

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du

DIPLOME DE MAGISTER

Option : physique des polymères

Par

ANSRI AMEL

**CARACTERISATIONS DES CELLULES
PHOTOVOLTAIQUES A BASE DES POLYMERES
CONDUCTEURS**

Président:

BENMOUNA Mustapha: Professeur, Université de Tlemcen.

Directeur de mémoire:

HAMOUNI Mohammed: Maitre de conférences, Université de Tlemcen.

Examineurs:

KHALDI Smain: Professeur, Université de Tlemcen.

NEGADI Amina: Professeur, Université de Tlemcen.

BERRAYAH Abdelkader: Professeur, Université de Tlemcen.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Recherche sur les Macromolécules de la faculté des sciences de l'université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen sous la direction de monsieur Mohammed HAMOUNI, maitre de conférences classe A. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur fructueuse orientation, leur conseil et encouragement continus et le temps qu'ils m'ont consacré durant la réalisation de cette étude.

Je tiens à remercier, vivement, Monsieur le professeur Mustapha BENMOUNA, directeur du laboratoire de recherche sur les Macromolécules de l'université de Tlemcen, d'avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

Monsieur le professeur Smain KHALDI, directeur de l'école préparatoire sciences et techniques de Tlemcen, a bien voulu examiner ce travail, qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

Monsieur Abdelkader BERRAYAH, professeur à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner le présent travail.

Que le professeur Amina NEGADI, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour avoir accepté de juger le présent travail.

Enfin, que toutes les personnes qui m'ont apporté aide et soutien au cours de la réalisation du présent mémoire soient sincèrement remerciés.

Au nom de Dieu le Clément et Le Miséricordieux

Louange à ALLAH le Tout-puissant

A mes chers parents

Qui m'ont encouragé durant toute ma vie

A mon cher frère

ILYES

A mes chères sœurs

ASSIA

CHAIMA

*A ma meilleure amie HEDDAR Soumia et je la souhaite bonne chance
dans son projet et son avenir.*

Je remercie tous les collègues de ma promotion.

*Je tiens à remercier sincèrement tous les membres de laboratoire de
recherche sur les macromolécules (LRM). Et tous ceux qui m'ont aidé de
prés ou de loin.*

Table des matières

Introduction générale

Introduction générale.....	1
Références bibliographiques.....	5

Chapitre I : Concepts généraux sur les matériaux et les cellules photovoltaïques organiques

I- Matériaux organiques.....	7
I.1- Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs.....	7
I.1.1- Pigments.....	8
I.1.2- Colorants.....	8
I.1.3- Polymères.....	9
I.1.4- Cristaux liquides.....	9
I.2- Semi-conducteur organique.....	11
I.2.1- Molécules conjuguées.....	11
I.2.2- Origine de la conductivité.....	12
I.3- Création des polarons et bipolarons dans la bande interdite.....	13
I.3.1- Principe de dopage.....	13
I.3.2- Porteurs de charges.....	15
a)- Polarons/les bipolarons.....	16
b)- Solitons.....	18
I.4- Transport de charges.....	19
I.4.1- Sauts entre états localisés.....	19
I.4.2- Transport de charges dans les matériaux organiques désordonnés.....	19
I.5- Mobilité.....	19
II- Généralités sur les cellules photovoltaïques organiques.....	20
II.1- Soleil.....	20
II.1.1- Caractéristiques générales.....	20
II.1.2- Structure interne du soleil.....	21

II.1.3- Energie du soleil	22
II.2- Cellule photovoltaïque.....	25
II.2.1- Principe de fonctionnement	25
II.3- Cellule photovoltaïque organique.....	28
II.3.1- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique.....	29
1. Absorption des photons avec création d'excitons	30
2. Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur	31
3. Dissociation des excitons.....	32
4. Transport des charges et collecte aux électrodes	33
II.3.2- Différents types de cellule photovoltaïque organique.....	34
1. Structure à simple couche	35
2. Structure à hétérojonction bicouche	36
3. Structure à hétérojonction en volume.....	37
III- Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	37
III.1- Caractéristique idéale.....	37
III.2- Caractéristique réelle.....	39
IV- Paramètres essentiels caractérisant une cellule photovoltaïque organique	42
IV.1- Courant de court-circuit J_{CC}	42
IV.2- Tension de circuit ouvert V_{CO}	42
IV.3- Facteur de forme.....	42
IV.4- Rendement de conversion d'énergie.....	43
V- Rendement quantique externe (EQE).....	43
VI- Calcul sur le modèle à une seule diode.....	44
VI.1- Calcul de J_{CC} , V_{CO} , J_{PH} et J_{CC}	44
VI.2- Calcul de R_s et R_p	45
VI.3- Calcul du courant maximal J_M et la tension maximal V_M	46
Références bibliographiques.....	48

Chapitre II : Résultats et discussions

Première partie : EFFETS DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DU FLUORURE DE LITHIUM (LiF) SUR LA CARACTÉRISTIQUE COURANT-TENSION ET SUR LES PARAMÈTRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE DE TYPE ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

1- Effets de l'épaisseur de la couche Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.....	55
2- Effets de l'épaisseur de la couche Fluorure de Lithium (LiF) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.....	58

Deuxième partie : EFFETS DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE SUR LA CARACTÉRISTIQUE COURANT-TENSION ET SUR LES PARAMÈTRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE DE TYPE ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

1- Effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.....	70
2- Effets de l'intensité lumineuse sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.....	73
Références bibliographiques.....	82

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale	83
Perspectives.....	85

Annexe

I- Description de la cellule ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.....	86
I.1- Anode en Indium Tin Oxyde (ITO).....	86
I.2- Cathode en Aluminium (Al).....	87
I.3- Dépôt de poly (3,4-éthylènedioxythiophène)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT-PSS).....	87
I.4- La couche active phthalocyanine de cuivre/buckminster fullerène [60] (CuPc/C60).....	89
I.5- Insertion d'une couche de fluorure de lithium (LiF).....	90
Références bibliographiques.....	92

Listes des figures

Chapitre I : concepts généraux sur les matériaux et les cellules photovoltaïques

Figure I-1 :	Classement des semi-conducteurs organiques.....	7
Figure I-2 :	Exemples de la structure moléculaire de différents pigments utilisés dans les cellules solaires organiques.....	8
Figure I-3 :	Les polymères semi-conducteurs ordinaires et les macromolécules utilisées dans les cellules photovoltaïques organiques.....	9
Figure I-4 :	(a) La structure moléculaire de l'hexaphenyl -substitué hexabenzocorone (HBCPhC12) utilisée comme cristal liquide dans les cellules solaires organiques. (b) structure colonnaire du HBC-PhC12.....	10
Figure I-5:	Exemple de polymère conducteur, PPV (Poly-Phéyl vénylène).....	11
Figure I-6:	Représentation de la molécule d'éthylène. A : molécule d'éthylène, B : représentation des orbitales sp^2 et pz du carbone et des orbitales 1s de l'hydrogène.....	12
Figure I-7 :	Structure de bandes des polymères conducteurs.....	12
Figure I-8 :	dopage des semi-conducteurs inorganiques.....	13
Figure I-9 :	dopage des polymères conducteurs.....	14
Figure I-10:	conductivité de divers polymères conducteurs (différents taux de dopage) et de matériaux classiques à 300 K.....	15
Figure I-11:	mécanisme d'apparition d'un polaron dans le polythiophène.....	16
Figure I-12:	mécanisme de dopage avec 2 polarons sur la chaîne de polythiophène.....	17
Figure I-13:	mécanisme de dopage avec 1 bipolaron sur la chaîne de polythiophène....	18
Figure I-14:	schéma sur la source soleil.....	20
Figure I-15:	Structure interne du soleil.....	21
Figure I-16:	L'effet du soleil sur la terre.....	22
Figure I-17:	Constant d'illumination.....	24
Figure I-18:	Spectre AM0, AM1 et AM1.5.....	24

Figure I-19:	cellule photovoltaïque monocristalline.....	25
Figure I-20:	Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en silicium et illustration des phénomènes de photogénération et de collecte de porteurs pour différentes longueurs d'ondes.....	27
Figure I-21:	Phototype de cellule organique flexible et transparente.....	29
Figure I-22:	les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique.....	30
Figure I-23:	Absorption des photons avec création des d'excitons.....	30
Figure I-24:	Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur.....	31
Figure I-25:	le diagramme énergétique à la jonction Donneur/Accepteur et les conditions de dissociation.....	32
Figure I-26:	Transport des charges et collecte aux électrodes.....	33
Figure I-27:	structure d'une cellule photovoltaïque organique.....	34
Figure I-28:	structure d'une cellule photovoltaïque organique monocouche.....	35
Figure I-29:	photogénération de charges dans une structure métal-isolant-métal.....	35
Figure I-30:	structure d'une cellule photovoltaïque organique à hétérojonction bicouche.....	36
Figure I-31:	structure d'une cellule photovoltaïque organique à hétérojonction en volume.....	37
Figure 1.32:	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale dans obscurité.....	38
Figure I-33:	Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque idéale sous claiement.....	39
Figure I-34:	circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclaircment (modèle à une diode).....	39
Figure I-35:	Définition des résistances série et shunt.....	40
Figure I-36:	(a) caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircment et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V).....	41

Chapitre II : Résultats et discussions

Première partie : EFFETS DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DU FLUORURE DE LITHIUM (LiF) SUR LA CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION ET SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE DE TYPE ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

- Figure II-1:** caractérisation courant-tension d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al pour différentes épaisseurs de la couche LiF sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 55
- Figure II-2:** Effet de l'épaisseur sur la densité de photocourant d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 61
- Figure II-3:** Effet de l'épaisseur sur la densité de courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 62
- Figure II-4:** Effet de l'épaisseur sur la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 63
- Figure II-5:** Effet de l'épaisseur sur la résistance série d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 64
- Figure II-6:** Effet de l'épaisseur sur la résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 65
- Figure II-7:** Effet de l'épaisseur sur le facteur de forme d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 66

Figure II-8: Effet de l'épaisseur sur le rendement d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm ²	67
--	----

Deuxième partie : EFFETS DE L'INTENSITE LUMINEUSE SUR LA CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION ET SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE DE TYPE ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Figure II-9: caractérisation courant-tension d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al pour différentes illumination.....	70
Figure II-10: Effet de l'intensité lumineuse sur la densité de photocourant d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	74
Figure II-11: Effet de l'intensité lumineuse sur la densité de courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	75
Figure II-12: Effet de l'intensité lumineuse sur la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	76
Figure II-13: Effet de l'intensité lumineuse sur la résistance série d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	77
Figure II-14: Effet de l'intensité lumineuse sur la résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	78
Figure II-15: Effet de l'intensité lumineuse sur facteur de forme d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	79

Figure II-16: Effet de l'intensité lumineuse sur rendement d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.....	80
--	----

Annexe : propriétés physiques des matériaux utilisés

Figure 1: Schéma de la cellule métallisée.....	86
Figure 2: poly (3,4-éthylènedioxythiophène) PEDOT.....	87
Figure 3: poly (styrenesulfonate) PSS.....	87
Figure 4: une couche accepteuse Buckminster fullerène [60] (C60).....	89
Figure 5: une couche donneuse Phthalocyanine de Cuivre (CuPc).....	89
Figure 6: Spectre d'absorption du CuPc et du C60 et le spectre solaire pour comparaison.....	89
Figure 7: Régime de bande plate de la structure ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/Al.....	90

Liste des tableaux

Chapitre II : Résultats et discussions

Première partie : EFFETS DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DU FLUORURE DE LITHIUM (LiF) SUR LA CARACTÉRISTIQUE COURANT-TENSION ET SUR LES PARAMÈTRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE DE TYPE ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

- Tableau II.1:** la variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al pour différentes épaisseurs de la couche Fluorure de Lithium (LiF)..... 57
- Tableau II.2:** la variation des paramètres de la cellule photovoltaïque organique d'une structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al pour différentes épaisseurs de la couche Fluorure de Lithium (LiF)..... 60

Deuxième partie : EFFETS DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE SUR LA CARACTÉRISTIQUE COURANT-TENSION ET SUR LES PARAMÈTRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE DE TYPE ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

- Tableau II.3:** la variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert d'une structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3nm)/Al pour différents éclaircissements (mW/cm^2)..... 72
- Tableau II.4:** la variation des paramètres de la cellule photovoltaïque organique d'une structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al pour différents éclaircissements (mW/cm^2)..... 73

Nomenclature

Les symboles sont généralement définis quand ils apparaissent dans le texte. La liste ci dessous contient seulement les symboles, les abréviations et les indices les plus communément utilisés.

symbole	définition	unité
J	Densité de courant	(mA/cm ²)
J _{PH}	La densité de photocourant	(mA/cm ²)
J _d	La densité de courant de la diode	(mA/cm ²)
J _{CC}	La densité de courant de court-circuit	(mA/cm ²)
R _S	La résistance série	Ohm (Ω)
R _P	La résistance parallèle	Ohm (Ω)
FF	Le Facteur de forme	
η	Le rendement de conversion de photocourant	(%)
V _{CO}	La tension de circuit ouvert	Volt (V)
V	La tension	Volt (V)
J _S	La densité de courant de saturation	(mA/cm ²)
J _m	La densité de courant maximale	(mA/cm ²)
V _m	La tension maximale	Volt (V)
P _{max}	La puissance maximale	(mw/cm ²)
P _{in}	La puissance incidente	(mW/cm ²)
n	Le facteur d'idéalité	
K _B	La constante de Boltzmann (1.38×10 ⁻²³)	J.K ⁻¹
T	La température absolue	Kelvin (K)
q	La charge de l'électron (1.6×10 ⁻¹⁹)	Coulomb (cb)
h	La constante de Planck (6.63×10 ⁻³⁴)	m ² .Kg.S ⁻¹
c	La vitesse de la lumière (3×10 ⁸)	m.S ⁻¹
λ	La longueur d'onde	nm
E _{ph}	L'énergie du photon	eV
EQE	Le rendement quantique externe (external quantum efficiency)	(%)

IQE	Le rendement quantique interne (internal quantum efficiency)	(%)
X_A	l'affinité électronique de l'accepteur.	
L_n	Longueur de diffusions des électrons.	nm
L_p	Longueur de diffusions des trous.	nm
σ	La conductivité des matériaux.	$S.cm^{-1}$
τ	La durée de vie.	S
ΔE	L'énergie de déformation élastique de la chaîne.	eV
U	L'énergie de répulsion coulombienne.	eV
μ	La mobilité électronique.	$cm^2V^{-1}s^{-1}$
m	L'indice associé à la masse d'air.	
A	Etant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre.	
I_{PD}	L'énergie d'ionisation du donneur.	eV
E_{CT}	L'énergie de séparation de l'électron et du trou juste après le transfert de charge à l'interface donneur-accepteur.	eV
μ_e	Mobilité des électrons	$cm^2V^{-1}s^{-1}$
μ_h	Mobilité des trous	$cm^2V^{-1}s^{-1}$
E_{ex}	Energie d'excité.	eV
φ	Le flux lumineux incident.	
J_p	La densité de courant de la résistance parallèle.	(mA/cm ²)
ΔW_{int}	La différence du potentiel interne.	eV
ΔW_{anode}	La différence de travail de la sortie de l'anode.	eV
$\Delta W_{cathode}$	La différence de travail de la sortie de la cathode.	eV

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Les matières plastiques, à la différence des métaux, sont réputées ne pas conduire l'électricité. De fait, elles sont utilisées pour isoler les fils de cuivre des câbles électriques ordinaires. En 1977, A.J.Heeger, Q.G.Mac Diarmid et H. Shirakawa ont montré qu'après certaines modifications, un plastique peut devenir conducteur de l'électricité, c'est-à-dire « métal synthétique ». Pour ce faire, le polymère doit être conjugué, c'est-à-dire que la chaîne principale du polymère doit comporter alternativement des liaisons simples et multiples ; de plus il doit être dopé, ce qui consiste à enlever des électrons (par oxydation) ou à en ajouter (par réduction). Ces « trous » ou électrons supplémentaires peuvent se déplacer le long de la chaîne de polymère qui devient ainsi conductrice d'électricité [1].

Les domaines d'application vastes et nombreux dépendent de la nature des polymères conjugués : revêtement antistatiques, dispositifs chauffants par effet Joule avec les polymères conducteurs intrinsèques (PCI), diodes électroluminescentes, cellules électrochimiques ou photovoltaïque avec les semi-conducteurs.

Dans le domaine des nouvelles technologies pour l'énergie, le solaire photovoltaïque organique est en train de devenir un axe de développement industriellement important. Dans ce contexte, une recherche de base est indispensable pour valider et démontrer l'intérêt d'une filière plastique par un abaissement décisif des coûts [2].

L'effet photovoltaïque, qui consiste en la production d'énergie électrique à partir d'énergie lumineuse a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel. Le premier dispositif photovoltaïque date de 1883, mais c'est en 1954 qu'a réellement débuté l'évolution de la conversion photovoltaïque avec le développement par les Laboratoires Bell d'une cellule solaire, réellement efficace, à base de silicium [3]. En 1958, le premier satellite American Vanguard I fut équipé d'une alimentation photovoltaïque.

Etant donné les énormes coûts de production à l'époque, le photovoltaïque est resté limité à un nombre restreint d'applications, notamment aérospatiales [4]. Lorsque

ces cellules solaires illuminées sont raccordées à un circuit extérieur, un courant est alors débité dans ce circuit et l'énergie lumineuse est convertie en électricité.

La technologie actuelle est partagée entre le silicium monocristallin (80% du marché) et le silicium polycristallin, dont la part tend à augmenter. La recherche de nouveaux semi-conducteurs inorganiques destinés à la conversion photovoltaïque porte actuellement sur des composés comme le tellure de cadmium (CdTe) ou la chalcopyrite CuInSe₂ (CIS) [5].

Du fait de leur faible coût de production et des techniques de mise en œuvre qui sont inaccessibles aux matériaux inorganiques, les polymères semi-conducteurs organiques offrent une alternative intéressante aux semi-conducteurs classiques. En effet, les molécules organiques et les polymères sont faciles à manipuler et leur choix comme matériau de base permettrait de n'avoir recours pour l'ensemble de l'ingénierie de la cellule (c'est-à-dire du substrat jusqu'à la capsule protectrice) qu'à une seule et même technologie. Par ailleurs, les polymères sont pour certains dégradables garantissant une technologie propre dans un contexte de développement durable.

L'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans et les premières cellules solaires organiques présentaient des rendements de conversion en énergie (η) très faibles, de l'ordre de 10^{-5} %. Dès 1978, Merritt prévoyait que les valeurs de rendements de conversion en énergie pourraient dépasser les 1 %, mais ce n'est qu'en 1986 que ce rendement a été atteint avec les travaux de Tang ($\eta = 0,95$ %) [6]. Pendant les années qui suivirent, cette valeur a parfois été reproduite avec des matériaux différents [7], mais elle n'a jamais été améliorée. Ce n'est que depuis le début du XXI^e siècle que le rendement a recommencé à croître, atteignant 2,5 % avec les travaux publiés par Shaheen [8], 3,6 % avec ceux de Peumans sous éclairage AM1,5 avec une puissance lumineuse de 100 mWcm^{-2} (équivalent de l'éclairage du soleil à la surface de la terre en Europe) [9] et enfin 4,2 % avec une double hétérostructure de C60 et de phthalocyanine de cuivre [10].

Aujourd'hui, le record est détenu par les chercheurs de Konarka, une émanation de Siemens en Allemagne, avec un rendement de conversion en énergie qui dépasse les 5 % [11]. Cette valeur reste encore faible si on la compare à celles qui ont été

obtenues en laboratoire avec des cellules en silicium monocristallin (24,7%), multicristallin (19,8 %) et amorphe (12,7 %) [12].

Actuellement, environ 90% de la production utilisent la technologie de silicium cristallin. Grâce aux programmes nationaux de financement et les investissements dans les équipements de production, le coût de KWh produit par une cellule photovoltaïque est aujourd'hui dix fois inférieur à celui qui prévalait dans les années 80. Chaque doublement de la capacité de production conduit à une baisse prix de l'ordre de 18%. Cette forte croissance a toute fois entraîné pour l'année 2005 une pénurie de silicium qui va se répercuter davantage sur le prix déjà élevé de cette sidérurgie. La substitution du silicium par les matériaux organiques est considérée comme une alternative prometteuse pour divers raisons : faible coût, facilité de mise en forme, technologies de basse température, dispositifs souples et légers....

Le but à long terme (2020) est de produire l'énergie solaire à des coûts compétitifs de ceux de l'énergie fossile [13].

- **Motivation**

A l'heure actuelle, la quasi-totalité des cellules photovoltaïques commerciales utilisent le silicium cristallin comme matériau actif. Les rendements de ce type de cellules sont compris en moyenne entre 10 et 20% selon la nature du silicium utilisé. Toute fois le silicium monocristallin et polycristallin présente plusieurs inconvénients liés à un coût de production élevé, à une disponibilité parfois limitée et au caractère rigide et cassant du matériau [14].

Le développement de cellules photovoltaïques organiques constitue un grand enjeu de la filière électronique organique. Ces cellules photovoltaïques organiques sont prometteuses pour la production d'énergie à bas coût. Elles peuvent être fabriquées sur substrat souple, ce qui leur permettra de s'intégrer facilement dans les appareils nomades tel que les téléphones portables, les ordinateurs portables....

- **Position du problème**

Compte tenu des faibles performances des cellules solaires organiques étudiées aux cours des vingt dernières années, la plupart des travaux ont concerné

essentiellement des aspects liés aux problèmes fondamentaux posés par le fonctionnement des cellules. Si ces travaux ont conduit à des avancées importantes tant en ce qui concerne la compréhension des processus élémentaires mis en jeu que l'amélioration de l'efficacité des cellules, la perspective aujourd'hui réelle d'aboutir à échéance de quelques années à des cellules utilisables dans le cadre d'applications ciblées (supports souples, durée de vie limitée) implique nécessairement la mise au point de nouveaux semi-conducteurs organiques spécifiquement conçus pour la conversion photovoltaïque.

Dans le présent travail, nous nous proposons d'étudier les caractéristiques et les paramètres de la cellule photovoltaïque à base des polymères conducteurs. A cet effet, nous examinons l'effet de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) et l'effet de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al et sur les paramètres de cette cellule telle que: la densité de photocourant J_{ph} , la densité de courant de court-circuit J_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} , la résistance série R_S et la résistance parallèle R_P , le facteur de forme FF et le rendement de conversion photovoltaïque η .

En plus d'une introduction générale et d'une conclusion, ce mémoire de Magister, se subdivise en deux grands chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons une généralité scientifique essentielle sur les matériaux organiques et les cellules photovoltaïques organiques.

Dans le deuxième chapitre qui constitue notre contribution personnelle, nous examinons l'effet d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al sous fort éclairement et sur les paramètres de cette cellule. Nous examinons, ensuite l'effet de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension et sur les paramètres de la même cellule organique.

Références bibliographiques

[1] : P. Andersson, R. Forchheimer, P. Tehrani, M. Berggren, *Advanced Functional Materials*, vol 17, N^o 16, 3074-3082, (2007).

[2] : S. Bouchekouf, B. Marir et M. Benabbas-Marir, Etude numérique de la cellule photovoltaïque organique MPP/ZnPc, *Revue des Energie Renouvelables*, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie, Vol 12, N^o 2, 163-174, (2009).

[3] : B. Brouse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, thèse de doctorat, l'Université de Limoges, France, électronique des hautes fréquences et optoélectronique, 54 (2004).

[4] : L. Lkzmerski, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, 71 (1997).

[5] : R. De Bettignies, Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués, thèse de doctorat, en Physique, Ecole doctorale d'Angers, 573 (2003).

[6] : C. W. Tang. Two-layer organic photovoltaic cell, *Appl. Phys. Lett.* 48(2), 183-185, (1986).

[7] : D. Wöhrle, D. Meissner, organic solar cells, *Adv. Mater.* 3(3), 129-138, (1991).

[8] : S. E. Shaheem, C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz, J. C. Hummelen, 2.5% efficient organic plastic solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, 78,6, 841-843, (2001).

[9] : P. Peumans, S. R. Forrest, very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine/C₆₀ photovoltaic cells, *Appl. Lett.* 79 (1), 126-128, (2001).

[10] : MA. Xue, S. Uchiba, B. P. Rand, et S. R. Forrest, 4.2% efficient organic photovoltaic cells with low series resistances. Appl, Phys. Lett. 84 (16), 3013-3015, (2004).

[11] : <http://www.solarbuzz.Com/News/News EUTEM.Htm>.

[12] : P. Campbell, M. A. Greem, High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells, solar Energy Materials solar cells, 65, 1-4, 369-375, (2001).

[13] :T. X. Lav, Réseaux et réseaux interpénétrés carbozole/perylène à hétérojonctions volumiques, thèse de doctorat, de l'Université de Cergy-Pontoise, (2008).

[14] : Q. Bricaud, Nouveaux polymères π -conjugués pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Matière, Molécules, Université d'Angers. 920 (2008).

CHAPITRE I

*Aperçu bibliographique sur les
matériaux et les cellules
photovoltaïques organiques*

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de concepts qui seront utilisés dans notre étude. Dans cette partie qui constitue un support théorique pour notre mémoire, nous présentons des notions générales sur les matériaux organiques conducteurs, le photovoltaïque, les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïque classique et organique, les différents types de cellules photovoltaïques organiques, les circuits pour modéliser les cellules photovoltaïques, ainsi que les principaux paramètres qui peuvent être extraits pour n'importe quelles cellules photovoltaïques organiques.

I- Matériaux organiques

I.1- Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs

Selon les propriétés mécaniques, les matériaux organiques semi-conducteurs peuvent être classés en trois catégories : solubles, insolubles et cristaux liquides comme l'indique la figure I-1. Ces derniers peuvent être classés également soit en molécules avec une structure qui se répète régulièrement et constituée de quelques unités (oligomères) ou d'une seule unité (monomère), soit en molécules qui ont plus de 10 unités (polymères).

Les oligomères et les monomères absorbent de la lumière visible et ils sont appelés aussi les chromophores. Par convention, ils portent le nom des colorants s'ils sont solubles et le nom des pigments s'ils sont insolubles.

