



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI – TÉBESSA  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
DÉPARTEMENT : Science de la matière

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Option : Physique de matière condensée

## Thème

**Modélisation et simulation des cellules photovoltaïques  
organiques transparentes**

***BENMENIA LEILA & BELMERABET AYA***

Soutenue le: 21/06/2022

Devant les jurys:

|             |                   |     |                                    |
|-------------|-------------------|-----|------------------------------------|
| Président:  | Chaouche Yassine  | MCA | Université Larbi Tebessi - Tébessa |
| Rapporteur: | Saouane Izzeddine | MCB | Université Larbi Tebessi - Tébessa |
| Examineur:  | Bougroua Hamza    | MCA | Université Larbi Tebessi - Tébessa |

2021/2022

# Remerciement

*Avant tout nous remercions dieu qui nous a donné la force et la patience de terminer ce travail.*

*Nous tenons grand merci à notre encadreur **Dr Saouane Izzeddine** pour les efforts faits durant l'année universitaire, et pour leurs conseils précieux.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté l'évaluation de ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques : **Dr chaouache Yassine** pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant présider le jury de cette soutenance et ou **Dr Bougroua Hamza** pour avoir acceptée d'examiner ce travail.*

*Nous remercions tous les enseignants de département de Science matière.*

*Enfin nous tenons à remercier tous ceux ou celles qui ont eu l'honneur, de près ou de loin, à nous aider à présenter ce travail.*

*Leila L. Aya*

# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*A mon père **SACI** :*

*Reçois ce travail comme remerciement pour tous les efforts et sacrifices que tu as eu à faire. Tu as su nous montrer le bon exemple à travers ta sérénité, ta grande patience et sans oublier ton effort inlassable pour la réussite de tes enfants. Trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance, de mon amour et de mon profond respect.*

*A ma mère **NADJAH** :*

*Si je t'appelle affectueusement " mon bijou " c'est parce que tu l'es pour moi. Merci maman pour ton amour, ta rigueur et la sévérité avec laquelle tu nous as éduqués. Je reste fasciné par ta forte personnalité et ton savoir-faire.*

*A mes frères **MOHAMMED** et **ADAM** :*

*Votre soutien et vos prières ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui Recevez ici mes sincères remerciements.*

*A mes sœur **HANNA** et **RANDA** :*

*Malgré la distance vous m'avez soutenue moralement pendant les moments les plus difficiles de ma formation*

*Sans oublier les anges **M<sup>ED</sup>OKBA** et **GHAITH**.*

*A ma très chère tante **SAMIA** :*

*Merci pour votre soutien et encouragement reçois ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*A Toute Ma Famille :*

*Puisse ce travail être le témoignage de ma profonde affection, mon estime et mon attachement.*

*A mes amis :*

*En souvenir des nombreuses heures studieuses et de nos moments de détente passés ensemble. Je vous souhaite une brillante carrière et une réussite sociale.*

*Ma cher binôme **Leila** d'avoir eu le courage d'achever ce travail..*

*Aya*

# Dédicace

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que Je dédie ce travail :*

*Spécialement à mes chers parents : (Abdellatif et Saliha)*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

*A MON CHER MARI Oussama: Merci pour ton amour, ton soutien et tes encouragements qui ont toujours été pour moi d'un grand réconfort. Merci pour ta gentillesse et ton sens du sacrifice. Je t'aime tout simplement.*

*A mes adorables sœurs : (Nour el houda; Oumaima; Hamida) Sans qui, la vie n'aurait aucun charme, vous me remplissez de joie et de bonheur.*

*A mon frère Mouhamed el habib Je ne peux exprimer à travers ces lignes tous mes sentiments d'amour et de tendresse envers mon cher frère.*

*À mon cher petit neveu : (Mohamed yazen) que dieu te protège.*

*À mes tantes : Madjda ; Razika ; Khadidja ; Roumaissa ; Imane*

*Fatma ; Kouka*

*A Ma Binôme, ma belle « AYA ».*

*À MES AMIS DE TOUJOURS : Aya ; Sara ; Dalal ; Safa ; Achouak*

*A toutes les personnes qui m'ont encouragé à terminer ce modeste travail.*

*Leila*

# TABLE DES MATIERES

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Symboles

Introduction générale..... 1

## *Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques organiques*

|   |    |
|---|----|
| I.1 Les cellules Photovoltaïques organiques .....   | 4  |
| I.1.1.Le semi-conducteur organique .....  | 4  |
| I.1.2. Fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques.....                        | 5  |
| I.1.2.1.Absorption des photons dans les matériaux et création des excitons.....           | 6  |
| I.1.2.2.Diffusion des excitons vers l'interface enter les deux matériaux organiques ..... | 7  |
| I.1.2.3.Dissociation des excitons .....   | 7  |
| I.1.2.4.Transport des charges jusqu'aux électrodes.....                                   | 8  |
| I.2.Structure des cellules photovoltaïques organiques .....                               | 8  |
| I.2.1.Structure Schottky.....   | 9  |
| I.2.2.Structure hétérojonction.....   | 10 |
| I.2.2.1. Système bicouche.....  | 10 |
| I.2.2.2.Système à réseau interpénétré de deux matériaux .....                             | 11 |
| I.3. Cellules photovoltaïques organiques transparentes .....                              | 12 |
| I.3.1. Les principales technologies de cellules solaires transparentes.....               | 13 |
| I.3.1.1. La cellule WYSIPS .....  | 13 |
| I.3.1.2. Un nouveau prototype entièrement transparent (Université de Michigan).....       | 14 |
| I.4. Référence bibliographiques .....   | 15 |

## **Chapitre II: Modélisation d'une cellule photovoltaïque organique**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Modèles mathématique .....                                      | 17 |
| II.1.1. Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque .....               | 17 |
| II.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque .....                  | 18 |
| II.3. Paramètres des cellules photovoltaïques .....                   | 20 |
| II.3.1. Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) .....                   | 20 |
| II.3.2. Tension à circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) .....                   | 21 |
| II.3.3. Puissance maximale .....                                      | 21 |
| II.3.4. Facteur de qualité .....                                      | 22 |
| II.3.5. Facteur de forme .....  | 22 |
| II.3.6. Rendement d'une cellule solaire.....                          | 22 |
| II.4. Méthodes d'extraction des paramètres de cellules solaires ..... | 22 |
| II.4.1 Méthode d'optimisation verticale (MOV) .....                   | 24 |
| II.4.2.Méthodes d'optimisation latérale (MOL) .....                   | 25 |
| II.5.Références Bibliographiques .....                                | 27 |

## **Chapitre III: Résultats et discussions**

|  |    |
|--|----|
| III.1. Les matériaux utilisés.....   | 29 |
| III.2. Structure étudiée.....  | 30 |
| III.3. Résultats de la simulation.....   | 30 |
| III.3.1. Caractéristique courant- tension.....   | 30 |
| III.3.2. Influence de l'épaisseur du la couche active.....   | 31 |
| III.3.3. Effet de la température sur la caractéristique courant- tension de la cellule organique ..... | 32 |
| III.3.4. Influence simultanée du rayonnement et de température .....                                   | 36 |
| III.3.5. L'influence de la résistance série.....   | 36 |

|   |    |
|---|----|
| III.3.6. L'influence de la résistance Shunt ..... | 37 |
| III.4. Références bibliographiques .....          | 38 |
| Conclusion générale .....                         | 40 |

**Liste des Figures**

**Chapitre I :**

|  |    |
|--|----|
| Fig.I.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque D/A.....        | 6  |
| Fig.I.2. Diagramme énergétique à la jonction D/A.....                            | 7  |
| Fig.I.3. Structure générale d'une cellule photovoltaïque organique .....         | 8  |
| Fig.I.4. Schéma d'une cellule Schottky.....                                      | 9  |
| Fig.I.5. Schéma d'une cellule bicouche.....                                      | 10 |
| Fig.I.6. Structure d'un réseau (Donneur d'électrons /Accepteur d'électrons)..... | 11 |
| Fig.I.7. Structure d'un réseau (Donneur d'électrons /Accepteur d'électrons)..... | 11 |
| Fig I.8. Spectre d'émission du soleil.....                                       | 12 |

**Chapitre II :**

|  |    |
|--|----|
| Fig.II.1. Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.....    | 17 |
| Fig.II.2. La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque ..... | 18 |
| Fig. II.3. Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....    | 19 |

**Chapitre III :**

|  |    |
|--|----|
| Fig III.1. Structure moléculaire des matériaux utilisés .....                              | 29 |
| Fig III.2. Structure du composant ITO/T6O2/Bp3I5/BCP/ITO.....                              | 30 |
| Fig. III.3. Caractéristiques courant- tension.....   | 31 |
| Fig III.4. Effet de la température sur la caractéristique courant- tension.....            | 32 |
| Fig III.5. Effet de la température sur la puissance. ....                                  | 33 |
| Fig. III.6. Variation de $V_{oc}$ et $V_{max}$ en fonction de la température.. ..          | 33 |
| Fig III.7. Variation de $I_{cc}$ et $I_{max}$ en fonction de la température.....           | 34 |
| Fig III.8. Variation de $P_{max}$ en fonction de la température. ....                      | 35 |
| Fig. III.9. Variation de $FF$ en fonction de la température.. ..                           | 35 |
| Fig III.10. Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur I-V et P-V..... | 36 |



*Fig III.11. Influence de la résistance shunt sur I-V et P-V. ....37*

***Liste des tableaux***

***Chapitre I :***

*Tableau I.1. la similarité entre les semi-conducteurs organiques et inorganiques ..... 4*

***Chapitre III :***

*Tableau III.1. Effet de l'épaisseur de la couche active sur les paramètres de la cellule .. 31*

*Listes des symboles*

| Paramètres       | Signification   |
|------------------|---|
| V                | La tension de sortie [volts].                                 |
| I                | Le courant [ampères].   |
| q                | La constante de charge d'électron $1.602 \cdot 10^{-19}$ [C]. |
| K                | La constante de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23}$ [J/K].       |
| $I_{CC}$         | Courant de court-circuit du panneau solaire [ampères].        |
| $V_{co}$         | La tension en circuit ouvert [volts].                         |
| $\eta$           | Le rendement du panneau.                                      |
| FF               | Facteur de forme.   |
| $I_g$            | courant de sortie du générateur photovoltaïque [ampères].     |
| $I_0$            | courant de saturation [ampères].                              |
| $V_{th}$         | tension thermique [volts].                                    |
| $I_{ph}$         | courant photonique de la cellule.                             |
| $I_c$            | Courant électrique [ampères].                                 |
| $R_s$            | Résistance série [ohm].                                       |
| $R_{sh}$         | résistance shunt.   |
| $\zeta_r$        | constant diélectrique relatif pour tous les semi-conducteurs. |
| $\alpha$         | Coefficient d'absorption.                                     |
| m                | masse effective du porteur de charge (électron ou trou).      |
| $I_{obsc}$       | densité de courant direct.                                    |
| $P_c$            | puissance de crête.   |
| $\eta_M$         | rendement de conversion d'énergie.                            |
| $P_0$            | puissance du rayonnement.                                     |
| $T_c$            | Température de jonction.                                      |
| $T_{amb}$        | Température ambient de cellules, [degré Kelvin].              |
| NOCT             | température nominale de fonctionnement de la cellule.         |
| $J_s$            | courant de saturation indépendant de la tension appliquée.    |
| $I_{01}, I_{02}$ | courants inverses de saturation.                              |
| $A_1, A_2$       | facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2.                 |
| NCS              | Nombre des cellules en série.                                 |

## *Introduction générale*

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, une grande partie de la production d'énergie mondiale est assurée à partir de source fossile [1].

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources [2].

