'électronique



## MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Spécialité : Electronique

Option : Microélectronique

### THÈME :

**Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque organique à réseau  
interpénétré avec le logiciel GPVDM**

Présenté par :

MOHAMED SEGHIR Hanane

MOKRANI Hadjila

Proposé par :

Mlle.SALEM Dalila

Devant le jury:

BOUMEDINE Fazia

Présidente

UMMTO

BOUGHIAS Ouiza

Examinatrice

UMMTO

NEMMAR BELHOUCINE Farida

Promotrice

UMMTO

Promotion 2017-2018

## **REMERCIEMENT**

*Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a données la force pour réaliser ce travail que nous souhaitons qu'il atteindra nos aspirations, si Dieu le veut.*

*Nous tenons nos vifs remerciements et gratitude à notre promotrice NEMMAR BELHOUCINE Farida pour avoir accepté de nous encadrer et pour ses précieux et pertinents conseils lors d'élaboration de ce mémoire.*

*Nos remerciements également Madame SALEM Dalila qui nous a aidés et participé a notre formation ainsi pour sa disponibilité tout au long de ce travail.*

*Nous tenons également à exprimer nos remerciements aux membres de jury de nous fait l'honneur d'accepter d'être dans le jury de la soutenance de ce mémoire et d'avoir accepté de l'évaluer.*

*Sans oublier d'exprimer notre gratitude à l'ensemble des enseignants de l'UMMTO en particulier ceux du master de microélectronique.*

*Enfin nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.*

*Merci à tous*

# DEDICACE

*Ce modeste travail est dédié à:*

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, qui ont sacrifié toute leur vie afin de me voir devenir ce que je suis.*

*- A mes sœurs (Noura et Karima).*

*-A mes frères (Said et Ahcène).*

*- A **BENFEDHA Djamel**, je veux le remercie du fond du cœur.*

*Et bien sur sans oublier ma binôme **MOHAMED SEGHIR Hanane**.*

**MOKRANI Hadjila**

# DEDICACE

*Ce modeste travail est dédié à:*

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, qui ont sacrifié toute leur vie afin de me voir devenir ce que je suis.*

*- A mes sœurs (Manel et Sarah).*

*-A mes frères (Sidali et Sofiane).*

*- A mon fiancé **Hachrouf Azzedin**, je veux le remercier du fond du cœur.*

*Et bien sûr sans oublier ma binôme **Mokrani Hadjila**.*

**MOHAMED SEGHIR Hanane**

---

# Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

## Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

I. Généralités.....4

I.1. L'énergie solaire photovoltaïque.....4

I.2. Le rayonnement solaire .....4

II. Les filières technologies.....5

II.1. Filière silicium-cristallin.....6

II.1.1. Silicium monocristallin.....6

II.1.2. Silicium poly-cristallin.....6

II.2. Filière couche minces.....7

II.2.1. Les cellules à base du silicium amorphe.....7

II.2.2. Les cellules à base du tellure de cadmium CdTe.....7

II.2.3. Les cellules à base de sélénium de cuivre d'indium CIGS.....8

II.3. Les cellules à colorant (Graätzel).....8

II.4. Les cellules photovoltaïques organiques.....9

III. Les matériaux organiques semi-conducteurs.....11

III.1. Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs .....11

III.1.1. Petites molécules.....12

III.1.2. Macromolécules.....13

III.1.2.1. Les Polymères .....13

III.1.2.2. Les polymères conjugués.....	13
III.3. Création de bandes semi-conductrices organiques .....	16
III.4. Le dopage des polymères et La création des polarons et des bipolarons dans la bande interdite.....	17
III.5. Les propriétés des matériaux semi-conducteurs organiques.....	19
IV. La différence entre les cellules à semi-conducteurs inorganiques et organique.....	22

## Chapitre II : Etude des cellules photovoltaïques organiques

I-Principe de fonctionnement d'une cellule organique.....	24
I.1. L'absorption des photons.....	24
I.2. Création des excitons.....	25
I.3. La diffusion et la dissociation des excitons.....	25
I.4. Le transport et la collecte des charges.....	26
II. Les caractéristiques courant-tension et schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque .....	27
II.1. Les paramètres des cellules photovoltaïques organiques.....	28
II.1.a. La tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	28
II.1.b. Le courant de court circuit .....	29
II.1.c. Le facteur de forme.....	30
II.1.d. Le rendement de conversion de puissance $\eta$ .....	30
II.2. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque organique (OPV).....	31
III. différentes structures des cellules photovoltaïques organiques.....	32
III.1. Les structures conventionnelles.....	32
III.1.1. La structure monocouche.....	32

III.1.2. La structure bicouche.....	33
III.1.3. La structure réseau interpénétré (hétérojonction en volume).....	33
III.1.4. La structure tandem.....	34
III.2. Structure inverse.....	34
IV. Insertion des couches inter-faciles.....	35
IV.1 Le type des matériaux utilisé pour les couches inter-faciales.....	36
IV.1.1. Couche inter-faciale anodique.....	36
IV.1.2. Couche inter-faciale cathodique.....	37
IV.2 Le role des couches inter-faciales.....	37
V. Les avantages et les inconvénients des matériaux semi-conducteurs organique.....	38
VI. La stabilité de la cellule.....	39

**Chapitre III : Simulation numérique d'une cellule interpénétrée P3HT : PCBM**

I. Logiciel GPVDM (Général-Purpose Photovoltaic Device Model) .....	40
I.1. Définition.....	40
I.2. Détails techniques.....	41
I.3. Le modèle physique.....	41
I.3.a. Le modèle électrique.....	41
I.3.b. Le modèle optique.....	42
II. Description de la cellule organique interpénétré à base de P3HT/ PCBM utilisé.....	42
II.1. Structure étudiée.....	42
II.2. Les matériaux utilisés dans la cellule hétérojonction en volume.....	43
II.2.1. Les matériaux utilisés dans la couche active.....	43

---

II.2.2. Les matériaux utilisés pour les deux électrodes.....	45
II.3. Paramètres numérique de la cellule solaire organique simulée.....	46
II.4. Les matériaux utilisés dans les couches interfaciales dans la cellule simulée.....	47
II.5. Paramètres numériques sur les matériaux utilisés dans les couches interfaciales.....	49

**Chapitre IV : résultats et discussions**

I. L'influence de l'épaisseur de la couche active (P3HT : PCBM) sur la cellule hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM.....	51
I.1. Effets de l'épaisseur de la couche active sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque de type ITO/P3HT : PCBM/Al.....	51
I.2. Effets de l'épaisseur sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/P3HT : PCBM/Al.....	54
II. L'effet de la mobilité des porteurs de charges sur les performances de la cellule solaire organique P3HT : PCBM.....	57
III. L'influence de l'intensité lumineuse sur la cellule hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM.....	60
III.1 Effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque de type ITO/P3HT : PCBM/Al.....	60
III.2 Effets de l'intensité lumineuse sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/P3HT : PCBM/Al.....	61
IV. L'influence des couches inter-faciales sur la cellule hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM.....	64
IV.1 Effets des couches inter-faciales sur la caractéristique J(V) de la cellule photovoltaïque organique.....	64
IV.2 Effets des couches inter-faciales sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique.....	67

**V. Conclusion générale.....69**

**Références bibliographique**

**Résumé**

### Liste des symboles et abréviations

**E(x)** : Champ électrique.

**E<sub>g</sub>** : Largeur de la bande interdite (gap).

**E<sub>c</sub>** : Bande de conduction.

**E<sub>v</sub>** : Bande de valence.

**Φ(x)** : Potentiel électrostatique.

**Φ<sub>0</sub>** : Flux de photons incident.

**ρ(x)** : Densité de charges électriques.

**P<sub>t</sub>** : Densité de charges des défauts.

**α(λ)** : Constante d'absorption.

**λ** : Longueur d'onde du spectre.

**G(λ,x)** : Taux de génération des paires électron-trous.

**n, p** : Concentration des électrons et des trous respectivement.

**n<sub>0</sub>, p<sub>0</sub>** : Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement..

**J<sub>n</sub> , J<sub>p</sub>** : Densité de courant des électrons et des trous respectivement.

**J(V)** : Caractéristique courant-tension.

**J<sub>s</sub>** : Courant d'obscurité.

**J<sub>L</sub>** : Courant sous éclairage.

**J<sub>sc</sub>** : Courant de court circuit.

**V<sub>oc</sub>** : Tension de circuit ouvert.

**FF** : Facteur de forme.

**η** : Rendement de conversion.

**EQE** : Rendement quantique externe.

**Φ<sub>n</sub>, Φ<sub>p</sub>** : Fonctions de travail des électrodes anode et cathode

**τ<sub>n</sub> , τ<sub>p</sub>** :Durée de vie des électrons et des trous respectivement.

**μ<sub>n</sub> , μ<sub>p</sub>** :Mobilité des électrons et des trous respectivement.

**D<sub>n</sub> ,D<sub>p</sub>** : Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

**R<sub>n</sub>, R<sub>p</sub>** : Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

**T** : Température de la cellule

**χ** : Affinité électronique du mélange.

**k** : Coefficient de recombinaison bi-moléculaire (Langevin)

**d** : Epaisseur de la couche active de la cellule.

**OPV** : Cellule solaire organique.

**BHJ** : Cellule solaire hétérojonction en vrac.

**GPVDM** : Général-Purpose Photovoltaic Device Model

**P3HT**: poly (3-hexylthiophene).

**PCBM**: phenyl-C61-butyrac acid methyl ester.

**HOMO**: Highest Occupied Molecular Orbital.

**LUMO**: Lowest Unoccupied Molecular Orbital

**C60F36**: 36-fold fluorinated C60

**CBP** 4:4'-Bis(N-carbazolyl)-1,1'-biphenyl

**CIGS** :Copper Indium Gallium Selenium

**D/A** : Donneur/Accepteur

**DSSC** : Dye-Sensitized Solar Cell

**MDMO-PPV** : Poly[2-méthoxy-5-(3,7-diméthyl-octyloxy)-1,4-phénylène-vinylène]

**MEH-PPV** :Poly[2-méthoxy-5-(2-éthyl-hexyloxy)-1,4-phénylène-vinylène]

**MPP**: 1-méthyl-4-phenylpyridinium

**OFET**: Organic Field Effect Transistor

**OLED**: Organic Light-Emitting Diode

**PCDTBT**: Poly[N- 9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4,7-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole]

**PEDOT: PSS** :Poly(3,4-éthylènedioxythiophène): poly(styrène sulfonate) de sodium

**PEN**: Pentacène

**PFN**: poly [(9, 9-bis(3'-(N,N-diméthylamino)propyl)-2,7-fluorene)-alt-2,7-(9,9-dioctylfluorene)]

**PTCDA** : Dianhydride pérylène-3, 4, 9,10-tétra carboxylique

**Rs** : résistance serie

**Rsh**: resistance shunt

## Chapitre I

**Figure I.1** : spectre solaire.

**Figure I.2** : Définition du nombre d'air masse (AM) et spectre d'émission du rayonnement solaire.

**Figure I.3** : structure d'une cellule solaire à base du silicium cristallin.

**Figure I.4** : structure d'une cellule solaire à base du silicium non cristallin (amorphe).

**Figure I.5**: structure d'une cellule solaire à base de CdTe .

**Figure I.6** : structure d'une cellule solaire à base de CIGS.

**Figure I.7** : cellule solaire à colorant.

**Figure I.8** : cellule solaire à colorant [Konarka Power Plastics, HELIATEK]

**Figure I.9** : Structure d'une cellule organique

**Figure I.10** : phototype de cellule organique flexible et transparente.

**Figure I.11**: impression de cellules photovoltaïques organiques enroulables.

**Figure I.12**: Répartition de la production des cellules photovoltaïques par technologie en 2011.

**Figure I.13** : classement des semi-conducteurs organiques.

**Figure I.14** : exemple d'un pigment insoluble (C60) qui peut être dérivé à un colorant soluble (PCBM).

**Figure I.15** : exemple de polymères semi-conducteurs.

**Figure I.16**: état d'hybridation du carbone : (a) non hybridé, (b) hybridé  $sp^3$ , (c) hybridé  $sp^2$ , (d) hybridé  $sp$ .

**Figure I.17** : représentation de carbon hybridé  $sp^2$  et de la double liaison ( $\pi, \sigma$ ).

**Figure I.18** : (a) polymère conjugué le poly-acétylène (b) polymère non conjugué le polyéthylène.

**Figure I.19** : la structure des bandes dans un semi conducteur organique.

**Figure I.20** : (a) Système non dégénéré (b) système dégénéré.

**Figure I.21**: exemple de deux matériaux utilisés dans les cellules organiques.

**Figure I.22 :** diagramme énergétique d'un matériau semi-conducteur donneur ou accepteur d'électrons.

**Figure I.23 :** diagramme des bandes d'énergie des polymères conjugués et des accepteurs utilisés dans la cellule solaire organique.

**Figure I.24 :** la formation des bandes selon la conjugaison du polymère.

## **Chapitre II**

**Figure II.1 :** le principe de fonctionnement d'une cellule solaire organique.

**Figure II.2 :** la distribution des photons sur une cellule organique.

**Figure II.3 :** la diffusion des excitons.

**Figure II.4 :** la condition de la dissociation  $E_{ex} > E_{PI-AE}$ .

**Figure II.5 :** caractéristiques courant-tension et paramètres physiques d'une cellule PV organique.

**Figure II.6 :** Les deux régimes selon la puissance d'éclairement.

**Figure II.7 :** schéma équivalent de la cellule PV organique.

**Figure II.8 :** influence théorique de la résistance  $R_s$  et  $R_{sh}$  sur la courbe  $I(V)$ .

**Figure II.9 :** *la structure d'une cellule monocouche à gauche, et les niveaux d'énergie d'une cellule monocouche à droite*

**Figure II.10 :** *la structure d'une cellule bicouche à gauche, et les niveaux d'énergie d'une cellule bicouche à droite*

**Figure II.11 :** *la structure d'une cellule à réseau interpénétré à gauche, et les niveaux d'énergie de la cellule à droite.*

**Figure II.12 :** *la structure d'une cellule tandem*

**Figure II.13 :** *les deux types de cellule OPV a) conventionnelle b) inverse*

## **Chapitre III**

**Figure III.1:** la structure hétérojonction en volume de la cellule organique réalisé avec GPVDM.

**Figure III.2 :** structure chimique du polymère P3HT.

**Figure III.3 :** Orbitales  $\pi$  conjuguées d'un poly-thiophène coplanaire.

**Figure III.4** : le spectre d'absorption de P3HT.

**Figure III.5**: structure chimique de molécules accepteuses d'électrons (type N).

**Figure III.6** : le spectre d'absorption de PC60BM.

**Figure III.7** : le spectre d'absorption de l'Al.

**Figure III.8** : le spectre d'absorption de l'ITO.

**Figure III.9** : Illustration schématique de structures de cellules photovoltaïques organiques avec intégration de leurs couches inter-faciales anodique et cathodique, structure conventionnelle.

## Chapitre IV

**Figure IV.1** : structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 80nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.2** : structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 120nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.3**: structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 160nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.4**: structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 200nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.5**: structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 240nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.6**: structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 280nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.7**: structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 320nm à gauche, caractéristique J(V) de la cellule simulée à droite

**Figure IV.8** : variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche active

**Figure IV.9**: variation de la tension à circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche active

**Figure IV.10**: variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche active

**Figure IV.11** : variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche active

**Figure IV.12** : variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de la mobilité des charges

**Figure IV.13** : variation de la tension de circuit-ouvert en fonction de la mobilité des charges

**Figure IV.14** : variation du rendement en fonction de la mobilité des charges

**Figure IV.15** : variation du facteur de forme en fonction de la mobilité des charges

**Figure IV.16**: caractéristiques  $J(V)$  d'une cellule, OPV à base de P3HT : PCBM en fonction de l'intensité lumineuse

**Figure IV.17** : variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de l'intensité lumineuse

**Figure IV.18**: variation de la tension à circuit ouvert en fonction de l'intensité lumineuse

**Figure IV.19** : variation du facteur de forme en fonction de l'intensité lumineuse

**Figure IV.20** : variation du rendement en fonction de l'épaisseur de l'intensité lumineuse

**Figure IV.21**: structure de la cellule organique étudiée ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM /Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule OPV (à droite)

**Figure IV.22** : structure de la cellule OPV simulée avec des couches inter-faciales ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/ZnO/Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule OPV (à droite)

**Figure IV.23**: structure de la cellule OPV simulée avec les couches inter-faciales ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/C60/Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule OPV (à droite)

**Figure IV.24**: structure de la cellule OPV simulée avec les couches inter-faciales ITO/V2O5/P3HT : PCBM /Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule (à droite)

**Figure IV.25**: structure de la cellule OPV simulée avec les couches inter-faciales ITO/V2O5/P3HT : PCBM /TiO2/Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule (à droite)

**Tableau I.1** : comparaison entre les cellules solaires organiques et inorganiques

**Tableau III.1** : paramètres numériques sur les matériaux utilisés dans la cellule simulée

**Tableau III.2** : paramètres numériques des matériaux utilisés dans les couches inter-faciales

**Tableau IV.1** : la variation des paramètres d'une cellule photovoltaïque organique pour la structure ITO/P3HT : PCBM/Al avec différentes épaisseurs de la couche active

**Tableau IV.2** : la variation des paramètres d'une cellule photovoltaïque organique pour la structure ITO/P3HT : PCBM/Al avec différentes intensités lumineuse

**Tableau IV.3** : la variation des paramètres d'une cellule photovoltaïque organique pour différentes structures avec des couches inter-faciales

### **Introduction générale :**

Les principales ressources énergétiques utilisées actuellement dans le monde sont les énergies fossiles (pétrole, charbon, le gaz), les nucléaires, les énergies renouvelables. Et face à l'augmentation des besoins énergétiques de l'humanité, et l'épuisement prévisibles des ressources d'énergies fossiles, et l'utilisation massive de ces énergies a un effet néfaste sur l'environnement, le changement climatique, la pollution de l'air, et les déversements de pétrole. Ainsi que la combustion des combustibles produit des gaz qui retiennent la chaleur qui sont la cause principale de l'augmentation continue de températures atmosphériques mondiales.

Et comme ces dernières années la protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure de nos sociétés. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation de l'énergie solaire. Cette dernière est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil. En une semaine, la planète reçoit sous forme de rayonnement solaire l'équivalent de ses réserves d'énergie. Une couverture de 0,4% de la surface du globe par des capteurs au rendement de 10% suffirait à satisfaire la consommation d'énergie de l'humanité [1].

Le phénomène de transformation de l'énergie solaire en électricité se qu'on appelle l'effet photovoltaïque se fait par des panneaux solaires composés par des cellules photovoltaïques solaires qui sont des diodes fonctionnant en inverse, d'un point de vue électrique. Le principe d'une cellule photovoltaïque consiste à capter l'énergie fournie par la lumière solaire et à la convertir en puissance électrique. L'énergie solaire est gratuite et ces systèmes de production n'ont pas besoin de relier à des réseaux de gaz ou d'électricité, elle aussi permet de diminuer les émissions de gaz à l'effet de serre. Il est depuis quelques années facile, courant et rapidement rentable de faire installer des panneaux solaires sur le toit d'une maison afin de produire de l'électricité.

En 1839 Antoine Becquerel un physicien français découvre l'effet photovoltaïque [2], avec une cellule électrolyte, et en 1875 Werner a exposé sur l'effet photovoltaïque des semi-conducteurs ; la crise de l'énergie en 1970 a vu le début d'un intérêt majeur à l'utilisation de cellules solaires pour produire de l'électricité dans les foyers et les entreprises [3].

Cette technologie est de plus en plus reconnue comme un élément clé de notre avenir énergétique. Les panneaux photovoltaïques sont couramment utilisés, que ce soit par des entreprises privées, publiques, ou par des particuliers. Le marché mondial de l'électricité solaire photovoltaïque est depuis l'année 2000 dominé par trois pays: l'Allemagne, le Japon et les Etats-Unis [4].

Cependant, à l'échelle terrestre, les applications restent limitées à cause de la méthode de production des cellules solaires qui est difficile, et donc, très cher, car il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. Aujourd'hui, le silicium, sous toutes ses formes (Monocristallines, poly-cristalline ou amorphe) est encore à plus de 80% le matériau de base des cellules photovoltaïques [5]. Mais peut-être pas pour très longtemps.

L'utilisation des matériaux organiques apparaît comme une solution alternative pour produire des cellules solaires à faible coût et les rendre compétitives sur le marché de l'électricité. Ces cellules ne sont pas, jusqu'à présent, commercialement compétitives à cause de leur faible rendement de conversion en puissance. En effet, les matériaux organiques sont en passe de devenir une technologie clef de la prochaine révolution électronique à faible coût. L'électronique organique est entrée dans le domaine industriel, dans la fabrication des LED depuis 1999, les transistors et les circuits intégrés en 2008 [6]. Depuis quelques années, les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques sont développées dans le but de remplacer les cellules à base de silicium et de réduire le coût des technologies utilisées. Cependant, les cellules PV à base de matériaux organiques nécessitent des investigations supplémentaires afin d'améliorer le rendement de conversion et la stabilité de la cellule.

Notre travail est partagé en quatre chapitres dont les quelles on a basé sur les cellules photovoltaïques organique, dans le premier chapitre nous décrirons les différentes filières technologique des cellules PV solaire et étudier les semi-conducteurs organique et les matériaux utilisé pour la réalisation de ces cellules (les polymères et les petites molécules), et la différence entre les semi-conducteur inorganique et les semi-conducteur organique, et dans le deuxième chapitre on va parler sur le principe de fonctionnement des cellules PV organique leurs caractéristiques et ces différentes structures.

Ce travail sera réalisé par simulation, Toutefois, la maîtrise et la compréhension de ces matériaux est très difficile, pour cela, de nombreux chercheurs on préféré s'investir en simulation afin de gagner du temps. Donc dans le troisième chapitre, nous effectuerons des

simulations des performances d'une cellule solaire organique à hétérojonction en volume à base de P3HT/PCBM à l'aide du logiciel GPVDM, donc dans ce chapitre nous allons définir et représentés les matériaux utilisé dans notre cellule avant de passer au simulation, et détermines les différents paramètres électrique caractérisant notre cellule, et dans le dernier chapitre nous étudierons les effets de l'épaisseur de la couche active et de l'intensité lumineuse sur la caractéristique  $J(V)$ , sur les rendements de conversions, les densités du courant de court-circuit, les tensions à circuit ouvert et les facteurs de formes, et nous allons étudiés l'influence des différentes couches inter-faciales (PEDOT : PSS, ZnO, C60, V2O5), ajoutées aux interfaces entre la couche active et les électrodes, sur les paramètres d'une cellule OPV conventionnelle.

### Introduction :

Dans ce chapitre nous décrirons les différentes filières technologies existant dans la fabrication des cellules solaires photovoltaïques, et nous introduisons des notions de base sur les matériaux organiques semi-conducteurs utilisés dans la fabrication des cellules solaires photovoltaïques organiques, les types de ces matériaux, et les polymères conjugués. Enfin nous présentons les différentes propriétés électriques et optiques d'une cellule OPV, ainsi que les points de différences qu'on peut les trouver entre cette nouvelle technologie et la technologie à base de silicium.

### I. Généralités :

#### I.1. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire c'est une énergie inépuisable qu'est disponible partout sur terre, elle pourrait couvrir parfaitement nos besoins énergétiques. L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par la conversion directe du rayonnement lumineux en électricité. Pour ce faire on utilise des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles cellules solaires photovoltaïques [5].

#### I.2. Le rayonnement solaire :

La terre reçoit une partie d'énergie parmi tout l'énergie émet par le soleil dans toute les directions. Le flux de puissance atteignant le sommet de l'atmosphère de la terre est d'environ  $1400 \text{ Watts} / \text{m}^2$  [7]. L'atmosphère relativement dense de la Terre filtre environ  $400 \text{ W/m}^2$ . Les rayonnements solaires constituent un spectre continu allant des ultra-violets à l'infrarouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Les rayons solaire prennent 8.33 minutes pour arriver à la terre puisque ils se propagent à une vitesse de  $3 \times 10^5 \text{ km s}^{-1}$  et la distance entre la terre et le soleil  $150 \times 10^6 \text{ km}$  [3].

