

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEINEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté au

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN MICROELECTRONIQUE

Option : Technologie des composants semiconducteurs

et dispositifs photovoltaïques

Par

Abdelhak MAOUCHA

Ingénieur, département d'Electronique -Université de Batna

Intitulé

Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique

Devant le jury :

Dr. MAHAMDI Ramdane	Prof. U. Banta	Président
Dr. DJEFFAL Fayçal	M. C. U. Batna	Rapporteur
Dr. BOURIDAH Hachemi	M. C. U. Jijel	Examineur
Dr. BENHAYA Abdelhamid	Prof. U. Banta	Examineur
Dr. DIBI Zohir	M. C. U. Batna	Examineur

-2011-

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur DJEFFAL Fayçal, maître de conférences à l'université de Batna, membre du Laboratoire de l'Electronique Avancée (LEA) qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur MAHAMDI Ramdan, professeur à l'université de Batna, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur BOURIDAH Hachemi maître de conférences à l'université de Jijel, à Monsieur BENCHAYE Abdelhamid professeur à l'université de Batna, et à Monsieur DIBI Zohir maître de conférences à l'université de Batna, d'avoir bien voulu accepté de juger ce travail.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous ma famille et mes amis, et tous les collègues, et surtout à Monsieur BENTRACIA Toufik.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur la technologie Photovoltaïque	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Energie solaire.....	5
I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.3.1 L'interaction photon/semiconducteur.....	6
I.3.2 fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.4 Différentes technologies existantes.....	11
I.4.1 Le silicium.....	11
I.4.1.1 Silicium monocristallin.....	12
I.4.1.2 Silicium polycristallin.....	12
I.4.1.3 Silicium en ruban auto-supporté.....	13
I.4.1.4 Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe.....	13
I.4.2 Cellules en couches minces.....	13
I.4.2.1 Matériaux à base de tellure de cadmium.....	13
I.4.2.2 Matériaux à base de séléniure de cuivre indium.....	14
I.4.3 Les cellules III-V multijonctions.....	14
I.4.4 Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel.....	14
I.4.5 Les cellules photovoltaïques organiques.....	15
I.5 Association des cellules solaires.....	15
I.5.1 Association en série.....	15
I.5.2 Association en parallèle.....	16
I.5.3 Association hybride (en série et en parallèle).....	16
I.6 conclusion.....	17
Chapitre II : Les cellules photovoltaïques organiques	
II.1 Introduction.....	18
II.2 semi-conducteur organique.....	19
II.3 Fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques.....	20
II.3.1 Absorption des photons- Génération des excitons.....	20
II.3.2 Diffusion des excitons.....	21
II.3.3 Dissociation des excitons.....	21
II.3.3.1 Cellule de type Schottky.....	21
II.3.3.2 Jonction donneur/accepteur.....	22
II.3.4 Transport et collection des charges jusqu'aux électrodes.....	22

II.4 Différentes structures des cellules photovoltaïques organiques	23
II.4.1 Structure monocouche	23
II.4.2 Structure bicouche	24
II.4.3 Structure p-i-n	25
II.4.4 Structure des cellules tandem	26
II.5 Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques	27
II.5.1 Avantages	27
II.5.2 Inconvénients	28
II.6 Conclusion	30

Chapitre III : Les algorithmes génétiques mono et multi-objectifs

III.1 Introduction	31
III.2 Algorithmes génétiques	31
III.2.1 Principe des algorithmes génétiques.....	32
III.2.2 Les caractéristiques des algorithmes génétiques	33
III.2.3 Opérateur de sélection	34
III.2.3.1 Sélection	35
III.2.3.2 Croisement.....	36
III.2.3.3 Mutation	36
III.2.3.4 Elitisme.....	36
III.2.4 Les grandes étapes de l'algorithme génétique.....	37
III.2.5 Caractéristiques principales de l'optimisation génétique	37
III.3 L'optimisation mono-objective ou multi-objective	38
III.3.1 Optimisation	38
III.3.1.2 Fonction Objective	39
III.3.1.3 Variables de décision.....	39
III.3.2 Optimisation mono-objectif.....	39
III.3.2.1 Minimum global	40
III.3.2.2 Minimum local fort.....	40
III.3.2.3 Minimum local faible	40
III.3.3 Optimisation multi-objectif	40
III.3.3.1 Dominance.....	41
III.3.3.2 L'optimisation au sens de Pareto.....	41
III.3.3.2.1 Optimum de Pareto.....	41
III.3.3.2.2 Frontière de Pareto	42
III.3.4 L'optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques	42

III.4 Conclusion.....	45
-----------------------	----

Chapitre VI : Identification paramétrique des cellules photovoltaïques organiques

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Modèles d'une cellule solaire.....	47
IV.2.1 Modèle à trois diodes.....	47
IV.2.2 Modèle à une diode (exponentielle simple).....	47
IV.2.2 Modèle à deux diodes (exponentielle double).....	48
IV.3 Extraction des paramètres.....	49
IV.3.1 Méthode des cinq points.....	49
IV.3.2 Méthode de région de confiance (trust region).....	51
IV.3.3 résultats et discussion.....	53
IV.3.3.1 la cellule solaire organique MDMO-PPV.....	53
IV.3.3.2 Cellule solaire organique structures simples PIN.....	55
IV.3.3.3 Cellule solaire organique hétérojonction (MEH-PPV/PCBM).....	56
IV.4 Conclusion.....	57

Chapitre V : Optimisation multi-objectif des cellules solaires organiques

V.1 Introduction.....	58
V.2 Optimisation du rendement de la cellule organique par MOGAs.....	58
V.3 Optimisation utilisant l'algorithme NSGA II.....	59
V.4 Résultats et discussions.....	62
V.4.1 Paramétrage.....	62
V.4.2 Application de la technique pour les cellules solaires organiques.....	63
V.5 Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67

Bibliographie

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de trouver des nouvelles solutions pour fournir et de développer, et même de rationaliser l'exploitation de ces énergies.

Jusqu'à maintenant, l'énergie électrique est la source la plus utilisée dans les différents domaines, dans les plus grandes usines ou même les plus petits appareils électroniques, que ce soit les plus importants domaines, tels que ceux utilisés dans les hôpitaux, ou ceux utilisés dans les Jouets. Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, on trouve notamment les générateurs, basé sur l'énergie fossile, en particulièrement le pétrole, ou bien qui utilise l'énergie nucléaire, ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, ce qui faire obligé de penser sérieusement aux énergies renouvelables.

Parmi les énergies les plus modernes, qui ont un brillant avenir, car ils sont propres et écologiques: « l'énergie solaire ». Il existe plusieurs façons d'utiliser cette énergie pour produire de l'électricité, mais la méthode la plus importante, et celle qui nous concerne dans ce mémoire, est la méthode basée sur le principe de la photovoltaïque.

La première cellule photovoltaïque a été réalisée en 1954, à base du silicium, aujourd'hui il reste encore le matériau le plus couramment utilisé, malgré la concurrence toujours plus rude des Tellures de Cadmium, et l'Arséniure de Gallium. Cette filière technologique à base des semiconducteurs inorganiques caractérisées par son prix élevé, par sa fabrication très compliqué, sa rigidité (fragile) ...

Afin de diminuer le coût de fabrication des ces dispositifs photovoltaïques, une alternative consiste à substituer le silicium par des matériaux organiques. Les cellules solaires organiques font actuellement l'objet d'une accélération considérable. Obtenues très simplement, à faible coût et avec un faible impact environnemental, compatibles avec des substrats flexibles, elles permettent d'envisager de nombreuses applications: emballages, vêtements, écrans flexibles, recharge de téléphones cellulaires ou d'ordinateurs portables. Donc, l'objectif principal de ce mémoire est l'étude et l'optimisation des propriétés électriques et physiques des cellules solaires à base des matériaux organiques afin de décrire et d'améliorer le comportement électrique de ces dispositifs dans les différents régimes de fonctionnement.

Des modèles et des techniques d'étude et d'extraction des paramètres électriques des cellules solaires organiques ont été développées au paravent, mais leurs applications sont limitées car ils sont basés sur le modèle à une seule diode qui ne prend pas en considération l'effet de recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau, la raison pour laquelle notre travail est destiné à développer une méthode basée sur le modèle à double diodes, capable d'extraire les sept paramètres électriques ce qui nous permet d'avoir une idée sur les intervalles de validité de chaque paramètre. Dans ce contexte, des nouvelles approches basées sur les techniques évolutionnaires multi-objectif et un calcul itératif destiné à l'identification paramétrique des cellules solaires seront développées afin d'analyser, modéliser et optimiser les dispositifs à base des cellules solaires organiques.

Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur la technologie photovoltaïque, en commençant par des notions sur le rayonnement solaire. Dans un deuxième temps, nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque, et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ensuite on va citer les différentes filières technologiques des cellules solaires. Nous finissons ce chapitre par la présentation des différents montages des cellules solaires dans un module photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, est destiné à la présentation et l'étude des principes physiques et électriques des cellules photovoltaïques organiques. Premièrement on présente une définition des Semiconducteurs organique, suivie du principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques et les mécanismes physiques misent en jeu dans la production d'électricité par ces cellules. Les différentes structures de cellules photovoltaïques organiques ainsi que ces avantages et inconvénients sont enfin détaillées dans une quatrième et cinquième partie.

Le chapitre III est consacré à l'utilisation des algorithmes génétiques pour l'optimisation mono et multi-objectif. La première partie décrit la définition, le principe et les caractéristiques des algorithmes génétiques. La deuxième partie présente les méthodes d'optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques.

Le quatrième chapitre concerne l'extraction des paramètres de la cellule photovoltaïque exploitant uniquement sa caractéristique I-V. Dans un premier temps, on présente les différents modèles qui décrivent le comportement des cellules photovoltaïques organiques, ensuite on discute la méthode et la technique utilisée pour l'identification des paramètres ainsi

que le modèle choisi. Après la présentation de l'organigramme qui résume le travail d'identification, on présente les paramètres électriques extraits des trois cellules ainsi que les résultats obtenues. Ces paramètres peuvent être utilisés pour décrire le schéma équivalent de la cellule solaire.

Le cinquième chapitre est destiné à l'optimisation multi-objectif des cellules solaires organiques. Après avoir expliqué l'idée de base de notre approche, nous présentons la technique basée sur le MOGAs, qui est l'algorithme NSGA II, ensuite on va expliquer l'implantation des paramètres de la technique GAmultiobj sous l'environnement MATLAB. La présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus font l'objectif de la dernière partie de ce chapitre.

Une conclusion générale et des perspectives d'amélioration parachèvent ce travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAIQUE

I.1 Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert la première fois par Edmund Bequerel en 1839 quand il a observé que l'action de la lumière sur une électrode en platine enduite argentée immergée dans l'électrolyte a produit un courant électrique. Quarante ans après les premiers dispositifs photovoltaïques à semiconducteur ont été construits par le travailers étudiant la photoconductivité récemment découverte du sélénium.

Cependant, ce n'était pas les propriétés photovoltaïques des matériaux comme le sélénium qui a excité les chercheurs, mais la photoconductivité, le fait que le courant produit était proportionnel à l'intensité de la lumière incidente. Pendant les années 1950, le développement de l'électronique et surtout l'utilisation du silicium, et après la découverte des jonctions PN en silicium, la première pile solaire de silicium a été rapportée par Chapin, Fuller et Pearson en 1954 et a converti la lumière du soleil avec une efficacité de 6%, six fois plus haut que la meilleure tentative précédente. Actuellement des cellules dites de troisième génération visent à passer la limite maximale de rendement des cellules conventionnelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif (cellule multi-jonction, les cellules nanowires,).

Dans ce premier chapitre, Nous aborderons en premier lieu quelques notions sur le rayonnement solaire, ensuite, nous décrivons le principe de l'effet photovoltaïque, et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Dernièrement on va citer les différentes filières des cellules solaires.

I.2 Energie solaire

Le soleil libère continuellement une énorme quantité d'énergie rayonnante dans le système solaire; en moyenne, 1367 watts atteignent chaque mètre carré de la couche atmosphérique externe. Il faut noter que la Terre reçoit une fraction minuscule de cette énergie. En effet, en traversant les différentes couches de l'atmosphère, une partie de l'énergie solaire s'atténue: certaines longueurs d'onde du spectre solaire sont absorbées par des composants comme la couche d'ozone (absorption des rayons de l'UV jusqu'au visible) ou comme la vapeur d'eau qui possède plusieurs raies dans le visible et dans l'infrarouge. Pourtant, la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la terre en une heure est plus importante que la quantité totale d'énergie consommée par la population mondiale en une année. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Pour tenir compte de la longueur effective parcourue à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct, la notion de masse d'air (AM x) est introduite. Figure I.1. Elle correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. La masse d'air est exprimée comme un multiple du parcours traversé en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [1].

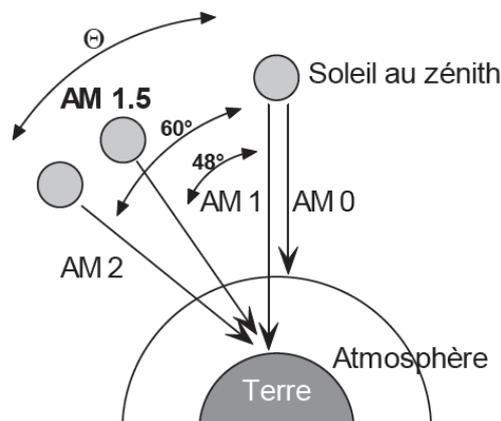


Figure I.1: Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre

On introduit le nombre d'air masse défini par:

$$AM \approx \frac{1}{\sin\theta} \quad (I.2)$$

Où l'angle θ est l'élévation solaire, c'est-à-dire l'angle en radian entre le rayonnement solaire et le plan horizontal. Le spectre solaire AM0, correspond à une masse d'air nulle pour un éclairage solaire au delà de l'atmosphère à incidence normale. Pour un ciel clair avec le soleil à l'aplomb, on a le rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). L'éclairage solaire arrivant sur la terre avec un angle de 48° est de 1000 W/m^2 (soit 100 mW/cm^2) avec une masse d'air AM1 [2].

Le spectre solaire AM1.5 est composé de 3~4 % de lumière ultraviolette ($< 390 \text{ nm}$), de 45 % de lumière visible ($390\text{-}750 \text{ nm}$) et de 52 % de lumière infrarouge [Proche IR ($750\text{-}1400 \text{ nm}$) = 38 % et IR Lointain ($> 1400 \text{ nm}$) = 14%].

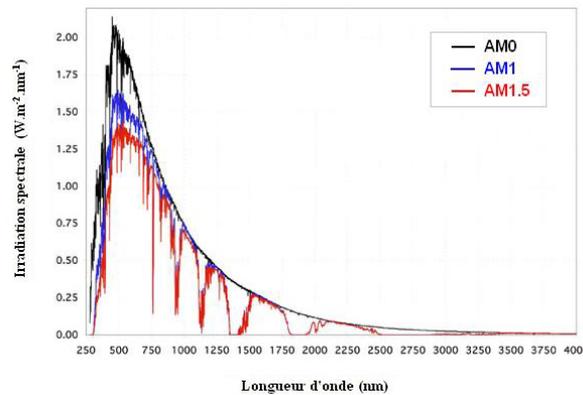


Figure I.2: Rayonnements AM0, AM1 et AM1.5 [2].

I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.3.1 L'interaction photon/semiconducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semiconducteurs. La Figure I.3 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (Figure I-3 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semiconducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect: les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur

d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron [3], afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (Figure I.3 (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

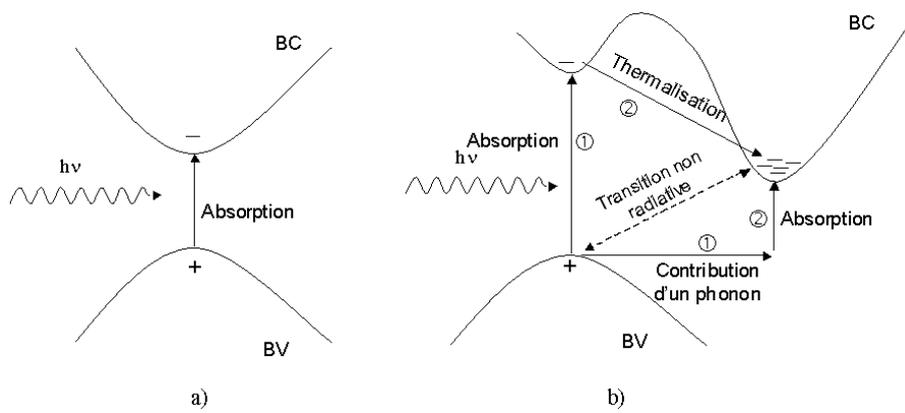


Figure I.3: Transitions inter-bandes d'électrons dans un semiconducteur. Le cas a) correspond à un semiconducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect).

L'interaction entre les photons et un semiconducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque: le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La Figure I.4 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

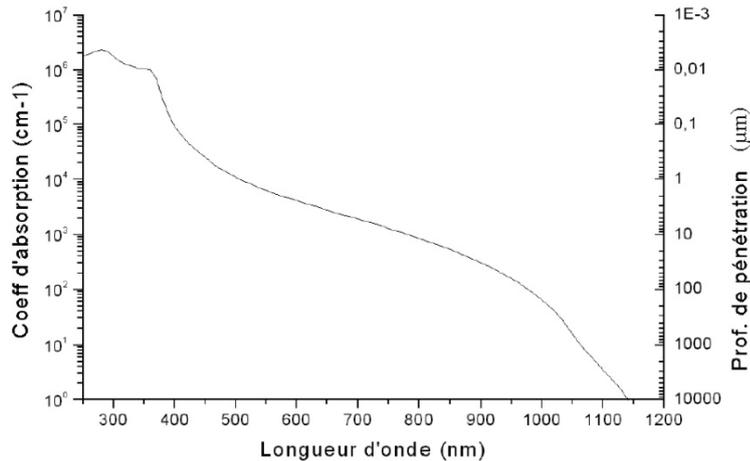


Figure I.4: Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde

L'interaction photon/électron au sein du semiconducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

I.3.2 fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semiconducteur;
- collecte des particules générées dans le dispositif [4].

