

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR**  
**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES TECHNOLOGIES**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE**

**Thème**

**MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE CELLULE**  
**PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE INVERSÉE**

**Soutenu le Mai / 2017 /**

**Présenté par :**

- AZIZ Halima
- SADDEK Somia

**Encadré par :** Mr. GHAITAOUI Touhami

**Président :** Pr. BENATIALLAH Ali

**Examineurs :** Mr. HARROUZ Abdelkader

**2016- 2017**

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère*

*A mon père*

*A mes frères et mes sœurs*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

## Remerciements

Ce travail de master a été préparé et réalisé au Département des sciences technologies de l'Université Ahmed Draya Adrar en collaboration avec L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) Adrar.

La Pluridisciplinarité du sujet de ce travail de recherche m'a permis de rencontrer des personnes possédant de grandes qualités scientifiques et humaines. Je tiens notamment à exprimer toute ma reconnaissance à Mr. GHAITAOUI Touhami, de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar, d'avoir encadré ce travail et m'avoir initié à la recherche scientifique, Egalement pour l'aide constante et bienveillante qu'il m'a apportée, pour la confiance et l'autonomie d'action qu'il m'a accordée. Je lui souhaite une joyeuse vie scientifique !!! Merci encore Beaucoup Mr. GHAITAOUI Touhami.

Que Les Messieurs Le Professeur BENATIALLAH Ali, le Professeur HARROUZ Abdelkader respectivement sachent que je suis honoré qu'ils aient accepté d'être examinateurs de ce travail de master. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail ainsi que pour leurs remarques et commentaires qui ont contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

Je souhaite maintenant remercier mes collègues amis et frères d'Université Ahmed draya Adrar.

Un grande merci à mes amis à qui je souhaite beaucoup de réussite, à N. Aghiat .

Un énorme merci à toute ma famille qui m'a soutenu, motivé tout au long de mes études et en particulier à ma mère, ma mère, ma mère et mon père pour avoir permis que devienne celui que je suis aujourd'hui et aussi à mes frères.

# Sommaire

<b>INRODUCTION GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>Généralités sur l'énergie photovoltaïque organique</b>	
I.1. Introduction	4
I.2. Contexte énergétique mondial	4
I.3. Le gisement solaire	5
I.4. Etat de l'art et filières du photovoltaïque	6
1.4.1. La 1ère génération	7
1.4.2. La 2ème génération	8
1.4.3. La 3ème génération.	9
I.5. Notions de base sur le photovoltaïque	10
I.5.1. La jonction p-n : « cas de l'inorganique »	10
I. 5.2. Les semi-conducteurs organiques	12
I. 5.2.1. Les systèmes conjugués	12
I.5.2.2. Les polymères $\pi$ -conjugués .	13
I.5.2.3. Les petites molécules	14
I.6. Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques	15
I.6.1. Avantages	15
I.6.2. Inconvénients	16
I.7. Conclusion	17
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>Caractérisation des cellules photovoltaïques organiques</b>	
II.1. Introduction	19
II.2. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques	19
II.2.1. Absorption des photons – création des excitons	19
II.2.2. Diffusion des excitons	20
II.2.3. Dissociation des excitons	21
II.2.4. Transport des charges jusqu'aux électrodes	21
II.2.5. Collecte des porteurs de charge	22
II.3. Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules solaires organiques	24
II.3.1. Caractéristique courant-tension I (V)	24

II.3.2.Courant de court-circuit $I_{cc}$	24
II.3.3.Tension à circuit ouvert $V_{co}$	24
II.3.4. Facteur de forme FF	25
II.3.5. Rendement quantique externe EQE	25
II.3.6.Rendement de conversion en puissance $\eta$	26
II.3.7. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique	26
II.4 Modèles d'une cellule solaire	26
II.4.1. Modèle à une diode (simple exponentielle)	27
II.4.2 .Modèle à deux diodes (double exponentielle)	27
II.4.3. Modèle à trois diodes	28
II.5.Différentes structures des cellules photovoltaïques organiques	28
II.5.1.structure monocouche	28
II.5.2.structure bicouche	29
II.5.3.structure p-i-n	31
II.5.4.Structure inverse	31
II.5.5.structure des cellules tandem	33
II.6.Conclusion	34

## **CHAPITRE III**

### **Simulation et discussion des résultats**

III.1.Introduction	36
III.2.Résultats de la simulation et validation du modèle	37
III.2.1. Modèle de Simulation	37
III.2.2.L'obtention des courbes I-V et P-V en STC par le modèle de Simulink	38
III.3. Les influences des différents paramètres sur une cellule photovoltaïque organique	40
III.3.1. Influence de l'irradiation	40
III.3.2. Influence de la température	42
III.3.3. Influence de facteur d'idéalité (N)	44
III-3-4- Influence de résistance $R_S$	44
III.4. CONCLUSION	45

## **CONCLUSION GENERALE**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

# Introduction générale

---

Depuis de nombreuses années l'Humanité fait face à une demande en énergie de plus en plus croissante. Cette croissance, qui n'est que la conséquence directe de la croissance démographique mondiale et la mutation progressive des nombreuses économies primaires (basées sur l'agriculture) vers des économies secondaires (basées sur la production) dans les pays en voie de développement, entraîne une raréfaction des ressources naturelles utilisées pour répondre à ce besoin en énergie. Une très grande partie de ces ressources sont aujourd'hui fossiles : pétrole, charbon, gaz naturel. Bien que diversifiées et très abondantes, ces ressources ne sont pas inépuisables et l'exploitation qui en est aujourd'hui faite ne pourra durer plus d'un siècle. Mais la sûreté énergétique à long terme des pays du monde n'est pas le seul péril que fait encourir le recours aux énergies fossiles. Leur utilisation génère considérablement de dioxyde de carbone, gaz en partie responsable de l'effet de serre. Cet effet de serre met en péril de nombreuses populations de part le monde et la stabilité géopolitique même de certaines régions du globe pourrait être mise à mal par des phénomènes climatiques majeurs.

Pour répondre à ces préoccupations, de plus en plus d'états mettent en place des politiques incitant à l'économie de l'énergie, 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.

L'énergie photovoltaïque a connu un développement formidable en l'espace de 50 ans. La recherche spatiale a permis de financer les recherches initiales. La compréhension des phénomènes physiques qui a découlée de ces recherches a permis à de nombreux matériaux d'être développés avec succès par la suite, et petit à petit, avec la baisse du coût des matières utilisées et une meilleure maîtrise de la technologie, les panneaux photovoltaïques ont quitté l'espace pour être utilisés sur la Terre. Les politiques d'incitation gouvernementales ont permis l'essor de cette filière arrivée à maturité qui connaît depuis maintenant 20 ans des taux de croissance à deux chiffres.

Les matériaux utilisés dans un premier temps par ces cellules photovoltaïques étaient essentiellement inorganiques : aujourd'hui encore le matériau le plus couramment utilisé reste

## Introduction générale

---

le silicium, malgré la concurrence toujours plus rude des tellures de cadmium, des chalcogénures et autres Arséniure de Gallium.

Cependant dès le début des années 80, un nouveau type de matériau voit le jour : l'effet photovoltaïque peut en effet être obtenu à partir de molécules organiques. Ces nouveaux matériaux portent de grands espoirs : ils sont peu onéreux à fabriquer en grande quantité et ouvrent la voie à des volumes de production bien plus importants que leurs cousins inorganiques.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés par d'une cellule photovoltaïque organique inversée, La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres.

Au premier chapitre, on fait une description générale sur le gisement solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque et les avantages et les inconvénients de cette technologie.

Le deuxième chapitre a été consacré aux différentes structures et modèles des cellules photovoltaïques organiques, leur principe de fonctionnement, après on va présenter les caractéristiques courant – tension des cellules solaires organiques d'une manière générale.

Le chapitre trois est consacré à la simulation et caractérisation de cellule photovoltaïque organique inversée à la structure L'oxyde d'indium-étain (ITO) / ZnO / poly [N-90-heptadécanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(40,70-di-2-thiényl-20,10,30-benzothiadiazole)] (PCDTBT)/Al .Sous l'environnement Matlab pour déterminer les différents paramètres influent sur le fonctionnement de cette cellule, En fin, on termine par une discussion des résultats.



**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR**  
**L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE**  
**ORGANIQUE**

## **.1.Introduction**

Généralement, les semi-conducteurs inorganiques ont besoin des opérations à hautes températures dans leurs productions, qui sont très coûteuses, et difficiles à produire.

Les recherches scientifiques ont pu découvrir des nouveaux matériaux et Semi-conducteurs organiques. Le développement de cellules solaires à base de ces matériaux organiques ou de polymères est motivé par les avantages que présentent ces matériaux : Faible coût, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, technologies basse température, grandes surfaces, dispositifs souples. Donc Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des semi-conducteurs organiques. Tout d'abord, nous décrivons le rayonnement solaire, Etat de l'art et filières du photovoltaïque Nous montrerons ensuite ce qu'est un semi-conducteur organique en insistant sur les propriétés qui sont importantes dans le processus de conversion photovoltaïque.

## **I.2. Contexte énergétique mondial**

Le scénario de référence de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit que les besoins mondiaux en énergie primaire vont augmenter de 55 % entre 2005 et 2030, ceci dû notamment à une croissance exponentielle des pays émergents [1] Face à cette demande toujours croissante et à l'épuisement des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui restent néanmoins actuellement les sources primaires majoritaires de production d'électricité dans le monde (60%) le recours aux énergies alternatives est devenu une priorité. Après les crises pétrolières dans les années 1970, l'énergie nucléaire a été très fortement développée, notamment en France, où elle représentait encore en 2005 près de 80 % de la production d'électricité [2]. Cependant, les catastrophes de Three Mile Island (Etats-Unis) et plus récemment de Tchernobyl (Ukraine) associées au problème du retraitement des déchets radioactifs poussent certains gouvernements à diversifier progressivement leurs sources d'énergie. Le recours aux énergies dites « renouvelables » est donc devenu une évidence et des efforts considérables pour le développement de ces énergies ont été consentis depuis quelques années dans de nombreux pays.

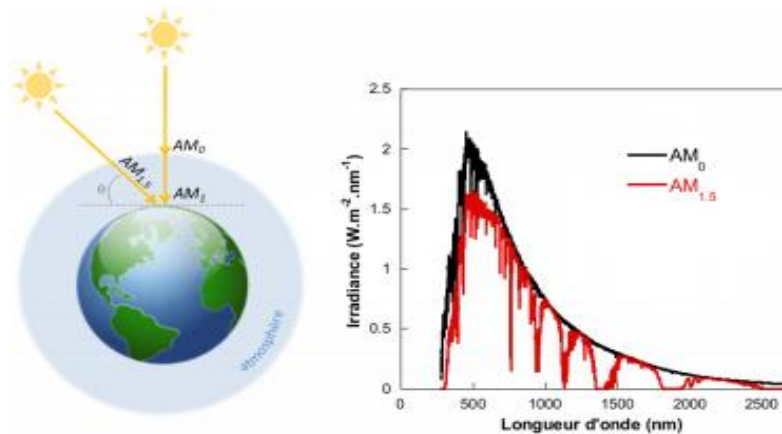
Les énergies renouvelables se définissent, selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), comme des énergies produites par un processus naturel (rayonnement solaire, marées, vent,...) et qui, contrairement aux énergies fossiles, sont inépuisables et n'émettent pas de gaz à effet de serre [2]. Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer par exemple l'énergie éolienne, l'énergie marémotrice, la géothermie ou encore l'énergie solaire photovoltaïque dont fait l'objet ce travail de recherche.

### I.3. Le gisement solaire

Contrairement aux autres énergies renouvelables, l'énergie solaire ne souffre pas de problème de gisement et est disponible partout sur notre planète. Le soleil est une étoile de 696000 km de rayon et de masse 1,99.1030 kg. Sa température intérieure, d'environ 15 millions de kelvins, lui permet à chaque seconde de transformer 700 millions de tonnes d'hydrogène, par réaction de fusion atomique, ce qui correspond à une énergie égale à 386 milliards de milliards de mégawatts [3]. Sous forme de rayonnement électromagnétique, une partie de cette énergie atteint la surface de la terre. Hors atmosphère, l'énergie moyenne reçue par la Terre est d'environ 5,5 kWh/m<sup>2</sup> par jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre. Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultra-violet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. Le rayonnement solaire au sol dépend donc de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux et n'est donc pas homogène sur toute la surface de la Terre. Pour tenir compte de ces différences, on introduit un coefficient x appelé masse atmosphérique ou nombre d'air masse (AMx) dont l'expression est :

$$\frac{1}{\sin \theta} \quad (1)$$

$\theta$  : représente l'élévation du soleil sur l'horizon (90 ° au zénith) comme le montre la Figure I.1. Ainsi lorsque le Soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7,8 km).

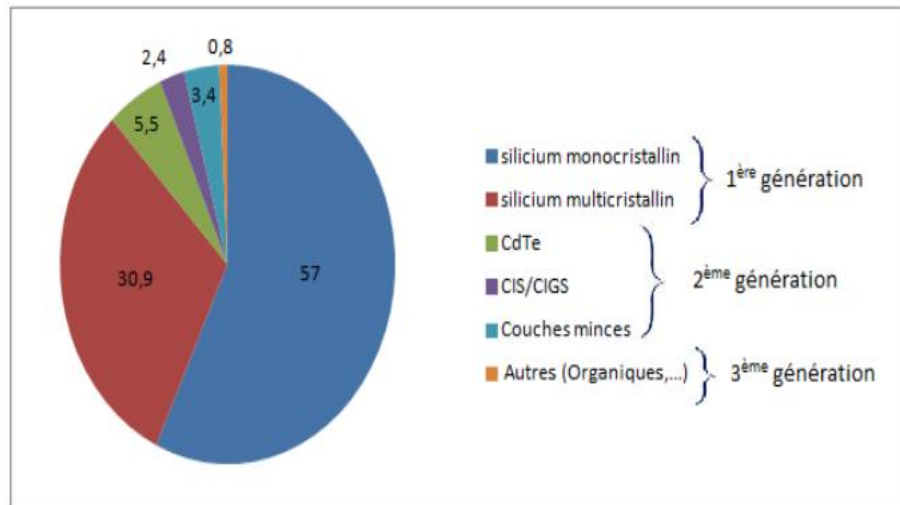


**Figure I.1** : Définition du nombre d'air masse (AM) et spectre d'émission du rayonnement solaire homologué par la Société Américaine de Tests et Matériaux (ASTM G173-03) [3]

#### 1.4. Etat de l'art et filières du photovoltaïque

Le principe de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, aussi appelé effet photovoltaïque, a été observé pour la première fois par Antoine Becquerel et présenté à l'académie des sciences en 1839. Il faut attendre 1954 pour que les chercheurs Chapin, Pearson et Prince mettent au point au sein des laboratoires de la compagnie Bell la première cellule photovoltaïque au silicium possédant un rendement atteignant les 6%. Cette cellule est suffisamment performante pour imaginer un développement et une application sous forme de panneaux solaires. En parallèle, l'industrie spatiale se développe fortement et recherche des solutions pour alimenter ses satellites. C'est ainsi que le premier satellite scientifique américain équipé de panneaux solaires est mis en orbite en août 1959. Depuis lors, de nombreux progrès ont été effectués et différentes générations de cellules solaires ont vu le jour.