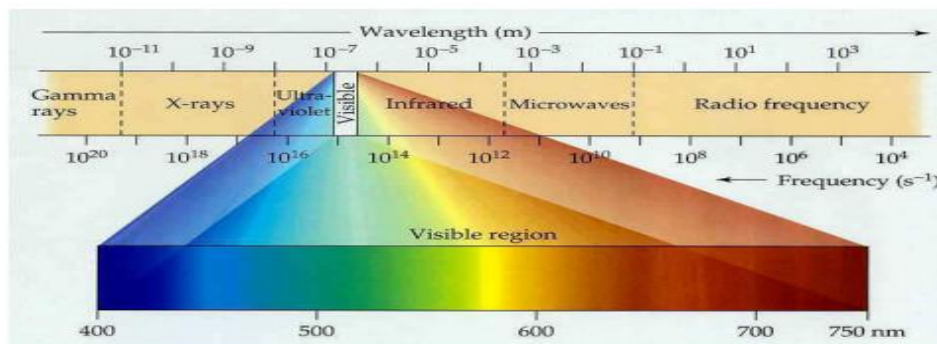
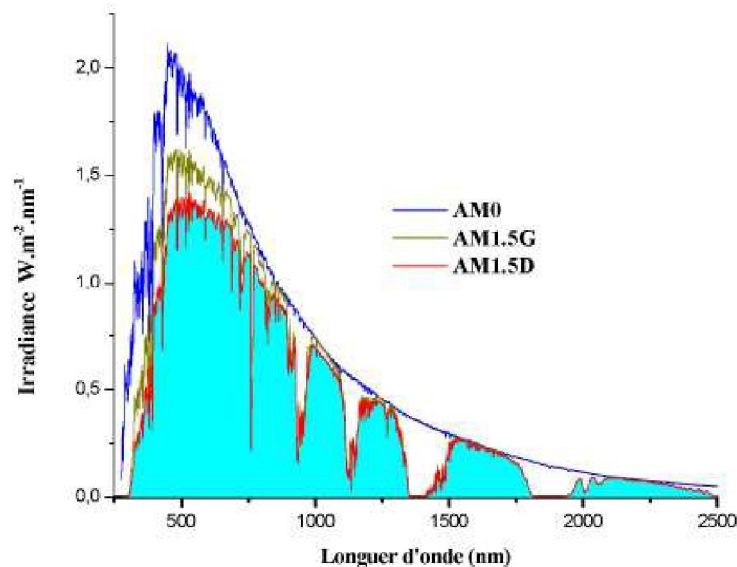


Figure I.1 : spectre solaire [3]

Le rayonnement solaire au sol dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux et n'est pas homogène sur toute la surface de la terre [6]. On introduit la notion «d'air masse» notée  $AM_x$  elle correspond à la perte d'énergie solaire par l'absorption atmosphérique.

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta}$$

Où  $\theta$  est l'angle de l'élévation solaire, c'est-à-dire l'angle entre le rayonnement solaire et l'horizontal à la terre.



**Figure I.2 :** Définition du nombre d'air masse (AM) et spectre d'émission du rayonnement solaire [8]

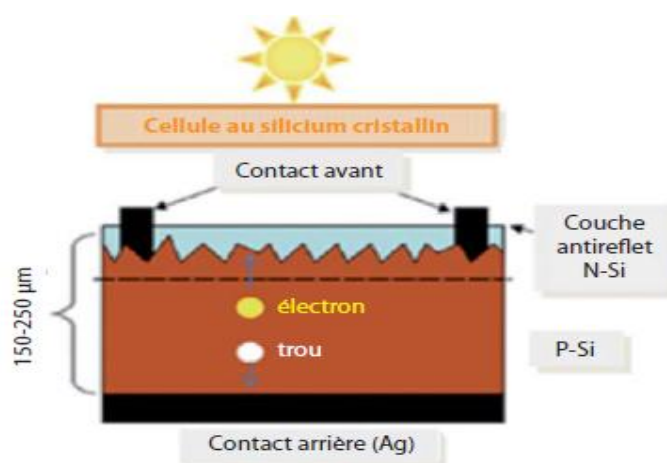
Par définition, AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un éclairement solaire au-delà de l'atmosphère à incidence normale. La masse d'air AM1.5G correspond à l'éclairement solaire arrivant à la surface de la terre en incidence normale. L'éclairement solaire arrivant sur la terre avec un angle de  $48^\circ$  est de  $1000 \text{ W/m}^2$  (soit  $100 \text{ mW/cm}^2$ ) avec une masse d'air AM 1,5D [9]. Cette dernière sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

## II. Les filières technologiques

La filière photovoltaïque en elle-même est une unité de nombreuses filières technologiques existantes, caractérisées soit par les matériaux employés, soit par leurs principes même.

### II.1. Filière silicium-cristallin

Cette technologie est constituée par des fines plaques de silicium qui sont extraites du sable ou du quartz. Le silicium est obtenu à partir d'un seul cristal (silicium monocristallin), ou plusieurs cristaux (silicium poly-cristallin). Actuellement cette filière est la plus répandue au marché. Le silicium cristallin est le matériau de base de près de 90% du marché mondial des modules photovoltaïques [10] suivi par le silicium amorphe avec 8.3% [11]. Les cellules en silicium cristallin ont un bon rendement de 18% [12].



*Figure I.3 : une cellule solaire à base de silicium cristallin [13]*

#### II.1.a. Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin peut être obtenu par deux méthodes de fabrication : la méthode de Czochlarski (Cz) consiste en la croissance d'un monocristal de silicium sous forme de lingot, à partir d'un creuset de silicium fondu, la méthode float zone (Fz) elle s'effectue sous vide [14]. Les cellules à base de silicium monocristallin ont un rendement de près de 16 à 19% [10].

#### II.1.b. Silicium poly-cristallin

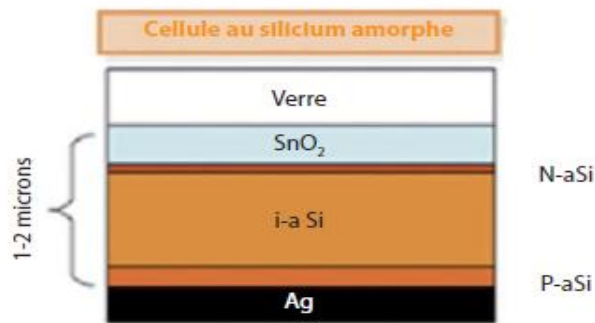
Autrement dit \*multi-cristallin\*, cette technologie permet d'avoir un rendement de près de 11 à 15% [5]. Le silicium multi-cristallin est produit dans un creuset en jetant du silicium fondu dans ce creuset pour le refroidir, en contrôlant la vitesse de refroidissement et aussi on peut contrôler la taille des cristaux formés lors de la solidification. Ce contrôle est crucial puisque les joints de grain ont un effet négatif sur les performances des cellules photovoltaïques [14].

### II.2. Filière couche minces

Les cellules en couches minces sont fabriquées à base d'une ou plusieurs couches semi-conductrices sur un substrat du verre ou du plastique [10]. La technologie en couche minces, qui utilise des couches absorbantes poly-cristallines ou amorphes concerne actuellement le a-Si hydrogéné, le GaAs, CdTe, et le CIGS. Ces matériaux sont considérés comme les meilleurs choix pour la production des cellules solaires à couches minces en raison de leurs bonnes propriétés optiques et de leurs bandes interdites souhaitables à l'absorption du spectre solaire, et cette technologie permettent de diminuer le cout de fabrication. Les cellules en couches minces les plus répandus au marché se sont :

#### II.2.a. Les cellules à base du silicium amorphe

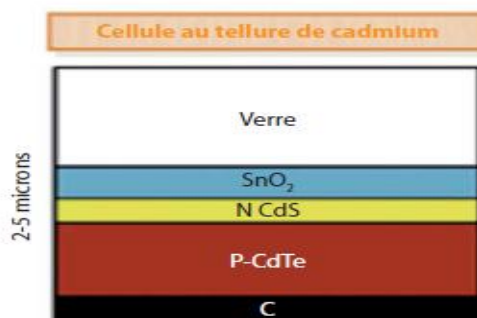
Appelé non cristallin qu'est composé par un silicium projeté, c'est un ensemble d'atomes désordonnés produit par déposition de silicium sur un substrat flexible, ces cellules sont utilisés dans la fabrication des montres et des calculatrices. Les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) [15].



*Figure I.4 : structure d'une cellule solaire à base du silicium non cristallin (amorphe) [13]*

#### II.2.b. Les cellules à base du tellurure de cadmium CdTe

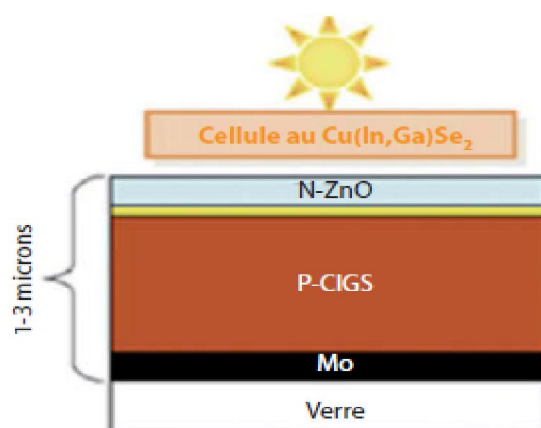
En laboratoire, il arrive à 16,5 % de rendement et 10 % dans le commerce [16], le CdTe déposé par électrochimie ou bien par évaporation, les procédés de dépôt sont extrêmement rapide de quelques seconds à quelques minutes [13], les films de CdTe présentent une résistance électrique relativement élevée qui engendre des pertes résistives et limitent le rendement de conversion.



*Figure I.5: structure d'une cellule solaire à base de CdTe [13]*

### II.2.c. Les cellules à base de sélénium de cuivre d'indium CIGS

Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Atteint 20 % de rendement en élaboration et 11% dans le commerce [16], ces cellules utilisent des matériaux poly-cristallins.



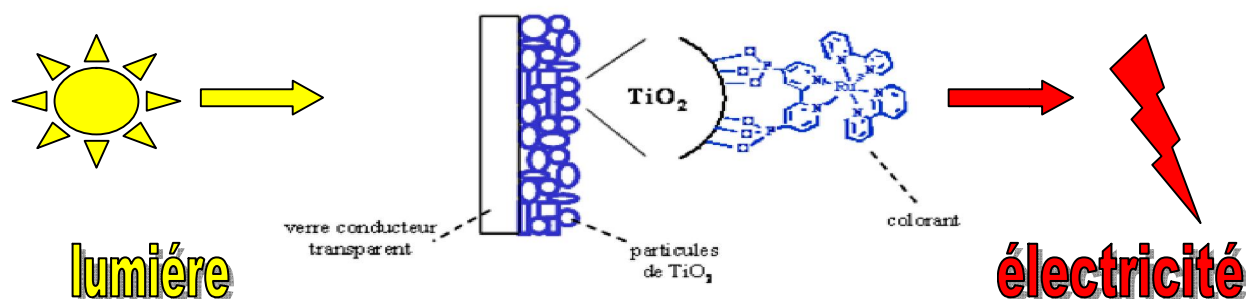
*Figure I.6 : structure d'une cellule solaire à base de CIGS [13]*

Et en plus on a d'autres technologies qui sont en stade de recherche et de développement :

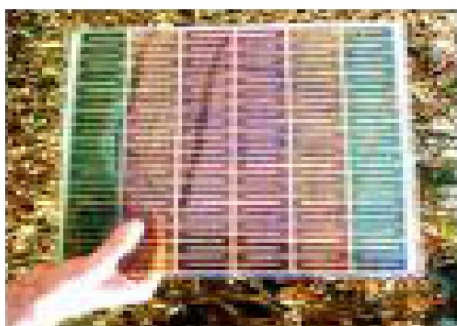
### II.3. Les cellules à colorant (Graätzel)

Le matériau de base est ici une molécule de colorant, la difficulté est de réaliser les contacts pour récupérer les électrons et les trous pour cette raison on utilise une couche d'oxyde de titane nano-poreux (TiO<sub>2</sub>) [17] pour récupérer les charges, à partir desquels on peut réaliser des interfaces de très grandes surfaces sur lesquelles on fixera une petite pellicule de molécule

photo-active. Le meilleur rendement obtenu est de l'ordre de 10.4% pour une cellule de 1 cm<sup>2</sup> [18].



*Figure I.7 : cellule solaire à colorant*



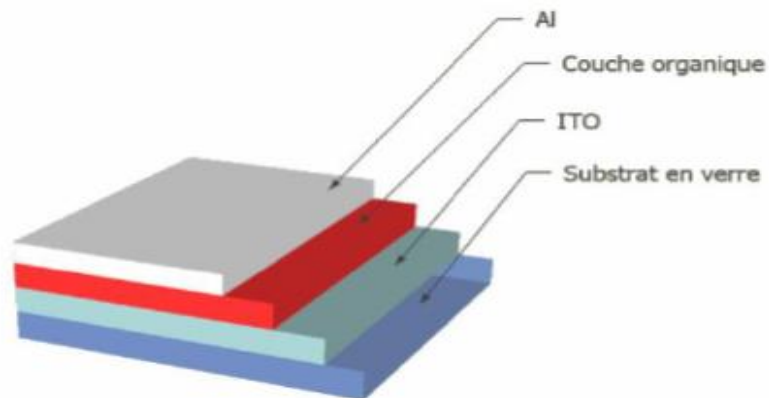
**Figure I.8** : cellule solaire à colorant [KONARKA Power Plastics, HELIATEK]

### II.4. Les cellules photovoltaïques organiques

Composées d'un semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat flexible en plastique, ou en verre, et par une couche active comprise entre deux électrodes (une anode transparente, et une cathode réfléchissante), elles ont des dimensions de quelques cm<sup>2</sup>, ce qui est suffisant pour les caractérisés [18]. Les électrodes transparents doivent avoir une transmission optique très élevée afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et possédant une bonne conductivité électrique et des propriétés de transparence très élevé dans le visible [19].

L'intérêt de cette nouvelle technologie est de fabriquer des films fins de matériaux organiques par des techniques maîtrisées comme l'évaporation thermique, le spin-coating et l'impression, son développement à grande échelle, et qui offrent un rendement moyennement

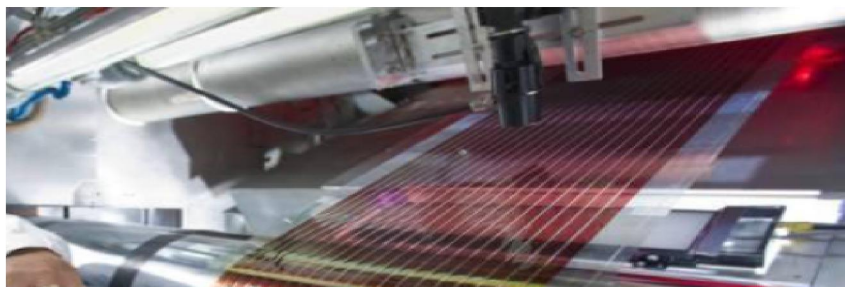
élevé de l'ordre de 5 à 7% [13] pour les meilleurs cellules avec une longévité (durée de vie) faible due à l'oxydation des couches par l'oxygène de l'air.



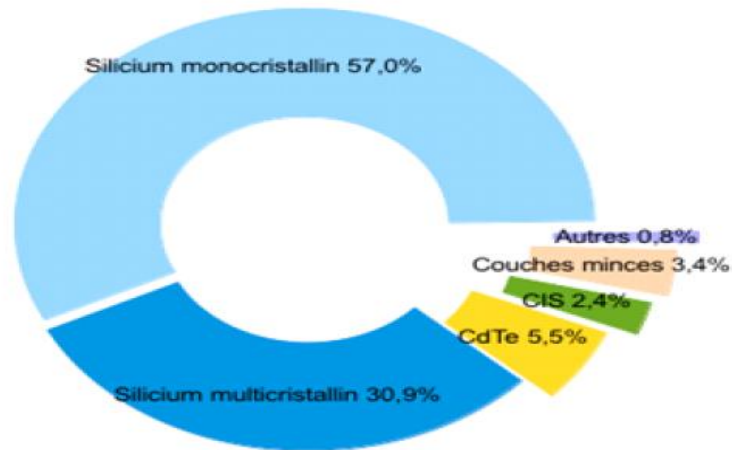
*Figure I.9: structure d'une cellule solaire organique [20]*



*Figure I.10: phototype de cellule organique flexible et transparente*



*Figure I.11: impression de cellules photovoltaïques organiques enroulables*



*Figure I.12: Répartition de la production des cellules photovoltaïques par technologie en 2011[14]*

### III. Les matériaux organiques semi-conducteurs

#### III.1. Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs

On peut classer les matériaux organiques en trois catégories : solubles, insolubles et cristaux liquides. Il existe deux familles de molécules dans les matériaux organiques : les petites molécules (oligomères), et les grandes molécules (polymères).

Dans les matériaux solubles les oligomères sont appelés \* **colorants**\*, par contre dans les oligomères insolubles sont appelés \***pigments**\*. La figure ci-dessous illustre le classement des matériaux semi-conducteurs organiques :

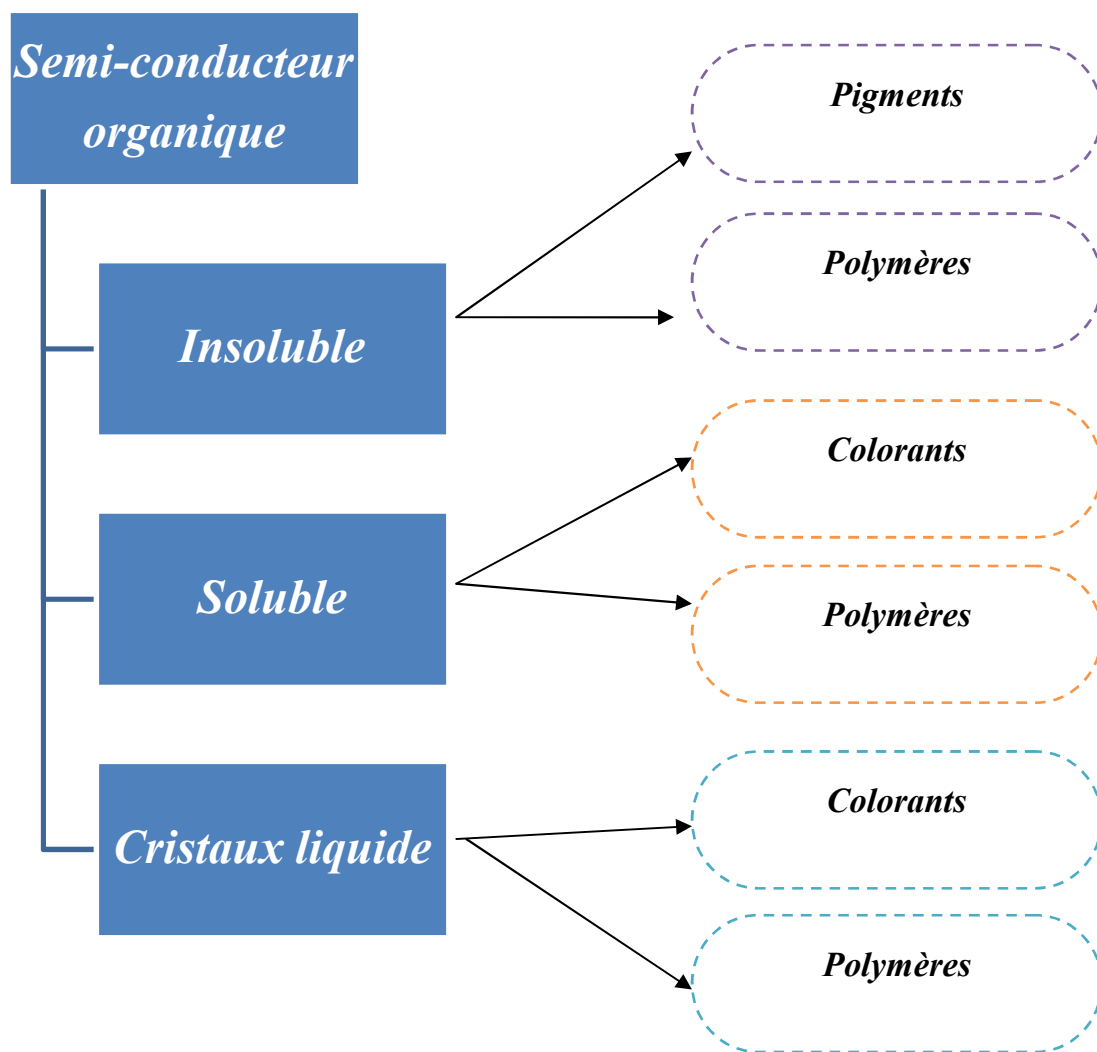


Figure I.13 : classement des semi-conducteurs organiques

### III.1.a. Petites molécules :

- **Pigments**

Sont les matériaux insolubles dans la plupart des solvants comme le fullerène (C<sub>60</sub>) [21], et le penta cène, et ils absorbent de la lumière visible. La figure suivante illustre certaines structures moléculaires de différents pigments utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques organiques.



*Figure I.14 : exemple d'un pigment insoluble (C60) qui peut être dérivé à un colorant soluble (PCBM) [13]*

- **Colorants**

Sont des matériaux solubles dans la plupart des solvants, et d'une masse molaire très petite. Le dépôt des pigments utilise la méthode d'évaporation sous vide qu'est très compliqués et qui prend beaucoup du temps.

- **Cristaux liquides :**

Ces matériaux sont différenciés par leur propriétés situées entre celles des matériaux liquides et celles des solides, ces matériaux portent des propriétés mécaniques similaire à celles des liquides, c'est-à-dire quelles sont moles [22]. Grace à leur grande mobilité de charge et leur longueur de diffusion des exciton importante, ces matériaux sont plus avantageux pour les cellules solaires organiques.

### III.1.b. Macromolécules

- **Les Polymères**

La découverte des polymères était en 1977 [23]. Un polymère est la dérivation de plusieurs monomères, c'est une chaîne d'atomes de carbones liés entre eux par des liaisons de type sigma  $\sigma$ . Ils sont caractérisés par leurs grandes masses molaires supérieures à 5000 g/mol [24] et par leurs propriétés électriques isolantes, dont les polymères ne peuvent pas être déposés par évaporation sous vide. Ils peuvent être: solubles, insolubles ou des cristaux liquides. Comme ils peuvent être utilisés comme donneurs ou accepteurs d'électrons.

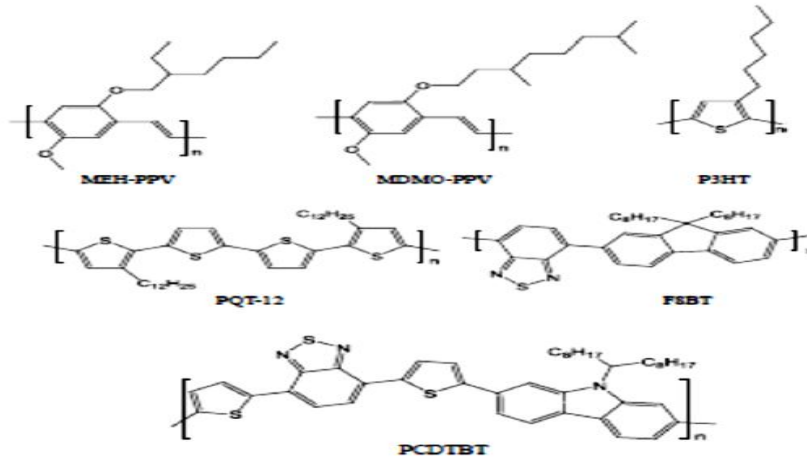


Figure I.15 : exemple de polymères semi-conducteurs [14]

### III.2. Les polymères conjugués

Par convention, le terme **\*organique\*** signifie que les molécules sont à base de carbone et d'hydrogène. Un semi-conducteur organique, qu'il soit un polymère ou une petite molécule, est constitué d'un squelette carboné, le carbone est donc l'élément principale qui le compose, la structure électronique du carbone est la suivante :  $(1S)^2 (2S)^2 (2P)^2$  [14], quand il est intégré dans une molécule, le carbone est hybride. C'est-à-dire que les orbitales s et p de la deuxième couche vont interagir de façon à former de nouvelles orbitales. Ces nouvelles orbitales permettent de mieux décrire les liaisons entre les carbones. Ici, la fusion des orbitales **s** et **p** va donc donner une orbitale hybride **sp**.

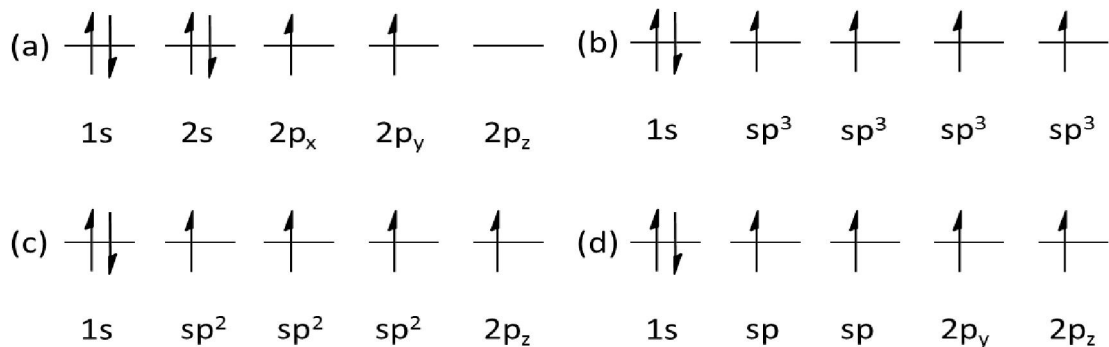
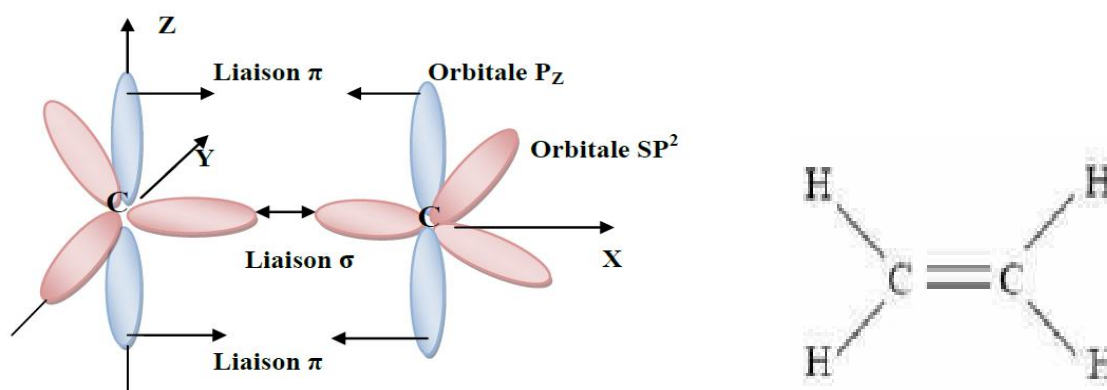


Figure I.16: état d'hybridation du carbone : (a) non hybridé, (b) hybridé  $sp^3$ ,  
(c) hybridé  $sp^2$ , (d) hybridé  $sp$  [22]

**sp<sup>3</sup>** : il s'agit de l'état d'hybridation d'un carbone intégré dans une liaison simple comme le diamant et les polyéthylènes [23]. Dans ce cas, le carbone est lié à quatre atomes différents par des liaisons  $\sigma$ , formées par le recouvrement des orbitales  $sp^3$

$sp^2$  : pour les carbones au sein d'une liaison double, c'est-à-dire que le carbone est lié deux fois au même atome comme l'éthylène et le benzène [23]. Cette double liaison est composée d'une liaison  $\sigma$  formée par le recouvrement des orbitales  $sp^3$  et d'une liaison  $\pi$  formée par le recouvrement des orbitales  $p_z$ .