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption des photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [5]. Ce

champ peut être généré de plusieurs manières: par la jonction de deux semiconducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semiconducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semiconducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homo-jonctions ou jonction p-n).

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semiconducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trou créées est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure I.5:

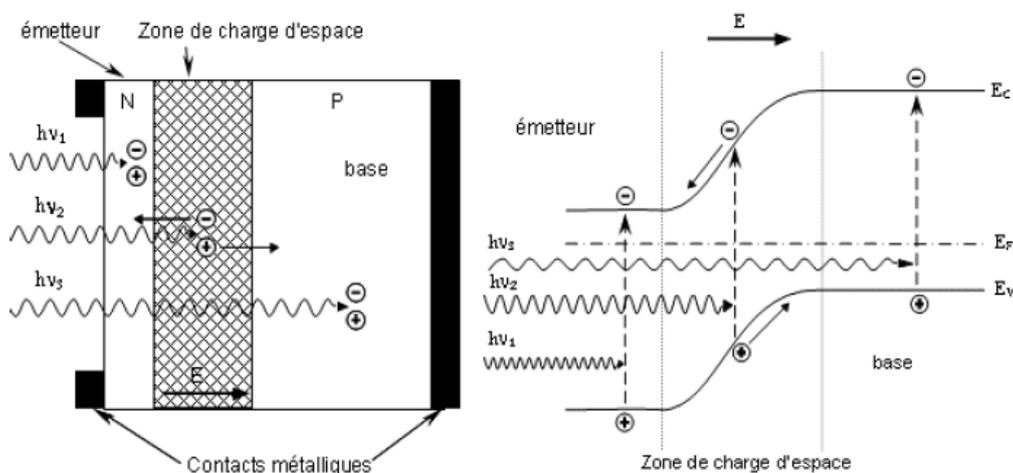


Figure I.5: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace.

Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région:

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires.

On aura un photocourant de diffusion;

- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les

trous vers la région p. On aura un photocourant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} .

C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

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

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (I.3)$$

Avec: I_{ph} : densité de courant photogénéré et I_{obs} : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (I.3) peut être écrite sous la forme suivante:

$$I(V) = I_{ph} - I_s(\exp(qV/kT) - 1) \quad (I.4)$$

Avec: I_s : courant de saturation de la diode, q: charge élémentaire, k: constante de Boltzmann, T: température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent: le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la Figure I.6.

A partir de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment:

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$);

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$);

I_m : à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque;

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque;

η : rendement de conversion;

FF: facteur de forme.

$\eta = (\text{Puissance électrique maximale fournie}) / (\text{Puissance solaire incidente})$:

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_i \cdot S} = \frac{FF V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot S} \quad (I.5)$$

Avec P_i : puissance d'éclairement reçue par unité de surface; S: surface de la cellule

$FF = (\text{Puissance maximale délivrée sur la charge}) / (V_{co} \cdot I_{cc})$:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.6)$$

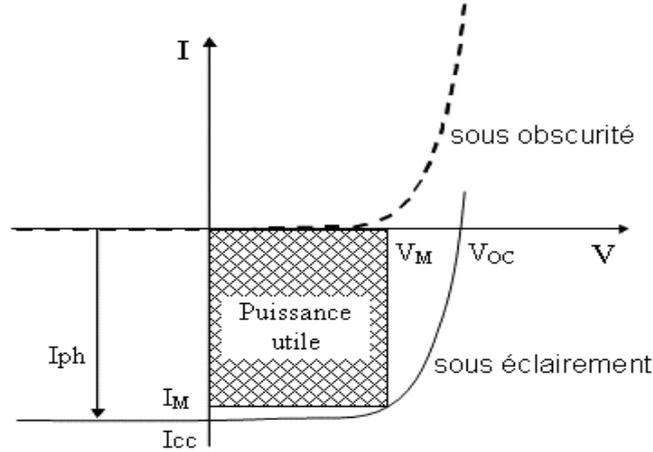


Figure I.6: Caractéristiques I=(V) sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

I.4 Différentes technologies existantes

Dans ce paragraphe on va citer les différentes filières technologiques des cellules photovoltaïques:

I.4.1 Le silicium

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure I.7. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

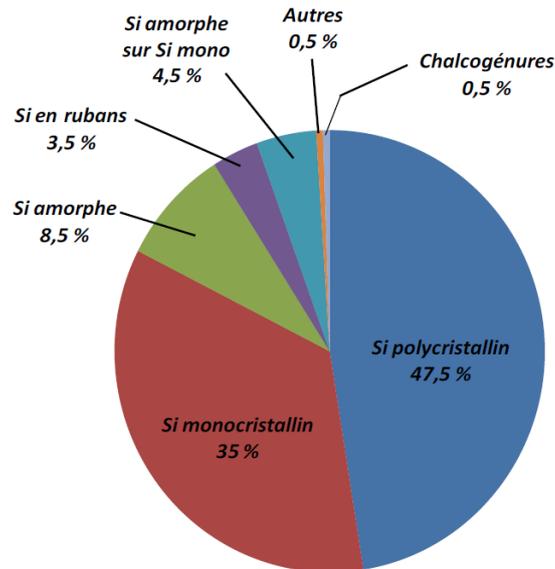


Figure I.7: Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [6]

I.4.1.1 Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [7]. Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm² (Université de New South Wales, Australie) [6,8], soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

I.4.1.2 Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 cm² [6,8]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des

rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

I.4.1.3 Silicium en ruban autosupporté

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [6,8].

I.4.1.4 Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres. Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [6,8]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétérostructures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo [6,9]) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

I.4.2 Cellules en couches minces

Appelées aussi les chalcogénures, nous citons deux type CdS-CdTe et CIS:

I.4.2.1 Matériaux à base de tellure de cadmium

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière à base de Sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium (CdS-CdTe) représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire [6,8]. En outre, son très grand coefficient d'absorption

fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 μm . Les résultats de rendement de conversion sont très encourageants: près de 11 % sur une surface de 4900 cm^2 . Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière.

I.4.2.2 Matériaux à base de séléniure de cuivre indium

Avec un coefficient d'absorption 100 à 1000 fois plus fort que celui du silicium cristallin (dans la gamme de 1,1 à 2,6 eV), le Diséléniure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau très prometteur [6,8]. Ce composé type I-III-VI, de structure chalcopyrite, a un rendement théorique de l'hétérojonction (n)CdS-(p)CuInSe₂ qui se situe autour de 25 %. Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires de type Cu(Ga,In)(Se,S)₂ ont récemment atteint des rendements de conversion record de 18,8 % en laboratoire [6,10]. Malgré les difficultés connues pour maîtriser cette filière à grande échelle, un rendement de 12,8 % a été obtenu sur le plan industriel par ZSW [6,8].

I.4.3 Les cellules III-V multi-jonctions

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi-jonction III-V dites (de troisième génération) répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisés pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De part le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée [10,11].

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales.

I.4.4 Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon un principe différent de celui décrit

précédemment [16]. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semiconducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm^2 et est à mettre au profit de la société *Sharp* [6,10]. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 % [6,12].

I.4.5 Les cellules photovoltaïques organiques

L'effet photovoltaïque est observé depuis 30 ans dans les matériaux semiconducteurs organiques. Les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles ($<10^{-5}\%$). En 1986 l'équipe de Tang a montré que les rendements proches du 1% sont atteignables [6,10,17]. Le rendement n'a pas été amélioré que depuis le début des années 2000, il a dépassé les quatre pourcent avec les travaux de J. Xue [18], après ça une valeur record de 7.9% est obtenue par la firme SOLARMER, utilisant des matériaux dérivés du fullerène (PCBM) et un copolymère alterne [19].

I.5 Association des cellules solaires

I.5.1 Association en série

Dans un montage en série, le même courant traverse toutes les cellules, la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [13] La Figure I.8 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

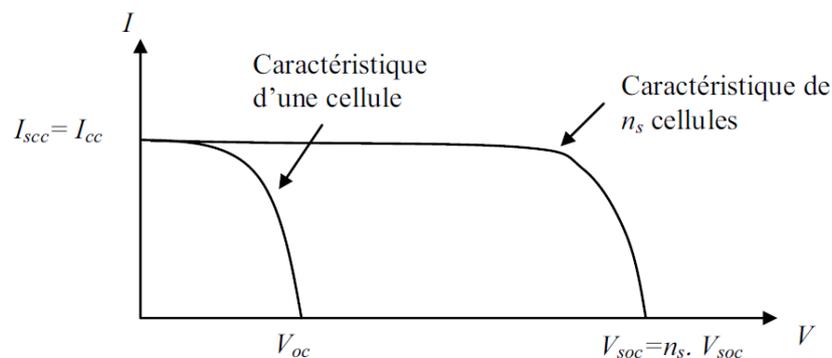


Figure I.8: Caractéristique résultante d'un montage en série

I.5.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. [13]

La Figure I.9 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

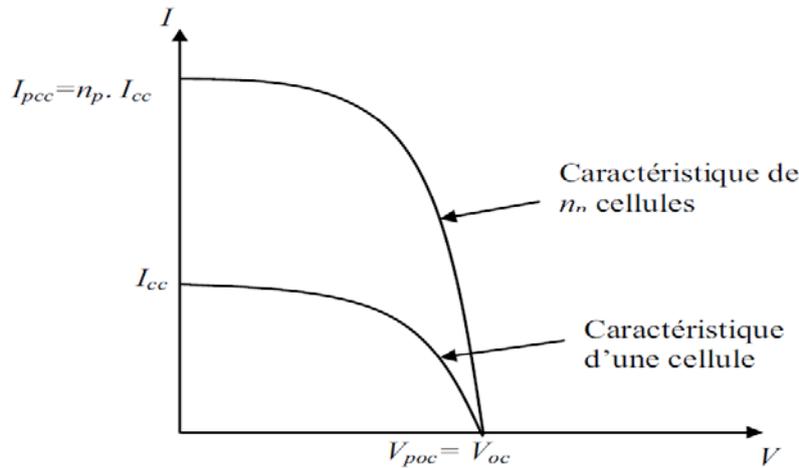


Figure I.9: Caractéristique résultante d'un montage en parallèle

I.5.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations:

$$I_{cc} (total) = n_p \times I_{cc} \quad (I.7)$$

$$V_{oc} (total) = n_s \times V_{oc} \quad (I.8)$$

n_p : nombre des cellule en parallèle,

n_s : nombre des cellule en série.

La Figure I.10 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

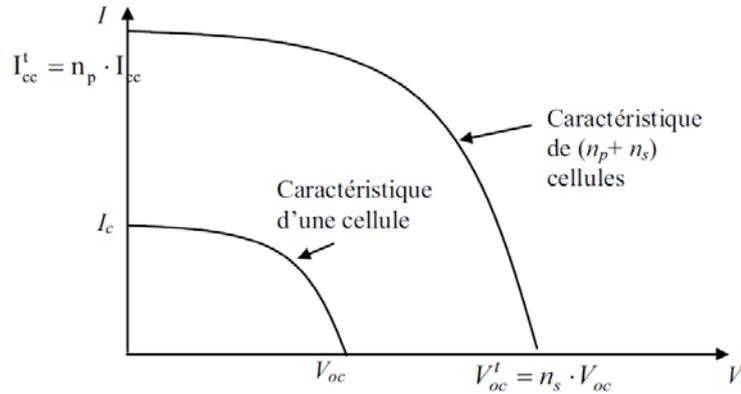


Figure I.10: Caractéristique résultante d'un montage hybride de (n_p et n_s) cellules

Les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes, à savoir l'association des cellules (série ou/et parallèle). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [14].

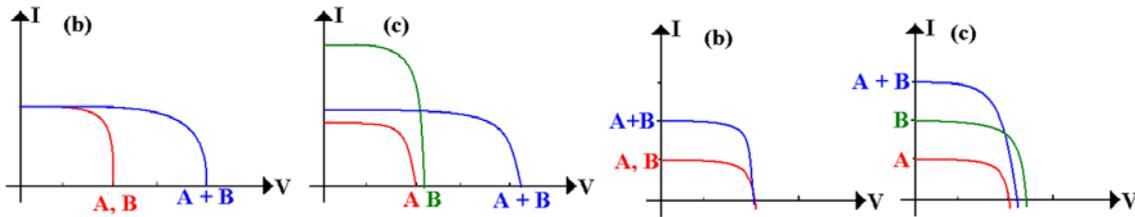


Figure I.11: à gauche cellules A et B en série à droite cellules A et B en parallèle
(b) cellules identiques (c) cellules non identiques

Les cellules non identiques génèrent à leur connexion plus de pertes que deux cellules identiques, ce qui impose une contrainte de reproductibilité dans la fabrication des cellules [15].

I.6 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technologie photovoltaïque, commençant par quelques notions sur le rayonnement solaire, et comment il pénètre notre atmosphère selon différentes angles et comment ces angles influent sur son énergie (air mass AM_x). Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi que leurs diverses filières technologiques, parmi lesquelles on a parlé sur les cellules solaires organique que seront bien détaillées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES
ORGANIQUES

II.1 Introduction

La conversion directe de la lumière solaire en électricité par des cellules photovoltaïques est connue depuis le XX^{ème} siècle. Les dispositifs monocristallins de silicium et de l'arsenic de gallium dépassent des efficacités de 25% [20]. La technique de la couche mince devrait réduire la consommation du matériau et coûts de production, mais les coûts de production restent toujours élevés pour l'utilisation à grand public. Généralement, les semiconducteurs inorganiques ont besoin des opérations à hautes températures dans leurs productions, qui sont très coûteuses, et difficiles à produire [21].

Les recherches scientifiques ont pu de découvrir des nouveaux matériaux et Semiconducteurs 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 est dédié à la définition des Semiconducteurs organiques, suivie du principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques. Puis nous nous intéressons à la présentation des différents types et technologies des cellules photovoltaïques organiques, ainsi que les avantages et les inconvénients de ces cellules.

II.2 semiconducteur organique

Un semiconducteur organique est un composé organique, sous la forme d'un film moléculaire ou polymère, qui montre des propriétés similaires aux semiconducteurs inorganiques [22]. Ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) qui est l'homologue de la bande de valence pour les SC inorganiques, d'une bande LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital), l'homologue de la bande de conduction des SC inorganiques, et d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique, ou électronique plastique. Par organique, on entend que les molécules utilisées sont à base de carbone. On dit organique par opposition aux semiconducteurs inorganiques comme le silicium ou l'arséniure de gallium par exemple. Les semiconducteurs organiques offrent plusieurs avantages comme: légèreté, flexibilité, facilité de fabrication et l'auto-assemblage et jetable, mais cette technologie présente cependant une limitation due au temps de vie cela est dû à la sensibilité des matériaux organiques vis à vis de l'humidité et de l'oxygène, et parfois à la durée de vie des matériaux eux même.

On peut classer les semiconducteurs organiques en deux catégories: les molécules de faibles masses molaires appelées communément (petites) molécules conjuguées Figure II.2, ou bien les polymères conjugués Figure II.1.

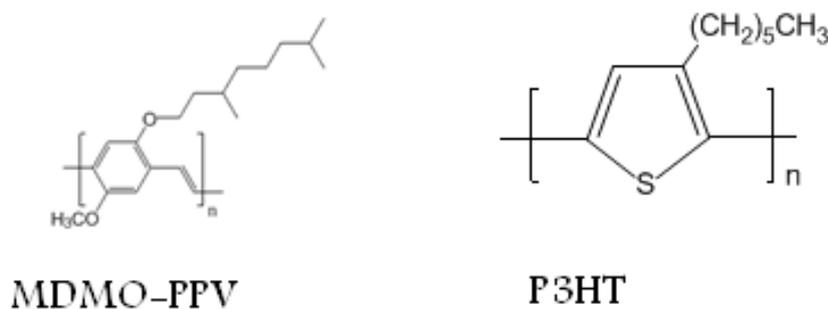


Figure II.1: deux polymères semiconducteurs

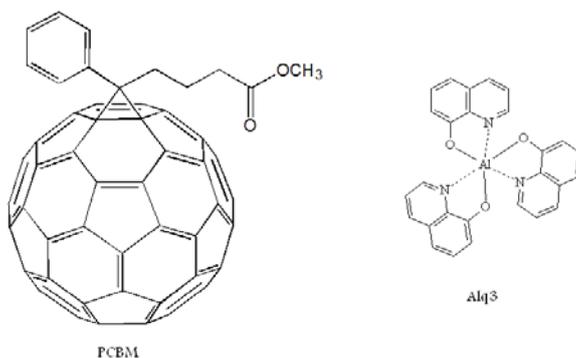


Figure II.2: deux petites molécules semiconducteurs

II.3 Fonctionnement des cellules photovoltaïques organiques

Entre l'étape initiale où la lumière pénètre dans un dispositif photovoltaïque organique et la dernière étape où les électrons sont collectés sur les électrodes, plusieurs processus agissent successivement, déterminant l'efficacité de la photoconversion [23]. Ces étapes sont détaillées ci-dessous et éclaircies par la Figure II.3.