Aujourd'hui, on peut regrouper les cellules solaires en 3 générations :



**Figure 1.2 :** Répartition (%) de la production de cellules par filière en 2011[4]

#### 1.4.1. La 1ère génération

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction p-n et sont généralement constituées de silicium jouant le rôle du matériau semi-conducteur d'une épaisseur d'environ 200  $\mu\text{m}$ . On distingue deux types de cellules :

- Les cellules en silicium monocristallin, pour lesquelles on obtient des rendements de conversions photovoltaïques record proche de 25%.

- Les cellules en silicium polycristallin, pour lesquelles les rendements sont de 20%. Ces cellules sont réalisées à partir des résidus de l'industrie électronique sous forme de lingots refroidis axialement puis découpés en plaquettes minces et débarrassés de leurs défauts recombinants par diffusion de phosphore ou d'aluminium. Le rendement de ce type de cellules est inférieur à celui de cellules monocristallines mais leur fabrication est légèrement moins coûteuse.

Cependant, la méthode de production des panneaux solaires basée sur les wafers de silicium consomme énormément d'énergie et reste donc très coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, un silicium d'une très grande pureté et environ la moitié des lingots de silicium est perdue lors de la mise en œuvre de cette méthode. Cette génération domine actuellement le domaine du photovoltaïque avec 88% de part de marché en 2011 (Figure 1.2) et le coût non négligeable de ces panneaux impacte significativement sur la place qu'occupe le photovoltaïque dans la production énergétique mondiale à l'heure actuelle.

### 1.4.2. La 2ème génération

Les couches minces inorganiques constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Le principe de ces cellules est d'utiliser un matériau absorbeur ayant un coefficient d'absorption optique supérieur à celui du silicium cristallin. Dans cette optique, l'utilisation des matériaux à gap direct est généralement favorisée et permet dans la pratique d'atteindre des épaisseurs beaucoup plus fines, de l'ordre de 1 à 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur (épaisseur du Si cristallin).

Cette génération permet de diminuer les coûts de production des dispositifs en réduisant la quantité de matières premières utilisées et en exploitant des procédés de fabrication moins chers. Les matériaux photo-actifs les plus utilisés en couche minces sont le tellure de cadmium (CdTe), le CIGS (Cuivre Indium Gallium Sélénium) et le silicium amorphe (a-Si).

- Les cellules « CdTe » (au tellure de cadmium) : Elles possèdent un rendement record de 17 % donc plus faible que ceux de 1ère génération. Cependant elles présentent une excellente résistance thermique, une meilleure absorption du rayonnement sur le domaine du visible et proche IR et une durée de vie qui pourrait dépasser les 25 ans. Un des freins à leur développement à grande échelle est l'utilisation de matériaux toxiques (Cadmium et tellure), qui nécessiteront un processus de recyclage certainement coûteux lors de leur démantèlement.

- Les cellules « CIGS » : Ces cellules possèdent un rendement record de 20% donc supérieures à celle de CdTe mais nécessitent des méthodes de fabrication plus contraignantes et donc plus coûteuses. De plus, la structure la plus souvent utilisée (Substrat/Mo/CIGS/CdS/ZnO/ZnO:Al/Grille Ni/Al) comporte une couche CdS comme couche tampon (50 nm) et pose le même problème de toxicité que pour les cellules CdTe. Par ailleurs, d'importants efforts sont faits à l'heure actuelle dans la recherche et le développement de couches tampon alternatives telles que Zn(O,S), (Zn,Mg)O,  $\text{In}_2(\text{S,Se})_3$  et autres. La présence d'indium pose aussi des problèmes à plus ou moins long terme dus à son utilisation intensive dans le domaine de la micro-électronique. Le prix encore compétitif de ce matériau à l'heure actuelle va être amené à augmenter significativement dans les années à venir. Nous y reviendrons par la suite au niveau des électrodes transparentes.

- Les cellules à base de silicium amorphe : Elles possèdent un rendement record de 10% assez faible en comparaison des deux autres mais ont l'avantage de revenir moins chères au niveau du coût de fabrication que les deux technologies précédentes ( $< 2\text{€}/\text{W}$  contre plus 2 à 4  $\text{€}/\text{W}$  pour le CIGS et le CdTe).

En 2011, cette génération occupe environ 11% de part de marché et les études menées par l'EPIA ont montré l'intérêt de ces solutions photovoltaïques. En particulier, la possibilité

de les utiliser sur des substrats flexibles et dans des conditions d'éclairage diffus permet à cette génération de se positionner sur des niches économiques non couvertes par le silicium. Cependant, la complexité de fabrication, l'utilisation de matériaux toxiques et le manque de recul font que ces technologies ne sont pas encore arrivées à maturité contrairement à celles de 1<sup>ère</sup> génération.

### 1.4.3. La 3<sup>ème</sup> génération

Actuellement, nous en sommes à la troisième génération de cellules solaires. Cette génération répond à un besoin d'ordre économique. Elle a pour objectif principal de réduire le prix du kWh par l'amélioration des rendements ou par la diminution du coût de fabrication. Dans cette optique, différents concepts sont mis en œuvre :

- Les cellules multicouches, de type tandem [4][5] Le but est d'améliorer les performances en augmentant la plage d'absorption des dispositifs en combinant des cellules en série n'absorbant pas dans le même intervalle de longueur d'onde.

- Les cellules à réseaux d'antennes [6] Elles permettraient d'utiliser les photons de basse énergie qui, pour le moment, ne sont pas mis à contribution par les autres types de cellules.

- Les cellules à électrons chauds [7] (financées par le département américain de l'énergie) : Elles seraient basées sur la capture des électrons de haute énergie avant que ceux-ci ne se déséxcitent en libérant leur énergie sous forme de chaleur. Certains voient ainsi une possibilité d'augmenter le rendement d'un facteur deux.

- Les cellules à base de pérovskite : Depuis 2006, des études sont menées pour comprendre les phénomènes physiques derrière le rendement des pérovskites et les performances intéressantes obtenues. En octobre 2013, un premier travail effectué à la NTU à Singapour en collaboration étroite avec Michael Gratzel et publié dans Science met en évidence les phénomènes intrinsèques des pérovskites et a permis d'obtenir une cellule avec un rendement de 15%. A l'heure actuelle, le record est détenu par l'université Korean Research Institute of Chemical Technology (KRICT) à Saïgon qui a réussi à obtenir une cellule de 17,9% de rendement.

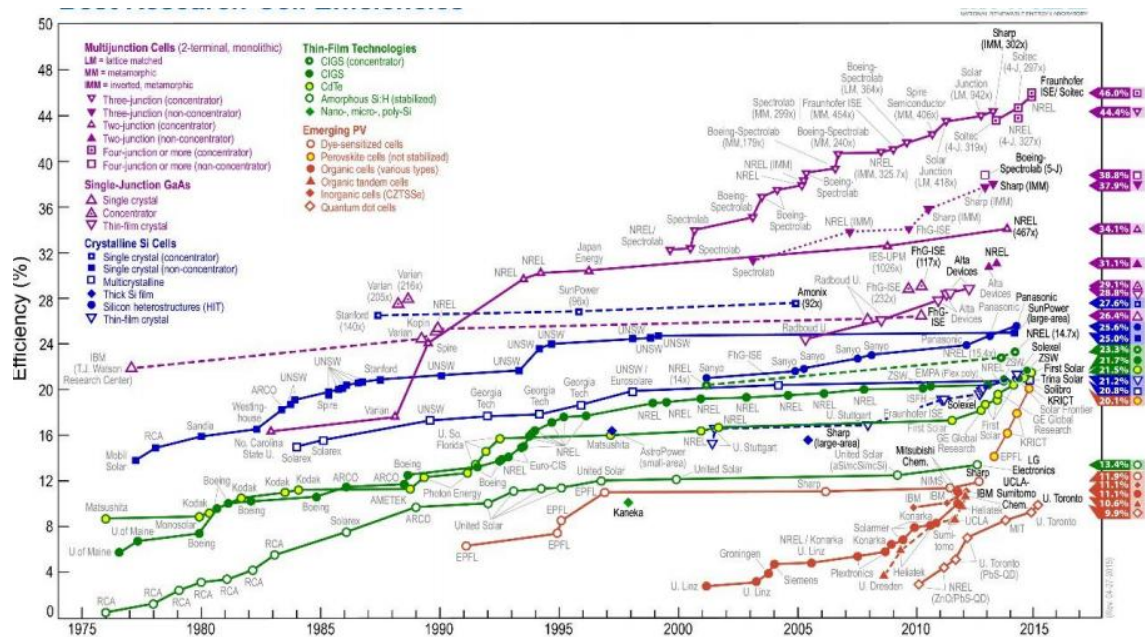
- Le photovoltaïque organique : On peut distinguer 3 sous filières organiques

- Les cellules Grätzel ou cellules sensibilisées par colorant qui ont atteint un rendement record de 11,4 % fin 2012.

- Les cellules à base de petites molécules [8].

- Les cellules à hétérojonction en volume Polymère/fullerène.

Cette génération est encore au stade expérimental et se positionnera sur le marché en tant que solution complémentaire au silicium plutôt qu'en tant qu'alternative. Les rendements resteront toujours inférieurs à ceux de 1ère génération mais la possibilité de produire des dispositifs sur substrat flexible par technologie d'impression (Roll to roll, jet d'encre,...) et leur capacité à fonctionner sous éclairage diffus sans utiliser des matériaux toxiques comme la 2ème génération font d'eux une solution innovante.



**Figure I.3 :** Rendement record toutes filières confondues certifiées par l'organisme NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2014) [8]

La figure I.3 montre les rendements record de cellules toutes filières confondues. Malgré que le photovoltaïque organique soit l'une des filières les plus récentes, on observe une forte progression du rendement des dispositifs photovoltaïques organiques depuis 2005.

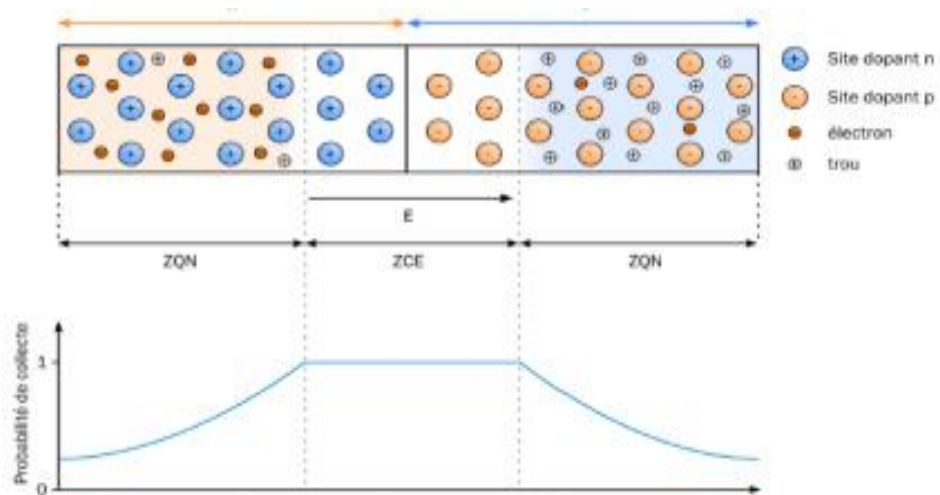
### I.5. Notions de base sur le photovoltaïque

#### I. 5.1. La jonction p-n : « cas de l'inorganique »

La production d'énergie photovoltaïque est basée sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. Dans le cas des cellules solaires inorganiques, lorsque la cellule est éclairée, un champ électrique est produit au niveau de la jonction p-n. Cette dernière est formée à partir de deux semi-conducteurs inorganiques dopés de type n et p intercalés entre deux électrodes. La création de la jonction conduit à un alignement des niveaux de Fermi des deux matériaux ce qui permet le transfert des charges au niveau de l'interface : des électrons peuvent circuler du semi-conducteur de type n vers le semi-conducteur de type p afin de se recombiner avec les

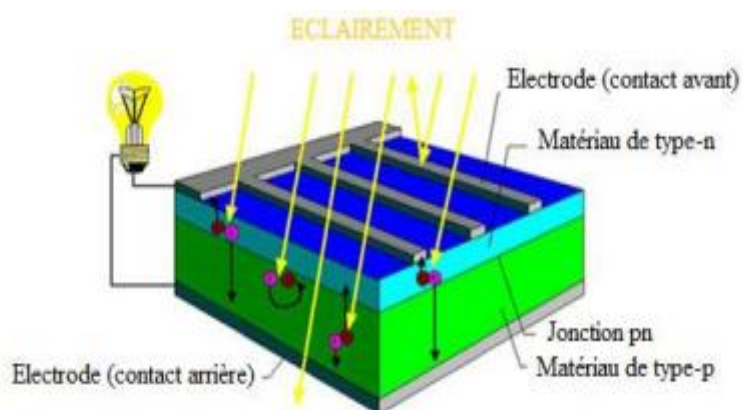


charges positives (trous), et réciproquement pour les trous. Au niveau de l'interface, une zone appelée charge d'espace est créée (ZCE) et correspond à un volume où le champ électrique sépare les charges de telles sortes que le taux de collecte par les électrodes soit de 100%. De part et d'autres de cette région, une zone quasi-neutre (ZQN) se forme. La probabilité de collecte dépend de la longueur de diffusion des charges (paramètre propre au semi-conducteur) et diminue avec l'éloignement par rapport à la ZCE. La figure. I.4 permet de visualiser le champ électrique dans une jonction p-n et la probabilité de collecte des charges suivant la position par rapport à la ZCE.



**Figure I.4** : Représentation du champ électrique dans une jonction p-n et probabilité de collecte [8]

Généralement, dans une cellule inorganique, seul l'un des deux matériaux composant la jonction p- n est utilisé comme matériau absorbeur de lumière. Ces cellules sont conçues de telles sortes à favoriser l'absorption de la lumière ce qui se traduit par une couche absorbeur beaucoup plus épaisse que l'autre couche formant la jonction. La structure de base d'une cellule solaire inorganique est représentée dans la figure I.5.



**Figure I.5** : Représentation du fonctionnement d'une cellule inorganique avec un absorbeur de type p [9]

Ce type de jonction se retrouve dans les cellules des deux premières générations de cellules solaires. Les mécanismes au sein de la jonction étant relativement bien connus, les travaux portant sur le photovoltaïque organique se sont fortement inspirés de cette dernière pour débiter et se développer depuis lors.

### **I.5.2. Les semi-conducteurs organiques**

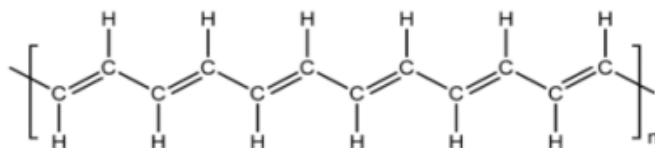
Comme nous avons pu le voir dans l'état de l'art, les semi-conducteurs organiques se classent en deux catégories : les petites molécules et les polymères conjugués. Les propriétés optiques et électriques de ces matériaux sont proches et c'est la technique de dépôt qui différenciera les uns des autres. Contrairement à leur homologue inorganique, les matériaux organiques ne possèdent pas de porteurs minoritaires. La nature des semi-conducteurs est définie par leur affinité électronique : les semi-conducteurs organiques de type p (donneur d'électrons) ont une faible affinité électronique alors que ceux de type n (accepteur d'électrons) ont une forte affinité électronique.

#### **I.5.2.1. Les systèmes conjugués**

La caractéristique d'un polymère semi-conducteur organique est sa structure carbonée basée sur l'alternance de simple liaison (C-C) et de double liaison (C=C) appelées respectivement liaison  $\sigma$  et  $\pi$ .