$sp$  : dans le cas d'une triple liaison, où le carbone est lié trois fois au même atome comme l'acétylène [23]. Dans ce cas l'angle est plat. La triple liaison est formée toujours d'une liaison  $\sigma$ , mais cette fois-ci elle comporte deux liaisons  $\pi$ , formées par le recouvrement des orbitales  $p_y$  et  $p_z$ .

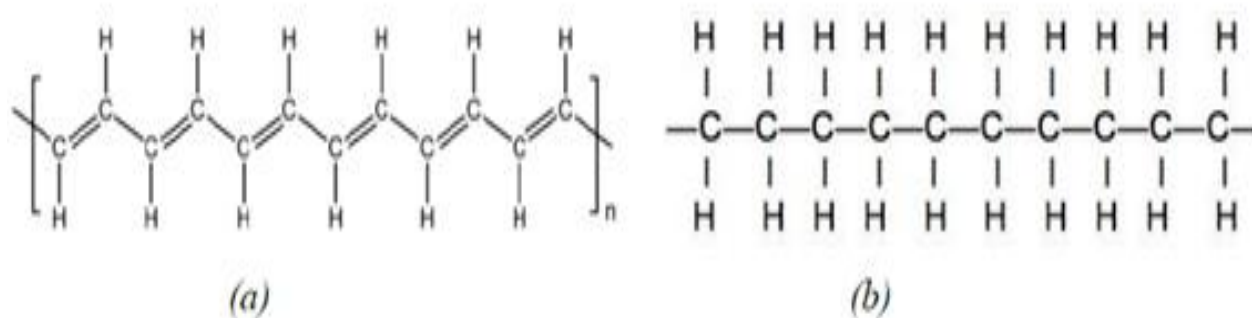


**Figure I.17 :** représentation de carbon hybridé  $sp^2$ , et de la double liaison ( $\pi, \sigma$ ) de la molécule d'éthylène [3-25]

La conjugaison désigne l'alternance de liaisons simples et doubles. L'exemple qui décrit le mieux la conjugaison est le poly-acétylène [22]. Les liaisons simples et doubles peuvent être échangées, on dit qu'elles sont conjuguées. Ce caractère conjugué va se manifester physiquement au niveau des longueurs de liaison : une liaison conjuguée va avoir une longueur intermédiaire entre celle d'une liaison simple et d'une liaison double.

La conjugaison des liaisons, et donc la forte mobilité des électrons sur la molécule, sont à l'origine des propriétés semi-conductrices des polymères conjugués.

Ainsi, tous les dispositifs électroniques organiques sont basés sur les propriétés physiques et chimiques caractéristiques de délocalisation des électrons des liaisons  $\pi$ .



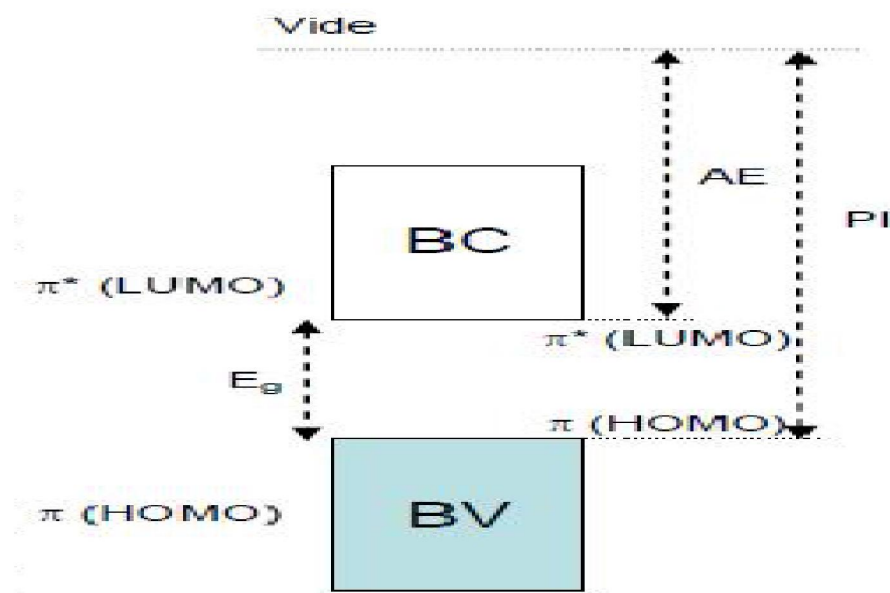
*Figure 1.18 : (a) polymère conjugué le poly-acétylène (b) polymère non conjugué le polyéthylène [26]*

### III.3. Création de bandes semi-conductrices organiques

Il est possible d'arriver au concept de bandes en suivant l'évolution des orbitales, atomiques puis moléculaires. L'orbitale atomique du carbone dans lequel se trouve l'électron se transforme en orbitale moléculaire lorsqu'on lie plusieurs atomes de carbones. Les orbitales **s** ou **sp** se recouvrant donnent des orbitales  $\sigma$ , les orbitales **p** se recouvrant donnent des orbitales  $\pi$  un nuage d'électrons. Lorsque deux atomes des carbones se combinent, les orbitales moléculaires créées par la mise en commun des électrons ont des énergies bien définies. La physique quantique prévoit deux cas lors de la formation d'une liaison : la création d'une orbitale stable de basse énergie, dite liante, et celle d'une orbitale instable, de haute énergie, dite anti liante, notée  $\pi^*$ . Les orbitales  $\pi$ , permettant la délocalisation des électrons sur toute la molécule, qui nous intéressent. A l'état fondamental, les électrons se trouvent sur l'orbitale  $\pi$ , alors que l'orbitale  $\pi^*$  est vide. Lorsqu'on augmente le nombre de carbones liés, on déstabilise légèrement les orbitales liantes et on stabilise les anti-liantes. Ainsi, dans le cas de polymères conjugués, l'alternance d'un grand nombre de liaisons simples et doubles regroupe ces niveaux d'énergie en bandes, ils ne sont plus discrets.

Les bandes ainsi créées sont appelées « Bande de conduction » et « Bande de valence ». La HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) est l'équivalent organique de la bande de valence qu'elle est formée par l'association des liaisons liantes  $\pi$ . La différence d'énergie entre le vide et la HOMO est le potentiel d'ionisation, c'est l'énergie nécessaire pour arracher un électron à la molécule. Tandis que, la LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) correspond à la bande de conduction qu'elle est formée par l'association des orbitales anti-liantes  $\pi^*$ . La différence entre le niveau énergétique du vide et la LUMO est l'affinité électronique. Il s'agit de l'énergie nécessaire pour réduire la molécule, en lui ajoutant un

électron. La différence d'énergie entre la HOMO et la LUMO correspond à la bande interdite, ou « gap » avec une grandeur qui comprise entre 1.5 et 3 eV [25]. Lorsqu'on augmente la longueur de conjugaison l'écart entre les niveaux diminue [15].



*Figure I.19 : la structure des bandes dans un semi conducteur organique*

### III.4. Le dopage des polymères et la création des polarons et des bipolarants dans la bande interdite :

Dans les semi-conducteurs inorganiques quelques atomes sont remplacés par des ions en excès (par exemple le phosphore ou le bore pour le silicium) ce qui leur procure le type N ou P. Les semi-conducteurs organiques peuvent être dopés par l'ajout d'un réactif chimique qui oxyde (ou réduit) le système [27], ce qui fait transfère les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, rendant le système plus conducteur. Il existe deux principales méthodes de dopage :

- **Dopage chimique**

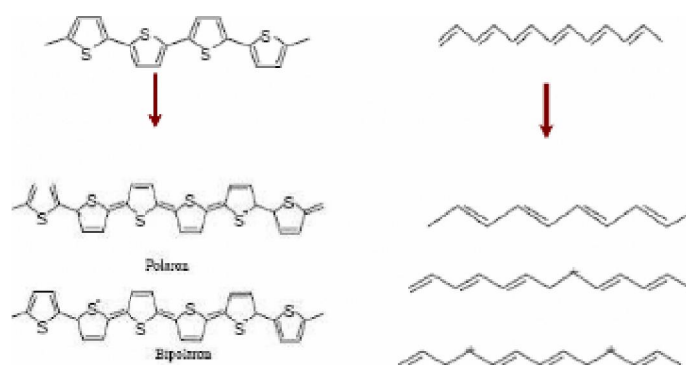
Consiste en une réaction d'oxydation (dopage P) ou réduction (dopage N). Les atomes dopants introduisent des trous ou des électrons, comme le poly acétylène dopé P.

- **Dopage électrochimique**

Utilise une électrode recouverte d'un polymère et baignant dans une solution électrolytique dans laquelle le polymère est insoluble [27]. On applique une tension entre les électrodes qui provoque un mouvement des ions de la solution et des électrons qui se fixent sur le polymère traité, ou s'en échappent. Donc on obtient un semi-conducteur organique type N ou type P respectivement. On note que le dopage N est moins courant que le dopage P.

### **Polarons et bipolarons :**

Lorsque le taux de dopage augmente, les niveaux apparus dans la bande interdite se recouvrent, et la notion de bandes de polarons ou solitons est introduite. Dans tous les cas, la formation d'un polaron, bipolaron ou soliton maintient la bande de valence pleine et la bande de conduction vide. Par conséquent, les espèces porteuses de charges sont des polarons chargés, des solitons chargés ou des bipolarons chargés. Ces espèces, solitons, polarons et bipolarons, sont responsables des propriétés électriques, magnétiques et optiques des polymères conjugués. Cette particularité a des conséquences directes sur les mécanismes de transport: la conduction se déroule par saut des porteurs de charges d'un état localisé à un autre, plutôt que par propagation cohérente des électrons ou des trous dans un matériau cristallin. Par conséquent, certaines propriétés peuvent alors être interprétées en termes de bande de soliton ou de polaron [27].



**Figure I.20 :** (a) Système non dégénéré (b) système dégénéré [27]

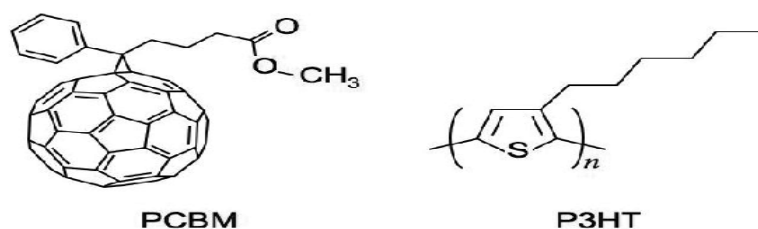
Parmi les intérêts de dopage des polymères dans les semi-conducteurs organiques c'est d'augmenté la conductivité, et le dopage peut avoir un rôle important dans la mise en solution du polymère et dans l'organisation structurale de celui-ci [25].

### III.5. Les propriétés des matériaux semi-conducteurs organiques

Le photovoltaïque organique est une nouvelle technologie pour l'exploitation de l'énergie solaire, un matériau organique semi-conducteur est un composé organique sous 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 et la présence d'une bande interdite.

#### III.5.a. Propriétés électroniques

On peut classer les matériaux organiques en deux types : un matériau accepteur d'électrons (A) et un matériau donneur d'électrons (D) [14]. L'accepteur c'est le plus avide d'électrons et le donneur est celui qui cède facilement ses charges négatives. Pour le matériau accepteur on a prit comme exemple le PCBM (matériau moléculaire) et comme donneur le P3HT (matériau polymère).



**Figure I.21** : exemple de deux matériaux utilisés dans les cellules organiques [18]

Ce classement se fait par la comparaison des positionnements relatifs des niveaux LUMO et HOMO de chacun de ces matériaux. Le matériau donneur est celui qui possède le plus faible potentiel d'ionisation tant dis que le matériau accepteur admet la plus forte affinité électronique.

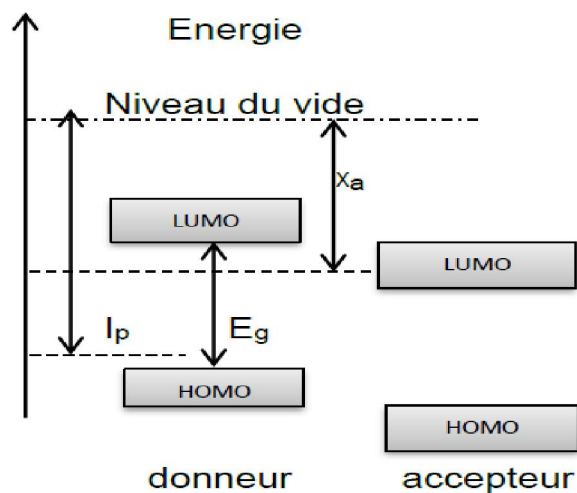


Figure I.22: diagramme énergétique d'un matériau semi-conducteur donneur ou accepteur d'électrons [14]

Ici on ne parle pas de type n et de type p, car cette dénomination est déterminée par la nature du dopant. Or dans les organiques les matériaux ne sont que rarement dopés [18].

La figure ci-dessous compare les niveaux des bandes HOMO et LUMO des principaux matériaux organiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques :

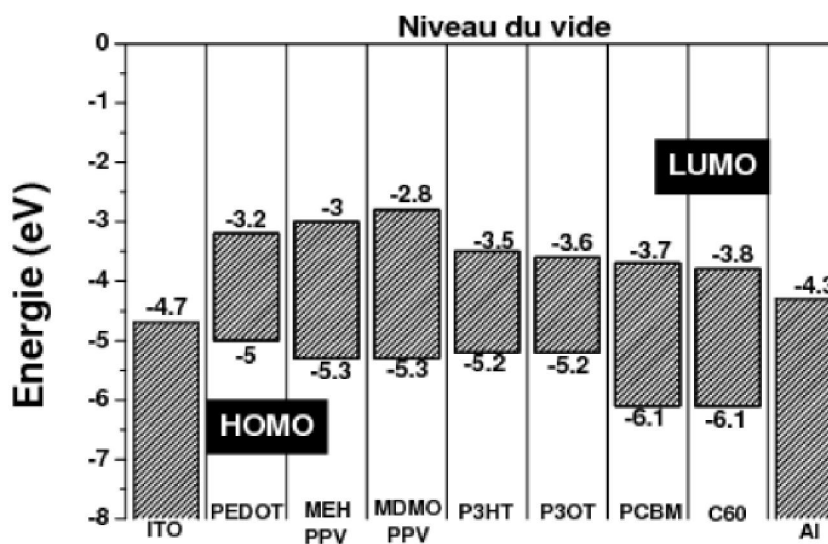


Figure I.23: diagramme des bandes d'énergie des polymères conjugués et des accepteurs utilisés dans la cellule solaire organique [28]

### III.5.b. Propriétés optiques

Les propriétés d'absorption des semi-conducteurs organiques dépendent de la largeur de la bande interdite, qu'est la différence entre le niveau HOMO et le niveau LUMO [14], et cette bande interdite diminue en fonction de la longueur de conjugaison du polymère figure (I.23) [29].

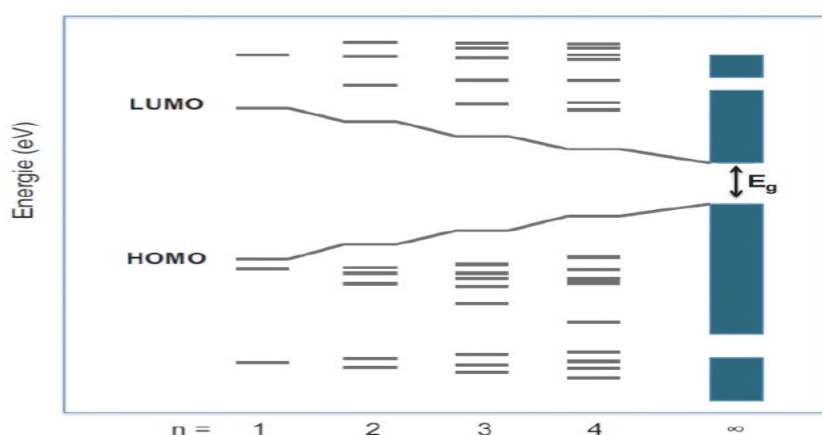


Figure I.24 : la formation des bandes selon la conjugaison du polymère [29]

### III.5.c. Propriétés de transport

Le transport des charges dans les semi-conducteurs organiques se fait par sautes successifs \*hopping\*, et on a deux types de transport [14]:

- **Transport intramoléculaire**

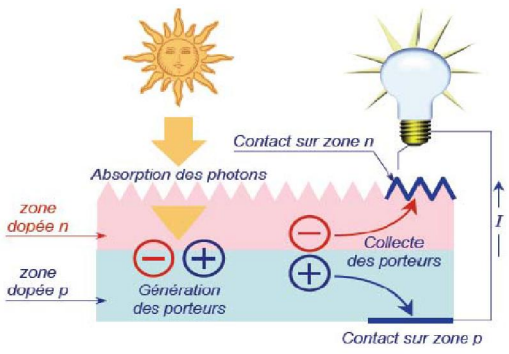
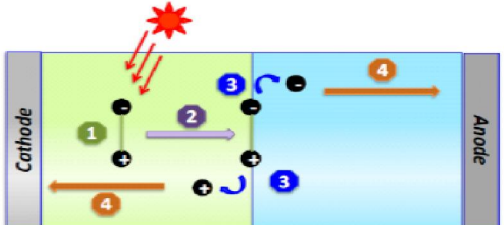
Ce transport peut se faire au long de la chaîne conjuguée, mais il peut porter plusieurs défauts structuraux.

- **Transport intermoléculaire**

Appelé inter-chaîne, permet aux charges de passer d'une molécule à une autre de deux chaînes voisines. La mobilité des charges est dans la plus part des cas limitée par ce transport inter-chaîne [30].

**IV. La différence entre les cellules à semi-conducteurs inorganiques et organique**

Le tableau ci-dessus résume les caractéristiques principales des cellules photovoltaïques inorganiques et des cellules photovoltaïques organiques

<b>Les cellules à semi-conducteurs inorganiques</b>	<b>Les cellules à semi-conducteurs organiques</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• l'énergie de liaison de l'exciton est faible</li> <li>• Les matériaux les plus utilisés : le silicium, le CdTe et le CIS</li> <li>• <b>Le principe de fonctionnement [12]:</b></li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Paramètres électriques :</b></li> </ul> <p><math>\mu_e=1450\text{cm}^2/\text{v.s}</math> (SI)  <math>\mu_h=480\text{cm}^2/\text{v.s}</math> (SI)          Paire électron-trou: <math>E_i= \text{mev}</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Son rendement de conversion est peut arriver jusqu'à 46%</li> <li>• Son gap est de 0.36 à 3.6 eV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'énergie de liaison de l'exciton est très grande</li> <li>• Les matériaux les plus utilisés : PCBM, P3HT, MEH-PPV, MDMO-PPV, PCPDTBT</li> <li>• Le spectre d'absorption est nettement très étendu</li> <li>• le transport des charges s'effectue par sauts successifs</li> <li>• La couche photo-active est très fine</li> <li>• Son moins fragiles, peuvent se rouler comme une feuille</li> <li>• <b>Le principe de fonctionnement [31] :</b></li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Paramètres électriques :</b></li> </ul> <p><math>\mu_e=0.6\text{cm}^2/\text{v.s}</math> (C60)  <math>\mu_e=0.1\text{cm}^2/\text{v.s}</math> (P3HT)          Exciton : <math>E_i=0.25\text{ev}</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Son rendement est de l'ordre de 12%</li> <li>• Son gap est de 1.75 à 2.5 eV</li> </ul>

**Tableau I.1 : comparaison entre les cellules solaires organiques et inorganiques**

### **Conclusion:**

Nous avons pu cerner, grâce à ce premier chapitre, les tenants et les aboutissants du développement de l'énergie photovoltaïque, et l'importance qu'elle aura dans le monde de demain. L'ensemble des différentes technologies permettant de produire de l'électricité d'origine photovoltaïque a été présenté, et l'importance de la technologie à base des semi-conducteurs organiques car cette nouvelle technologie est la source d'énergie de l'avenir grâce à ces multiples avantages.

### Introduction :

Les performances des cellules solaires organiques dépendent de nombreux paramètres, tels que l'absorption, le transport de charge, la longueur de diffusion, les états interfaces, etc. Le choix des matériaux photo-actifs et des électrodes métalliques est nécessaire pour obtenir un bon rendement de conversion [3]. Ce dernier peut être amélioré en utilisant des polymères conjugués ayant un coefficient d'absorption élevé, une bonne conductivité électrique et une structuration adéquate de la couche photo-active. La stabilité et la durée de vie des cellules solaires organiques à base des polymères conjugués sont aussi des paramètres à considérer pour qualifier ces cellules [32]. Dans cette partie nous aborderons les principes de fonctionnement des cellules solaires organiques ainsi que leurs paramètres photovoltaïques. Nous présenterons les différentes structures actuellement exploitées. Et parmi les solutions les plus utilisés pour améliorer les performances d'une cellule organique c'est d'ajouter des couches inter-faciales, dont dans ce chapitre nous avons alloués une partie pour définir les types de ces couches et les matériaux utilisés, et les conditions requises chaque couche anodique et cathodique et le rôle de chaque une. En fin nous avons citées quelques avantages de cette nouvelle technologie.

### I-Principe de fonctionnement d'une cellule organique :

Dans les OPVs, le passage d'un photon à un électron peut être décomposé en quatre étapes, représentées schématiquement sur la figure suivante :

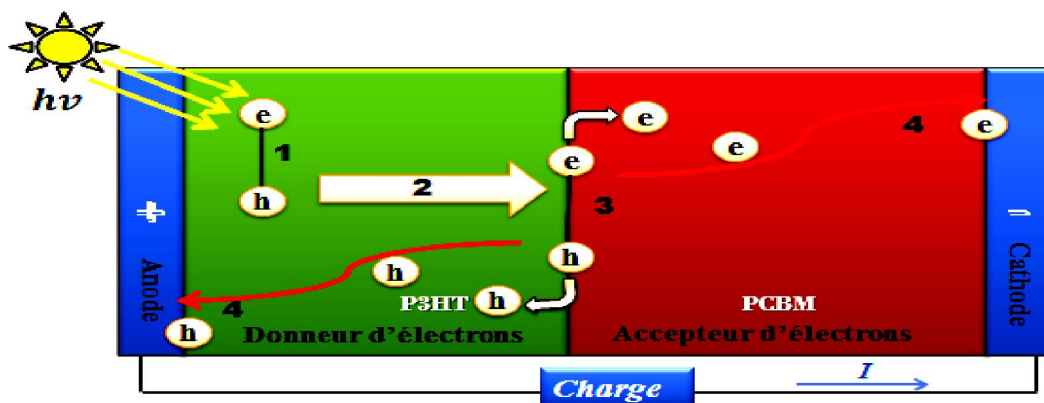


Figure II.1 : le principe de fonctionnement d'une cellule solaire organique [33]

#### I.1. L'absorption des photons

L'absorption des photons se fait dans la couche active est plus grand dans la partie des donneurs, et il diminue dans la partie des accepteurs

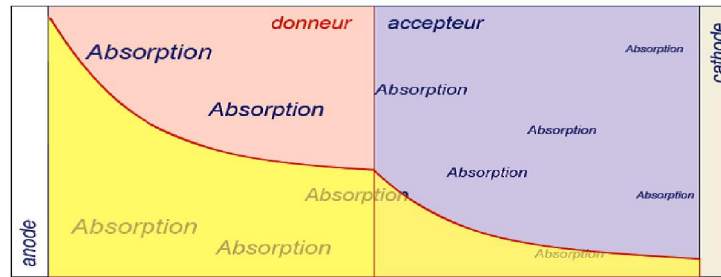
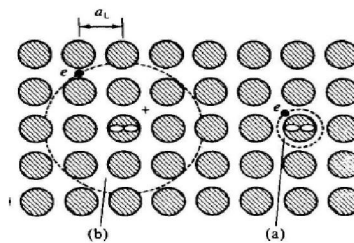


Figure II.2 : la distribution des photons sur une cellule organique [12]

### I.2. Création des excitons

L'absorption de la lumière par le semi-conducteur ne conduit pas directement à la création des porteurs de charges électroniques libres, mais il se forme un intermédiaire appelé exciton qu'est électriquement neutre [15]. Le photon absorbé par la couche active excite un électron, qui se trouve dans les liaisons chimiques entre les atomes de la bande HOMO, donc l'électron passe de son niveau d'équilibre à un niveau supérieur et il va laisser un trou qui reste lié à l'électron par une force d'interaction.