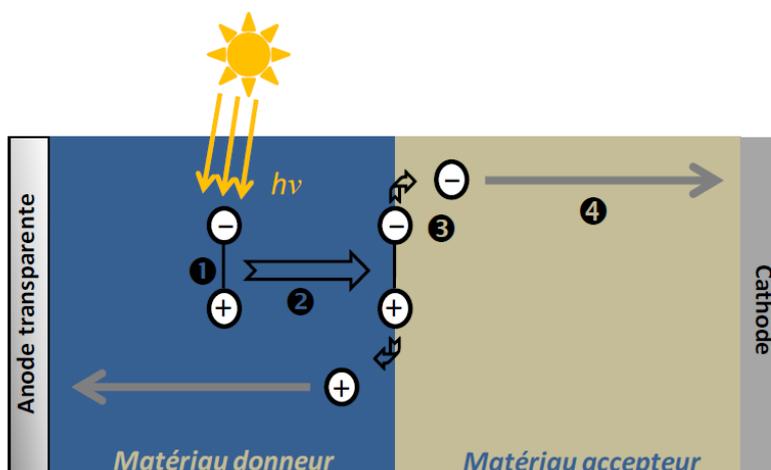


Figure II.3: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique [6]

II.3.1 Absorption des photons Génération des excitons

La création d'excitons consécutive à l'absorption de photons est une étape fondamentale dans l'opération d'une cellule solaire. L'absorption de photons dans un semiconducteur organique se traduit par la transition d'un électron de la HOMO vers le niveau LUMO qui entraîne l'apparition d'un trou (dans la HOMO) qui reste lié à l'électron (dans la LUMO) par une attraction coulombienne. Le couple électron-trou, électriquement neutre, est appelé exciton (Figure II.3 ❶). Cela signifie que l'excitation induite par l'absorption de la lumière ne conduit pas directement à la création de porteurs de charges électriques libres. Il existe deux types de excitons: les excitons de type Frenkel et les excitons de type Mott-Wannier. Le premier, proposé par J. Frenkel, consiste à un couple électron-trou confiné dans la même unité moléculaire [24,25]. Dans le cas où le couple électron-trou peut être séparé par une distance plus grande que la distance moléculaire, nous parlerons alors d'exciton de type Mott-Wannier [24,26]. Il est à noter que dans les matériaux organiques, les excitons sont le plus souvent considérés comme étant de type Frenkel [24,27,28]. Pour les polymères semiconducteurs, il existe aussi l'exciton intra-chaîne et l'exciton inter-chaîne. Le premier terme indique que la charge (paire électron-trou) se localise sur une même chaîne de polymère alors que le dernier indique que la charge se trouve sur différentes chaînes de polymère [29,30].

L'exciton étant par essence électriquement neutre, il ne transporte pas de courant et son déplacement n'est pas fonction du champ électrique. Pour produire du courant dans le cas de cellules solaires, il faudra donc trouver un moyen pour dissocier les excitons créés par l'absorption de la lumière solaire. Cette séparation nécessite une énergie supérieure à l'énergie de liaison de la paire électron-trou. Dans les semiconducteurs organiques, cette énergie de liaison est fonction du matériau et peut varier de 0,1 eV à 1,6 eV [31]. De fait, à température ambiante, aucune dissociation thermique n'est envisageable contrairement aux semiconducteurs inorganiques dont l'énergie de liaison des excitons n'est que de quelques millivoltes.

II.3.2 Diffusion des excitons

Nous venons de voir que pour produire du courant à partir des semiconducteurs, il est impératif de dissocier les excitons avant qu'ils ne s'annihilent (recombinaison de la paire électron-trou). Idéalement, tous les excitons doivent atteindre un site de dissociation. La distance maximale des sites de dissociation des lieux de création des excitons ne doit donc pas excéder leur longueur de diffusion L_D (Figure II.3②). L_D est fonction de la vitesse de déplacement des excitons et de leur durée de vie. Cette grandeur varie en fonction des matériaux, et dans les matériaux organiques répertoriés dans la littérature on relève des valeurs de l'ordre de 5 à 20 nm [24,27]. Dans certains cas, les phthanocyanines et les pérylènes, les excitons peuvent avoir une longueur de diffusion supérieure de l'ordre de 30 à 100 nm [24]. Pour que les excitons puissent atteindre un site de dissociation, il faut qu'ils soient générés à une distance inférieure ou égale à L_D de ce site.

II.3.3 Dissociation des excitons

II.3.3.1 Cellule de type Schottky

La zone de charge d'espace ou zone de déplétion à l'interface métal/semiconducteur, dans laquelle règne un fort champ électrique peut dans certains cas être utilisée pour dissocier les excitons. Cependant, dans le cas des cellules organiques, ce phénomène est trop peu efficace pour permettre d'obtenir des cellules solaires avec un rendement de plusieurs pourcents.

II.3.3.2 Jonction donneur/accepteur

Les conditions de dissociation peuvent être exprimées à partir du diagramme énergétique des matériaux mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques. La Figure II.4 représente une jonction de type donneur/accepteur. Les semiconducteurs organiques sont caractérisés par une constante diélectrique faible. Typiquement ϵ_r est comprise entre 2 et 4 [32,33]. Par conséquent, la liaison coulombienne est très forte et rend plus difficile la dissociation des excitons. Une méthode efficace pour les dissocier dans les semiconducteurs organiques est de mettre en œuvre une interface entre un matériau de faible affinité électronique (donneur d'électrons) et un autre de forte affinité électronique (accepteur d'électrons) comme nous le montrons Figure II.4. Si un exciton est créé dans le matériau donneur d'électrons et atteint l'interface D/A, à une énergie E_{ex} , l'électron sera transféré à l'accepteur tandis que le trou restera dans le matériau donneur (Figure II.3 ③). A l'opposé, si un exciton est formé dans l'accepteur; le trou sera transféré vers le donneur à l'interface D/A et l'électron demeurera dans le semiconducteur accepteur d'électrons. Ce processus aura effectivement lieu si la force d'attraction de l'électron (ou du trou) dans le matériau accepteur (ou donneur) est suffisante. En d'autres termes, il faut que l'énergie finale de la paire de polarons E_{CT} est inférieure à l'énergie initiale de l'exciton E_{ex} [6].

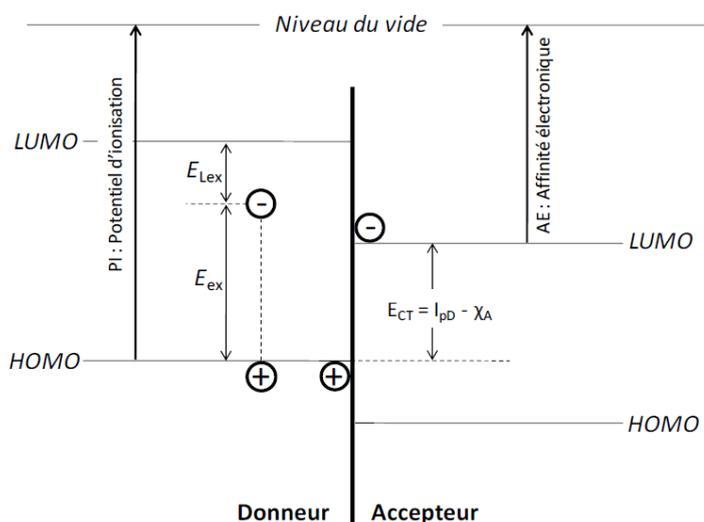


Figure II.4: Dissociation de l'exciton dans l'interface D/A

II.3.4 Transport et collection des charges jusqu'aux électrodes

La dernière étape de la conversion photovoltaïque consiste à ramener les charges électriques vers les électrodes (Figure II.3 ④). Le transport des charges libres est affecté par les recombinaisons sur le trajet vers l'électrode. C'est particulièrement le cas des cellules de type

Schottky où le même matériau transporte aussi bien des électrons que des trous. Le choix des électrodes métalliques et des matériaux organiques influencera fortement les performances de conversion photovoltaïques des cellules. Pour les dispositifs organiques, le travail de sortie des électrodes métalliques doit permettre de former des contacts ohmiques pour collecter les électrons et les trous dans les matériaux accepteurs et donneurs respectivement. Parallèlement, ces contacts doivent être bloquants pour les porteurs de signe opposés (trous et électrons dans les matériaux accepteurs et donneurs respectivement). Pour la collection des électrons, il est préférable de choisir des métaux dont le travail de sortie est faible comme Al, Ca, Ag. Quant aux métaux à fort travail de sortie, comme Au ou Pt, ils pourront être utilisés pour collecter les trous. Cependant, pour les cellules solaires, une des deux électrodes devra impérativement être transparente pour laisser passer la lumière.

Actuellement, la cathode la plus utilisée dans les cellules solaires organiques est l'oxyde d'indium et d'étain ITO (Indium Tin Oxyde - oxyde d'indium et d'étain) dont la largeur de la bande interdite est de 3,7 eV et dont le travail de sortie (EF-E0) est compris entre 4,5 et 4,9 eV. L'ITO peut être également déposé sur les substrats flexibles comme Polyéthylène téréphtalate (PET) [24,34,35].

II.4 Différentes structures des cellules photovoltaïques organiques

II.4.1 Structure monocouche

Ce type des cellules à été décrit comme étant de type de 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.5. En générale, les cellules de type Schottky se présentent sous la forme de ITO/semiconducteur organique/métal. La dissociation des porteurs photo-générés s'effectue à l'interface du semiconducteur et de l'électrode métallique. Des travaux ont d'abord été menés sur le polythiophène et ses dérivés [6], sans grand succès (rendements inférieurs à 0,001 %). L'intérêt s'est ensuite orienté vers le poly(p-phenylène vinylène) [6], 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 [6,36,37]. 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.

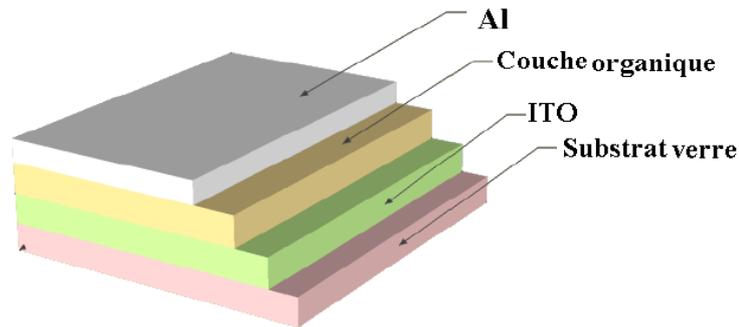


Figure II.5: Structure monocouche [15]

II.4.2 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.6. 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.6(a)) et les hétérojonctions en volume. Ces dernières peuvent s'arranger de deux manières différentes: elles peuvent former une jonction « interdigitée » (Figure II.6(b)), ou une jonction « interpénétrée » (Figure II.6(c)).

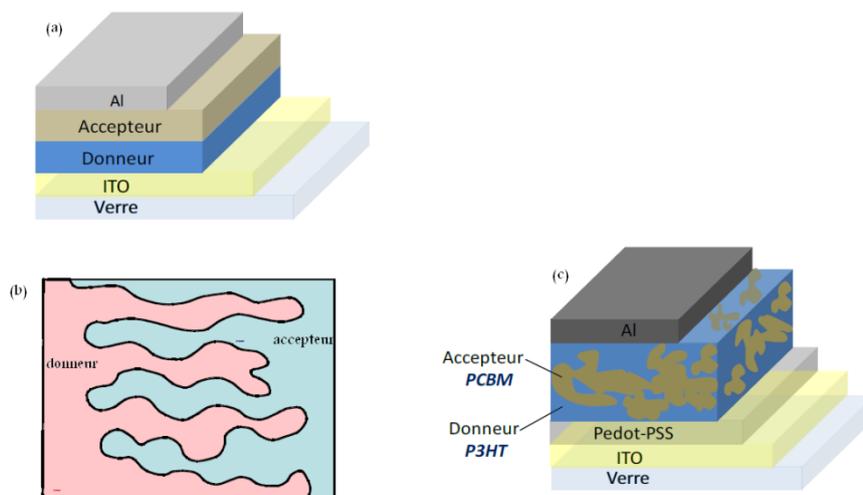


Figure II.6: trois types d'hétérojonctions rencontrées dans les cellules solaires organiques [6]

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 [38,39], 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 [6,40]. 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 [10]. En 2007, et grâce à nouveaux polymères, le rendement atteint 7.9%.

II.4.3 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 semiconducteurs 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 [24]. 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 [24], il est ainsi possible d'obtenir une couche inter-faciale de mélange donneur/accepteur par inter-diffusion des deux matériaux.

II.4.4 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 [42].

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 [43]. 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.7.

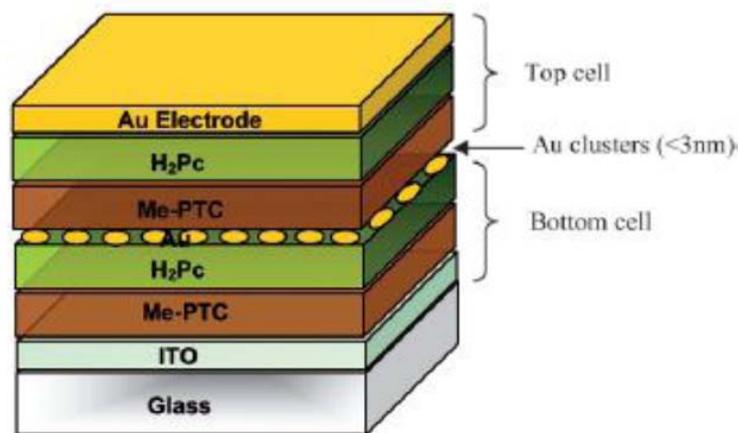


Figure II.7: structure d'une cellule tandem [24]

En 2007 le groupe de Kim [41], 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 TiO_x, une cellule présentant un rendement de conversion énergétique de 6,7 % sous un éclairement de 20mW/cm². Cette structure est présentée à la Figure II.8.

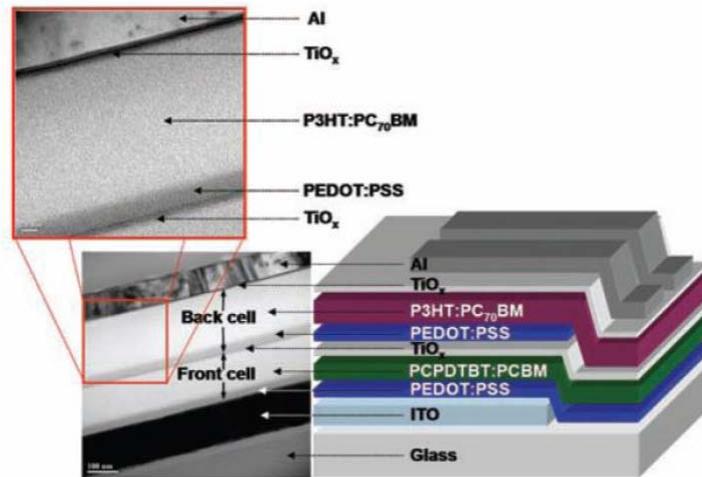


Figure II.8: cellule photovoltaïque organique en architecture tandem [11]

II.5 Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques

II.5.1 Avantages

- ⊙ **Légèreté et flexibilité:** les semiconducteurs organiques sont très légers, ce qui peut être pratique pour des installations de grandes envergures. En plus, ils sont moins fragiles que les semiconducteurs 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 [24]: spin-coating, drop-coating, injek-printing, roll-to-rool 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, Schmidt - Mende réalisèrent une cellule solaire auto-assemblée à base de cristaux liquides de hexabenzocoronène et pérylène [44].
- ⊙ **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 semiconducteur 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.

II.5.2 Inconvénients

- ⊙ **Absorption limitée:** l'énergie de la bande interdite des polymères semiconducteurs 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 [45]. 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 [15]:

- Vieillessement intrinsèque des matériaux: c'est le vieillissement du matériau hors exposition à l'eau et à l'oxygène, mais sous éclairement. La dégradation est appelée photolyse.
- Vieillessement extrinsèque des matériaux: O_2 et H_2O 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.

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 semiconducteurs 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, donc ce que nous devons faire pour les optimiser au maximum, en exploitant les techniques existantes que nous aurons expliqué dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

LES ALGORITHMES GENETIQUES
MONO ET MULTI-OBJECTIF

III.1 Introduction

La résolution des problèmes d'optimisation consiste, en règle générale, à définir une ou plusieurs fonctions objectives à minimiser ou maximiser selon le type de problème traité. La méthode d'optimisation de base est la méthode d'essai et d'erreur: il s'agit de tester un certain nombre de solutions potentielles jusqu'à l'obtention d'une solution adéquate. Les algorithmes informatiques constituent un puissant outil pour l'automatisation de ce processus. Parmi les méthodes non traditionnelles d'optimisation: les algorithmes génétiques.

Dans les années 1960, John Holland étudie les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (*the canonical genetic algorithm AGC*) dans son livre « *Adaptation in Natural and Artificial Systems* » [46]. Il expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échangeant le matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique). Ce modèle servira de base aux recherches ultérieures et sera plus particulièrement repris par Goldberg qui publiera en 1989, un ouvrage de vulgarisation des algorithmes génétiques, et ajouta à la théorie des algorithmes génétiques les idées suivantes:

- ⊙ Un individu est lié à un environnement par son code d'ADN.
- ⊙ Une solution est liée à un problème par son indice de qualité.

III.2 Algorithmes génétiques

Un algorithme génétique est une méthode méta-heuristique qui simule des évolutions biologiques, en parcourant l'espace des paramètres. Le changement des paramètres de conception suit un processus d'évolution basé les règles de la génétique qui modifient les chromosomes (croisements, mutation, sélection...).

Dans un problème d'optimisation, les variables définissent chacune un gène du chromosome. Ces chromosomes évoluent grâce à différentes opérations calquées sur les lois de la génétique vers un chromosome optimal [47].

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer les cinq éléments suivants:

- ❶ Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne

le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.

② Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

③ Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.

④ Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.

⑤ Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

III.2.1 Principe des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont l'œuvre de Holland [46]. Il s'est directement inspiré du modèle des lois de la nature de Darwin, modèle basé sur la survie des espèces les plus fortes. Ainsi, dans un bassin de population donné, les plus forts individus auront plus de chance de se reproduire et ainsi de transmettre leurs gènes pour produire de meilleurs descendants, augmentant la qualité globale de la population. La population qui résultera de cette reproduction sera donc globalement mieux adaptée à l'environnement que la précédente puisque la plupart des individus auront hérité de plusieurs des caractéristiques de l'"élite" de la génération précédente (puisque chacun hérite à la fois de sa mère et de son père). Et c'est ainsi, en recombinaison à chaque génération les caractéristiques élémentaires de bonne

adaptation et en saupoudrant le tout d'un peu de hasard, que la population va évoluer vers une adéquation toujours meilleure avec l'environnement.

Dans cette ligne de pensée où les spécimens se reproduisent, dans le modèle des algorithmes génétiques, les spécimens se reproduiront aussi; en particulier les plus forts à un rythme plus rapide. Des opérations génétiques sont effectuées sur deux candidats pour obtenir deux nouveaux candidats plus performants que leurs propres parents. La progéniture aura hérité de bons gènes de chaque parent. Pour trouver une solution à un problème, les GAs utilisent le hasard. En effet, les gènes de chaque parent sont choisis et croisés de façon aléatoire dans la progéniture.