Mais aussi à la production d'énergie grâce à d'autres moyens souvent qualifiés de « propres » en référence au fait qu'il ne génère pas de dioxyde de carbone. Ces moyens de production sont principalement issus des énergies renouvelables, c'est-à-dire dont les ressources sont inépuisables par nature. Parmi celles-ci, on peut citer l'énergie éolienne (issue du vent), marémotrice (issue du ressac, des vagues et des mouvements des marées) ou encore l'énergie « solaire ». Ce dernier terme recouvre en réalité de nombreuses technologies, parmi lesquelles l'énergie photovoltaïque. Il s'agit ici de transformer directement la lumière du soleil en électricité, sans intermédiaire, directement grâce à un matériau semi-conducteur.

Actuellement de nouvelles applications, demandent des sources d'énergie moins chères, capables d'être flexibles et/ou transparentes. Ce travail s'inscrit dans le cadre de ces dernières applications, plus concrètement dans l'utilisation de cellules photovoltaïques organiques pour alimenter des systèmes insérés dans des verres. Pour cela nous avons besoin de composants transparents dans le domaine du spectre visible, capables de fournir une tension de fonctionnement d'environ 1 volt.

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

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à la présentation générale des cellules photovoltaïques organiques. Une revue des différentes structures de ce type de composants est exposée.
- Dans le deuxième chapitre nous nous abordons une présentation des modèles physiques utilisés dans la simulation numérique, nous présentons les équations fondamentales dans les cellules photovoltaïques organiques avec les méthodes d'extractions des paramètres de ces cellules.
- Dans le troisième chapitre, Nous décrivons la structure de la cellule solaire organique transparente à simuler et nous ferons une étude de simulation effectuée sous MATLAB, les résultats de simulations numérique de la structure à hétérojonction planaire D/A sont présentés pour les différents paramètres influant sur les performances de ces cellules.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

### ✓ ***Références Bibliographie de l'introduction générale***

- [1] *F. Brihmat* , «L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien», *Mémoire de magister, université Mouloud mammeri ,Tizi-ouzou,(2012).*
- [2] *L.Saher* ,«Réserves pétrolières-le pessimisme de l'AID», *EL Watan (2009).*

# Chapitre 1

Généralités sur les cellules  
photovoltaïques organiques

Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques. Nous montrerons ce qu'est un semi-conducteur organique en insistant sur les propriétés qui sont importantes dans le processus de conversion photovoltaïque. A la fin de ce premier chapitre les différentes configurations des cellules solaires organiques seront décrites.

## I.1. Les cellules photovoltaïque organiques

Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles, de l'ordre de  $10^{-5}$  %. Dès 1978, les valeurs de rendement exigeraient dépasser les 1%. Pendant les années qui suivirent, cette valeur a parfois été reproduite avec des matériaux différents. Ce n'est que depuis le début du XXI<sup>ème</sup> siècle que le rendement a recommencé à croître, atteignant 2,5 %. Les cellules photovoltaïques organiques ont connu le meilleur taux de croissance parmi les différentes filières photovoltaïque durant les 15 dernières années [1].

### I.1.1. Le 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. On dit organique par opposition aux semi-conducteurs inorganiques, tels le silicium [2].

Les semi-conducteurs organiques possèdent des caractéristiques similaires aux semi-conducteurs inorganiques. Le tableau I.1 présente leurs correspondances:

| <i>Semi-conducteur inorganique</i> | <i>Semi-conducteur organique</i> |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Bande de valence                   | HOMO                             |
| Bande de conduction                | LUMO                             |
| Bande interdite                    | Bande interdite                  |

**Tableau I.1.** la similarité entre les semi-conducteurs organiques et inorganiques[2].

Avec:

*HOMO*: l'orbite moléculaire occupée d'énergie la plus élevée.

*LUMO*: l'orbite moléculaire non occupée d'énergie la moins élevée.

Les semi-conducteurs organiques peuvent dopés, c'est-à-dire qu'on peut y produire des électrons en excès (dopage N) ou des trous (dopage P).

Dans les semi-conducteurs organiques on parle de matériau de type donneur ou type p, si celui-ci possède une valeur d'affinité électronique importante (typiquement 4 eV) et on parle de matériau de type accepteur ou type n, si la valeur de son potentiel d'ionisation est faible (typiquement 5 eV). On considère qu'un accepteur conduit mieux les électrons que les trous et inversement dans le cas d'un donneur d'électrons. Le classement de matériaux organiques comme donneur et accepteur d'électrons, dépend aussi de la position relative des niveaux HOMO et LUMO de ces deux types de matériaux. Par exemple, dans la couche active (donneur + accepteur) d'une cellule photovoltaïque organique la HOMO et la LUMO de l'accepteur sont plus grande que celles du donneur d'électrons en valeur absolues [2].

Les semi-conducteurs organiques sont utilisés dans le domaine de l'optoélectronique pour le développement de :

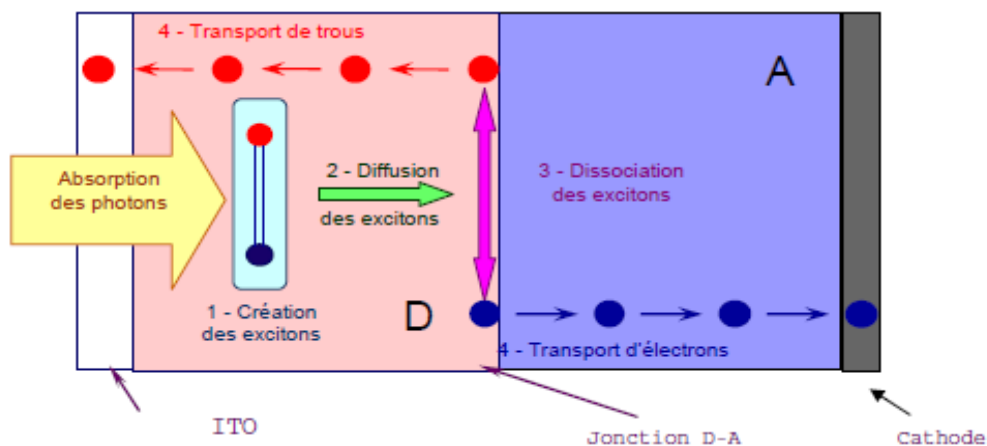
- Diodes électroluminescentes organiques OLED avec lesquelles on peut fabriquer des dispositifs d'affichage.
- Panneaux solaires.
- Transistors à effet de champ.
- Fenêtres intelligentes qui s'obscurcissent lorsqu'il y a trop de soleil.

### **I.1.2. Fonctionnement des cellules photovoltaïque organiques**

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans une couche active qui est composé généralement des matériaux semi-conducteurs de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [3].

Entre l'étape initiale où la lumière pénètre dans une cellule photovoltaïque organique et l'étape finale où les charges sont collectées sur les électrodes, plusieurs processus physiques agissent successivement et qui déterminent l'efficacité de la photo conversion [4]. Ces différentes étapes sont illustrées par la figure I.1.





*Fig.I.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque D/A [3].*

### I.1.2.1. Absorption des photons dans les matériaux et création des excitons

D'après la loi de Beer-Lambert l'absorbance à une longueur d'onde donnée est proportionnelle au coefficient d'absorption du matériau multiplié par l'épaisseur du film. La bande interdite des semi-conducteurs est aussi un paramètre important à contrôler puisque un petit gap de 1.1 eV permet d'absorber 77% de radiations solaires. Or, la plupart des matériaux organiques possèdent des gaps supérieurs à 2eV, limitant alors l'absorption efficace des photons à 30%. Par contre, grâce à leur coefficient d'absorption généralement élevé, des épaisseurs de films de l'ordre de 100 nm sont suffisantes pour absorber près de 60% de la lumière [5].

L'absorption de photons dans un solide se traduit par l'apport d'énergie aux électrons du niveau HOMO. La transition vers le niveau LUMO entraîne l'apparition d'un trou qui reste lié à l'électron par interaction électrostatique. Le couple électron-trou, électriquement neutre, est alors appelée exciton. Lorsque les deux charges sont localisées sur la même molécule ou sur la même unité monomère, il est appelé exciton de Frenkel ; au contraire si la distance entre l'électron et le trou correspond à plusieurs unités monomères, c'est un exciton de type Wannier [6].

Dans les matériaux inorganiques comme le silicium, la valeur de l'énergie de liaison est très faible et l'énergie associée à l'agitation thermique est suffisante, à température ambiante, pour séparer les deux charges liées. Dans les matériaux organiques l'énergie de liaison est comprise entre 0,4 et 1,4 eV [7], et l'agitation thermique ne suffit pas à dissocier les excitons.

### I.1.2.2. Diffusion des excitons vers l'interface entre les deux matériaux organiques

Les excitons ont une durée de vie très courte, de l'ordre de la nanoseconde. Si rien ne se produit pendant ce temps, l'électron et le trou se recombinent et l'énergie de l'exciton se transforme en un nouveau photon ou en chaleur. Il faut donc dissocier les charges liées avant leur recombinaison. Les excitons ne sont pas localisés sur une molécule. Pendant leur durée de vie, ils peuvent diffuser à travers le solide en transportant de l'énergie d'excitation sur une distance  $L_D$  plus ou moins grande selon le matériau considéré. Si la valeur de  $L_D$  peut atteindre 4  $\mu\text{m}$  dans certains matériaux inorganiques, elle est beaucoup plus courte dans les organiques avec une valeur de 5,5 nm pour les poly thiophènes par exemple [8].

### I.2.2.3. Dissociation des excitons

Les excitons sont ensuite dissociés à l'interface D/A en charges positives et négatives. Celles-ci sont localisées dans des matériaux différents et séparées spatialement par l'interface. La figure I.2 montre ce processus dans le cas où les excitons sont générés dans le donneur. On peut constater qu'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 [9].

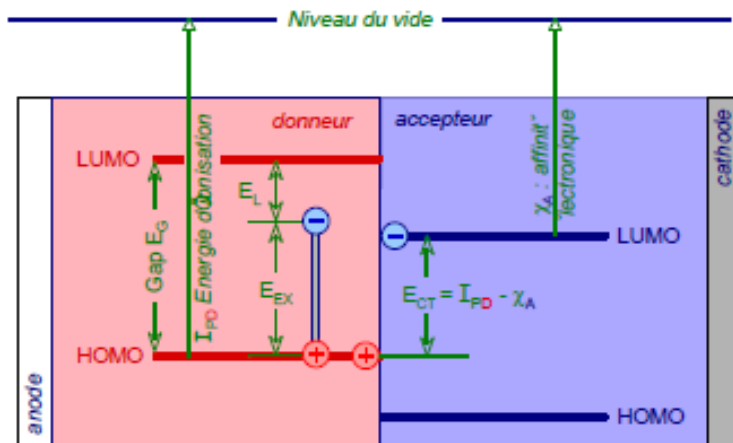


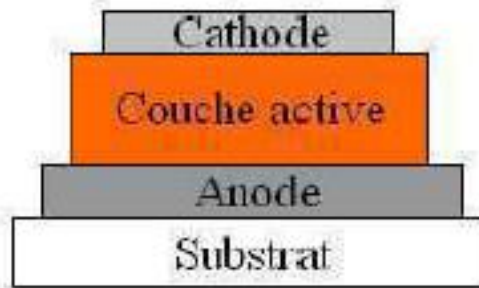
Fig.I.2. Diagramme énergétique à la jonction D/A [3]

#### I.1.2.4. Transport des charges jusqu'aux électrodes

La dernière étape de la conversion photovoltaïque consiste à ramener les charges électriques vers les électrodes. Les porteurs de charge créés doivent rejoindre les électrodes dont l'une est transparente (généralement en ITO) et l'autre peut être réfléchissante (aluminium, argent, or). Le transport de charge vers les électrodes est contrôlé généralement par un mécanisme de saut entre sites [3].

### I.2. Structure des cellules photovoltaïques organiques

La cellule photovoltaïque de base est constituée d'une ou plusieurs couches actives entourées par des électrodes. Chaque couche de l'empilement doit vérifier certains critères. La représentation de cet empilement est schématisée sur la figure I.3.