On a deux types d'excitons [22] :



- (a) exciton de Frenkel fortement lié
- (b) exciton de Wannier faiblement lié

Dans les matériaux organiques,

les excitons sont plus considérés de type Frenkel c'est-à-dire un électron et un trou en forte interaction ; leur énergie varie entre 0.1 et 1.4 eV [34-35] ce qui ne permet pas une dissociation thermique.

### I.3. La diffusion et la dissociation des excitons

La diffusion des excitons se fait vers l'interface des matériaux donneurs et accepteurs, La longueur de diffusion typique est de l'ordre de 10nm [36].

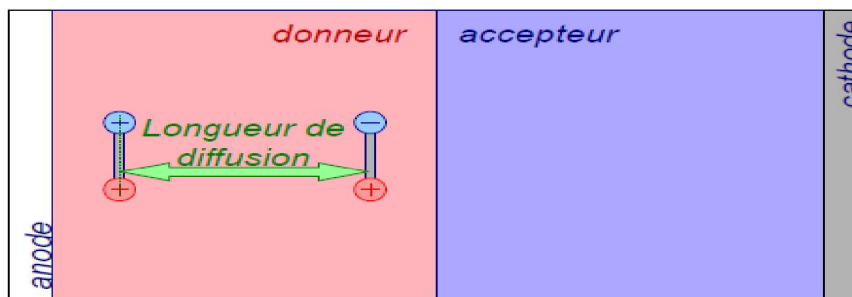


Figure II.3: la diffusion des excitons [12]

L'exciton est électriquement neutre [14], par conséquent, il ne transporte pas de courant. La production du courant nécessite la dissociation (séparation) de celui-ci. Cette séparation nécessite une énergie supérieure à l'énergie de liaison de l'exciton [37]. Dans le cas où la longueur de diffusion de l'exciton est suffisamment grande pour rencontrer un champ interne, cela implique une dissociation des charges autrement dit séparation des charges. La différence d'affinité électronique entre les deux matériaux donneur et accepteur offre un taux acceptable de dissociation des excitons à l'interface, et si l'exciton dépasse sa durée de vie avant qu'il arrive à l'interface, il va devenir une chaleur (un phonon).

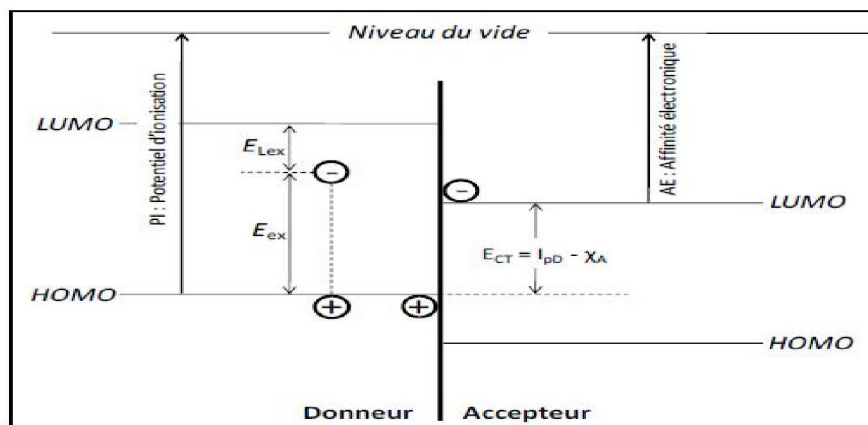


Figure II.4 : la condition de la dissociation  $E_{ex} > PI - AE$  [15]

Si la différence d'énergie entre le niveau LUMO du donneur et le niveau LUMO de l'accepteur est au moins égale à 0.3eV [14] donc il y aura une dissociation si non la dissociation sera peu probable.

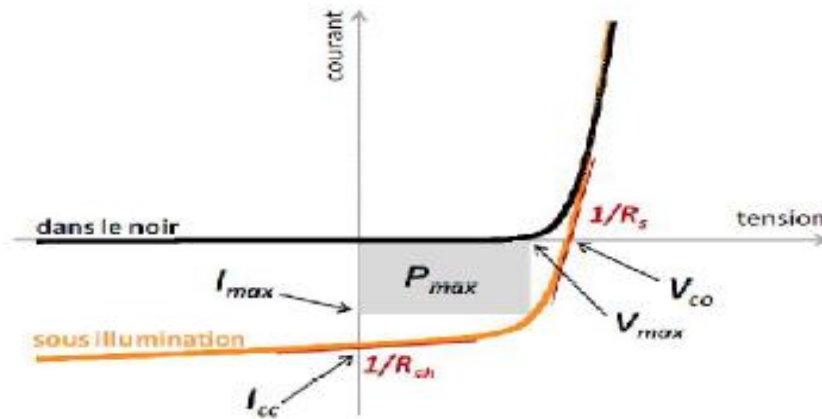
#### I.4. Le transport et la collecte des charges

La dernière étape de la conversion photovoltaïques consiste à remmener les porteurs des charges jusqu'aux électrodes est assurée la collecte des trous vers l'anode par le donneur d'électrons, pour les collectés on peut utiliser les métaux à fort travail de sortie comme l'Or et le Platine. La collecte des électrons vers la cathode est assurée par l'accepteur d'électrons en utilisant les métaux dont le travail de sortie est faible comme l'Aluminium, le Calcium et l'Argent [14] qu'ils sont les plus utilisés qui permettent d'obtenir un contact ohmique avec les matériaux transporteurs d'électrons. Une fois les excitons sont dissociés, l'efficacité de collectes des charges libres aux électrodes théoriquement est élevée ( $\eta_{cc} \approx 100\%$ ) car les contacts SC/Métal sont de type ohmique.

L'ITO (oxyde d'indium et oxyde d'étain) est un mélange d'oxyde d'indium et d'oxyde d'étain [14], c'est le composé le plus utilisé comme anode car il admet une semi transparence dans le visible et une bonne conductivité électrique.

**II. Les caractéristiques courant-tension et schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque :**

Les caractéristiques courant-tension sont utilisés pour déterminer les paramètres suivants : la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$ , le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , le facteur de forme FF, et le rendement de conversion de puissance  $\eta$

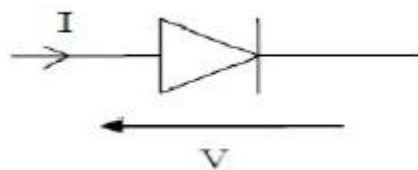


*Figure II.5: caractéristiques courant-tension et paramètres physique d'une cellule PV organique [38]*

Dans l'obscurité la caractéristique (I/V) passe par l'origine tandis que la courbe sous illumination est déclarée par rapport à la première valeur  $I_{cc}$  qui traduit la génération constante par la lumière ; dans ce cas la caractéristique courant-tension est similaire à celle d'une diode classique décrite par l'équation suivante [39]:

$$I = I_d - I_{ph} \tag{II.1}$$

$$\text{Avec } I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1 \right] \text{ (dans l'obscurité)} \tag{II.2}$$



On aura:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (\text{II.3})$$

**I** : le courant traversant la diode

**I<sub>s</sub>** : le courant de saturation à  $V < 0V$ , sous polarisation inverse

**e** : la charge des porteurs mobiles

**V** : la tension de polarisation avec  $V = V_{\text{appliqué}} - V_{\text{barrière de potentiel}}$

**n** : le coefficient d'idéalité  $0 < n \leq 1$

**k** : la constante de Boltzmann

**T** : la température absolue

## II.1 Les paramètres des cellules photovoltaïques organiques

### II.1.a La tension de circuit-ouvert $V_{co}$ :

On obtient cette tension quand aucun courant ne circule dans la cellule ( $I=0$ ) ;  $V_{co}$  dépend de la qualité des interfaces métal/semi-conducteur, de la mobilité des porteurs et de l'état de transfert de charge à l'interface donneur/accepteur [40], dépend aussi de la différence des travaux de sortie des électrodes et les matériaux constituant ces derniers, les contacts avec la couche active et sa morphologie, et cette tension varie peu avec l'intensité lumineuse [41].

La tension de circuit ouvert dépend de l'éclairement de la cellule, quand  $I_d=0$  dans l'expression du courant de la cellule sous illumination, on obtient:

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

On distingue deux cas :

- Dans le cas où  $I_{ph} \ll I_s$  donc il s'agit d'un régime des faibles flux lumineux

Soit 
$$V_{co} = \frac{KT}{q} \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.5})$$

- Dans le cas où  $I_{ph} \gg I_s$  donc il s'agit d'un régime de fort flux lumineux

Soit 
$$V_{co} = \frac{KT}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.6})$$

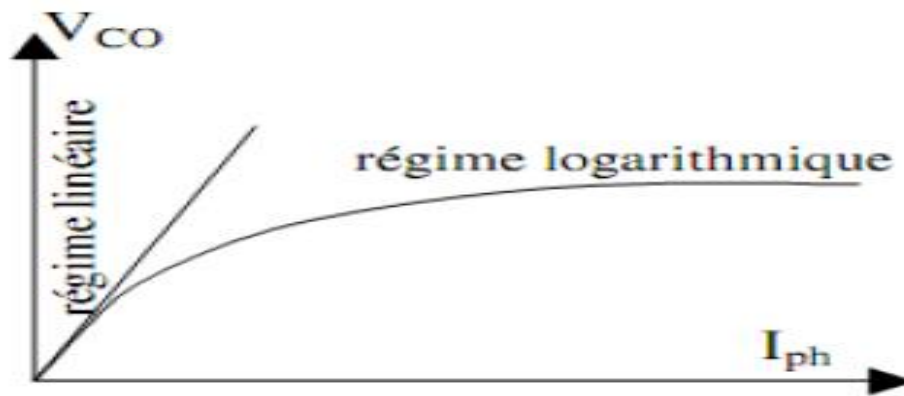


Figure II.6 : Les deux régimes selon la puissance d'éclairement [25]

Les pertes de charges aux niveaux des deux électrodes diminuent la valeur de  $V_{co}$  [25], et pour améliorer cette valeur il faut améliorer l'adéquation entre le travail de sortie de l'électrode et la HOMO du donneur ou la LUMO de l'accepteur et pour le faire on doit ajouter des couches intermédiaires ; ou bien il suffit de traiter les surfaces des électrodes.

### II.1.b. Le courant de court-circuit $I_{cc}$

On obtient le courant de court-circuit, quand on applique une tension nulle aux bornes de la cellule ( $V=0$ ), cela en fonction de la température, de la longueur d'onde, surface de la couche active et de la mobilité des porteurs, linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue, et la morphologie de la couche active qui a un impact direct sur le courant et sur le rendement de conversion.

Le courant de court circuit  $I_{cc}$  est donné par l'expression suivante:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (II.7)$$

Avec :  $I_{ph}$  : le photocourant

$R_s$  : résistance série

$R_{sh}$  : résistance shunt

Dans le cas idéal on sait que ( $R_s$  tend vers 0, et  $R_{sh}$  tend vers  $\infty$ ) donc  $I_{cc}$  devient :

$$I_{cc} = I_{ph}$$

Il faut noter aussi que les facteurs essentiels pour améliorer ce courant se sont le faible gap et la mobilité élevée des matériaux utilisés.

### II.1.c Le facteur de forme FF

Il représente le rapport de la puissance électrique maximale fournie sur la puissance maximale théorique.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co.Icc}} = \frac{V_{max}.I_{max}}{V_{co.Icc}} \quad (II.8)$$

Ce paramètre est lié au nombre des porteurs de charge collecter aux électrodes, il dépend donc de la mobilité des porteurs et de la qualité des interfaces.

### II.1.d Le rendement de conversion de puissance $\eta$

Se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.V_{co.Icc}}{P_{in}} \quad (II.9)$$

Si S est la surface de la cellule (en m<sup>2</sup>) et E est l'éclairement-irradiante (en W/m<sup>2</sup>). Le rendement énergétique s'écrit [42]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}*S} \quad (II.10)$$

Avec S : est la surface de la cellule photovoltaïque

L'efficacité maximale de conversion d'une cellule est signifié pour une distribution spectrale et une intensité donnée.

## II.2. Schéma équivalent de la cellule OPV :

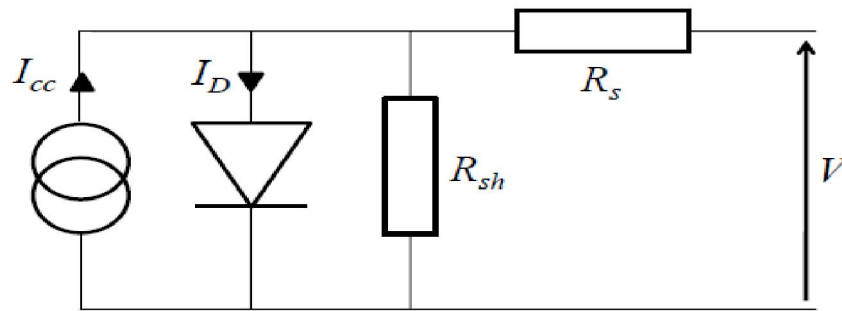


Figure II.7 : schéma équivalent de la cellule PV organique

**C** : la capacité, elle prend en compte les phénomènes de charge et décharge

**Rs** : résistance série

**Rsh** : résistance shunt

Avec **Rsh** >>> **Rs**

Dans le cas idéales **Rsh** =  $\infty$  et **Rs** = 0 [43]

Sous illumination la tension appliquée est supérieure ou inférieure à une tension de seuil, la diode est respectivement passante ou bloquante [44].

Autrement dit :

Si **Vappliqué** >> **Vs** => la diode est passante

Si **Vappliqué** << **Vs** => la diode est bloquante

Avec **Vs** est la tension de seuil de la diode dans une cellule solaire photovoltaïque qui égale à 0.7eV

**Rs** est une résistance série lié à la résistivité volumique, elle dépend des matériaux choisis et à l'impédance des électrodes. La pente de la courbe I(V) au point **Vco** représente l'inverse de **Rs** (**1/Rs**).

**Rsh** est une résistance shunt lié aux effets de bord et à la recombinaison volumique. La pente de la courbe I(V) au point **Icc** représente l'inverse de **Rsh** (**1/Rsh**).

Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenté  $R_{sh}$  [45]. L'influence de ces deux paramètres sur la courbe  $I(V)$  est donnée sur la figure suivante :

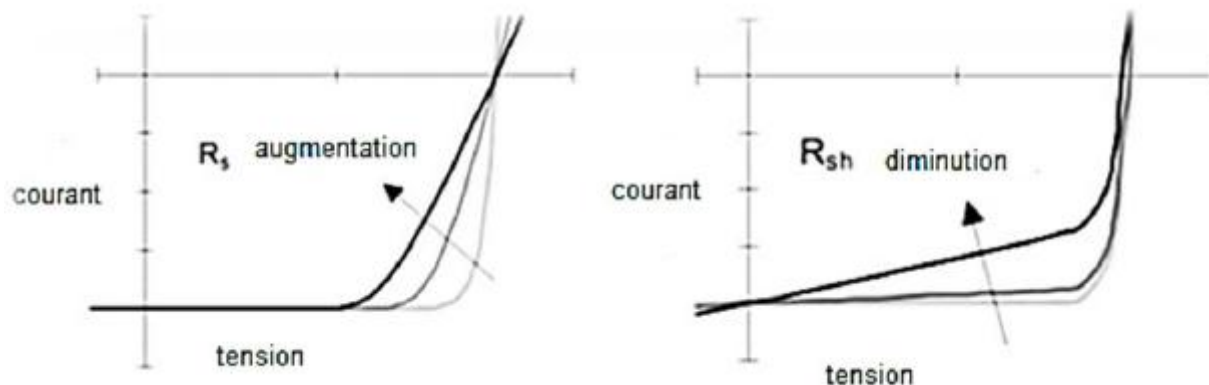


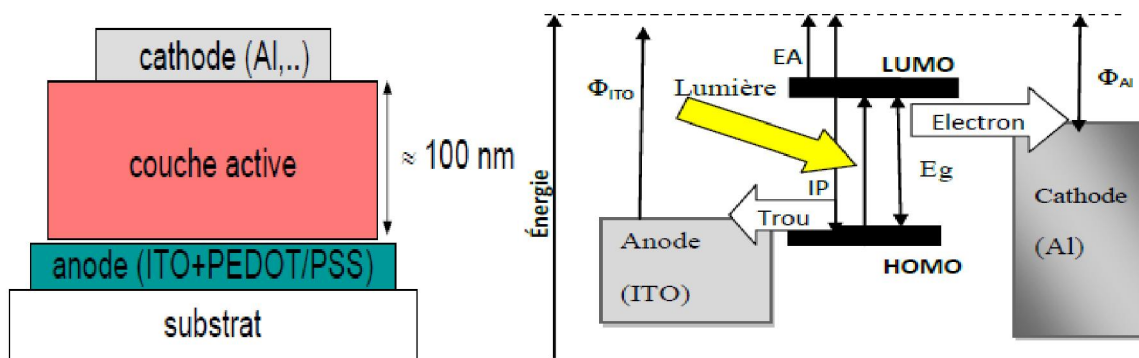
Figure II.8 : influence théorique de la résistance  $R_s$  et  $R_{sh}$  sur la courbe  $I(V)$  [14]

### III. les différentes structures des OPVs

#### III.1. Les structures conventionnelles

##### III.1.a. La structure monocouche :

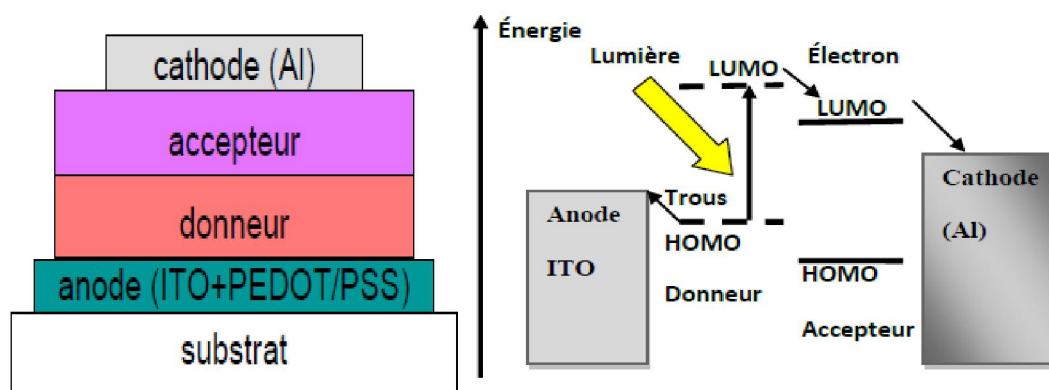
Appelée structure Schottky, cette structure est constituée par polymère conjugué unique déposé entre deux électrodes. La dissociation des porteurs photo-générés s'effectue à l'interface du semi-conducteur avec l'électrode métallique qui implique l'apparition du photocourant. Les performances de ce type restent très faibles [46]. Le faible rendement dans les dispositifs photovoltaïques organiques monocouche est dû au fait que la dissociation des excitons exige une énergie plus haute que l'énergie thermique à température ambiante.



**Figure II.9 :** la structure d'une cellule monocouche à gauche, et les niveaux d'énergie d'une cellule monocouche à droite [12-25]

### III.1.b. La structure bicouche

Cette structure est composée par deux matériaux de nature différente, dans le quel le matériau donneur (ou de type P) est en contact avec l'anode, et le matériau accepteur (type N) avec l'électrode métallique (comme l'Aluminium). Les performances obtenues pour des structures bicouche à base de petite molécule sont supérieures à celle obtenues à base de polymères (monocouches), les meilleures performances obtenues avec cette structure sont de l'ordre de 5% [7]. La zone de dissociation des excitons se situe à l'interface entre ces deux couches. Par rapport à la structure monocouche la bicouche permet d'augmenter le taux de dissociation des excitons grâce au mécanisme photo-induit à l'interface des matériaux D/A. la structure bicouche présente en effet une faible longueur de diffusion des excitons [14], ce qui diminue l'efficacité de la cellule.



**Figure II.10:** la structure d'une cellule bicouche à gauche, et les niveaux d'énergie d'une cellule bicouche à droite [12-25]

### III.1.c. La structure réseau interpénétré (hétérojonction en volume)

C'est un mélange moléculaire entre le donneur et l'accepteur d'électrons, les cellules de ce type présentent une plus grande interface Donneur/Accepteur, se qui implique une multiplication des zones interraciales entre les matériaux donneurs et les matériaux accepteurs et réduire les problèmes de perte. Les excitons atteignent également plus vite les sites de dissociation, et quel que soit l'endroit où l'exciton est photo-généré il est susceptible de diffuser à l'interface et se dissocier.

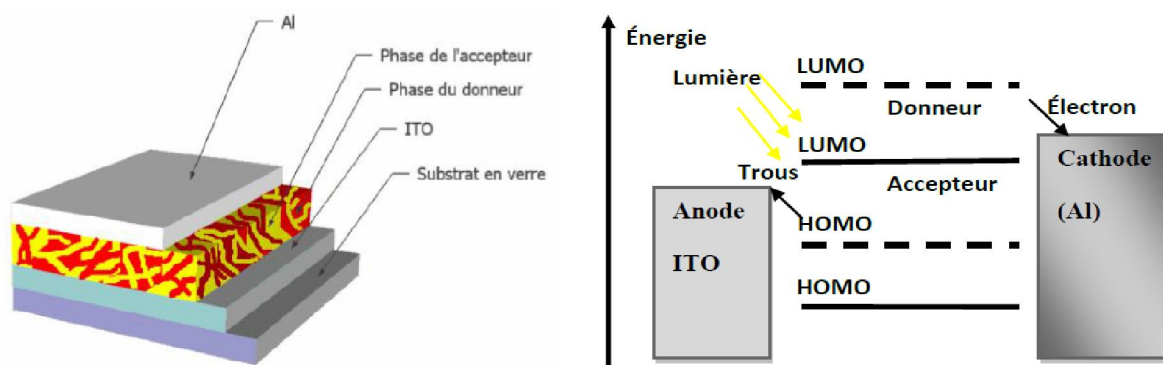


Figure II.11: la structure d'une cellule à réseau interpénétré à gauche, et les niveaux d'énergie de la cellule à droite [15-25]

### III.1.d. La structure tandem

Cette architecture permet d'empiler deux cellules en série ou en parallèles afin d'améliorer l'efficacité en appliquant une légère pression [7] et on chauffe. Les matériaux utilisés dans les deux cellules photovoltaïques possèdent des bandes interdites différentes. Cette structure présente l'avantage d'élaborer et de traiter indépendamment les deux couches organiques, et d'obtenir un rendement très élevé proche de 15% [47], parce que elle permet d'absorbé une grande quantité de lumière.

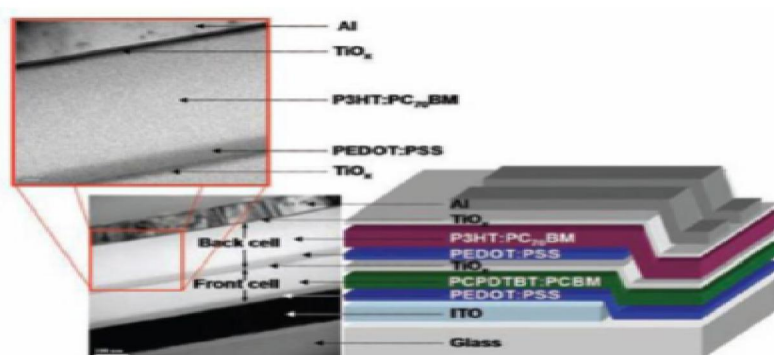
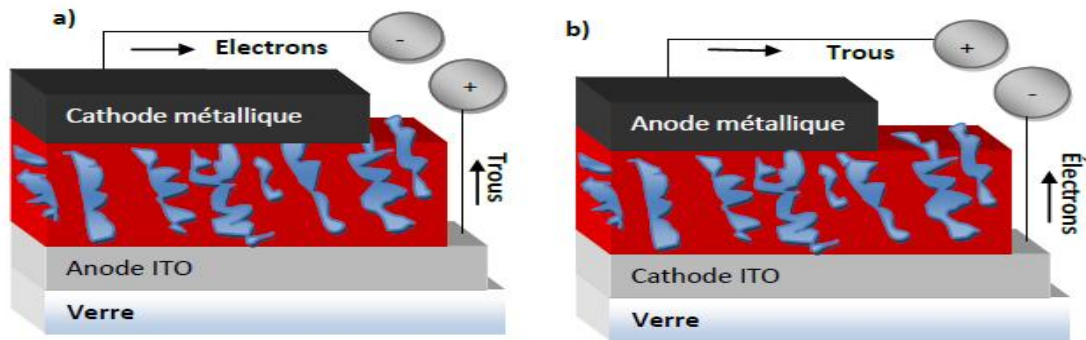


Figure II.12: structure d'une cellule tandem [25]

### III.2. Structure inverse

La structure inverse des cellules photovoltaïques organiques est apparue ces dernières années. Dans cette structure, les cellules sont illuminées par la cathode transparente, d'où sont collectées et extraites les charges négatives. L'ITO reste également le principal matériau utilisé pour la cathode dans la structure inverse [25]. La structure inverse présente deux avantages par rapport à celle conventionnelle : elle présente souvent des performances de

stabilité beaucoup plus élevée, et fournissent une plus forte flexibilité dans les conceptions des cellules.