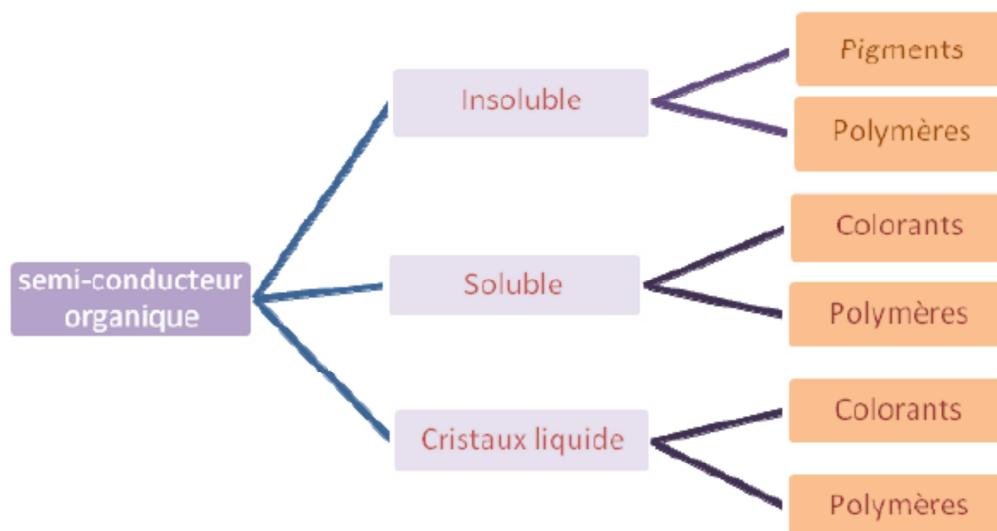


Figure I- 1 : Classement des semi-conducteurs organiques

I.1.1- Pigments

Ces pigments sont de plus en plus répandus dans le domaine du photovoltaïque au cours de ces dernières années. Parmi ceux-ci, nous citons le perylène ou l'acide diimide perylènetétracarboxylique et le phthalocyanine ou les différents phthalocyanine métalliques. Aussi le fullerène (C60) et le pentacène sont considérés comme des pigments puisqu'ils sont insolubles dans la plupart des solvants [1].

La figure I-2, illustre certaines structures moléculaires de différents pigments utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques organiques.

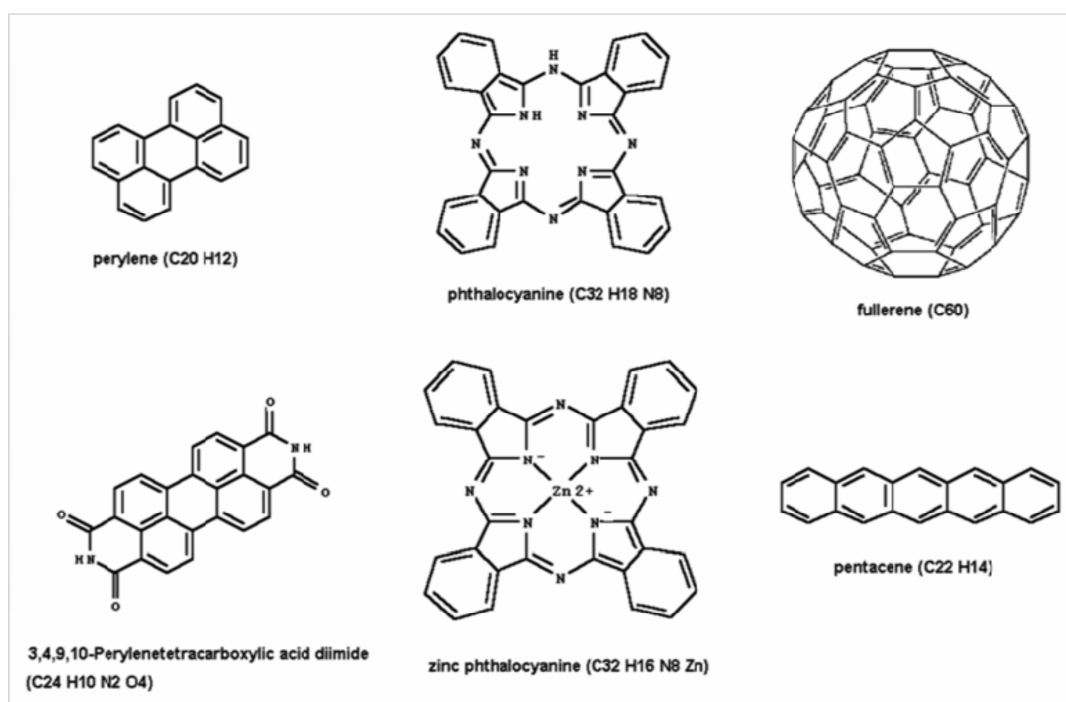


Figure I- 2 : Exemples de la structure moléculaire de différents pigments utilisés dans les cellules solaires organiques

I.1.2- Colorants

La fabrication des cellules solaires organiques à base de pigments nécessite un dépôt des couches organiques par la méthode d'évaporation sous vide. Cette technique est non seulement compliquée mais elle nécessite un temps assez lent pour atteindre le vide poussé (High Vacuum). De ce fait, elle est difficilement transférable vers l'industrie. Par contre, les pigments peuvent être synthétisés par l'ajout des solubles adaptés aux chaînes de molécules, comme il a été démontré par Pertrisch et al en

(2000), pour l'acide diimide perylène-tétracarboxylique et le phthalocyanine. De cette façon, les dérivés de fullerène soluble, tel que le PCBM (figure I-3) peuvent être synthétisés et utilisés dans les cellules solaires organiques obtenues par spin-on (tournette) [2].

I.1.3- Polymères

Les polymères, selon leur structure moléculaire et leur composition chimique, ils peuvent être: soluble, insoluble ou des cristaux liquides. Aussi ils peuvent être utilisés en tant que donneur ou accepteur d'électrons dans les cellules solaires organiques. La figure I-3 montre la structure moléculaire des polymères semi-conducteurs ordinaires ainsi que le type accepteur de fullerène et un de ces dérivés solubles utilisé dans les cellules solaires organiques. Autres polymères organiques étudiés dans les cellules photovoltaïques sont, par exemple: le polythiophène et le poly (para-phénylène vinylène) (PPV) [3].

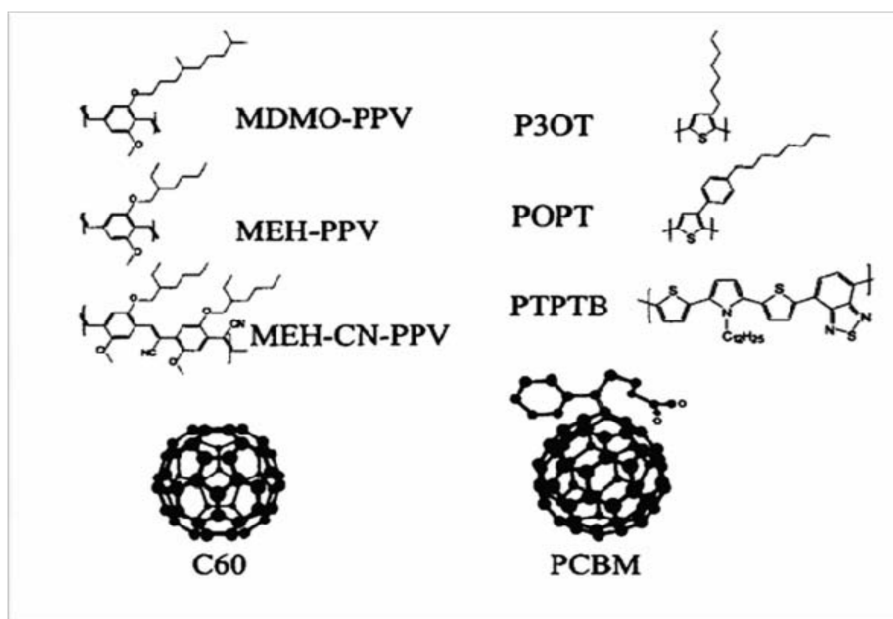


Figure I-3 : Les polymères semi-conducteurs ordinaires et les macromolécules utilisées dans les cellules photovoltaïques organiques

I.1.4- Cristaux liquides

Récemment, les cristaux liquides ont procréé une nouvelle catégorie utilisée dans les cellules solaires organiques. En effet, ils offrent deux paramètres avantageux pour les cellules solaires organiques à savoir une mobilité de charge suffisamment

grande et une importante longueur de diffusion des excitons (quelques 100 nm) [4]. Pour une certaine plage de variation des températures, ces matériaux présentent des propriétés situées entre celles des liquides et celles des solides. En général, les molécules des cristaux liquides ont tendance à être rangées dans une structure ordonnée comme étant un solide cristallin mais elles présentent des propriétés mécaniques semblables à celles des liquides, c'est-à-dire qu'elles sont molles (pâteux) [5]. Par ailleurs, un haut rendement quantique externe (EQE), de plus de 34% à 490 nm [6], a été observé par Schmidt-Mende et al en (2001) en effectuant des mesures sur des cellules solaires organiques de type double couche à base de cristaux liquides (hexaphenyl-substitutes hexabenzocorone) (HBC-PhC12) en tant que donneur et d'un dérivé de l'acide diimide dicarboxylique perylène comme un accepteur au niveau de la couche active de la cellule [7]. A température ambiante, le HBC-PhC12 a une structure semblable à un disque (un liquide discotic) où les molécules s'organisent en une structure colonnaire [8]. La Figure I-4, illustre la structure moléculaire de l'hexaphenyl -substitué hexabenzocorone (HBCPhC12) utilisée comme cristal liquide dans les cellules solaires organiques et structure colonnaire du HBC-PhC12.

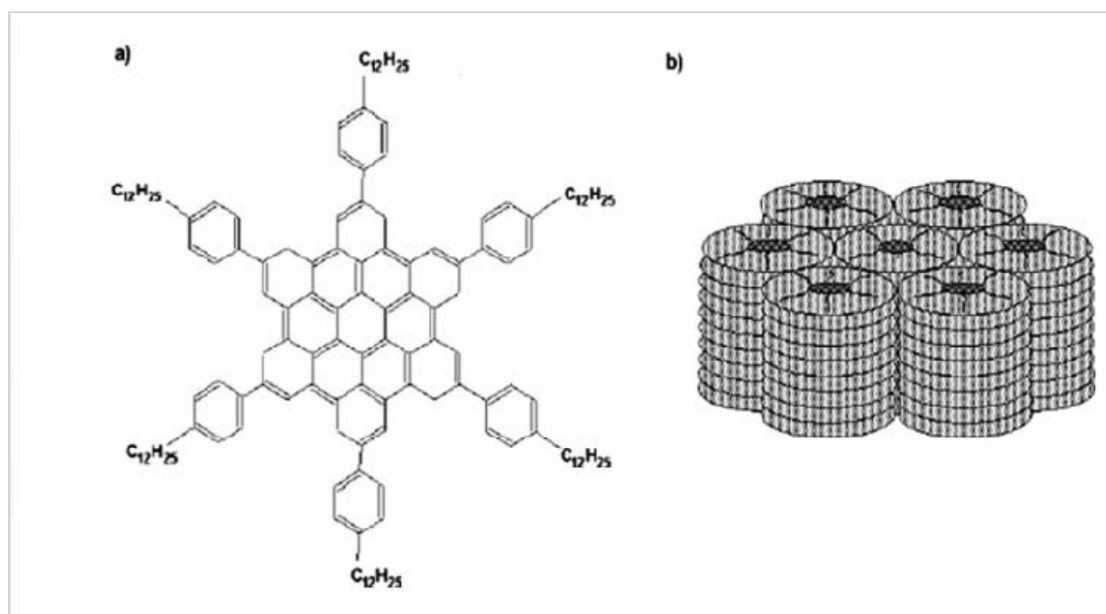


Figure I-4 : (a) La structure moléculaire de l'hexaphenyl -substitué hexabenzocorone (HBCPhC12) utilisée comme cristal liquide dans les cellules solaires organiques. (b) structure colonnaire du HBC-PhC12 [7].

I.2- Semi-conducteur organique

Un semi-conducteur organique est un composé organique, sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques. Ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique, ou électronique des plastiques [9].

I.2.1- Molécules conjuguées

Les polymères (ou petites molécules) semi-conducteurs sont des polymères conjugués. Ils alternent les liaisons carbonées simples et doubles. Comme il sera détaillé par la suite, celles-ci sont délocalisées, ce qui permet le transport de charges à travers la molécule.

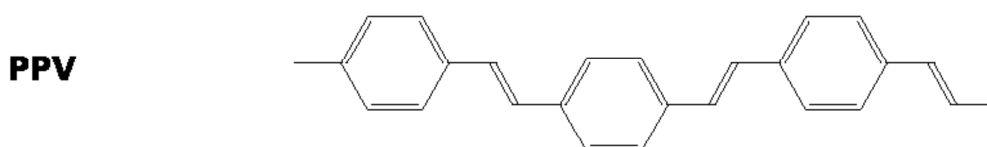


Figure I-5 : exemple de polymère conducteur, le PPV (poly-phényl vénylène).

Les liaisons carbone-carbone, dites covalentes, lient deux atomes identiques et résultent en un partage des électrons périphériques qui se déplacent alors sur des orbitales moléculaires communes aux deux atomes. Ces liaisons moléculaires s'obtiennent par superposition des orbitales atomiques. Ainsi, dans l'atome de carbone, les quatre électrons de valence se répartissent entre l'orbitale 2s et les trois orbitales 2p (p_x , p_y et p_z). Une liaison σ carbone-carbone née de la superposition d'une des trois orbitales atomiques hybrides sp^2 de chaque carbone [10]. Quant aux orbitales p_z des deux carbones, qui pointent perpendiculairement aux autres orbitales hybrides sp^2 , elles se chevauchent pour former une liaison π [11].

Pour illustrer ces propriétés, nous montrons l'exemple de la molécule d'éthylène sur la figure (figure I-6).

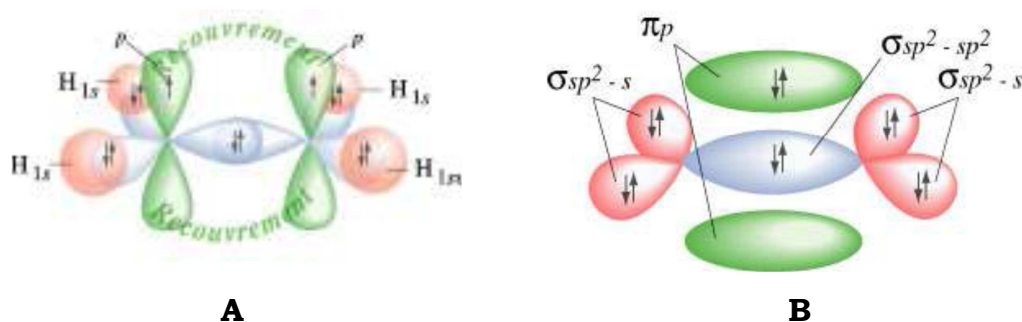


Figure I-6: Représentation de la molécule d'éthylène. A : molécule d'éthylène, B : représentation des orbitales sp² et pz du carbone et des orbitales 1s de l'hydrogène.

I.2.2- Origine de la conductivité

Lorsque deux orbitales atomiques s'associent, elles donnent naissance à une orbitale moléculaire. Celle-ci peut avoir deux niveaux d'énergie. Dans le cas de la liaison π , la plus basse énergie π est dite liante, formant la bande de valence : HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), alors que la plus haute π^* est dite anti-liante, formant la bande de conduction : LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Ce band gap confère le caractère semi-conducteur [12].

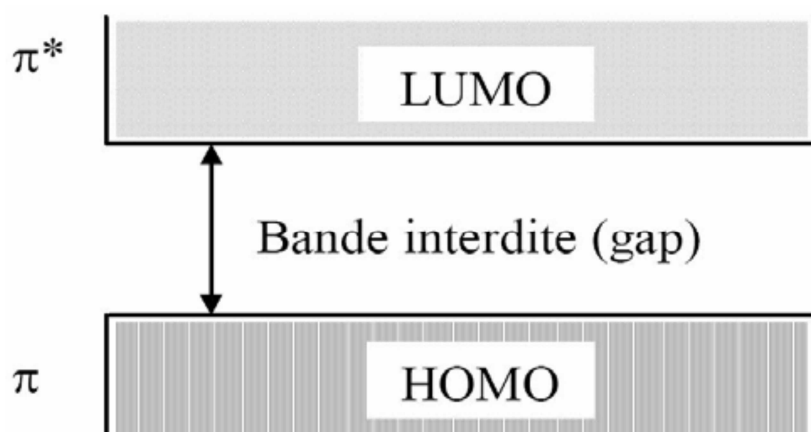


Figure I-7 : Structure de bandes des polymères conducteurs

Le caractère semi-conducteur d'un matériau organique est dû aussi à la présence d'un système conjugué, c'est-à-dire à l'alternance de liaison carbone simple (σ) et double ($\sigma + \pi$). Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des exemples de ce type de semi-conducteur. Comparativement aux matériaux conducteurs

classiques, les polymères conducteurs ont une grande résistance. Pour augmenter leur conductivité électrique, on peut les dopés par des métaux conducteurs [13].

I.3- Création des polarons et des bipolarons dans la bande interdite

La bande interdite des polymères conjugué est généralement assez large : de l'ordre de 2,7 eV, pour le PPV par exemple. Ces matériaux sont donc isolants. Cependant, un polymère peut devenir semi-conducteur ou conducteur grâce à l'introduction de charges. L'introduction de ces charges se fait par un dopage qui peut être de type p ou n [14].

I.3.1- Le principe de dopage

On parle de dopage de polymères, par analogie avec le dopage des semi-conducteurs inorganiques classiques, même si, le processus chimique et le phénomène physique engendré sont très différents. Le principe du dopage des semi-conducteurs classiques consiste à introduire des impuretés donneuses (dopage de type n), ou accepteuses (dopage de type p) dans le matériau par substitution des atomes d'origine. Du fait de la rigidité du réseau cristallin, le diagramme de bandes du matériau n'est pas modifié et le dopage n ou p revient à introduire dans le bas de la bande de conduction ou le haut de la bande de valence un électron ou un trou délocalisé comme le montre la Figure I-8 [15].

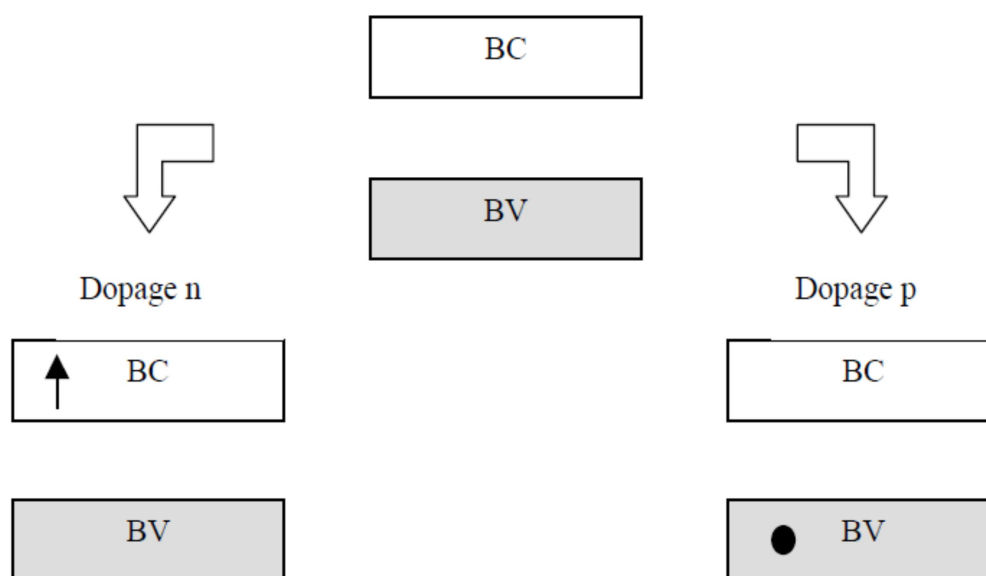


Figure I-8 : dopage des semi-conducteurs inorganiques.

Le dopage des polymères conducteurs est une véritable réaction d'oxydoréduction du polymère qui peut être effectué soit par voie électrochimique, soit par exposition à des gaz, soit en solution contenant des espèces oxydantes (type p) ou réductrices (type n). L'apparition de ces charges supplémentaires casse la structure répétitive de la molécule et introduit localement une déformation du réseau. Donc, le schéma de bandes n'est pas rigide [14]. Du fait de la déformation du réseau, des états appartenant aux bandes de valence et de conduction sont profondément modifiés. Ils sont déplacés et apparaissent comme des états localisés dans le gap (Figure I-9). Parallèlement, le nombre d'états qui restent dans la bande de valence et dans la bande de conduction diminue d'autant. Pour compenser l'apparition d'une charge sur le squelette macromoléculaire conjugué, la neutralité du système est assurée par l'insertion d'un contre ion au voisinage de la chaîne. Contrairement au dopage des semi-conducteurs classiques, celui-ci est réversible et facilement contrôlable.

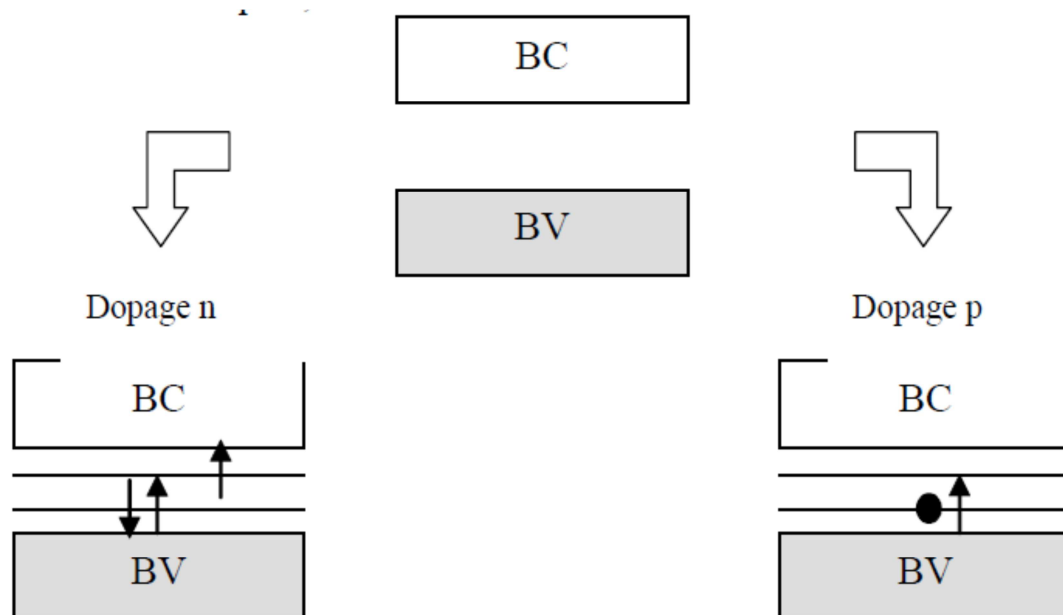


Figure I-9 : dopage des polymères conducteurs.

Les espèces introduites (porteurs de charge) permettent d'assurer le transport électronique dans ces matériaux. En fonction du dopant et du taux de dopage, on peut observer une transition isolant-conducteur voire dans certains cas isolant-métal (Figure I-10).

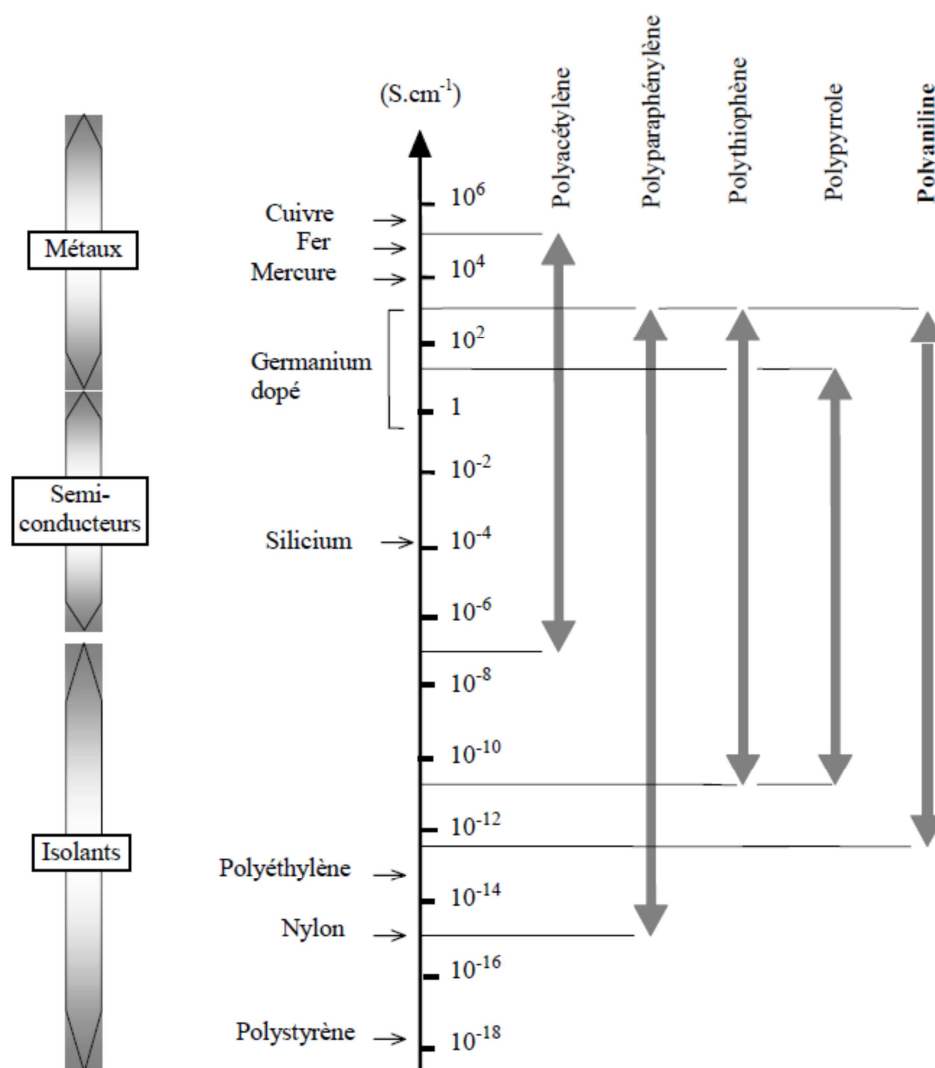


Figure I-10 : conductivité de divers polymères conducteurs (différents taux de dopage) et de matériaux classiques à 300 K.

I.3.2- Les porteurs des charges

Lors du processus de dopage, l'introduction des charges modifie localement l'alternance des simples et doubles liaisons, ce qui en retour localise les porteurs de charge sur la chaîne.

Les quasi-particules ainsi formées peuvent se classer en deux types :

- les polarons / les bipolarons dans les polymères à état fondamental non dégénéré.
- les solitons chargés dans les polymères à état fondamental dégénéré.

a) Les polarons / les bipolarons

Le Polaron est le défaut créé par l'injection d'une charge positive ou négative, est associé à une déformation locale de la chaîne – ion radical pour le chimiste (Figure I-11) [16]. Il est localisé sur un nombre fini de cycles. Le polaron est à la fois un porteur de charge (valeur $\pm e$) et un porteur de spin ($S = 1/2$) le spin de l'électron correspond à la rotation de l'électron sur lui-même, ce qui engendre également un moment magnétique. La valeur du spin peut prendre deux valeurs déterminées $+1/2$ ou $-1/2$ qui sont associées au moment cinétique de l'électron. Le déplacement (cohérent ou par sauts) des polarons le long du squelette de la macromolécule (contribution intra-chaîne) ou de chaîne à chaîne (contribution inter-chaîne) contribue au transport électronique dans le matériau [17].