La présence de nuage d'électrons délocalisés des liaisons  $\pi$  facilite le transport des électrons le long du système conjugué. La progression spatiale de la conjugaison ne peut avoir lieu que

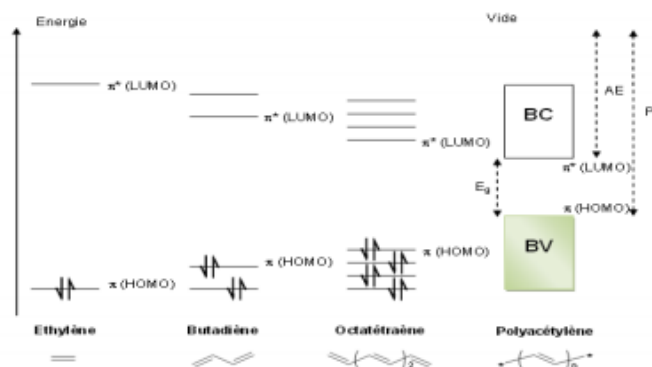
dans un plan du fait de la géométrie des orbitales 2pz mises en jeu. La délocalisation des électrons  $\pi$  provoque une rigidité au sein de la molécule et une distorsion de la planéité du système global. Il en résulte une diminution de la longueur de conjugaison [10].



**Figure I.6** : Segment du polymère conjugué trans-polyacétylène[10]

Les orbitales moléculaires  $\sigma$  (liantes) et  $\sigma^*$  (antiliantes) ont un grand écart énergétique (bande interdite) dû à l'important recouvrement des orbitales. A l'inverse, les orbitales  $\pi$  et  $\pi^*$  ont une différence énergétique relativement faible car le recouvrement latéral induit une faible interaction. L'orbitale liante  $\pi$  de plus haute énergie est toujours pleine car elle contient les électrons à l'état fondamental : elle est appelée HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital). L'orbitale moléculaire anti-liante  $\pi^*$  de plus basse énergie est vacante et constitue la LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Les bandes HOMO et LUMO ainsi établies permettent alors de définir l'énergie d'oxydation de la molécule ou potentiel d'ionisation (PI), l'affinité électronique (AE) et la largeur de la bande interdite ou band gap ( $E_g$ ) comme étant la différence d'énergie entre les bandes permises.

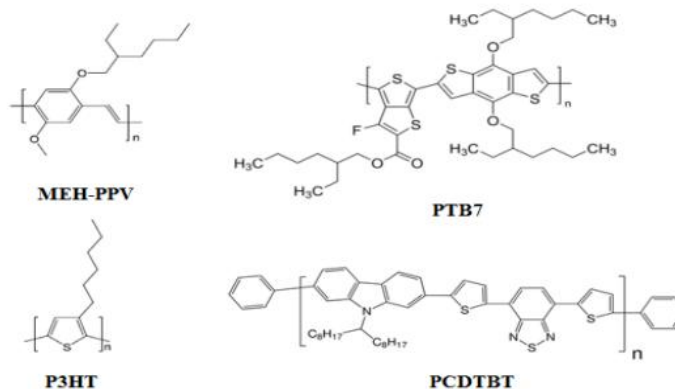
On peut voir sur la figure I.7 que l'augmentation de la longueur de conjugaison conduit à une diminution du gap et ainsi à une plage d'absorption plus importante de la molécule. Typiquement, le gap (bande interdite) formé par la différence entre les bandes d'énergies HOMO-LUMO est de l'ordre de 2-3 eV pour des polymères  $\pi$ -conjugués.



**Figure I.7** : Evolution des orbitales moléculaires  $\pi$  et  $\pi^*$  en fonction de l'augmentation de la longueur de conjugaison [11]

### I.5.2.2. Les polymères $\pi$ -conjugués

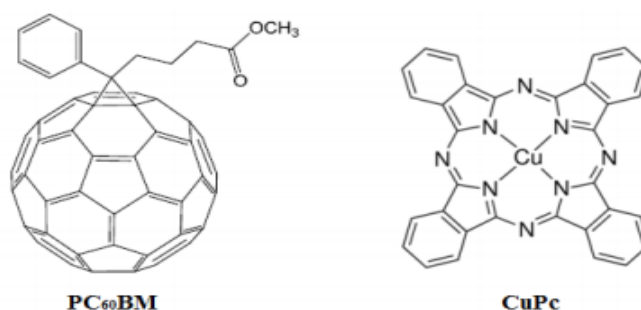
Un polymère est une macromolécule, obtenue par la répétition d'un motif appelé monomère. De par leur masse moléculaire élevée, on ne les dépose que par voie liquide. Techniquement, les polymères sont mis en solution sous forme d'encre et déposés afin d'obtenir des épaisseurs de l'ordre de 100- 200 nm. Au sein du laboratoire, nous les déposons à la tournette (spin-coating) et par l'intermédiaire de notre partenaire Disasolar, nous avons eu accès à des dispositifs déposés par impression jet d'encre. La figure I.8 représente la structure de quelques polymères couramment utilisés à l'heure actuelle.



**Figure I.8** : Structures des polymères conjugués couramment utilisés dans les cellules solaires organiques[11]

### I.5.2.3. Les petites molécules

Les petites molécules peuvent être déposées par sublimation thermique sous vide, comme le C60, contrairement aux polymères. Certaines petites molécules peuvent aussi être déposées par voie liquide comme par exemple le PC60BM ou les CuPc. La figure I.9 présente la structure de petites molécules utilisées dans la réalisation de cellules solaires organiques.



**Figure I.9** : Structures de petites molécules couramment utilisées dans les cellules solaires organiques [12]

## **I.6. Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques**

### **I.6.1. Avantages**

- ✓ Légèreté et flexibilité : les semi-conducteurs organiques sont très légers, ce qui peut être pratique pour des installations de grandes envergures. En plus, ils sont moins fragiles que les semi-conducteurs inorganiques, qui doivent être déposés sur des substrats plans et rigides.
- ✓ La mise en forme à l'aide de procédés en solution : particulièrement pour les polymères, permet de couvrir de grandes surfaces.
- ✓ Plusieurs procédures de fabrication: de couches minces à base de polymères [13] .
- ✓ spin-coating, drop-coating, injek-printing, roll-to-rol process, screen printing, pad-printing, doctor blading, spray-coating sont à l'étude pour les futures développements industriels. De plus, ces procédés de fabrication ne nécessitent pas les très hautes températures qu'exige la production du silicium cristallin, et n'implique qu'un faible coût.
- ✓ Dissociation excitonique plus efficace : dans les réseaux interpénétrés, 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, et ceci quelque soit la direction prise durant sa diffusion.
- ✓ Facilité de fabrication : les cellules PV organiques peuvent être produites avec relativement peu de moyens en laboratoire, ce qui fait que leur processus de fabrication est facile et économique.
- ✓ Auto-assemblage : en effet, le génie chimique peut mettre au point des molécules qui s'auto-assemblent. La preuve de cela est qu'en 2001, Shmidt - Mende réalisèrent une cellule solaire auto-assemblée à base de cristaux liquides de hexabenzocoronène et pérylène [14].
- ✓ Essor de l'électricité organique : les avancées scientifiques et technologiques réalisées dans ce domaine peuvent présenter un avantage majeur pour la filière du photovoltaïque organique qui se base essentiellement sur les études et les recherches autour de matières semi-conducteur organiques.
- ✓ Solubilité : étant donné que les matériaux organiques sont solubles, on peut donc les obtenir sous forme liquide (encres, peintures) et donc les imprimer sur des matériaux divers.
- ✓ Transparence : il est possible de créer des cellules transparentes, qui ouvrent de nombreuses possibilités.

1. Utilisation bifaciale : l'énergie solaire peut être captée par les deux faces, donc il est possible d'utiliser ces cellules dans un environnement de faible luminosité.

2. Insertion dans des éléments architecturaux : ces cellules pourront être insérées dans des menuiseries (fenêtres, porte,...) ou sur des éléments (toitures, parois,...).

3. Utilisation multicouche : plusieurs couches transparentes peuvent être superposées, ce qui augmentera l'efficacité des cellules.

### **I.6.2.Inconvénients**

☒ Absorption limitée : l'énergie de la bande interdite des polymères semi-conducteurs est généralement supérieure à 2eV. Cette énergie correspond à une longueur d'onde d'absorption maximale de 620 nm ce qui limite l'absorption du rayonnement solaire à 30%. En plus, on peut aussi avoir des pertes dues à la transmission et à la diffusion dans l'anode.

☒ Limite du rendement de collecte : les cellules photovoltaïques basées sur une hétérojonction dans le volume sont limitées par le transport des charges. La recombinaison électron-trou s'opérant dans le volume ne permet seulement qu'aux charges proches des électrodes de contribuer au photocourant.

☒ Mobilité réduite: la mobilité des porteurs de charge est très faible dans les matériaux organiques plutôt que dans les matériaux inorganiques.

☒ Instabilité dans le temps : une cellule photovoltaïque organique doit être capable de produire de l'électricité pendant dix ans, au moins sans baisse de rendement significative, afin d'obtenir des dispositifs concurrentiels au silicium [15]. Ce qui n'est pas le cas pour les cellules photovoltaïque organiques. La durée de vie des cellules solaires est le temps que prend le dispositif sous illumination continue pour atteindre la moitié de sa valeur initiale de rendement de conversion. La durée de vie espérée pour les applications peut varier de 5000 heures (applications de niche, sur des appareils nomades), à 20000 heures pour une intégration dans l'habitat. Les paramètres suivants influent sur La durée de vie des cellules photovoltaïque organique [16].

☒ Vieillessement intrinsèque des matériaux : c'est le vieillissement du matériau hors exposition à l'eau et à l'oxygène, mais sous éclairage. La dégradation est appelée photolyse.

☒ Vieillessement extrinsèque des matériaux: O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O peuvent réagir avec les matériaux organiques et les métaux des électrodes. Le principal mécanisme de vieillissement est la photo-oxydation.

☒ Vieillessement de la cellule : ce vieillissement prend en compte la dégradation des interfaces suite à la mise en contact de matériaux différents (couche active-électrode par exemple) avec pour conséquence la diffusion d'impuretés de part et d'autre de l'interface. Ces dégradations sont en général accélérées en présence de l'eau, de l'oxygène et sous illumination. Une autre cause provient du fonctionnement même du dispositif par le biais de la

dissipation thermique dans la cellule solaire (due à l'exposition au soleil et au passage du courant dans la cellule solaire).

- ☒ Problème écologique : à cause de son faible.
- ☒ coût, plusieurs appareils seront fabriqués pour être jetables, qui va poser un problème d'environnement.

### **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général. Ce dernier consacré à l'énergie photovoltaïque organique. Où on a tenu tout d'abord à rappeler l'histoire de l'énergie photovoltaïque ensuite nous avons exposé une petite définition sur le gisement ainsi que les propriétés structurales et électroniques des polymères semi-conducteurs et conducteurs.

Nous avons fourni une explication sur le transport et la collection des charges jusqu'aux électrodes. On termine ce chapitre par la présentation des avantages et inconvénients des cellules solaires organiques.

**CHAPITRE II**

**CARACTÉRISATIONS DES  
CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES  
ORGANIQUES**



## II.1.Introduction

Les semi-conducteurs organiques sont en passe de s'imposer comme les matériaux clef de l'électronique à faible coût. Ils présentent la possibilité d'être déposés en couches minces par des procédés de mise en forme peu onéreux. Leurs applications principales sont les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs), les cellules photovoltaïques organiques et les transistors organiques.

La recherche et le développement de cellules solaires à base de matériaux organiques ou de polymères est motivée par les avantages que présentent ces matériaux faible coût, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, technologies basse température, grandes surfaces, dispositifs souples. Cette solution permettrait de plus de traiter selon une même technologie le substrat (support mécanique), le matériau actif où a lieu la conversion photovoltaïque et l'encapsulation.

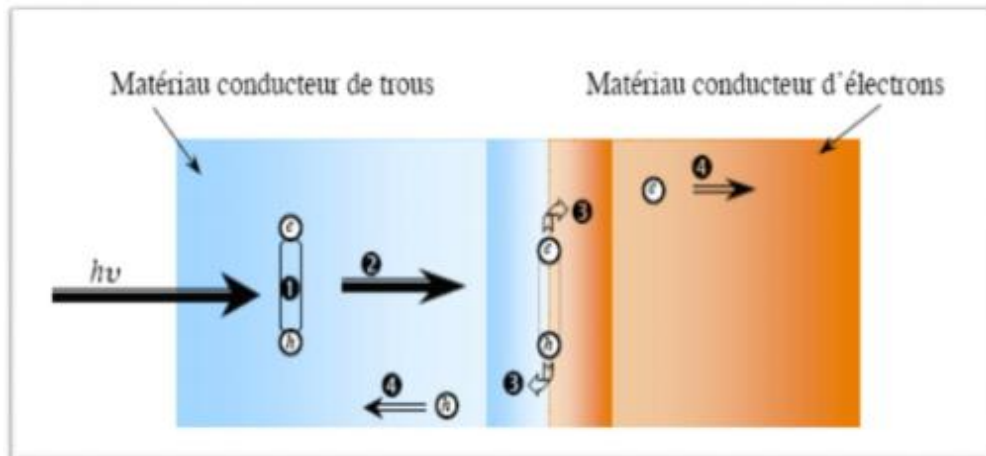
Dans ce chapitre nous présentons premièrement Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques suivie Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules solaires organiques, le schéma électrique équivalent ainsi que le fonctionnement de ces cellules. Enfin nous abordons différentes structures des cellules photovoltaïques organiques.

## II.2. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques

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 [17]. Ces différentes étapes sont détaillées ci-après et illustrées par la Figure II.1.

### II.2.1. Absorption des photons – création des excitons

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 mutuelle. Le couple électron-trou, électriquement neutre, est alors appelée exciton (Figure II.1:1) 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. Dans les matériaux inorganiques, la valeur de l'énergie de liaison  $E_{Lex}$  est très faible (14,7 meV pour le silicium) et l'énergie thermique est suffisante, à température ambiante, pour séparer les deux charges liées. Il n'en est pas de même dans les matériaux organiques puisque les valeurs de  $E_{Lex}$  sont de l'ordre de plusieurs centaines de meV.



**Figure II.1** : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique [18]

Il en résulte une difficulté à dissocier les charges qui restent liées à température ambiante. La présence d'un champ électrique local, est requise pour que s'exerce une force capable de surpasser l'attraction coulombienne. Pour y parvenir, la présence de deux matériaux avec des niveaux énergétiques différents est nécessaire. L'un est appelé matériau « donneur » (ou de type p) pour la capacité qu'il a à donner un électron, l'autre matériau étant appelé « accepteur » (ou de type n) pour la capacité qu'il a à accepter un ou plusieurs électrons. En outre, la durée de vie d'un exciton  $\tau_{\text{exc}}$  est de quelques nanosecondes. Faute de dissociation, l'électron rejoint le niveau HOMO en cédant son énergie de manière radiative (photoluminescence) ou non-radiative (chaleur) [17].