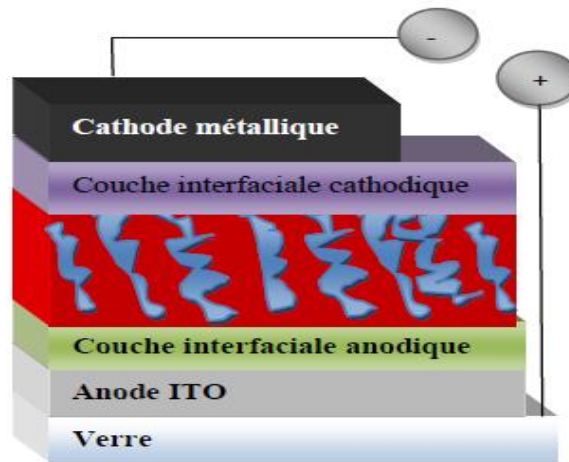


*Figure 11.13: les deux types de cellule OPV a) conventionnelle b) inverse [25]*

#### IV. Insertion des couches inter-faciles (pour une structure réseau inter-pénétré conventionnelle) :

L'insertion et l'ajout des couches aux interfaces entre la couche active et les électrodes l'une des solutions proposées dans le but d'améliorer le rendement et la stabilité des cellules solaires organiques, le rôle de ces couches inter-faciales est selon leurs conditions de dépôt et de fabrication [28], et leur emplacement dans la cellule, dont on a deux types de couches inter-faciales, une couche inter-faciale anodique (située entre l'anode et la couche active), et une couche inter-faciale cathodique (située entre la cathode et la couche active), et on peut utiliser les deux matériaux semi-conducteurs : les semi-conducteurs organiques comme le PEDOT : PSS, et les semi-conducteurs inorganiques comme les oxyde métalliques (MnO<sub>3</sub>, ZnO, TiO<sub>x</sub>), ces matériaux sont déjà très utilisés comme matériaux d'interfaces dans la photovoltaïque organique.

Mais il faut noter que l'intégration des couches inter-faciales dans les cellules solaires organiques est un point très sensible, il faut prendre en considération la structure du dispositif et les matériaux utilisés dans la réalisation et l'élaboration de la couche photo-active et les deux électrodes, et leurs propriétés électriques, pour trouver la bonne combinaison. Aussi, il sera mis en évidence l'intégration de ces matériaux d'interface avec les hautes performances des polymères à faible gap de conduction (comme le P3HT) et les dérivés fullerènes comme matériaux actifs (comme la PCBM) pour produire des dispositifs photovoltaïques stables et efficaces [25].



*Figure II.14 : Illustration schématique de structures de cellules photovoltaïques organiques avec intégration de leurs couches inter-faciales anodique et cathodique, structure conventionnelle [25]*

### IV.1 Le type des matériaux utilisés pour les couches inter-faciales :

Les couches inter-faciales sont insérées dans le but de sélectionner les charges extraites de la couche active et pour les collecter au niveau des électrodes selon leurs polarités [28], dont il faut bien choisir les matériaux utilisés pour la réalisation des couches inter-faciales dans les deux côtés anodique et cathodique pour avoir une meilleure configuration de la cellule, et une bonne recombinaison entre les matériaux ajoutés à l'interface et les électrodes :

#### IV.1.a. Couche inter-faciale anodique [25]:

Concernant les couches inter-faciales anodiques qui sont insérées entre l'anode et la couche photo-active, il faut qu'ils soient de type P, il s'agit d'un matériau accepteur des trous, avec de bonnes propriétés de transparence, pour les semi-conducteurs organiques le PEDOT : PSS est le polymère le plus connu et le plus utilisé comme couche inter-faciale de type P, grâce à ces propriétés de transparence intéressantes et sa conductivité élevée, dont il peut améliorer les performances de la cellule.

Dans les couches inorganiques on utilise les oxydes métalliques de type P, sont considérés comme de bons remplaçants de PEDOT : PSS, il faut que la bande de valence du semi-conducteur utilisée doit correspondre au niveau HOMO du donneur P3HT, et les matériaux utilisés dans ces couches sont : le NiO (l'oxyde de nickel), et le MoO<sub>3</sub> (l'oxyde de molybdène), et le V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (l'oxyde de vanadium), on peut aussi envisager l'utilisation du WO<sub>3</sub> (le trioxyde de tungstène) [28].

### IV.1.b. Couche inter-faciale cathodique :

En utilisant les semi-conducteurs de type N comme des couches inter-faciales cathodiques dans les cellules solaires organiques il s'agit d'un matériau accepteur d'électron, pour les semi-conducteurs organiques on peut citer le C60 (fullerènes) [25], sont des bons accepteurs et transporteurs d'électrons et bloqueurs de trous.

Et pour les semi-conducteurs inorganiques, les matériaux de type N les plus utilisés se sont de la famille des oxydes métalliques comme le TiO<sub>2</sub> (dioxyde de titane) et le ZnO (l'oxyde de zinc) [48]. Les électrons créés dans la couche active se déplacent du niveau LUMO de l'accepteur (PCBM) vers la bande de conduction du semi-conducteur ajouté à l'interface, le choix de ces oxydes métalliques grâce à leurs propriétés de transparence dans le visible, et pour la bonne adéquation de leur bande de conduction avec le niveau LUMO du PCBM.

### IV.2 Le rôle des couches inter-faciales :

Avec l'évolution des dispositifs organiques, ces couches d'interface ne peuvent plus être considérées comme de simples barrières ou collecteurs de charges.

#### IV.2.a Le rôle des couches inter-faciales cathodiques :

L'efficacité d'insertion d'une couche cathodique de type N est [25] :

- Améliorer la durée de vie de la cellule solaire organique, par la protection de cette dernière contre les réactions chimiques et physiques entre la couche photo-active et les électrodes dues à la diffusion des ions du métal utilisé comme cathode vers l'intérieure de la couche active.
- Réduire la dégradation de la cellule, grâce à un contact ohmique qui sera produit entre la couche active et la cathode métallique.
- Jouer le rôle d'une barrière d'énergie qui bloque le flot de charges allant dans la direction opposée c'est-à-dire les trous allant vers la cathode et les électrons allant vers l'anode.
- Dans l'interface couche active/métal l'intensité du champ optique diminue jusqu'à s'annuler, donc en ajoutant une couche inter-faciale (couche active/couche inter-faciale cathodique/métal), qui peut distribuer le champ électrique, ce qui améliore le courant de court-circuit  $I_{cc}$  de la cellule.

### IV.2.b Le rôle des couches inter-faciales anodiques :

L'efficacité d'insertion d'une couche anodique de type P :

- Cette couche anodique peut empêcher l'oxydation des composants de la couche active en faisant obstacle à la diffusion de l'oxygène de l'ITO à la couche active [48].
- Lissage de la morphologie de surface de l'ITO [49].
- Par exemple le dépôt d'une couche de PEDOT : PPS entre l'anode et la couche active va jouer le rôle d'une couche tampon permettant d'augmenter le travail d'extraction et de diminuer la rugosité de l'ITO [24].
- Modifier le travail d'extraction de l'anode : on prend l'exemple de l'ITO son travail d'extraction situe entre 4.5 et 4.7 eV [50], donc ce matériau peut collecter aussi les électrons que les trous.

### V. Avantages et inconvénients des cellules organiques

Dans cette partie nous nous intéressons aux principaux avantages des cellules photovoltaïques organiques en générale. En effet le principal intérêt des cellules organiques est leur légèreté et flexibilité par rapport aux cellules solaires inorganiques, ce qui peut être pratique pour des installations de grandes envergures, et leur facilité de fabrication et de manipulation ces nouvelles cellules peuvent être produites avec peu de moyennes en élaboration, et la facilité d'un recyclage réduisant leur impact sur l'environnement.

Les cellules photovoltaïques organiques sont réalisées à basses températures [46], ce qui les rend compatibles avec les substrats en plastique. Elles peuvent donc être intégrées à des processus de dépôts par voie liquide, ce qui permet de développer des techniques d'impression des dispositifs électroniques et ouvre de nouvelles perspectives industrielles pour un électronique bas coût qui est au moins trois fois moins cher que les procédés appliqués aux couches minces à base de silicium, et qui représentent des coefficients d'absorption optiques très élevés.

Ces nouvelles cellules peuvent être installées partout elles peuvent être exposées au soleil facilement. Comme les cellules photovoltaïques organiques sont entièrement en plastique elles peuvent sans problème être produites en série contrairement aux cellules photovoltaïques en silicium qui nécessite un travail préparatoire coûteux. Dans cette nouvelle génération de

panneaux solaires le courant sera conduit par des couches en plastique ultra fine et flexible, se qui ouvre des perspectives d'application innombrables.

Cependant, ces matériaux organiques ont deux points faibles : la durée de vie et le rendement. Les modules photovoltaïques organiques ne devraient pas durer aussi longtemps que les modules photovoltaïques traditionnels qui possèdent une longévité souvent supérieure à 20 ans. aussi l'électrolyte actuellement utilisé majoritairement est instable. Les solvants le composant sont volatils et présentent un risque d'évaporation et même d'explosion de la cellule [8].

### **VI. La stabilité de la cellule:**

Finalement, un point très important, l'optimisation des performances des cellules solaires organiques est relié à la stabilité du dispositif dans les conditions ambiantes et dans les risques de dégradation chimique de la couche active ou des électrodes en présence d'oxyde et d'humidité, et pour protéger les cellules contre ces risques, il est nécessaire d'encapsuler le dispositif. La durée de vie des cellules à base de P3HT : PCBM encapsulées et de l'ordre de 10 000 heures

### **Conclusion :**

Malgré tous les avantages caractérisant les cellules solaires OPV, restent des dispositifs à faible rendement et une durée de vie baisse, mais avec le développement des technologies d'élaboration microélectronique et de chimie organique, constituer des dispositifs prometteurs dans le domaine de la conversion photovoltaïque. L'amélioration et l'adaptation des structures et des matériaux peuvent permettre d'atteindre un rendement de conversion de 10% pour une structure tandem. Leur flexibilité et leur réalisation sur des grandes surfaces, peut rendre le cout du l'énergie photovoltaïque attrayant.

### Introduction :

La technologie des cellules solaires ne fera que s'améliorer si les scientifiques et les ingénieurs comprennent comment leurs dispositifs fonctionnent et comment ils peuvent être améliorés. Un bon moyen d'avoir cette connaissance est la simulation c'est pour ça on a utilisé le logiciel PGDM pour étudié une cellule solaire organique. Les cellules simulées possèdent une structure hétérojonction en volume à base de P3HT/PCBM, nous allons commencer ce chapitre par une définition sur le simulateur utilisé, et des descriptions sur la cellule choisie et sur les matériaux de la couche active et les électrodes utilisés dans la réalisation de la cellule simulée et leurs paramètres numériques.

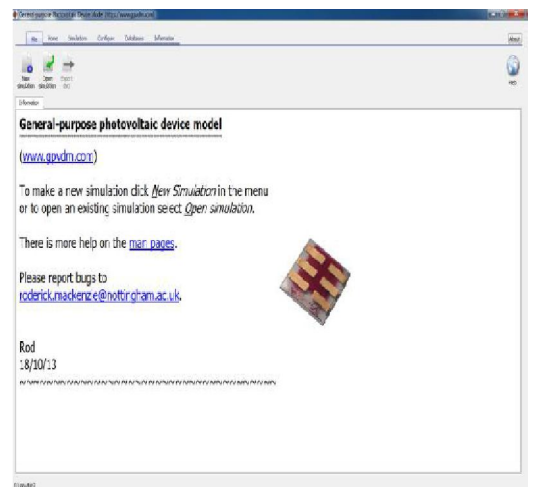
### I. Logiciel GPVDM (Général-Prupose Photovoltaic Device Model) :

#### I.1 Définition:

Il a été écrit à l'origine pour simuler des cellules solaires organiques, La première version de ce logiciel s'appelait OPVDM, le modèle s'appelle maintenant GPVDM parce qu'il peut simuler plus que juste les dispositifs organiques , il a été étendu pour simuler d'autres classes de dispositifs, y compris OLED, OFET et de nombreux autres types de cellules solaires de 1ère, 2ème et 3ème génération.

Actuellement, le modèle peut simuler :

- Cellules OPV
- Les différents structures des cellules solaires organiques (monocouche, bicouches, hétérojonction en volume.....etc).
- OLED
- Transistors à effet de champ organique (OFET)
- Cellules solaires au silicium cristallin
- cellules solaires a-SI
- Cellules solaires CIGS



Pour ce faire, le modèle contient à la fois un solveur électrique et un solveur optique, permettant de simuler les caractéristiques de courant / tension ainsi que le modèle et le profil optique dans le dispositif.

Le modèle peut simuler:

- Courbes de JV
- Spectroscopie d'impédance (IS)
- Prise en compte complète du modèle optique dans la réflexion sur les interfaces et l'absorption.
- Calcul du profil de réflexion

Le modèle facilite l'étude de l'influence de paramètres matériels tels que la mobilité, les troubles énergétiques, le dopage et la recombinaison sur les performances de dispositif. Tous les paramètres internes du périphérique sont facilement accessibles via l'interface graphique.

### **I.2 Détails techniques :**

Le modèle résout les équations du dispositif en régime permanent ou temporel, en 1D ou en 2D. Spécifiquement, le modèle résout à la fois la diffusion des dérivées des électrons et des trous et l'équation de continuité des porteurs dans l'espace de position pour décrire le mouvement de charge dans le dispositif. Le modèle résout également l'équation de Poisson pour calculer le potentiel électrostatique interne.

La recombinaison et le piégeage des porteurs sont décrits dans le modèle en utilisant une formation de Shockley-Read-Hall (SRH).

### **I.3 Le modèle physique :**

#### **I.3.a Le modèle électrique :**

-Pour calculer le potentiel intégré du dispositif nous devons savoir :

- Les concentrations de porteurs majoritaires sur les contacts n et p
- Les densités efficaces des états  $N_{LUMO}$  et  $N_{HOMO}$
- La bande interdite effective  $E_g$

-Pour obtenir la distribution de potentiel interne au sein de dispositif on résout les équations suivante :

a) L'équation de Poisson :

$$\frac{d}{dx} \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d\phi}{dx} = q (nf + nt - pf - pt) \quad \text{III.1}$$

b) le piégeage de la porteuse et recombinaison de shockley-Read-Hall :

$$\frac{\delta nt}{\delta t} = r_{ec} - r_{ee} - r_{hc} + r_{he} \quad \text{III.2}$$

### **I.3.b Modèle optique**

Les équations de Maxwell nous donnent la relation entre le champ électrique et le champ magnétique pour une onde plane.

$$\nabla * E = -j\omega\mu H \quad \text{III.4}$$

## **II. Description de la cellule organique à réseau interpénétré à base de P3HT/ PCBM utilisée :**

### **II.1 Structure étudiée :**

En utilisant le logiciel GPVDM, on a réalisé la simulation de la cellule organique représenté dans la figure III.1, qui est composé d'une couche active à base de P3HT : PCBM comprise entre une anode d'oxyde d'indium-étain (ITO), et d'une cathode métallique d'Aluminium (Al), la différence d'affinité électronique entre les deux matériaux choisis dans la fabrication de la couche active offre un taux acceptable de dissociation des excitons à l'interface ce qui conduit à un transport ultrarapide des électrons photo-induits du P3HT vers PCBM, c'est la première raison de l'utilisation du mélange nanométrique de ces deux matériaux pour notre cellule. Le rendement atteint : 3.3% : composite MDMO-PPV/PCBM (2000) et 5% : composite P3HT/PCBM (2005/2006) [51].

L'intérêt de la structure hétérojonction en volume (à base de réseau interpénétré) est d'augmenter significativement les interfaces (D/A), dont l'amélioration du rendement de la conversion photovoltaïque en maximisant l'absorption [33], en formant un mélange nanométrique de deux matériaux (le P3HT et le PCMB). Les paramètres les plus importants dans la réalisation de ces cellules sont le recuit thermique, le choix de solvant et le rapport massique et la concentration de P3HT : PCMB dans le solvant [46].

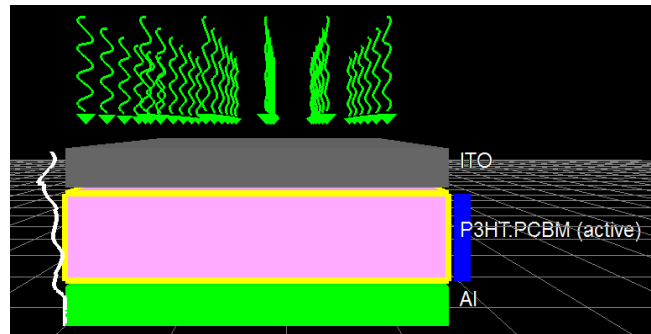


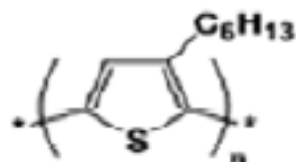
Figure III.1: la structure hétérojonction en volume de la cellule organique réalisée avec GPVDM

## II.2. Les matériaux utilisés dans la cellule hétérojonction en volume simulée:

### II.2.a Les matériaux utilisés dans la couche active :

- Le P3HT : (poly (3-hexylthiophène))

C'est un polymère conjugué soluble, le plus utilisé dans la réalisation des cellules solaires organiques, on a l'utilisé comme un matériau donneur d'électrons, grâce à sa bonne solubilité dans les solvants usuels, et ainsi que par ces bonnes propriétés de conduction [52], et qu'est chimiquement stable. Le seul défaut de ce matériau c'est qu'il ne permet pas une absorption optimale du rayonnement, grâce à son gap qui est assez faible de l'ordre de 1.7 eV qui soit une des valeurs les plus faibles des polymères conjugués [53].



Poly(3-hexylthiophene)

Figure III.2 : structure chimique du polymère P3HT [12]

Les orbitales  $\pi$  conjuguées qui constituent les chaînes polymères dans le matériau P3HT, se sont les seules responsables sur les propriétés optiques de ce dernier. On sait que la conjugaison du matériau est due à la superposition des orbitales  $\pi$ , et qui nous donne des cycles thiophènes coplanaires et substitués [25].

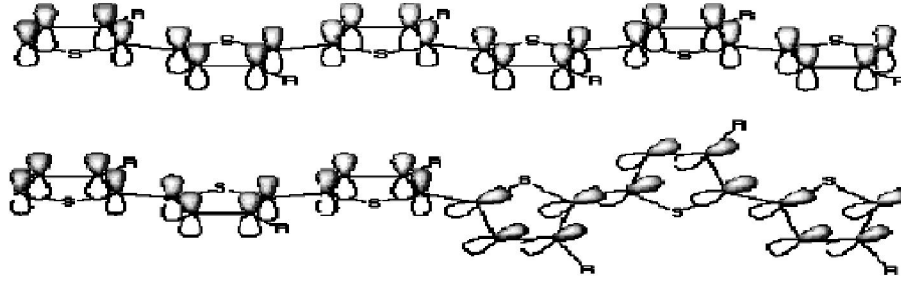


Figure III.3 : Orbitales  $\pi$  conjuguées d'un poly-thiophène coplanaire [25]

La longueur de conjugaison dépend du nombre de cycle des orbitales  $\pi$ , et plus que la longueur de conjugaison augmente, plus que la différence entre les niveaux énergétiques sera faible, cela augmente la longueur d'onde d'absorption. D'après la figure ci-dessous on peut dire qu'on a une forte absorbance de la lumière dans le visible entre [330 et 650 nm] (figure III.4).

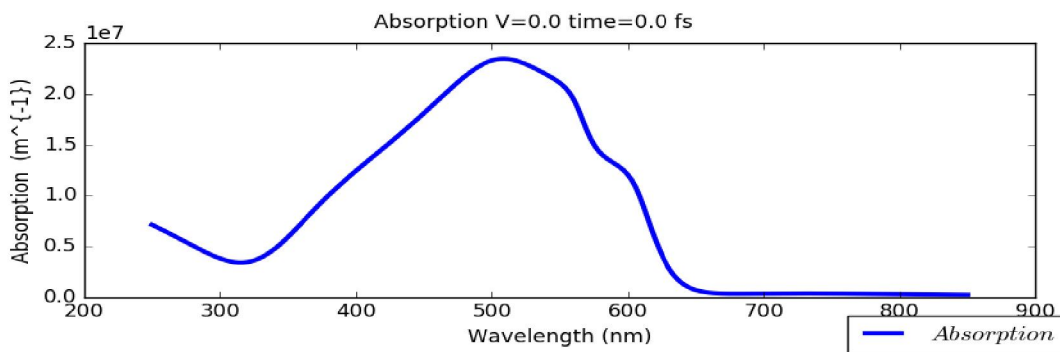
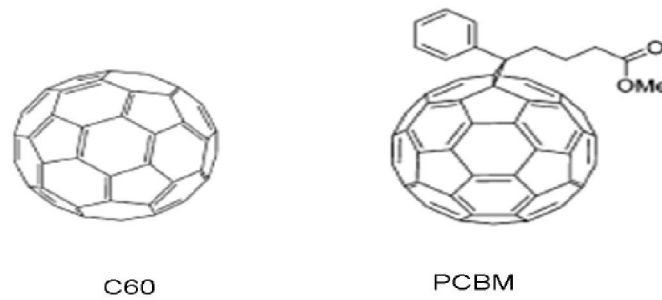


Figure III.4 : le spectre d'absorption de P3HT

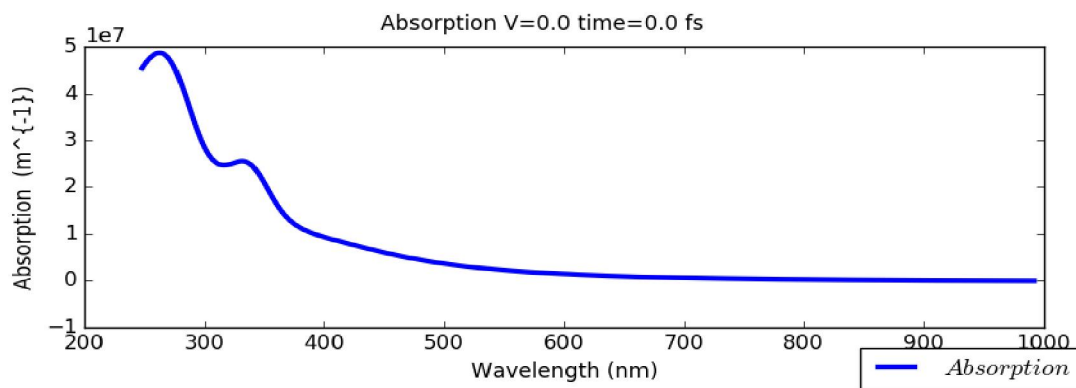
- **Le PCBM : (phényle-C61-butanuate de méthyle)**

Le PCBM est la dérivée d'une petite molécule appelée **fullerène C60**, dont la structure chimique a été modifiée pour le rendre soluble. Le PCBM peut être utilisé dans les cellules solaires organiques obtenues par tournette [54]. Ce matériau accepteur d'électrons est le plus utilisé dans l'électronique organique, grâce à sa grande stabilité, il a été très utilisé en association avec le P3HT dans les cellules solaires organiques grâce à ses propriétés de mobilité électronique élevées [50-55]. Il y a aussi des petites molécules donneuses d'électrons : le pentacène (P5) et le phtalocyanines de métal (MPC) [9].



*Figure III.5: structure chimique de petite molécule PCBM [56]*

Le PCBM a une très faible absorption dans le visible entre 400 et 700 nm, et il représente une absorption très élevée pour l'UV de 250 à 400 nm (figure III.6)



*Figure III.6 : le spectre d'absorption de PCBM*

## II.2.b Les matériaux utilisés pour les deux électrodes :

- **Le choix de la cathode métallique (Al) :**

Pour obtenir une grande efficacité et un meilleur rendement il faut bien choisir les métaux pour l'électrode, et les métaux les plus choisis dans les cellules solaires organiques sont : l'aluminium (Al) avec un travail de sortie de 4.28 eV, l'argent (Ag) avec un travail de sortie de 4.26 eV[54], dont pour notre cellule on a choisi une électrode (cathode) en aluminium (Al). Le contact semi-conducteur organique/métal (Al) est un contact de type schottky [33] pour limiter la densité de courant délivrée, et pour avoir à la fois une séparation et une collection des charges.

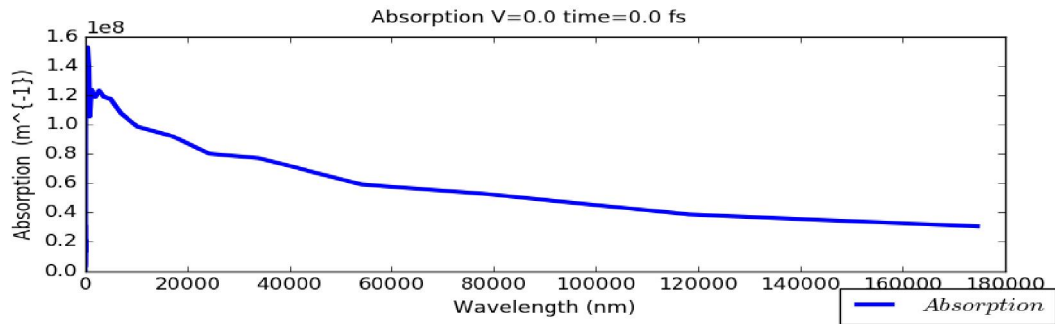


Figure III.7 : le spectre d'absorption de l'Al

- **Le choix de l'anode (ITO) :**

La réalisation et l'application des cellules solaires organiques, nécessite d'utiliser une anode composé par des matériaux possédant la caractéristique d'être à la fois conducteur électrique et transparent dans le domaine visible, pour cette raison notre choix est porté sur l'ITO (oxyde d'indium dopé d'étain) c'est un mélange d'oxyde d'indium et d'oxyde d'étain, L'ITO est caractérisé par une large bande interdite, directe, qui varié entre 3,5- 4,3eV [57], et qui possède une transmission de 93.5% dans 0.8 nm.