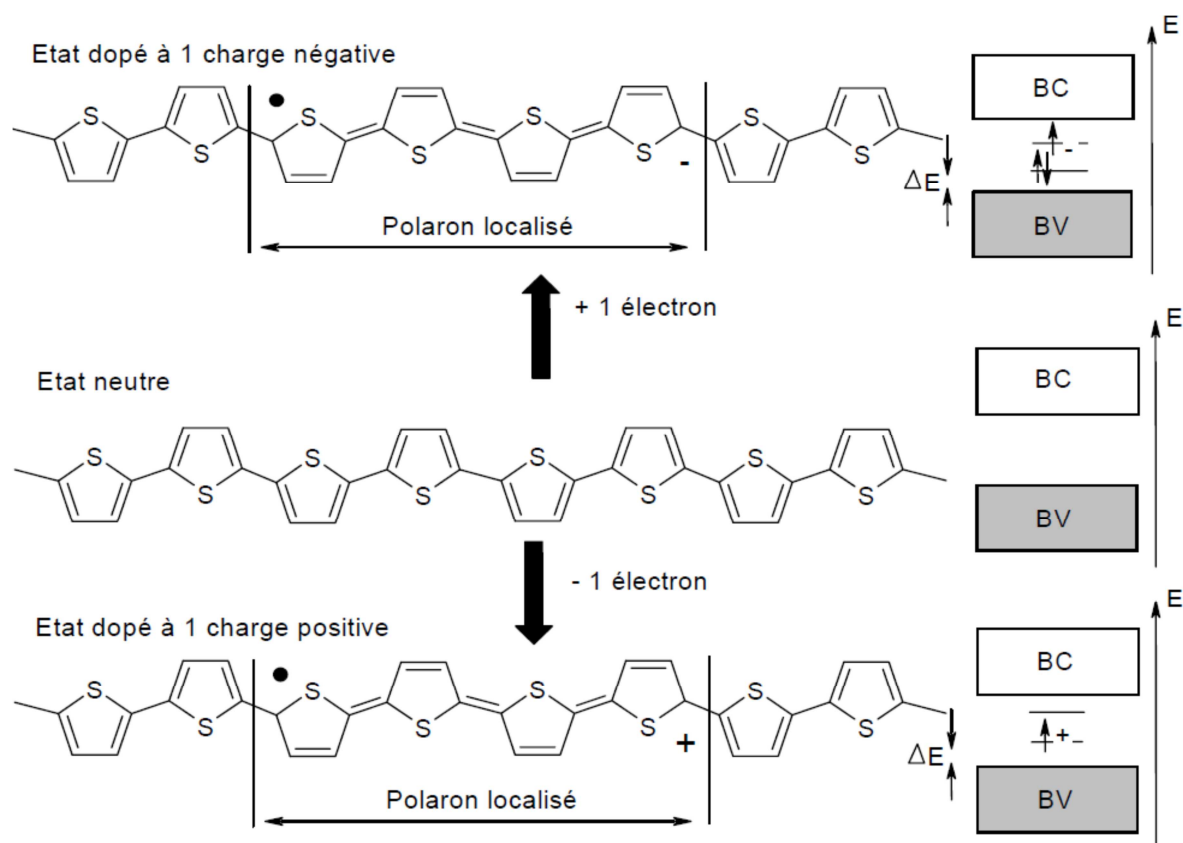


Figure I-11 : mécanisme d'apparition d'un polaron dans le polythiophène.

Dans le diagramme de bandes, la déformation associée au polaron fait apparaître deux niveaux d'énergie créés se situant dans le gap : un niveau occupé par un seul électron proche de la bande de valence, et un niveau symétrique proche de la bande de conduction vide, dans le cas d'un polaron positif. L'apparition des polarons

peut être mise en évidence par Résonance Paramagnétique Electronique (RPE) [18], ou par mesures optiques.

Supposons que l'on ait créé un polaron et que l'on vienne enlever (ou rajouter) un deuxième électron. Deux cas sont possibles :

- **1^{ère} cas** : on crée un deuxième polaron de même signe, à côté du premier (Figure I-12).

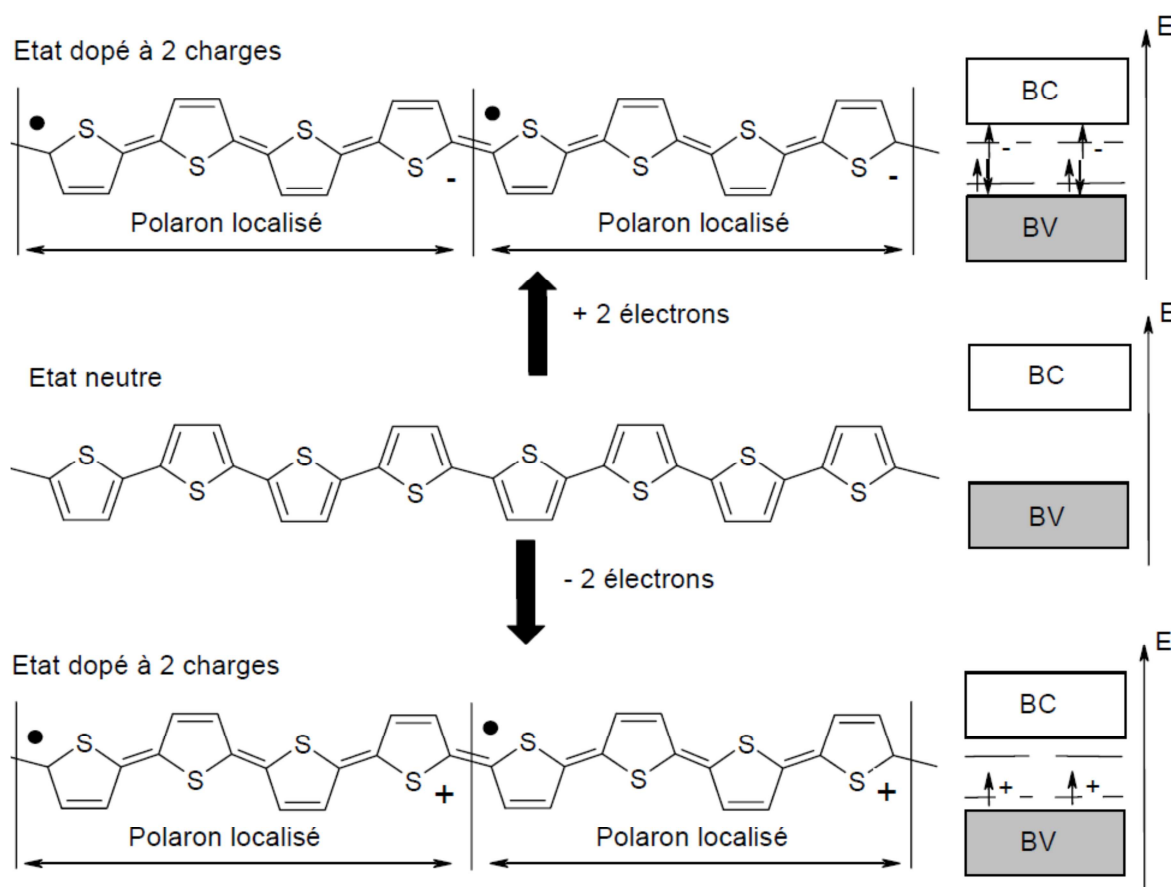


Figure I-12 : mécanisme de dopage avec 2 polarons sur la chaîne de polythiophène.

- **2^{ème} cas** : on enlève (ou rajoute) un électron supplémentaire au polaron existant.

Une nouvelle quasi-particule est créée, le bipolaron, dans lequel deux charges sont accommodées dans la même déformation locale de la chaîne (Figure I-13). Le bipolaron porte une charge (valeur $\pm 2e$) mais possède un spin nul ($S = 0$), ce qui le rend invisible par la technique de Résonance Paramagnétique Electronique (RPE).

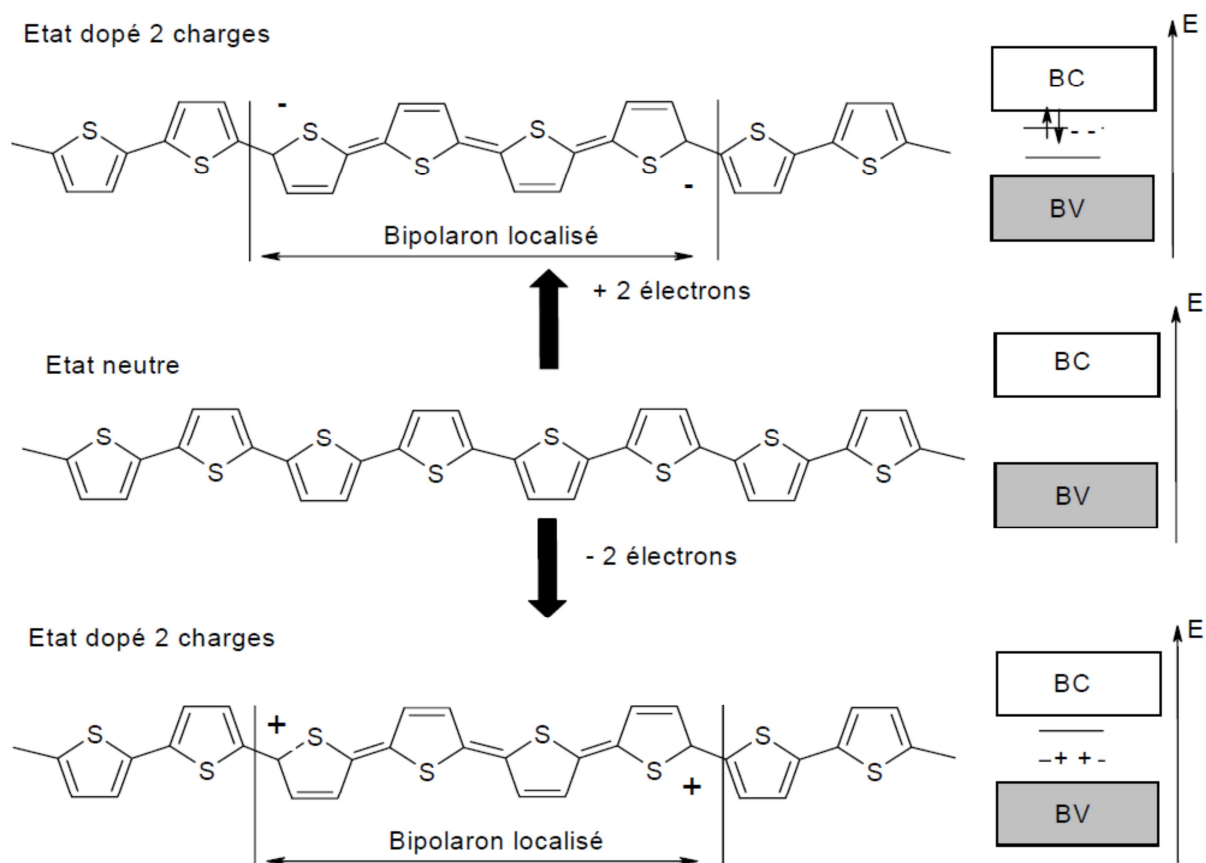


Figure I-13 : mécanisme de dopage avec 1 bipolaron sur la chaîne de polythiophène.

Le cas réaliste est celui qui minimise l'énergie de la chaîne. Le bilan énergétique entre la création de deux polarons et celle d'un bipolaron est en première approximation, et à faible taux de dopage, environ égal à la différence ($\Delta E - U$) entre l'énergie de déformation élastique de la chaîne, ΔE , associé à une quasi-particule et l'énergie de répulsion coulombienne, U , entre les deux charges associées dans la même déformation locale. Si $\Delta E > U$, le deuxième cas (bipolaron) sera favorisé et inversement [19]. Lorsque le taux de dopage devient important, les quasi-particules interagissent (recouvrement des fonctions d'ondes). On parlera alors de bande polaronique ou bipolaronique.

b) Les solitons

Le soliton chargé apparaît lors du dopage des systèmes à état fondamental dégénéré (ex : *trans*-polyacétylène). Il se présente comme un défaut séparant deux parties de la chaîne présentant une phase inverse de l'alternance des doubles et simples liaisons.

Les solitons présentent une relation spin-charge différente de celle des polarons. Le soliton chargé possède une charge ($q = \pm e$) mais un spin nul ($S = 0$) alors qu'un soliton neutre ($q = 0$) possède un spin ($S = 1/2$). A fort taux de dopage les solitons peuvent former une bande de solitons. Dans ces systèmes, les solitons chargés assurent le transport électronique [20].

I.4- Transport de charges

I.4.1- Sauts entre états localisés

Dans les semi-conducteurs inorganiques, les électrons de la bande de conduction se déplacent comme des électrons quasi libres à travers des états délocalisés. Le transport des charges est limité par les vibrations du réseau qui augmentent avec la température et qui provoquent la diffusion des porteurs.

Ce modèle ne peut pas être appliqué au cas des semi-conducteurs organiques pour lesquels les polarons sont localisés. Le transport de charges d'un site à un autre s'effectue en fait par effet tunnel assisté thermiquement : les porteurs se déplacent par saut (hopping) d'un état à un état voisin. Le saut assisté thermiquement, contrairement au transport par bandes, est donc favorisé par la présence de phonons et la mobilité augmente avec la température [21].

I.4.2- Transport de charge dans les matériaux organiques désordonnés

Les systèmes organiques désordonnés unidimensionnel ont été intensivement étudié expérimentalement pour une versatilité d'applications dans les dispositifs électroniques. En outre, dans certains processus importants tels que le transport de l'électron le long de la molécule ADN et le transport de charge dans les canaux ioniques à travers les membranes cellulaires.

Dopage → porteur de charge → conductivité (transport de charge)

I.5- Mobilité

Dans les semi-conducteurs en général, le transport de charge est décrit par leur mobilité μ , qui est la vitesse moyenne d'une charge par unité de champ électrique. Elle

s'exprime le plus souvent en $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Dans les matériaux inorganiques, la mobilité est élevée avec des valeurs comprises entre 1 et $10^4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Dans les matériaux organiques, la mobilité se situe entre 10^{-2} et $10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. C'est le saut entre les états qui est en majorité responsable des faibles mobilités observées [22]. Le transport dans les matériaux organiques est donc relativement lent.

De nombreux travaux menés sur les matériaux organiques montrent que la mobilité est dépendante de la température et du champ électrique.

II- Généralité sur les cellules photovoltaïques organiques

II.1- Soleil

II.1.1- Caractéristique générale

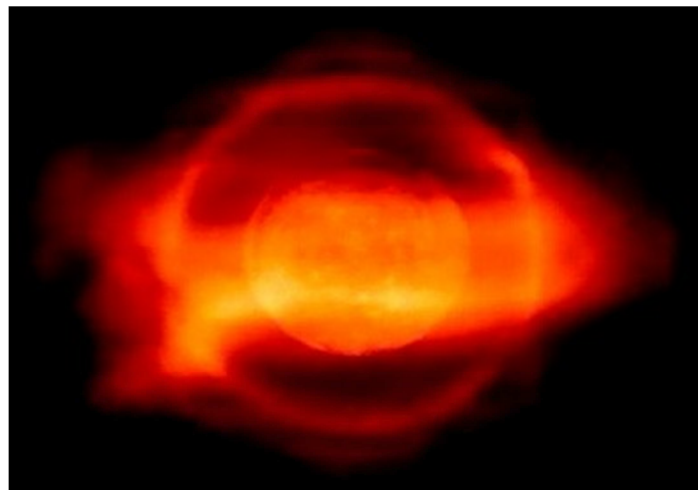


Figure I-14 : schéma sur la source soleil [23].

Le Soleil est une étoile de 1 391 000 km de diamètre (109 fois le diamètre de la Terre) parmi les milliards de notre galaxie, la Voie lactée. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le Système solaire, ce qui a permis la vie sur Terre. C'est aussi la seule étoile dont il est possible d'observer la composition de près. Le Soleil ne tourne pas aussi rond partout : alors que sa surface effectue une révolution tous les 25 jours à l'équateur, il ne lui faut pas moins de 36 jours aux pôles. Cette rotation est responsable de l'activité. En tournant sur lui-même il crée un champ magnétique 5 000 fois plus intense que celui de la terre [24].

II.1.2- La structure interne du soleil

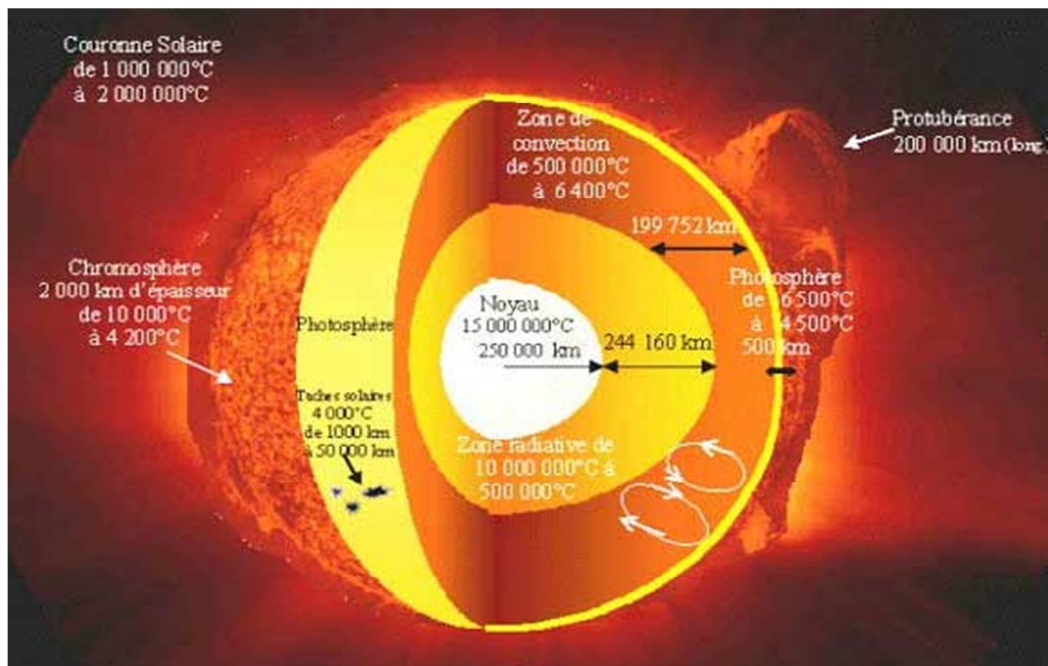


Figure I-15: Structure interne du soleil [25].

- **Le noyau et la zone radiative :**

A l'intérieur du Soleil, se trouve un noyau qui occupe 15 % du Soleil, à une température de 15 millions de degrés où l'hydrogène est transformé en hélium par réaction nucléaire. Durant la combustion de l'hydrogène des photons et des neutrinos sont créés. Puis, plus haut se trouve une zone radiative d'une épaisseur de 244160 km, très dense qui représente 98 % de la masse du Soleil. Un photon mettra jusqu'à un million d'années à la traverser. La température est de 500 000C⁰ à 10 000 000C⁰. A 494160 km du centre du Soleil il y a zone de convection de 199752 km qui évacue la chaleur vers l'extérieur par des animations de mouvements tourbillonnaires.

- **La photosphère :**

La photosphère est une surface visible du Soleil qui a environ 500km d'épaisseur et une température de 6000C⁰. Des nuages de gaz chauds provenant du noyau s'élèvent à la surface pour y constituer une structure granuleuse dont chaque grain mesure entre 1000 et 2000km de diamètre. Sur la photosphère on y voit des taches sombres produites par le champ magnétique interne.

- **La chromosphère :**

La chromosphère, se trouve au-dessus de la photosphère pouvant atteindre 10000km de hauteur. Sa température varie entre 10000 C⁰ juste au-dessus de la photosphère et au-dessus 20000 C⁰ dans les couches les plus élevées pour atteindre 1 million de degrés quelques 10000km plus haut où elle fusionne avec la basse couronne. Elle est composée de spicules qui sont des jets de gaz d'une couleur rouge. Il s'y produit des protubérances et des éruptions chromosphériques. La chromosphère ne rayonne que dans certaines raies spectrales, surtout dans la lumière rouge de l'hydrogène [26].

- **La couronne solaire :**

La couronne solaire, se trouve au dessus de la chromosphère elle s'étend très loin dans l'espace. Sa température varie entre 1 et 2 millions de degrés [26].

II.1.3- L'énergie du soleil

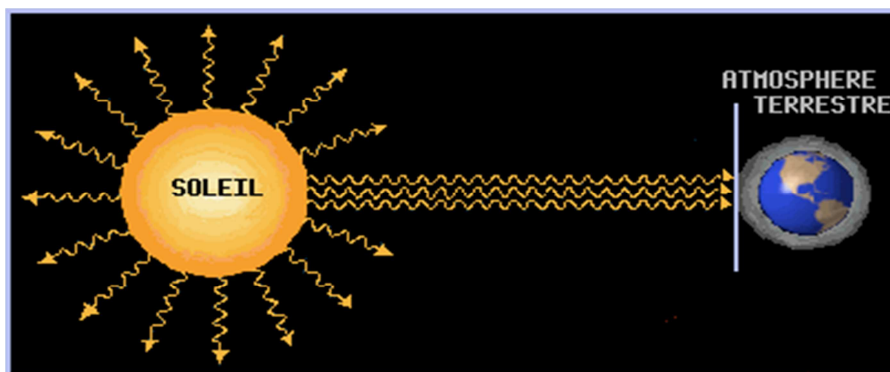


Figure I-16 : L'effet du soleil sur la terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température (15000000 C⁰) et la pression (340 milliards de fois la pression terrestre au niveau de la mer) sont si intenses que des réactions nucléaires ont lieu. Ces réactions provoquent la fusion de quatre protons (noyaux d'hydrogène) pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La particule alpha est environ 0,70 % moins massive que les quatre protons. La différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière et de chaleur. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes

d'hydrogène sont converties en hélium. Dans le processus, 5 millions de tonnes d'énergie pure sont libérées [27].

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de Km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m². La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m².

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45⁰ par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement « global » incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont: un spectre AM1.5 sous un éclairage de 1000W/m² et une température de 25°C.

De manière générale, l'indice m associée à la masse d'air (AM m) est calculé comme suit :

$$m \approx \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (\text{I.1})$$

Θ : étant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre.

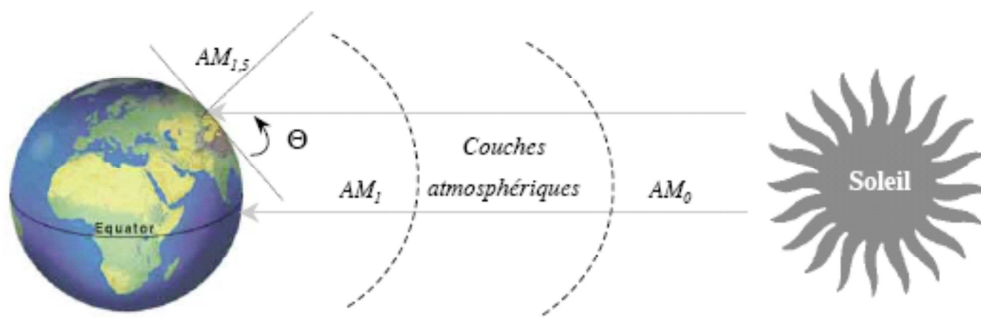


Figure I-17 : Constante d'illumination.

Au cours des dix dernières années les spectres rattachés à ce standard (figure I-18) ont été homologués par l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO 9845-1: 1992) et la Société Américaine de Test et Matériaux (ASTM E892-87: 1992) [28].

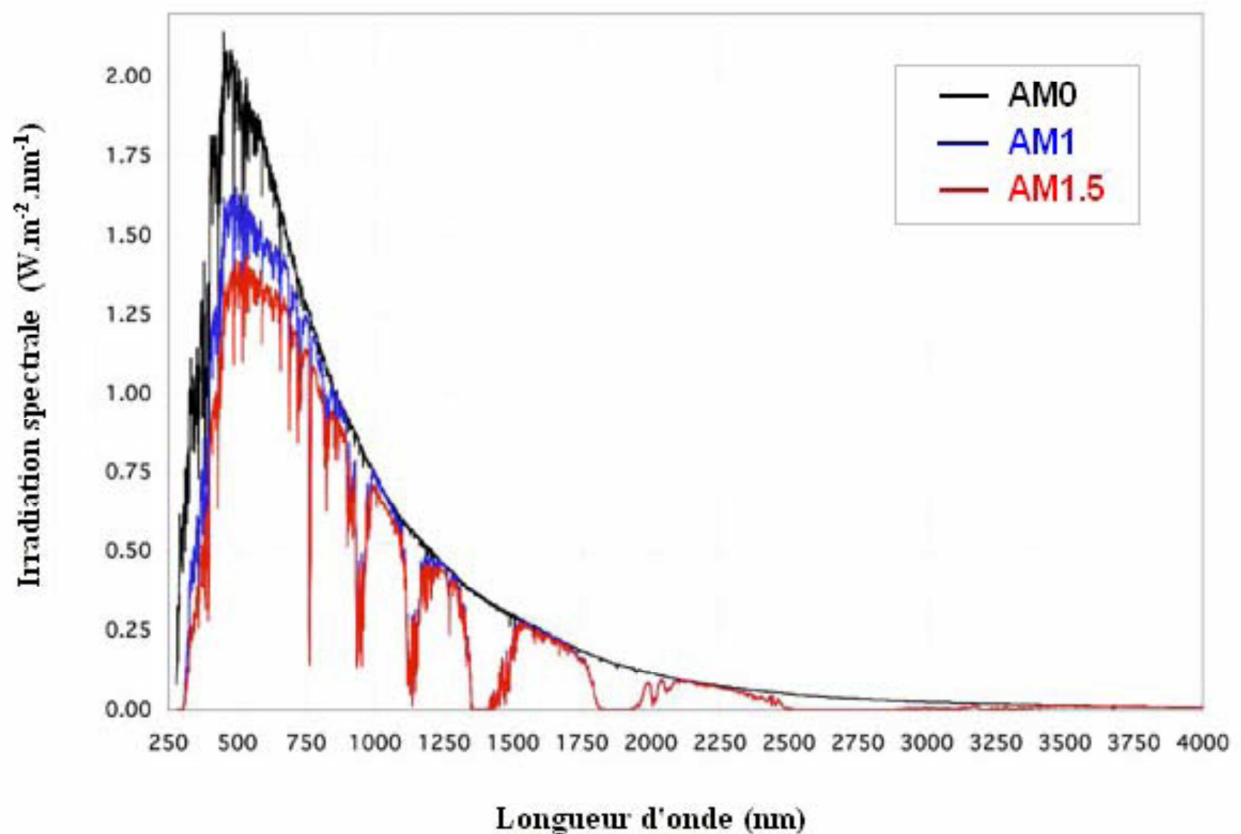


Figure I-18: Spectre AM0, AM1 et AM1.5.