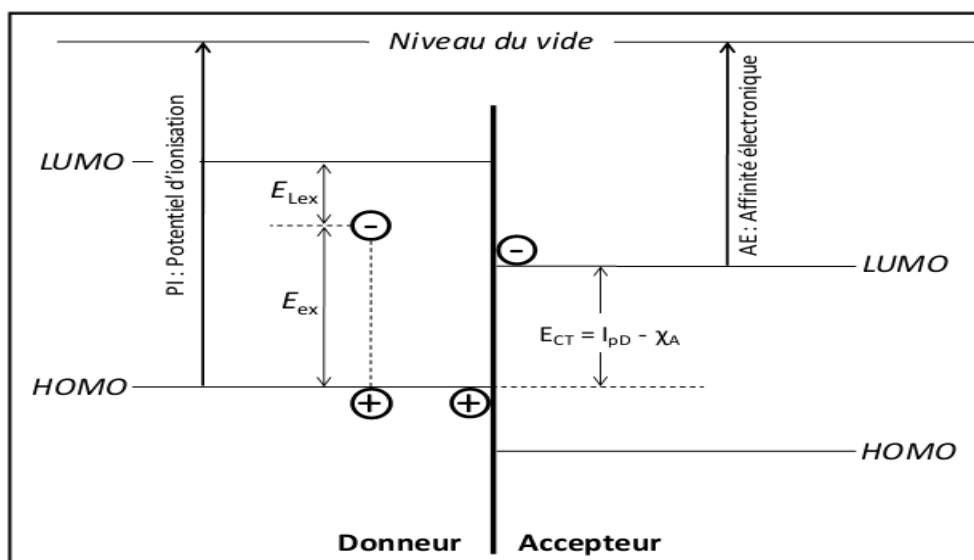
### II.2.2. Diffusion des excitons

Les excitons ont une durée de vie  $\tau$  très courte, de l'ordre de la nanoseconde. Si rien ne se produit pendant ce temps  $\tau$ , 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 (Figure II.1: 2).

Si la valeur de  $L_D$  peut atteindre  $4 \mu\text{m}$  dans certains matériaux inorganiques présentant des configurations particulières (des fils quantiques d'arséniure de gallium [18], elle est beaucoup plus courte dans les organiques avec une valeur de  $5,5 \text{ nm}$  pour les polythiophènes [19]. Pour que les excitons puissent atteindre un site de dissociation (la jonction donneur-accepteur), il faut qu'ils soient générés à une distance inférieure à  $L_D$  de cette interface.

### II.2.3. Dissociation des excitons

Les conditions de dissociation peuvent être exprimées à partir du diagramme énergétique des matériaux mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques. La Figure II.2 représente la jonction de type donneur-accepteur. La lumière est absorbée par les deux matériaux et des excitons sont créés des deux côtés de la jonction. Ceux qui apparaissent du côté donneur ont une énergie  $E_{ex}$  qui est inférieure à la différence entre l'énergie de la LUMO et celle de la HOMO d'une valeur égale à l'énergie de liaison  $E_{Lex}$ . Après dissociation, l'électron passe dans l'accepteur tandis que le trou reste dans le donneur (Figure II.1:3). On obtient alors une paire de polarons : un polaron de charge positive dans le donneur et un polaron de charge négative dans l'accepteur. 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 de la paire de polarons  $E_{CT}$  est inférieure à l'énergie initiale de l'exciton  $E_{ex}$  [20]. Un raisonnement analogue montre que la même condition prévaut pour les excitons générés du côté accepteur de la jonction. Pour obtenir une dissociation des excitons efficace, il est donc indispensable de contrôler les niveaux énergétiques des matériaux. L'ingénierie moléculaire, permet, dans certaines limites, de choisir ces valeurs par modification de la structure.



**Figure II.2** : Conditions de dissociation de l'exciton ( $E_{ex} > PI - AE$ ) [20]

### II.2.4. Transport des porteurs de charges

Le transport des porteurs de charges jusqu'aux électrodes est assuré par le donneur d'électrons pour les trous et par l'accepteur d'électrons pour les électrons. Différencier ainsi les matrices de transports permet d'éviter les phénomènes de recombinaison. Dans le cas des diodes de type Schottky (Figure II.1:4), où un seul matériau sert de transporteur, ces

phénomènes de recombinaison sont extrêmement importants et entraînent des performances médiocres.

La mobilité des trous dans le matériau donneur d'électron et la mobilité des électrons dans le matériau accepteur d'électron doivent être les plus grandes possibles afin d'assurer le transport des porteurs de charge au mieux. Elles doivent également être proches afin d'assurer une bonne balance des charges. Une plus grande organisation moléculaire est souvent facteur de bonnes mobilités, mais les impuretés, en jouant le rôle de piège (centre de recombinaisons) peuvent aussi influencer sur ces valeurs de façon négative [21].

### **II.2.5. Collecte des porteurs de charge**

Le choix des électrodes chargées de collecter les porteurs de charges est primordial pour obtenir de bonnes performances photovoltaïques. En effet, les travaux de sortie de ces électrodes doivent permettre un contact ohmique pour les électrons à l'interface accepteur/cathode et pour les trous à l'interface donneur/anode. Ces électrodes doivent de plus être bloquantes pour les porteurs de charges opposés à ceux qu'elles doivent collecter (électron pour l'anode et trou pour la cathode).

La structure même des cellules photovoltaïques organiques impose qu'une des deux électrodes soit transparente pour pouvoir laisser passer la lumière jusqu'à la couche active.

Or les matériaux qui se prêtent le mieux à la collecte des charges sont les métaux : leur conductivité est élevée, ils sont faciles d'accès, facilement déposables par évaporation sous vide et donnent accès à toute une gamme de travaux de sortie.

#### **a)-Collecte des électrons**

L'Aluminium, l'argent ou encore le calcium ont des travaux de sortie faibles (4,28 ; 4,26 ; 2,87 eV respectivement) ce qui les désignent comme collecteurs d'électrons. Mais si les métaux sont les candidats tous désignés pour jouer le rôle de collecteurs de charges, ils présentent en outre l'inconvénient d'être opaques si l'on veut des conductivités suffisantes, rendant la réalisation d'électrodes transparentes efficaces très difficile à réaliser.

#### **b)-Collecte des trous**

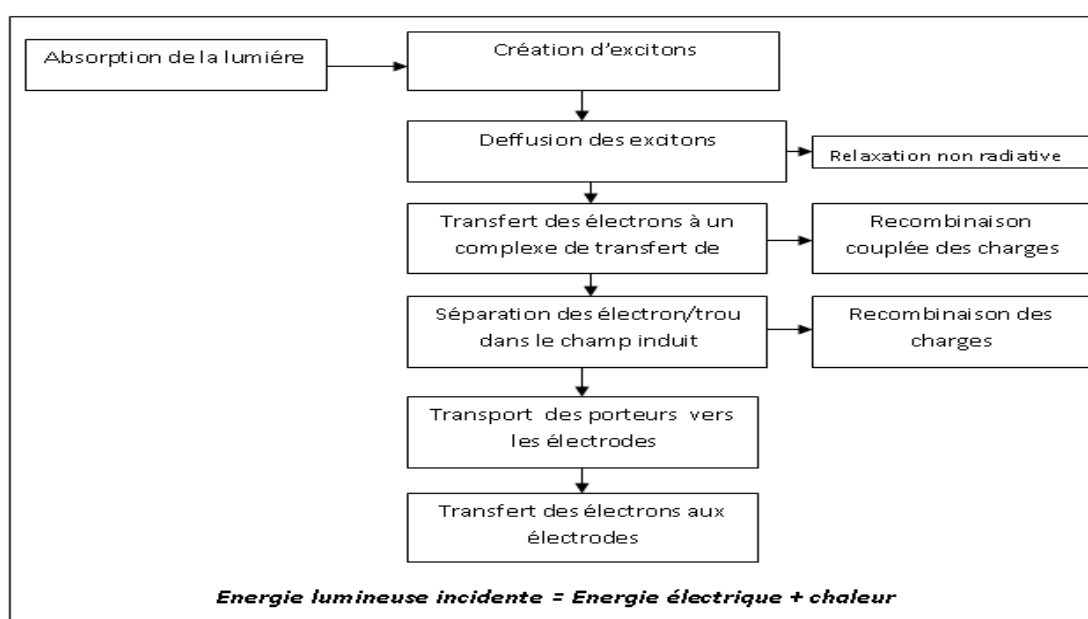
L'ITO (oxyde d'indium et d'étain) est un oxyde métallique qui, en plus de conduire le courant, offre la propriété d'être relativement transparente à partir de 350nm. Son travail de sortie (4,9eV) en fait, de plus, un excellent candidat pour collecter les trous.

Il est déposable par pulvérisation cathodique, et ce sur n'importe quel substrat, y compris souple. C'est le matériau le plus couramment utilisé pour collecter les trous dans le cas des

cellules photovoltaïques organiques, ou pour les injecter dans le cas des diodes électroluminescentes organiques (OLED) [22]. Cependant l'ITO présente certains inconvénients. C'est un matériau cassant : utilisé dans les cellules organiques (réputées pour leurs possibles applications souples) pour ses propriétés optiques et électriques avantageuses, il est ironiquement le facteur limitant la souplesse de ces cellules. Sa disponibilité est liée à celle du zinc : en effet la production d'indium dépend du minage de la sphalérite, elle même extraite de la terre, car minerais de zinc. Cela mène à une situation où l'offre en indium est dictée par la demande en zinc. Or la demande en indium ne cesse d'augmenter à cause de l'industrie des écrans plats.

D'autres oxydes métalliques comme les oxydes de zinc dopés à l'Aluminium sont en cours de développement et offrent des propriétés optiques et électriques similaires, mais en présentant l'avantage de ne plus utiliser d'indium. Les polymères conducteurs comme le poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(4-styrenesulfonate) plus communément appelé PEDOT:PSS ou la polyaniline (PANI) offrent l'avantage de ne pas nécessiter de technologie du vide pour être déposés (on peut les déposer sous forme de solutions aqueuses ou en solvant organique), sont beaucoup moins chers mais moins conducteurs. On peut en citer l'émergence d'électrode utilisant des nanotubes de carbone[23] qui offrent des performances prometteuses et de bas coûts de production, avec quelques incertitudes quant à leur sûreté sanitaire.

Ce diagramme de la Figure II.3. Servira de trame aux paragraphes suivants, consacrés à la présentation des différentes étapes prenant part à l'effet photovoltaïque.

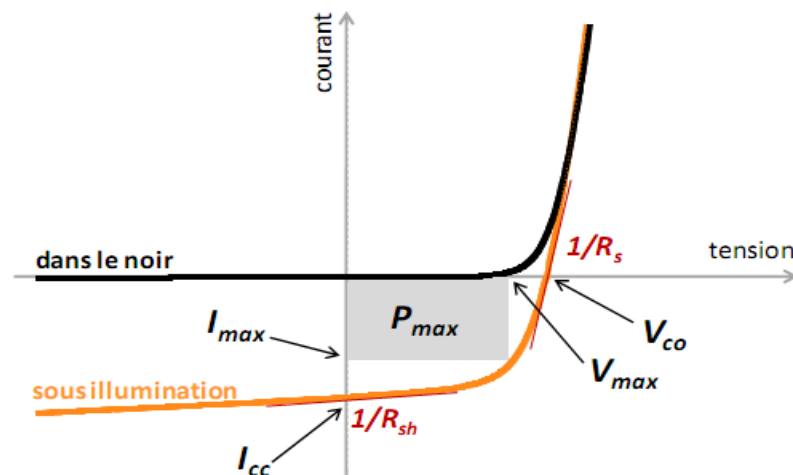


**Figure II.3** : Principaux mécanismes mis en jeu lors de l'effet photovoltaïque [23]

### II.3. Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules solaires organiques

#### II.3.1. Caractéristique courant-tension I (V)

La Figure II.4 représente une caractéristique courant-tension I(V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme (FF) du composant.



**Figure II.4:** Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [24]

#### II.3.2. Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V = 0$  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 [24].

#### II.3.3. Tension à 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. De plus, les pertes de charges aux interfaces matériaux-électrodes peuvent également affecter la valeur de la  $V_{co}$  [20]. Enfin, cette valeur décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [24].

### II.3.4. Facteur de forme FF

Le facteur de forme FF rend compte de la qualité de la forme des courbes I(V). Il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (02)$$

Où  $I_{\max}$  et  $V_{\max}$  représentent respectivement le courant et la tension du point de fonctionnement qui permet d'extraire le maximum de puissance ( $P_{\max}$ ) de la cellule (Figure II.4). Plus la valeur de FF est grande, plus la caractéristique I(V) ressemble à celle d'une source idéale de courant  $I_{cc}$  tant que  $V < V_{co}$  et à une source idéale de tension pour  $I > I_{cc}$ . dans le cas limite  $FF \rightarrow 1$ , la puissance extraite de la cellule est maximale [25].

### II.3.5. 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 (absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette valeur s'appelle le rendement quantique interne, IQE (Internal Quantum Efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (External Quantum Efficiency) et se définit comme suit :

$$\frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (03)$$

Où  $J_{cc}$  est la densité de courant de court-circuit,  $\varphi$  le flux lumineux incident,  $e$  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 célérité de la lumière dans le vide et  $\lambda$  la longueur d'onde). Le rapport  $\frac{\varphi(\lambda)}{\varphi(\lambda)}$  est appelée «réponse spectrale» de la cellule, elle est notée  $SR(\lambda)$ . Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit :

$$EQE = S(\lambda) \times hce\lambda \quad (04)$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, et de l'efficacité de la collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident.

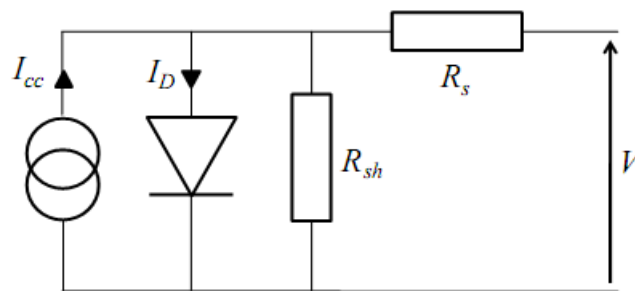
### II.3.6. Rendement de conversion en puissance

$\eta$  Le rendement de conversion en puissance  $\eta$  des cellules photovoltaïques se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF \times I_{cc} \times \frac{V_{oc}}{P_{in}} \quad (05)$$

### II.3.7. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (Figure II.5) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant.



**Figure II.5 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique [25]

$R_s$  est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ).  $R_{sh}$  est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ ). En général, la valeur de  $R_{sh}$  est plus grande que celle de  $R_s$  d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenter  $R_{sh}$ . Le cas idéal est représenté par  $R_{sh}$  égale à l'infini et  $R_s$  égale à zéro [25].

### II.4 Modèles d'une cellule solaire

Dans la littérature, on peut trouver des différents circuits équivalents utilisés pour l'étude et la modélisation de la cellule solaire organique. Les modèles les plus importants sont cités ci-dessous :



### II.4.1 Modèle à une diode (simple exponentielle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

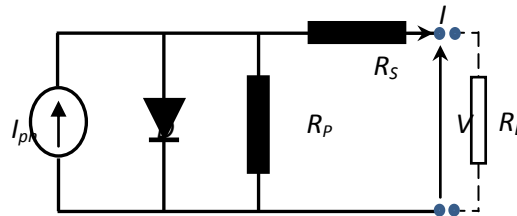


Figure II.6: Schéma équivalent de modèle PV à diode.

La résistance shunt  $R_p$  est expliquée l'existence de shunts à travers l'émetteur causés par les défauts. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [5].

### II.4.2 Modèle à deux diodes

Le modèle photovoltaïque à deux diodes est représenté par le circuit électrique présenté dans la figure (II.7), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série [26].