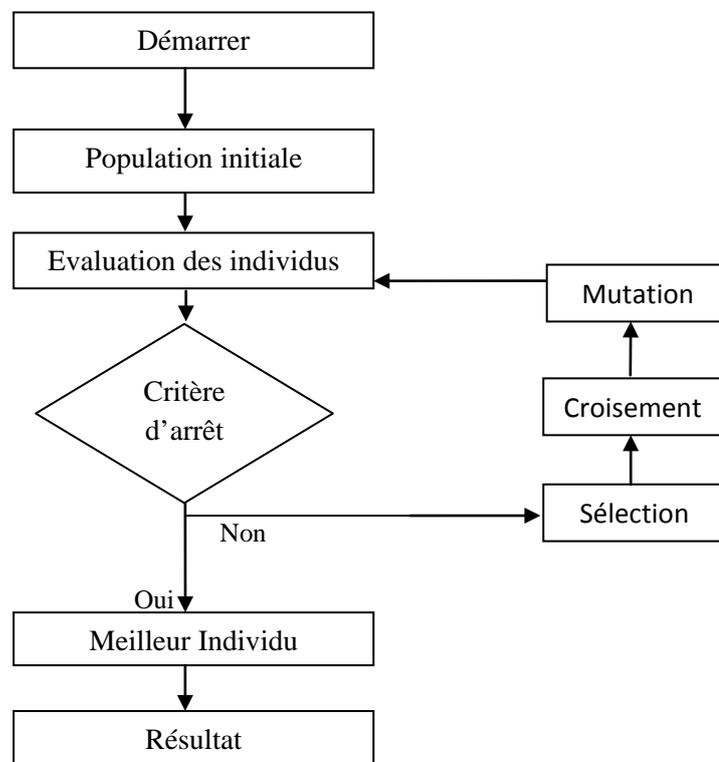


Figure III.1: Schéma du principe des algorithmes génétiques

III.2.2 Les caractéristiques des algorithmes génétiques

La mise en œuvre des GA se caractérise par divers aspects tels que l'espace de recherche de solutions, la fonction d'évaluation servant à sélectionner les chromosomes parents, le codage des paramètres du problème à traiter, les règles de transition probabilistes et le rôle du hasard.

- ⊙ **La fonction d'évaluation:** c'est une fonction objective associée aux individus composant la population. Elle est utilisée par les GAs pour sélectionner les candidats

aptes à la reproduction. La fonction d'évaluation exprime non seulement la fonction objective du problème, mais elle reflète également ses contraintes, puisque normalement des pénalités sont imposées quand les contraintes ne sont pas respectées. Cette fonction permet la représentation des multiples nuances du problème réel, ce qui n'arrive pas toujours dans le cas des heuristiques classiques.

- ⊙ **Le codage:** La première étape est de définir et de coder convenablement le problème. Historiquement le codage utilisé par les algorithmes génétiques était représenté sous forme de chaîne binaire contenant toute l'information nécessaire à la description d'un individu (chromosome). D'autres formes de codage sont possibles à savoir le codage réel, codage de gray, etc. Il existe deux types de difficultés dans le choix d'un codage. D'une part celui-ci doit pouvoir être adapté au problème de façon à limiter au mieux la taille de l'espace de recherche, et aussi de façon que les nouveaux chromosomes engendrés par les opérateurs de recherche soient significatifs le plus souvent possible, c'est à dire qu'ils puissent coder des solutions valides respectant les contraintes du problème.
- ⊙ **Les règles de transitions probabilistes:** elles sont utilisées pour choisir le site de croisement de manière probabiliste. La sélection des deux chromosomes, impliqués dans le processus de croisement, est faite en fonction de leur qualité.
- ⊙ **Le rôle du hasard:** Les GAs utilisent des règles de transition probabilistes. Dans le processus de croisement, le choix des deux chromosomes et le lieu de croisement sont réalisés de façon probabiliste en fonction de leur qualité. Le hasard guide la recherche vers des régions de l'espace de recherche susceptibles d'améliorer la solution.

III.2.3 Opérateur de sélection

Les opérateurs génétiques sont appliqués à une population initiale de façon à produire, dans le temps, des populations successives de qualité. Une des représentations génétiques les plus utilisées est la binaire, dans laquelle chaque gène (composant) d'un chromosome est symbolisé par les valeurs zéro ou un. La représentation par nombres entiers associe à chaque gène une valeur entière. La Figure III.2 représente une chaîne (un chromosome) composé de 7 bits.

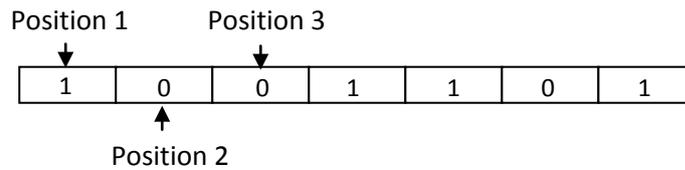


Figure III.2: Schéma d'un chromosome.

Les opérateurs génétiques de base sont: la sélection, le croisement, la mutation et l'élitisme.

III.2.3.1 Sélection

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu'ils traitent. Les deux principes de sélection suivants sont les plus couramment utilisés:

⊙ La roulette

Cette méthode exploite la métaphore d'une roulette de casino. La roue est divisée en autant de secteurs que d'individus dans la population. La taille de ces secteurs est proportionnelle à l'adaptation de chaque individu. En faisant tourner la roue, l'individu pointé à l'arrêt de la boule est sélectionné. Les individus les mieux adaptés ont donc plus de chance d'être tirés au sort lors du déroulement du jeu [48].

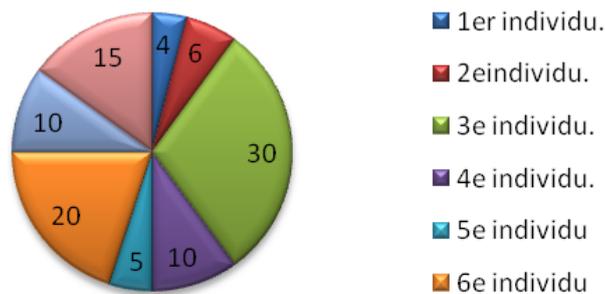


Figure III.3: La roulette [49]

⊙ Le tournoi

Cette méthode ressemble plus à ce qui se passe dans la réalité. Comme son nom l'indique, elle fait s'affronter deux ou plusieurs individus afin que le meilleur gagne. Plusieurs variantes existent. On peut par exemple faire varier le nombre d'individu qui

doivent s'affronter au départ, ou encore permettre ou non que le même individu soit éligible plusieurs fois lors d'un même tournoi [48].

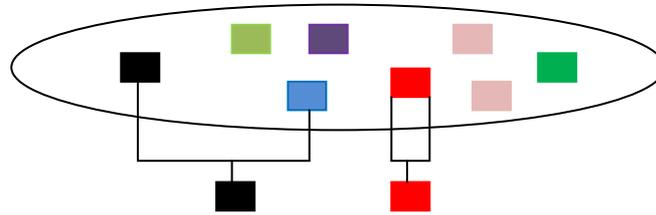


Figure III.4 : Le tournoi entre deux individus avec rééligibilité [49]

III.2.3.2 Croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants.

Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits est le croisement à découpage de chromosomes (slicing crossover). Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de M gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents.

III.2.3.3 Mutation

La mutation est un processus qui consiste à permuter un bit choisi au hasard dans un chromosome. On attribue à ce processus la fréquence à laquelle la mutation se produit. Si on lui associe une probabilité de 0.005, un chromosome aura cinq chances sur mille d'être muté. La mutation modifie aléatoirement la valeur d'une position d'une chaîne. Elle est utile pour ramener du matériel génétique qui aurait été oublié par les opérateurs de croisement. Certaines implantations vont automatiquement changer la valeur du bit choisi, d'autres vont générer aléatoirement une nouvelle valeur de bit, ce qui n'entraîne aucune mutation [49].

III.2.3.4 Elitisme

L'élitisme est un opérateur optionnel particulier, il permet de garder l'individu le mieux adapté d'une génération à la suivante. En effet, l'opérateur de sélection peut ne pas le

sélectionner, le croisement avec un autre individu peut donner des individus moins adaptés si les gènes ne sont pas bien recombinaison ou encore sa mutation peut également le rendre moins adapté [50].

III.2.4 Les grandes étapes de l'algorithme génétique

Le principe d'un algorithme génétique consiste à évaluer une population et à en générer une autre de façon itérative grâce aux actions opérées par les opérateurs génétiques. Le nombre de chromosomes dans une population reste inchangé à travers les diverses générations. Pour mettre en œuvre un GA, il faut disposer d'un schéma pour coder les solutions du problème, une fonction d'évaluation, une procédure d'initialisation, un ensemble d'opérateurs et un ensemble de paramètres qui gouvernent l'élaboration de la population initiale, l'exécution des opérateurs et l'arrêt de génération de nouvelles populations. De façon générale, un GA fonctionne selon les étapes suivantes:

- ⊙ **Étape 1:** On génère une population initiale de taille n , représentant le nombre de chromosomes. Puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome. La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante pour éviter la convergence prématurée vers des minimums locaux. Cette diversité se définit initialement et se maintient en combinant diverses stratégies de croisement et de mutation.
- ⊙ **Étape 2:** On évalue chaque chromosome par la fonction objective, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude.
- ⊙ **Étape 3:** On exécute les cycles de génération de populations. Chaque nouvelle génération remplace la précédente. Le nombre de cycle x est déterminé au départ. Dans chaque cycle, n chromosomes sont choisis pour reproduction et croisement deux à deux. Après la création de la $x^{\text{ème}}$ population, les chromosomes vont évoluer de façon telle que cette dernière génération contient des chromosomes qui sont meilleurs que ceux des générations précédentes.

III.2.5 Caractéristiques principales de l'optimisation génétique

Une définition de l'optimisation peut être comme suit Goldberg [51]: « Le désir humain de perfection trouve son expression dans la théorie de l'optimisation. Elle étudie comment

décrire et atteindre ce qui est meilleur, une fois que l'on connaît comment mesurer et modifier ce qui est bon et mauvais... La théorie d'optimisation comprend l'étude quantitative des optimums et les méthodes pour les trouver ». Donc, l'optimisation cherche à améliorer une performance en se rapprochant d'un ou des points optimaux via un procédé d'amélioration. Cependant les procédures d'optimisation classiques se concentrent souvent sur les résultats finaux (convergence vers un optimum) et négligent les performances intermédiaires en oubliant que l'objectif majeur de l'optimisation est l'amélioration. Les algorithmes génétiques est un processus d'optimisation qui tient compte de cette idée en recherchant de meilleures solutions au cours des générations. En outre, face à un problème pour lequel il existe une infinité de solutions, la recherche d'une solution optimale consiste à explorer l'espace des solutions en se laissant guider par les principes de l'algorithme génétique, plutôt que d'essayer naïvement toutes les solutions une à une pour trouver la meilleure.

Les algorithmes génétiques se caractérisent par rapport aux différentes méthodes classiques d'optimisation selon les principaux points suivants:

- ⊙ Ils utilisent un codage de paramètres et non pas les paramètres eux mêmes du problème considéré.
- ⊙ Ils considèrent une population de solutions au lieu d'une solution unique. Ceci va permettre d'escalader plusieurs pics en parallèle, réduisant ainsi la probabilité de trouver un faux pic.
- ⊙ Ils utilisent des règles de transitions probabilistes et non déterministes dans le but d'inscrire leur exploration dans une optique d'amélioration probable.

III.3 L'optimisation mono-objectif et multi-objectif

La résolution d'un problème d'optimisation mono-objectif consiste à trouver le minimum ou le maximum d'une fonction donnée. Ce besoin d'optimisation vient de la nécessité de fournir à l'utilisateur un système qui répond au mieux à ses attentes. Mais parfois, il s'avère nécessaire d'optimiser plusieurs fonctions, d'où la nécessité de recourir à une optimisation multi-objectifs.

III.3.1 Optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée [52]. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une

certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

III.3.1.2 Fonction Objective

C'est le nom donné à la fonction f (on l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum).

III.3.1.3 Variables de décision

Elles sont regroupées dans le vecteur \vec{x} . C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction f [52].

III.3.2 Optimisation mono-objectif

Un problème d'optimisation mono-objectif est présenté sous la forme suivante:

Minimiser $f(\vec{x})$ (fonction à optimiser)

Sujet de:

$\vec{g}(\vec{x}) \leq 0$ (m contraintes d'inégalité)

$\vec{h}(\vec{x}) = 0$ (p contraintes d'égalité)

Avec $\vec{x} \in R^n$, $\vec{g}(\vec{x}) \in R^m$, $\vec{h}(\vec{x}) \in R^p$.

Les vecteurs $\vec{g}(\vec{x})$ et $\vec{h}(\vec{x})$ représentent respectivement m contraintes d'inégalité et p contraintes d'égalité.

L'optimisation mono-objectif par algorithme génétique est représentée à la Figure III.5.

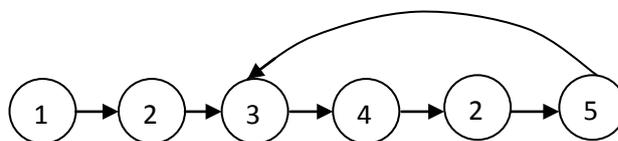


Figure III.5: L'optimisation mono-objectif par algorithme génétique.

- (1) Initialisation de la population.
- (2) Evaluation de l'efficacité des individus de la population.
- (3) Croisement.
- (4) Mutation.
- (5) Sélection.

III.3.2.1 Minimum global

Un “point” \vec{x}^* est un minimum global de la fonction f si on a:

$f(\vec{x}^*) < f(\vec{x})$ quel que soit \vec{x} tel que $\vec{x}^* \neq \vec{x}$. Cette définition correspond au point $M3$ de la Figure III.6.

III.3.2.2 Minimum local fort

Un “point” \vec{x}^* est un minimum local de la fonction f si on a:

$f(\vec{x}^*) < f(\vec{x})$ quel que soit $\vec{x} \in V(\vec{x}^*)$ et $\vec{x}^* \neq \vec{x}$, où $V(\vec{x}^*)$ définit un “voisinage” de \vec{x}^* . Cette définition correspond aux points $M2$ et $M4$ de la Figure III.6.

III.3.2.3 Minimum local faible

Un “point” \vec{x}^* est un minimum local faible de la fonction f si on a:

$f(\vec{x}^*) \leq f(\vec{x})$ quel que soit $\vec{x} \in V(\vec{x}^*)$ et $\vec{x}^* \neq \vec{x}$, où $V(\vec{x}^*)$ définit un “voisinage” de \vec{x}^* . Cette définition correspond au point $M1$ de la Figure III.6

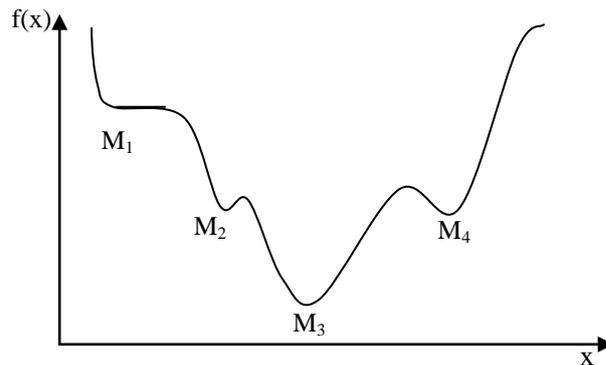


Figure III.6: différents minima d’une fonction objective [52].

III.3.3 Optimisation multi-objectif

Lorsqu’un problème d’optimisation implique plus d’une fonction objective. Par exemple, on veut un système performant et on veut aussi que ce système consomme peu. Dans ce cas, on parle de problème d’optimisation multi-objectif (ou problème d’optimisation multicritère). Celui-ci s’écrit de la manière suivante:

Minimiser $\vec{f}(\vec{x})$

Avec $\vec{g}(\vec{x}) \leq 0$

Et $\vec{h}(\vec{x}) = 0$

Où $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$, $\vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k$, $\vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m$ et $\vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p$.

Comme on peut le voir ici, on n'a plus un seul objectif à atteindre, mais k (le vecteur \vec{f} regroupe k fonctions objectif). Le but que l'on se fixe dans la résolution d'un problème d'optimisation multi-objectif est de minimiser "au mieux" les différents objectifs [52].

III.3.3.1 Dominance

Lorsque nous avons résolu notre problème d'optimisation multi-objectif, nous avons obtenu une multitude de solutions. Seul un nombre restreint de ces solutions va nous intéresser. Pour qu'une solution soit intéressante, il faut qu'il existe une relation de dominance entre la solution considérée et les autres solutions, dans le sens suivant:

On dit que le vecteur $\vec{x}1$ domine le vecteur $\vec{x}2$ si:

- $\vec{x}1$ est au moins aussi bon que $\vec{x}2$ dans tous les objectifs, et,
- $\vec{x}1$ est strictement meilleur que $\vec{x}2$ dans au moins un objectif.

Les solutions qui dominent les autres mais ne se dominent pas entre elles sont appelées solutions optimales au sens de Pareto (ou solutions non dominées).

III.3.3.2 L'optimisation au sens de Pareto

III.3.3.2.1 Optimum de Pareto

Au XIX^{ième} siècle, Vilfredo Pareto, un mathématicien italien, formule le concept suivant [60]: dans un problème multi-objectif, il existe un équilibre tel l'on ne peut pas améliorer un critère sans détériorer au moins un des autres critères.

Cet équilibre a été appelé optimum de Pareto. Un point x est dit Pareto-optimal s'il n'est dominé par aucun autre point appartenant à E . Ces points sont également appelés solutions *non inférieures* ou *non dominées*.