II.2- Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère une tension électrique continue. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium consiste à convertir l'énergie cinétique des photons en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs à base de Silicium (Si), de Sulfure de Cadmium (CdS) ou de Tellure de Cadmium (CdTe). Elles se présentent basiquement sous la forme de fines plaques en contact [29].



Figure I-19 : cellule photovoltaïque monocristalline.

II.2.1- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué :

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie ;
- D'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une

différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'elle soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait des semi-conducteurs le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium pour les applications spatiales, en silicium cristallin pour les applications terrestres et en silicium amorphe pour des cellules bas coût [30].

Une cellule solaire se compose d'un certain nombre de couches, généralement deux couches principales, l'une est constitué d'un semi-conducteur de type N et l'autre de type P et inversement. C'est à la jonction ou interface métallurgique de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité. Celle ci est un élément très important dans l'optoélectronique. Ces semi-conducteurs sont des matériaux électroniques spéciaux, sensibles à la lumière, ayant deux propriétés principales pour produire l'électricité :

- Quand la lumière est absorbée, des électrons seront libérés dans le semi-conducteur et contribuent au courant.
- Lorsque les deux semi-conducteurs constituent une jonction, un champ électrique s'établit [31].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent selon la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils sont majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [32].

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I = I_{\text{obs}} - I_{\text{ph}} \quad (\text{I. 2})$$

Avec

$$I_{\text{obs}} = I_{\text{S}} \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (\text{I. 3})$$

Où q : charge élémentaire ($q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

V : tension aux bornes de la jonction.

k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T : température (K)

I_{S} : est le courant de saturation en inverse de la diode.

Le coefficient n est le facteur d'idéalité de la diode et il dépend de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison avec des pièges situés au milieu de la bande interdite).

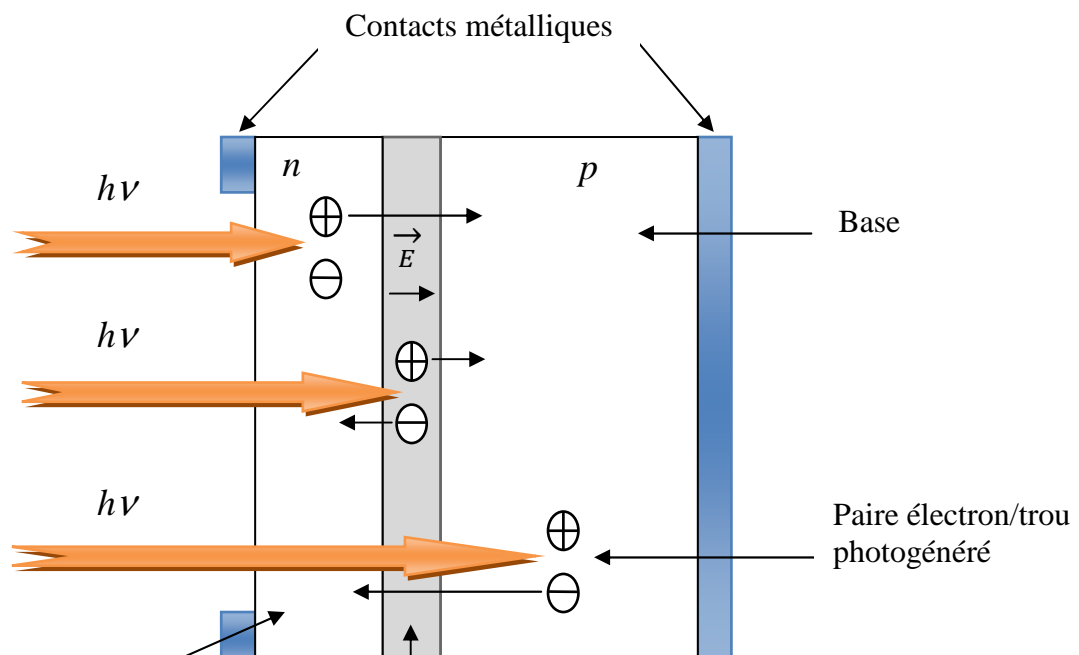


Figure I-20 : Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en silicium et illustration des phénomènes de photogénération et de collecte de porteurs pour différentes longueurs d'onde.

La longueur de diffusion des électrons photogénérés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\sim 250\text{-}300\ \mu\text{m}$) et elle est le plus souvent de type p : elle va fournir le plus de porteurs.

Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ($\sim 0.5\ \mu\text{m}$) et fortement dopé ($>10^{20}\ \text{cm}^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la zone de charge d'espace ($\sim 0.3\ \mu\text{m}$). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau [33].

II.3- Cellule photovoltaïque organique

Une cellule photovoltaïque organique (OPVC) est une cellule photovoltaïque qui utilise l'électronique organique ; une branche de l'électronique qui traite de polymères conducteurs organiques ou des petites molécules organiques pour l'absorption de la lumière et de transport de charge. Le polymère lui-même à bas coûts de production en grandes quantités. Molécules combinées avec la souplesse de molécules organiques, ce qui représente probablement des avantages pour les applications photovoltaïques. Le coefficient d'absorption optique de molécules organiques est élevé, donc une grande quantité de lumière peut être absorbée par une petite quantité de matériaux. Les principaux inconvénients associés aux cellules photovoltaïques organiques sont l'efficacité faible, une faible stabilité et la force faible par rapport aux cellules photovoltaïques inorganiques. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient en effet du faible coût des semi-conducteurs organiques ainsi que de nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Il existe principalement trois types :

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères.
- Les cellules photovoltaïques hybrides.

Le procédé photovoltaïque actuellement admis est l'absorption d'un photon par la couche organique active qui génère un exciton, lui-même se trouvant à un état excité. Cette quasi-particule diffuse à travers le matériau aussi longtemps que les processus de recombinaison n'interviennent pas. Dans le cas où la longueur de diffusion de l'exciton est suffisamment importante pour rencontrer un champ interne, la séparation des charges peut avoir lieu. Les trous et les électrons sont ensuite collectés au niveau des électrodes (l'anode et à la cathode, respectivement) suivant le champ interne de la cellule.

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. Les rendements observés sont très inférieurs à ceux obtenus avec des cellules à base de silicium. Cependant, l'utilisation de matériaux organiques permet d'envisager la réalisation de cellules solaires de grandes dimensions sur des substrats flexibles, par des procédés à faible coût (utilisant les matériaux organiques sous forme d'encre ou de peinture par exemple) [34].

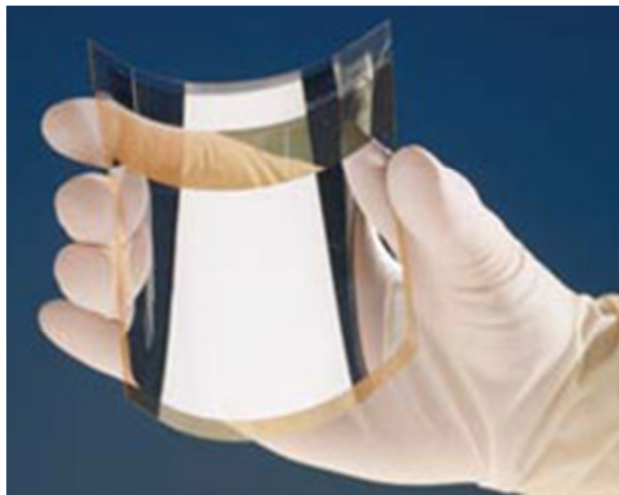


Figure I-21: Phototype de cellule organique flexible et transparente.

II.3.1- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique

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

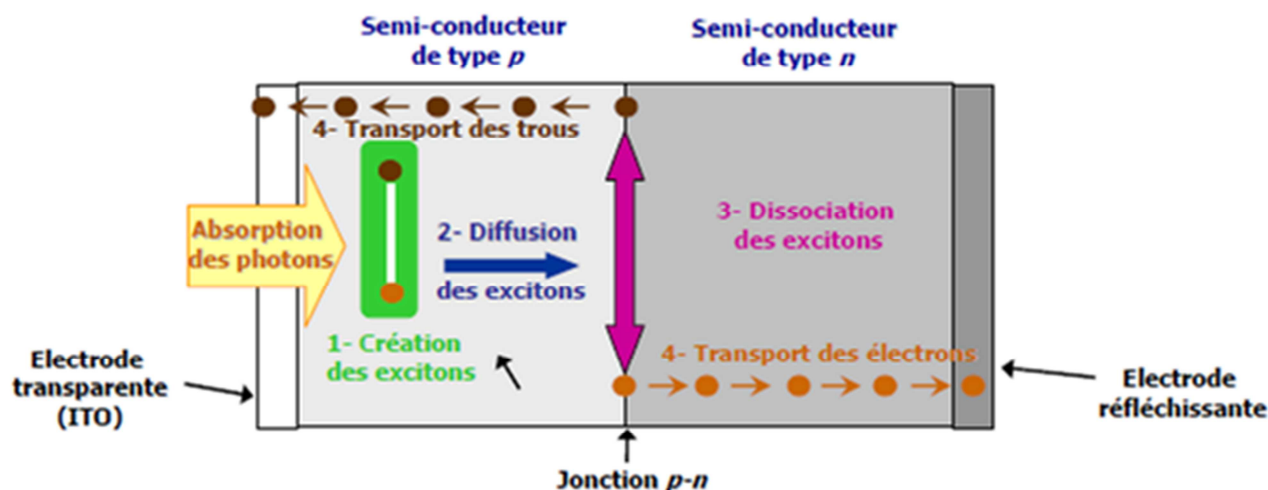


Figure I-22 : les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique.

1. Absorption des photons avec création d'excitons

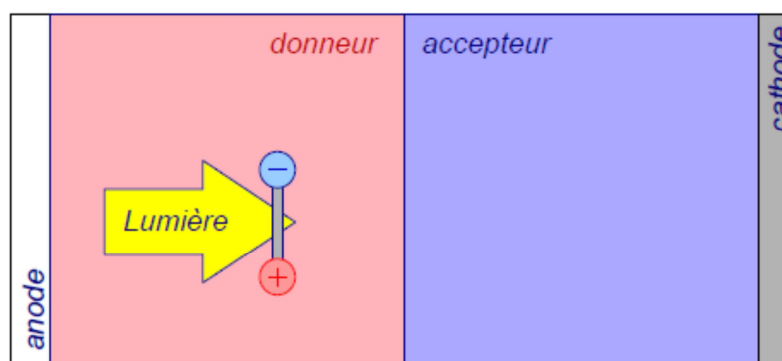


Figure I-23 : Absorption des photons avec création des d'excitons.

L'absorbance (ou densité optique) d'un film organique à une longueur d'onde donnée est égale au coefficient d'absorption du matériau multiplié par l'épaisseur du film. Elle doit être suffisamment grande pour que toute la lumière soit absorbée à travers la cellule. Si le coefficient d'absorption est relativement grand ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$) dans les matériaux organiques utilisés alors l'épaisseur des films considérée de l'ordre de 100 nm est insuffisante pour assurer une absorption intégrale de la lumière incidente [35]. Il faut ajouter que le spectre d'absorption des matériaux choisis doit couvrir au maximum le spectre d'émission solaire. Ainsi le contrôle de la bande interdite (gap) des semi-conducteurs est important [36].

L'absorption des photons entraîne la formation d'exciton : des paires électron-trou corrélées par des forces de coulomb. Dans le silicium l'énergie nécessaire pour

dissocier un exciton est de 14.7 MeV. Cela signifie qu'à température ambiante, l'énergie thermique est suffisante pour séparer les charges. C'est pour cela que, dans les cellules photovoltaïques en silicium, on ne s'intéresse pas à la dissociation des exciton [37].

Dans les matériaux organiques, l'énergie de liaison E_L est beaucoup plus élevée (comprise entre 0.4 et 1.4 eV) ; l'agitation thermique ne suffit pas à séparer des paires électrons-trous [38].

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

2. Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur

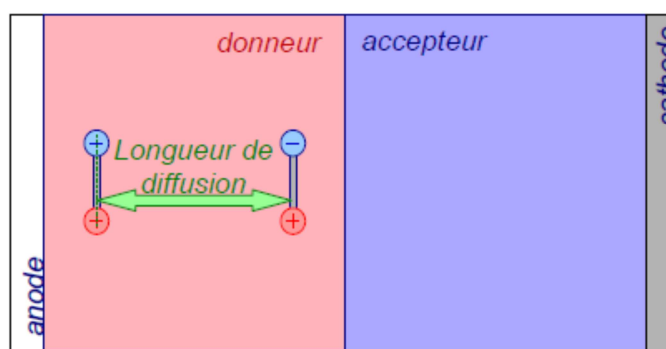


Figure I-24 : Diffusion des excitons jusqu'à la jonction donneur-accepteur.

Les excitons ont une durée de vie τ très courte, de l'ordre de la nanoseconde pour les singlets, mais beaucoup plus longue pour les triplets (quelques millisecondes). Si rien ne se produit pendant ce temps τ , l'électron et le trou se recombinent et l'énergie de l'exciton se transforme en un nouveau photon (désexcitation radiative) ou en chaleur. Tout est perdu pour le processus de conversion photovoltaïque. Il faut donc dissocier les charges liées avant leur recombinaison [39].

Les excitons ne sont pas localisés sur une molécule. Pendant leur durée de vie, ils diffusent sur une longueur L_D dont la valeur se situe entre quelque nanomètre (7,7 nm dans le C_{60}) et quelques dizaines de nanomètres (30 ± 10 nm dans le ZnPc, 12 ± 3 nm dans le PPV, 68 ± 20 nm dans le CuPc), exceptionnellement elle atteint plusieurs micromètres dans des matériaux fortement ordonnés. Pour que les excitons puissent

atteindre un site de dissociation (c'est-à-dire la jonction Donneur/Accepteur), il faut que ceux-ci soient générés à une distance inférieure à la longueur de diffusion (L_D) de cette jonction. C'est pour cela que, dans les cellules mettant en œuvre le concept bulk hétérojonction (BHJ), chaque couche organique a une épaisseur de l'ordre de 50 nm.

3. Dissociation des excitons

Lorsque les excitons rejoignent la jonction D/A, les deux charges qui les composent se séparent à condition que l'une d'entre elles passe (soit transférée) de l'autre côté de la jonction. On obtient alors une paire de polarons : un positif pour le donneur et un négatif pour l'accepteur. La figure suivante illustre ce processus et permet d'établir la condition de transfert en fonction de l'énergie de la bande HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) et de celle de la bande LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). On parle parfois de la bande de valence (HOMO) et de la bande de conduction (LUMO).

Puisqu'il n'y a pas d'apport d'énergie au moment du transfert, celui-ci ne peut s'effectuer que si l'énergie finale (celle de la paire de polarons ($E_{CT} = I_{PD} - \chi_A$)) est inférieure à l'énergie initiale (celle de l'exciton E_{EX}) [40]. en d'autres termes, l'énergie de l'ensemble des deux charges séparées doit être plus petite que celle de l'exciton. La figure I-25 schématise le cas où les excitons sont générés dans le matériau donneur.

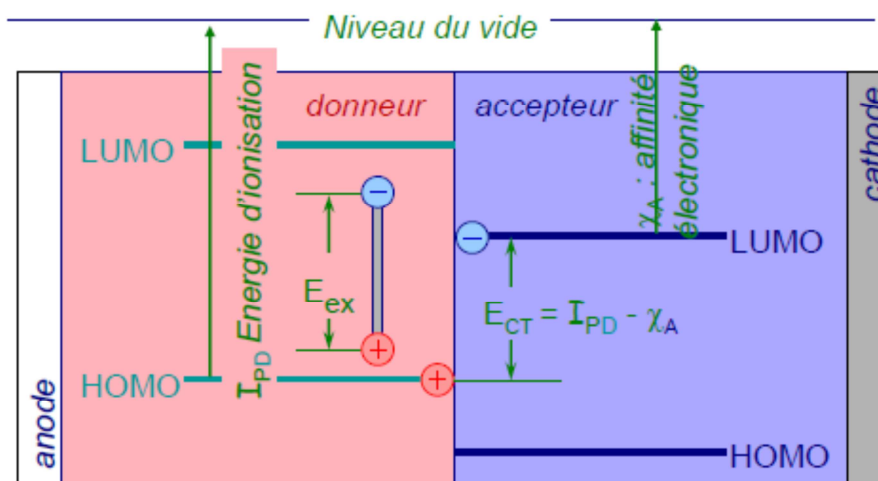


Figure I-25 : le diagramme énergétique à la jonction Donneur/Accepteur et les conditions de dissociation.

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

$$E_{CT} = I_{PD} - \chi_A < E_{EX}. \quad (I.4)$$

Où

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

χ_A : est l'affinité électronique de l'accepteur

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

4. Transport des charges et collecte aux électrodes

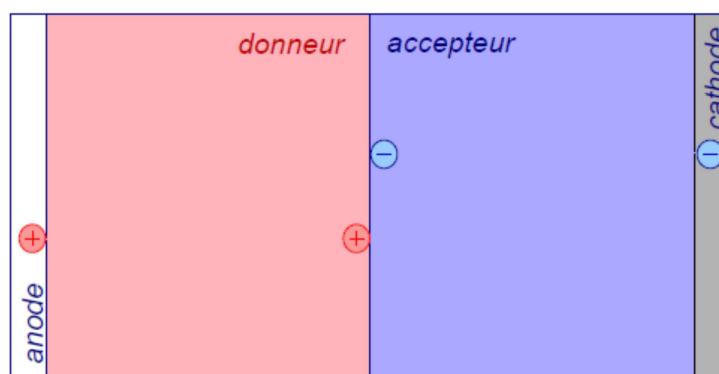


Figure I-26 : Transport des charges et collecte aux électrodes.

Dans cette quatrième étape les porteurs de charge, situés au voisinage de l'interface Donneur/Accepteur, doivent rejoindre les électrodes en traversant le film donneur ou accepteur. Le processus de transport est généralement contrôlé par un mécanisme de saut entre sites (conduction de type Poole-frenkel). Pour cela les mobilités des électrons μ_e et des trous μ_h doivent être les plus grandes possibles, au moins égales à $10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$, pour des épaisseurs de film de 100 nm [41].

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

Les valeurs des mobilités sont inhérentes à de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci, nous citons les pièges d'origine chimique liés à la structure et aux impuretés et la différence entre LUMO et HOMO (gap). Il a été montré que dans le cas du pentacène, une mobilité de $35 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ pouvait être déduite des caractéristiques courant-tension, à température ambiante, après purification de matériau [42]. Par ailleurs, si la valeur de la mobilité des électrons mesurée dans le silicium monocristallin ($\mu_e = 1500 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$), semble hors de portée dans les matériaux organiques, l'exemple ci-dessus montre que les mobilités rencontrées dans le silicium amorphe peuvent être atteintes. Lorsque les porteurs ont traversé les couches organiques, ils arrivent aux interfaces avec les électrodes. Ils doivent être collectés pour rejoindre le circuit électrique extérieur. Des précautions doivent être prises pour éviter une diminution de la tension de circuit ouvert V_{CO} et une résistance série R_S trop élevée.

II.3.2- Les différents types de cellule photovoltaïque organique

Dans le domaine des cellules photovoltaïques organiques, il existe trois principaux types de structure :

- 1- Structure monocouche,
- 2- Structure à hétérojonction bicouche,
- 3- Structure à hétérojonction en volume.

Les différentes architectures des cellules développées, qui dépendent essentiellement de la composition de la couche active. Concernant les électrodes, le même système est souvent utilisé à savoir l'utilisation d'oxyde d'étain et d'indium (ITO) et de Poly (éthylène dioxythiophène)-Poly (styrène sulfonate) (PEDOT-PSS) comme anode et d'aluminium comme cathode.

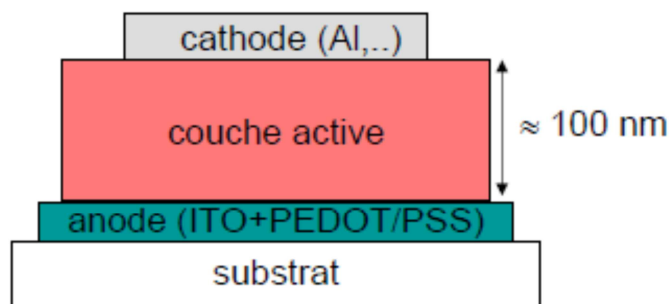


Figure I-27 : structure d'une cellule photovoltaïque organique.

1. Structure à simple couche

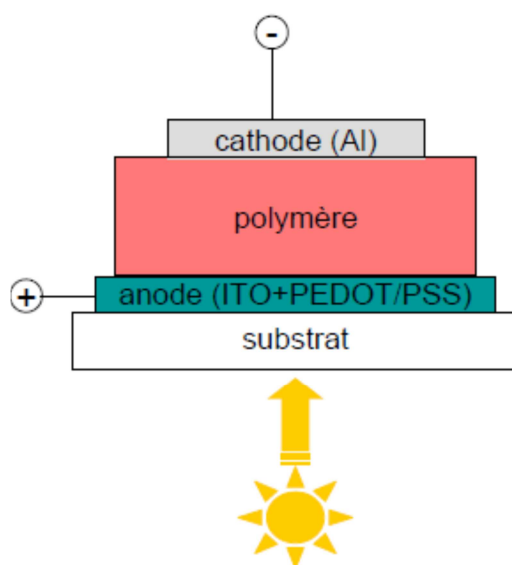


Figure I-28 : structure d'une cellule photovoltaïque organique monocouche.

C'est la plus simple des cellules photovoltaïques organiques. Il s'agit d'une simple couche de polymère semi-conducteur déposée entre deux électrodes. Une électrode offre un contact ohmique avec le polymère, tandis que la seconde doit offrir des propriétés rectifiantes.

Donc, dans les structures MIM (métal-isolant-métal), seule la différence du potentiel interne (ΔW_{int}) s'efforce de dissocier l'exciton photogénéré comme il est représenté sur la figure I-29 (avec $\Delta W_{\text{int}} = W_{\text{anode}} - W_{\text{cathode}}$; ΔW_{int} est la différence des travaux de sortie de l'anode et de la cathode).

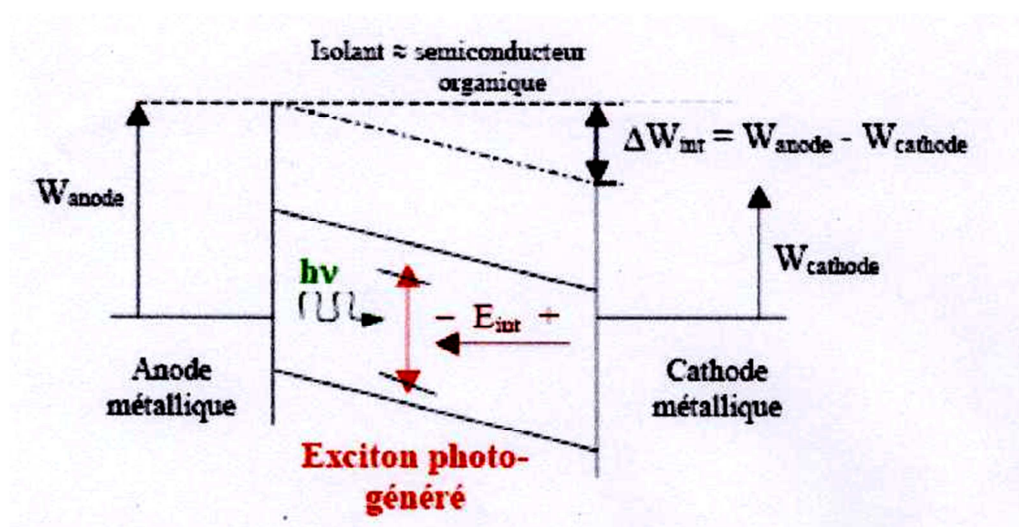


Figure I-29 : photogénération de charges dans une structure métal-isolant-métal [43].

Des travaux ont d'abord été menés sur le polythiophène et ses dérivés [44], sans grand succès (rendements inférieurs à 0,1 %) [45]. Cependant, les performances de ce type de cellules restent très faibles. En effet, l'hétérogénéité de la distribution des dopants et leur accumulation à l'interface métal/polymère contribue à la décroissance du rendement [46,47]. De plus, le problème d'augmentation des résistances séries, causé par les faibles mobilités des porteurs, limite le courant de court-circuit et par la suite le rendement. Enfin, si l'exciton est créé près de l'interface ohmique, il doit traverser toute l'épaisseur du matériau pour atteindre le site de dissociation, or la longueur de diffusion excitonique est faible, de l'ordre de 5 à 20 nm.

2. Structure à hétérojonction bicouche

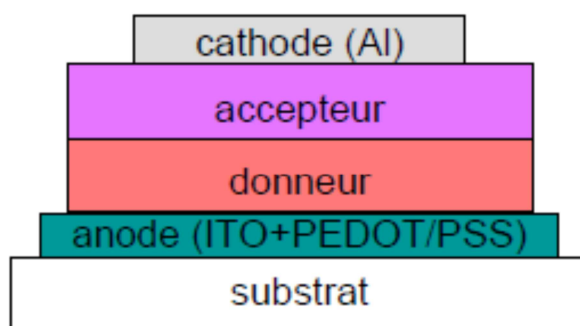


Figure I-30 : structure d'une cellule photovoltaïque organique à hétérojonction bicouche.

Le dispositif à hétérojonction bicouche se compose d'une couche de donneur et d'une couche d'accepteur. Le polymère utilisé dans cette dernière couche est le C_{60} . Il y a deux avantages par rapport à la simple couche. Le premier avantage réside dans le fait que les taux de recombinaisons de l'électron et du trou sont inférieurs aux porteurs de charges transportés. Deuxièmement, une fois que les excitons sont dissociés à l'interface des matériaux, les électrons passent au matériau accepteur (type n) et les trous passent au matériau donneur (type p) suite à une séparation de charge sous les deux conditions :

- (a) condition de circuit ouvert, aucun courant ne fonctionne dans le dispositif et la tension est déterminée par la différence entre le niveau LUMO de l'accepteur et le niveau HOMO du donneur.

(b) Dans les conditions de court circuit, les niveaux de Fermi des deux électrodes alignent et des électrons sont transférés à partir du donneur à l'accepteur.

4. Structure à hétérojonction en volume

Pour améliorer le système à hétérojonction est de redéfinir son architecture en élaborant des films fins constitués par un mélange intime des molécules donneuses D et acceptrice A. Ainsi, tout le volume organique déposé est susceptible de collaborer à la conversion photovoltaïque du fait que tout exciton généré se trouve proche d'une zone de séparation [48], et ceci quelque soit la direction prise durant sa diffusion. La figure I-31, représente un système composite de 2 phases p et n interpénétrées.