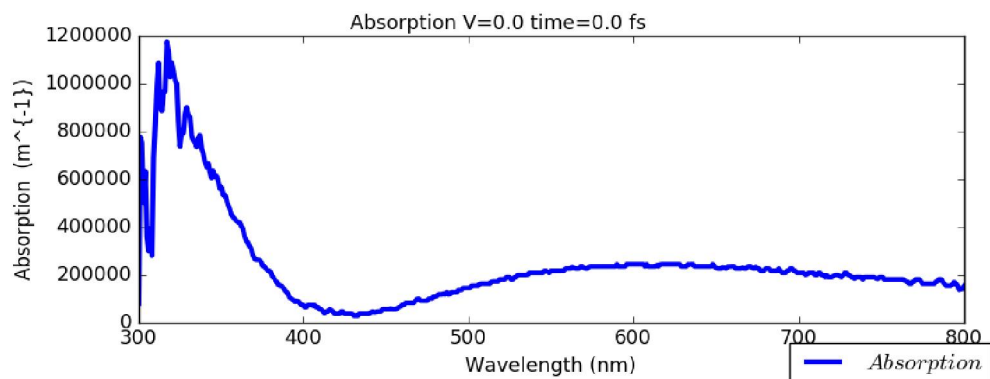


Figure III.8 : le spectre d'absorption de l'ITO

### II.3. Paramètres numérique de la cellule solaire organique simulée :

L'analyse détaillée de la cellule réalisé, nous a permis de déterminer les valeurs suivantes, des points remarquables de la cellule (P3HT : PCBM) :

La charge dans le contact gauche :  $5.8 \text{ e}26 \text{ m}^{-3}$

La charge dans le contacte droit :  $2.65 \text{ e}25 \text{ m}^{-3}$

$R_s = 19.50 \text{ } \Omega$   $R_{sh} = 1.9 \text{ e}5 \text{ } \Omega$

	P3HT (donneur)	PCBM (accepteur)	ITO
La densité d'électrons ( $m^{-3}eV^{-1}$ )	8.666103e+24	8.666103 e+24	8.666103e+24
La densité des trous ( $m^{-3}eV^{-1}$ )	1.790441e+27	1.790441 e+27	1.790441e+27
Les électrons inclinés (eV)	7.763936e-02	7.763936 e-02	7.763936e-02
Les trous inclinés (eV)	1.046922e-01	1.046922 e-01	1.046922e-01
La mobilité des électrons ( $m^2V^{-1}S^{-1}$ )	6.862705e-07	6.862705 e-07	6.862705e-07
La mobilité des trous ( $m^2V^{-1}S^{-1}$ )	3.750624e-02	3.750624 e-02	3.750624e-02
La permittivité relative	3	3	3
La densité d'état effective des électrons libres ( $m^{-3}$ )	5e26	5e26	5e26
La densité d'état effective des trous libres ( $m^{-3}$ )	5e26	5e26	5e26
Travail de sortie Xi (eV)	3.7	3.7	4.17
Eg (eV)	2.1	2.1	0
Le taux de recombinaison ( $m^3S^{-1}$ )	1e-15	1e-15	1e-15

*Tableau III.1 : paramètres numériques sur les matériaux utilisée dans la cellule simulée*

#### **II.4 les matériaux utilisés dans les couches interfaciales dans la cellule simulée :**

- **Le PEDOT : PSS** (poly 3,4-éthylène-dioxy-2,4-thiophène : poly(styrène sulfonate)) :

Le PEDOT: PSS est un polymère conducteur transparent, c'est un polymère le (poly 3,4-éthylène-dioxy-2,4-thiophène) (PEDOT) dopé au (poly styrène sulfonate) de sodium (PSS) [38], il possède un gap de 2.1eV. Ce polymère conducteur utilisé comme couche intermédiaire entre l'anode et la couche active pour augmenter le travail d'extraction électronique de l'anode.

- **Le C60 :**

Il est composé de 60 atomes de carbone qui donne la forme sphérique à la molécule (la forme d'un ballon de football), le C60 a été découvert par H.Kroto, R.Smalley et R.Curl [50], c'est un très bon accepteur d'électrons, il est très utilisé du fait de ces propriétés de mobilité électronique élevées, avec des propriétés optiques et électriques similaire avec le PCBM.

- **Le ZnO (oxyde de zinc) :**

L'oxyde de zinc est un semi-conducteur qui possède une grande application et utilisation dans l'électronique et l'électronique organique grâce à ces propriétés multiples : ca grande conductivité thermique, ca grande capacité calorifique, ca constante électrique moyenne et ca haute résistivité , ce matériau a été déposés en couche mince à l'aide d'une technique de spray, qui possède une bande interdite de 4.3eV ce qui permet de le classer parmi les semi-conducteurs à large bande interdite, cette valeur de gap peut varier suivant le mode de préparation et le taux de dopage , c'est-à-dire qu'on peut modifier les propriétés de ZnO. Le ZnO sous sa forme pigmentaire , il diffuse et absorbe fortement le rayonnement Ultraviolet [8-58], son coefficient d'absorption varie en fonction des conditions d'élaboration, l'amélioration de la stoechiométrie de ZnO conduit à une diminution du coefficient d'absorption et à une augmentation de l'énergie de la bande interdite [59-60].

- **Le V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (l'oxyde de vanadium) :**

L'oxyde de vanadium est un composé inorganique à été largement étudié en tant que couches de transport de trous dans les cellules solaires organiques [61]. L'étendue de la modification de ses propriétés est plus importante dans le domaine du proche infrarouge (IR). Ainsi, dans l'IR, le matériau passe d'un comportement transparent dans son état semi-conducteur (phase M<sub>1</sub>) à un état absorbant et réfléchissant lorsqu'il devient métallique (phase R) [62].

**II.5 Paramètres numériques des matériaux utilisés dans les couches inter-faciales :**

	<b>PEDOT : PSS</b>	<b>C60</b>	<b>ZnO</b>	<b>V5O2</b>
La densité d'électrons ( $m^{-3}eV^{-1}$ )	8.66 e+24	8.66 e+24	1 e24	8.66 e+24
La densité des trous ( $m^{-3}eV^{-1}$ )	1.79 e+27	1.79 e+27	1 e24	1.79 e+27
Les électrons inclinés (eV)	7.76 e-02	7.76 e-02	30 e-03	7.76 e-02
Les trous inclinés (eV)	1.04 e-01	1.04 e-01	30 e-03	1.04 e-01
La mobilité des électrons ( $m^2V^{-1}S^{-1}$ )	6.86 e-07	6.86 e-07	1 e-08	6.86 e-07
La mobilité des trous ( $m^2V^{-1}S^{-1}$ )	3.75 e-02	3.75 e-02	1 e-08	3.75 e-02
La permittivité relative	3	3	3	3
La densité d'état effective des électrons libres ( $m^{-3}$ )	5 e26	5 e26	5 e26	5e26
La densité d'état effective des trous libres ( $m^{-3}$ )	5 e26	5 e26	5 e26	5e26
Travail de sortie Xi (eV)	3.7	3.7	4.17	3.7
Eg (eV)	2.1	2.1	4.03	2.1
Le taux de recombinaison ( $m^3S^{-1}$ )	1 e-15	1 e-15	0.0	1 e-15

*Tableau III.2 : paramètres numériques des matériaux utilisés dans les couches inter-facial*

#### **Conclusion:**

Dans le réseau interpénétré polymère conjugué-fullerène (Donneur-Accepteur), la photo-génération des charges est principalement assurée par le polymère. La clé de la conductivité de ce dernier réside dans la succession de liaisons simples et doubles le long de son squelette. Les cellules photovoltaïques organiques en général offrent de nombreux avantages pratiques. Mais en face, il reste toujours des difficultés à surmonter. Afin d'améliorer les performances de ces cellules, de nombreuses stratégies ont été entreprises par des équipes de chercheurs dans le monde entier.

### Introduction :

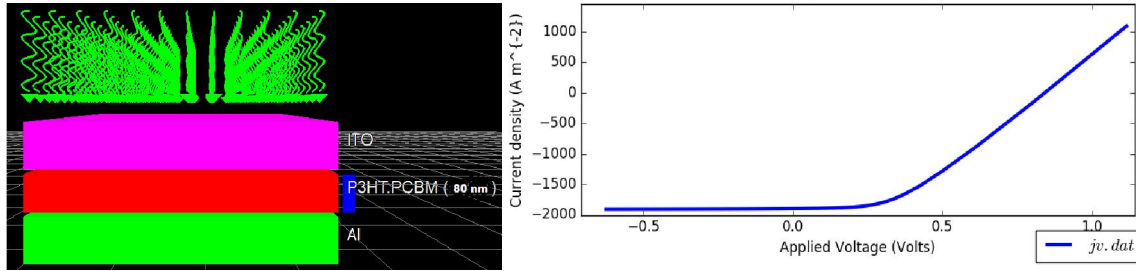
Nous aborderons dans ce dernier chapitre, les différentes méthodes d'amélioration des performances de la cellule solaire organique. Dans la première partie de ce chapitre nous examinons l'effet de l'épaisseur de la couche active (P3HT : PCBM) sur la caractéristique  $J(V)$  de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/P3HT : PCBM/Al sous fort éclairage de  $100 \text{ mW/cm}^2$  et sur les paramètres de cette cellule tels que: le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la densité de courant  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ . Dans une deuxième partie, nous examinons l'effet de l'éclairage sur la caractéristique courant-tension et sur les paramètres de cette cellule. Et dans la dernière partie nous allons modifier la structure de la cellule choisie et ajouter des couches aux interfaces de la cellule (PEDOT : PSS, ZnO, C60 et V2O5) entre la couche active et les deux électrodes.

### I. L'influence de l'épaisseur de la couche active (D/A) sur la cellule hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM:

Pour avoir quelle est l'influence et l'impact des paramètres géométriques de la couche active sur les paramètres de la cellule et sur la caractéristique  $J(V)$ , on a changé l'épaisseur de la couche active de 80 à 320 nm avec un pas de 40 nm, à cet effet, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule sur 100 nm et faisons varier l'épaisseur de la couche active seulement avec une intensité lumineuse de  $100 \text{ mW/cm}^2$  avec une surface active de  $0.12 \text{ cm}^2$ .

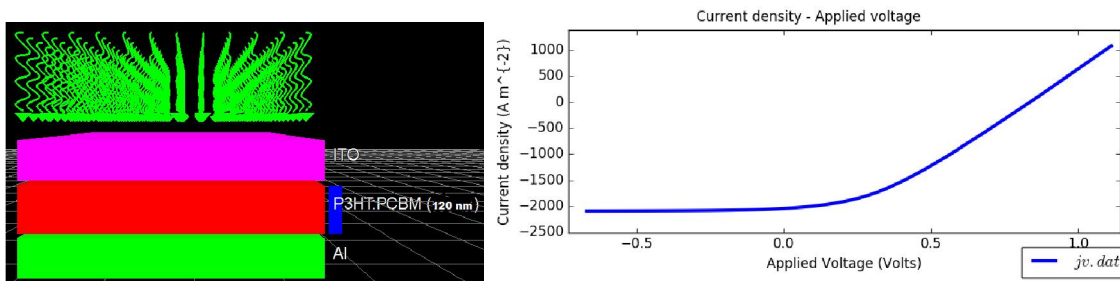
#### I.1 Effets de l'épaisseur de la couche active sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque de type ITO/P3HT : PCBM/Al :

Nous avons obtenus grâce au logiciel GPVDM la caractéristique  $J(V)$ , d'une cellule hétérojonction en volume comme le montre les figures de IV.1 à IV.7, qui représentent les variations de la densité de courant électrique ( $J$ ) en fonction de la tension ( $V$ ) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/P3HT : PCBM/Al pour différentes épaisseurs de la couche active sous une illumination de  $100 \text{ mW/cm}^2$ .



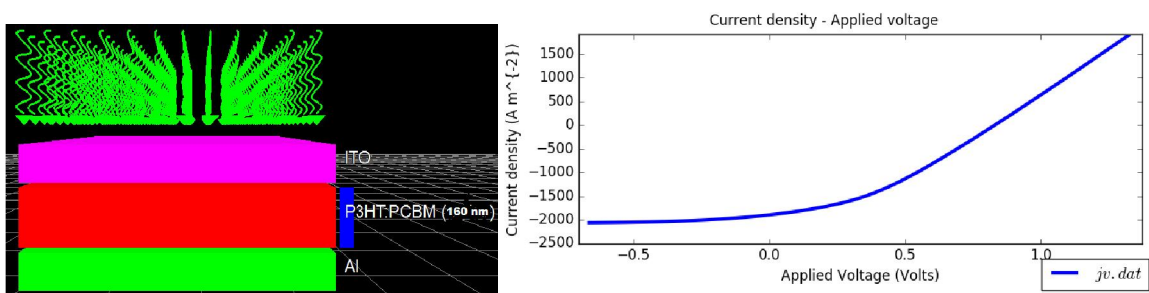
**Figure IV.1 :** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 80nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

Les résultats que nous avons obtenus montrent que pour une épaisseur de 80nm de la couche P3HT : PCBM la densité du courant est de l'ordre de  $1.829 \text{ mA/cm}^2$  lorsque la tension est égale à 0.71V.



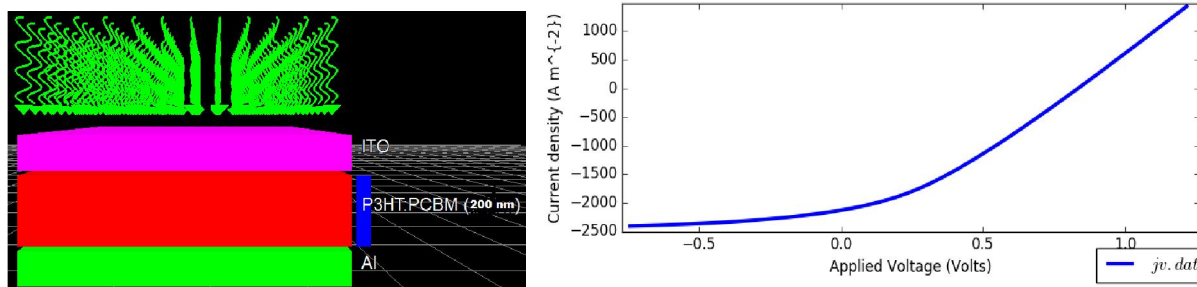
**Figure IV.2 :** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 120nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

Et pour une épaisseur de 120 nm de la couche P3HT : PCBM, la densité du courant est de l'ordre de  $1.991 \text{ mA/cm}^2$  lorsque la tension est de l'ordre de 0.73V.



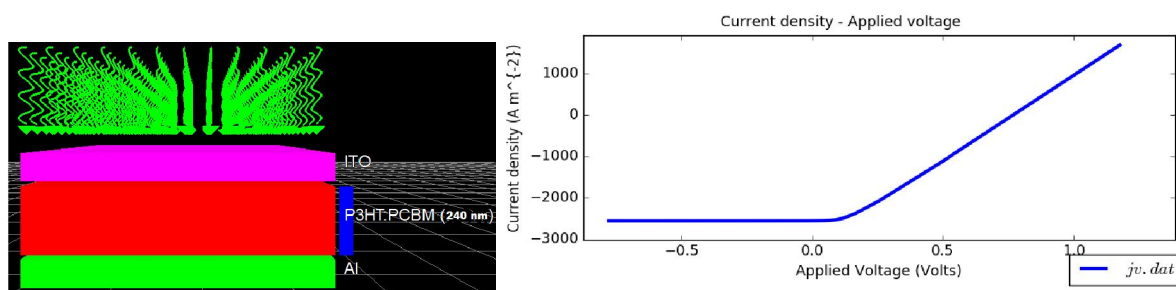
**Figure IV.3:** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 160nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

Ainsi que pour une épaisseur de 160 nm de la couche P3HT : PCBM la densité du courant est de l'ordre de  $1.993 \text{ mA/cm}^2$  lorsque la tension augmente 0.75V.



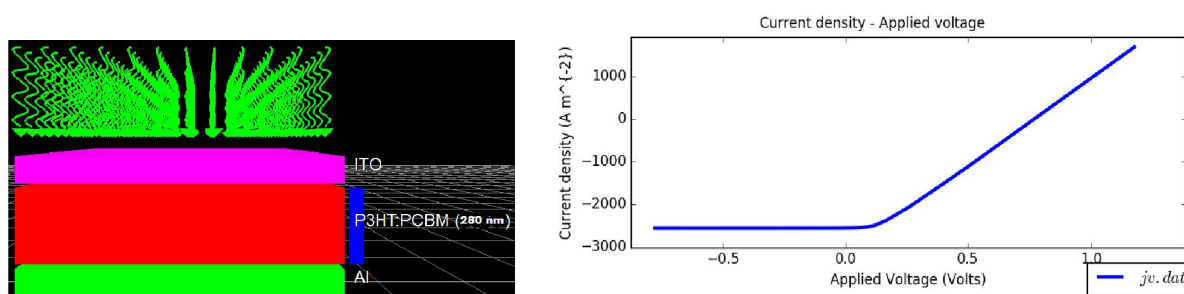
**Figure IV.4:** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 200nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

Et pour une épaisseur de 200 nm de la couche P3HT : PCBM la densité du courant est de l'ordre de  $2.086 \text{ mA/cm}^2$  lorsque la tension est 0.76 V.



**Figure IV.5:** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 240nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

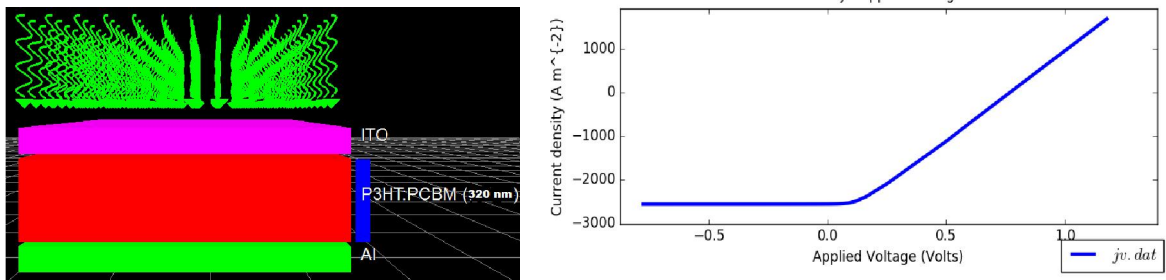
Nous remarquons que pour une épaisseur de 240 nm de la couche P3HT : PCBM la densité du courant est de l'ordre de  $2.088 \text{ mA/cm}^2$  et la tension de circuit-ouvert de l'ordre de 0.765V.



**Figure IV.6:** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 280nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

Dans ce cas où l'épaisseur de la couche active P3HT : PCBM est de 280 nm. Nous remarquons que les performances de la cellule restent stable avec une densité de courant de

l'ordre de 2.088 mA/cm<sup>2</sup>, et une tension de circuit ouvert qui égale à 0.765 V.



**Figure IV.7:** structure de la cellule OPV ITO/P3HT : PCBM/Al avec une couche active de 320nm à gauche, caractéristique  $J(V)$  de la cellule simulée à droite

En fin, a partir de ces résultats nous remarquons que la densité de courant et la tension de circuit-ouvert augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active de 80 nm à 200 nm après on aura une stabilisation de la densité de courant et la tension de circuit ouvert à partir d'une épaisseur qui est supérieur à 200 nm.

### I.2 Effets de l'épaisseur sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/P3HT : PCBM/Al :

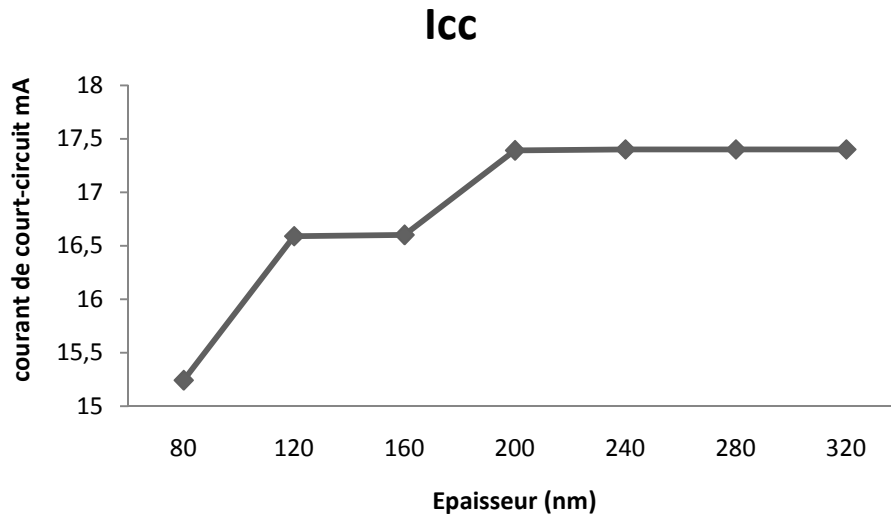
En plus de la caractéristique  $J(V)$ , le logiciel nous a permis de déduire les paramètres photovoltaïques de la cellule et leurs développements selon l'épaisseur de la couche active. On peut aisément calculer ces paramètres à partir des courbes caractéristiques de la cellule organique, les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

	Vco(V)	Icc(mA/cm <sup>2</sup> )	Vmax(V)	Imax(mA/cm <sup>2</sup> )	Pmax(mW)	FF %	η %
80 nm	0.71	15.24	0.323	1.597	0.515	47.59	4.29
120 nm	0.73	16.59	0.318	1.716	0.545	45.00	4.54
160 nm	0.75	16.60	0.315	1.765	0.555	44.57	4.62
200 nm	0.76	17.39	0.312	1.837	0.573	43.38	4.779
240 nm	0.765	17.4	0.313	1.838	0.575	43.19	4.78
280 nm	0.7658	17.4	0.3135	1.838	0.576	43.19	4.78
320 nm	0.7658	17.4	0.3135	1.838	0.576	43.19	4.78

**Tableau IV.1 :** la variation des paramètres d'une cellule photovoltaïque organique pour la structure ITO/P3HT : PCBM/Al avec différentes épaisseurs de la couche active

Avec  $J_{cc} = \frac{I_{cc}}{S}$  on a S : la surface du dispositif qui égale à  $0.12 \text{ cm}^2$

**I.2.1 : Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**

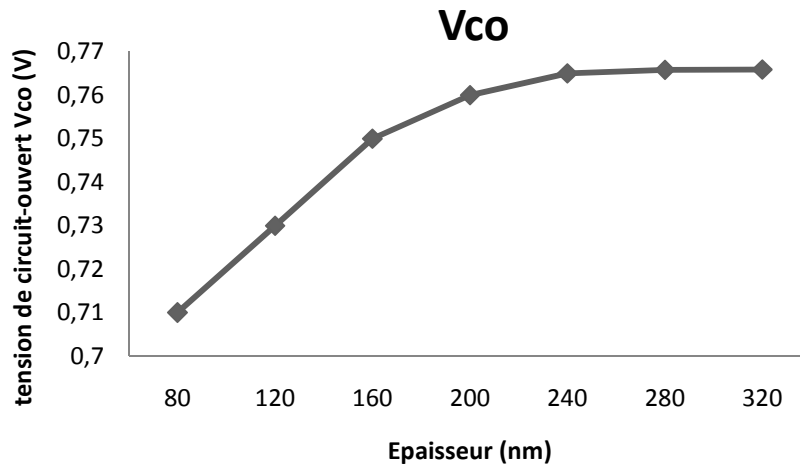


*Figure IV.8 : variation du courant en fonction de l'épaisseur de la couche active*

A partir du tableau IV.1 et la figure IV.8, nous remarquons que le courant augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche active, et les résultats obtenus montrent que le courant augmente de  $15.24 \text{ mA/cm}^2$  à  $17.4 \text{ mA/cm}^2$  lorsque la couche active de P3HT : PCBM augmente de 80 nm à 200 nm. Ces variations montrent que le courant électrique de la diode augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche active, donc l'augmentation de l'épaisseur de la couche active entraîne probablement des chemins de court-circuit entre les deux électrodes.

Nous remarquons une stabilité du courant  $I_{cc}$  qui égale à  $17.4 \text{ mA/cm}^2$ , à partir d'une épaisseur de 200 nm, cette stabilité est due à une saturation au niveau de la couche active, et la même chose pour tout les autres paramètres de la cellule (la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement) ce qui est illustré dans les parties suivantes.