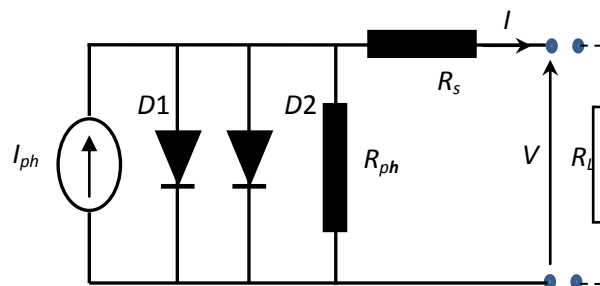


Figure II.7: Schéma équivalent de modèles PV à deux diodes

Les sept paramètres inconnus de ce modèle sont:  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ . L'équation générale de ce modèle est :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{rl} \quad (06)$$

$$I_{D1} = I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) \quad (07)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{\gamma_2 k T_C} \right) - 1 \right) \quad (08)$$

Remplaçant (07) et (08) dans (06) nous obtenons :

$$I = \left[ I_{ph} - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{\gamma_1 k T_C} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{\gamma_2 k T_C} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \right] \quad (09)$$

### II.4.3 Modèle à trois diodes

B. Mazhari [26] a proposé un modèle des cellules solaires organiques, comme le montre la Figure II.8.

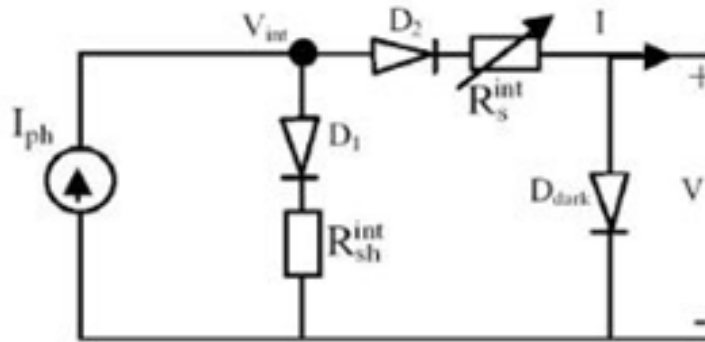


Figure II.8 : Modèle à trois diodes

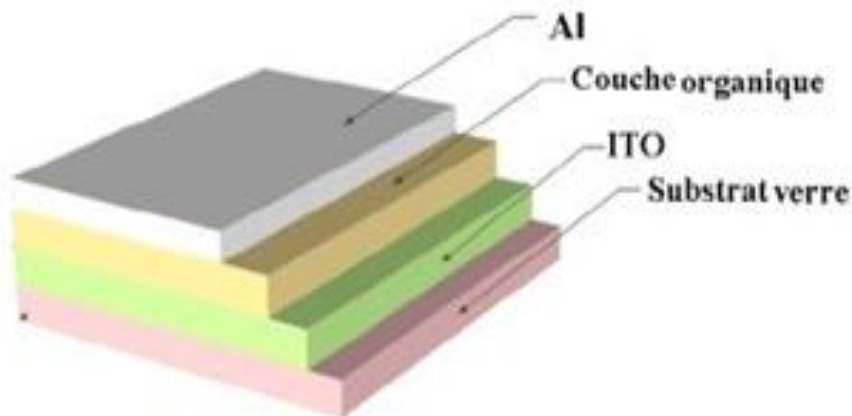
$R$  représente la perte due à la recombinaison. Les diodes  $D1$  et  $D2$  sont des diodes idéales qui représentent un court-circuit sous polarisation directe et le courant circuit-ouvert sous polarisation inverse, respectivement.

## II.5. Différentes structures des cellules photovoltaïques organiques

### II.5.1. structure monocouche

Ce type de cellules a été décrit comme étant de type Schottky, car une couche de matériau organique est prise en sandwich entre deux électrodes asymétriques, une seule présentant un contact ohmique et l'autre un contact redresseur. Figure II.9 En générale, les cellules de type Schottky se présentent sous la forme de ITO/semi-conducteur organique/métal. La dissociation des porteurs photo-générés s'effectue à l'interface du semi-conducteur et de l'électrode métallique. Des travaux ont d'abord été menés sur le polythiophène et ses dérivés [25], sans grand succès (rendements inférieurs à 0,001 %). L'intérêt s'est ensuite orienté vers le poly(p-phenylène vinylène) [25], avec des structures

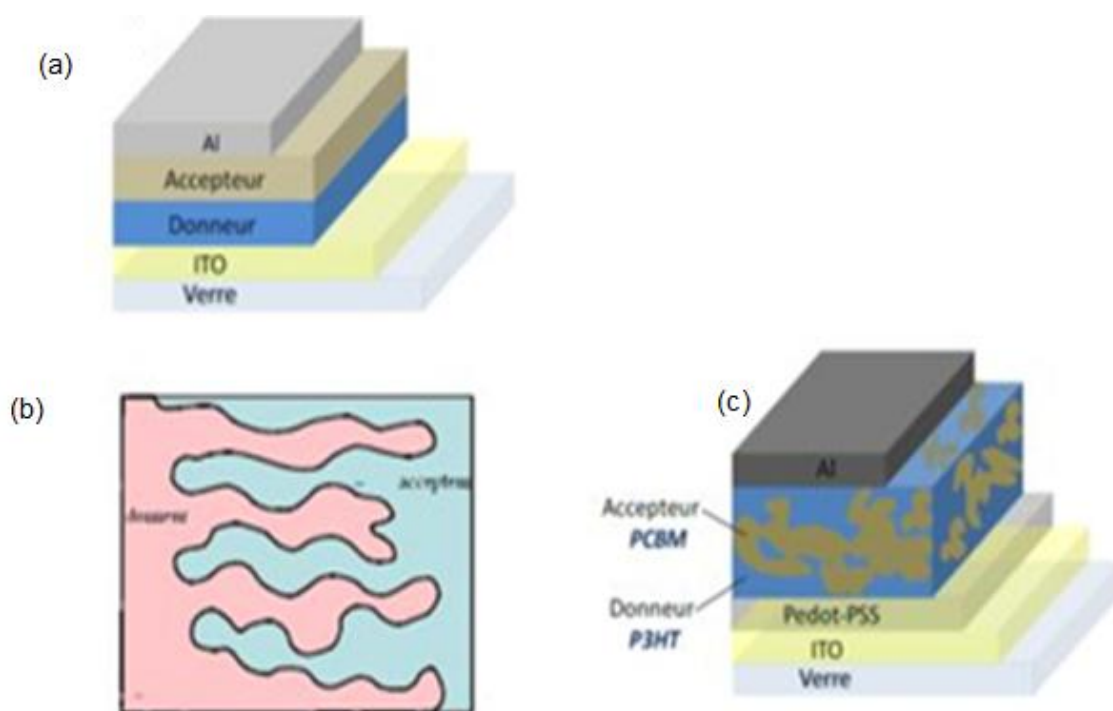
ITO/PPV/Al présentant une tension de circuit ouvert de 1,3 V. Cependant, les performances de ce type de cellules restent très faibles. En effet, l'hétérogénéité de la distribution des dopants et leur accumulation à l'interface métal/polymère contribue à la décroissance du rendement. De plus, le problème 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.



**Figure II.9:**Structure monocouche [25]

### II.5.2. structure bicouche

Appelée aussi structure hétérojonction ou jonction PN, elle est composée de deux matériaux de natures différentes (donneur et accepteur d'électrons) mis en contact entre deux électrodes Figure II.10. Dans ce cas, la zone active pour la conversion photovoltaïque se trouve à l'interface entre le donneur et l'accepteur. Le champ électrique créé à cette interface est dû à la différence entre le potentiel d'ionisation du donneur et l'affinité électronique de l'accepteur. Il permet la dissociation des excitons qui atteignent ce site. Ainsi, les charges libres vont migrer séparément vers leurs électrodes respectives: les électrons par l'accepteur vers la cathode et les trous par le donneur vers l'anode. Les cellules en structure bicouche peuvent être séparées en deux groupes: les hétérojonctions planaires (Figure II.10. (a)) et les hétérojonctions en volume. Ces dernières peuvent s'arranger de deux manières différentes: elles peuvent former une jonction « interdigitée » (Figure II.10. (b)), ou une jonction « interpénétrée » (Figure II.10. (c)).



**Figure II.10.** Trois types d'hétérojonctions rencontrées dans les cellules solaires organiques

[25]

Les hétérojonctions planaire D/A sont, quant à elles, principalement fabriquées par l'évaporation sous vide de matériaux moléculaires appelés aussi (petites molécules) comme le PTCDA, PTCBI, Mérocyanine Pour la Structure de type hétérojonction en volume, la couche active est constituée d'un mélange physique entre le donneur et l'accepteur d'électrons.

Ce type de cellules permet de multiplier les zones interfaciales entre le matériau donneur et le matériau accepteur et de réduire ainsi les problèmes de pertes par recombinaison des excitons générés loin de l'interface. Cette structure a été développée parallèlement par les équipes de A. Heeger et R. Friend, en 1995, [16], qui ont utilisé comme couche active un mélange de MEH-PPV comme donneur et du CN-PPV comme accepteur, avec un rendement énergétique de 0,9%. Par la suite, des études récentes sur le même système ont montré des rendements de conversion énergétique de 1,7 % après optimisation par recuit thermique [4]. En 2001 l'équipe de N. Sariciftci a utilisé le MDMO-PPV comme matériau donneur et le PCBM en matériau accepteur, qui a permis d'obtenir un rendement de 2,5%. En 2003 ce rendement atteint 3% après optimisation [14]. En 2007, et grâce à nouveaux polymères, le rendement atteint 7.9%.

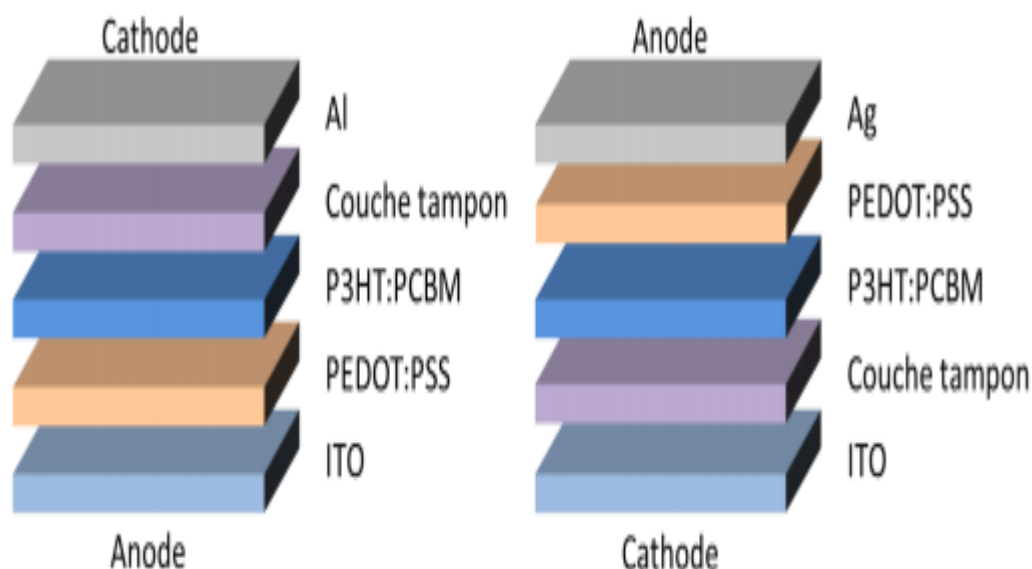
### II.5.3. structure p-i-n

Un des problèmes associés aux cellules hétérojonctions (interpénétré) est qu'il est difficile de contrôler la façon dont le donneur et l'accepteur s'organisent. Une solution consiste à associer les avantages de la structure bicouche à l'hétérojonction volumique en jouant à la fois sur la dissociation des excitons et le transport des charges aux électrodes tout limitant les mécanismes de recombinaisons. Une solution consiste donc à utiliser les techniques développées dans le cadre des OLEDs et des semi-conducteurs inorganiques à savoir l'architecture PIN. Une zone active non dopée (I) est prise en sandwich entre deux zones dopées qui assurent un transport des charges vers les électrodes de façon sélective et avec très peu de pertes ohmiques dues aux fortes conductivités des zones P et N. Cette architecture est élaborée par différentes façons. La couche intrinsèque peut être définie par un mélange de matériaux donneur et accepteur d'électrons. A l'origine, ce type de structure a été réalisé par Hiramoto [13]. Il a co-sublimé un donneur et un accepteur. Ce mélange déposé est mis en sandwich entre une couche de type p et une et une couche de type n.

On peut également déposer la deuxième couche de polymère par spin-coating. Grâce à la solubilisation partielle de la première couche [14], il est ainsi possible d'obtenir une couche inter-faciale de mélange donneur/accepteur par inter-diffusion des deux matériaux.

### II.5.4. Structure inverse

Les cellules photovoltaïques à architecture classique intégrant une couche active sous forme d'hétérojonction en volume (comme par exemple le P3HT:PCBM) sont composées par une succession de couches : substrat de verre (ou PET)/ ITO/ PEDOT:PSS/ P3HT:PCBM/ Al (Figure II.11).

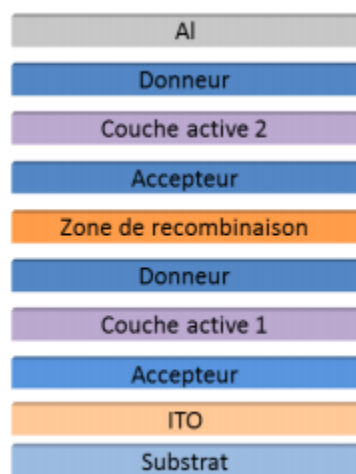


**Figure 11.11** : Schéma d'une structure conventionnelle de cellule photovoltaïque (à gauche) et d'une structure inverse (à droite)[27]

Cependant, ce type d'architecture présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, la couche de PEDOT:PSS, qui permet le transport de trous, possède une acidité élevée et mène à la dégradation de l'interface avec l'ITO et donc à une perte de performances. Hains et al. ont utilisé d'autres couches tampons pour remplacer le PEDOT:PSS, mais ils n'ont pas réussi à maintenir un rendement élevé à cause d'une grande résistance ohmique de la couche active. D'autre part, le dépôt de la couche d'aluminium doit se faire sous un vide poussé ce qui augmente les prix de fabrication des dispositifs à grande échelle. C'est pour pallier ces inconvénients que les cellules photovoltaïques à structure inverse se sont développées. Contrairement à une structure classique, dans cette architecture, les polarités sont inversées. Les cellules sont illuminées par la cathode, qui est constituée d'un substrat recouvert d'une électrode transparente, d'où sont collectées et extraites les charges négatives. L'ITO reste le principal matériau utilisé pour la cathode dans la structure inverse et le PEDOT:PSS reste une couche tampon. L'électrode anodique est constituée par un métal opaque, tel que l'argent, l'or ou encore le cuivre dont le travail d'extraction est relativement important. Ces métaux présentent une stabilité à l'ambiante plus élevée que l'aluminium, ainsi la fabrication de cellules est moins complexe.