*Fig.I.3. Structure générale d'une cellule photovoltaïque organique [1].*

Les éléments importants sont [1]:

- **Substrat** : rigide (verre) ou flexible (polymère, métal).
- **Anode transparente** : généralement composée d'oxyde d'indium dopé à l'étain mais il existe d'autres possibilités (nanotubes de carbone, polymères conducteurs...).
- **Couche active** : composée des semi-conducteurs organiques. Lorsqu'il s'agit de petites molécules, elles sont déposées par sublimation sous vide ou par voie humide. Pour des polymères (molécules plus grosses), elles sont déposées par voie humide, notamment des techniques de couchage rotatif ou de jet d'encre.
- **Cathode** : Elle est déposée par évaporation sous vide et est le plus souvent composée d'aluminium ou d'argent.

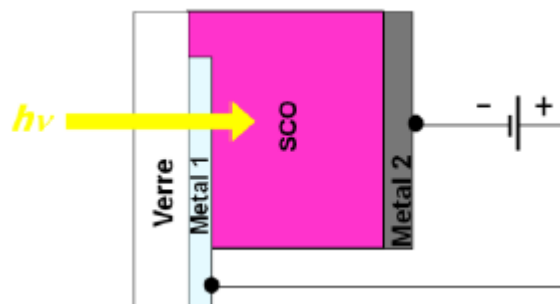
Il faut d'abord vérifier que la lumière incidente ne soit pas absorbée dans les premières couches avant d'atteindre la couche organique. Pour cela on choisit généralement une électrode transparente placée avant la couche organique. Cette électrode transparente est généralement une couche d'oxyde d'étain et d'indium (ITO).

Puis Les couches photo actives constituées de semi-conducteurs organiques sont déposées à la suite de cette couche d'oxyde. De plus l'ajout d'une électrode métallique épaisse à la fin de l'empilement permet de réfléchir les rayons lumineux transmis dans l'empilement et de faire traverser une seconde fois la couche active. Sans cette couche métallique l'absorption serait diminuée.

Il y a différentes structures de cellules photovoltaïques organiques, on trouve la structure de type Schottky, la structure bicouche (hétérojonction PN) et la structure réseaux interpénètres (hétérojonction en volume).

### I.2.1. Structure Schottky

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 de redressement du courant. Dans cette configuration de Schottky. Le photo-courant est dû à la dissociation des excitons aux interfaces semi-conducteur organique SCO/métal. Ce type fournit une tension de circuit ouvert relativement élevée [1,10].



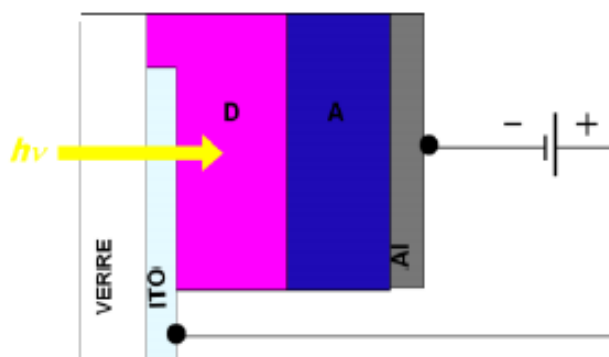
*Fig.I.3. Schéma d'une cellule Schottky [2].*

## I.2.2. Structure hétérojonction

Dans cette structure la couche active est constituée de deux semi-conducteurs de types différents mis en contact entre deux électrodes. La dissociation des porteurs photo-générés s'effectue alors à l'interface des deux semi-conducteurs. Cette même structure peut être réalisée par:

### I.2.2.1. Système bicouche

Deux couches superposées dans lequel le matériau donneur d'électrons (ou de type P) est en contact avec l'ITO, et le matériau accepteur (de type N) avec l'électrode métallique (Fig. I.4).

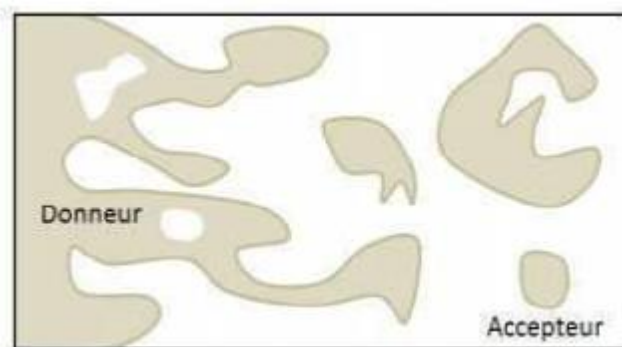


*Fig.I.4. Schéma d'une cellule bicouche [2].*

Dans ce cas, les interfaces donneur d'électrons/anode et accepteur d'électrons/cathode doivent être ohmiques, donc la zone de dissociation des excitons se situe à l'interface entre donneur d'électrons /accepteur d'électrons. Ces structures ont été développées au début des années 1990 par plusieurs équipes, dont celle de A.J. Heeger à Santa Barbara et les études menées ont démontré l'existence d'un processus de transfert d'électrons photo-induits ultra-rapide entre un polymère conjugué et le C60. Par rapport à une structure monocouche, l'hétérojonction D/A permet d'augmenter le taux de dissociation de excitons grâce au mécanisme de transfert de charge photo induit à l'interface D/A et il démunie fortement le taux de recombinaison. Cette structure possède une zone active plus importante à l'interface donneur d'électrons /accepteur d'électrons par rapport à la structure Schottky, en plus de cela, elle a l'avantage de l'amélioration de l'absorption lorsque celle du donneur d'électrons et celle de l'accepteur sont complémentaires [1,2,11,12].

### I.2.2.2. Système à réseau interpénétré de deux matériaux

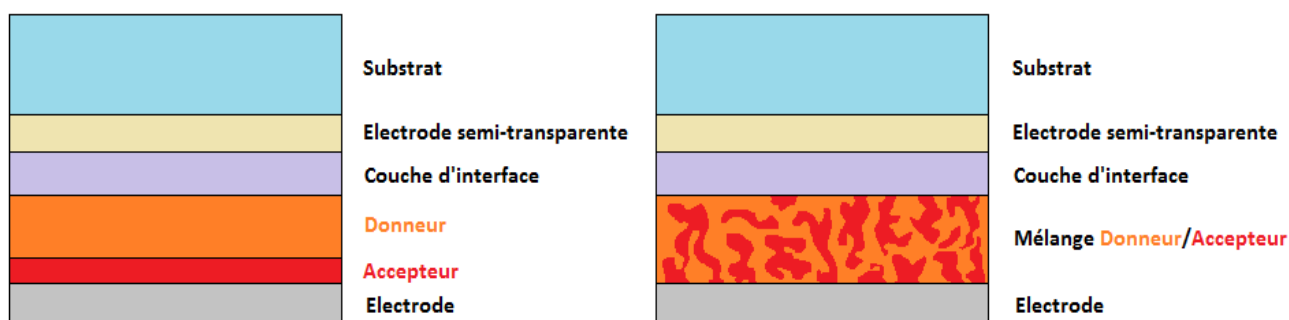
Cette dernière, appelée « hétérojonction en volume », est basée sur l'augmentation des zones de contact entre les deux semi-conducteurs et sur la création de chemins de percolation des charges vers les électrodes : elle consiste à réaliser la couche active en mélangeant le matériau de type p (donneur d'électron) et le matériau de type n (accepteur d'électron) afin de former une seule couche de composite. On obtient ainsi des zones « donneur » et « accepteur » interpénétrées dans tout le volume de la couche active (Figure I.5).



*Fig.I.5. Structure d'un réseau (Donneur d'électrons /Accepteur d'électrons).*

Les cellules de ce type présentent une plus grande interface D/A (Donneur d'électrons/Accepteur d'électrons). Les excitons atteignent ainsi plus facilement les sites de dissociation. Cette structure a été développée parallèlement par les équipes de A. Heeger et R. Friend en 1995 [13, 14]. L'inconvénient de ce type de structure réside dans la maîtrise de la morphologie de la structure.

La figure I.6. permet de visualiser la différence entre les deux structures [2]:



*Fig.I.6. Structure d'un réseau (Donneur d'électrons /Accepteur d'électrons)[2].*

Comme pour la structure bicouche, les petites molécules et les polymères conjugués ont été les deux voies principalement abordées. Les matériaux donneur et accepteur sont déposés en même temps pour former la couche active, soit par évaporation pour les petites molécules non solubles, soit par centrifugation pour les polymères et les petites molécules solubles.

### I.3. Cellules photovoltaïques organiques transparentes

Pour réaliser des composants transparents il faut élaborer des couches organiques et des électrodes n'absorbant pas les photons émis dans le domaine visible du spectre solaire. Ces contraintes entraînent de profonds changements par rapport à une cellule photovoltaïque conventionnelle.

Pour intégrer des cellules photovoltaïques organiques sur des verres, il existe deux possibilités [3] :

- La première est d'utiliser des cellules transparentes dans le visible et pour cela il faut choisir des matériaux organiques qui absorbent soit dans l'ultraviolet soit dans l'infrarouge (Figure I.6). Ces matériaux doivent être associés à des électrodes transparentes.

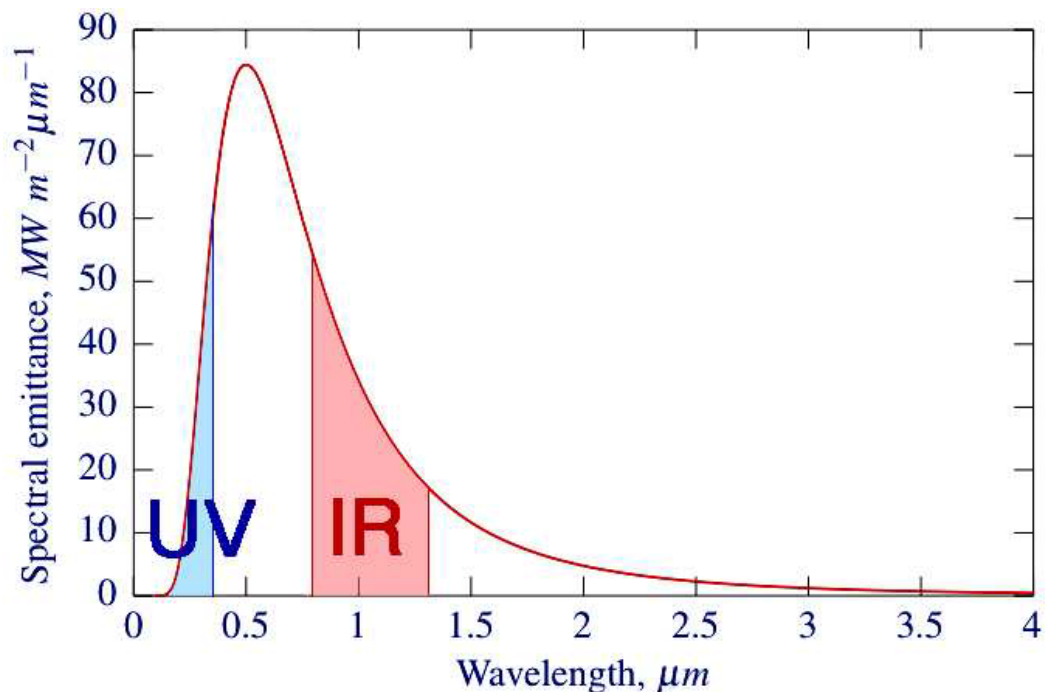


Fig I.7. Spectre d'émission du soleil [3].

La deuxième possibilité est l'intégration des cellules dans les parois des cellules des couches microstructures qui doivent être déposées à la surface du verre. La taille de ces cellules est suffisamment faible, pour présenter une bonne transparence à la lumière visible.