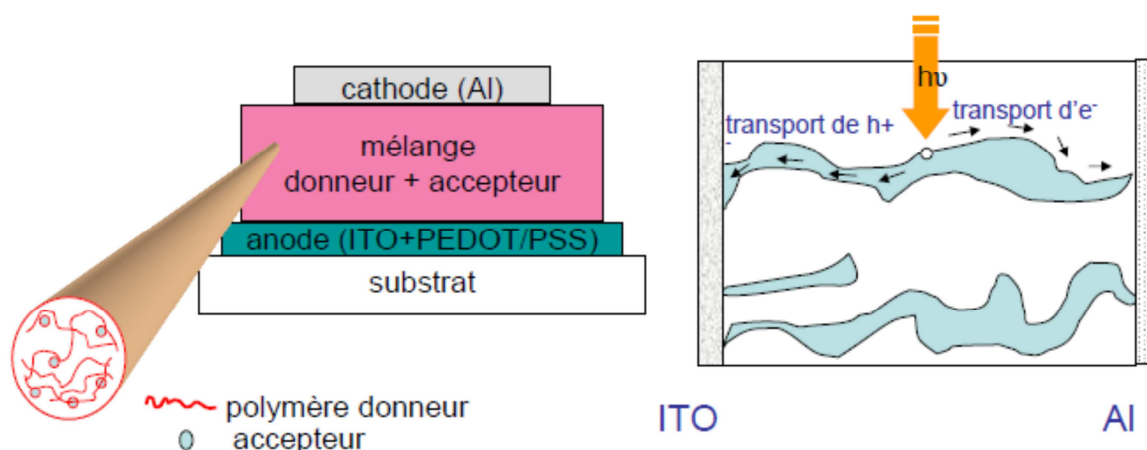


Figure I-31 : structure d'une cellule photovoltaïque organique à hétérojonction en volume. Il est habituellement observé une amélioration des performances par rapport aux structures bicouches.

III- Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le tracé du circuit électrique équivalent d'un système est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques (Source, résistance, diode). Nous allons décrire ici par cette méthode une cellule photovoltaïque inorganique ou organique dans l'obscurité et sous illumination.

III.1- Caractéristique idéale

Dans l'obscurité, une cellule solaire organique suit le comportement d'une diode classique. Selon que la tension appliquée est supérieure ou inférieure à une

tension de seuil, la diode est respectivement passante ou bloquante. La figure I-32 présente les circuits électriques équivalents d'une cellule photovoltaïque idéale dans obscurité.

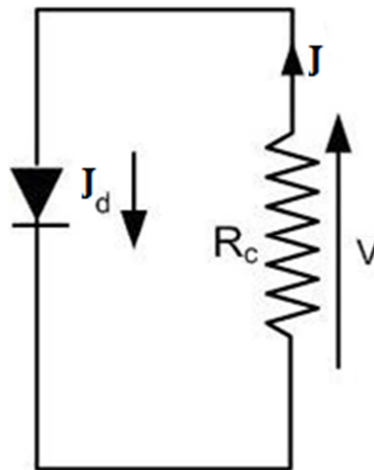


Figure 1.32 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale dans obscurité.

La densité de courant J_d dans la diode suit une équation de type Shockley [49]:

$$J_d = J_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nK_B T}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.5})$$

Avec J_s la densité de courant de saturation sous polarisation inverse, V la tension de polarisation appliquée et n le facteur d'idéalité ($0 < n \leq 1$ où 1 est le cas idéal). R_c désigne la résistance de charge du circuit extérieur, q est la charge de l'électron, K la constante de Boltzmann, T est la température.

La figure I-33 présente les circuits électriques équivalents d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage. Une source de courant a été mise en parallèle à la jonction (diode). Cette source de courant génère le photocourant J_{ph} sous illumination. R_c est la résistance de charge du circuit extérieur.

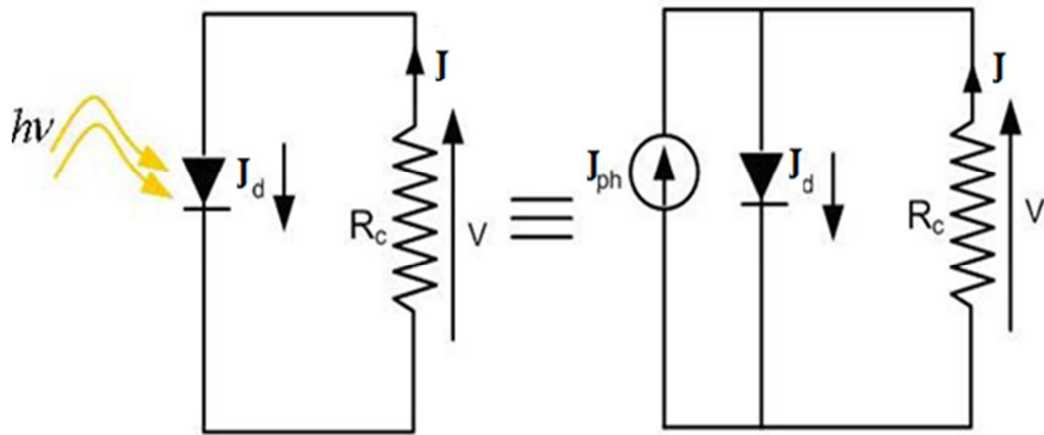


Figure I-33 : Circuit électrique équivalent d’une cellule solaire photovoltaïque idéale sous éclairement.

On modélise sous éclairement la densité de courant J du circuit extérieur comme étant la somme de J_d et de J_{ph} [50] :

$$J = J_S \left(\exp \left(\frac{qV}{nK_B T} \right) - 1 \right) - J_{ph} \tag{I.6}$$

III.2- Caractéristique réelle

Pour passer aux cas d’une cellule solaire réelle, il faut modifier le schéma électrique en prenant en compte les pertes dues aux résistances série et shunt (R_s et R_p) de la cellule. La figure I-34, montre le circuit électrique équivalent d’une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairement.

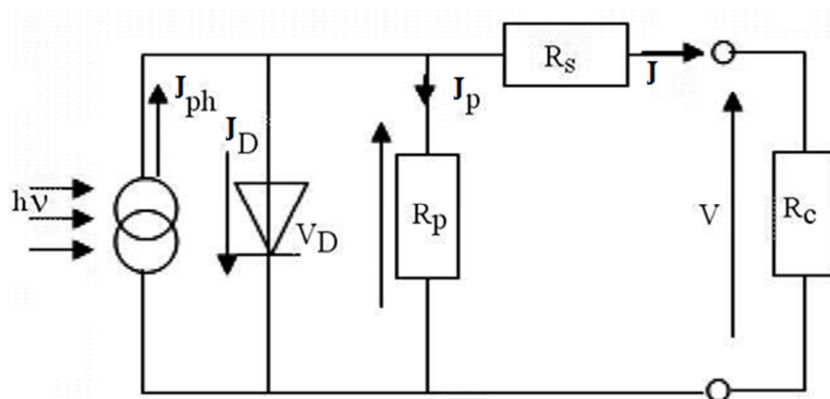


Figure I-34: circuit électrique équivalent d’une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairement (modèle à une diode).

Les lois des nœuds et des mailles donnent :

$$J + J_{ph} = J_d + J_P \quad (\text{I.7})$$

$$V = JR_S + J_P \cdot R_P \quad (\text{I.8})$$

L'équation déterminant la densité de courant est alors :

$$J = J_{Ph} - J_S \left[\exp \left(\frac{q(V+R_S J)}{nK_B T} \right) - 1 \right] - \frac{(V+R_S J)}{R_P} \quad (\text{I.9})$$

Donc, Les performances des cellules solaires sont limitées par différentes pertes d'énergie. Ces pertes sont liées aux paramètres physiques et technologiques de la cellule photovoltaïque. Elles sont assimilables à deux résistances :

- **Résistance série R_S** , elle caractérise les pertes par effet Joule de la résistance propre du semi-conducteur, les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé.
- **Résistance shunt (ou parallèle) R_P ou R_{sh}** , elle caractérise les pertes par recombinaison dues aux « épaisseurs des régions N et P et la zone de charge d'espace. R_P est donc liée directement au processus de fabrication, l'existence de défauts de structures et aux états de surface. Cette valeur devra être la plus élevée possible [51].

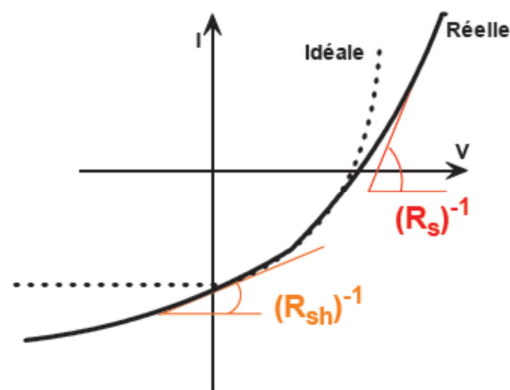


Figure I-35 : Définition des résistances série et shunt [52].

La caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire est la superposition d'un courant de diode sous obscurité et d'un courant photogénéré (voir Figure I-36.a).

L'éclairement de la structure a pour effet de déplacer la courbe $J(V)$ de la diode vers les courants inverses. Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la convention est d'inverser l'axe des courants, comme illustré par la Figure I-36.b. Notons que la cellule photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $J(V)$ est fixée. C'est la valeur de l'impédance de la charge aux bornes de la cellule qui va imposer le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale [53].

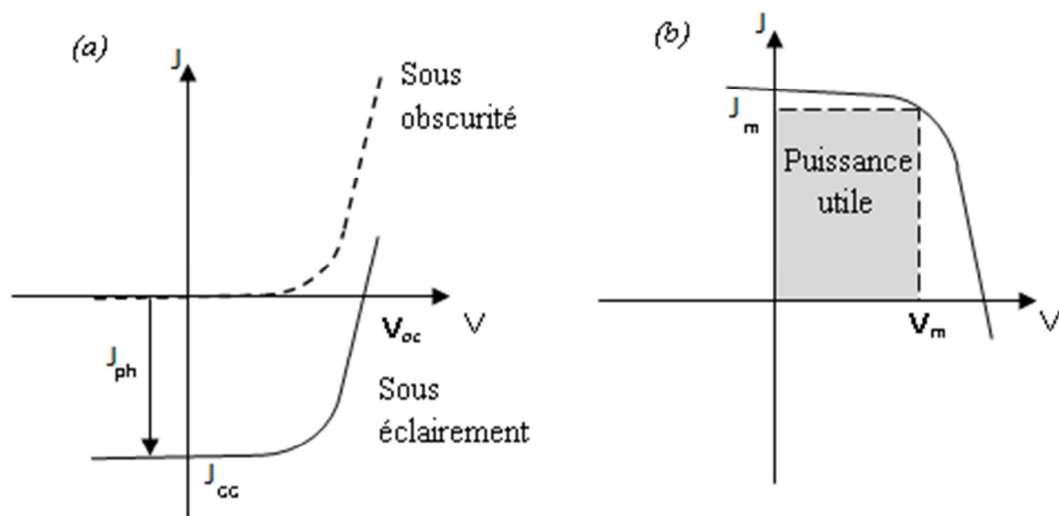


Figure I-36 : (a) caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe $I(V)$.

Le maximum de puissance disponible est défini par la tension V_m et le courant J_m . La qualité électrique de la cellule est déterminée par le facteur de forme (FF).

Le point de fonctionnement de la cellule sur la courbe $J(V)$ est déterminé par l'impédance de la charge, qui, mal adaptée, n'utilisera pas toute la puissance disponible. Il est donc important de pouvoir travailler avec les valeurs V_m et J_m afin d'utiliser la puissance maximale.

IV- Paramètre essentiel caractérisant une cellule photovoltaïque organique

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

IV.1- La densité de courant de court-circuit J_{CC}

Il s'agit de la densité de courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V = 0$ V dans le schéma équivalent). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [54].

IV.2- Tension de circuit ouvert V_{CO}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Dans le cas de cellules solaires organiques, la V_{CO} est linéairement dépendante du niveau de la HOMO du matériau donneur et du niveau de la LUMO du matériau accepteur [55, 56]. De plus, les pertes de charges aux interfaces matériaux-électrodes peuvent également affecter la valeur de la V_{CO} [57]. Enfin, cette valeur décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [54].

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

$$V_{CO} = \left(\frac{KT}{q}\right) \cdot \ln\left[\left(\frac{J_{CC}}{J_S}\right) + 1\right] \quad (I.10)$$

IV.3- Facteur de forme

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

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{cc} \times V_{co}} \quad (I.11)$$

Où :

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

V_{co} est tension de circuit ouvert.

IV.4- Le rendement de conversion d'énergie

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot J_m}{P_{in}} = \frac{FF \times J_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \quad (I.12)$$

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

V- Le rendement quantique externe (EQE)

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons transmis (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique est défini comme suit [58] :

$$EQE = \frac{I_{cc}}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{q} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in} \times S} \times \frac{hc}{q\lambda} = \frac{J_{CC} \times hc}{q \times \lambda \times P_{in}} \quad (I.13)$$

Où J_{CC} est la densité de courant de court-circuit, ($\varphi = P_{in} \times S$) le flux lumineux incident. Où S est la surface et P_{in} est la puissance incidente, q la charge de l'électron et E_{ph} l'énergie du photon (avec $E_{ph} = \frac{hc}{\lambda}$, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde).

Le rapport $\frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)}$ est appelé « la réponse spectrale » de la cellule, elle est notée $SR(\lambda)$.

Cette dernière représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. Elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes.

Le rendement quantique externe peut être donné par :

$$EQE = SR(\lambda) \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (I.14)$$

Ce rendement dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, de la largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal (sans pertes) correspond à la récolte par les électrodes d'un pair électron-trou par photon incident. Des valeurs de 50% et 80% ont été reportées pour les matériaux organiques et inorganiques respectivement.

VI- calcul sur le modèle à une seule diode

L'équation densité de courant-tension gérant la puissance extraite d'une cellule solaire en utilisant le premier modèle est :

$$J = J_{PH} - J_S \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S J)}{nK_B T}\right) - 1 \right] - \frac{(V + R_S J)}{R_P} \quad (I.15)$$

Cette équation est dite équation implicite (la densité de courant se trouve dans les deux membres de l'équation) et non linéaire (car le deuxième membre de l'équation contient un terme exponentiel en plus du précédent qui est linéaire), pour extraire les paramètres photovoltaïque à partir de cette équation on procède comme suit :

VI.1- Calcul de J_{CC} , V_{CO} , J_{PH} et J_S

Quand la condition $V=0$ est vérifiée la densité de courant $J=J_{CC}$:

$$J_{CC} = J_{PH} - J_S \left[\exp\left(q \frac{J_{CC} R_S}{nK_B T}\right) - 1 \right] - \frac{J_{CC} R_S}{R_P} \quad (I.16)$$

Quand la condition $J=0$ est vérifiée la tension $V=V_{CO}$:

$$J_{PH} - J_S \left[\exp\left(\frac{qV_{CO}}{nK_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_p} = 0 \quad (I.17)$$

D'où

$$J_{PH} = J_S \left[\exp\left(\frac{qV_{CO}}{nK_B T}\right) - 1 \right] + \frac{V_{CO}}{R_p} \quad (I.18)$$

Si on remplace l'équation (I.17) dans (I.16) on obtient :

$$J_S \left[\exp\left(q \frac{V_{CO}}{nK_B T}\right) - \exp\left(q \frac{J_{CC} R_S}{nK_B T}\right) \right] = \frac{J_{CC} R_S}{R_p} + J_{CC} - \frac{V_{CO}}{R_p} \quad (I.19)$$

Donc

$$J_S = \frac{J_{CC}(R_S + R_p) - V_{CO}}{R_p \left(\exp\left(q \frac{V_{CO}}{nK_B T}\right) - \exp\left(q \frac{J_{CC} R_S}{nK_B T}\right) \right)} \quad (I.20)$$

VI.2- Calcul de R_s et R_p

En prenant le schéma équivalent de la figure I-35 on peut calculer les résistances série et shunt de la façon suivante [59] :

L'équation de la charge R_c donne :

$$J_{PH} = J_d + J_p + J_{RC} \quad (I.21)$$

$$J_{PH} = J_S \left(\exp\left(q \frac{(V_{RC} + J_{CC} R_S)}{nK_B T}\right) - 1 \right) + \frac{V_{RC} + J_{RC} R_S}{R_p} + J_{RC} \quad (I.22)$$

A partir des équations (I.17) (I.20) et (I.22) on calcule la tension aux bornes de la charge par :

$$V_{RC} = \frac{nK_B T}{q} \ln \left[\frac{R_p + (J_{PH} + J_S - J_{RC})}{R_p J_S} - J_{RC} R_S \right] - J_{RC} R_S \quad (I.23)$$

En prenant deux point (J_1, V_1) et (J_2, V_2) proches entre eux et de l'axe des abscisses de la caractéristique J-V on obtient donc :

$$V_1 = \frac{nK_B T}{q} \ln \left[\frac{R_p + (J_{PH} + J_S - J_1)}{R_p J_S} - J_1 R_S \right] - J_1 R_S \quad (I.24)$$

$$V_2 = \frac{nK_B T}{q} \ln \left[\frac{R_p + (J_{PH} + J_S - J_2)}{R_p J_S} - J_2 R_S \right] - J_2 R_S \quad (I.25)$$

R_S peut être écrite alors sous la forme :

$$R_S = \frac{V_1 - V_2}{J_2 - J_1} - \frac{nK_B T}{q} \frac{1}{J_2 - J_1} \ln \left[\frac{R_p (J_{PH} + J_S - J_1) - J_1 R_S}{R_p (J_{PH} + J_S - J_2) - J_2 R_S} \right] \quad (I.26)$$

Avec l'approximation $R_p \gg R_S$ l'équation (I.26) devient :

$$R_S = \frac{V_1 - V_2}{J_2 - J_1} - \frac{nK_B T}{q} \frac{1}{J_2 - J_1} \ln \left[\frac{(J_{PH} + J_S - J_1)}{(J_{PH} + J_S - J_2)} \right] \quad (I.27)$$

Et

$$R_p = \frac{V_{CO}}{J_{PH} - J_S \left(\exp \left(q \frac{V_{CO}}{nK_B T} \right) - 1 \right)} \quad (I.28)$$

VI.3- Calcul du courant maximal J_M et la tension maximal V_M

La puissance de la cellule est $P=J.V$.

Pour trouver J_M et V_M il suffit de trouver P_M la puissance maximale de la cellule (figure I-36). Ceci consiste à maximiser l'aire du rectangle borné par les axes de J et V et par la courbe J-V.

Pour ce faire, nous pouvons procéder à un calcul différentiel [60]:

$$\frac{dP}{dJ} = 0 \quad (I.29)$$

Où

$$P = V.J \quad (\text{I.30})$$

V est déduite à partir de l'équation (I.15) et la puissance aux bornes de la cellule est donnée par :

$$V = (-J + J_{PH} - J_S \left(\exp \left(q \frac{(V + R_S J)}{nK_B T} \right) - 1 \right) - \frac{R_S J}{R_P}) R_P \quad (\text{I.31})$$

D' où

$$\frac{dP}{dJ} = -2J(R_S + R_P) + R_P J_{PH} + R_P J_S \left[\exp \left(q \frac{(V + R_S J)}{nK_B T} \right) - 1 \right] \left(1 + \frac{R_S J}{nK_B T} \right) \quad (\text{I.32})$$

La résolution de cette équation différentielle donne la densité du courant maximal pour une cellule photovoltaïque [61].

Enfin

$$J_M = \frac{[(\log(J_{CC} + J_S) - \log(J_{CC} - J_S) / J_S)]}{\left(R_S \left(1 + q \frac{J_S}{nK_B T} \right) \right)} \quad (\text{I.33})$$

Et

$$V_M = \frac{nK_B T}{q} \log \left(\frac{(J_{CC} + J_S)}{J_S} \right) - R_S J_M \quad (\text{I.34})$$

Pour calculer la puissance maximale de la cellule il suffit de faire le produit des deux entités précédentes.

Références bibliographiques

- [1]: http://www.columbianchemicals.com/Portals/0/Products/Literature/french/Plastic_fr.pdf.
- [2]: Brabec, *Adv. Funct. Mat.* 11(5) 374 2001 et équipe de Groningen, V. D. Mihailtechi, *JAP*, 94, 6849 (2003).
- [3]: M. Granstrom, K. Petritsch, A. C. Arias, A. Lux, Anderson M. R. and Friend R. H., Laminated fabrication of polymeric photovoltaic diode, *Nature London*, 395, 257-260 (1998).
- [4]: S. Sergeev, W. Pisula, Y. H. Geerts; *chem. Soc. Rev.*, 36, 1920, (2007).
- [5]: X. Comminhes, P. Davidson, C. Bourzaux, J. Livage, *Advanced Materials*, 9, 900 (1997).
- [6]: J. Jung, A. Rybak, A. Salazak, S. Bialecki, P. Miskiewicz, I. Glowacki, J. Ulanski, S. Rosselli, A. Yasuda, G. Nelles, Z. Tomovic, M. D. Watson, K. Mullen, *Synth. Met.*, 155, 150 (2005).
- [7]: L. Schmidt-Mende, A. Fechtenkotter, K. Mullen, E. Moons, R. H. Friend, J. D. Mackenzie, *Science*, 293, 1119 (2001).
- [8]: L. Schmidt-Mende, A. Fechtenkotter, K. Mullen, R. H. Friend, J. D. Mackenzie, *physica E*, 14, 263 (2002).
- [9]: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/bandstr.html>.
- [10]: W. R. Salaneck, R. H. Friend, and J. L. Brédas, Electronic structure of conjugated polymers: Consequences of electron-lattice coupling, *Phys. Rep. -Rev. Sec. Phys. Lett.* 319, 231-251 (1999).
- [11]: A. J. Heeger, Nobel lecture: Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials, *Rev. Mod. Phys.* 73, 681-700 (2001).

[12]: L. Bailly, cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 4053 (2010).

[13]:<http://www.questmachine.org/Articles/articlequestmachine.php?a=1352>.

[14]: R. Friend, Polymer diodes, Physics world june (1999), <http://www.cdtltd.co.uk>.

[15]: R. Payerne, structure et propriétés électroniques à différentes échelles de systèmes modèles de polymères conducteurs et semi-conducteurs, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Physique, Matériaux et nanostructures, (2004).

[16]: W.R. Salaneck, J.L. Brédas, Electronic and chemical structure of interfaces for polymer light emitting devices, (1996).

[17]: N. N. Hoang, Réalisation et caractérisation de structure composite polyaniline-polyurethane dans le domaine micro-ondes modélisation et optimisation de blindage électromagnétique multicouche en utilisant un algorithme génétique, thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 3086 (2005).

[18]: F. Gnaud, M. Nechtschein, et al., Physical Review letters 55, 118 (1995).

[19]: Shi-Jie-Xie, Liang-Mo-Mei and D. L. Lin, Physical Review B condensed Matter, 50, 13364 (1994).

[20]: S. Kivelson, Physical Review B. Condensed Matter 25, 3798 (1982).

[21]: M. Ben Khalifa, Etude du transport et ingénierie de bandes dans les diodes organiques électroluminescentes à hétérostructure, thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon, France, Dispositifs de l'électronique intégrée, 2004 (2004).

[22]: K. Zerga, Modélisation et simulation de la mobilité des porteurs de charge, mémoire de magistère, Université de Tlemcen, l'Algérie, (2010).

[23]: <http://epistolier.Wordpress.com/2010/06/03/soleil>.

[24]:http://www.futura-sciences.com/fr/définition/t/univers-/dsoleil_3727.

[25]: <http://system.solaire.free.fr/soleil.htm>.

[26]: <http://www.techno-science.net/onglet=glossaire&définition=7280>.

[27]: [http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/images/solar/E vents/erupt2.jpg](http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/images/solar/Events/erupt2.jpg).

[28]: W. Hojeij, Réalisations et caractérisations optoélectroniques de cellules photovoltaïques organiques, thèse de doctorat, l'Université de Limoges, France, Electroniques des hautes fréquences et optoélectroniques, 44 (2007).

[29]: Green, M. A.; Emery, K. Hishikawa, Y. Warta, W. Prog. Photovolt: Res. Appl, 16, 61-67 (2008).

[30]: B. Thuillier, Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, thèse de doctorat. INSA de Lyon, (2001).

[31]: M. Benaïcha, Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque, mémoire de magistère, physique. Université Colonel Hadj Lakhdar Batna, Algérie, (2007).

[32] : O. Nichporuk, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités, thèse de doctorat, Université INSA de Lyon, (2005).

[33] : J. F. Lelievre, Elaboration de SIN, H par PECVD, optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques, thèse de doctorat, Université INSA de Lyon, (2007).

[34] : Q. Bricaud, Nouveaux polymères π -conjugués pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Matière, Molécules, Matériaux en pays de la Loire (3MPL). Université d'Angers, 920 (2008).

[35] : C. Cocoyer et al., Appl. Phys. Lett., 133108 (2006).

[36] : L. Zeng et al., Appl. Phys. Lett., 89, 111111 (2006).

[37] : G. Hill et al., chem. Phys. Lett., 327, 181, 3-4 (2000).

[38] : M. Knupfer, Appl.Phys. A : Mat. Sci. & Proe., 77, 623 (2003).

- [39] : C-M. Yanget al., Appl. Phys. Lett., 90, 133509 (2007).
- [40] : P. Peumans et al., J. Appl. Phys., 93, 7, 3693 (2003).
- [41] : O. Haerter et al., Appl. Phys. Lett., 86, 164101 (2005).
- [42] : O. D. Jurchescu et al., Appl. Phys. Lett., 84, 16, 3061 (2004).
- [43]: Brabec, Adv. Funct. Mat. 11(5) 3742001 et équipe de Groningen, V. D. Mihailtechi, JAP, 94, on 6849, (2003).
- [44] : S. Glenis, G. Horowitz, G. Tourillon et F. Garnier, Thin Solid Films, 111, 93 (1984).
- [45] : S. Glenis, G. Tourillon et F. Garnier, Thin Solid Films, 139, 221(1986.)
- [46] : G. Gustafsson, O. Inganäs, M. Sundberg et C. Svensson, Synthetic Metals, 41, 499 (1991).
- [47]: F.J. Esselink et G. Hadziioannou, Synthetic Metals, 75, 209 (1995).
- [48] : P. F. Van Hutten, G. Hadziioannou, The role of interfaces in photovoltaic devices, in Molecular Materials and functional polymers , Ed. W. J. Blau, P. Lianos, U.Schubert, Springer, 129 (2001).
- [49]: J.M. Nunzi, Organic Photovoltaic Materials and Devices, Comptes Rendus Physique, Vol. 3, pp. 523 - 542, 2002.
- [50]: http://ipn2.epfl.ch/LNS/lectures/solid/cours/Appendice_A.pdf.
- [51]: K. Petritsch, Organic solar cell architectures, thèse d'université, Graz, (2000).
- [52] : R. De Bettignies, Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués, thèse de doctorat. Physique. Ecole doctorale d'Angers. 573 (2003).
- [53] : A. Bouyefane, Optimisation de la grille de collecte des cellules solaires conventionnelles à base de Silicium multicristallin, thèse de magister, Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, Algérie, (2009).