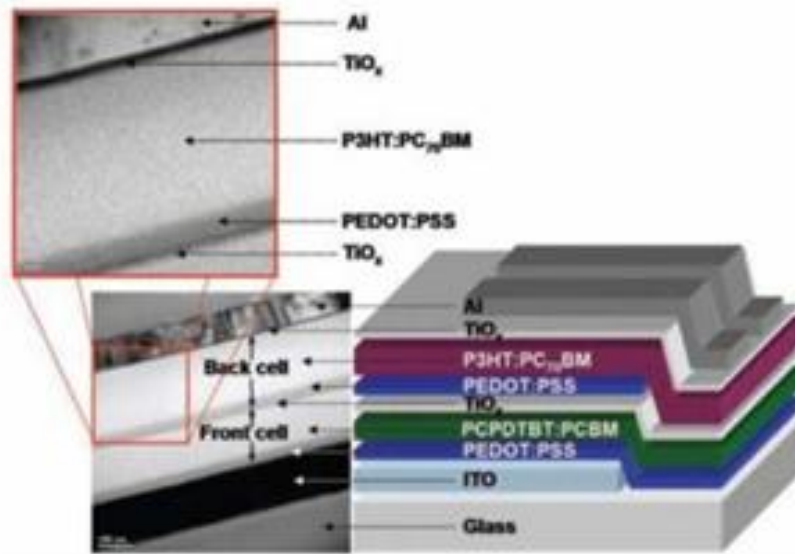
### II.5.5. structure des cellules tandem

Des améliorations peuvent encore être apportées en empilant les cellules les unes sur les autres. L'objectif étant d'absorber la plus grande partie du spectre solaire tout en limitant les pertes par thermalisation pour dépasser la limite de Shockley-Queisser. Ce concept, largement employé, a permis d'atteindre des rendements de plus de 40 % dans le domaine du photovoltaïque inorganique et 6,7 % pour les cellules solaires organiques. [25] Pour réaliser une cellule tandem, le plus simple consiste à empiler deux cellules réalisées sur deux substrats différents. Cependant, pour des raisons de coûts évidentes, cette solution n'est pas viable. Il faut donc envisager de réaliser ces cellules de façon monolithique. La première structure «tandem » monolithique dans le domaine photovoltaïque organique a été développée par Hiramoto et al. en 1990. Il s'agit d'une structure qui consiste en empilement de deux cellules (sub-cellules) espacé par une couche métallique (Au). Chaque cellule est une bicouche jonction composée de 50 nm de H2Pc (Phthanocyanine) et 70 nm d'un dérivé de perylene tetracarboxylic (Me-PTC) figure II.12.



**Figure II.12:** structure d'une cellule tandem [15]

En 2007 le groupe de Kim , a obtenu, avec une structure composée d'une cellule P3HT: PCBM et d'une cellule PCPDTBT (low band gap): PCBM séparées par une couche de TiOx, une cellule présentant un rendement de conversion énergétique de 6,7 % sous un éclairement de 20mW/cm<sup>2</sup>. Cette structure est présentée à la figure II.13.



**Figure II.13:** cellule photovoltaïque organique en architecture tandem[15]

## II.6. Conclusion

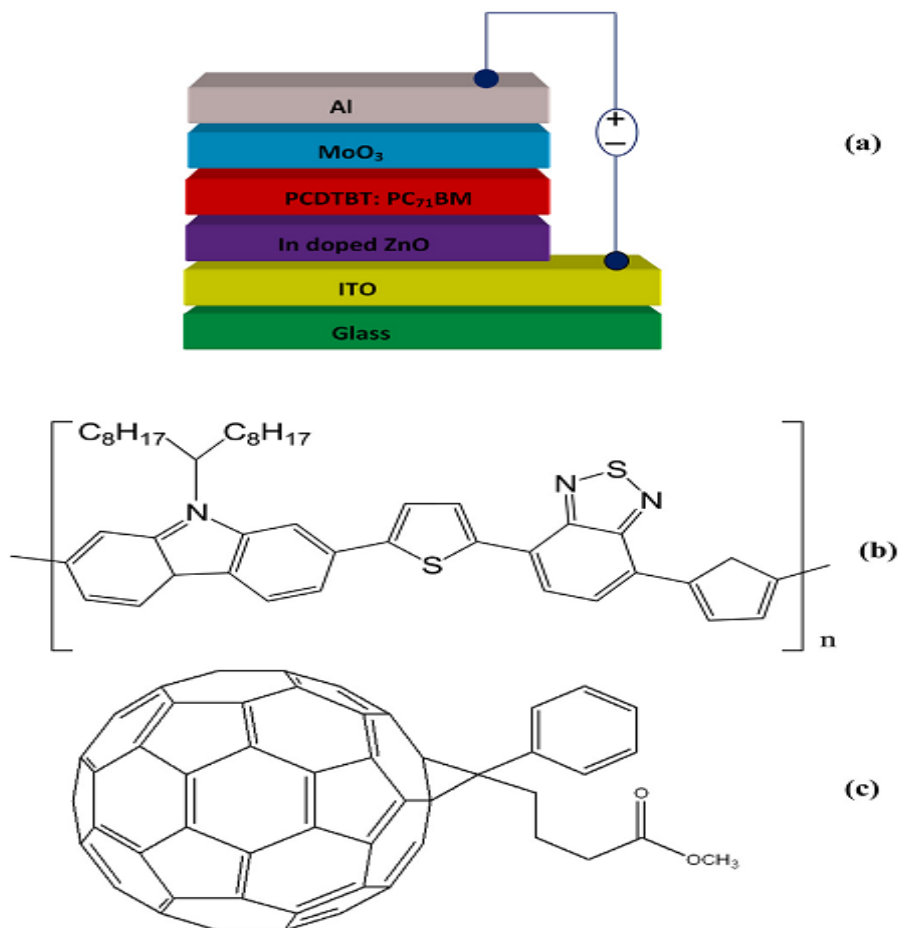
Grace à ce chapitre nous avons pu comprendre le fonctionnement des cellules à base des matériaux organiques, ainsi que la physique des semi-conducteurs organiques. Comme nous avons aussi discuté les différentes structures utilisées dans la fabrication des cellules solaires organiques, ce qui nous a permis d'identifier les facteurs limitant le rendement.



**CHAPITRE III**  
**RÉSULTAT DE LA SIMULATION  
DE MODÈLE**

**III.1.Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons procéder à la simulation et caractérisation de cellule photovoltaïque organique à base de polymères de type inversée à la structure L'oxyde d'indium-étain (ITO) / ZnO / poly [N-90-heptadécanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(40,70-di-2-thiényl-20, 10,30-benzothiadiazole)] (PCDTBT)/Al représenté dans la figure III.1. 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. Nous présentons ensuite la validation de cette module à condition standard (STC), en fin les résultats obtenus de la simulation numérique sous le programme MATLAB Simulink.



**Figure III.1 :** (a) L'architecture de la cellule solaire organique inversée, (b) la structure moléculaire de PCDTBT et (c) la structure moléculaire PC71BM [28]

**III.2.Résultats de la simulation et validation du modèle**

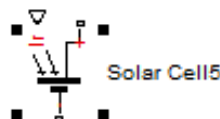
**III.2.1. Modèle de Simulation**

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de test et de simulation. Nous avons choisi une cellule solaire organique inversée. Cette cellule Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque organique à la température 25<sup>0</sup>C et l'irradiation 1000 W/m<sup>2</sup> sont données dans le tableau suivant :

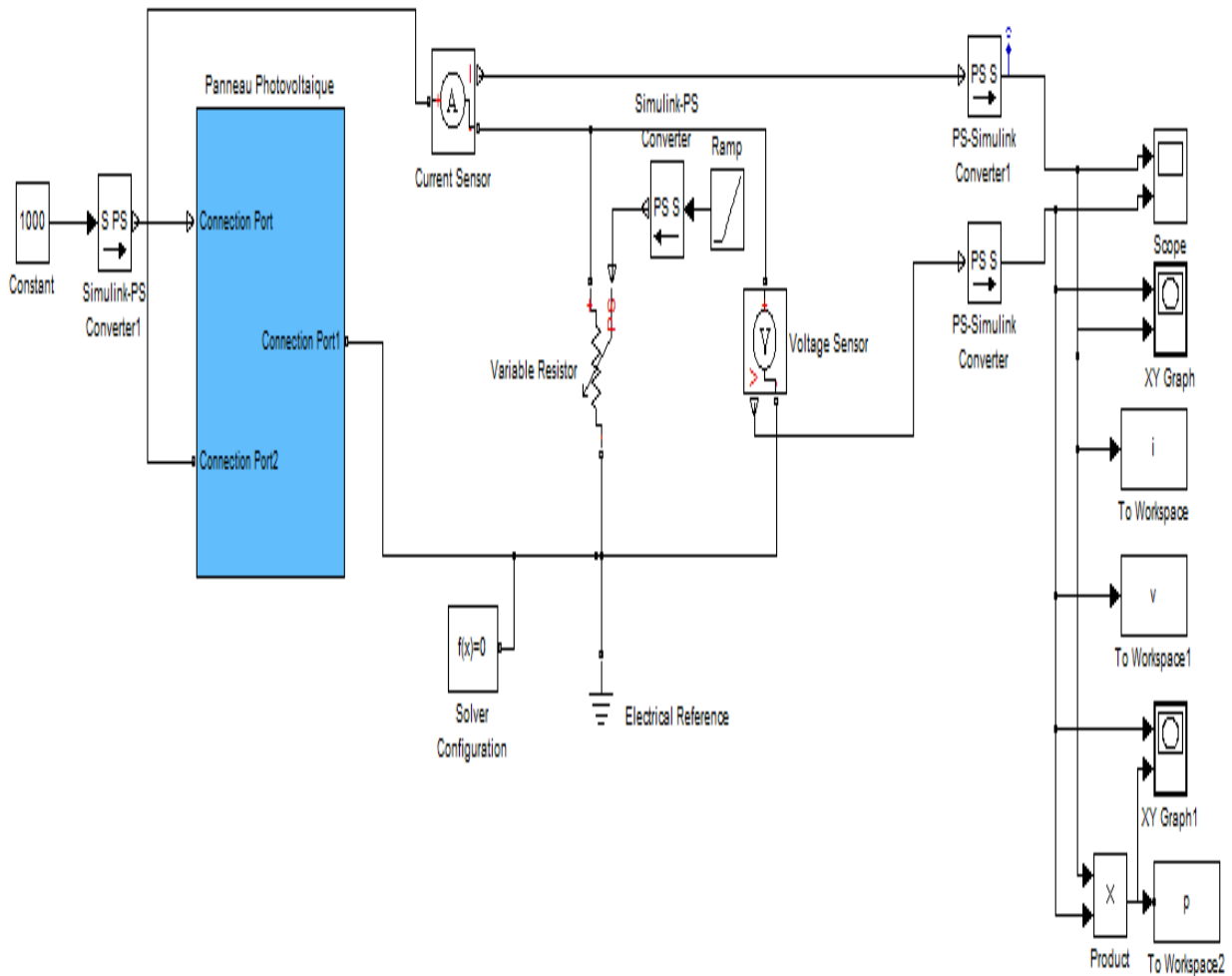
Module d'une cellule solaire organique inversée (ITO)/ ZnO/ (PCDTBT): (PC71BM)/MoO3/Al Rendement : $\eta$ =5.58%, FF=51.72%	
Energie de gap Eg [ eV]	1.88
Tension de circuit ouvert Voc[Volt]	0.878
Courant court-circuit I <sub>cc</sub> [mA]	12.28
Nombre de cellule en série N <sub>s</sub>	1
Résistance en série [Ohm]	7.21
Résistance en shunt [Ohm]	753.86

**Tableau 1.** Caractéristiques électriques du module[28]

La figure III.2.représenter une cellule solaire photovoltaïque qui disponible au Simscape (Matlab-Simulink) cette cellule utilise dans la bloc de simulation (Figure III.3) ,pour étudier les différents caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque organique inversée et aussi les déférents effets sur cette dernier (l'influence de l'éclairement (E) , la température(T) facteur de d'idéalité (N) ,.....).



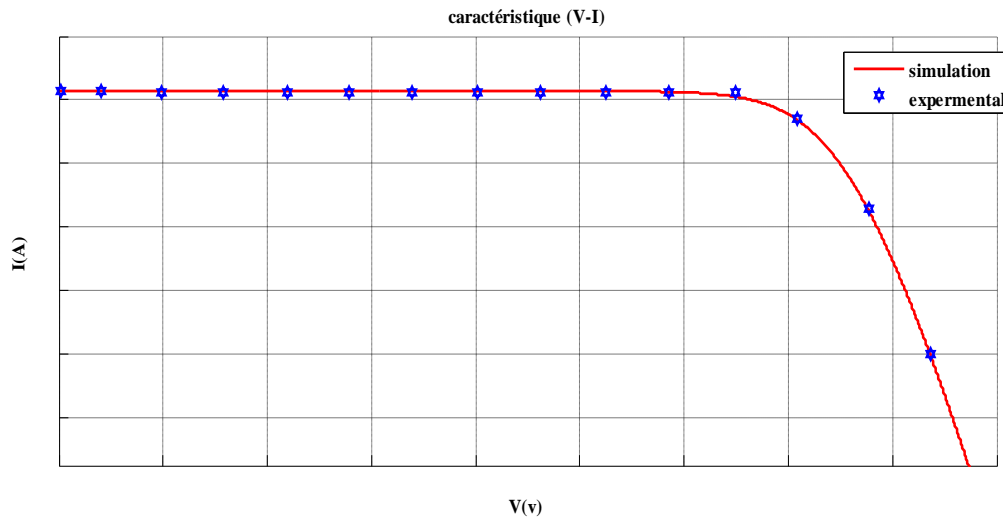
**Figure III.2:**Modèle d'une cellule solaire



**Figure III.3** : bloc de la simulation

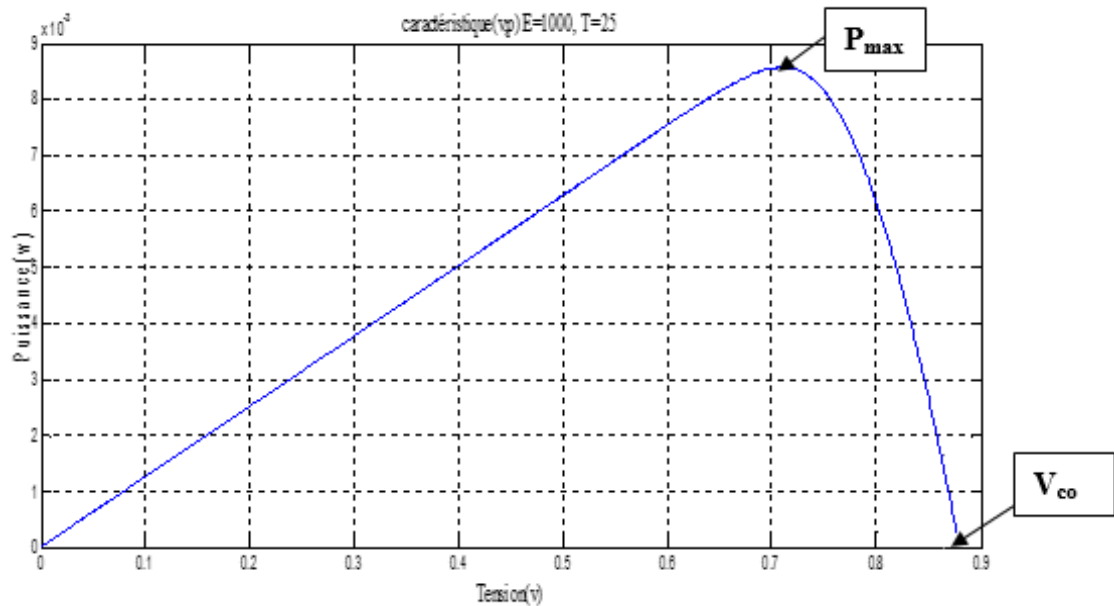
### III.2.2.L'obtention des courbes I-V et P-V en STC par le modèle de Simulink

Une fois la validité de la méthode proposée pour le module d'une cellule solaire organique inversée a été vérifiée, cette simulation a été utilisée pour obtenir la courbe I-V et la courbe P-V en STC qui est le but de ce chapitre. Notre bloc de simulation a été correctement formé, il a tendance à donner des réponses raisonnables et identique (courbe I-V en STC), comme le démontre la figure III.