Cette solution a été testée par S. Archambeau dans le cadre d'un stage postdoctoral dans l'équipe de recherche du Laplace, en collaboration avec la société Essilor. Malheureusement les résultats n'ont pas été très encourageants, car les techniques classiques de photolithographie utilisent des résines organiques qui, pour être mises en œuvre, utilisent des solvants qui dissolvent les matériaux qui constituent la cellule photovoltaïque.

Un autre paramètre important dans le cadre de ce projet concerne la durée de vie du composant. Elle ne pourra être suffisamment longue que si les matériaux organiques sont protégés de l'action de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Dans ce travail, nous avons essayé dans un premier temps de étudier des cellules entièrement transparentes en utilisant des matériaux qui n'absorbent pas dans le visible et en remplaçant la cathode en aluminium par un matériau transparent et conducteur.

### **I.3.1. Les principales technologies de cellules solaires transparentes**

#### **I.3.1.1. La cellule WYSIPS**

En 2011, l'entreprise française SunPartner Technologies a présenté pour la première fois WYSIPS (What You See Is Photovoltaic Surface), une cellule photovoltaïque transparente ayant pour support un film plastique et un composé organique. Cette cellule absorbe une partie du spectre infrarouge et ultraviolet ainsi qu'une partie du spectre visible pour un rendement allant de 7 à 9%.

La partie du spectre visible absorbée réduit la transparence du film à 70%. Quelques années plus tard, pour répondre aux exigences de transparence des constructeurs de téléphonie mobile, WYSIPS a fait évoluer sa technologie: leurs cellules ont désormais une transparence de 90% mais en contrepartie un rendement plus faible compris entre 2 et 3% [15].



**I.3.1.2. Un nouveau prototype entièrement transparent (Université de Michigan)**

Au cours de l'été 2014, une nouvelle avancée dans le domaine des cellules photovoltaïques transparentes nous est parvenue de l'Université de Michigan aux USA. Une équipe de chercheurs a réussi à fabriquer une cellule photovoltaïque proche du verre et totalement transparent. En effet, elle n'absorbe la lumière que dans le domaine des infrarouges.

Un polymère organique permet à la surface en question d'absorber le rayonnement infrarouge. Ce matériau réémet ce rayonnement infrarouge sous forme d'émission lumineuse captée par les cellules photovoltaïques placées sur le bord du vitrage. Celle-ci a pour l'instant un rendement de 1% mais devrait bientôt atteindre 5% une fois la cellule optimisée. De plus, elle présenterait un coût de production à l'échelle industrielle relativement faible [15].

**I.4. Référence bibliographiques**

- [1] Z. El Jouad, *Thèse doctorat " Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques"*, Université IBN TOFAIL, Maroc,(2016).
- [2] A. Mohammed Krarroubi, *" Traitement de l'interface anode/matériau organique pour améliorer le rendement des cellules solaires"*, Thèse doctorat Université d'Oran 1-A-B, Algérie, (2018).
- [3] J. Miguel Navarro, *" Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible"*, Thèse doctorat l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, (2008).
- [4] K. Petritsch, *"Organic solar cell architectures"*, Thèse de l'université de Graz, Autriche (2000).
- [5] M. Oukachmih, *"Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques"*, Thèse doctorat Université Paul Sabatier, Toulouse, (2003).
- [6] S. Zeghina, *" Simulation et analyse d'une cellule solaire organique"*, Mémoire Magistère, Université de Batna, Algérie (2009).
- [7] D. Minh Trung, *"élaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, études des systèmes recyclables "*, Thèse doctorat de l'université bordeaux I, (2009).
- [8] A. Moliton, *" Optoélectronique moléculaire et polymère : des concepts aux composants"*, Collection technique et scientifique des télécommunications (2003).
- [9] B. Brousse, *"Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique"*, Thèse doctorat de l'université de limoges, (2004).
- [10] T. Sihem, *" Etudes des composants électroniques (cellules solaires, diodes Schottky) en utilisant les algorithmes génétiques et le langage VHDL AMS "*, Thèse de doctorat, Université de Sétif, Algérie, (2012).
- [11] N.S. Sariciftci, D. Braun, C. Zhang, V.I. Srdanov, A.J. Heeger, G. Stucky et F. Wudl, *" Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells"*, *Applied Physics Letters*, 62, 6, 585-587 (1993).
- [12] J. C. Bernede. *"Organic Photovoltaic Cells: History, Principle and Techniques"* *Journal of the Chilean Chemical Society*, 53, 3, 1549-1564 (2008).
- [13] G. Yu and A.J. Heeger. *"Charge separation and photovoltaic conversion in polymer composites with internal donor/acceptor heterojunctions"* *Journal of Applied Physics*, 78, 4510-4515 (1995).
- [14] J.J.M. Halls, C.A. Walsh, N.C. Greenham, E.A. Marseglia, R.H. Friend, S.C. Moratti, A.B. Holmes. *"Efficient photodiodes from interpenetrating polymer networks Nature"*, 376, 498-500 (1995).
- [15] <https://www.ecosources.org/>

# Chapitre II

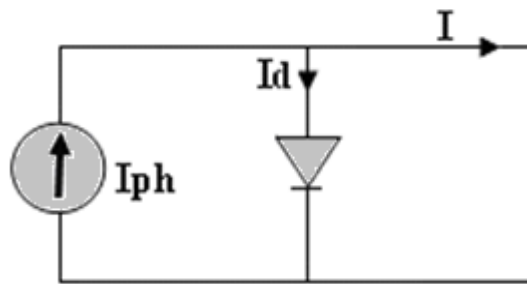
Modélisation d'une cellule  
photovoltaïque organique

Le choix des modèles physiques est important pour améliorer la précision des résultats de simulation numérique. La première difficulté de l'utilisateur va donc être de choisir certains modèles par rapport à d'autres qui pourtant décrivent les mêmes phénomènes physiques, l'autre difficulté sera de choisir les modèles en adéquation avec les mécanismes physiques mis en jeu pour les conditions d'utilisation du dispositif. Dans une première partie, nous présentons les équations fondamentales de cellule photovoltaïque, avec une seconde partie, nous nous focalisons sur quelques méthodes d'extraction des paramètres de la cellule.

## II.1. Modèles mathématique

### II.1.1. Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir circuit équivalent donné par la figure (II.1) composé d'un générateur à courant et d'une diode en parallèle.



**Fig.II.1.** Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Donc le courant aux bornes de la cellule est [1]:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

$I_{ph}$ : photo- courant.

$I_d$  : courant traversant la diode.

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$$(\text{II.3})$$

Avec:

$$U_T = \frac{k.T}{q}$$

$U_T$ : tension thermique.

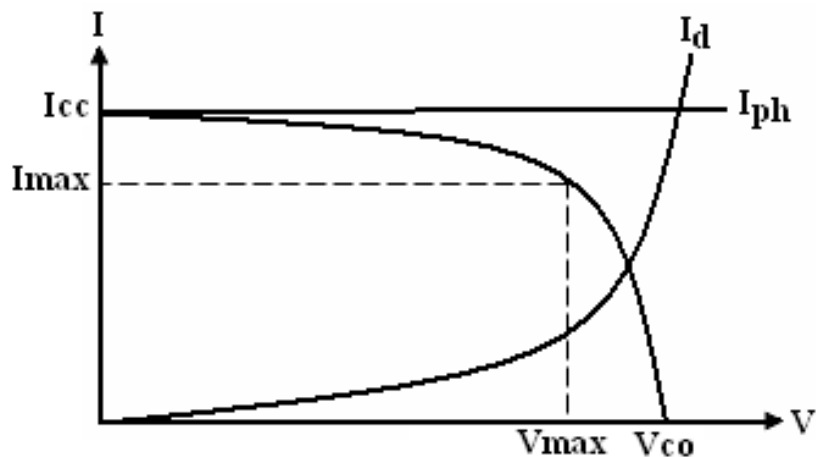
$I_S$ : courant de saturation.

$V$ : tension à la borne de la diode.

$T$ : température absolue.

Si on trace le courant en fonction de la tension en a une soustraction de deux courbes, la figure (II.2), représente les différentes courbes [2]:

$$I(V) = I_{ph} - I = I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

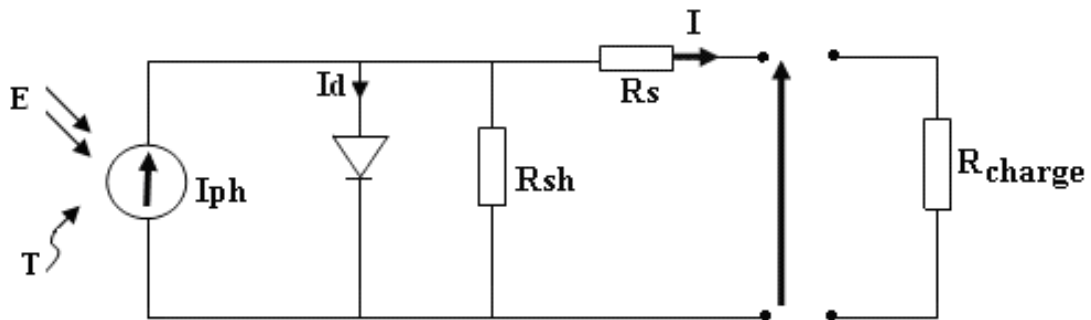


*Fig.II.2. La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque.*

## II.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque

La modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque offre trois avantages importants : une facilité d'utilisation grâce au circuit électrique équivalent, une vulgarisation des propriétés du système et donc la compréhension de phénomènes complexes en est facilitée.

Dans le cas où la cellule se comporte en générateur de puissance, il existe plusieurs modèles électriques, aussi appelés circuits équivalents, pour reproduire le comportement de la cellule à l'aide de composants électroniques [3-5]. Les circuits utilisés le plus fréquemment dans la littérature pour modéliser les cellules organiques constituées d'une jonction p-n sont les circuits à une diode (Fig.II.3).



**Fig. II.3.** Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

- **Résistance série ( $R_s$ ):** est principalement due à la résistance en volume du semi-conducteur, aux contacts métalliques et interconnexions, au transport des porteurs à travers la couche diffusante, aux résistances de contact avec les contacts métalliques des électrodes. Elle agit de manière peu prononcée sur le courant de court-circuit et peut être déterminée à partir de la courbe I-V en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours de  $V_{oc}$ . Plus  $R_s$  est faible et meilleure est la cellule. La pente de la courbe courant-tension au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ) [6].

- **Résistance en série ( $R_{sh}$ ):** est due aux impuretés proches de la jonction et au fait que la jonction p-n (ou p-i-n pour le silicium amorphe) ne soit pas idéale. Ce qui causera des courants de fuite dans la jonction. Elle agit de manière peu prononcée sur la tension en circuit-ouvert et peut être déterminée à partir de la courbe I-V en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours de  $I_{sc}$ . Plus  $R_{sh}$  est forte et meilleure est la cellule. La pente de la courbe courant tension au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ ) [7].

La connaissance des valeurs de ces résistances parasites est importante dans l'étude de la qualité du matériau et la recherche de l'amélioration du rendement d'une cellule. En effet, le facteur de forme est directement lié à ces deux résistances. Plus  $R_{sh}$  est grand, moins il y a de courants de fuite et meilleur est le facteur de forme. Plus  $R_s$  est petit, moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur ou à la surface du semi-conducteur et meilleur est le facteur de forme [3].

Le photo courant  $I_{ph}$  crée dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule).

- Le courant direct  $I_d$  d'obscurité de la jonction.
- Le courant  $I$  généré par la cellule et fourni à la charge.
- Le courant  $I_p$  correspond au courant des connexions parallèles.

Cet équilibre s'écrit [2] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.5})$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans La figure (II.5), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left( \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$\Rightarrow I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left( \frac{(V + R_s I)}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.7})$$

### II.3. Paramètres des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ ,  $P_{max}$ ,  $A$ ,  $ff$  et  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

#### II.3.1. Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). 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 [8].