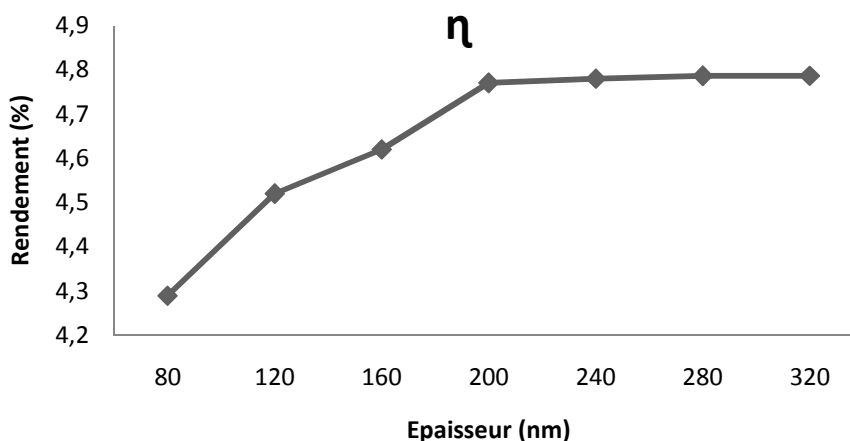
I.2.2 La tension de circuit-ouvert :



*Figure IV.9: variation de la tension à circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche active*

Et dans le même tableau et à partir de la figure IV.9, nous déduisons que la tension de circuit-ouvert aussi augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active, la tension de court-circuit augmente de 0.71V à 0.76V, lorsque la couche active de P3HT : PCBM augmente de 80 nm à 200 nm. Donc on peut dire que l'augmentation de l'épaisseur de la couche active provoque l'augmentation de la mobilité des porteurs entre la couche active et les électrodes.

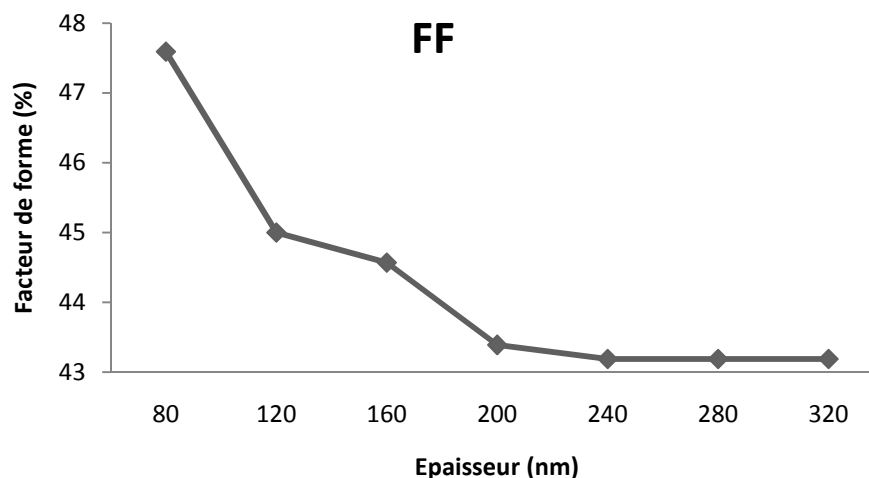
I.2.3 Le rendement de conversion  $\eta$  :



*Figure IV.10: variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche active*

Et nous remarquons aussi que la valeur du rendement de conversion augment sensiblement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active, où le rendement augmente de 4.29% à 4.77% lorsque l'épaisseur de la couche active P3HT : PCBM augmente de 80 nm à 200 nm. Cela est du principalement à la meilleur absorption des couches plus épaisses, puisque l'absorption de la lumière est un des facteurs déterminants de l'efficacité du rendement photovoltaïque, contrairement au facteur de forme FF qui décroît avec l'augmentation de l'épaisseur de 47.59% à 43.19%.

#### **I.2.4 Le facteur de forme FF :**

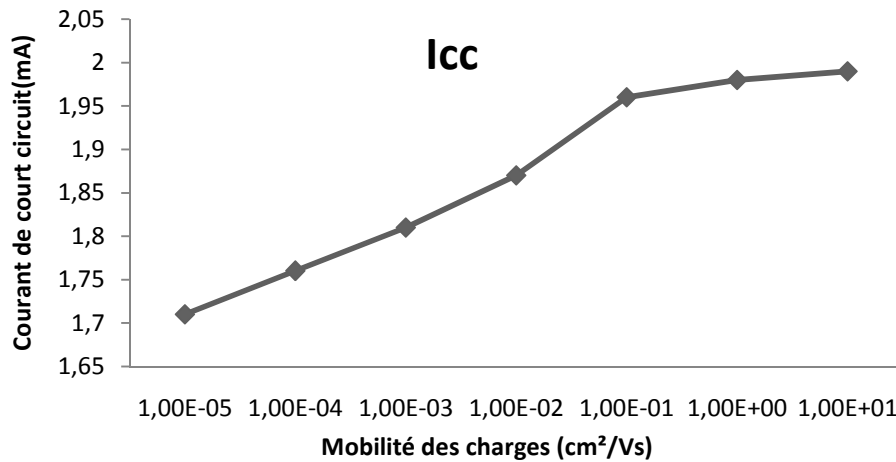


*Figure IV.11 : variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche active*

## **II. l'effet de la mobilité des porteurs de charges sur les performances de la cellule solaire organique P3HT : PCBM :**

Dans cette partie nous déduirons l'effet de la mobilité des trous et des électrons dans la couche active sur les performances de la cellule solaire organique à réseau interpénétré à base de P3HT : PCBM. Prenant la mobilité des trous égale à la mobilité des électrons ( $\mu_N = \mu_P$ ), cette expression doit être adaptée lorsqu'on l'applique à des cellules solaires organiques à hétérojonction en volume.

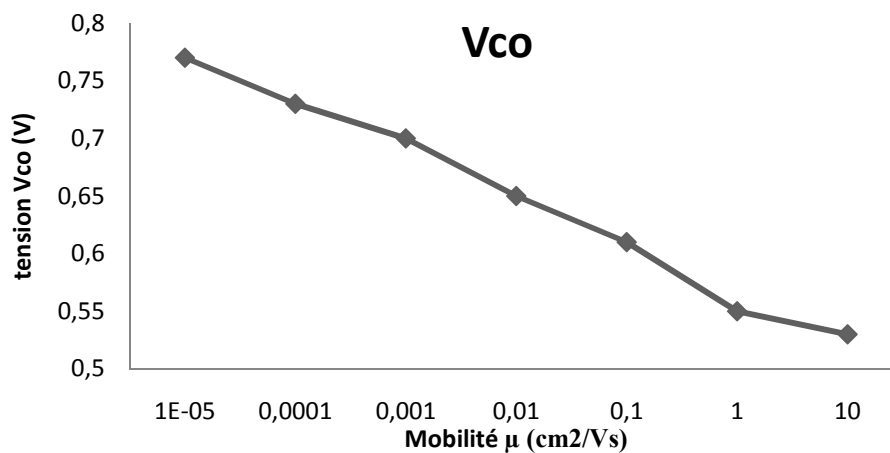
**II.1 : Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**



**Figure IV.12 :** variation du courant en fonction de la mobilité des charges

Nous remarquons que le courant augmente rapidement de 2.049 mA/cm<sup>2</sup> à 2.39 mA/cm<sup>2</sup>, avec l'augmentation de la mobilité des charges.

**II.2 La tension de circuit-ouvert :**



**Figure IV.13 :** variation de la tension de circuit-ouvert en fonction de la mobilité des charges

La tension de circuit-ouvert diminue de 0.77 V à faible mobilité de 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/Vs jusqu'à 0.53V pour une mobilité élevée de 10<sup>2</sup> cm<sup>2</sup>/V.s, en raison de la diminution du champ électrique. La diminution de la tension en circuit ouvert est due à une augmentation de la recombinaison bimoléculaire dans le dispositif lorsque la mobilité augmente comme est déjà mentionné dans les deux équations suivantes [9]:  $K = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (\mu_p + \mu_n)$  et  $R = k (pn - n_i^2)$

II.3 Le rendement de conversion  $\eta$  :

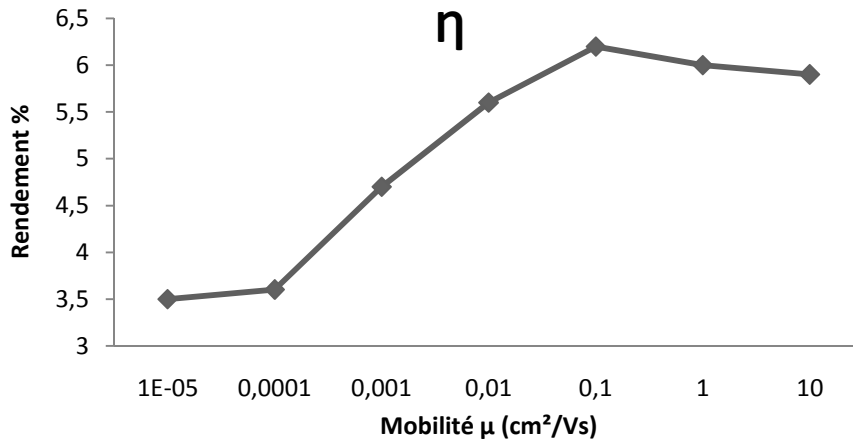


Figure IV.14 : variation du rendement en fonction de la mobilité des charges

Le rendement de conversion  $\eta$  varie de 3.5 % à 5.9% et présente un maximum à la mobilité autour de  $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , ce qui est évidemment liée au compromis entre l'augmentation du courant de court-circuit et de la chute de la tension en circuit-ouvert.

II.4 Le facteur de forme FF :

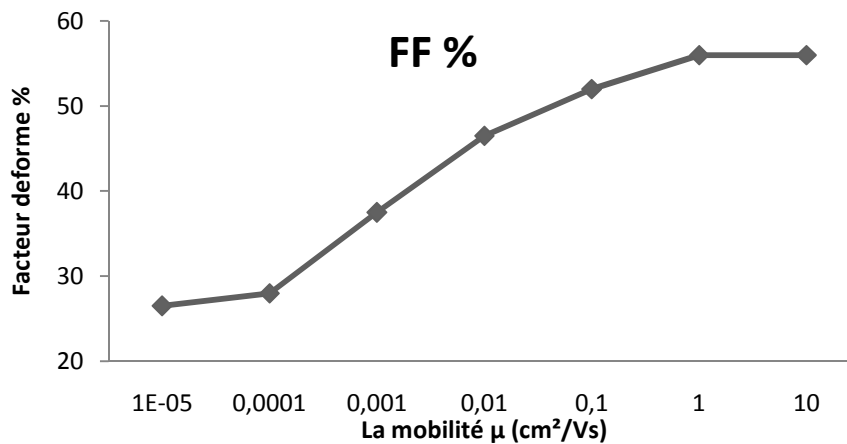


Figure IV.15 : variation du facteur de forme en fonction de la mobilité des charges

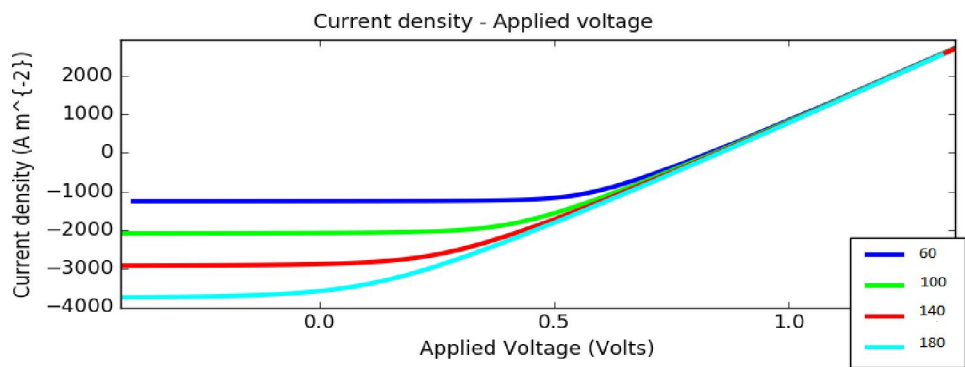
Le même comportement est remarqué pour le facteur de forme FF, car pour une faible mobilité et une grande mobilité, respectivement, nous avons soit un courant faible ou une tension faible. Les deux signifient un faible facteur de forme. Le maximum est entre les deux, aussi le facteur de forme est inversement proportionnel à la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ .

### III.L'influence de l'intensité lumineuse sur la cellule hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM:

Dans cette partie nous examinons les effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique I(V), et les paramètres photovoltaïques de la cellule photovoltaïque organique de structure ITO/P3HT : PCBM/Al. Pour ce faire, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule sur 100 nm, et faisons varier l'intensité lumineuse de 60mW/cm<sup>2</sup> à 180mW/cm<sup>2</sup>, avec un pas de 40mW/cm<sup>2</sup>.

#### III.1 Effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque de type ITO/P3HT : PCBM/Al :

Les différents résultats que nous avons obtenus sur la caractéristique J(V), sont représentés sur la figure IV.10:



**Figure IV.16:** caractéristiques J(V) d'une cellule, OPV à base de P3HT : PCBM en fonction de l'intensité lumineuse

Sur cette figure, nous remarquons que pour une illumination de 60 mW/cm<sup>2</sup>, la densité de courant est de l'ordre de 1.250 mA/cm<sup>2</sup>, lorsque la tension égale à 0.724V.

Ainsi que pour une illumination de 100 mW/cm<sup>2</sup>, la densité de courant est de l'ordre de 1.991mA/cm<sup>2</sup>, et la tension est de 0.733 V.

Pour une illumination de 140 mW/cm<sup>2</sup>, nous obtenons une densité de courant Jcc de l'ordre de 2.678 mA/cm<sup>2</sup> et une tension de circuit ouvert Vco de l'ordre de 0.803V.

En fin pour une illumination de 180 mW/cm<sup>2</sup>, nous obtenons une densité de courant Jcc de l'ordre de 3.743 mA/cm<sup>2</sup> et une tension de circuit-ouvert Vco de l'ordre de 0.823.

D'après les différents résultats que nous avons obtenus, nous remarquons que les deux paramètres de la cellule photovoltaïque, la densité de courant Jcc et la tension de circuit-

ouvert  $V_{co}$  augmentent avec l'augmentation de l'éclairement à cause de l'augmentation de la mobilité des porteurs des charges.

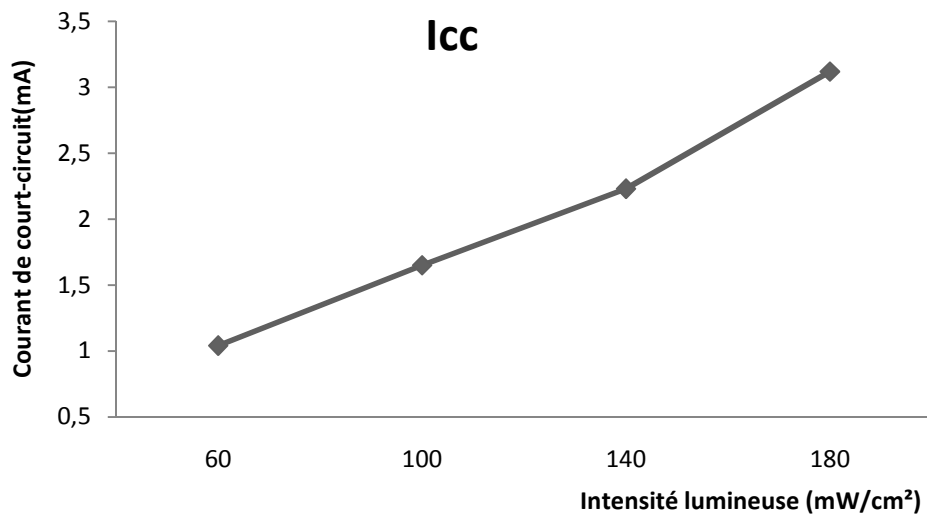
### III.2 Effets de l'intensité lumineuse sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/P3HT : PCBM/Al :

Les différents résultats que nous avons obtenus et concernant  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ,  $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $P_{max}$ , FF, et  $\eta$  pour différentes illuminations sont rassemblés dans le tableau :

	$V_{co}(V)$	$I_{cc}(mA/cm^2)$	$V_{max}(V)$	$I_{max}(mA/cm^2)$	$P_{max}(mW)$	FF %	$\eta$ %
60 $mW/cm^2$	0.724	10.41	0.403	1.088	0.438	58.11	6.08
100 $mW/cm^2$	0.733	16.58	0.303	1.814	0.549	45.17	4.58
140 $mW/cm^2$	0.803	22.25	0.157	2.472	0.388	21.71	1.79
180 $mW/cm^2$	0.823	31.16	0.112	3.350	0.375	14.62	1.73

*Tableau IV.2 : la variation des paramètres d'une cellule photovoltaïque organique pour la structure ITO/P3HT : PCBM/Al avec différentes intensités lumineuses*

#### III.2.1 : Le courant de court-circuit $I_{cc}$ :

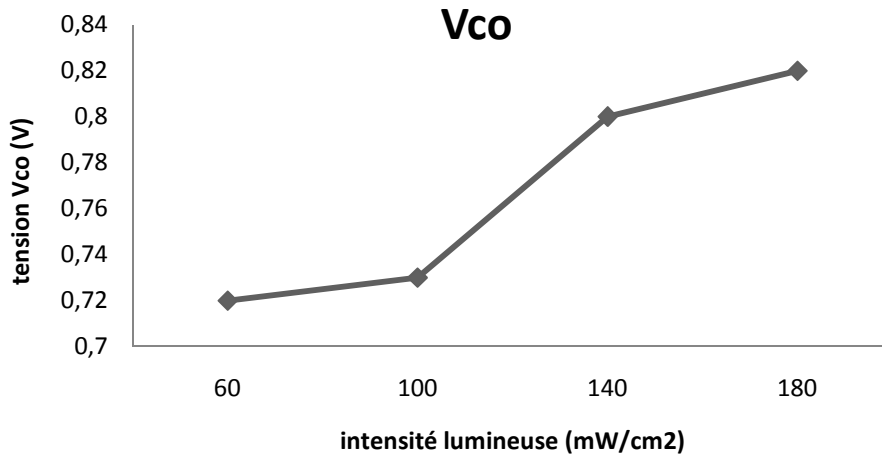


*Figure IV.17 : variation du courant en fonction de l'intensité lumineuse*

Le tableau IV.2 et la figure IV.17, représente la variation du courant en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/P3HT : PCBM/Al, nous remarquons que le courant augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus, montrent que le courant  $I_{cc}$  augmente de 10.41

$\text{mA}/\text{cm}^2$  à  $31.16 \text{ mA}/\text{cm}^2$  lorsque l'intensité lumineuse augmente de  $60 \text{ mW}/\text{cm}^2$  à  $180 \text{ mW}/\text{cm}^2$ . Le courant  $I_{cc}$  dépend de la photoconductivité de la cellule dont ces variations montrent que la photoconductivité de la diode augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse en raison de l'augmentation de la mobilité des porteurs libres des électrons et des trous [21].

### III.2.2 La tension de circuit-ouvert :



*Figure IV.18: variation de la tension à circuit ouvert en fonction de l'intensité lumineuse*

Et dans le même tableau et dans la figure IV.18, nous remarquons la variation de la tension de circuit-ouvert en fonction de l'intensité lumineuse de la cellule photovoltaïque organique simulée. Sur ce tableau nous déduisons que la tension de circuit-ouvert augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus, montrent que la tension de circuit-ouvert augmente de  $0.724\text{V}$  à  $0.823\text{V}$ , lorsque l'intensité lumineuse augmente de  $60\text{mW}/\text{cm}^2$  à  $180\text{mW}/\text{cm}^2$ . Ces variations montrent que la tension de circuit-ouvert dépend de la mobilité de porteurs et de la recombinaison c'est-à-dire c'est la tension maximale fournie par la cellule solaire, permettant d'évaluer le nombre des recombinaisons dans la structure (plus  $V_{co}$  est faible, plus il y a de recombinaison).

III.2.3 Le facteur de forme FF :

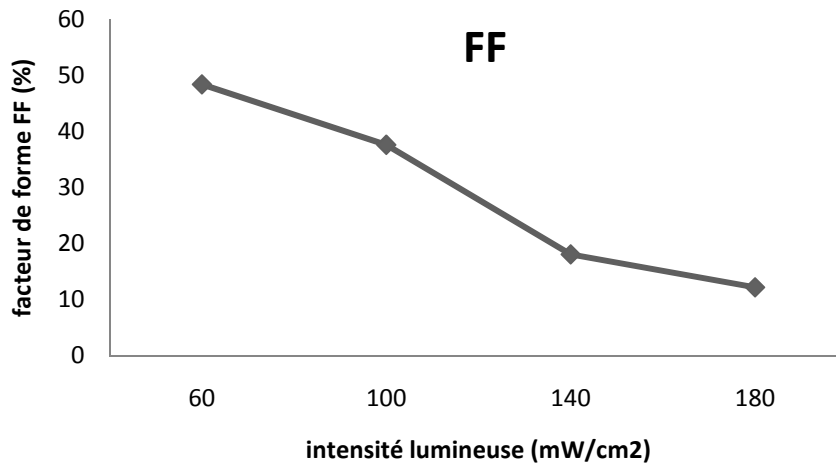


Figure IV.19 : variation du facteur de forme en fonction de l'intensité lumineuse

Les différents résultats obtenus, montrent que le facteur de forme diminue de 58.11% à 14.62% en fonction de l'intensité lumineuse. Ainsi, les faibles valeurs de facteur de forme au fort éclairage est du à des valeurs élevées des résistances série et parallèle qui provoquent des pertes des charges. Donc, ce paramètre dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances séries et parallèle.

III.2.4 Le rendement de conversion  $\eta$  :

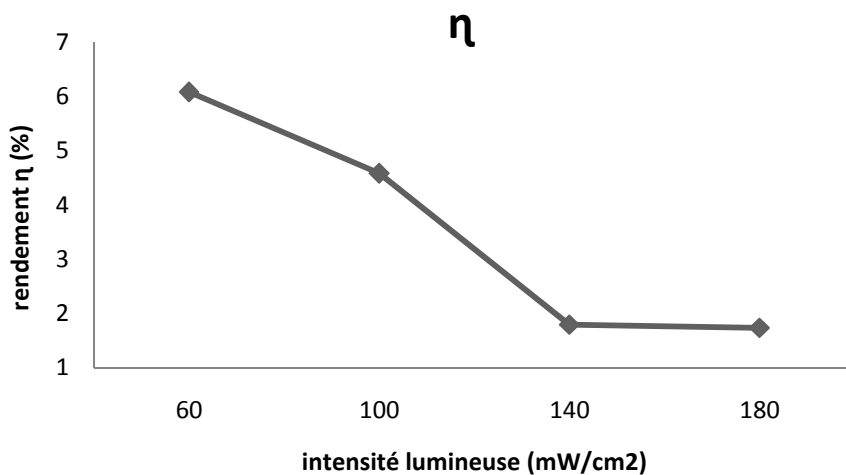


Figure IV.20 : variation du rendement en fonction de l'épaisseur de l'intensité lumineuse

Pour la variation du rendement en fonction de l'intensité lumineuse, nous remarquons que le rendement de conversion photovoltaïque diminue avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus, montrent que le rendement de

conversion décroît de 6.08% à 1.73%, lorsque l'intensité lumineuse augmente de 60 mW/cm<sup>2</sup> à 180 mW/cm<sup>2</sup>. Ces résultats montrent que le rendement inversement proportionnel à l'intensité lumineuse.

Pour obtenir un rendement maximum, en améliorant les trois termes (le facteur de forme, le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$ ). En pratique, ce rendement est diminué en fonction de deux facteurs : l'effet des résistances série et parallèle du composant qui diminuent en fonction de l'intensité lumineuse et l'effet de réflexion à la surface de la cellule [21].

#### **IV.L'influence des couches inter-faciles sur la cellule hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM:**

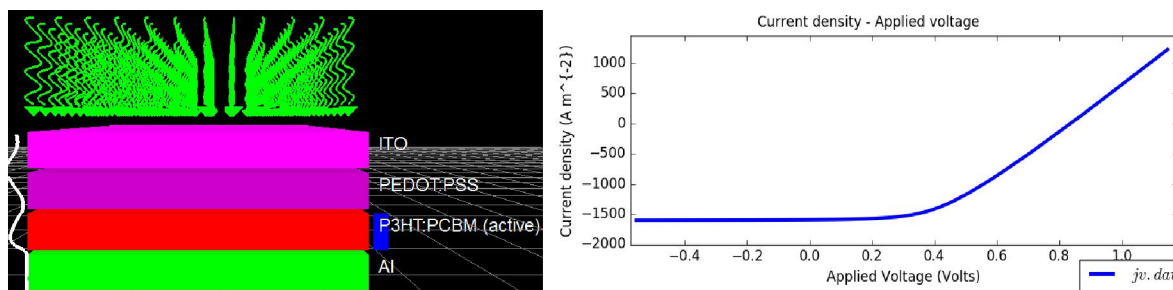
Dans cette partie, nous examinons l'effet des couches ajoutés à l'interface entre la couche active et les électrodes sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique, et sur les paramètres de cette dernière, nous fixons l'épaisseur des couches utilisées sur une épaisseur de 100 nm, avec une intensité lumineuse de 100W/m<sup>2</sup>.

##### **IV.1 Effets des couches inter-faciales sur la caractéristique J(V) de la cellule photovoltaïque organique :**

Les différents résultats que nous avons obtenus à l'aide du simulateur sont représentés sur les figures :

###### **a) Simulation d'une cellule avec la structure ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/Al :**

la configuration de la cellule conventionnelle à hétérojonction que nous allons étudier est représenté dans la figure IV.21. Il s'agit d'un empilement de type ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/Al, où la couche interfaciale de PEDOT : PSS est insérée entre la couche active et l'anode.