**Figure III.4:**Performance du modèle Matlab simulink obtenu en STC

Une comparaison entre la courbe I-V extrapolés aux conditions STC par le Matlab Simulink et les valeurs expérimentales données par le travail de M. Thambidurai et al, à l'aide d'un concepteur (data sheet) à été effectuée. La figure III-5 montre la puissance maximale du module photovoltaïque  $P_{max}$  (8.5 mw) et la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  obtenu avec le modèle Matlab Simulink. On peut en déduire que les données obtenues par le Matlab Simulink sont très semblables à ceux fournie par le concepteur.



**Figure.III.5:**Caractéristique V-P en STC

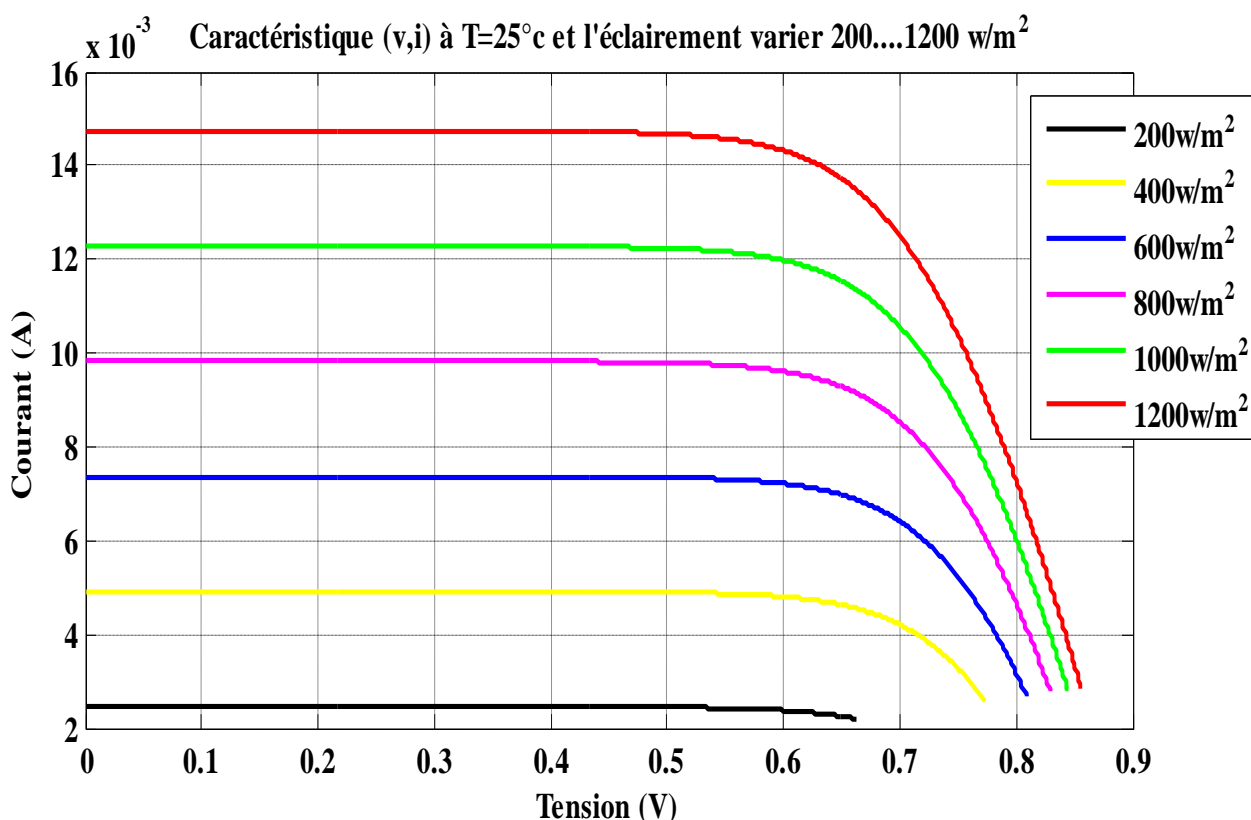
### III.3. Les influences des différents paramètres sur une cellule photovoltaïque organique

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque organique dépendent de l'éclairement et de la température et le facteur d'idéalité et la résistance en série. Selon la technologie de la cellule photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes.

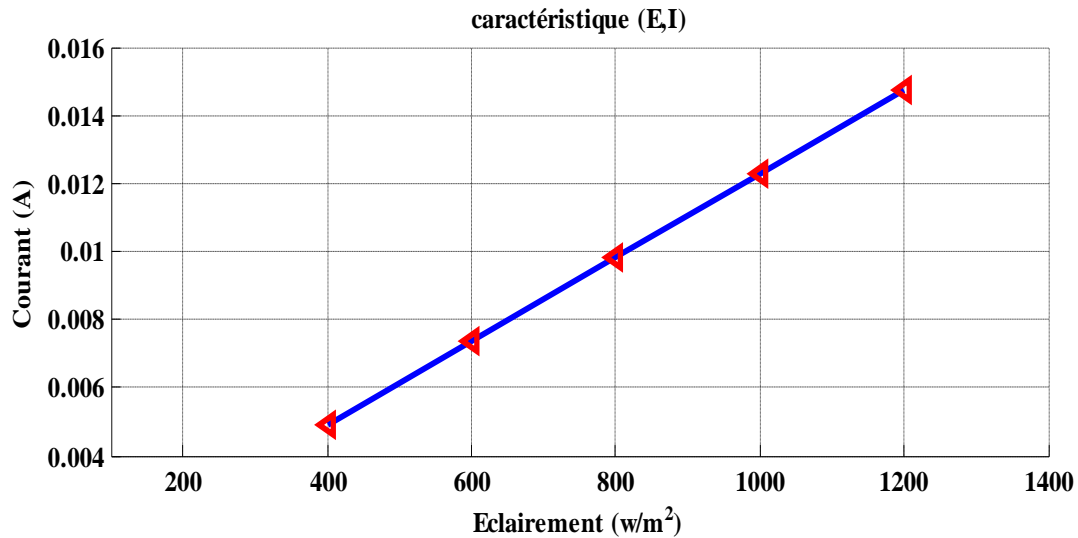
Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats de la simulation d'une cellule photovoltaïque organique (cellule solaires organique inversée).

#### III.3.1. Influence de l'irradiation

En faisant varier l'éclairement entre  $200\text{w/m}^2$  et  $1200\text{ w/m}^2$  avec un pas de  $200\text{ w/m}^2$  , à  $T=25^\circ\text{c}$ , on a déduit l'influence de celui-ci sur la caractéristique I(V) de la cellule comme il est illustré par la figure III.6.

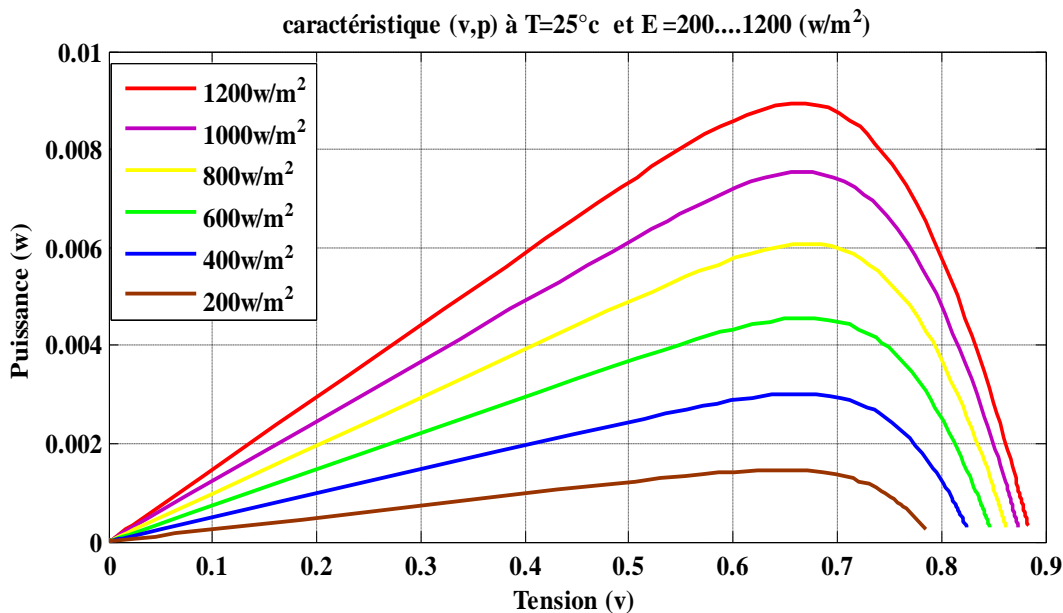


**Figure.III.6:** Caractéristiques I–V d'un module pour différentes irradiances solaires à 25°C



**Figure.III.7:** Caractéristiques de courant en fonction de l'éclairement I(E)

D'après les courbes ci-dessus (Figure.III.6, Figure.III.7) nous remarquons que l'irradiation à un impact très remarquable sur le courant  $I_{cc}$  (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante (négligeable)., Ainsi nous pouvons conclure que le rendement d'un module PV augmente considérablement avec l'augmentation de l'irradiation .

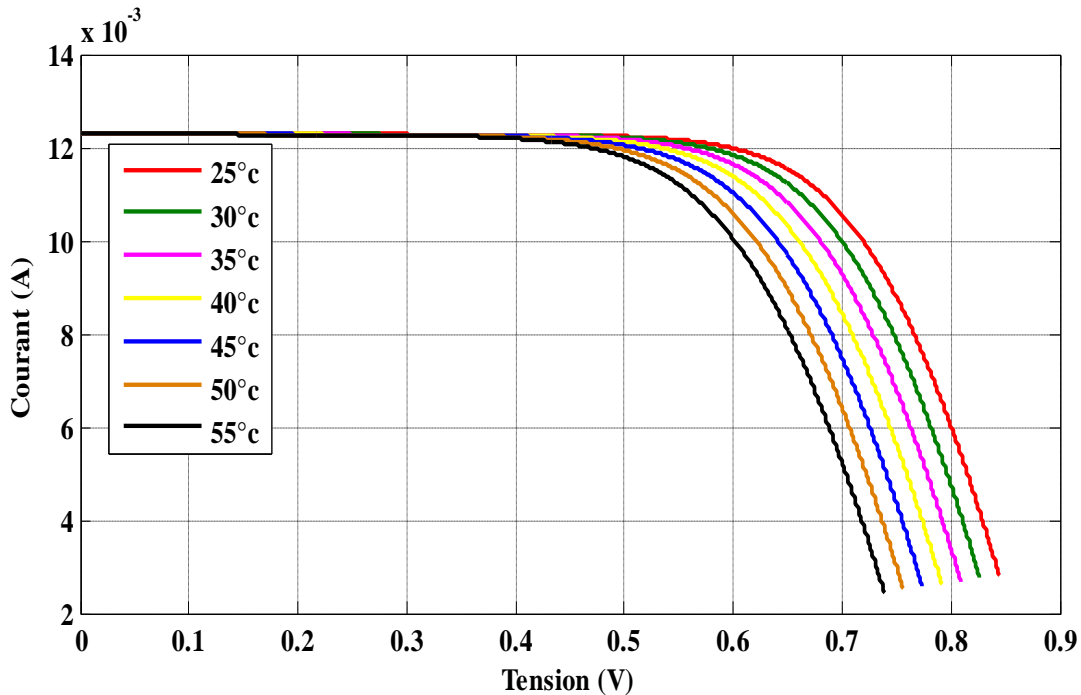


**Figure.III.8:** Caractéristiques P –V d'un module pour différentes irradiances solaires à 25°C

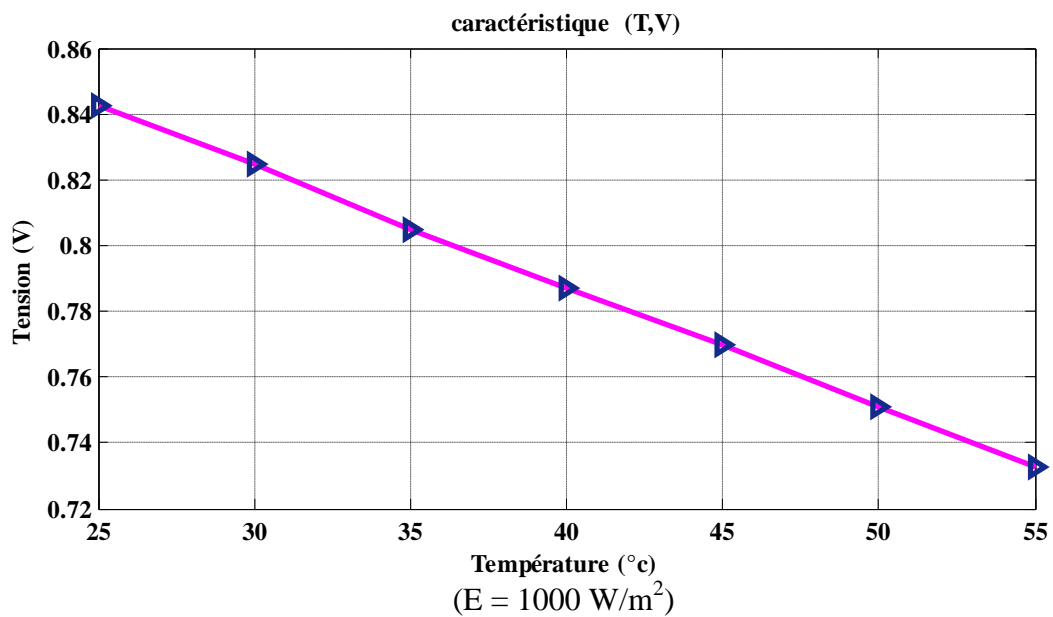
On remarque dans la Figure.III.8 que La puissance délivrée par une cellule PV est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

**III.3.2. Influence de la température**

En faisant varier la température de la cellule entre 25°C et 55°C avec un pas de 5 °c, l'influence de celle-ci sur la caractéristique I(V) est donnée par la figure III.9 sous un éclairciment 1000w/m<sup>2</sup>.



**FigureIII.9 :** Caractéristiques I–V d’un module pour différentes températures

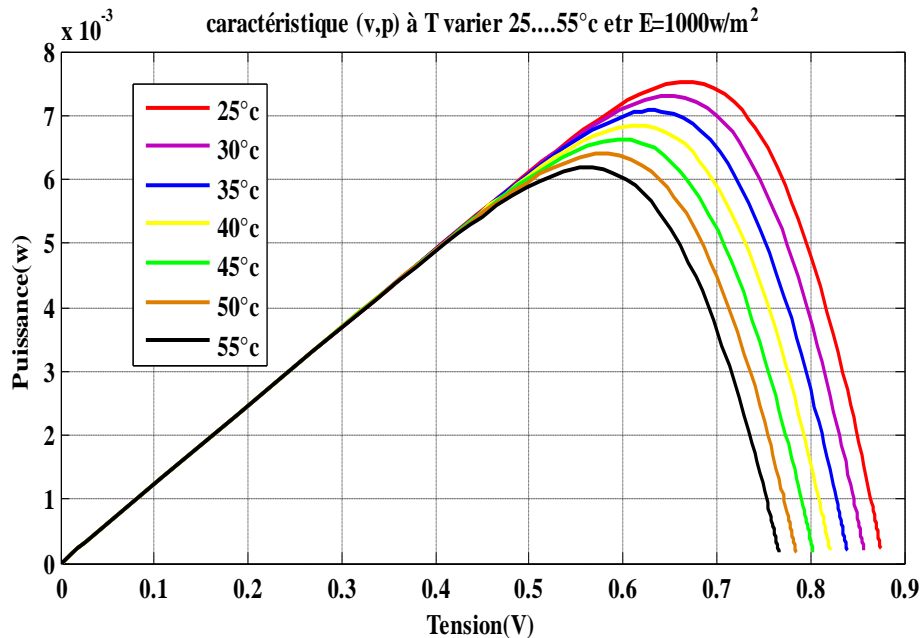


**Figure III.10 :** variation de V en fonction de températures



Quand la température diminue, la tension de circuit ouvert augmente (figure III.10), mais la variation de courant de court-circuit est négligeable (figure III.9). Ainsi nous pouvons conclure que la température a un impact négatif sur le rendement d'une cellule PVO.