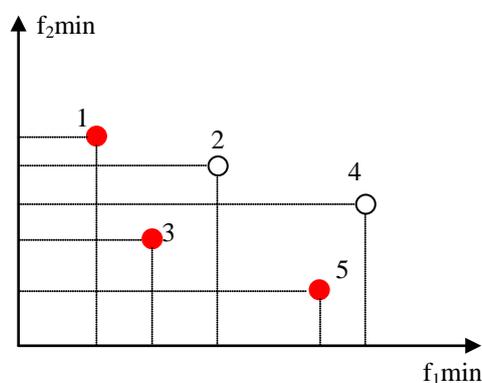


Figure III.7: Exemple de dominance

Dans l'exemple Figure III.7, les points 1,3 et 5 ne sont dominés par aucun autre. Alors que le point 2 est dominé par le point 1, et que le point 4 est dominé par les points 3 et 5.

Dans l'exemple de la Figure III.7, la frontière de Pareto est composée des points 1, 3 et 5.

Tous les individus non dominés sont de rang 1, le tableau de dominance est le suivant:

Point	Dominé par	Rang
1	aucun	1
2	1	2
3	aucun	1
4	3 et 5	3
5	aucun	1

Tableau III.1: Tableau de dominance

III.3.3.2 Frontière de Pareto

La frontière de Pareto est l'ensemble de tous les points 'Pareto-optimaux'. La Figure III.8 présente pour un problème à deux objectifs, les quatre frontières de Pareto en fonction du désir de l'utilisateur de minimiser ou maximiser les objectifs.

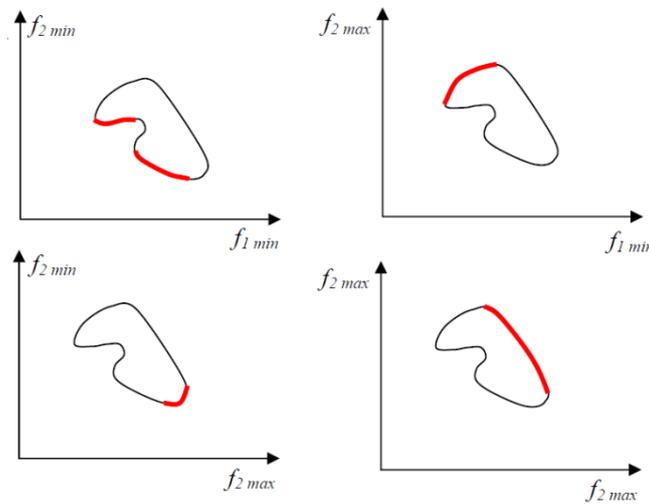


Tableau III.8: Frontière de Pareto pour l'ensemble des points Pareto-optimaux

III.3.4 L'optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques

Ce qui nous intéresse dans notre travail, est l'optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques. Le fonctionnement d'un algorithme génétique traitant un problème d'optimisation multi-objectif est représenté à la Figure III.9.

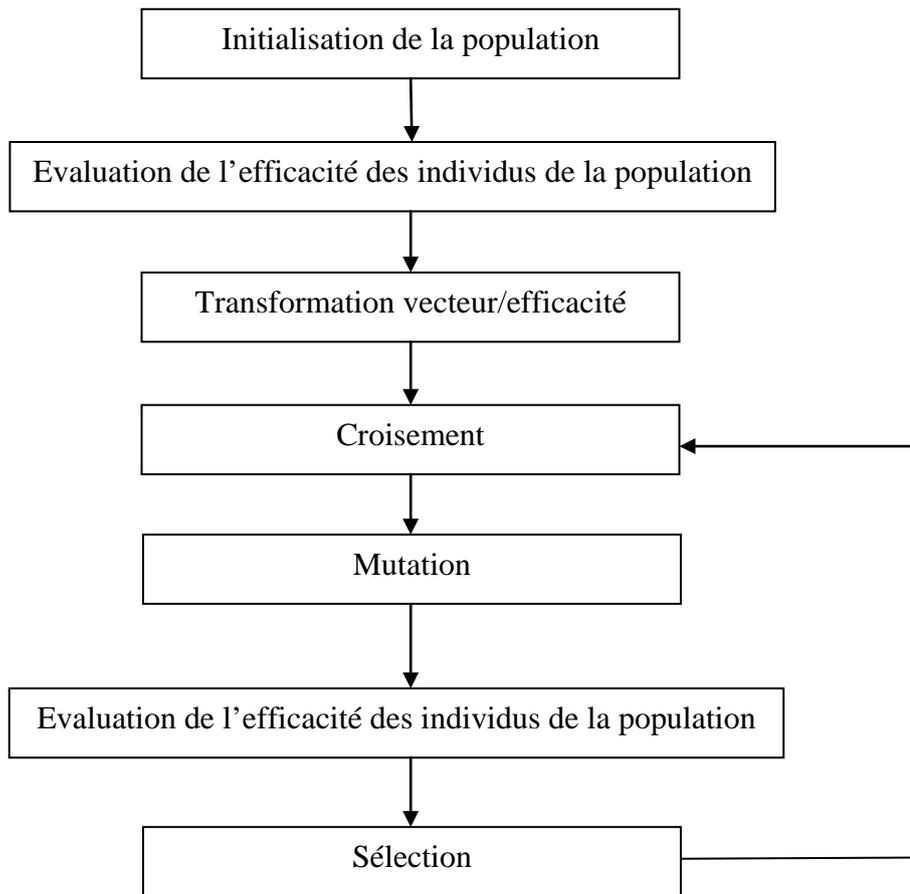


Figure III.9: L'optimisation multi-objectif par algorithme génétique.

La seule différence que l'on note est l'étape (Transformation vecteur/efficacité). A cette étape, on transforme un vecteur (qui contient les valeurs des fonctions objectif pour chaque individu) en une efficacité. Diverses stratégies, qui seront décrites dans les paragraphes suivants, peuvent être adoptées.

Tous les algorithmes génétiques traitant un problème d'optimisation multi-objectif pourront se ramener à ce schéma.

L'application des AG à l'optimisation multi-objectif est récente. D'après Veldhuizen & Lamont dans *Analyzing the State-of-the Art*, publiée en 2000, le premier travail a été proposé par Schaffer en 1984. Des lors, le nombre de publications dans ce domaine grandit exponentiellement [53]. En 1999, Coello a présenté une étude classifiant et évaluant diverses techniques d'optimisation multi-objectif. Cette étude a conclu que la plupart des méthodes sont basées sur les AG monocritère. Les différences portent sur la méthode de sélection des

individus. D'après Y. Colletto [52], les procédures principales sont, dans l'ordre chronologique de publication:

- ⊙ L'AG base sur un vecteur d'évaluation (Vector Evaluated Genetic Algorithm - VEGA) 1984- Schaffer, Schaffer: on modifie l'opérateur génétique de sélection d'un AG monocritère de façon à créer des populations séparées pour chaque objectif. Ceci génère des « spécialisations », c'est-à-dire que chaque population tendra vers le point optimal de chaque objectif et non vers la frontière Pareto-optimale associée au problème ;
- ⊙ L'AG Multi-objectif (Multi-objective Génétique Algorithme - MOGA), 1993- Fonseca & Fleming [54]. L'idée du MOGA est d'établir un ordre des individus: les non-domines ont des classifications semblables, tandis les domines sont pénalisés d'après leur dominance. La difficulté est de trouver une façon d'interpoler ces deux groupes de manière à permettre une bonne conformation de la frontière Pareto-optimale ;
- ⊙ L'AG base sur le tri des non-domines (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) NSGA en 1993 - Srinivas & Deb, NSGA II en 2000 - Deb et al.. Dans ce cas, seules les solutions non-dominées sont sélectionnées. Comme ces solutions sont efficaces, elles auront la même probabilité de se reproduire. Dans cette méthodologie, l'inconvénient est la difficulté de maintenir la diversité de la population. L'absence de diversité peut générer une frontière incomplète, c'est-à-dire une concentration des solutions dans certaines régions;
- ⊙ L'AG base sur le nichage de Pareto (Niche Pareto Génétique Algorithme- NPGA) 1993 - Horn & Nafpliotis [55]. L'une des techniques de sélection pour l'AG monocritère est le tournoi entre les individus. Horn & Nafpliotis ont implémenté un tournoi dans lequel la règle de compétition est liée à la dominance de Pareto. Dans cette méthode, il est difficile de déterminer combien d'individus participeront du tournoi, et lesquels ;

- ⊙ La méthode des populations intermédiaires, 1996 - Vienne & Marc [56]. Cet algorithme a trois étapes: la détermination des points minimums pour chaque objectif ; la recherche de la population intermédiaire (basée sur le choix de Z individus pour chaque objectif) ; et a partir de cette population, la définition de la frontière Pareto-optimale. La principale restriction de cette méthode est que chaque objectif doit avoir un optimum unique dans l'espace d'étude ;

- ⊙ L'Algorithme évolutionnaire base sur la « force » de Pareto (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) - SPEA I 1998 - Zitzler & Thiele [57], SPEA II 1999 et 2001- Zitzler [58], Zitzler et al. [59]. Un numéro indiquant une mesure de « force » pour chaque individu est crée par le processus de sélection. Les individus non-domines doivent posséder une « force » plus grande.

III.4 Conclusion

Les algorithmes génétiques fournissent des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de sélection, d'hybridation et de mutation. Un algorithme génétique nous donne une grande liberté dans le paramétrage et dans l'implémentation des différents traitements. Nous somme libre ensuite de modifier tel ou tel paramètre si les solutions obtenues ne nous conviennent pas.

Les algorithmes génétiques sont aussi particulièrement adaptés à l'évaluation de problème multi-objectif et à la réalisation de recherches de valeurs optimales selon plusieurs objectifs simultanés. L'optimisation multi-objectif doit résoudre les tâches suivantes:

- ⊙ Guider le processus de recherche vers la frontière de Pareto.
- ⊙ Maintenir une diversité des solutions pour assurer une bonne répartition sur la frontière de Pareto.

CHAPITRE VI

IDENTIFICATION PARAMETRIQUE DES CELLULES
PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES

IV.1 Introduction

Pour mieux comprendre les mécanismes physiques agissant à l'intérieur de la cellule solaire, et par conséquent les différents paramètres qui affectent ces caractéristiques, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'identification de ces paramètres, non seulement pour l'augmentation du rendement de la cellule photovoltaïque, mais aussi pour pouvoir simuler son comportement, et optimiser ses différentes caractéristiques.

Ces paramètres sont déterminés difficilement par les méthodes de mesure dynamique, et surtout pour la production en série des cellules solaires. Par contre, ils existent des méthodes qui n'utilisent que les données fournis par le constructeur ou uniquement la caractéristique I-V de la cellule, tout en exploitant un des modèles existant dans la littérature.

Quelques méthodes proposées utilisant des mesures prises aux différents niveaux lumineux [61], tandis que d'autres emploient les conditions de lumière et d'obscurité [62]. Deux modèles sont utilisés fréquemment dans ce domaine d'étude: le modèle à une exponentielle, et le modèle à deux exponentielles.

- Les paramètres du modèle à simple exponentielle (une seule diode) sont: le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité, la résistance shunt, et le photocourant.
- Les paramètres du modèle à double exponentielle (deux diode) à extraire sont: les deux courants de saturation, la résistance série, la résistance shunt, les deux facteurs d'idéalité, et le photocourant.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction de ces paramètres:

- Les méthodes explicites utilisant la fonction W de Lambert
- La méthode de Newton-Raphson associée avec un algorithme d'optimisation
- La méthode des cinq points (utilisant l'algorithme itératif Région de Confiance)

Notre approche d'identification est basée sur la méthode des cinq points. Cette dernière est conçue pour l'identification, seulement, les cinq paramètres, où les deux facteurs d'idéalité sont supposés des constants comme: $n_1=1$ et $n_2=2$. Afin de calculer les valeurs exactes de ces deux paramètres nous allons développer un algorithme qui permet de tenir en compte ces deux facteurs d'idéalité.

IV.2 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:

IV.2.1 Modèle à trois diodes

B. Mazhari [63] a proposé un modèle des cellules solaires organiques, comme le montre la Figure VI.1

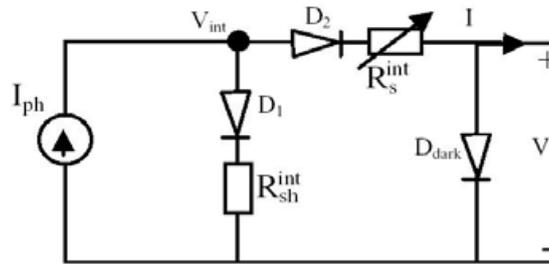


Figure VI.1: Modèle à trois diodes [3].

R_{sh}^{int} 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.

IV.2.2 Modèle à une diode (simple exponentielle)

Ce modèle est le plus courant, il est utilisé par de nombreux auteurs pour obtenir des valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire par des méthodes d'approximations. Ça caractéristique courant-tension est représentée par l'équation (VI.1):

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkt}\right) - 1 \right] \quad (\text{VI.1})$$

Le circuit équivalent correspondant est schématisé sur la Figure VI.2.

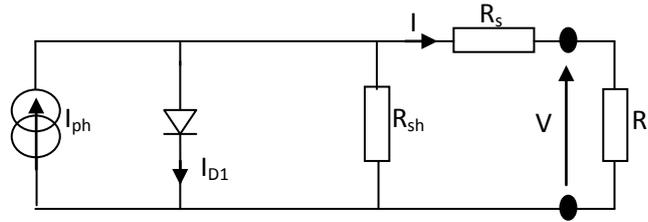


Figure VI.2: cellule solaire décrite par le modèle à simple exponentielle.

Où I_{ph} est l'origine de la charge générée par l'éclairement; I_{01} est le courant de saturation

sous polarisation inverse; R_L est la résistance du circuit externe; R_s et R_{sh} sont respectivement la résistance série et la résistance shunt; n est le facteur d'idéalité.

La résistance série d'une cellule solaires donnée dépend de la résistivité de substrat de semiconducteurs, les électrodes de métal, et l'interface métal / semiconducteurs. De même, dans une cellule solaire organique, la résistance série dépend de la résistivité de la matière organique, les électrodes de métal et l'interface métal / organique [64].

IV.2.2 Modèle à deux diodes (double exponentielle)

Sous un éclairement donné [65], l'expression de la caractéristique courant – tension s'écrit:

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - I_{01} [\exp \beta_1 (V + R_s I) - 1] - I_{02} [\exp \beta_2 (V + R_s I) - 1] \quad (\text{VI.2})$$

Avec: $B_1 = q/n_1 kT$ et $B_2 = q/n_2 kT$

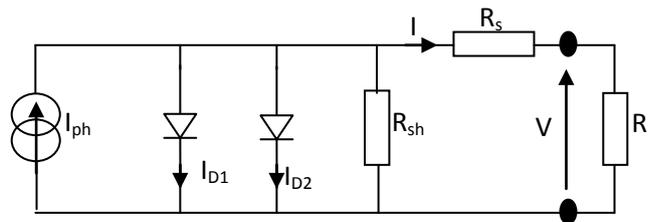


Figure VI.3: cellule solaire décrite par le modèle à double exponentielle.

I_{ph} étant le photocourant due aux photons incidents, les deux termes exponentiels représentent séparément le courant de saturation de diffusion (I_{01}) et le courant de saturation de génération-recombinaison (I_{02}) [66], respectivement. Le dernier terme de l'équation reflète les pertes par résistance shunt, appelées courant de fuite.

Quand la cellule fonctionne comme un générateur sous éclairement, il faut noter que l'éclairement ne cause pas un simple décalage de caractéristique courant-tension le long du

l'axe de courant [67], l'effet de la résistance série est non linéaire :

$$R_{s0} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{V=V_{oc}} \quad (\text{VI.3})$$

$$R_{sh0} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{sc}} \quad (\text{VI.4})$$

R_{s0} et R_{sh0} sont les valeurs expérimentales de la résistance dynamique qui expriment le comportement de la courbe I-V autour de la tension à circuit ouvert et du court-circuit [68].

IV.3 Extraction des paramètres

Pour l'extraction des paramètres de la cellule, nous avons exploités la méthode des cinq points [69], en améliorant un peu son algorithme de base, pour calculer les sept paramètres (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_{01} , I_{02} , n_1 , n_2) au lieu des cinq paramètres (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_{01} , I_{02}) calculer dans la méthode conventionnelle.

IV.3.1 Méthode des cinq points

Cette méthode, présente une méthodologie pour l'extraction des paramètres des cellules photovoltaïques, par l'utilisation des modèles électriques à une exponentielle et double exponentiels. Le but de la méthode proposée était l'extraction des paramètres en utilisant uniquement les courbes expérimentales, en appliquant la Méthode de la région de confiance (trust region) pour résoudre un système d'équations $f(x_i)$. Les variables x_i sont les sept paramètres décrits précédemment.

La définition du problème à optimiser, est de commencer par la détermination des équations qui composeront le système non linéaire à résoudre. Pour faire ainsi, et en raison du principe de cette méthode, qui a été la représentation des cinq points donnés sur la caractéristique I-V, et par conséquent les cinq équations nécessaires pour extraire les paramètres du modèle.

La Figure VI.4 montre les points utilisés dans chaque équation

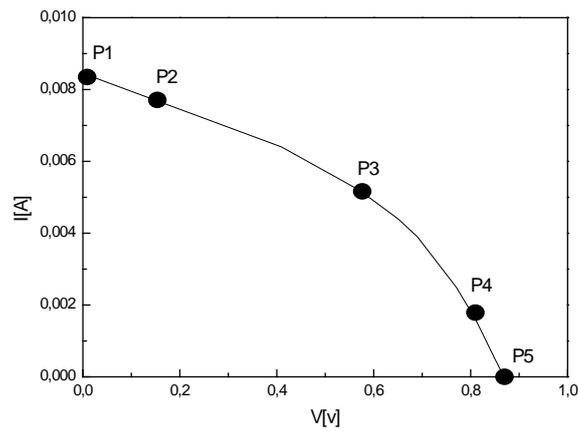


Figure VI.4: les points utilisés pour définir le système d'équations

Le choix de ces points a été fait selon les définitions suivantes :

- P1: $(V_1, I_1) = (0, I_{sc})$ – tension en circuit ouvert. (les mesures doivent être effectuées pour des tension très faibles).
- P2: $(V_2, I_2) = (0.3V_{oc}, I_{0.3V_{oc}})$ – la tension est de 30% de la tension en circuit ouvert.
- P3: $(V_3, I_3) = (V_{max}, I_{max})$ – point de la puissance maximale.
- P4: $(V_4, I_4) = (0.9V_{oc}, I_{0.9V_{oc}})$ – la tension est de 90% de la tension en circuit ouvert.
- P5: $(V_5, I_5) = (V_{oc}, 0)$ – la tension égale à la tension en circuit ouvert et le courant égale à zéro.