- [54] : M. Oukachmih, Thèse de doctorat, Université Toulouse-Paul Sabatier, (2003).
- [55] : C.J. Brabec, A. Cravino, D. Meissner, N.S. Sariciftci, T. Fromherz, M.T. Rispens, L. Sanchez et J.C. Hummelen, *Advanced Functional Materials*, 11, 374 (2001).
- [56] : M.C. Scharber, D. Mühlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf, A.J. Heeger et C.J. Brabec, *Advanced Materials*, 18, 789 (2006).
- [57] : S. Gunes, H. Neugebauer et N.S. Sariciftci, *Chem. Rev.*, 107, 1324 (2007).
- [58]:<http://www.unine.ch/phys/Enseignement/cours2003.2004/Physemi/cours/Sem/nde2.html>.
- [59] : R. Braunstein, A. R. Moore and Frank Herman, Intrinsic optical Absorption in Germanium-Silicon Alloys, in *Physical Review*, Vol. 109, N^o3, pp. 695-710, (1958).
- [60]: E. kasper, Properties of strained and relaxed Silicon-Germanium, IEE Inspec, emis datareviews series N^o12, (1995).
- [61] : J. P. Bismikes, L. Ekstrom and R. J. Paff, Lattice Parameter and Density in Germanium-Silicon Alloys , in *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 68, N^o10, pp. 3021-3027, (1964).

CHAPITRE II
Résultats et discussions

Pour examiner les caractéristiques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque organique, nous nous sommes appuyés sur les résultats expérimentaux obtenus par *Wassim HOJEIJ* et ces collaborateurs de l'université de Limoges (France).

Ces résultats concernant la cellule photovoltaïque organique à hétérojonction de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al réalisée à l'institut de recherche microonde (XLIM-MINACOM).

Dans une première partie, nous examinons l'effet de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al sous fort éclairage et sur les paramètres de cette cellule tels que: la densité de photocourant J_{ph} , la densité de courant de court-circuit J_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} , la résistance série R_S et la résistance parallèle R_P , le facteur de forme FF et le rendement de conversion photovoltaïque η .

Dans une deuxième partie, nous examinons l'effet de l'éclairage sur la caractéristique courant-tension et sur les paramètres de cette cellule.

PREMIERE PARTIE

Effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension et sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.

Dans cette partie de notre travail, nous examinons les effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension et sur la tension de circuit ouvert V_{CO} , la densité de courant de court-circuit J_{CC} , la résistance série R_S , la résistance parallèle R_P , le facteur de forme FF et le rendement η de la cellule photovoltaïque organique sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

Pour ce faire, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique et faisons varier l'épaisseur de la couche LiF.

Les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique à hétérojonction réalisé par Wassim HOJEIJ sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 sont fixées comme suit :

- électrode en Indium Tin Oxyde (ITO) d'épaisseur 100 nm.
- couche de poly (3,4-éthylènedioxythiophène)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT-PSS) d'épaisseur 30nm.
- couche active accepteuse phthalocyanine de cuivre (CuPc) d'épaisseur 25 nm.
- Une couche active donneuse buckminster fullerène 60 (C60) d'épaisseur 40 nm.
- Une couche d'intersection en Fluorure de Lithium (LiF) d'épaisseur variable entre (0nm, 0.3 nm et 0.6 nm).
- Un contact arrière en aluminium (Al) avec une couche d'épaisseur 100 nm.

1- Effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Dans cette partie, nous examinons l'effet d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique examiné sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . A cet effet, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique et faisons varier l'épaisseur de la couche LiF.

Les différents résultats que nous avons obtenus à l'aide des équations (I.15), (I.18), (I.20), sont représentés sur la figure II-1.

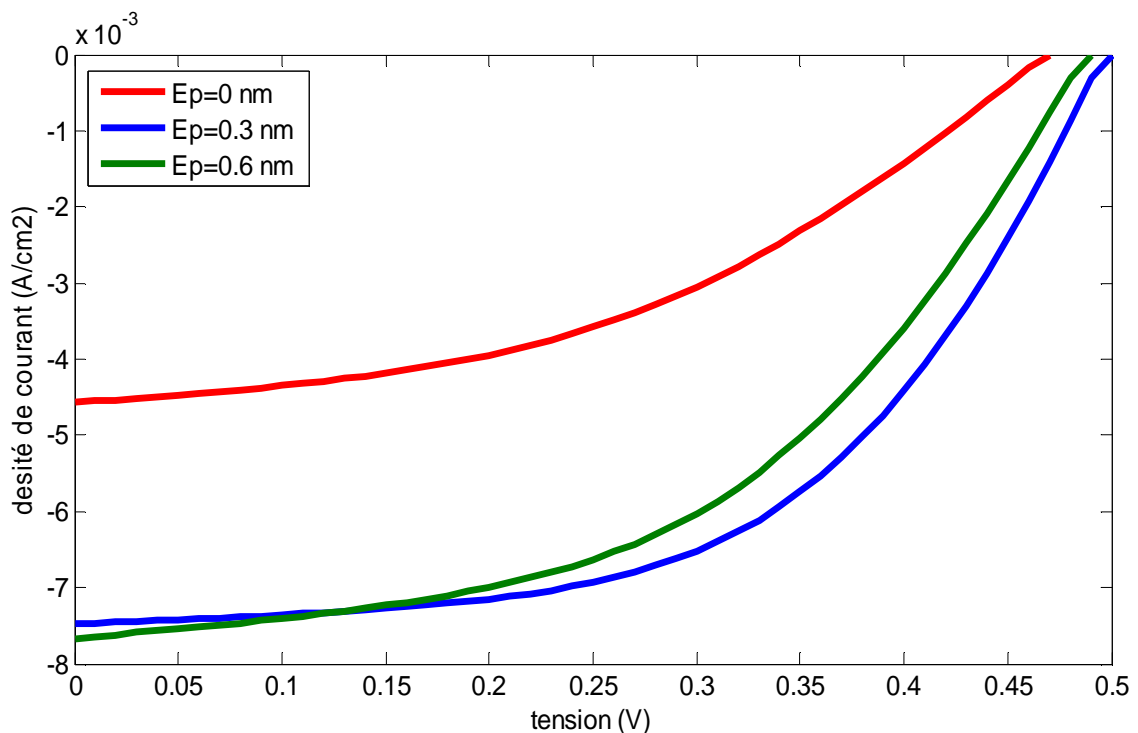


Figure II-1 : caractérisation courant-tension d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al pour différentes épaisseurs de la couche LiF sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

La figure II-1, représente les variations de la densité de courant électrique (J) en fonction de la tension (V) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al ceci pour différente épaisseur de la couche Fluorure de Lithium (LiF) sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

Sur cette figure, nous remarquons que la densité de courant électrique augmente avec l'augmentation de la tension V .

Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-1, montrent qu'en absence de la couche du Fluorure de Lithium (LiF), la densité de courant augmente de $-4.57 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ à 0 A/cm^2 lorsque la tension varie de 0 V à 0.5017 V . Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de $-3.7 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ et la tension de 0.16 V .

Avec cette épaisseur, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{cc} de l'ordre de $-4.57 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ et une tension de circuit ouvert de l'ordre de 0.5017 V

Ainsi que, pour une épaisseur de 0.3 nm de la couche du Fluorure de Lithium (LiF), la densité de courant augmente de $-7.48 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ à 0 A/cm^2 lorsque la tension varie de 0 V à 0.5018 V . Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de $-6.6 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ et la tension de 0.26 V .

Avec cette épaisseur, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{cc} de l'ordre de $-7.48 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ et une tension de circuit ouvert de l'ordre de 0.5018 V .

Pour une épaisseur de 0.6 nm de la couche du Fluorure de Lithium (LiF), la densité de courant augmente de $-7.67 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ à 0 A/cm^2 lorsque la tension varie de 0 V à 0.4944 V . Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de $-6.4 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ et la tension de 0.23 V .

Avec cette épaisseur, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{cc} de l'ordre de $-7.67 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ et une tension de circuit ouvert de l'ordre de 0.4944 V .

D'après ces résultats, nous remarquons que L'insertion d'une fine couche de LiF entre la cathode d'aluminium et la couche active permet d'améliorer le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. Cette couche de LiF améliore donc le contact ohmique entre la cathode et la couche active pour une couche très mince.

Donc, l'épaisseur trop fine de la couche LiF entraîne probablement des chemins de court-circuit entre électrodes, comme le suggère la diminution des pertes des charges.

Les différents résultats que nous avons obtenus et concernant le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert pour différent épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sont rassembler et comparer aux résultats expérimentaux

obtenus par Wassim HOJEIJ sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . Nos résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Épaisseur de la couche LiF (nm)		J_{CC} (mA/cm ²)	V_{CO} (V)
0	Théorique	4.568	0.475
	Expérimentale	4.57	0.47
0.3	Théorique	7.480	0.5018
	Expérimentale	7.48	0.5
0.6	Théorique	7.670	0.4944
	Expérimentale	7.67	0.49

Tableau II.1 : la variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al pour différentes épaisseurs de la couche Fluorure de Lithium (LiF).

2- Effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Dans cette section, nous examinons l'effet d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique examinée sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . A cet effet, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique et en fait varie l'épaisseur de la couche LiF.

Les paramètres de la cellule photovoltaïque organique : la densité de photocourant J_{PH} , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_p , le facteur de forme FF et le rendement η ont été obtenues à l'aide des relations suivantes :

$$J_{PH} = J_s \left[\exp\left(\frac{qV_{CO}}{nK_B T}\right) - 1 \right] + \frac{V_{CO}}{R_p} \quad (\text{II.1})$$

Où

J_s : La densité de courant de saturation en (mA/cm^2).

n : Le facteur d'idéalité ($n=1$ dans le cas idéale).

K_B : La constante de Boltzmann (1.38×10^{-23}).

T : La température absolue en Kelvin (300 K).

q : La charge de l'électron (1.6×10^{-19}) en Coulomb (cb).

Avec

$$J_s = \frac{J_{CC}(R_s + R_p) - V_{CO}}{R_p \left(\exp\left(q \frac{V_{CO}}{nK_B T}\right) - \exp\left(q \frac{J_{CC} R_s}{nK_B T}\right) \right)} \quad (\text{II.2})$$

$$R_s = \frac{V_1 - V_2}{J_2 - J_1} - \frac{nK_B T}{q} \frac{1}{J_2 - J_1} \ln \left[\frac{(J_{PH} + J_s - J_1)}{(J_{PH} + J_s - J_2)} \right] \quad (\text{II.3})$$

Où

(J_1, V_1) et (J_2, V_2) : deux point successive.

Tel que :

$$V_1 = \frac{nK_B T}{q} \ln \left[\frac{R_P + (J_{PH} + J_S - J_1)}{R_P J_S} - J_1 R_S \right] - J_1 R_S \quad (\text{II.4})$$

$$V_2 = \frac{nK_B T}{q} \ln \left[\frac{R_P + (J_{PH} + J_S - J_2)}{R_P J_S} - J_2 R_S \right] - J_2 R_S \quad (\text{II.5})$$

Et

$$R_P = \frac{V_{CO}}{J_{PH} - J_S \left(\exp\left(q \frac{V_{CO}}{nK_B T}\right) - 1 \right)} \quad (\text{II.6})$$

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.7})$$

Où

J_m : La densité de courant maximale en (mA/cm^2) .

V_m : La tension de circuit ouvert en (volt).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot J_m}{P_{in}} = \frac{FF \times J_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II.8})$$

Où

P_{in} : La puissance incidente en (mW/cm^2) .

Les différents résultats que nous avons obtenus sont rassemblés et comparés aux différents résultats expérimentaux :

Epaisseur De la couche LiF (nm)		J_{PH} (mA/cm ²)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	FF	η (%)
0	Théorique	4.8	299.89	541	0.31	0.787
	Expérimentale	4.56	300	560	0.285	0.7
0.3	Théorique	7.5	86.09	994.48	0.4588	2.028
	Expérimentale	7.48	90	1016	0.42	1.86
0.6	Théorique	7.7	119.18	409.46	0.3916	1.739
	Expérimentale	7.66	123	417	0.35	1.56

Tableau II.2 : la variation des paramètres de la cellule photovoltaïque organique d'une structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al pour différentes épaisseurs de la couche Fluorure de Lithium (LiF).

Les différents résultats que nous avons obtenus, sont représentés sur les figures II-2, II-3, II-4, II-5, II-6, II-7 et II-8.

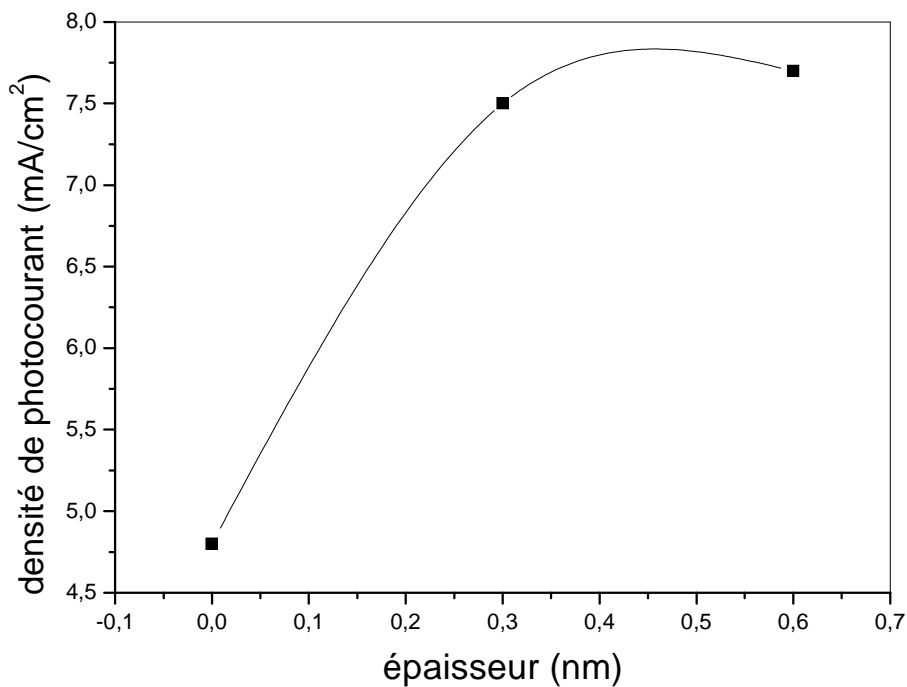


Figure II-2 : Effet de l'épaisseur sur la densité de photocourant d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm².

La figure II-2, représente la variation de la densité de photocourant en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm². Sur cette figure, nous remarquons que la densité de photocourant augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF). Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-2, montrent que la densité de photocourant augmente de 4.8mA/cm² à 7.7mA/cm² lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent que la photoconductivité de la diode augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF). Donc nous pouvons conclure, que l'épaisseur de la cellule photovoltaïque est un facteur important pour l'absorption des photons.

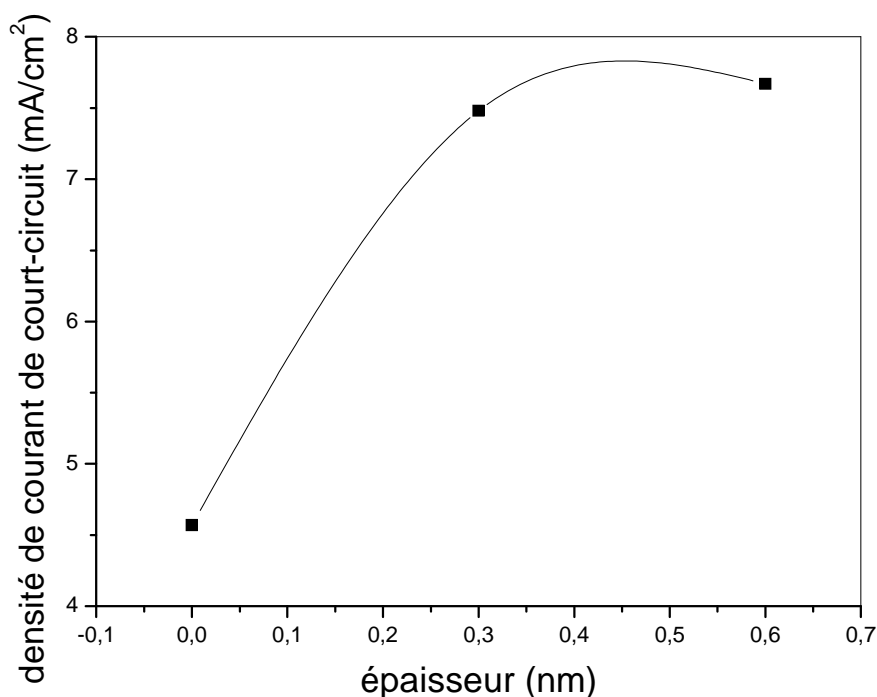


Figure II-3 : Effet de l'épaisseur sur la densité de courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm².

La figure II-3, représente la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm². Sur cette figure, nous remarquons que la densité de courant de court-circuit augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF). Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-3, montrent que la densité de courant de court-circuit augmente de 4.568 mA/cm² à 7.670 mA/cm² lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent que le courant électrique de la diode augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF). La couche LiF améliore, donc, le contact ohmique entre la cathode et la couche active et l'augmentation de l'épaisseur de la diode entraîne probablement des chemins de court-circuit entre électrodes, comme le suggère la diminution des pertes des charges.

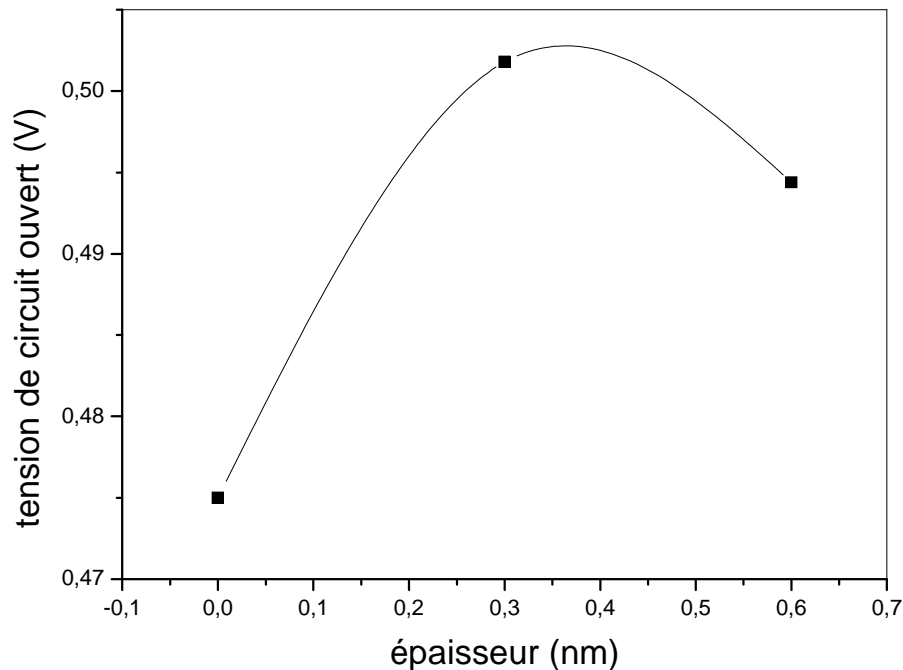


Figure II-4 : Effet de l'épaisseur sur la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

La figure II-4, représente la variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . Sur cette figure, nous remarquons que la tension de circuit ouvert augmente de 0.475 V à 0.5018 V lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.3 nm. Puis elle diminue de 0.5018 V à 0.4944 V lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0.3 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent, que l'insertion de la couche LiF améliore la tension de circuit-ouvert mais pour une couche mince de l'ordre de 0.3 nm ce qui est en bon accord de la faible mobilité des charges par rapport à 0.6 nm et l'augmentation des pertes des charges à cause de l'augmentation du processus de recombinaisons et du piégeage.

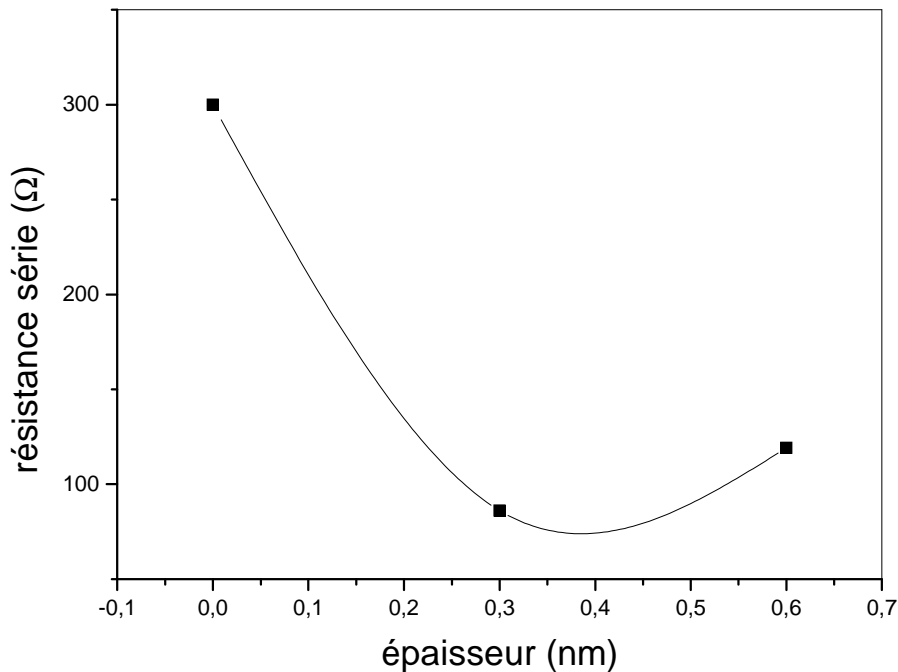


Figure II-5 : Effet de l'épaisseur sur la résistance série d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

La figure II-5, représente la variation de la résistance série en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . Sur cette figure, nous remarquons que la résistance série diminue de $299.89 \text{ } \Omega$ à $86.09 \text{ } \Omega$ lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.3 nm. Puis elle augmente de $86.09 \text{ } \Omega$ à $119.18 \text{ } \Omega$ lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0.3 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent, que l'insertion de la couche LiF diminuée la résistance série. Donc on peut dire que, pour une épaisseur fine de la couche LiF la résistivité de la diode diminuée à cause de la diminution de la mobilité des porteurs de charges dans le matériau, qui est régie par les impuretés et les barrières telles que la charge d'espace. Donc, La résistance série varie évidemment selon la distance que doivent parcourir les porteurs (la résistance série augmente lorsque les couches sont plus épaisses).

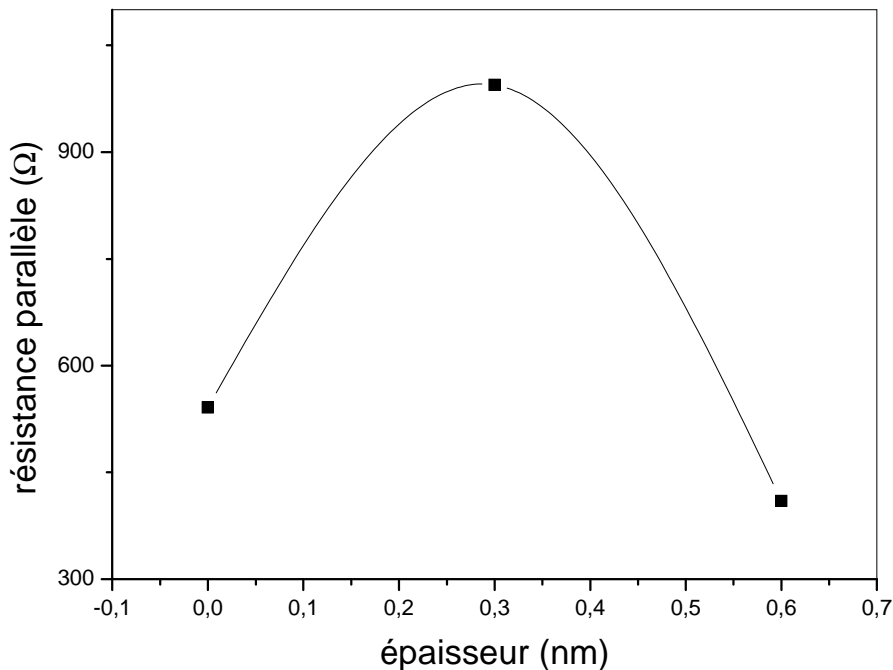


Figure II-6 : Effet de l'épaisseur sur la résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

La figure II-6, représente la variation de la résistance parallèle en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . Sur cette figure, nous remarquons que la résistance parallèle augmente de $541 \text{ } \Omega$ à $994.48 \text{ } \Omega$ lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.3 nm. Puis elle diminue de $994.48 \text{ } \Omega$ à $409.46 \text{ } \Omega$ lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0.3 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent que la résistance parallèle est plus importante pour une épaisseur de 0.3 nm de la couche LiF que 0 nm et 0.6 nm. Donc on peut dire que, pour une épaisseur fine de la couche LiF les pertes des charges augmentent facilement à cause de la faible mobilité des charges et l'augmentation du processus de recombinaisons et du piégeage. Donc, La résistance parallèle est associée à la recombinaison des charges et elle indique le degré des charges perdues à cause des recombinaisons et du piégeage.

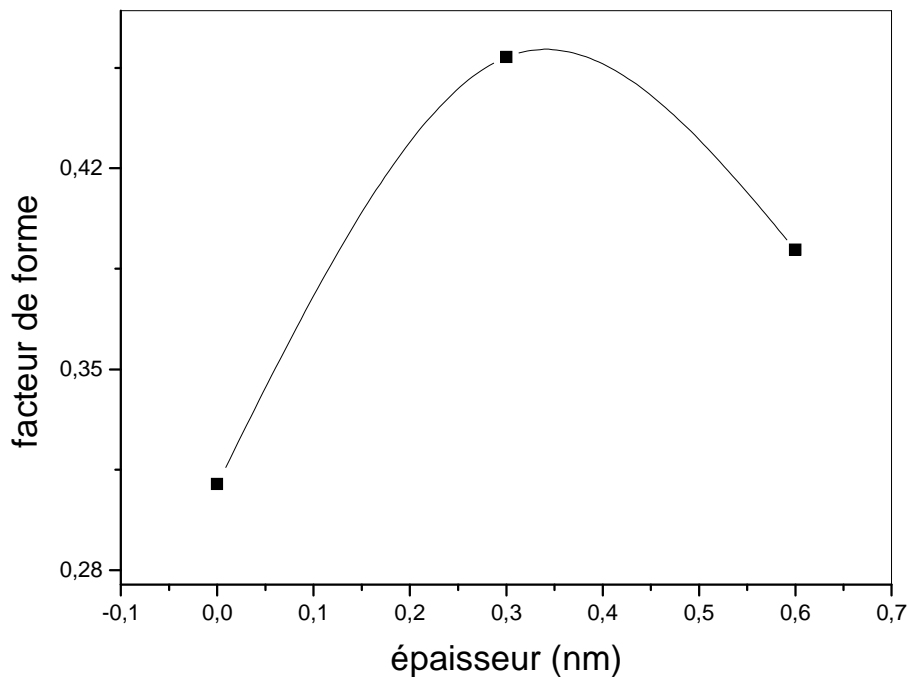


Figure II-7 : Effet de l'épaisseur sur le facteur de forme d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

La figure II-7, représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . Sur cette figure, nous remarquons que le facteur de forme augmente de 0.31 à 0.458 lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.3 nm. Puis elle diminue de 0.458 à 0.391 lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0.3 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent que le facteur de forme est plus important pour une épaisseur de 0.3 nm de la couche LiF que 0 nm et 0.6 nm. Donc pour une épaisseur trop fine de la couche LiF, on a pu remarquer une légère augmentation du facteur de forme due à une augmentation des pertes des charges et diminution de la résistivité du matériau organique à cause de la faible mobilité des charges et l'augmentation du processus de recombinaisons et du piégeage.