L'effet de la température sur la puissance est présenté par la figure III.11 ci-dessous.



**Figure III.11** : Caractéristiques P–V d'un module pour différentes températures

L'évolution de la caractéristique P(V) en fonction de la température montre que la puissance diminue lorsque la température est augmentée (relation inverse) et engendre une décroissance moins prononcé de la tension ( $V_{co}$ ).

### III.3.3. Influence de facteur d'idéalité (N)

En faisant varier facteur d'idéalité (N) de 1 à 2 avec un pas de 0.2 à condition standard STC ( $T=25^{\circ}C$ ,  $E=1000w/m^2$ ) on a déduit l'influence de celui-ci sur la caractéristique I(V) de la cellule comme il est illustré par la figure III.11.

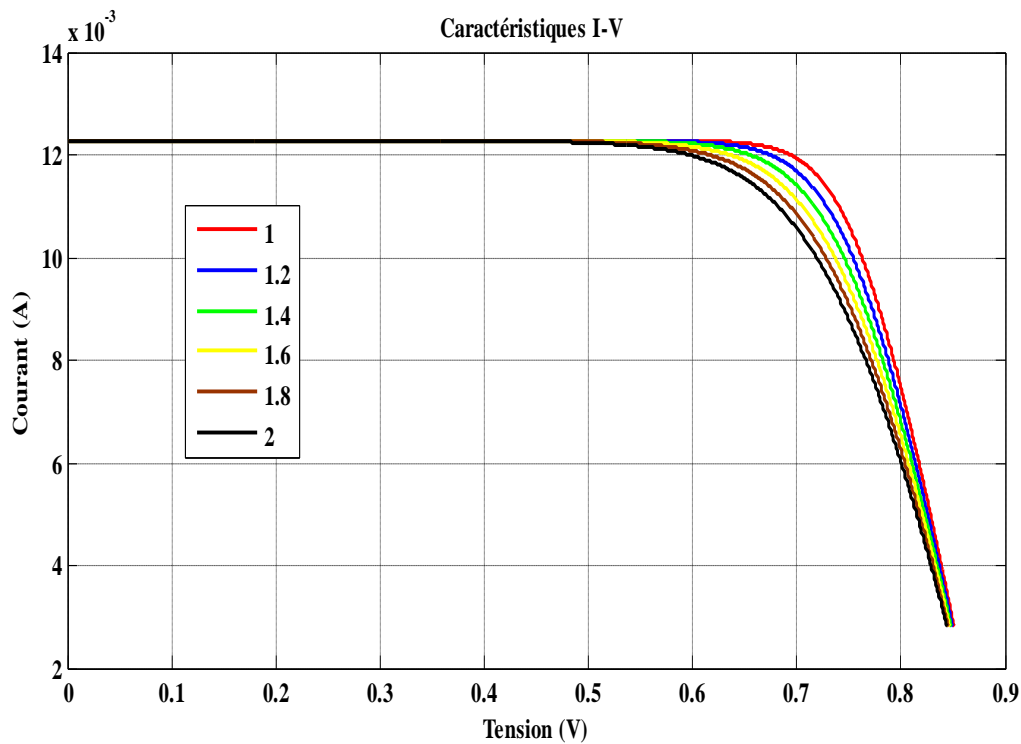


Figure III.11: Courbe I-V pour différentes valeurs de  $N$

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

### III.3.4. Influence de résistance $R_s$

Lorsque la résistance en série  $5.21\Omega$  jusqu'à  $9.21\Omega$  on obtient la résultat dans la figure III.12

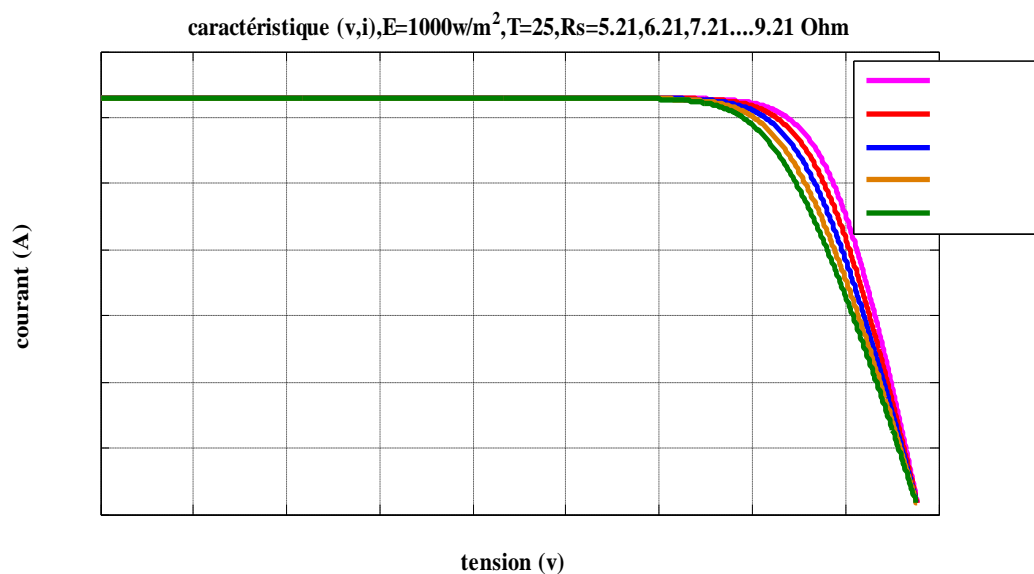


Figure III.12: Courbe I-V pour différentes valeurs de  $R_s$  ( $\Omega$ )

Les performances de la cellule PV diminuent quand la résistance  $R_s$  augmente, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance  $R_s$  soit la plus petite que possible.

#### **III.4. CONCLUSION**

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

Notre étude a porté sur la modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque dans l'environnement « Matlab » dont le but est l'optimisation de ce système pour un meilleur rendement.

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. La cellule solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement. Afin de créer une cellule PV organique on va modifier toutes les paramètres de cellule PV à base de Si.

Ainsi, cette modélisation nous a permis d'une part de déterminer un modèle similaire à une cellule photovoltaïque organique inversée comme point d'intérêt de notre étude.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion générale

---

La demande croissante en énergie nécessite de trouver des alternatives aux combustibles fossiles. Le photovoltaïque s'est fortement développé ces dix dernières années et dans ce contexte, l'OPV se présente comme une alternative innovante pouvant se positionner sur des niches de marché en proposant des dispositifs tout imprimés et flexibles.

Pour bien comprendre le comportement d'une cellule solaire organique, et être capable de simuler numériquement ces caractéristiques, à partir d'un modèle mathématique donné afin d'optimiser leur rendement, C'était l'objectif de ce travail de recherche. A cause de la complexité des méthodes de mesure dynamique, plusieurs méthodes de simulation ont été proposées dans la littérature, dans notre travail. Nous avons le modèle à 5 paramètres pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque organique inversé pour différentes conditions d'ensoleillement et de température.

Le travail réalisé dans ce mémoire a été basé sur les parties suivantes :

Dans un premier temps, nous avons essayé de faire une revue assez générale sur la technologie photovoltaïque, rappelant les différentes filières technologiques, et nous avons étudié les semi-conducteurs organiques.

Dans la deuxième partie du mémoire, Nous avons détaillé le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique, ainsi que différentes architectures référencées pour ce type de cellules dans la littérature. Cette partie nous a permis de comprendre les caractéristiques courant-tension et paramètres des cellules solaires organiques.

La troisième partie du mémoire, était sur la simulation de cellule photovoltaïque organique inversée par le programme MATLAB 2012, nous avons utilisé le modèle à 5 paramètres disponible dans le SIMSCAPE pour simuler le fonctionnement de la cellule PVO ((ITO)/ZnO/ (PCDTBT): (PC71BM)/MoO<sub>3</sub>/Al) pour différentes conditions, le tracé des caractéristiques I(V) et P(V) montre que Les performances d'une cellule PVO sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

D'après les résultats que nous avons obtenus en constatant que l'augmentation de résistance série et le facteur de qualité se traduit par la dégradation de la courbe I (V) au niveau du coude.

## Conclusion générale

---

Ce modeste travail peut être considéré comme une contribution très sérieuse dans le domaine des énergies renouvelables et plus précisément solaires, il présente beaucoup de perspectives à savoir le développement d'une filière de cellules photovoltaïques organiques compétitives avec des moyens très accessibles.

Espérant que l'approche proposée peut fournir une base théorique et des connaissances physiques pour la conception des cellules solaires organiques.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

---

- [1] A. Labouret, P. Cumunel, J. P. Braun et B. Faraggi, "Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque", 5e édition, Editions techniques et scientifiques françaises (ETSF), 2011.
- [2] B. Azoui, "Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application", Thèse de Doctorat. Université de Batna, 2002.
- [3] A. Touahri, "Étude du rayonnement solaire en vue de l'optimisation des systèmes photovoltaïque", Mémoire de master, Université de Adrar, 2013.
- [4] M. Yakhlef et O. Kammoum, "Etude des panneaux solaires: application pour le pompage", Université de Constantine, 2011.
- [5] N. Aoun, " Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales ", Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [6] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [7] D. Bokhers, " Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïques application au pompage". Mémoire de magistère électrotechnique, Université de Batna, 2007.
- [8] S. Ren, L.-Y. Chang & al., Inorganic-organic hybrid solar cell: bridging quantum dots to conjugated polymer nanowires, *Nano Letters* (2011), 11, 3998- 4002.
- [9] A. Guchhait, A.K. Rath & A.J. Pal, To make polymer: quantum dot hybrid solar cells NIR-active by increasing diameter of PbS nanoparticles, *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2011), 95, 651-656.
- [10] N. Kalfagiannis, P.G. Karagiannidis & al., Plasmonic silver nanoparticles for improved organic solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2012), 104, 165-174.
- [11] S. Vedraïne, P. Torchio & al, Optical characterization of organic blend films integrating metallic nanoparticles, *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2012), 102, 31-35
- [12] Richard GARUZ, " Caractérisations optiques (LBIC, LBIV) et validation d'encres pour des cellules et des modules solaires photovoltaïques organiques" thèse de doctorat, l'université de limoges, 22 Septembre 2015
- [13] Dang Minh Trung, "élaboration de cellules solaires photovoltaïques à base b de polymères conjugués, études des systèmes reticulables", , thèse de doctorat , l'université de Bordeaux1, 2009.
- [14] [http://www.questmachine.org/article/cellules\\_photovolt%C3%AFques\\_%C3%A0\\_base\\_de\\_poly m%C3%A8res](http://www.questmachine.org/article/cellules_photovolt%C3%AFques_%C3%A0_base_de_poly m%C3%A8res).
- [15] J. M. NUNZI, *Comptes Rendus Physique* , Vol3, pp.523-542, 2002.
- [16] Mohamad CHAKAROUN, "Evaluation de nouveaux concepts d'encapsulation de cellules solaires organiques pour l'amélioration de leurs durée de vie ", L'Université de Limoges, 2010.



## Références bibliographiques

---

- [17] P. Destruel et I. Séguy, Techniques de l'Ingénieur, dossier RE25-1,(1982).
- [18] Y. Nagamune, H. Watabe, F. Sogawa et Y. Arakawa, Applied Physics Letters, 67, 1535,(1995).
- [19] M. Theander, A. Yartsev, D. Zigmantas, V. Sundström, W. Mammo, M.R. Andersson et O.Inganäs, Physical Review B, 61, 12957,(2000).
- [20] P. Peumans, A. Yakimov et S.R. Forrest, Journal of Applied Physics 2003, 93, 3693
- [21] E. Gautier, A. Lorin, J. M. Nunzi, A. Schalchli ,J.J. Benattar, and D. Vital, Applied Physic Letters 69, 1071-1073 .(1996).
- [22] S. Kirchmeyer and K. Reuter, Journal of Material Chemistry 15, 2077-2088 (2005).
- [23] A. J. Miller, R. A. Hatton, and S. R. P. Silva, Applied Physics Letters 89, 133117-3 (2006).
- [24] M. Urien, G. Wantz, E. Cloutet, L. Hirsch, P. Tardy, L. Vignau, H. Cramail et J.P. Parneix, Organic Electronics, 8, 727(2007).
- [25] Mathieu Urien, thèse cellules photovoltaïques organiques a base copolymeres a blocs de type rigide-flexible par présente a l'université bordeaux i école doctorale des sciences chimiques le 16 octobre(2008).
- [26] B.Mazhari, 'An improved solar cell circuit model for organic solar cells', sol. Energy Mater sol.90 (2006) 1021-1033,2006.
- [27] Sarah Taleb Dehkordi ',Stabilisation de dispositifs Photovoltaïques organiques par réseaux semi-interpénètres de polymères ,thèse de doctorat , De l'Université de Cergy-Pontoise 19 Jul 2016.
- [28] M. Thambidurai , Jun Young Kim , Chan-mo Kang , N. Muthukumarasamy Hyung-Jun Song, Jiyun Song , Youngjun Ko , Dhayalan Velauthapillai , Changhee Lee Enhanced photovoltaic performance of inverted organic solar cells with In-doped ZnO as an electron extraction layer a Renewable Energy 66 (2014) 433e442.

# RESUME

Ce travail de recherche est porté sur la simulation et 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 notre travail on a simulé et caractérisé une cellule photovoltaïque organique inversée (ITO)/ ZnO/ (PCDTBT): (PC71BM)/MoO<sub>3</sub>/Al dont le rendement de conversion est à 5.58%.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

Il ressort que le rendement de nos cellules photovoltaïques dépend étroitement de leur paramètres des polymères qui compose la couche active ( Eg , N, Rs,.....) et de la condition climatique (éclairage , température, .....).

## ملخص

ويركز هذا البحث على محاكاة وتوصيف الخلايا الضوئية العضوية. تطوير هذه الخلايا تشكل تحديا كبيرا لتطوير الإلكترونيات العضوية. هذه الخلايا مؤهلة أيضا لإنتاج الطاقة بتكلفة منخفضة. ولأنها مصنوعة على حوامل مرنة، هذا ما يتيح لها سهولة الادمج في الأجهزة المحمولة مثل الهواتف المحمولة وأجهزة الكمبيوتر المحمولة.

في هذا العمل قمنا عملنا بمحاكاة ودراسة خصائص خلية ضوئية عضوية عكسية (ITO)/ ZnO/ (PCDTBT) (PC71BM)/MoO<sub>3</sub>/Al [بمردود التحويل الكهروضوئي حوالي 5.58%.

والميزة الرئيسية لهذا النموذج تكمن في بساطته وسهولة استخدامه انطلاقا من الخصائص التقنية للمصنع .

نستنتج من خلال هذا العمل أن أداء الخلايا الضوئية لدينا مرتبط بشكل وثيق على خصائص البوليمرات التي تكون الطبقة النشطة (Eg,N,RS) وأيضا على الشروط المناخية (الاضاءة والحرارة).