L'avantage principal d'utiliser le modèle à une diode est la simplification de circuit électrique équivalent qui permet de décrire le comportement de la cellule avec le minimum d'équations. Par contre, le modèle à deux diodes permet une présentation plus exacte de la cellule solaire.

A partir des points prélevés, il est possible de démontrer le système d'équations à résoudre :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x) = x_1 - x_2 \left[\exp \beta_1 (V_1 + x_4 I_1) - I \right] - x_3 \left[\exp \beta_2 (V_1 + x_4 I_1) - I \right] - \frac{V_1 + x_4 I_1}{x_5} - I_1 \\ f_2(x) = x_1 - x_2 \left[\exp \beta_1 (V_2 + x_4 I_2) - I \right] - x_3 \left[\exp \beta_2 (V_2 + x_4 I_2) - I \right] - \frac{V_2 + x_4 I_2}{x_5} - I_2 \\ f_3(x) = x_1 - x_2 \left[\exp \beta_1 (V_3 + x_4 I_3) - I \right] - x_3 \left[\exp \beta_2 (V_3 + x_4 I_3) - I \right] - \frac{V_3 + x_4 I_3}{x_5} - I_3 \\ f_4(x) = x_1 - x_2 \left[\exp \beta_1 (V_4 + x_4 I_4) - I \right] - x_3 \left[\exp \beta_2 (V_4 + x_4 I_4) - I \right] - \frac{V_4 + x_4 I_4}{x_5} - I_4 \\ f_5(x) = x_1 - x_2 \left[\exp \beta_1 (V_5 + x_4 I_5) - I \right] - x_3 \left[\exp \beta_2 (V_5 + x_4 I_5) - I \right] - \frac{V_5 + x_4 I_5}{x_5} - I_5 \end{array} \right. \quad (\text{VI.5})$$

IV.3.2 Méthode de région de confiance (trust region)

L'idée de la méthode de la région de confiance est d'approcher $f(x_k)$ par une fonction plus simple m_k dans une région R_k de confiance

$$R_k = \{x_k + p; \|p\| \leq \Delta\} \quad (\text{VI.6})$$

Pour un Δ fixe. Cette région de confiance doit être suffisamment petite pour que

$$m_k(x_k + p) \cong f(x_k + p) \quad (\text{VI.7})$$

Au lieu de résoudre l'équation:

$$f(x_k + 1) = \min_{\|p\| \leq \Delta} f(x_k + p) \quad (\text{VI.8})$$

On résout $m_k(x_k + 1) = \min m_k(x_k + p)$ pour trouver $x_k + 1$. Si la différence entre $f(x_k + 1)$ et $m_k(x_k + 1)$ est trop grande, on diminue le Δ (et donc la région de confiance) et on résout (VI.8) à nouveau. Un avantage de cette méthode est que toutes les directions sont prises en compte. Par contre, nous devons faire attention à ne pas trop nous éloigner de x_k , car la fonction m_k n'approche f que sur une région proche de x_k .

La taille de la région de confiance est essentielle pour déterminer l'efficacité de chaque pas. En effet, une région de confiance "trop petite" peut être à l'origine de calculs inutiles, et peut, de plus, faire converger la solution vers un point qui ne correspond pas au minimum de la fonction objectif (f). Si, par contre, la région de confiance est "trop grande", le point qui minimise la fonction modèle m_k peut être assez éloigné du point qui minimise la fonction objectif, dans ce cas, on doit réduire la taille de la région. En pratique, la taille de la région de confiance est déterminée en se basant sur la performance de l'algorithme au cours des dernières itérations. Si le modèle est bon, c'est-à-dire si la fonction modèle est capable de décrire correctement le comportement de la fonction objectif, la taille de la région de

confiance peut être augmentée afin de déterminer des pas plus performants. Dans le cas contraire, on réduit la taille de la région de confiance.

Les étapes suivies pour résoudre le système d'équation (utilisant la méthode région de confiance) sont illustrées dans la Figure VI.5.

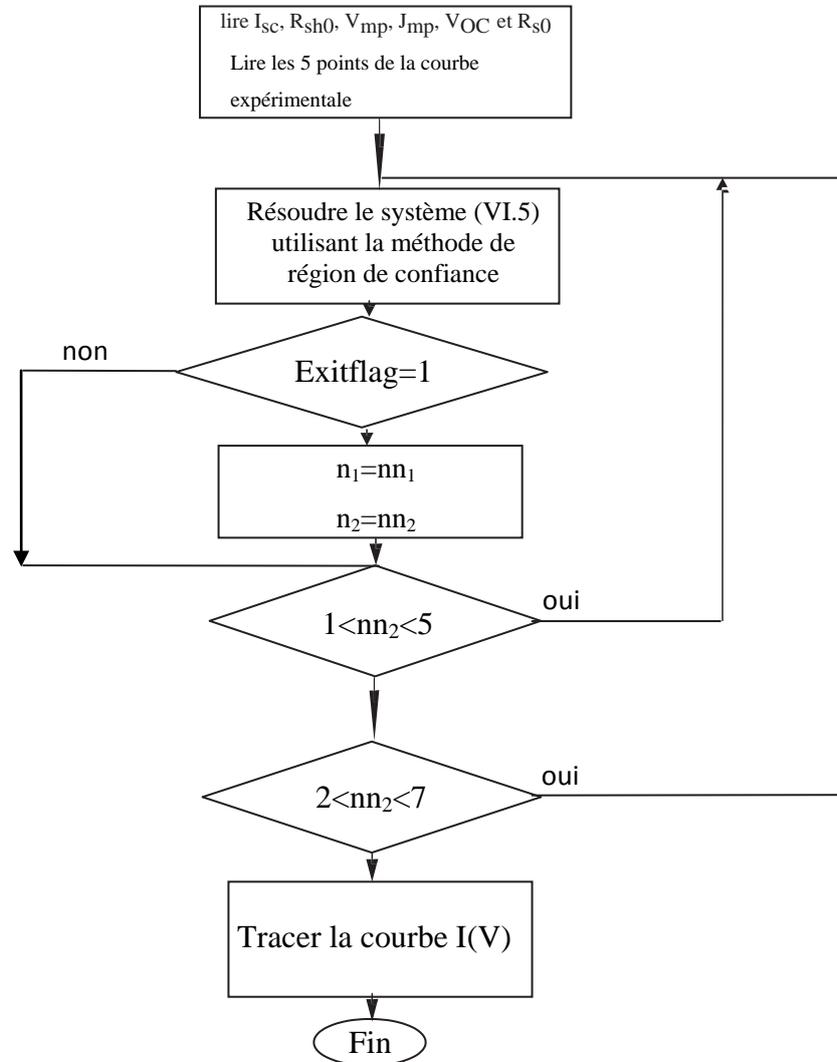


Figure VI.5 : Organigramme de l'extraction des paramètres d'une cellule solaire

Afin de tester la précision des courbes obtenues, nous avons calculé les écarts relatifs moyens algébriques (MBE), absolu (MAE), et quadratique (RMSE) [71] qui sont données par les expressions ci-dessous :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |e_i|^2}{N}} \quad (VI.9)$$

$$MBE = \frac{\sum e_i}{N} \quad (VI.10)$$

$$MAE = \frac{\sum |e_i|}{N} \quad (VI.11)$$

Tel que :

$$e_i = (I_i - I_{i.cal}) * \left(\frac{100}{I_i}\right) : \text{représente le pourcentage d'erreur.} \quad (VI.12)$$

I_i : le courant mesuré.

$I_{i.cal}$: le courant calculé.

N : la taille du vecteur mesuré V_i ou I_i .

IV.3.3 résultats et discussion

IV.3.3.1 la cellule solaire organique MDMO-PPV

C'est une cellule solaires en plastique produites à partir d'un polymère conjugué [70] poly(2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyl-oxy)-1,4-phenylenevinylene) (MDMO-PPV) et un methanofullerene [6,6]-phenyl C₆₀-butyric ester méthylique acide (PCBM) .

On a fait l'extraction à partir de la courbe I-V, montrée dans la Figure VI.6 :

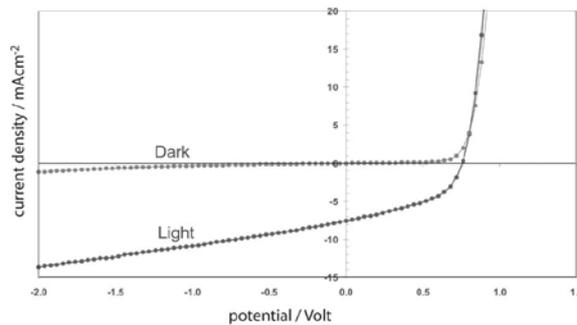


Figure VI.6 : la courbe I-V à l'obscurité et sous illumination [10]

Les paramètres extraits de la cellule (utilisant le modèle à double diode) sont montrés sur le tableau ci-dessous :

$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$	$I_{ph}(mA)$	$I_{01}(nA)$	$I_{02}(\mu A)$	n_1	n_2
8.36	196.84	7.94	8.60	1.87	2.31	4.78

Tableau VI.1 : Les paramètres extraits de la cellule utilisant la méthode des 5 points

Une fois les valeurs de paramètres de circuit équivalent étaient déterminées, on peut tracer la courbe I-V à partir de l'expression à double diodes.

La comparaison entre la courbe expérimentale et la courbe calculée est illustré dans la Figure VI.7 :

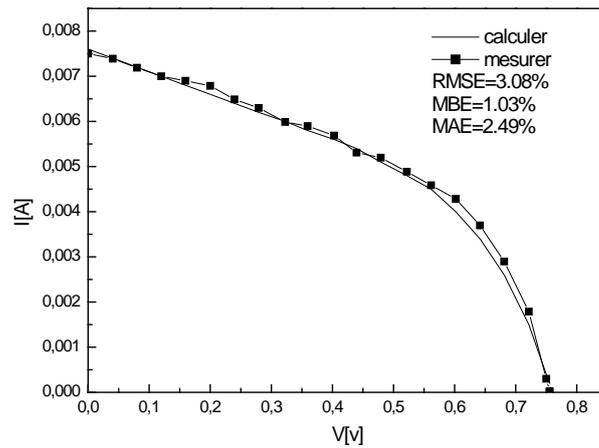


Figure VI.7 : Courbes simulées et mesurées expérimentalement de la caractéristique I-V de la cellule solaire organique MDMO-PPV

La figure VI.7 montre que la courbe mesurée expérimentalement et simulées sont presque chevauchées ce qui nous donne une idée sur la précision des paramètres extraits.

Grace à ces paramètres on a calculé les caractéristiques de la cellule tels que: le facteur de forme FF, le rendement η , et le point de la puissance maximale PPM (V_m, I_m).

On peut facilement passer aux calculs des caractéristiques d'un module combiné par ces cellules soit en série ou en parallèle ou en montage hybride :

FF	η (%)	P_{max} (mw)	V_m (v)	I_m (mA)
0.43	2.5	2.5	0.54	4.6

Tableau VI.2 :caractéristique de la cellule MDMO-PPV

Les écarts relatifs moyens algébriques (MBE), absolu (MAE), et quadratique (RMSE) sont donnés dans le tableau ci-dessous :

RMSE(%)	3.08
MBE(%)	1.03
MAE(%)	2.49

Tableau VI.3 : Indicateurs statistiques de la précision pour la méthode utilisée

IV.3.3.2 Cellule solaire organique structures simples PIN

La structure de cette cellule contient le mélange donneur-accepteur [71] de ZnPc et de C₆₀ (rapport molaire un-à-deux) en tant que partie sensible à la lumière (l'hétérojonction en volume) Mettais en sandwich entre les couches transport de large-Gap de MeO-TPD dopées p et C₆₀ dopées n. En détail, l'ordre de couche est ITO/30 nm MeO-TPD/60 nm dopé p Mélange ZnPc:C₆₀ (rapport molaire de 1 : 2)/20 nm C₆₀/0.5 nm dopé n Au/125 nm MeO-TPD/50 nm dopé p Mélange ZnPc:C₆₀ (rapport molaire de 1 : 2)/20 nm C₆₀/100 nm dopé p Al.

Les paramètres extraits de la cellule (utilisant le modèle à double diode) sont montrés sur le tableau ci-dessous :

Rs(Ω)	Rsh(Ω)	Iph(mA)	I01(μA)	I02(mA)	n1	n2
4.98	192.3	15.2	0.24	0.16	2	4.7

Tableau VI.4 : Les paramètres extraits de la cellule utilisant la méthode des 5 points

A partir de ces paramètres on a pu tracer la courbe ci-dessous :

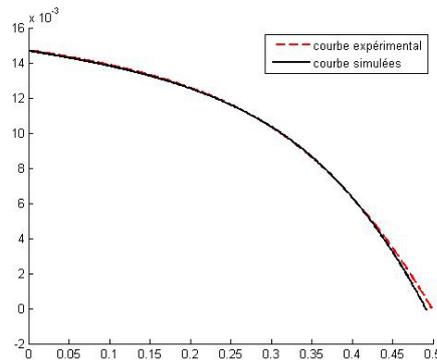


Figure VI.8 : Courbes simulées et mesurées expérimentalement de la caractéristique I-V de la cellule solaire organique structures simples PIN

L'application de notre algorithme nous a permis de calculer les paramètres suivants:

FF	η (%)	P _{max} (mw)	V _m (v)	I _m (mA)
0.43	2.4	3.1	0.31	9.9

Tableau VI.5:caractéristique de la cellule simples PIN

Les écarts relatifs moyens algébriques (MBE), absolu (MAE), et quadratique (RMSE) sont donnés dans le tableau VI.6 :

RMSE(%)	1.1
MBE(%)	0.28
MAE(%)	0.295

Tableau VI.6 : Indicateurs statistiques de la précision pour la méthode utilisée

IV.3.3.3 Cellule solaire organique hétérojonction (MEH-PPV/PCBM)

C'est une cellule solaire organique basée sur (2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene (MEH-PPV) et un methanofullerene [6,6]-phenyl C₆₀-butyric ester méthylique acide (PCBM) [72].

Les paramètres extraits de la cellule (utilisant le modèle à double diode) sont montrés sur le tableau ci-dessous :

Rs(Ω)	Rsh(Ω)	Iph(mA)	I01(pA)	I02(μA)	n1	n2
7.58	218.02	8.66	14.95	9.26	2	5.47

Tableau VI.7 : Les paramètres extraits de la cellule utilisant la méthode des 5 points

Les paramètres extraits nous a permis de tracer la courbe ci-dessous :

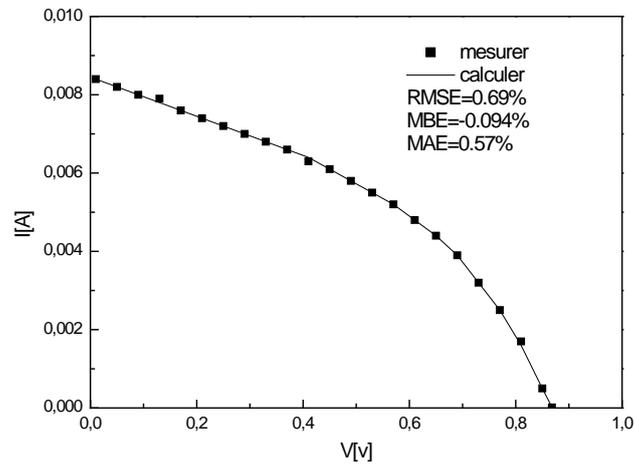


Figure VI.9 : Courbes simulées et mesurées expérimentalement de la caractéristique I-V de la cellule solaire organique (MEH-PPV/PCBM)

Les caractéristiques calculées de la cellule sont illustrées dans le tableau VI.8:

FF	η (%)	P_{\max} (mw)	V_m (v)	I_m (mA)
0.40	2.9	2.97	0.57	5.2

Tableau VI.8:caractéristique de la cellule (MEH-PPV/PCBM)

Les écarts relatifs moyens algébriques (MBE), absolu (MAE), et quadratique (RMSE) sont donnés dans le tableau ci-dessous :

RMSE(%)	0.69
MBE(%)	-0.094
MAE(%)	0.57

Tableau VI.9 : Indicateurs statistiques de la précision pour la méthode utilisée

IV.4 Conclusion

L'utilisation des méthodes itératives pour l'extraction des paramètres d'une cellule solaire nous a permis d'obtenir ces paramètres en utilisant seulement les cinq points connus sur la caractéristique I-V de la cellule solaire. D'ailleurs, on a constaté que la méthode proposée permet d'extraire des paramètres pour les courbes qui ont une grande variation dans le comportement du courant quand il approche le point de court-circuit, c'est le cas de la plus parts des cellules solaires organiques.

Dans ce contexte, nous observons que la méthode de région de confiance nous a permis d'obtenir des paramètres qui représentent, mieux, le comportement de la cellule solaire en se basant sur modèle à deux diodes.

Un algorithme, amélioré, qui permet la résolution et l'extraction des paramètres de la cellule solaire a été développé dans ce chapitre.

Notre travail dans ce chapitre, nous a permis d'identifier les paramètres des différentes cellules solaires organiques, et par la suite de fixer les intervalles de variation de chaque paramètre influant sur le facteur de forme de ces cellules. Ces intervalles seront utilisés dans le chapitre V, qui va s'intéresser à l'optimisation du facteur de forme des cellules solaires organiques.