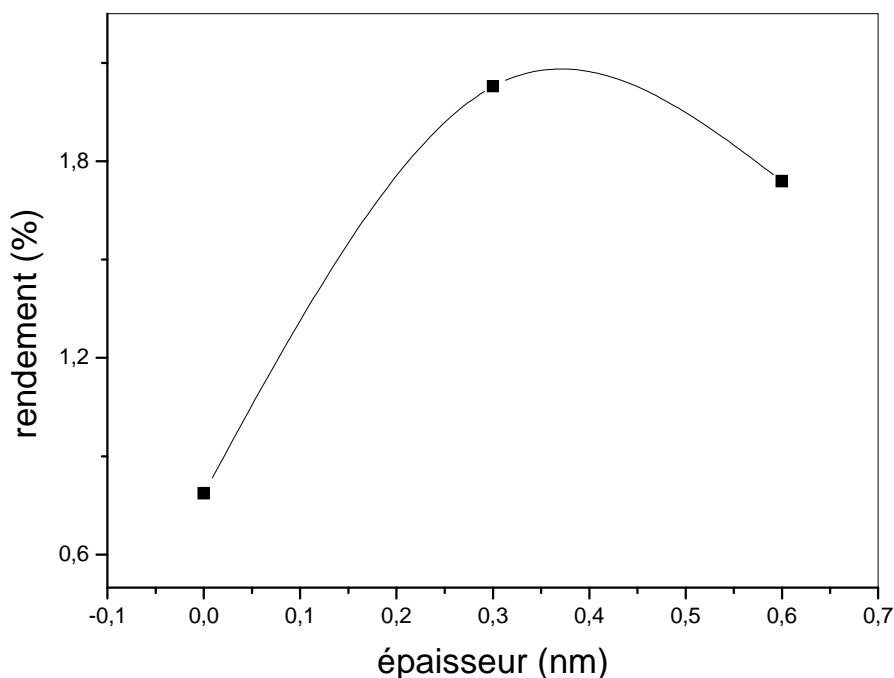


Figure II-8 : Effet de l'épaisseur sur le rendement d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 .

La figure II-8, représente la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (x nm)/Al sous une illumination de 84.6 mW/cm^2 . Sur cette figure, nous remarquons que le rendement augmente de 0.787 % à 2.028 % lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0 nm à 0.3 nm. Puis elle diminue de 2.028 % à 1.739 % lorsque l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) augmente de 0.3 nm à 0.6 nm. Ces variations montrent que le rendement est plus important pour une épaisseur de 0.3 nm de la couche LiF que 0 nm et 0.6 nm.

Les différents résultats que nous avons obtenus, montrent que l'insertion d'une fine couche de LiF entre la cathode d'aluminium et la couche active permet d'améliorer le rendement de conversion en puissance de la cellule réalisée avec 0,3 nm de LiF. L'augmentation de rendement est due à l'augmentation du facteur de forme qui atteint la valeur 0,4588 grâce à une diminution de la résistance série et une

augmentation de la résistance parallèle. Cette couche, en LiF, améliore donc le contact ohmique entre la cathode et la couche active pour une couche très mince [1].

L'épaisseur trop fine de la couche LiF entraîne probablement des chemins de court-circuit entre électrodes, comme le suggère la diminution de la résistance série et l'augmentation de la résistance parallèle. De plus ces échantillons ne sont pas très absorbants, d'où une chute importante du rendement. Donc la diode la plus efficace est la diode fine. Elle délivre une densité de courant de court-circuit de 7.48×10^{-3} A/cm² et une tension de circuit ouvert de 0.5018 V sous une illumination de 84.6 mW/cm². Le rendement correspondant est alors égal à 2.028 (%) [2].

DEUXIEME PARTIE

*Effets de l'intensité lumineuse sur la
caractéristique courant-tension et sur les
paramètres de la cellule photovoltaïque
organique de type ITO/PEDOT-
PSS/CuPc/C60/LiF/Al.*

Dans cette partie de notre travail, nous examinons les effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension et les paramètres: la tension de circuit ouvert V_{CO} , la densité de courant de court-circuit J_{CC} , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_p , le facteur de forme FF et le rendement η de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.

Pour ce faire, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique et faisons varier l'intensité lumineuse.

Les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique à hétérojonction réalisé par Wassim HOJEIJ sont fixées comme suit :

- électrode en Indium Tin Oxyde (ITO) d'épaisseur 100 nm.
- couche de poly (3,4-éthylènedioxythiophène)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT-PSS) d'épaisseur 30nm.
- couche active accepteuse phthalocyanine de cuivre (CuPc) d'épaisseur 25 nm.
- Une couche active donneuse buckminster fullerène 60 (C60) d'épaisseur 40 nm.
- Une couche d'intersection en Fluorure de Lithium (LiF) d'épaisseur 0.3 nm.
- Un contact arrière en aluminium (Al) avec une couche d'épaisseur 100 nm.

1- Effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Dans cette partie, nous examinons l'effet de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique examinée pour une couche d'insertion en Fluorure de Lithium (LiF) d'épaisseur 0.3 nm.

Les différents résultats que nous avons obtenus à l'aide des équations (I.15), (I.18), (I.20), sont représentés sur la figure II-9.

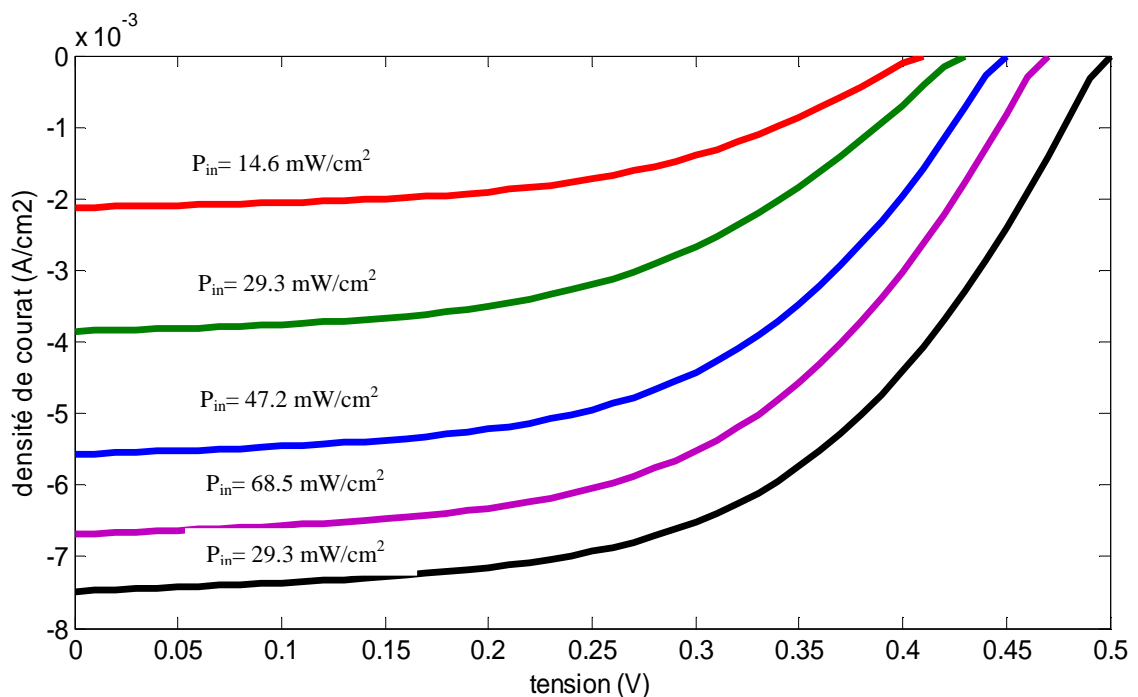


Figure II-9 : caractérisation courant-tension d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al pour différentes illuminations.

La figure II-9, représente les variations de la densité de courant électrique (J) en fonction de la tension (V) d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al ceci pour différentes intensités lumineuses. Sur cette figure, nous remarquons que la densité de courant électrique augmente avec l'augmentation de la tension V.

Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-9, montrent que, pour une illumination de 84.6 mW/cm^2 , la densité de courant augmente de $-7.48 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ à 0 A/cm^2 lorsque la tension varie de 0 V à 0.5017 V. Cette

augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de -6.3×10^{-3} A/cm² et la tension de 0.26 V. Avec cet éclairage, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{CC} de l'ordre de -7.48×10^{-3} A/cm² et une tension de circuit ouvert V_{CO} de l'ordre de 0.5017 V.

Ainsi que, pour une illumination de 68.5 mW/cm², la densité de courant augmente de -6.68×10^{-3} A/cm² à 0 A/cm² lorsque la tension varie de 0 V à 0.4717 V. Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de -5.8×10^{-3} A/cm² et la tension de 0.25 V. Avec cet éclairage, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{CC} de l'ordre de -6.68×10^{-3} A/cm² et une tension de circuit ouvert V_{CO} de l'ordre de 0.4717 V.

Pour une illumination de 47.2 mW/cm², la densité de courant augmente de -5.56×10^{-3} A/cm² à 0 A/cm² lorsque la tension varie de 0 V à 0.4517 V. Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de -4.9×10^{-3} A/cm² et la tension de 0.23 V. Avec cet éclairage, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{CC} de l'ordre de -5.56×10^{-3} A/cm² et une tension de circuit ouvert V_{CO} de l'ordre de 0.4517 V.

Pour une illumination de 29.3 mW/cm², la densité de courant augmente de -3.85×10^{-3} A/cm² à 0 A/cm² lorsque la tension varie de 0 V à 0.4316 V. Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de -3.4×10^{-3} A/cm² et la tension de 0.21 V. Avec cet éclairage, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{CC} de l'ordre de -3.85×10^{-3} A/cm² et une tension de circuit ouvert V_{CO} de l'ordre de 0.4316 V.

En fin, pour une illumination de 14.6 mW/cm², la densité de courant augmente de -2.11×10^{-3} A/cm² à 0 A/cm² lorsque la tension varie de 0 V à 0.4121 V. Cette augmentation devient sensible à partir de la densité de courant de -1.8×10^{-3} A/cm² et la tension de 0.20 V. Avec cet éclairage, nous obtenons une densité de courant de court-circuit J_{CC} de l'ordre de -2.11×10^{-3} A/cm² et une tension de circuit ouvert V_{CO} de l'ordre de 0.4121 V.

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

J_{CC} 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.

Les différents résultats que nous avons obtenus et concernant le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert pour différent illumination sont rassembler et comparer aux résultats expérimentaux obtenus par Wassim HOJEIJ pour une épaisseur de 0.3 nm de la couche de Fluorure de Lithium (LiF). Nos résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Eclairement P_{in} en (mW/cm ²)		V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)
84.6	Théorique	0.5018	7.480
	Expérimentale	0.5	7.48
68.5	Théorique	0.4717	6.68023
	Expérimentale	0.47	6.69
47.2	Théorique	0.4517	5.569
	Expérimentale	0.45	5.57
29.3	Théorique	0.4316	3.850
	Expérimentale	0.43	3.85
14.6	Théorique	0.4121	2.119
	Expérimentale	0.41	2.12

Tableau II.3 : la variation de la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert d'une structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3nm)/Al pour différents éclairagements (mW/cm²).

2- Effets de l'intensité lumineuse sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Dans cette section, nous examinons l'effet de l'intensité lumineuse sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique examinée pour une couche d'insertion en Fluorure de Lithium (LiF) d'épaisseur 0.3 nm.

A cet effet, nous fixons les épaisseurs de différentes couches de la cellule photovoltaïque organique et faisons varier l'intensité lumineuse.

Les résultats relatifs aux différents paramètres de la cellule photovoltaïque organique et obtenus à l'aide des équations, II.1 à II.8, sont rassemblés et comparés aux différents résultats expérimentaux dans le tableau II.4.

Eclairement P_{in} en (mW/cm ²)		J_{ph} (mA/cm ²)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	FF	η (%)
84.6	Théorique	7.5	86.09	994.48	0.458	2.0283
	Expérimentale	7.48	90	1016	0.42	1.86
68.5	Théorique	6.7	91	1071.67	0.4532	2.08029
	Expérimentale	6.69	95	1077	0.42	1.95
47.2	Théorique	5.6	95.93	1220.61	0.4496	2.3877
	Expérimentale	5.57	100	1221	0.416	2.23
29.3	Théorique	3.9	191.62	1662.42	0.4312	2.4368
	Expérimentale	3.85	195	1762	0.41	2.35
14.6	Théorique	2.1	269.66	2546.28	0.4141	2.4657
	Expérimentale	2.12	273	2452	0.403	2.41

Tableau II.4 : la variation des paramètres de la cellule photovoltaïque organique d'une structure ITO/PEDOT-PSS (30 nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al pour différentes éclaircements (mW/cm²).

Les variations de différents paramètres, sont représentées sur les figures: II-10, II-11, II-12, II-13, II-14, II-15 et II-16.

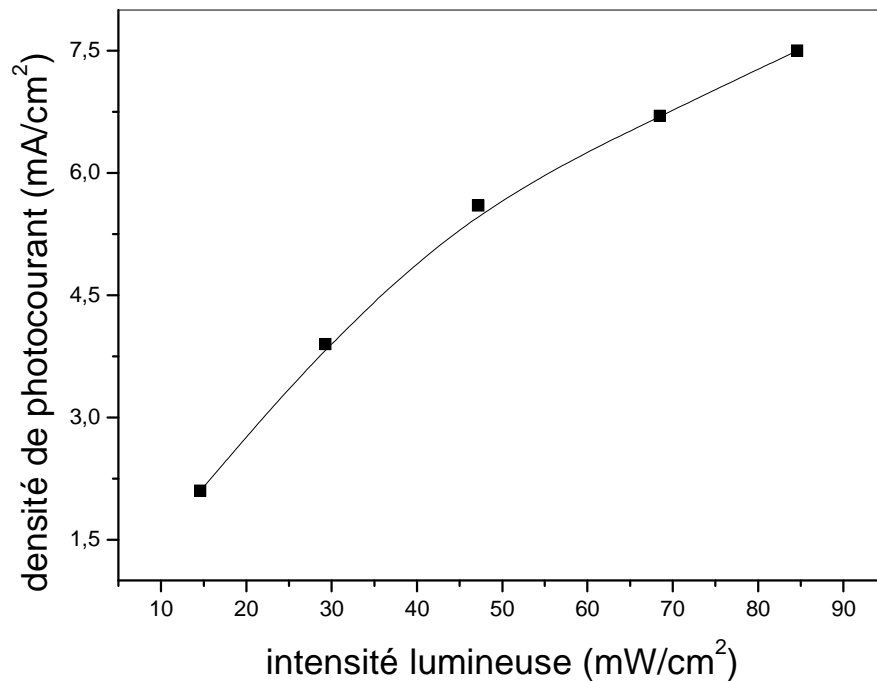


Figure II-10 : Effet de l'intensité lumineuse sur la densité de photocourant d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-10, représente la variation de la densité de photocourant en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que la densité de photocourant augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-10, montrent que la densité de photocourant augmente de 2.1 mA/cm² à 7.5 mA/cm² lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm² à 84.6 mW/cm². 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 avec l'intensité lumineuse.

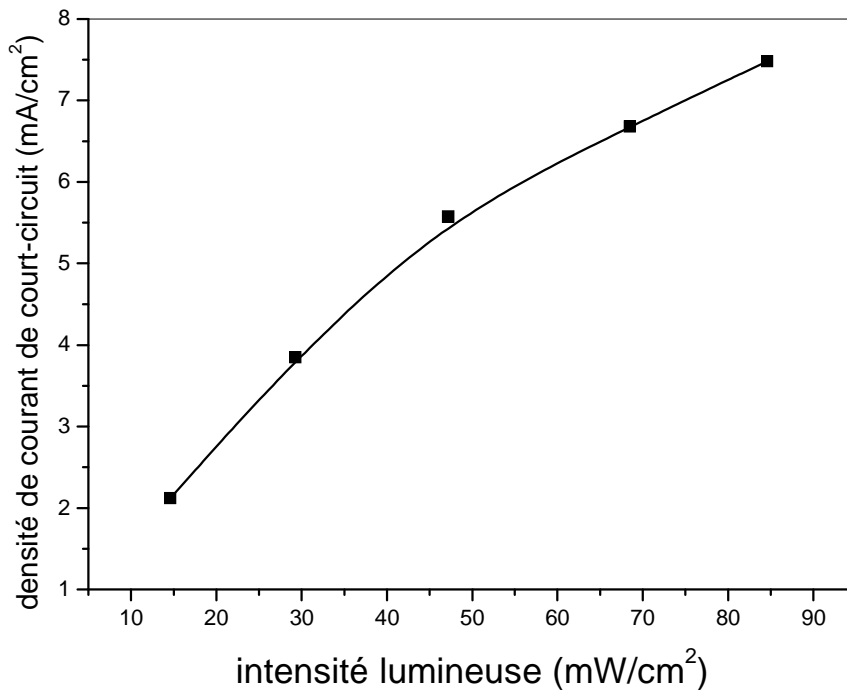


Figure II-11 : Effet de l'intensité lumineuse sur la densité de courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-11, représente la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que la densité de courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-11, montrent que la densité de courant de court-circuit augmente de 2.11 mA/cm^2 à 7.48 mA/cm^2 lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm^2 à 84.6 mW/cm^2 . 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. Ainsi, montre que le courant de court-circuit est alors plutôt limité par les recombinaisons bimoléculaires. Donc, c'est le courant maximum que l'on peut extraire de la structure et il correspond idéalement au courant photogénéré. Ce courant dépend

fortement du taux de génération optique (source externe) et de la longueur de diffusion L_D des porteurs (et donc des recombinaisons).

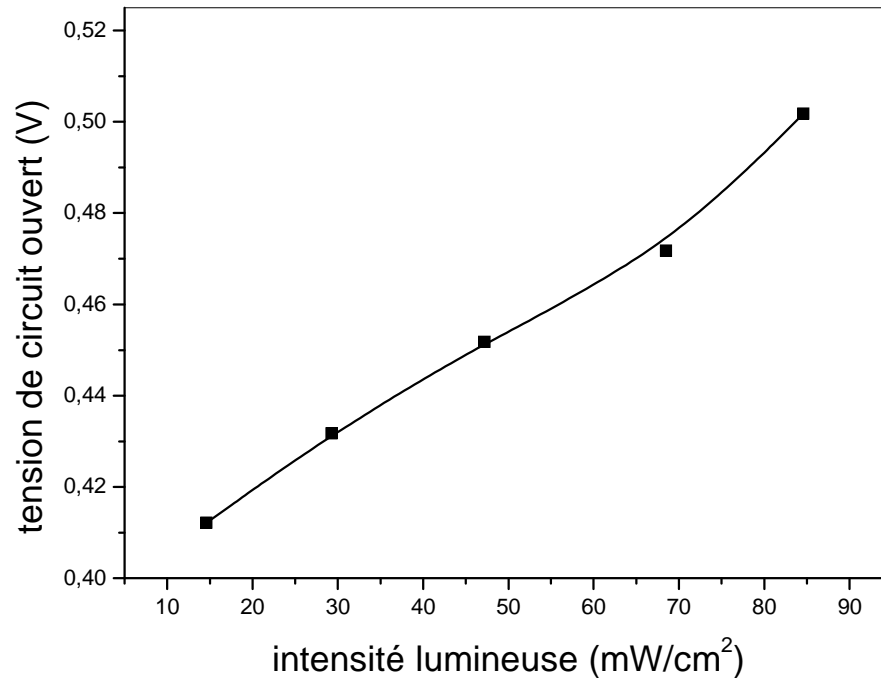


Figure II-12: Effet de l'intensité lumineuse sur la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-12, représente la variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que la tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-12, montrent que la tension de circuit ouvert augmente de 0.412 V à 0.501 V lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm² à 84.6 mW/cm². Ces variations montrent que, la tension de circuit ouvert dépend de la mobilité de porteur et de la recombinaison c'est-à-dire c'est la tension maximale fournie par la cellule solaire, permettant d'évaluer le nombre de recombinaisons dans la structure (plus V_{co} est faible, plus il y a de recombinaisons).

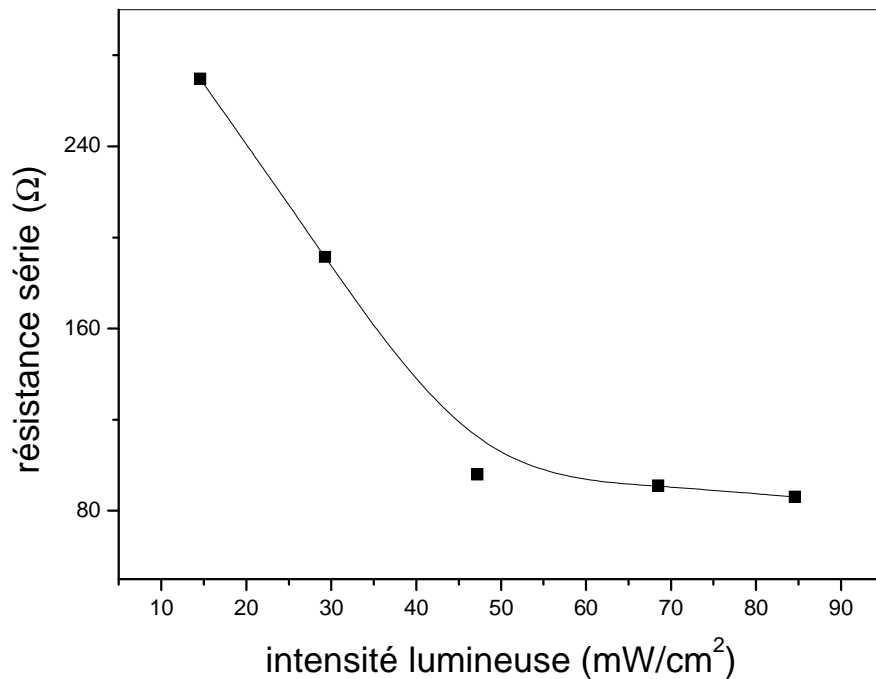


Figure II-13 : Effet de l'intensité lumineuse sur la résistance série d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-13, représente la variation de la résistance série en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que la résistance série diminue avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-13, montrent que la résistance série décroît de 269.66 Ω à 86.09 Ω lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm² à 84.6 mW/cm². Ces variations, montrent que la résistance série diminue avec l'augmentation de l'intensité lumineuse ; tient notamment compte de la mobilité des porteurs de charges dans le matériau, qui est régie par les impuretés et les barrières telles que la charge d'espace. Donc, sous forte éclaircissement la résistance série diminue puisque plus de porteurs de charges participent au processus de conduction.

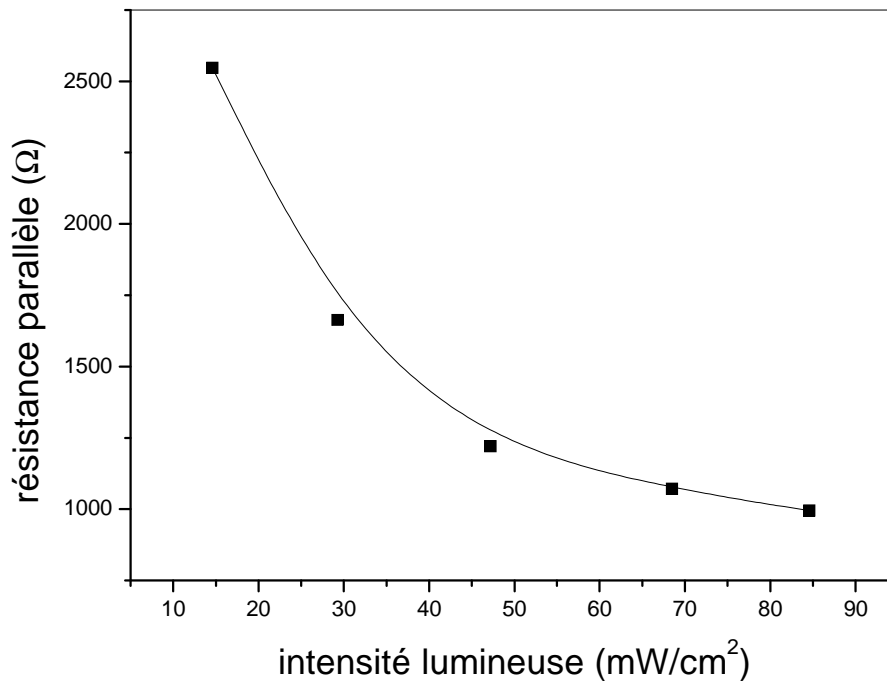


Figure II-14 : Effet de l'intensité lumineuse sur la résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-14, représente la variation de la résistance parallèle en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que la résistance parallèle diminue avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-14, montrent que la résistance parallèle décroît de 2546.286 Ω à 994.48 Ω lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm² à 84.6 mW/cm². Ces résultats, montrent que la résistance parallèle diminue avec l'augmentation de l'intensité lumineuse car la résistance parallèle est associée à la recombinaison des charges et elle indique le degré des charges perdues à cause des recombinaisons et du piégeage. Donc, plus la résistance parallèle est grande, moins on assiste au processus de recombinaison à cause de la faible mobilité des porteurs de charges. Le comportement de la résistance R_p est difficile à expliquer, allant à l'encontre d'une augmentation attendue des recombinaisons indiquent donc d'une diminution de R_p .