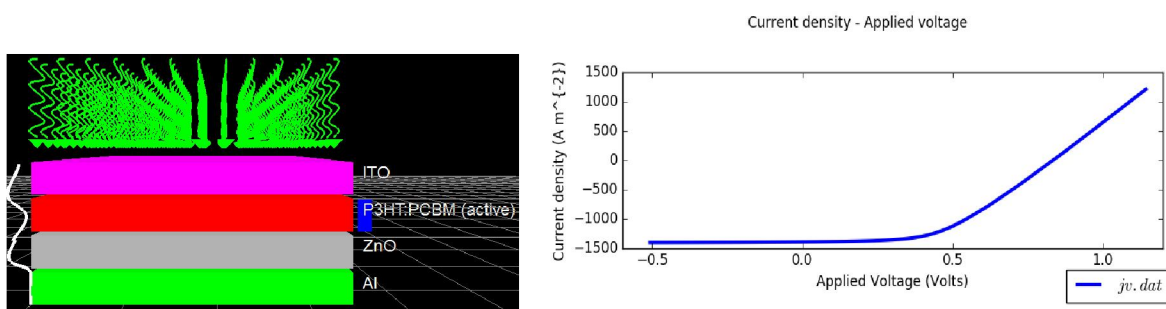


**Figure IV.21:** structure de la cellule organique étudié ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM /Al (à gauche), et les caractéristiques J(V) de cette cellule OPV (à droite)

Sur la figure IV.21, nous remarquons que pour une cellule à hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM avec insertion d'une couche inter-faciale anodique de PEDOT : PSS, avec cette structure, nous obtenons une densité de courant de l'ordre de 1.554 mA/cm<sup>2</sup> et une tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  de l'ordre de 0.795V.

**b) Simulation d'une cellule avec la structure ITO /P3HT : PCBM /ZnO/Al :**

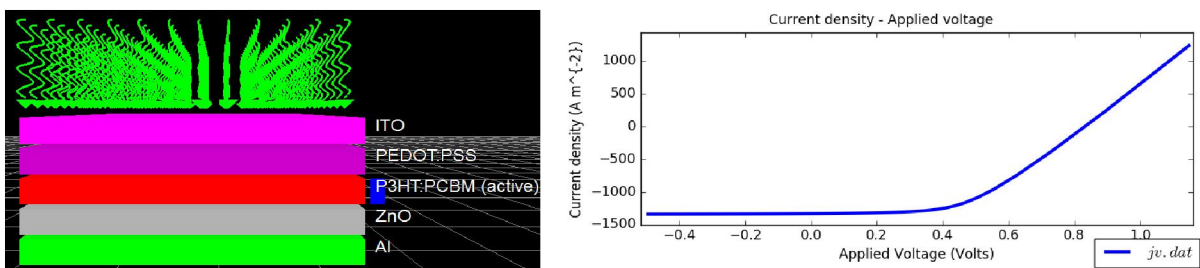
la configuration de la cellule conventionnelle à hétérojonction que nous allons étudier est de type ITO/P3HT : PCBM/ZnO/Al, avec un empilement d'une couche interfaciale cathodique, où la couche interfaciale de ZnO est insérée entre la couche active et l'anode.



**Figure IV.22:** structure de la cellule organique étudié ITO/P3HT : PCBM /ZnO/Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule OPV (à droite)

Sur la figure IV.22, nous remarquons que pour une cellule à hétérojonction en volume à base de P3HT : PCBM avec insertion d'une couche inter-faciale cathodique de ZnO, avec cette structure, nous obtenons une densité de courant de l'ordre de 1.331 mA/cm<sup>2</sup> et une tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  de l'ordre de 0.82V.

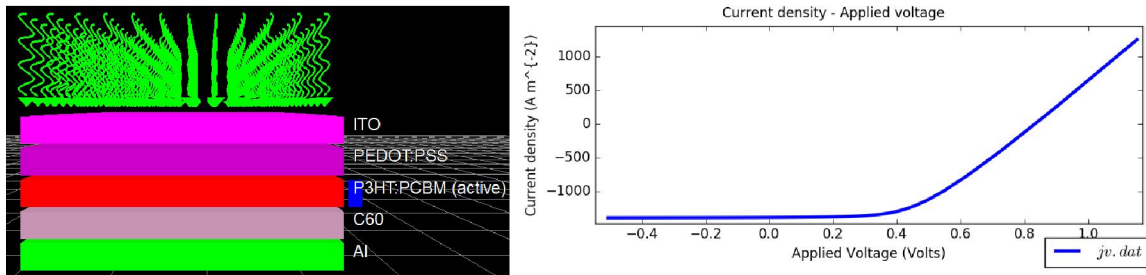
**c) Simulation d'une cellule avec la structure ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/ZnO/Al :**



**Figure IV.23 :** structure de la cellule OPV simulée avec des couches inter-faciales ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/ZnO/Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule OPV (à droite)

Ainsi que pour une structure avec deux couches inter-faciales anodique et cathodique ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/ZnO/Al, avec cette structure, nous obtenons une densité de courant de l'ordre de  $1.339 \text{ mA/cm}^2$  et une tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  de l'ordre de  $0.806 \text{ V}$ .

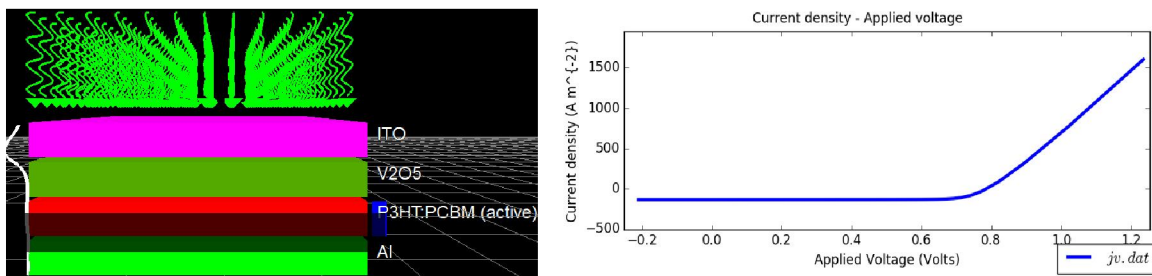
**d) Simulation d'une cellule avec la structure ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/C60/Al :**



**Figure IV.24:** structure de la cellule OPV simulée avec les couches inter-faciales ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/C60/Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule OPV (à droite)

D'après la figure, nous remarquons que pour une cellule de structure ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/C60/Al, avec cette structure, nous obtenons une densité de courant de l'ordre de  $1.383 \text{ mA/cm}^2$  et une tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  de l'ordre de  $0.803 \text{ V}$ .

**e) Simulation d'une cellule avec la structure ITO/V2O5/P3HT: PCBM/Al :**



**Figure IV.25:** structure de la cellule OPV simulée avec les couches inter-faciales ITO/V2O5/P3HT : PCBM /Al (à gauche), et les caractéristiques  $J(V)$  de cette cellule (à droite)

Les résultats que nous avons obtenus montrent que pour une structure ITO/V2O5/P3HT : PCBM/Al, avec une couche inter-faciale anodique de  $V_2O_5$ , et avec cette structure, nous obtenons une densité de courant de l'ordre de  $1.329 \text{ mA/cm}^2$  et une tension de circuit-ouvert de l'ordre de  $0.810 \text{ V}$ .

**IV.2 Effets des couches inter-faciales sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique :**

Les résultats relatifs au développement des différents paramètres de la cellule photovoltaïque organique, et obtenus à l'aide des équations, II.9 et II.10, sont rassemblés sur le tableau suivant :

	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>cc</sub> (mA)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (mA)	P <sub>max</sub> (mW)	FF %	η %
ITO/P3HT: PCBM/Al	0.733	16.59	0.303	1.814	0.54	44.40	4.58
ITO/PEDOT: PSS/P3HT: PCBM/Al	0.795	12.95	0.36	1.283	0.559	44.09	4.661
ITO/P3HT: PCBM/ZnO/Al	0.82	11.58	0.45	1.221	0.554	58.34	4.61
ITO/PEDOT : PSS/P3HT : PCBM/ZnO/Al	0.806	11.15	0.447	1.260	0.56	62.31	4.666
ITO/PEDOT: PSS/P3HT: PCBM/C60/Al	0.803	11.52	0.442	1.206	0.53	57.29	4.44
ITO/V2O5/P3HT: PCBM/Al	0.810	11.07	0.76	0.348	0.24	26.76	2.20

***Tableau IV.3 :** la variation des paramètres d'une cellule photovoltaïque organique pour différentes structures avec des couches inter-faciales*

L'exploitation des résultats de la simulation, qui sont en accord avec la littérature [61], et avec une comparaison des résultats obtenus et les résultats dans la deuxième partie de ce chapitre sous les mêmes conditions apporter sur notre cellule organique, avec une épaisseur de couche active de 100 nm et un éclairement de 100 mW/cm<sup>2</sup>.

Nous remarquons une amélioration de la tension de circuit-ouvert V<sub>co</sub> qui atteint une valeur de 0.810 V après d'avoir insérer une couche inter-faciale anodique V2O5, cette amélioration du a l'adéquation entre le travail de sortie de l'électrode (ITO) et la HOMO du donneur (P3HT).

Nous constatons une augmentation du rendement de conversion de la cellule organique, lors du dépôt d'une couche anodique PEDOT : PSS, et une couche cathodique ZnO, et qui atteignant une valeur maximale de 4.666%. L'augmentation de rendement est due à l'augmentation du facteur de forme qui atteint la valeur 5.18% grâce à une diminution de la résistance série et une augmentation de la résistance parallèle suite à l'introduction des deux couches inter-faciales de PEDOT : PSS et de ZnO. Cette couche de Zinc améliore donc le contact ohmique entre la cathode et la couche active [62], et favorise la collecte des photons par la couche active où la couche ZnO joue le rôle d'un modifiant de la distribution du champ électromagnétique, ces modifications conséquent une augmentation du rendement. Le dépôt de la couche de tampon PEDOT : PSS améliore la collecte des charges positives photo-générées, et empêche la diffusion de l'oxygène et d'indium provenant de l'ITO vers la couche active, ceci explique l'impact positif du dépôt sur le rendement de la cellule, par contre le C<sub>60</sub> ne contribue que très peu à l'absorption dans le visible par rapport aux oxydes [14].

Le V2O5 est une couche qui est très utilisée dans les couches interfaciales dans les cellules inverse donc leur effet dans les cellules conventionnelles comme couche interfaciale anodique pour remplacer le PEDOT : PSS est faible par rapport à ce dernier avec un rendement de 2.20%

### Conclusion:

Les meilleurs résultats enregistrés employant des mélanges conjugués polymère/petite molécule atteignent aujourd'hui des rendements de conversion de l'ordre de 6 à 8% [61]. Les simulations réalisées à l'aide du logiciel GPVDM sur les cellules photovoltaïques organiques à base de P3HT comme matériau donneur et de PCBM comme matériau accepteur à structure hétérojonction en volume sont en parfaite adéquation avec la littérature, et montrent les avantages indéniables des cellules à structure réseau inter-pénétré sur les autres structures. De plus nous nous sommes démontrés, la possibilité d'optimiser les rendements de conversion des cellules solaires organiques par l'augmentation de l'épaisseur de la couche active et l'insertion des couches inter-faciales à l'interface de la cellule organique.

## **Conclusion générale**

Aujourd'hui avec un rendement de 5% c'est petites merveilles d'énergie organique n'on pas encore atteint le niveau des cellules photovoltaïques à base de silicium. Cependant, elles compensent largement par leurs autres avantages. On peut dire que l'énergie solaire photovoltaïque organique est en train de devenir un axe de développement industriellement fort. Dans ce contexte, une recherche de base est indispensable pour valider et démontrer l'intérêt d'une filière organique par un abaissement décisif des coûts (en termes de matériaux et procédés industriels). Conscient de l'intérêt croissant dont bénéficieront les énergies renouvelables dans les prochaines années, il est impératif pour notre pays de prendre toutes les dispositions et mettre tous les moyens pour rattraper son retard dans ce domaine.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons examiné les caractéristiques et les paramètres d'une cellule OPV à hétérojonction en volume, à base de P3HT : PCBM, à l'aide de logiciel GPVDM, notre premier objectif était de donner et d'acquérir des connaissances de base sur ce nouveau type de cellules solaires photovoltaïques qui apparait comme une technologie alternative par rapport aux semi-conducteurs inorganiques.

Cette étude nous a permis d'étudié l'effet de l'épaisseur de la couche active, l'intensité lumineuse et les couches anodiques où cathodiques ajoutées aux interfaces sur les performances de la cellule solaire organique. Le meilleur rendement obtenu d'après la simulation est de valeur de 4.779% où l'épaisseur de la couche active égale à 200 nm, ainsi que le rendement restera stable pour les épaisseurs plus élevée de 200nm.

Pour une intensité lumineuse de 100 mW/cm<sup>2</sup> on obtient un meilleur rendement de 4.58% ; L'augmentation de la densité de courant de court-circuit, et la tension de circuit ouvert et le facteur de forme est dues à L'augmentation de l'intensité lumineuse, par contre les résistances série et parallèle et le rendement de conversion devient très faibles.

Nous constatons aussi l'augmentation du rendement de conversion de la cellule organique qui atteindre 4.666%, lors du l'ajout d'une couche anodique PEDOT : PSS, et une couche cathodique ZnO lorsque on la compare avec la structure de la cellule sans couches inter-faciales ; ce que nous confirme le rôle de ces couches sur les performances de la cellule.

Nous espérons dans une future proche, la fabrication de ce type des cellules photovoltaïques dans nos laboratoires Algériens pour confirmer la théorie développée et la simulation effectuée.

**Références bibliographiques**

- [1] M. GRAETZEL, P. BONHÔTE ; Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nanocristallins ; Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ; 1995.
- [2] <http://www.sdn72.org/2014/03/27/1839-edmond-becquerel-france-1839-france/>
- [3] Zouhair El Jouad ; Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques ; thèse doctorat ; thèse de doctorat ; Université d'Angers, 2016.
- [4] Monika Kakrdova ; l'Energie solaire ; Université Palackého v Olomouci ; 2011.
- [5] [www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_005\\_04.pdf](http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_005_04.pdf).
- [6] Gilles Horowitz ; L'électronique organique : un "brillant" avenir pour les matières plastiques ; Université Paris-Diderot ; [horowitz@univ-paris-diderot.fr](mailto:horowitz@univ-paris-diderot.fr); 2007.
- [7] Habiba BEJBOUJI ; Optimisation des matériaux d'électrodes dans les diodes électroluminescentes organiques et les cellules solaire organiques ; thèse de doctorat ; Université Hassan I ; 2009.
- [8] Bouras Abdellatif ; Caractérisation des matériaux organiques pour la réalisation des cellules solaires ; Université Mohamed Chérif Messadia-Souk Ahras ; 1013.
- [9] Boukli Hacène Souhila ; Modélisation et simulation des cellules solaires à base de P3HT : PCBM (effet de la mobilité et a vitesse de recombinaison en surface ; thèse de doctorat ; Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen; 2014.
- [10] Syndicat des énergies renouvelables, SOLER, Groupement Français des Professionnels du Solaire Photovoltaïque ; [www.enr.fr](http://www.enr.fr) ; 2012
- [11] K. W. Ford; Editor APS; New York Studies on the more efficient use of energy; 1975.
- [12] Laurence VIGNAU ; Les cellules photovoltaïques organiques ; Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS), Département MCM – site ENSCPB ; [laurence.vignau@ims-bordeaux.fr](mailto:laurence.vignau@ims-bordeaux.fr);
- [13] Daniel Lincot ; les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat ; l'institut de recherche et de développement sur l'énergie photovoltaïque (CNRS-EDF-Chimie Paristech) ; 2008.
- [14] Guanoune Walid ; Simulation des performances des cellules solaires à base de matériaux organiques ; mémoire magister ; Université des Frères Mentouri de Constantine Faculté des Sciences Exactes Département de Physique ; 2015.

[15] Soltane Zeghina ; Simulation et analyse d'une cellule solaire organique ; mémoire magister ; Université de BATNA, Faculté de technologie, Département d'électronique ; 2013.

[16] Agence d'études et de Promotion de l'Isère ; [www.grenoble-isere.com](http://www.grenoble-isere.com); Filière photovoltaïque ; 2010.

[17] Olivier HAAS ; Etude des défauts électriquement actifs dans les cellules solaires organiques ; thèse de doctorat ; Université de Nantes; 2012.

[18] Pierre Destruel ; Les cellules photovoltaïques organiques ; Article Université de Toulouse III ; <http://www.refletsdelaphysique.fr> ou <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007064>; 2007.

[19] Jérôme Garnier ; Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray cvd assiste par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques ; Arts et Métiers ParisTech ; <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005629>; 2010.

[20] Wassim Hoheij ; Réalisation et caractérisation optoélectronique de cellules photovoltaïques organiques ; thèse de doctorat ; Université de Limoges; 2007.

[21] Ansri Amel ; Caractérisation des cellules photovoltaïques à base des polymères conducteurs; mémoire de magister ; Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, Faculté des sciences, Département de physique .

[22] Bernard Pagoaga ; Synthèse de nouveaux matériaux semi-conducteurs dérivés du pérylène pour l'électronique organique ; thèse de doctorat ; Université de Reims Champagne-Ardenne-ICMR-LRN Ecole Doctorale Sciences Technologie Santé ; 2012.

[23] Conception, Caractérisation et Mise en oeuvre de matériaux organiques conducteurs pour des applications dans le domaine des capteurs chimiques Myriam Bouhadid ; Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2008

[24] Laure Biniek ; polymères semi-conducteurs à faible largeur de bande interdite : de la synthèse au dispositif photovoltaïque organique ; thèse de doctorat ; Ecole Doctorale Mathématiques, Sciences de l'information et de l'ingénieur 2010.

[25] Salem dalila ; l'effet d'interfaces électrodes couche active sur les performances de la cellule solaire organique à base de P3HT : PCBM ; mémoire de magister ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou; 2013.

[26] Sarah Bebiche ; OTFTs de type N à base de semi-conducteurs  $\pi$ -conjugués : fabrication, performance et stabilité ; thèse de doctorat ; Université Rennes 1 ; 2015.

[27] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Polym%C3%A8re\\_conducteur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polym%C3%A8re_conducteur)

- [28] Youssef Jouane ; Apport des couches inter-faciales à base d'oxyde de Zinc déposé par pulvérisation dans les performances des cellules photovoltaïques organiques compatibles avec des substrats flexibles ; thèse de doctorat ; Université Louis Pasteur – Strasbourg ; <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00769542>; 2013.
- [29] Lionel Derue ; Stabilisation thermique de la couche photo-active d'une cellule solaire organique par réticulation; thèse de doctorat ; Université Bordeaux I ; 2013.
- [30]: V. Coropceanu, J.Cornil, D.A.da Silva Filho, Y.Olivier, R.Silbey and J.L. Bredas; Chem Rev; Charge transport in organic semiconductors; 2007.
- [31] Dang Minh Trung ; Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués; thèse de doctorat ; Université Bordeaux I ; 2009.
- [32] D. Hatem\*, F. Nemmar et M.S. Belkaid ; Cellules solaires organiques: choix des matériaux, structures des dispositifs et amélioration du rendement et de la stabilité ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ; Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 ; 2009.
- [33] [https://www.google.com/search?q=le+principe+de+fonctionnement+d%27une+cellule+photovoltaïque+organique&client=firefox-b&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiXu427urTdAhXGmIsKHZy4BuYQ\\_AUICigB&biw=1366&bih=654#imgrc=\\_JGm0D995JiApM](https://www.google.com/search?q=le+principe+de+fonctionnement+d%27une+cellule+photovoltaïque+organique&client=firefox-b&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiXu427urTdAhXGmIsKHZy4BuYQ_AUICigB&biw=1366&bih=654#imgrc=_JGm0D995JiApM).
- [34] M. Knupfer; Applied Physics A: Materials Science & Processing 77; 623-626 2003.
- [35] C. H. Lee, G. Yu, D. Moses, and A. J. Heeger; Physical Review B 49; 2396 1994.
- [36] S.Alem-Boudjemline ; Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques, Thèse de doctorat ; Université d'Angers ; 2004.
- [37] B. Damien ; Photovoltaïque Organique : étude des interactions électroniques aux interfaces des hétérojonctions organiques ; thèse de doctorat ; Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) ; 2016.
- [38] Loïc Bailly ; Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ; Micro et nanotechnologies/ Microélectronique ; thèse de doctorat ; Université Sciences et Technologies - Bordeaux I ; 2010
- [39] J.M. Nunzi; Organic Photovoltaic Materials and Devices; Comptes Rendus Physique; 2002.
- [40] C.Deibel, T.Strobel and V.Dyakonov; Role of the charge transfer state in organic donor-acceptor solar cells; 2010.

- [41] Salima Alem-Boujemline ; Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques ; thèse de doctorat ; Université d'Angers ; <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011294>; 2006.
- [42] Berrezzoug Hanane ; Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque ; mémoire de master ; Université Dr Moulay Tahar de Saïda; 2016.
- [43] Y. Feng, X. Ju, W. Feng, H. Zhang, Y. Cheng, J. Liu, A. Fujii, M. Ozaki, and K. Yoshino; Applied Physics Letters 94; 2009.
- [44] B. Abdelmoumene, T. Mahmoud ; Etude des propriétés électroniques des cellules photovoltaïques organiques; thèse de doctorat ; Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen; 2011.
- [45] : Mathieu URIEN ; thèse de doctorat ; Université Bordeaux I ; 2008.
- [46] Farida Nemmar Belhocine; Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organique ; thèse de doctorat ; Université UMMTO.
- [47] Ameri, T. Dennler, G. Lungenschmied, & C.Brabec; Energy and Environmental Sciences 2, 347-363; Organic tandem solar cells: A review; 2009
- [48] M.P. de Jong, L.J. van Ijzendoorn, M.J.A. de Voigt ; Applied Physics Letters 77/14 ; 2000.
- [49] H. Sirringhaus, N. Tessler and R. H. Friend; Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers; 1998.
- [50] M. Makha ; Utilisation de diverses électrodes conductrices et transparentes comme anode des cellules photovoltaïques organiques, optimisation de l'interface à l'aide des couches tampons ; Université d'Angers ; <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01511059>; 2017.
- [51] Florent Monestier ; Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques ; Université Paul Cézanne Aix-Marseille; 2008.
- [52] Brabec, Adv. Funct. Mat. 11(5) 374 2001 et équipe de Groningen, V. D. Mihailtechi, JAP, 94, 6849 ; 2003.
- [53] T. B. Singh, N. Marjanović, G. J. Matt, S. Günes, N. S. Sariciftci, A. Moutagne 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 .
- [54] F. Monestier, "Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques". Thèse de Doctorat à l'Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, France ; 2008.

- [55] M.O. Reese et al; Optimal negative electrode for poly (3-hexythiophène): [6,6]-phenyl C61-butyric acid methyl ester bulk heterojonction photovoltaic devices; Applied Physics Letters, Appl Phys; Lett.92.53307,2008.
- [56] Fatima HADJERSI ; Investigation des propriétés structurales, optiques et électriques des films ITO élaborés par pulvérisation cathodique RF; Effet du recuit ; Université Ferhat Abbas de Sétif ; 2011.
- [57] Kherchaoui, Ghomrani Fatima-Zohra ; Elaboration et caractérisation de couches minces de ZnO : Al et ZnO : Al/TiO<sub>2</sub> ; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2012.
- [58] V. Djara, J.C. BernÅde ; Thin Solid Films 493/1-2 ; 2005 ; page 273.
- [59] V. Srikant, D. R. Clarke, J. App; Phys; 1998.
- [60] N. Blouin, A. Michaud, et M. Leclerc. A low-band gap poly (2,7-carbazole) derivative for use in high-performance solar cells. Advanced Materials; 2007
- [61] Frédéric Guillain ; Dépôt par voie liquide de couches inter-faciales pour cellules photovoltaïques organiques ; physique ; Université de Bordeaux ; <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01177081>; 16/07/2015.
- [62] A. Zaleska, E. Grabowska, J.W. Sobczak, M. Gazda, J. Hupka; Photocatalytic activity of n-modified TiO<sub>2</sub> under visible light: The effect of boron content, calcination temperature and TiO<sub>2</sub> matrix, Applied Catalysis B: Environmental, chapitre I. TCO & Spray CVD : Etat de l'art; 2009.

## ***Résumé***

### ***Simulation des cellules solaires photovoltaïques organiques à réseau interpénétré avec le logiciel GPVDM***

Lorsque on parle de l'énergie solaire photovoltaïque, on pense essentiellement aux filières classiques et aux cellules solaires en silicium cristallin et non cristallin intégrées dans un panneau qu'est protégé par un verre transparent et solide, bientôt cette technologie sera remplacée par des systèmes en plastique technique <<**des cellules photovoltaïques organiques**>>, cette technologie va révolutionner la production mondiale d'énergie, on retrouvera cette technologie dans le transport et la télécommunication par exemple sur les toits des automobiles entièrement transparents encor pour les ordinateurs les chargeurs portable etc.

Ce travail a été réalisé par simulation, il consiste à prévoir les caractéristiques de sortie des cellules solaires organiques. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre le logiciel GPVDM. Nous avons étudié une structure conventionnelle dont la couche active est à base de poly (3-hexylthiophène) (P3HT) et [6-6]-phényle-C61-butanoate de méthyle (PCBM). Nous avons fourni des efforts considérables pour mettre en œuvre le logiciel et aboutir à des rendements de conversion favorables. Plusieurs paramètres ont été pris en compte tels que l'épaisseur de la couche active, l'intensité lumineuse et les couches inter-faciales. Les résultats obtenus étaient satisfaisants et ils sont en accord avec la littérature.