CHAPITRE V

OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF DES CELLULES
PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'optimisation du rendement de la cellule solaire organique en se basant sur l'amélioration de leurs facteurs de forme. Le problème sera présenté sous forme d'une optimisation multi-objectif des paramètres électriques et géométriques. Le travail effectué dans le chapitre précédent nous a permis d'extraire ces paramètres électriques, qui seront utilisés comme des fonctions fitness de l'optimisation multi-objectif par les algorithmes génétiques afin de minimiser les pertes d'énergie et maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie pour l'objectif d'avoir des performances maximales de la cellule solaire organique.

La majorité des travaux qui ont étudié la cellule organique ont été concentrés à la modélisation, l'extraction, et l'élaboration des cellules organiques à base de nouveaux matériaux [68,73-77]. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce chapitre est de proposer une nouvelle approche basée sur l'Optimisation Multi-Objectif par Algorithmes Génétiques (MOGAs) qui permet de maximiser la conversion photovoltaïque des matériaux organiques, tout en optimisant les paramètres électriques qui affectent le facteur de forme. L'utilisation des MOGAs, a pour but de trouver le minimum/maximum des paramètres de la cellule solaire appelés les fonctions fitness en satisfaisant certaines contraintes [78,79], nous a permis également de trouver la solution optimale présentée sous forme d'une surface du Pareto.

V.2 Optimisation du rendement de la cellule organique par MOGAs

Notre approche, comme nous avons déjà expliqué précédemment, est basée sur l'optimisation du facteur de forme de la cellule solaire organique, cette tâche est assurée par la maximisation de la résistance shunt, et la minimisation de la résistance série. L'idée proposée est illustrée dans la Figure V.1, où les deux fonctions fitness sont les suivants:

- ⊙ Maximisation de la résistance shunt:

$$Max(R_{sh0}) = Max\left(-\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{sc}}\right) = Max\left(R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{sh}} + B_1 I_{01} \exp(B_1 I_{sc} R_s) + B_2 I_{02} \exp(B_2 I_{sc} R_s)}\right) \quad (V.1)$$

- ⊙ Minimisation de la résistance série:

$$Min(R_{s0}) = Min\left(-\left(\frac{dV}{dI}\right)_{V=V_{oc}}\right) = Min\left(R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{sh}} + B_1 I_{01} \exp(B_1 V_{oc}) + B_2 I_{02} \exp(B_2 V_{oc})}\right) \quad (V.2)$$

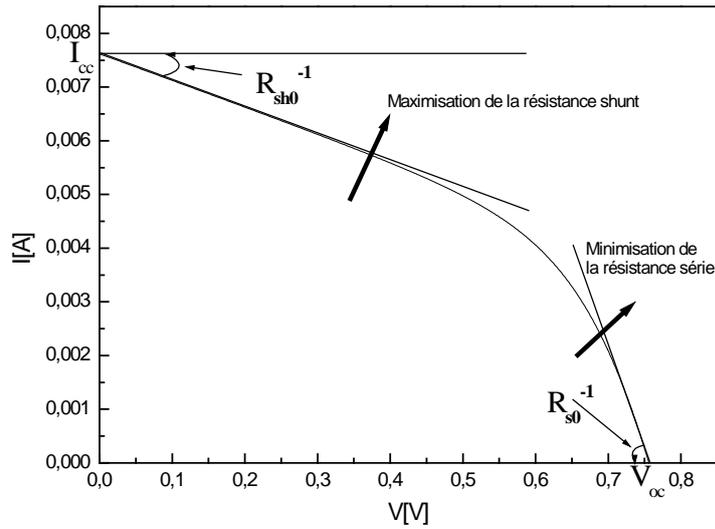


Figure V.1: optimisation du rendement de la cellule solaire organique en utilisant sa Caractéristique I-V.

La maximisation du rendement de la cellule solaire doit satisfaire les deux fonctions fitness (V.3) et (V.4):

- ⊙ Maintenir la valeur de V_{oc} proche de sa valeur de la cellule à optimiser:

$$V_{oc} = (I_{ph} - (I_{01}(\exp(B_1 V_{oc}) - 1)) - (I_{02}(\exp(B_2 V_{oc}) - 1))) R_{sh} \quad (V.3)$$

- ⊙ Fixer la valeur de I_{cc} , en satisfaisant la fonction suivante:

$$I_{sc} = (I_{ph} - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} - (I_{01}(\exp(B_1 I_{sc} R_s) - 1)) - (I_{02}(\exp(B_2 I_{sc} R_s) - 1))) \quad (V.4)$$

Afin que nous puissions appliquer cette optimisation, nous avons exploité l'outil 'GLOBAL OPTIMISATION' du Toulbox de MATLAB (GAmultiobj), l'algorithme NSGA II est la base de cet outil, que l'on va détailler dans le paragraphe suivant:

V.3 Optimisation utilisant l'algorithme NSGA II

L'algorithme NSGA II a été proposé par Deb et al [80]. Il intègre un opérateur de sélection, basé sur un calcul de la distance de "crowding" (ou "surpeuplement") qui estime la densité de chaque individu dans la population. Comparativement à NSGA, NSGA-II obtient de meilleurs résultats sur toutes les instances présentées dans les travaux de K. Deb, ce qui fait de cet algorithme un des plus utilisés aujourd'hui car:

- ⊙ Il utilise une approche élitiste qui permet de sauvegarder les meilleures solutions trouvées lors des générations précédentes.
- ⊙ Il utilise une procédure de tri basée sur la non-dominance, plus rapide.
- ⊙ Il ne nécessite aucun réglage de paramètre.
- ⊙ Il utilise l'opérateur de comparaison basé sur le calcul de la distance de *crowding*

La fonction "crowding" qui remplace la fonction sharing dans son prédécesseur NSGA, qui est une forte consommatrice de calculs, cette nouvelle fonction consiste à attribuer deux caractéristiques à chaque individu:

- ⊙ i_{rank} représente le rang de non domination de l'individu. Cette caractéristique dépend de la frontière à laquelle appartient l'individu.
- ⊙ $i_{distance}$ représente la distance de crowding de l'individu et permet d'estimer la densité de la population autour de lui.

Pour estimer la densité au voisinage d'une solution i , il calcule la distance moyenne sur chaque objectif, entre les deux points les plus proches situés de part et d'autre de la solution. Cette quantité appelée $i_{distance}$ sert d'estimateur de taille du plus large hypercube incluant le point i sans inclure un autre point de la population. Cette distance de crowding va être utilisée pour guider le processus de sélection.

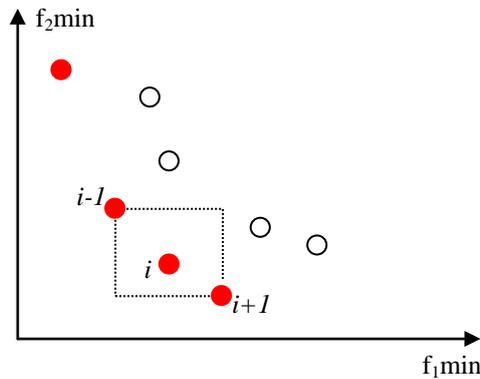


Figure V.2: calcul de la distance de crowding.

Pour répondre à la critique de non élitisme, Deb utilise dans cette méthode une sélection par tournoi et modifie la procédure de passage entre deux générations. Si deux solutions sont sélectionnées pour participer au tournoi, la solution de plus bas rang i_{rank} sera retenue. Mais si les deux rangs sont identiques, il est préférable d'utiliser le point situé dans une région dépeuplée, c'est-à-dire avec une valeur $i_{distance}$ importante. Deb définit sa notion de préférence entre deux solutions de la façon suivante:

$$(i \prec_n j) \text{ si } (i_{rank} < j_{rank}) \text{ o } ((i_{rank} = j_{rank}) \text{ et } (i_{distance} > j_{distance}))$$

NSGA-II fonctionne de la manière suivante:

une population de parents (P_t) de taille (N) et une population d'enfants (Q_t) de taille (N) sont assemblées pour former une population ($R_t = P_t \cup Q_t$), comme le montre la Figure V.3. Cet assemblage permet d'assurer l'élitisme. La population de taille ($2N$) est ensuite triée selon un critère de non-dominance pour identifier les différents fronts F_1, F_2 , etc. Les meilleurs individus vont se retrouver dans le ou les premiers fronts. Une nouvelle population parent (P_{t+1}) est formée en ajoutant les fronts au complet (premier front F_1 , second front F_2 , etc.) tant que ceux-ci ne dépassent pas N . Si le nombre d'individus présents dans (P_{t+1}) est inférieur à (N), une procédure de *crowding* est appliquée sur le premier front suivant, (F_i), non inclus dans (P_{t+1}). Le but de cet opérateur est d'insérer les ($N - |P_{t+1}|$) meilleurs individus qui manquent dans la population (P_{t+1}). Les individus de ce front sont utilisés pour calculer la distance de *crowding* entre deux solutions voisines [81].

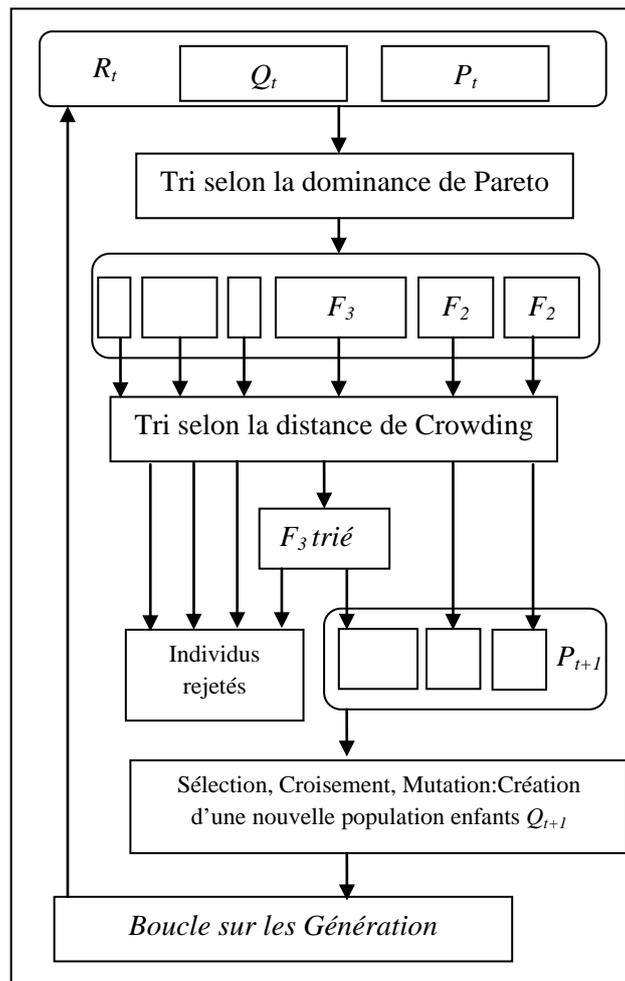


Figure V.3: principe de l'algorithme évolutionnaire NSGA II [82].

Une fois que les individus appartenant à la population (P_{t+1}) sont identifiés, une nouvelle population enfant (Q_{t+1}) est créée par sélection, croisement et mutation. La sélection par tournoi est utilisée mais le critère de sélection est maintenant basé sur l'opérateur de comparaison (\prec_n) défini précédemment. Le processus continue, d'une génération à la suivante, jusqu'à un critère d'arrêt. Les différentes étapes décrites de l'algorithme NSGA-II sont résumées ci-dessous:

- ⊙ **Etape 1:** Combiner les populations de parents et d'enfants et créer $R_t = P_t \cup Q_t$. Appliquer un tri non-domine sur R_t et identifier les différents fronts F_i , $i = 1, \dots$, etc.
- ⊙ **Etape 2:** Créer une nouvelle population $P_{t+1} = \emptyset$. Initialiser $i = 1$. Tant que $|P_{t+1}| + |F_i| < N$ (la population n'est pas pleine), on fait $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ et $i = i + 1$.
- ⊙ **Etape 3:** Lorsque toutes les solutions de F_i ne peuvent être intégrées à P_{t+1} on fait un tri sur les distances de crowding et on inclut à P_{t+1} les $N - |P_{t+1}|$ solutions les plus éparpillées en utilisant la distance de crowding dans l'ensemble F_i .
- ⊙ **Etape 4:** Créer la population d'enfants Q_{t+1} à partir de P_{t+1} en utilisant la sélection par tournoi à base de crowding et les opérateurs génétiques (sélection, croisement et mutation). Incrémenter le compteur des générations ($t = t + 1$).

V.4 Résultats et discussions

V.4.1 Paramétrage:

Pour l'implémentation de la technique MOGAs, des règles de la boîte d'outil, sous MATLAB, de GAMultiobj sont utilisées:

- ⊙ la population: le type, et la taille de la population, la population initiale (utilisée dans l'algorithme génétique)...
- ⊙ Définition des opérateurs génétiques: sélection, reproduction, mutation, croisement...
- ⊙ Paramètres du problème multi-objectif: mesure de la distance entre les individus (crowding), Fraction de la population au sens de Pareto (garde la population les plus en forme jusqu'à la fraction spécifiée, afin de maintenir une population diversifiée).
- ⊙ Critères d'arrêt: génération (spécifie le nombre maximal d'itération), délai (spécifie la durée maximale en secondes du fonctionnement de l'algorithme génétique avant de s'arrêter.).

Paramètres	valeurs
Taille de la population	100
Nombre de fonctions fitness	4
Nombre de variable	6
Sélection	Tournoi
Reproduction	0.8
Mutation	Gaussienne
Croisement	Dispersé
Mesure de la distance	Crowding
Fraction de la population au sens de Pareto	0.7
Nombre Maximum de générations	1500

Tableau V.1: Paramètres utilisés dans cette application

V.4.2 Application de la technique pour les cellules solaires organiques

Nous avons appliqué la technique d'optimisation MOGA à deux cellules solaires organiques [70,72]. L'espace de solutions (Front de Pareto) représentant l'ensemble des individus non dominés est illustré dans la Figure V.4.

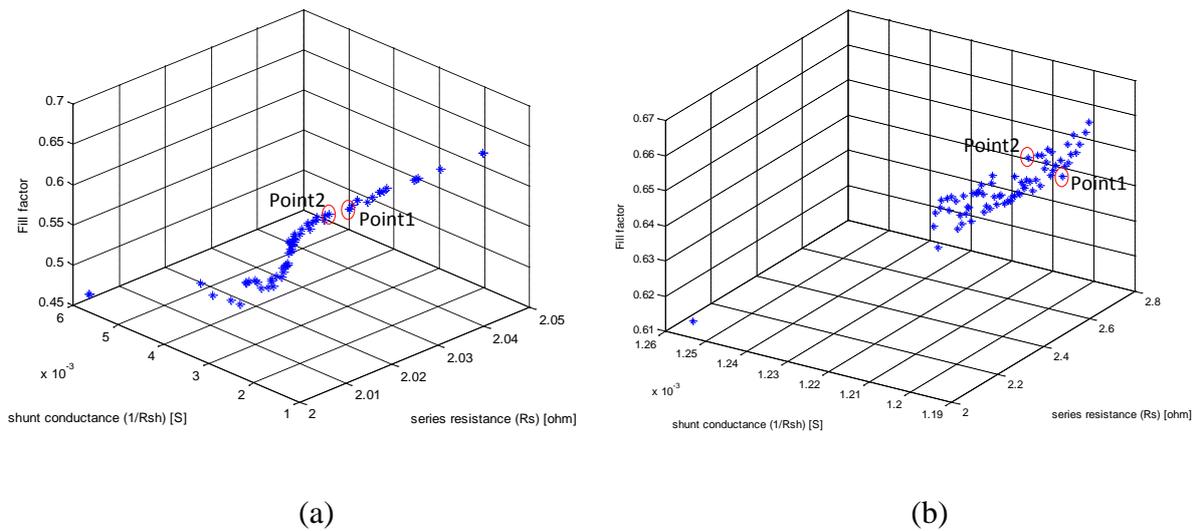


Figure V.4: Solutions de Pareto-optimale des cellules solaires organiques analysées (a) La première cellule solaire [70] (b) la deuxième cellule solaire [72].

Les solutions MOGAs montre clairement la région de Pareto dans lequel il n'existe aucune solution dominée sorte que chaque solution proposée peut être considérée comme aussi bonne que les autres, mais à cause de notre contraintes liées aux deux points V_{co} et I_{cs} nous avons choisi les deux points (point1, point2) les plus répandus aux contraintes, et qui sont situés dans le centre du front Pareto.

Les paramètres de conception correspondent à ces points, sont présentés dans le Tableau V.2:

Paramètres de Pareto	MEH-PPV [72]		MDMO-PPV [70]	
	Point1	Point2	Point1	Point2
Quantité				
Résistance shunt, R_{sh} (ohm)	835.896	835.898	824.91	824.938
Résistance série, R_s (ohm)	2.614	2.458	2.001	2.004
Photocourant, I_{ph} (mA)	8.7	8.7	7.94	7.94
Courant de saturation de la 1 ^{ère} diode, I_{01} (nA)	10.10	9.46	10.02	7.043
Courant de saturation de la 2 ^{ème} diode, I_{02} (nA)	109.6	108.2	142.4	130.9
Facteur d'idéalité de la 1 ^{ère} diode, n_1	2.554	2.480	2.258	2.307
Facteur d'idéalité de la 2 ^{ème} diode, n_2	6.923	6.924	6.764	6.809
rendement (%)	5.08	4.98	4.08	4.3
Fonction fitness				
Conductance shunt, g_{sho} (S)	0.00119	0.00119	0.00121	0.00121
Résistance série, R_{s0} (Ω)	2.55	2.40	2.013	2.008

Tableau V.2: Paramètres de conceptions optimisées des cellules solaires organiques

Les informations sur les solutions non-dominées formant l'ensemble de Pareto, fournissent pour le constructeur, une base de données qui lui permet de décider parmi ces solutions les valeurs acceptables et réalisable technologiquement, pour atteindre le meilleur rendement de conversion, qui peut être fourni par la cellule solaire organique.

La Figure V.5 montre les caractéristiques I-V et l'efficacité de conversion de puissance obtenus, avec et sans optimisation par MOGAs. Pour les deux cellules solaires analysées. Et en raison d'une augmentation de la résistance shunt et une diminution de la résistance série, le facteur de forme et l'efficacité de conversion de puissance des cellules solaires organiques sont beaucoup plus élevés lorsqu'on les compare avec celle de la conception classique de cellules solaires organiques.