On peut écrire :

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} \quad (\text{II.8})$$

### II.3.2. Tension à circuit ouvert ( $V_{CO}$ )

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [9].

On peut écrire :

$$V_{CO}(I = 0) = AU_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

### II.3.3. Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale ( $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement ( $I_{max} \cdot V_{max}$ ) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{CC}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{CO}$ ) [10].

Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par :

$$P = V \left( I_{ph} - I_S \left[ \exp \left( \frac{V}{AU_T} \right) - 1 \right] \right) \quad (\text{II.10})$$

Cette puissance fournie est maximale au point définit par :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial I}{\partial V} + I = 0$$

Soit :

$$I_{ph} - I_S \left( \exp \left( \frac{V}{AU_T} \right) - 1 \right) - V I_S \left( \frac{1}{AU_T} \right) \exp \left( \frac{V}{AU_T} \right) = 0 \quad (\text{II.11})$$

La tension  $V_{max}$  et le courant  $I_{max}$  correspondant ou maximum de puissance, sont alors données par :

$$\left( 1 + \frac{V_{max}}{AU_T} \right) \exp \left( \frac{V_{max}}{AU_T} \right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_S} \quad (\text{II.12})$$

Donc :



$$I_{\max} = I_S \frac{V_{\max}}{AU_T} \exp\left(\frac{V_{\max}}{AU_T}\right) \quad (\text{II.13})$$

### II.3.4. Facteur de qualité

Le facteur d'idéalité de la diode de recombinaisons varie beaucoup d'une cellule à une autre, ce qui témoigne d'une fréquence de recombinaison plus ou moins grande suivant le matériau et sa qualité [11].

### II.3.5. Facteur de forme

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle  $I_{sc} \times V_{oc}$ .

C'est un indicateur de la qualité de la jonction ainsi que des résistances série ou parallèle qui s'opèrent dans la cellule. Plus le facteur de forme se rapproche de 1 et meilleure est la cellule [11]:

$$ff = \frac{P_{\max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (\text{II.14})$$

### II.3.6. Rendement d'une cellule solaire

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [11]:

$$\eta_c = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{P_{\text{solaire}}} \quad (\text{II.15})$$

## II.4. Méthodes d'extraction des paramètres de cellules solaires

Plusieurs chercheurs travaillent dans le domaine d'extraction des paramètres des cellules solaires par le biais des programmes d'optimisation. La plupart de ces méthodes sont basées sur une approximation de l'erreur au sens des moindres carrés (LSE) entre le courant expérimental ( $I_{exp}$ ), et le courant simulé ( $I_{cal}$ ). Les bases de la (LES) sont très connues, et elle est utilisée dans toutes les disciplines. On donne ci-dessous le principe de cette technique.

Soit  $N$  données expérimentales  $(I_{exp_i}, V_{exp_i})$  ( $i=0, N-1$ ) qui représentent les régions directes et/ou inverse de la caractéristique  $I-V$  d'une cellule solaire. La méthode d'optimisation consiste à trouver les valeurs des paramètres  $(I_s, R_s, n, G_p, I_{ph})$  qui minimisent la somme des erreurs relatives quadratiques entre les courants expérimentaux  $I_{exp_i}$  et calculés  $I_{cal_i}$  générés par l'équation[12]:

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \frac{I_{cal_i}}{I_{exp_i}} - 1.0 \right)^2 \quad (\text{II.16})$$

Le courant  $I_{cal_i}$  joue le rôle de poids de pondération. La méthode d'approximation de l'erreur au sens des moindres (LES) consiste à minimiser l'erreur donnée par l'équation suivante :

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} (I_{cal_i} - I_{exp_i})^2 \quad (\text{II.17})$$

La différence fondamentale entre la MOV (équation (II.17)) et la LES (Least Square Estimation) (équation (II.18)) est que la première optimise l'erreur relative et la deuxième optimise l'erreur absolue. En effet, dans la LSE, lorsque le courant s'étale sur plusieurs ordres de grandeurs, les valeurs faibles n'auront aucun effet dans le processus d'optimisation.

Par exemple: si le courant s'étale entre  $10^{-10}$  et  $10^{-2}$  A et on voudrait optimiser le critère équation (II.18) à  $10^{-10}$  près, les valeurs du courant qui seront significatives dans la somme équation (II.18) sont celles qui sont supérieures à  $10^{-5}$  A.

Les autres, celles comprises entre  $10^{-10}$  et  $10^{-5}$  A, n'auront aucun effet sur la somme et leur approximation sera médiocre. La MOV contourne ce problème en forçant les erreurs relatives entre les valeurs du courant expérimental et les valeurs du courant simulé à avoir le même ordre de grandeur. De cette manière toutes les valeurs du courant seront significatives dans le processus d'optimisation.

La solution de l'équation (II.17) nécessite que le gradient  $g$  de la fonction  $S$  soit nul. Ceci conduit à la résolution du système d'équations non linéaire suivant :

$$\nabla(S) = \begin{cases} \frac{\partial S}{\partial I_s} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial R_s} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial G_p} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial I_{ph}} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Il s'agit donc de résoudre un système d'équations non linéaires. Une méthode de résolution efficace du type *Newton-Raphson* ou *Levenberg-Marquardt* permet de trouver la solution.

Dans nos calculs et du moment où le courant est très faible de l'ordre de  $10^{-15}$  A que, l'approximation de  $S_V$  (MOV) équation (II.19) est meilleure que E (LES). Une autre solution est d'exprimer  $V = f(I)$  qui sera appelée la méthode MOL (Méthode d'optimisation latérale), qui consiste à minimiser  $S_L$  donné par l'équation (II.20) :

$$S_V = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \frac{I_{cal_i} - I_{exp_i}}{I_{exp_i}} \right)^2 \quad (\text{II.19})$$

$$S_L = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \frac{V_{cal_i} - V_{exp_i}}{V_{exp_i}} \right)^2 \quad (\text{II.20})$$

La recherche du minimum se fait de la même manière que pour la *LSE*, c'est à dire, on résout le système d'équations non linéaires données par le gradient du critère choisi par un algorithme efficace. Elles sont devenues très populaires vues leur précision et leur efficacité dans l'extraction des paramètres et surtout vues l'existence d'ordinateurs puissants et de techniques sophistiquées de programmation. Leur mise au point est beaucoup plus difficile que la *LSE* surtout dans le calcul des premières et deuxièmes dérivées.

### II.4.1 Méthode d'optimisation verticale (MOV)

On rappelle l'expression du courant modèle à cinq paramètres [13]:

$$I = I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V - R_s I)}{nk_B T} \right) - 1 \right] + G_p (V - R_s I) - I_{ph} \quad (\text{II.21})$$

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\partial S}{\partial I_s} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_{exp_i}}{\partial I_s} \frac{I_{cal}}{(I_{exp_i})^2} \left( \frac{I_{cal_i} - I_{exp_i}}{I_{exp_i}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_{exp_i}}{\partial n} \frac{I_{cal}}{(I_{exp_i})^2} \left( \frac{I_{cal_i} - I_{exp_i}}{I_{exp_i}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial R_s} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_{exp_i}}{\partial R_s} \frac{I_{cal}}{(I_{exp_i})^2} \left( \frac{I_{cal_i} - I_{exp_i}}{I_{exp_i}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial G_p} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_{exp_i}}{\partial G_p} \frac{I_{cal}}{(I_{exp_i})^2} \left( \frac{I_{cal_i} - I_{exp_i}}{I_{exp_i}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial I_{ph}} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_{exp_i}}{\partial I_{ph}} \frac{I_{cal}}{(I_{exp_i})^2} \left( \frac{I_{cal_i} - I_{exp_i}}{I_{exp_i}} \right) = 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.22})$$

La solution de l'équation (II.22), trouvée par la méthode de Newton, gradient conjugué, fournit les valeurs des paramètres du cellule .

Il est bien connu que la méthode de Newton et toutes celles qui en dérivent (quasi-Newton) sont à convergence quadratique. Ceci a pour conséquence que pour que l'algorithme converge, il faut que le point initial soit choisi très proche de la solution exacte. En plus, la méthode de Newton possède ses propres conditions de convergence. Le choix du point initial et la convergence de la méthode doivent être soigneusement traités surtout que la MOV possède des minimums locaux.

### II.4.2.Méthodes d'optimisation latérale (MOL)

L'équation (II.22) est une fonction implicite c'est-à-dire  $I = f(I, V)$ , faisant transformer cette dernière à une fonction explicite  $V = f(I)$  comme :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V - R_s I)}{nk_B T} \right) - 1 \right] - G_p (V - R_s I) \quad (\text{II.23})$$

C'est une méthode pour extraire les paramètres du modèle intrinsèque et extrinsèque d'illuminée cellules solaires contenant résistance série parasite et la conductance shunt a été présentée. Il est basé sur la fonction de Lambert. On exprime en termes de fonctions Lambert  $W$  (une fonction spéciale en analyse des fonctions élémentaires mathématiques).

L'expression du courant  $I$  ou de la tension  $V$  sera une fonction explicite des autres paramètres. Le modèle dispositif sera ainsi exprimé comme :

$$I = \frac{nV_{th}}{R_S} W \left( \frac{I_0 R_S}{nV_{th} (1 + R_S G_p)} \exp \left( \frac{V + R_S (I_0 + I_{ph})}{nV_{th} (1 + R_S G_p)} \right) + \frac{VG_p - (I_0 + I_{ph})}{1 + R_S G_p} \right) \quad (\text{II.24})$$

$$V = -nV_{th} W \left( \frac{I_0}{nV_{th} G_p} \exp \left( \frac{I + I_0 + I_{ph}}{nV_{th} G_p} \right) \right) + I \left( R_S + \frac{1}{G_p} \right) + \frac{I_0 + I_{ph}}{G_p} \quad (\text{II.25})$$

$$V_{th} = \frac{K_B T}{q} \quad (\text{II.26})$$

Où:

$W$ : représente la notation habituelle de la fonction Lambert.

Ces représentations explicites sont pratiques et efficaces du calcul alternatif à l'utilisation de la solution itérative de l'équation originale transcendante équation (II.23) dans les modèles des cellules solaires.

**II.5.Références Bibliographiques**

- [1] *D.L. King, "Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions", Proceeding of NREL/SNL Photovoltaic Program Review Meeting, Lakewood, Colorado, November 18-22, (2000).*
- [2] *A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque (4ème édition : Dunod), (2012).*
- [3] *T. Mambrini, " Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies" Université Paris Sud, (2015).*
- [4] *M. Telidjane, "Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic", Thèse de doctorat de l'université de Lyon,(2017).*
- [5] *H. Kamelia, "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative", Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Algérie, (2003).*
- [6] *A. Cid Pastor, " Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2006).*
- [7] *R. Radbeh, "Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones", Thèse de doctorat, Université de Limoges,(2008).*
- [8] *T. Desrues, " Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière", Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon (2008).*
- [9] *R. Bettignies, "Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Angers ,(2003).*
- [10] *M. Gradella Villalva, J. Rafael Gazoli, E. Ruppert Filho," Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE Transaction on power electronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May (2009).*
- [11] *A. Labouret, M.villoz," Energie solaire photovoltaïque", Edition Lemoniteur, (2005).*
- [12] *Z.O. A. Ferhat-Hamida, A. Hoffmann, R. Weiss," Extarction of Schottky diode parameters including parallel conductance using vertical optimization method" ,Dissertation, (2002).*
- [13] *M. Ali " Extraction des paramètres des cellules et des modules solaires par l'utilisation de la méthode d'optimisation verticale et de la fonction Lambert", Mémoire master, (2011).*

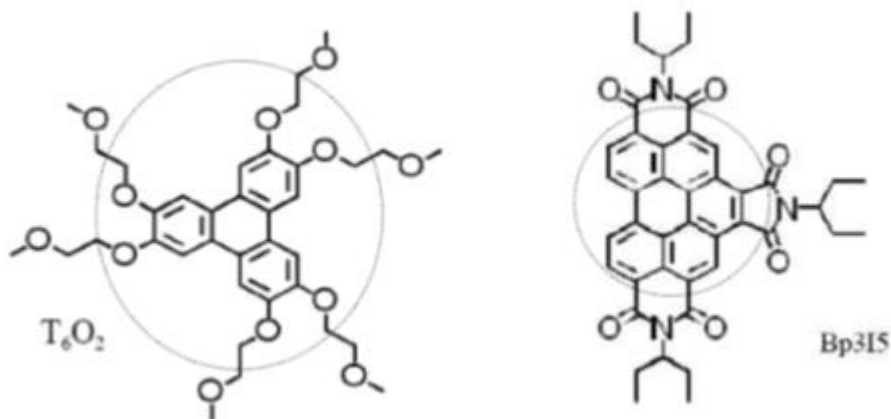
# Chapitre III

## *Résultats et discussions*

Dans ce chapitre, nous étudierons des cellules photovoltaïques organiques transparente de type hétérojonction planaire D/A. Nous définissons, dans un premier temps, la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés. Ces paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques organiques transparente. Nous présentons ensuite les résultats obtenus de la simulation numérique, sous *Matlab*, de la structure à hétérojonction D/A. L'objectif de ce travail est d'alimenter un système actif avec une cellule photovoltaïques organique transparente ou semi-transparente.