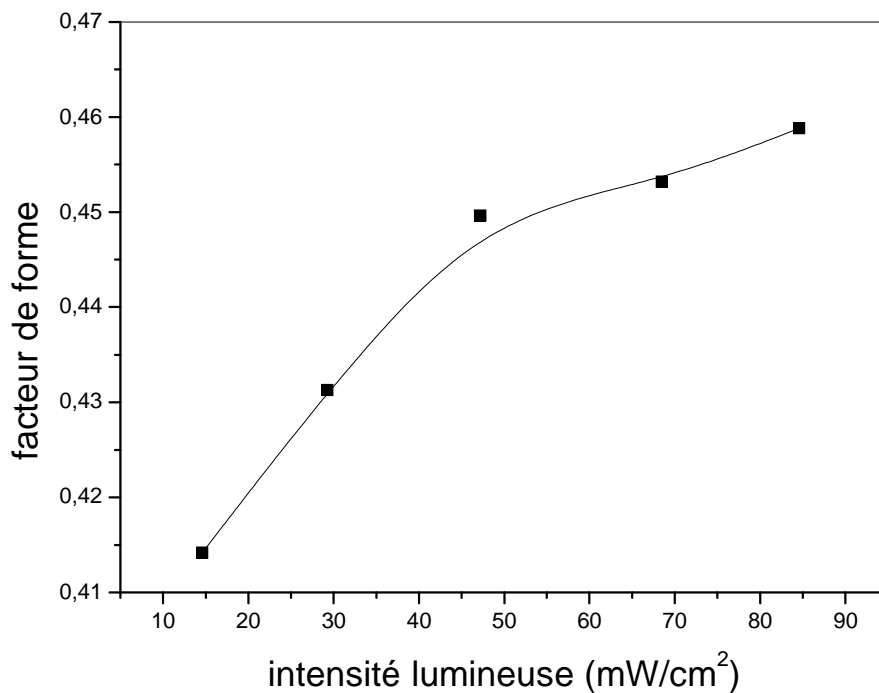


Figure II-15: Effet de l'intensité lumineuse sur le facteur de forme d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-15, représente la variation du facteur de forme en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-15, montrent que le facteur de forme augmente de 0.414 à 0.458 lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm² à 84.6 mW/cm². Ces résultats, montrent que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'éclairement. Ainsi, les faibles valeurs de facteur de forme au faible éclairement est du à des valeurs élevées des résistances série et parallèle qui provoquent des pertes des charges. Donc, ce terme dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

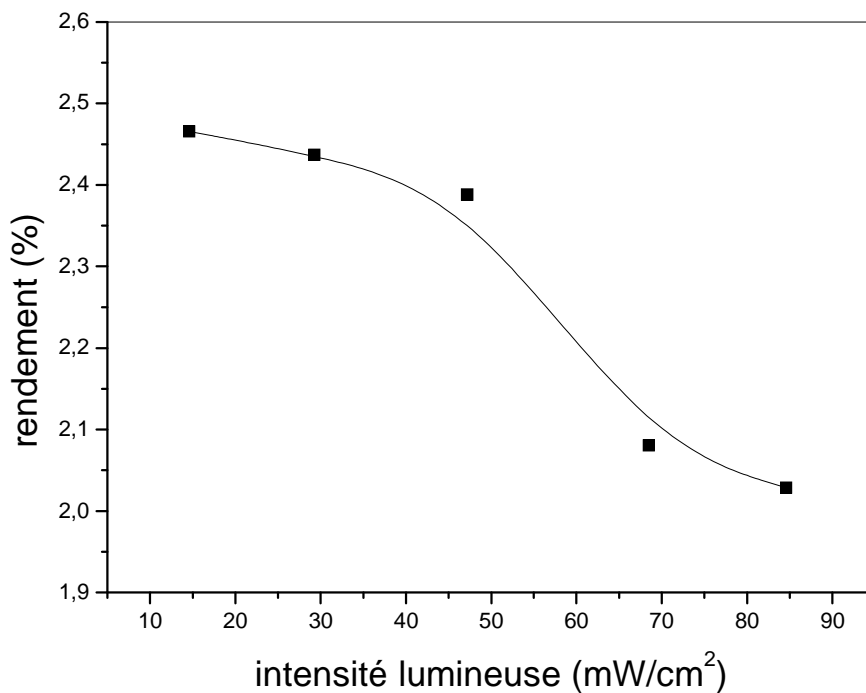


Figure II-16: Effet de l'intensité lumineuse sur le rendement d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al.

La figure II-16, représente la variation du rendement en fonction de l'intensité lumineuse d'une cellule photovoltaïque organique de structure ITO/PEDOT-PSS (30nm)/CuPc (25 nm)/C60 (40 nm)/LiF (0.3 nm)/Al. Sur cette figure, nous remarquons que le rendement de conversion photovoltaïque diminue avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Les différents résultats que nous avons obtenus et représentés sur la figure II-16, montrent que le rendement de conversion photovoltaïque décroît de 2.465 % à 2.028 % lorsque l'intensité lumineuse augmente de 14.6 mW/cm² à 84.6 mW/cm². Ces résultats, montrent que le rendement est inversement proportionnel à l'intensité lumineuse.

Pour obtenir un rendement maximum, en améliorant les trois termes (le facteur de forme, la densité de courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert). En pratique, ce rendement est diminué en fonction de deux facteurs : l'effet des résistances série et parallèle du composant et l'effet de réflexion à la surface de la cellule.

Ainsi que, L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque dans le cas des cellules solaires organiques nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans ce processus en faisant un bon choix pour la structure des dispositifs.

L'objectif du choix de la structure est de contribuer à l'amélioration du rendement de la conversion photovoltaïque en maximisant l'absorption et en augmentant la densité de courant délivrée sous même intensité lumineuse.

Nos résultats, montrent que les paramètres qui se dégradent avec l'augmentation de l'intensité lumineuse sont la résistance shunt et le rendement de conversion. Cette dégradation est principalement attribuée à la photoconductivité et à la recombinaison bimoléculaire dans la couche active. La photoconductivité se traduit par la conduction à l'aide d'une seule espèce de charges dans le matériau. La recombinaison bimoléculaire (un électron d'un exciton se recombine avec un trou appartenant ou non à un autre exciton) résulte de l'effet d'encombrement (charge d'espace) dans la couche active à cause de la faible mobilité des charges. L'augmentation de la R_{sh} dans ce cas est proportionnelle à la diminution de l'intensité lumineuse [1].

Références bibliographiques

[1]: W. HOJEIJ, Réalisations et caractérisations optoélectroniques de cellules photovoltaïques organiques, thèse de doctorat, l'Université de Limoges, France, Electroniques des hautes fréquences et optoélectroniques, 44 (2007).

[2]: R. De Bettignies, Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués, thèse de doctorat, Physique, Ecole doctorale d'Angers, 573 (2003).

CONCLUSION GENERALE

ET

PERSPECTIVES

Conclusion générale

Le présent travail, constitue une caractérisation des cellules photovoltaïques à base des semi-conducteurs organiques. Notre premier objectif était d'acquérir des connaissances de base sur ce nouveau type de semi-conducteurs organiques qui apparait comme une technologie alternative par rapport aux semi-conducteurs inorganiques.

La recherche dans ce domaine vise plusieurs axes : diode, transistors, écrans couleurs flexible enroulables sur une feuille de plastique, biocapteur de gaz, puces plastiques et les cellules photovoltaïques organiques.

Au cours de ce travail et dans le but d'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques organiques, nous avons examiné les caractéristiques et les paramètres de la cellule photovoltaïque à base des polymères conducteurs. Cette étude nous a permis de mettre en évidence les effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) et de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al et sur les paramètres de cette cellule tels que : la densité de photocourant J_{ph} , la densité de courant de court-circuit J_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} , la résistance série R_S et la résistance parallèle R_P , le facteur de forme FF et le rendement de conversion photovoltaïque η .

1. Effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Les différents résultats que nous avons obtenus révèlent que :

L'insertion d'une fine couche de LiF entre la cathode d'aluminium et la couche active (CuPc/C60) permet d'améliorer le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

2. Effets de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Les différents résultats que nous avons obtenus révèlent que :

- La photoconductivité de la diode augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF). En effet, l'insertion de la couche LiF améliore la densité de photocourant généré. Ainsi, nous pouvons conclure, que l'épaisseur de la cellule photovoltaïque est un facteur important pour l'absorption des photons.
- La densité de courant de court-circuit de la diode augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche du Fluorure de Lithium (LiF). Donc, la couche LiF améliore le contact ohmique entre la cathode et la couche active.
- L'insertion d'une fine couche du fluorure de lithium (LiF) entre la cathode d'aluminium et la couche active permet d'améliorer, la tension de circuit ouvert, la résistance parallèle, le facteur de forme et le rendement de conversion de nos cellules. Par contre, diminue la résistance série.

3. Effets de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Les différents résultats que nous avons obtenus révèlent que :

Les deux paramètres de la cellule photovoltaïque, la densité de courant de court-circuit J_{CC} et la tension de circuit ouvert V_{CO} augmentent avec l'augmentation de l'intensité lumineuse.

4. Effets de l'intensité lumineuse sur les paramètres de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

Les différents résultats que nous avons obtenus révèlent que :

L'augmentation de la densité de photocourant, la densité de courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le facteur de forme est dues à l'augmentation de l'intensité lumineuse. Par contre, à l'intensité lumineuse élevée les résistances série et parallèle et le rendement de conversion devient très faibles.

Perspectives

En perspective de ce travail il est nécessaire de poursuivre avec soin cette étude en tenant compte des mécanismes de transport de charges dans ces cellules photovoltaïques organiques ; car certains auteurs ont critiqué l'utilisation du formalisme classique des semi-conducteurs inorganiques pour décrire les matériaux organiques.

Nous espérons dans une future proche, la fabrication de ce type de cellules photovoltaïques dans nos laboratoires Algériens pour confirmer la théorie développée et la simulation effectuée ; car quelque soit la nature des programmes de simulation, ils ne pourront jamais remplacer la réalité qui est bien la réalisation pratique et la vérification du produit réalisé.

Les résultats encourageants que nous avons obtenus dans ce travail, nous suggèrent de consacrer ultérieurement nos activités de recherche à l'étude des problèmes suivants :

- 1) Effet de la température T sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique.

- 2) Effet de la résistance série R_s et la résistance parallèle R_p sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique.

ANNEXE

Propriétés physiques des matériaux utilisés

Annexe

I-Description de la cellule ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al

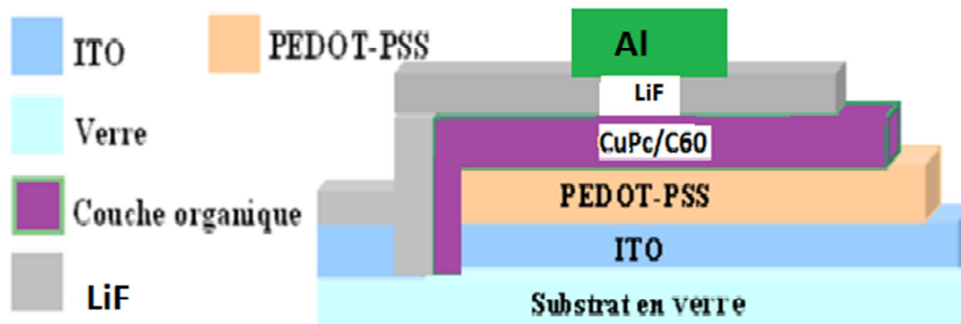


Figure 1 : Schéma de la cellule métallisée

La cellule photovoltaïque organique examinée, dans cette étude est une cellule à base d'un matériau actif le (phthalocyanine de cuivre/buckminster fullerène [60]) CuPc/C60 serré entre une couche de poly (3,4-éthylènedioxythiophène)-poly (styrenesulfonate) PEDOT-PSS qui est posé sur un électrode en Indium Tin Oxyde (ITO) transparente et une couche de Fluorure de Lithium (LiF) et un contact arrière en aluminium (Al).

Le dépôt des différentes couches pour obtenir une cellule solaire est comme suit :

I.1- L'anode en Indium Tin Oxyde (ITO)

L'ITO est souvent utilisé comme électrode semi-transparente car, d'une part il présente une transmittance de plus de 85% dans le visible et d'autre part il présente un contact ohmique avec certains matériaux transporteurs de trous (MPc, PTCDA...) [1]. Donc pour réaliser des cellules photovoltaïques organiques en utilisant des substrats en verre d'épaisseur 1,1 mm recouverts soit par ITO commercial soit par ITO réalisé par la technique de pulvérisation par faisceau d'ions IBS.

L'ITO commercialisée par Merck Display Technology. Il se présente sous forme d'une couche mince transparente de 100 nm d'épaisseur, avec une résistance inférieure à 20Ω/carré, une transmittance de 75 à 90 % sur une plage de longueur d'onde de 380-740 nm et une surface de 144 mm².

Par contre L'ITO réalisé par la technique de pulvérisation par faisceau d'ions IBS (Ion Beam Sputtering) d'une épaisseur de 100nm sur du polyéthylène téréphtalate (PET) sont par exemple déposés à température ambiante avec une transmission de 95% et une résistance carrée de l'ordre de $150\Omega/\text{carré}$ (soit une résistivité de $1,5 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm}$) [2].

I.2- Cathode en Aluminium (Al)

En effet, le film d'aluminium n'est pas très adhérent sur le verre, il est sensible à la moindre rayure lors de la prise de contact par pointe. C'est la raison pour laquelle le contact de l'aluminium est pris par l'intermédiaire de l'ITO qui offre une meilleure adhérence sur le substrat [3].

I.3- Dépôt de poly (3,4-éthylènedioxythiophène)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT-PSS)

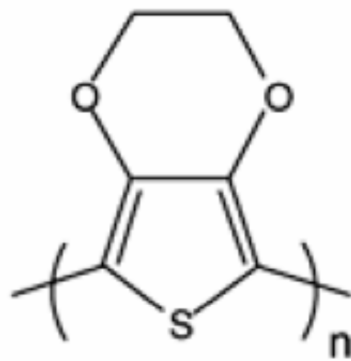


Figure 2 : poly (3,4-éthylènedioxythiophène)

PEDOT

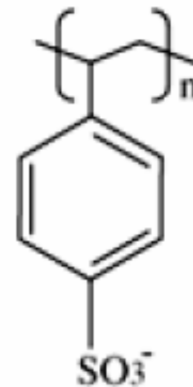


Figure 3 : poly (styrenesulfonate)

PSS

Le PEDOT-PSS est un polymère conducteur. Il est utilisé comme couche d'injection de trous à travers l'interface couche organique/ITO [4]. Sa fonction est d'aplanir la surface de l'ITO, dont la surface rugueuse est susceptible de générer des court-circuits à travers les films minces organiques. D'autre part il sert de couche tampon pour éviter la diffusion de l'oxygène et de l'indium vers la couche organique active, ces impuretés peuvent agir comme centres de recombinaison des excitons ou

comme pièges des porteurs photogénérées [5]. Le dépôt de PEDOT-PSS s'effectue à la tournette. Cette méthode de dépôt peut être décomposée en quatre étapes :

- *Première étape* : elle consiste à filtrer le PEDOT-PSS par seringue et embout de filtration à usage unique. La solution filtrée est mise dans une petite fiole que l'on garde à l'abri de la lumière.
- *Deuxième étape* : elle consiste à déposer à l'aide d'une pipette une large goutte de PEDOT-PSS sur un substrat bien nettoyé. Pendant cette étape, le PEDOT-PSS doit couvrir presque entièrement la surface pour ne pas avoir une surface partiellement couverte. Il faut aussi éviter les bulles d'air et déposer rapidement le PEDOT-PSS.
- *Troisième étape* : elle consiste en la mise en rotation du substrat, couvert de PEDOT-PSS, suivant une accélération x , une vitesse y et un temps z . Cette étape permet au PEDOT-PSS de se répartir uniformément sur toute la surface du substrat. Les épaisseurs de PEDOT-PSS sont choisies à l'aide du réglage des paramètres x , y et z . L'épaisseur de la couche de PEDOT-PSS dépend de ces trois paramètres. Dans le cas du PEDOT-PSS Baytron PH (fourni par HC Starck ces paramètres sont prédéfinis pour obtenir une épaisseur donnée. Pour obtenir des différentes épaisseurs ils ont fixé la valeur de la vitesse à 50 tours/min et la valeur du temps à 50 sec et ils ont varié la valeur de l'accélération.
- *Quatrième étape* : elle permet l'évaporation du solvant. Les échantillons recouverts de PEDOT-PSS sont recuits dans un four à 80°C, dans un tube de verre sous vide primaire, durant une heure pour enlever toute trace de solvant d'enduction dans le film de PEDOT-PSS [2].

I.4- La couche active phthalocyanine de cuivre/buckminster fullerène [60] (CuPc/C60)

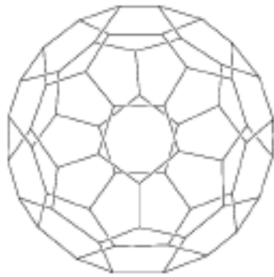


Figure 4 : une couche accepteuse
Buckminster fullerène [60] (C60) [6].

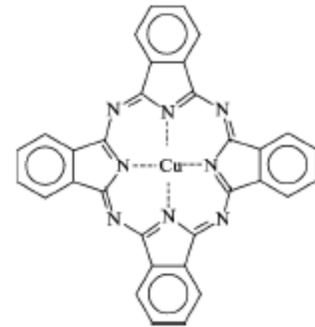


Figure 5 : une couche donneuse
Phthalocyanine de Cuivre (CuPc) [6].

Ce couple donneur-accepteur convient bien à la réalisation de cellules solaires puisque les spectres d'absorption des deux matériaux sont situés dans le domaine visible où le spectre solaire est le plus intense. D'autre part ces spectres d'absorption sont complémentaires, ce qui représente un cas très favorable pour une absorption du rayonnement solaire sur une large gamme de spectre.

L'étude des spectres d'IPCE (Incident photon-to-current efficiency) nombre de charges collectées par photons incidents d'une longueur d'onde donnée sera rendue plus aisée, puisque l'on pourra déduire la contribution au courant de court-circuit de la cellule pour chacun des matériaux absorbants. Ces spectres d'absorption sont représentés sur la figure 6, avec le spectre solaire en standard AM1.5 qui débute significativement à partir de 300 nm [2].

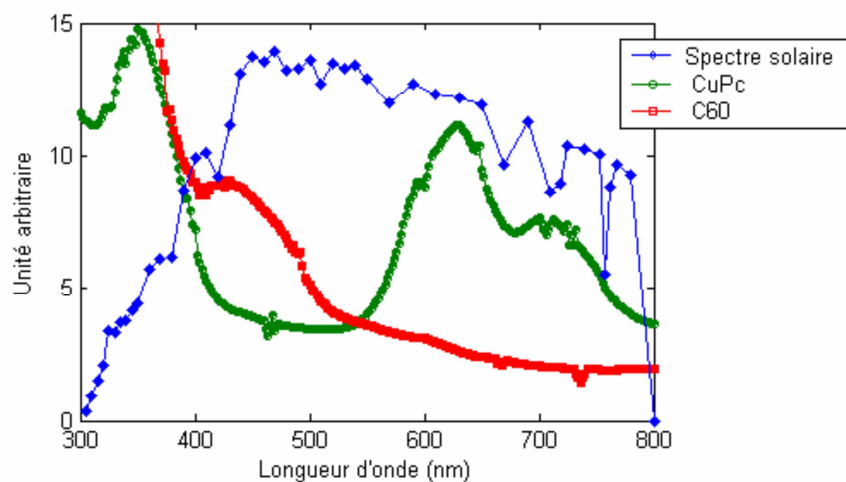


Figure 6 : Spectre d'absorption du CuPc et du C60 et le spectre solaire pour comparaison [2].

I.5- Insertion d'une couche de fluorure de lithium (LiF)

L'insertion d'une fine couche de fluorure de lithium (LiF) entre la couche active et l'anode en aluminium améliore les performances des cellules solaires [3].

Plusieurs processus tentent d'expliquer l'origine de cette amélioration par [7]:

- une diminution du travail de sortie de l'aluminium,
- Une dissociation du LiF induisant dopage de type N de la couche active au niveau de l'interface,
- La formation d'une couche de dipôles orientés provoquant un abaissement de la barrière de potentiel à l'interface de la couche active / Al,
- Une protection de la couche organique contre les atomes d'aluminium pendant l'évaporation.

La figure 7, montre le diagramme des niveaux d'énergie d'une cellule bicouche utilisant le couple donneur-accepteur CuPc-C60. Les valeurs des niveaux HOMO et LUMO de la CuPc et du C60, du potentiel d'ionisation du PEDOT-PSS et des travaux de sortie des électrodes sont obtenues à partir de données bibliographiques [8].

La valeur du travail de sortie de l'ITO obtenu dans laboratoire de l'institut de recherche Micro et Nanotechnologies pour Composants Optoélectroniques et Microondes XLIM-MINACOM de l'université de Limoges par la technique IBS a été mesuré expérimentalement à l'aide d'une sonde de Kelvin au LGET (Université de Toulouse). Elle peut varier de 4,7 eV à 4,9 eV selon le type de nettoyage effectué après le dépôt [9].

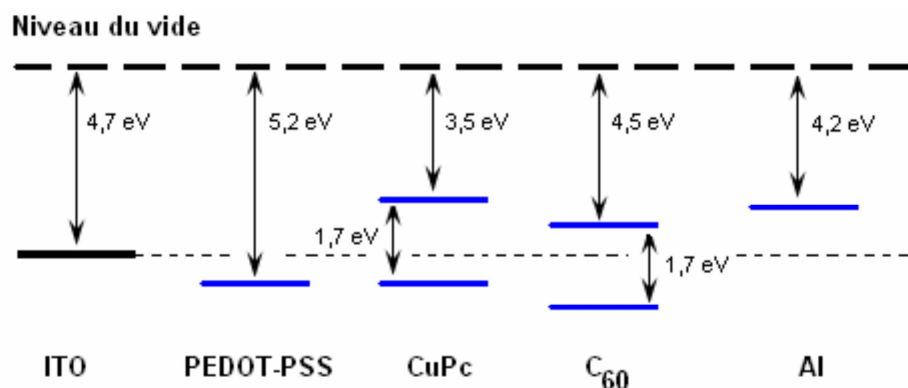


Figure 7 : Régime de bande plate de la structure ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/Al.

A partir de ce schéma nous pouvons constater que lors du fonctionnement sous illumination de la cellule les trous ne voient pas de barrière de potentiel en franchissant la couche de PEDOT pour être collectés à l'anode d'ITO. Nous pouvons aussi nous apercevoir de la faible barrière énergétique de 0,3eV (par rapport à ces niveaux d'énergie) qu'ont à franchir les électrons pour passer du C60 à la cathode d'Aluminium, ce qui pénalise la collecte des charges, et renforce la recombinaison des excitons à l'interface cathode- C60 [8].

Références bibliographiques

- [1] : A. Douha, Etude de l'effet de la température sur les paramètres d'une cellule solaire organique. Université de Béchar-Ingénieur d'état en science de Matériaux, (2008).
- [2] : W. Hojeij, Réalisations et caractérisations optoélectroniques de cellules photovoltaïques organiques, thèse de doctorat, l'Université de Limoges, Electroniques des hautes fréquences et optoélectroniques, (2007).
- [3] : M. T. Dang, Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, Etude des systèmes Réticulables, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 3892 (2009).
- [4] : T. M. Brown, J. S. Kim, R. H. Friend, F. Cacialli, R. Daik and W. J. Feast, Appl. Phys. Lett., 75, 1679 (1999).
- [5] : P. Peumans, V. Bulovic, S. P. Forrest, Appl. Phys. Lett. 76, 2650 (2000).
- [6] : http://www.columbianchemicals.com/Portals/0/Products/Literature/french/Plastic_fr.pdf.
- [7] : Christoph J. Brabec, Sean E. Shaheen, Christoph Winder, and N. Serdar Saricifri Applied Physics Letters, 80, 7 (2002).
- [8] : P. Peumans, S. R. Forest, Very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine/C₆₀ photovoltaic cells, Applied Physics Letters, 79, 1 (2001).
- [9] : B. Lucas, W. Rammal, A. El Amrani, A. Moliton, I. Ségury, Proc. SPIE 6192, 61921 M (2006).

RESUME

Ce travail de recherche est porté sur la caractérisation des cellules photovoltaïques organiques. Le développement de ces cellules constitue un grand enjeu de la filière électronique organique. Ces cellules sont aussi prometteuses pour la production d'énergie à bas coût. Elles peuvent être fabriquées sur substrat souple, ce qui leur permettra une intégration facile dans les appareils nomades comme les téléphones portables et les ordinateurs portables. Dans ce cadre et dans le but d'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques organiques, nous nous proposons d'étudier les caractéristiques et les paramètres de la cellule photovoltaïque à base des polymères conducteurs de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al.

Ce mémoire s'articule autour d'une introduction, deux chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre, est une présentation des concepts scientifiques essentiels que nous avons utilisés dans notre travail. Nous y rappelons les notions sur les matériaux organiques, le photovoltaïque, les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïque classique et organique, les différents types de cellules photovoltaïques organiques, les circuits pour modéliser les cellules photovoltaïques, ainsi que les principaux paramètres qui peuvent être extraits pour n'importe quelles cellules photovoltaïques organiques.

Le deuxième chapitre, constitue notre contribution personnelle. Dans ce chapitre, nous examinons l'effet d'épaisseur de la couche de Fluorure de Lithium (LiF) sur la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque organique de type ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al sous fort éclairage et sur les paramètres de cette cellule. Nous examinons, ensuite l'effet de l'intensité lumineuse sur la caractéristique courant-tension et sur les paramètres de la même cellule organique.

Mots clés : matériaux organiques, cellules photovoltaïques organiques, effet de l'épaisseur et l'effet de l'intensité lumineuse.

ABSTRACT

This research is focused on the characterization of organic photovoltaic cells. The development of these cells is a major challenge for organic electronics industry. They are also promising for energy production at low cost. They can be fabricated on flexible substrate, allowing them easy integration into mobile devices such as mobile phones and laptops. In this context and in order to improve the performance of organic photovoltaic cells, we propose to study the characteristics and parameters of the photovoltaic cell based on conductive polymers of ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al type. This thesis focuses on an introduction, two chapters and a general conclusion.

The first chapter is an overview of key scientific concepts that we used in our work. We recall the notions of organic materials, photovoltaics, principles of conventional photovoltaic and organic cells operation, the different types of organic solar cells, circuits to model solar cells, and the main parameters that can be extracted for any organic photovoltaic cells.

The second chapter is our contribution. In this chapter, we examine the effect of thickness of the layer of lithium fluoride (LiF) on the current-voltage organic photovoltaic cell of ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al type under high irradiance and on the parameters of that cell. We examine, then the effect of light intensity on the current-voltage characteristic and parameters of the organic cell.

Keywords: organic materials, organic photovoltaic cells, effect of the thickness and the luminous intensity.

ملخص

إن هذا العمل يخص دراسة و نمونجية الخلايا الكهروضوئية من الجيل الرابع، أو الخلايا الشمسية العضوية، و التي تشارك في تطوير الطاقات المتجددة، و القدرة على تغذية الأجهزة المحمولة (الهاتف النقال، اجهزة الحاسوب...).
في الفصل الأول التعرف على مختلف أنواع الخلايا الضوئية المتفق عليها، طبيعة أشباه النواقل العضوية، البات النقل الالكتروني و كذلك مختلف فروع الخلايا الضوئية العضوية ، كما قمنا في الأخير بانجاز مقارنة بين الخلايا الضوئية العضوية و الغير عضوية
الفصل الثاني فتخص دراسة خلايا كهر وضوئية من نوع ITO/PEDOT-PSS/CuPc/C60/LiF/Al ،
كما قمنا باستخراج مختلف العوامل الفوتوضوئية الميزة كثافة التيار -توتر كهربائية المعطاة تجريبيا.
و دراسة تأثير نسبة الدعم الكهربائي و سمك المادة المستعملة LiF ، و تأثير طاقة الشمسية على الخلية الضوئية
مفاتيح: المواد العضوية، الخلايا الضوئية، كثافة التيار -توتر كهربائية، سمك المادة المستعملة، تأثير طاقة الشمسية على الخلية الضوئية.