### III.1. Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans ce type de cellules ont été synthétisés par H. Bock au centre de recherche Paul Pascal. Les hétérojonctions planaires sont constituées de *2,3,6,7,10,11-hexakis-(2-methoxyethoxy)-triphenylène* ( $T_6O_2$ ) comme donneur et *1,2,4,5,10,11-hexakis-(2-éthylhexyloxy)carbonyl)-benzo[ghi]pérylène* (*Bp3I5*) comme accepteur. La formule développée de ces matériaux est représentée sur la figure III.1 [1].

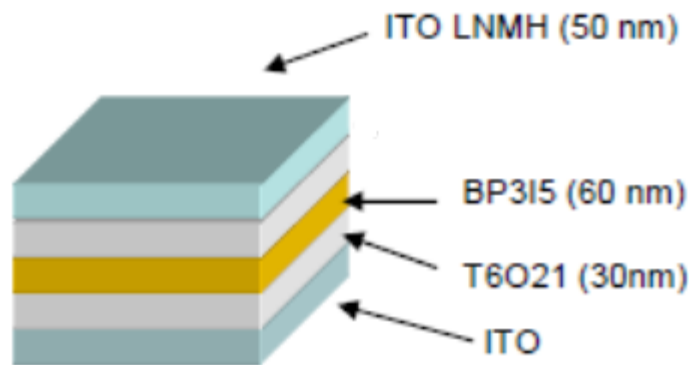


*Figure III.1. Structure moléculaire des matériaux utilisés [1].*



## III.2. Structure étudiée

La structure choisie est une cellule photovoltaïque hétérojonction planaire D/A. En effet, une jonction D-A peut-être éclairée du côté ITO, surtout si les couche sont très minces. En pratique, l'éclairement est effectué côté ITO qui transmet près de 80% de la lumière. Dans cette partie de travail, nous allons concentrer notre effort sur la caractérisation d'une cellule photovoltaïque organique type *ITO/T6O2/Bp3I5/ITO*. comme il est illustrée sur la figure III.2.

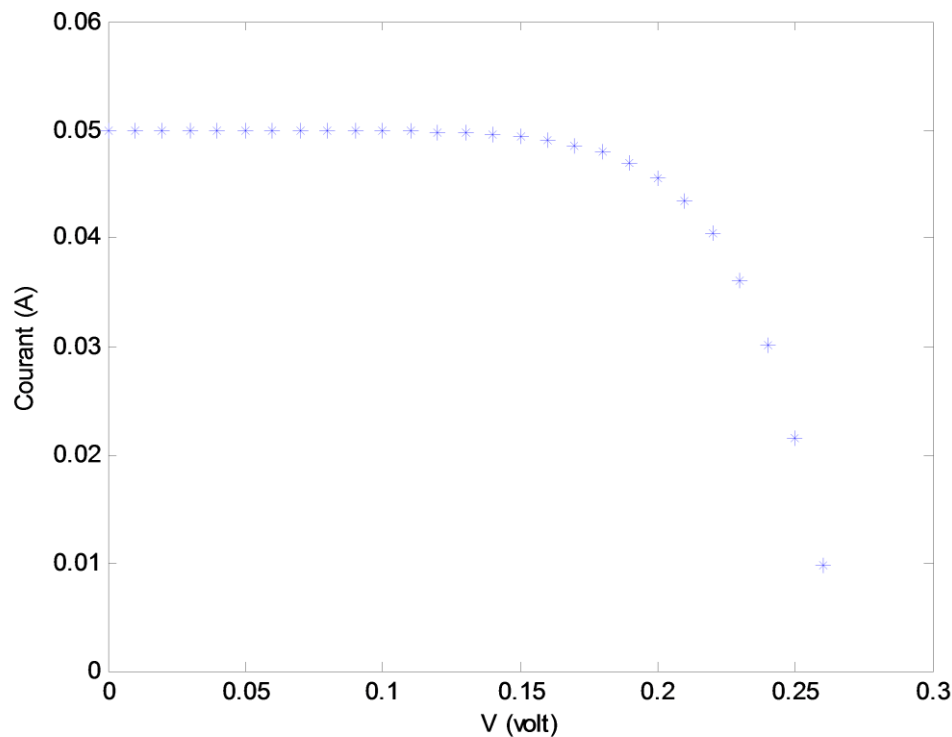


*Figure III.2. Structure du composant ITO/T6O2/Bp3I5/ITO.*

## III.3. Résultats de la simulation

### III.3.1. Caractéristique courant- tension

La figure III.2 présente les caractéristiques courant- tension de la cellule étudié sous un éclairement de  $1\text{KW/m}^2$  à la température ambiante ( $25^\circ\text{C}$ ). Le courant de court-circuit avoisine  $0.05\text{A}$  alors que la tension de circuit ouvert est de l'ordre de  $0.27\text{V}$ . L'aplatissement de la caractéristique  $I(V)$  est dû au fait que la résistance série n'est pas nulle et que la résistance shunt n'est pas infinie. La résistance série est due aux différentes couches de la cellule (émetteur, base et contacts) alors que la résistance shunt est due aux fuites à travers l'émetteur.



*Figure III.2. Caractéristiques courant- tension.*

### III.3.2. Influence de l'épaisseur de la couche active

Les résultats de simulation pour les différentes épaisseurs de la couche active sont regroupés dans le tableau III.1.

Nous remarquons que lorsque l'épaisseur de la couche active augmente, il y a une légère augmentation de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit, et par conséquent, le rendement diminue. Ce résultat est expliqué par la recombinaison des paires électrons-trous, créées près de l'interface.

**Tableau III.1.** Effet de l'épaisseur de la couche active sur les paramètres de la cellule.

| Epaisseur ( $\mu\text{m}$ ) | $I_{cc}$ (mA) | $V_{OC}$ (V) | $P_{max}$ (mW) | FF    | $\eta$ (%) |
|-----------------------------|---------------|--------------|----------------|-------|------------|
| 1.2                         | 5.655         | 0.877        | 2.265          | 46.22 | 1.81       |
| 1.4                         | 5.671         | 0.878        | 2.222          | 45.15 | 1.72       |
| 1.6                         | 5.913         | 0.888        | 2.155          | 43.51 | 1.61       |
| 1.8                         | 5.955         | 0.895        | 2.143          | 41.67 | 1.55       |

### III.3.3. Effet de la température sur la caractéristique courant- tension de la cellule organique

En faisant varier la température de la cellule entre 10°C et 55°C, l'influence de celle-ci sur la caractéristique  $I(V)$  est donnée par la figure III.3.

On constate, d'après la figure III.3, que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer le courant de court-circuit la tension du circuit ouvert de la cellule solaire.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules, ne serait-ce que parce qu'une cellule exposée à une irradiance n'en transforme en électricité que au plus, le reste étant réfléchi ou dissipé en chaleur. Ainsi, si la cellule n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader.

On observe une augmentation notable du courant direct de la cellule entraînant une diminution nette de la tension de circuit ouvert. En effet, si la température augmente, le photo-courant ( $I_{Ph}$ ) augmente et par conséquent le courant ( $I$ ), ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible.

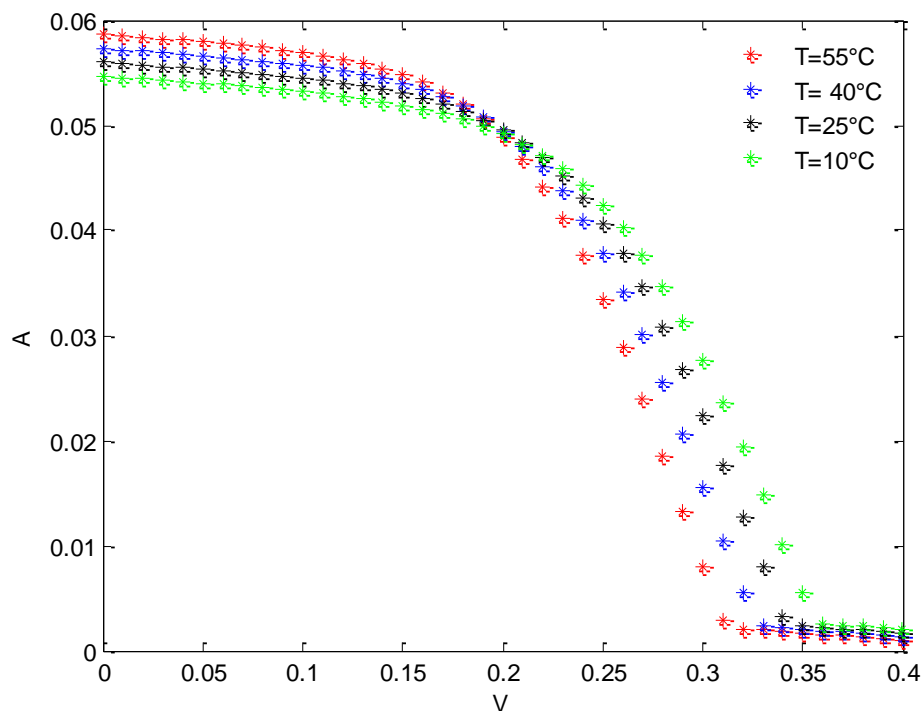


Figure III.3. Effet de la température sur la caractéristique courant- tension

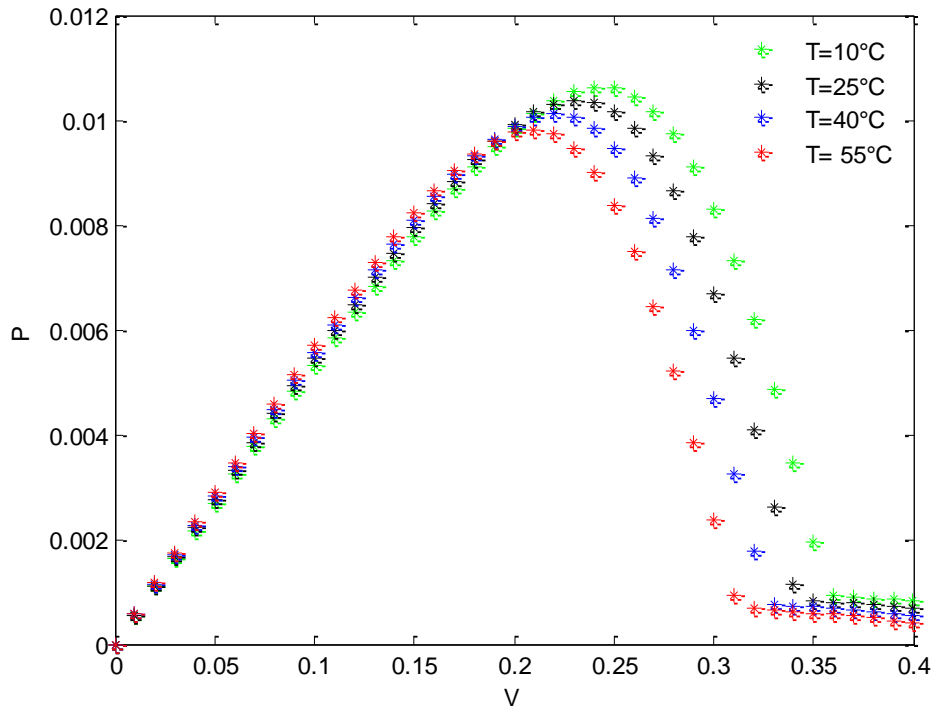


Figure III.4. Effet de la température sur puissance.

Les résultats rassemblés dans le tableau précédent montrent que la température fait augmenter le courant de court-circuit et diminuer la tension du circuit ouvert de la cellule solaire comme il est illustré dans les figures III.5 et III.6. Il est à noter que l'effet de la température est dû principalement à la dépendance du courant de saturation de la température.

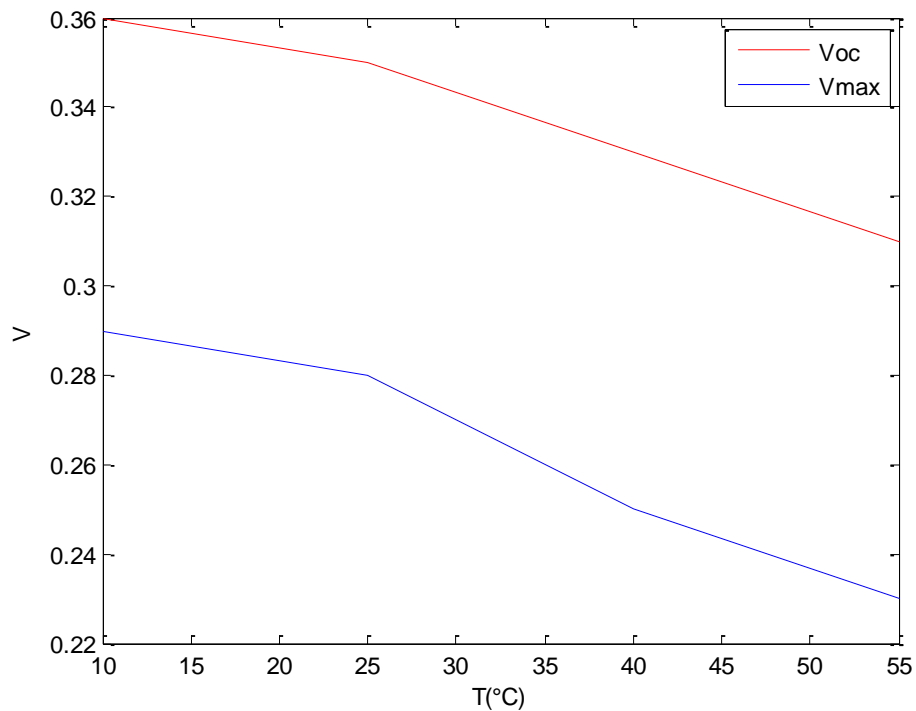
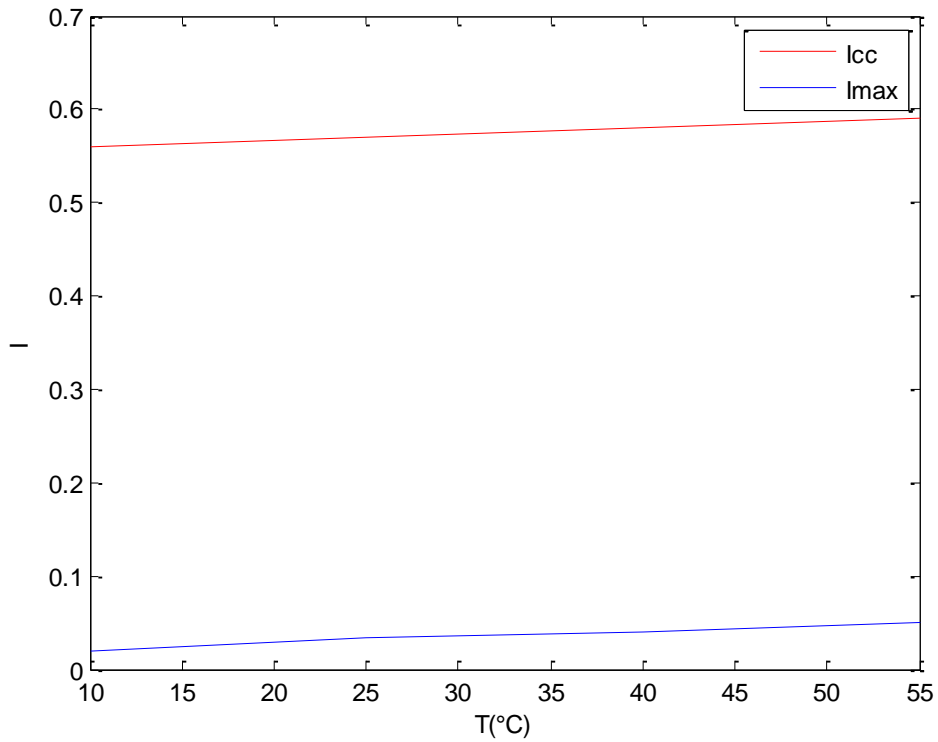
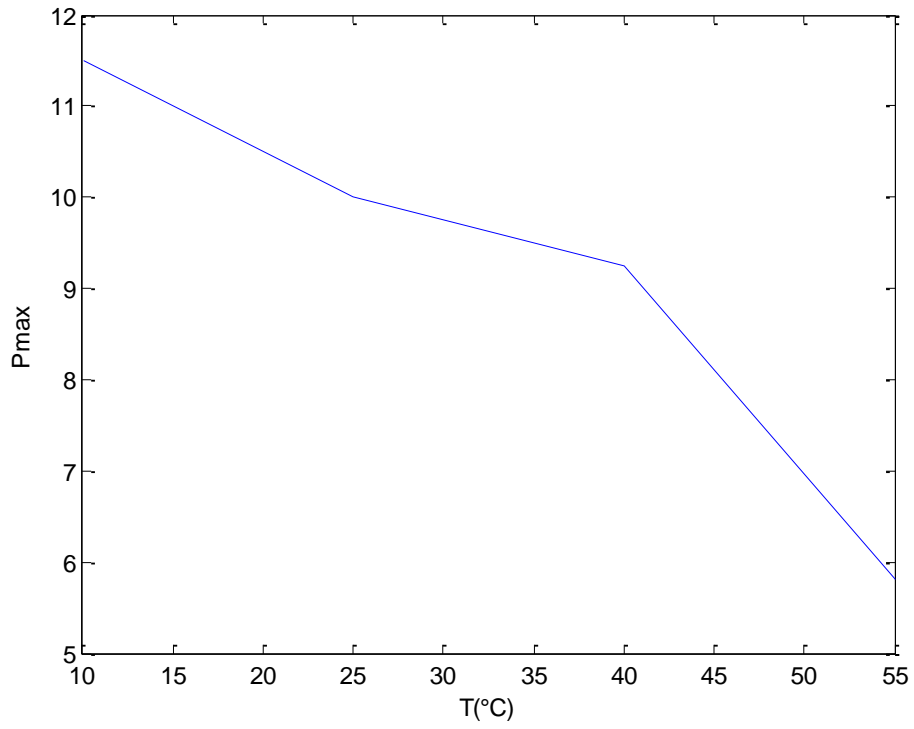


Figure III.5. Variation de  $V_{oc}$  et  $V_{max}$  on fonction de la température.

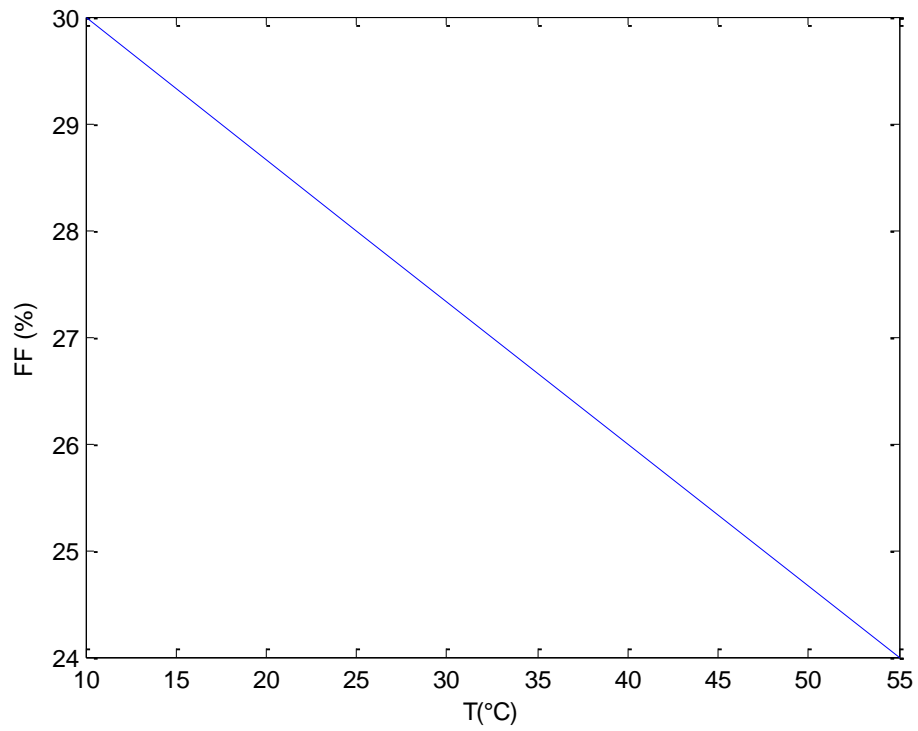


*Figure III.6. Variation de  $I_{cc}$  et  $I_{max}$  on fonction de la température.*

L'effet de la température sur le reste des paramètres électriques de la cellule ( $P_{max}$ ,  $FF$ ) sont illustrés par les figures III.7 et III.8 ci-dessous. Le constat global est la diminution des trois paramètres de la cellule solaire avec l'augmentation de la température. Donc, il est clair que la température a un effet néfaste sur la réponse de la cellule solaire.



*Figure III.7. Variation de  $P_{max}$  on fonction de la température.*

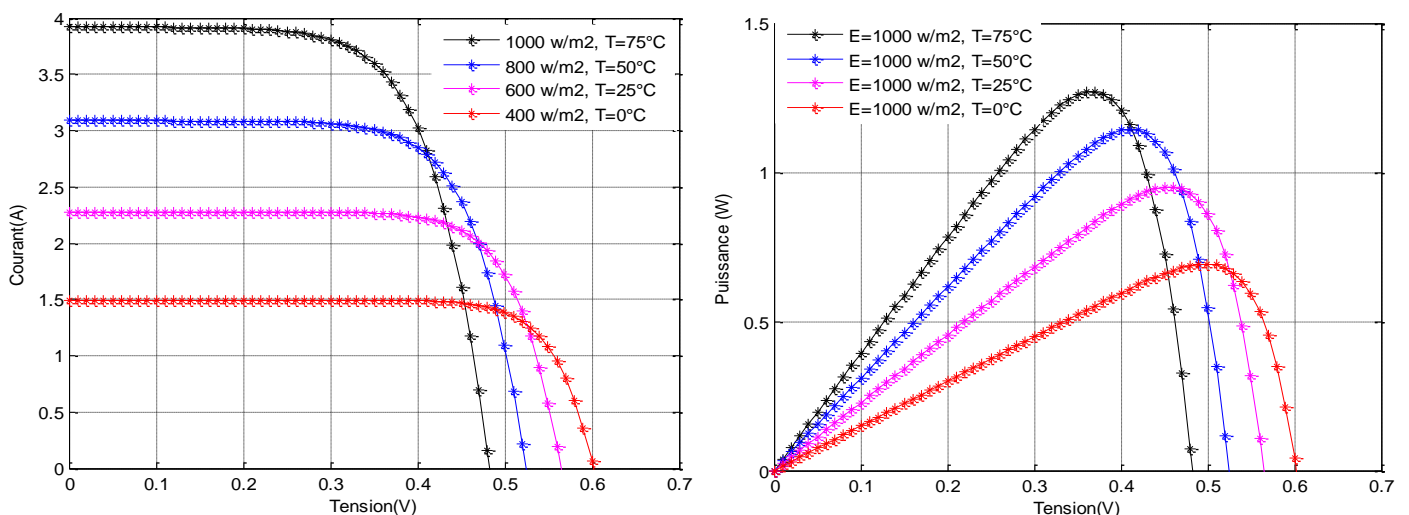


*Figure III.8. Variation de  $FF$  en fonction de la température.*

### III.3.4. Influence simultanée du rayonnement et de température

Nous avons vu plus haut que le courant de court-circuit est pratiquement égale au photo courant, lui – même directement proportionnel à la surface éclairée et l'irradiance pour un spectre donnée. L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante représente la caractéristique courant- tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température constante.

On remarque que la tension ( $V_{MPP}$ ) correspondant à la puissance maximale ( $P_{MPP}$ ) ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant qui augmente fortement avec l'éclairement. L'augmentation du rayonnement et de la température entraîne une diminution de la tension et une augmentation du courant.(figure III.9).



*Figure III.9. Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur I-V et P-V.*

### III.3.5. L'influence de la résistance série

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit. La valeur de la résistance série est gouvernée par la résistivité du matériau, par les résistances de contact des électrodes et par la résistance de la grille collectrice.

La résistance série ( $R_s$ ) de la cellule photovoltaïque a un grand impact sur la pente de la courbe  $I=f(V)$  près de la tension circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), suivant les indications du schéma ci-dessous, par conséquent la valeur de ( $R_s$ ) est calculée en évaluant la pente de la courbe  $I=f(v)$  au point ( $V_{oc}$ ).

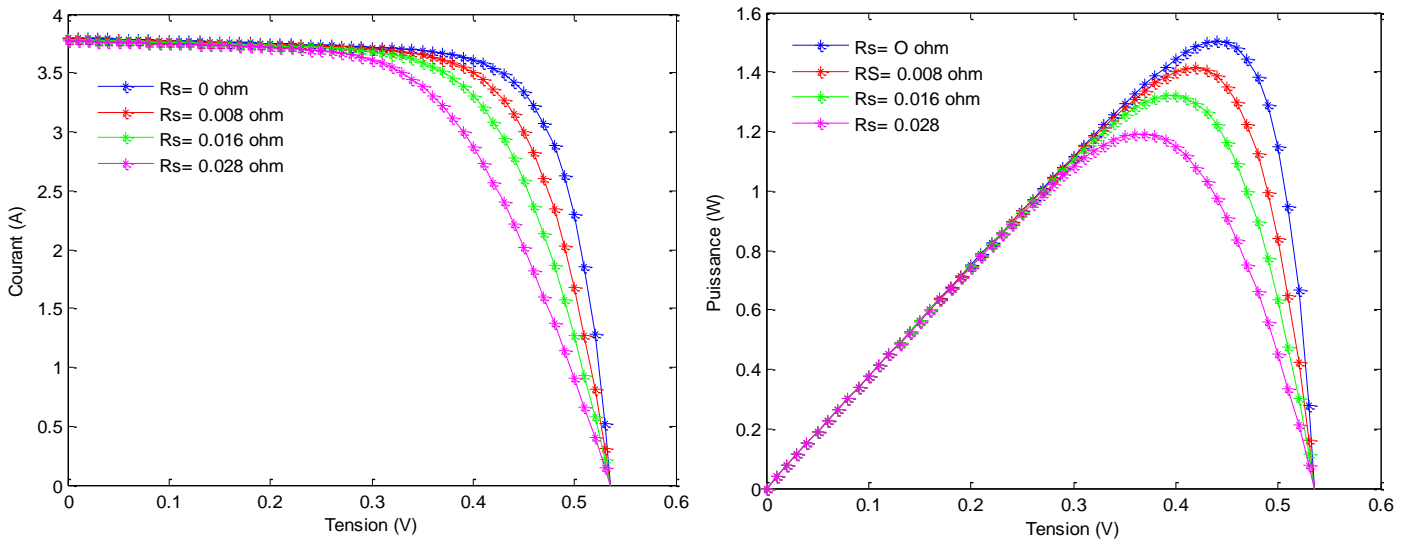


Figure III.10. Influence de la résistance série sur I-V et P-V.

### III.3.6. L'influence de la résistance Shunt

La résistance shunt est en général très élevée. On peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile; en outre une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairément.

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.

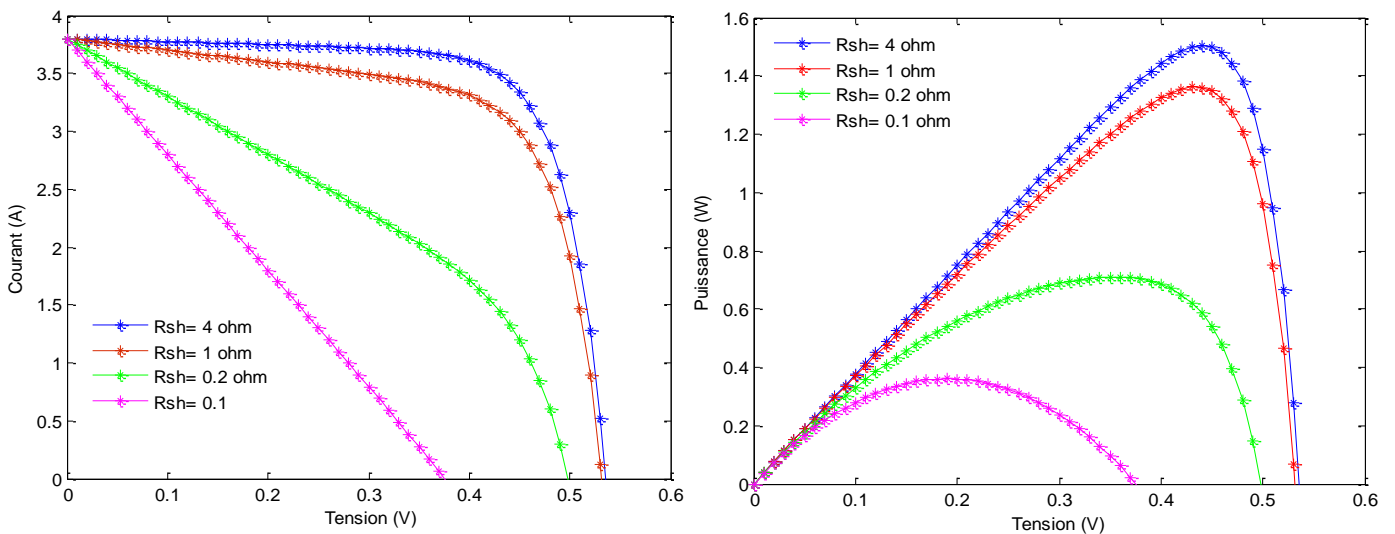


Figure III.11. Influence de la résistance shunt sur I-V et P-V.



#### **III.4. Références bibliographiques**

- [1] *J. Miguel Navarro, " Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible", l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, (2008).*

## Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

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

Notre étude a porté sur une cellule photovoltaïque organique hétérojonctions planaires sont constituées de 2,3,6,7,10,11-hexakis-(2-methoxyethoxy)-triphenylène ( $T_6O_2$ ) comme donneur et 1,2,4,5,10,11-hexakis-(2-éthylhexyloxy-carbonyl)-benzo[ghi]pérylène (Bp3I5) comme accepteur.

Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur, de la température et de l'éclairement sur la caractéristique courant - tension de la cellule solaire organique retenue dans le cadre de cette étude. Par la suite, nous avons déduit l'effet de ces trois facteurs sur le paramètre essentiel de la cellule solaire qui est le rendement de conversion.

Notons aussi que pour un éclairement de  $1\text{KW/m}^2$ , nous avons déterminé un rendement de 1.81 % qui est très faible par comparaison avec une cellule photovoltaïque inorganique, son coût plus faible, l'intérêt de l'électronique organique se manifeste dans des applications moins exigeantes au niveau performances. De plus, grâce aux propriétés intéressantes de ces plastiques, telles que transparence et flexibilité, de nouveaux types d'applications sont également envisageables. Espérant que l'approche proposée peut fournir une base de départ pour la conception et la réalisation des cellules solaires organiques.

# نمذجة ومحاكاة الخلايا الكهروضوئية العضوية الشفافة

## ملخص:

في سياق إنتاج الطاقة المتجددة ، تتمتع الخلايا الكهروضوئية العضوية بمزايا معينة مثل تكلفة التصنيع المنخفضة وإمكانية الحصول على أسطح كبيرة على ركائز مرنة وشفافة. يمكن استخدامها أيضاً في التطبيقات الجديدة كما هو موضح في هذه المذكرة. الهدف الرئيسي هو تحديد تأثير درجة الحرارة ، والإضاءة ، وسمك طبقة الخلية النشطة على الخصائص الكهربائية للخلية الكهروضوئية العضوية الشفافة. ركزت دراستنا على التداخلات المستوية للخلايا الكهروضوئية العضوية التي تتكون من 2,3,6,7,10,11-hexakis-(2-methoxyethoxy)-triphenylene (T6O2) كمانح و 1,2,4,5,10,11-hexakis-(2-ethylhexyloxycarbonyl)-benzo (Bp3I5) triphenylène [ghi] كمقبل.

**الكلمات المفتاحية:** الكهروضوئية ، أشباه الموصلات العضوية ، خلية شفافة .

---

# *Modeling and simulation of transparent organic photovoltaic cells*

## *Abstract:*

In the context of renewable energy production, organic photovoltaic cells have certain advantages such as low manufacturing cost and the possibility of obtaining large surfaces on flexible and transparent substrates. They can also be used in new applications as this memory work demonstrates.

The main objective is to define the influence of the temperature, the illumination, the thickness of the active cell layer on the electrical characteristic of the transparent organic photovoltaic cell. Our study focused on an organic photovoltaic cell planar heterojunctions consist of 2,3,6,7,10,11-hexakis-(2-methoxyethoxy)-triphenylene (T6O2) as donor and 1,2,4,5,10,11-hexakis-(2-ethylhexyloxycarbonyl)-benzo[ghi]perylene (Bp3I5) as acceptor.

**Keywords:** *Photovoltaic, organic semiconductor, transparent cell.*

---

# Résumé

Dans le contexte de la production d'énergie renouvelable, les cellules photovoltaïques organiques présentent certains avantages comme un faible coût de fabrication et la possibilité d'obtenir de grandes surfaces sur substrats souples et transparents. Elles peuvent également être utilisées dans des nouvelles applications comme le démontre ce travail de mémoire.

L'objectif principal est de définir l'influence de la température, l'éclairement, l'épaisseur de la couche active de cellule sur la caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque organique transparente. Notre étude a porté sur une cellule photovoltaïque organique hétérojonctions planaires sont constituées de 2,3,6,7,10,11-hexakis-(2-methoxyethoxy)-triphenylène (T<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) comme donneur et 1,2,4,5,10,11-hexakis-(2-éthylhexyloxycarbonyl)-benzo[ghi]pérylène (Bp3I5) comme accepteur.

**Mots clés :** *Photovoltaïque, semi-conducteur organique, cellule transparente.*