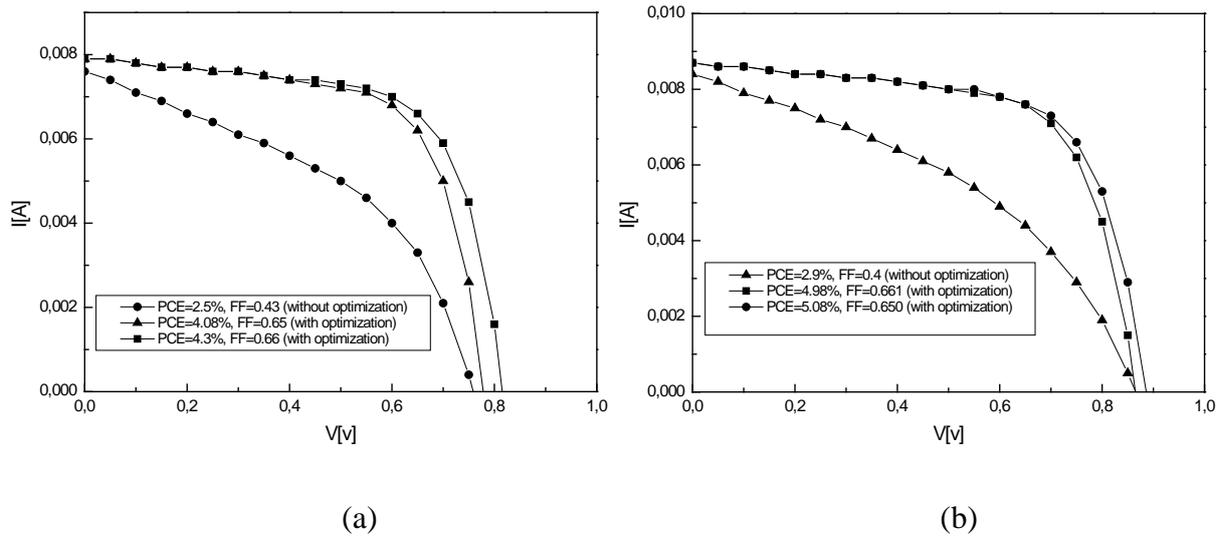


Figure V.5: Caractéristiques I-V et l'efficacité de conversion obtenues, avec et sans l'optimisation MOGAS, pour les deux cellules solaires analysées (a) La première cellule solaire [70], (b) la deuxième cellule solaire [72].

Quantité	MEH-PPV [72]		MDMO-PPV [70]	
	Cellule solaire optimisée (Point1)	Cellule solaire conventionnelle	Cellule solaire optimisée (Point2)	Cellule solaire conventionnelle
Résistance shunt, R_{sh} (ohm)	835.896	218.02	824.938	136.84
Résistance série, R_s (ohm)	2.614	7.58	2.004	8.36
Photocourant, I_{ph} (mA)	8.7	8.7	7.94	7.94
Courant de saturation de la 1 ^{ère} diode, I_{01} (nA)	10.10	14.95×10^{-3}	7.043	8.60
Courant de saturation de la 2 ^{ème} diode, I_{02} (nA)	109.6	9260	130.9	1870
Facteur d'idéalité de la 1 ^{ère} diode, n_1	2.554	2	2.307	2.31
Facteur d'idéalité de la 2 ^{ème} diode, n_2	6.923	5.47	6.809	4.78
rendement (%)	5.08	2.9	4.3	2.5
Facteur de forme	0.65	0.4	0.66	0.43

Tableau V.3: comparaison entre la conception d'une cellule solaire organique optimisée et une cellule solaire organique conventionnelle

D'après le Tableau V.3, il est observé qu'une grande amélioration de la performance des cellules solaires organiques, facteur de forme et l'efficacité de conversion de puissance, peut être obtenue par l'utilisation de notre approche basée sur l'optimisation MOGAs. Donc, l'approche proposée dans ce travail peut être considérée comme un outil important dans le domaine de la conception des cellules solaires organiques.

V.5 Conclusion

L'approche basée sur l'optimisation MOGAs, est proposée pour maximiser les performances électriques des cellules solaires organiques. L'algorithme développé a réussi de chercher le maximum possible de facteur de forme et l'efficacité de conversion de puissance. Il est à noter que la méthode proposée dans ce chapitre peut être utilisée pour l'optimisation et l'amélioration des performances de fonctionnement des panneaux solaires organiques.

L'approche proposée serait utile pour la conception des panneaux photovoltaïques afin de prédire les caractéristiques souhaitables des cellules solaires organiques avant de les élaborer.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

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, il faut d'abord identifier leurs paramètres. C'était l'objectif de ce travail de recherche. A cause de la complexité des méthodes de mesure dynamique, plusieurs méthodes d'extraction paramétrique ont été proposées auparavant, parmi lesquels celles qui se basées sur les méthodes itératives qui est le cas de l'approche adoptée dans notre travail. Nous avons développé la méthode des cinq points qui utilise l'algorithme de région de confiance pour la résolution des systèmes d'équations non linéaires afin d'avoir une extension de la méthode conventionnelle (méthode des cinq points) à l'identification des sept paramètres qui affectent précisément le comportement de la cellule solaire. La comparaison des résultats obtenus par la méthode développée et celles des valeurs expérimentales nous a permis de calculer l'erreur quadratique moyenne pour les différentes cellules analysées dans cette étude. Les paramètres extraits de différentes cellules solaires organiques sont utilisés pour déterminer les intervalles de chaque paramètre électrique afin de former notre base de données qui permet la formulation de notre problème d'optimisation en utilisant les algorithmes multi-objectif. 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 son principe de fonctionnement, ces différentes filières technologiques, et l'association des cellules dans un module photovoltaïque.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons étudié les semiconducteurs organiques, qui sont repérés sous deux catégories: les molécules, et les polymères conjugués. 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 la physique de la cellule, et d'identifier quelques facteurs influents sur son rendement.

La troisième partie du mémoire, était sur l'optimisation par algorithmes génétiques (mono et multi-objectif), elle nous a donné une idée sur la méthode appropriée pour notre cas, puisque nous avons plus d'une fonction à optimisée à la fois, donc nous avons été obligé d'utiliser l'optimisation multi-objectif.

Avant d'optimiser, on doit d'abord étudier et identifier, c'était la parti d'identification des paramètres, elle se passe premièrement par choisir l'un des plusieurs modèles existent dans la littérature, le modèle choisi était le modèle à deux exponentiels, Ce choix a été préféré, car ce modèle fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. Il a également prouvé son efficacité devant les autres modèles.

Nous avons établi des programmes de calculs sous MATLAB 7.10 qui nous a permis d'identifier les paramètres des cellules étudiées, et de tracer la caractéristique $I(V)$, et par suite de calculer les différents points caractérisant la cellule: le courant de court circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le point de puissance maximal PPM (V_m, I_m), le facteur de forme FF, et le rendement. Le travail proposé dans ce mémoire peut être généralisé à l'étude de comportement électrique d'un panneau solaire en suivant les mêmes étapes citées dans le quatrième chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons formé un problème d'optimisation multi-objectif conformément à notre idée de base, qui consiste à maximiser le facteur de forme, en minimisant la résistance série et la conductance shunt, et par conséquent une maximisation de l'efficacité de conversion a été obtenue.

On a utilisé la technique NSGA II, qui est une approche de résolution au sens de Pareto-optimale, et que nous avons implémenté sous MATLAB. Les résultats obtenus sont très satisfaisantes, car le facteur de forme et l'efficacité de conversion de puissance des cellules solaires organiques sont beaucoup plus élevés lorsqu'on les compare avec celle de la conception classique.

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

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] J. Metzdorf, S. Winter, T. Wittchen, *Metrologia*, 37, 573, 2000.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM), G173-03, ISO 9845-1, 1992.
- [3] Nichiporuk Oleksiy, 'Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués', thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [4] GreenMA . « solar cells Ed.university of new south wales ». 336P.1992.
- [5] Green M.A. « Silicon Solar Cells : Advanced principles & practice.Sydney : Center for photovoltaic devices and systems ». UNSW, 336 p, 1995.
- [6] Mathieu URIEN, 'Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible', thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2008.
- [7] J.-C. Muller, Techniques de l'Ingénieur, dossier BE8579.
- [8] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green et F. Ferrazza, *Applied Physics Letters* 1998, 73, 1991.
- [9] M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S. Kiyama et O. Oota, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 503, 2000.
- [10] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16-61, 2008.
- [11] Loïc BAILLY, 'CELLULES PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES SOUPLES A GRANDE SURFACE', L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2010.
- [12] P. Wang, Q. Dai, S.M. Zakeeruddin, M. Forsyth, D.R. MacFarlane et M. Grätzel, *J. Am. Chem. Soc.*, 126, 2004.
- [13] Alain Bilbao Learreta, 'Réalisation de Technique MPPT numérique', Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Université Virgile.2006
- [14] Bendjellouli Zakaria, 'contribution à la modélisation d'une cellule solaire', thèse de Magistère, UNIVERSITE DE BECHAR, 2009.
- [15] Mohamad CHAKAROUN, 'Évaluation de nouveaux concepts d'encapsulation de cellules solaires organiques pour l'amélioration de leur durée de vie', L'Université de Limoges, 2010.
- [16] B. O'Regan et M. Grätzel, *Nature*, 353, 737, 1991.
- [17] C.W. Tang, *Applied Physics Letters*, 48, 183, 1986.
- [18] J. Xue, S. Uchida, B.P. Rand et S.R. Forrest, *Applied Physics Letters*, 84, 3013, 2004.
- [19] http://www.pv-tech.org/news/_a/solarmer_breaks_organic_solar_pv_cell_conversion_efficiency_record_hits_nre/.

- [20] M. Green, K. Emery, K. Buecher, D.L. King, S. Igari, *Progress in Photovoltaics : Res. Appl* 5, 51, 1997.
- [21] D. Meissner, *Photon* 2, 34-37 1999.
- [22] http://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur_organique.
- [23] P. Destruel et I. Séguy, *Techniques de l'Ingénieur*, dossier RE25-1
- [24] DANG Minh Trung, ' ELABORATION DE CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE POLYMERES CONJUGUES, ETUDES DES SYSTEMES RETICULABLES', thèse de doctorat, L'UNIVERSITE BORDEAUX 1, 2009.
- [25] Frenkel, J. Some Remarks on the Theory of the Photoelectric Effect. *Physical Review* 38, 309, 1931.
- [26] Wannier, G. H. The Structure of Electronic Excitation Levels in Insulating Crystals. *Physical Review* 52, 191, 1937.
- [27] Ghosh, A. K. & Feng, T. Merocyanine organic solar cells. *Journal of Applied Physics* 49, 5982-5989, 1978.
- [28] Yamashita, K., Harima, Y. & Iwashima, H. Evaluation of exciton diffusion lengths and apparent barrier widths for metal/porphyrin Schottky barrier cells by using the optical filtering effect. *The Journal of Physical Chemistry* 91, 3055-3059, doi:doi:10.1021/j100295a082, 1987.
- [29] Cornil, J., Heeger, A. J. & Bredas, J. L. Effects of intermolecular interactions on the lowest excited state in luminescent conjugated polymers and oligomers. *Chemical Physics Letters* 272, 463-470, 1997.
- [30] Friend, R. H. *et al.* Electronic excitations in luminescent conjugated polymers. *Solid State Communications* 102, 249-258, 1997.
- [31] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_polym%C3%A8re_photovolta%C3%AFque.
- [32] Gregg, B. A. & Hanna, M. C. Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics* 93, 3605-3614, 2003.
- [33] Gregg, B. A., Chen, S.-G. & Branz, H. M. On the superlinear increase in conductivity with dopant concentration in excitonic semiconductors. *Applied Physics Letters* 84, 1707-1709, 2004.
- [34] Choi, K. H. *et al.* Characteristics of flexible indium tin oxide electrode grown by continuous roll-to-roll sputtering process for flexible organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93, 1248-1255, 2009.
- [35] Kim, H.-K., Jeong, J.-A., Choi, K.-H., Jeong, S.-w. & Kang, J.-W. Characteristics of Flexible ITO Electrodes grown by Continuous facing target Roll-to-Roll Sputtering for flexible organic solar cells. *Electrochemical and Solid-State Letters* 12, H169-H172, 2009.
- [36] G. Gustafsson, O. Inganäs, M. Sundberg et C. Svensson, *Synthetic Metals*, 41, 499, 1991.
- [37] F.J. Esselink et G. Hadziioannou, *Synthetic Metals*, 75, 209, 1995.
- [38] G. Yu et A.J. Heeger, *Journal of Applied Physics*, 78, 4510, 1995.

- [39] J.J.M. Halls, C.A. Walsh, N.C. Greenham, E.A. Marseglia, R.H. Friend, S.C. Moratti et A.B. Holmes, *Nature*, 376, 498, 1995.
- [40] T. Kietzke, H.H. Horhold et D. Neher, *Chem. Mater.* 2005, 17, 6532, 2005.
- [41] J.Y. Kim, K. Lee, N.E. Coates, D. Moses, T.-Q. Nguyen, M. Dante et A.J. Heeger, *Science*, 317, 222, 2007.
- [42] Kim, J. Y. *et al.* Efficient Tandem Polymer Solar Cells Fabricated by All-Solution Processing. *Science* 317, 222-225, doi:10.1126/science.1141711, 2007.
- [43] Hiramoto, M., Suezaki, M. & Yokoyama, M. Effect of Thin Gold Interstitial-layer on the Photovoltaic Properties of Tandem Organic Solar Cell. *Chemistry Letters*, 327-330, 1990.
- [44] http://www.questmachine.org/article/Cellules_photovolta%C3%AFques_%C3%A0_base_de_poly m%C3%A8res.
- [45] J.M. NUNZI, *Comptes Rendus Physique*, Vol3, pp. 523-542, 2002.
- [46] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: The University of Michigan Press, USA, 1975.
- [47] Fonseca C.M. et Fleming P. J. 'Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization', *Proceedings of the Fifth International Conference in Genetic Algorithms*, pp. 416-423, San Mateo, CA, 1993.
- [48] R. L. Haupt, S. E Haupt. '*Practical Genetic Algorithms*', 2nd edition, John Wiley & Sons edition, New York, USA, 2004.
- [49] T. Back. 'Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms (Hardcover) ', Oxford University Press, USA, 1996.
- [50] D. Whitley, 'Foundations of Genetic Algorithms 2, US Edition ', California, USA, 1993.
- [51] D. E. Goldberg, '*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*', 1st edition, Addison-Wesley Professional, Boston, USA, 1989.
- [52] Y. Colletto et P. Siarry, 'Optimisation Multi-objectif', EYROLLES, Nov. 2002.
- [53] Sergio L-A., 'Optimisation multi-objectif et analyse de sensibilité appliquées a la conception de dispositifs ', thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon, 2006.
- [54] Fonseca C-M. and Fleming P-J., 'Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization', In: 5th Conference on Genetic Algorithm, San Mateo, California, pp. 416-423, Aug. 1993.
- [55] David S., 'Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms', In: First International Conference on Genetic Algorithm, Lawrence Erlbaum, New Jersey, pp. 93-100, 1985.
- [56] Viennet C-F. and Marc I., '*Multicriteria Optimization using a Genetic Algorithm for Determining a Pareto Set*', *International Journal of Systems Science*, v. 27, n. 2, pp. 255-260, 1996.
- [57] Eckart Z. and Lothar T., 'An evolutionary algorithm for multi-objective optimization: The strength Pareto approach'. Technical report, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, 1998.

- [58] Eckart Z., 'Evolutionary Algorithms for Multi-objective Optimization: Methods and Applications', Thesis Doctor of Technical Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1999.
- [59] Eckart Z., Laumanns M. and Lothar T., 'SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm,' In: EUROGEN 2001, Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems, Athens, pp. 12-21, Sept. 2001.
- [60] V. Pareto, 'Cours d'économie politique', vol.1 et 2, F. Rouge, Lausanne, 1896.
- [61] M. Tivanov, A. Patryn, N. Drozdov, A. Fedotov and A. Mazanik, "Determination of solar cell parameters from its current-voltage and spectral characteristics". *Sol. Energy Mater.Sol. Cells*, Vol. 87, pp. 457-465, 2005.
- [62] Ewa Radziemska. 'Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells'. *Energy Convers. Manage.*, Vol.46,pp. 1485-1494, 2005.
- [63] B. Mazhari, 'An improved solar cell circuit model for organic solar Cells', *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 90 (2006) 1021-1033, 2006.
- [64] J.M. Nunzi, '*Organic Materials and Devices for Photovoltaic Applications*', ERT Cellules Solaires Photovoltaïques Plastiques, Labo POMA, Angers, France, pp. 197 - 224, 2002.
- [65] J.P. Charles, '*Caractérisation I-V et Fonctionnement des Photopiles Solaires*', Thèse de Doctorat ès Sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Juillet 1984.
- [66] C.J. Brabec, J.A. Hauch, P. Schilinsky and C. Waldauf, '*Theme Article - Production Aspects of Organic Photovoltaics and Their Impact on the Commercialization of Devices*', *Mrs Bull.*, Vol. 30, p. 50, 2005.
- [67] R.N. Hall, '*Silicon Photovoltaic Cells*', *Solid - State Electron.*, Vol. 24, pp. 595 - 616, 1981.
- [68] A.Cheknane, S.Hikmat, Faycal Djefal, Boumedie`ne Benyoucef, Jean-Pierre Charles, 'An equivalent circuit approach to organic solar cell modelling', *Microelectronics Journal* 39 (2008) 1173-1180, 2008.
- [69] P. Rodrigues, J. R. Camacho, and F. B. Matos, 'The application of Trust Region Method to estimate the parameters of photovoltaic modules through the use of single and double exponential models.', *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'11)* Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011
- [70] T. Jeranko, H. Tributsch, N.S. Sariciftci, J.C. Hummelen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 83 (2004) 247-262, 2004.
- [71] N. Nehaoua, Y. Chergui, D.E. Mekki, 'Determination of organic solar cell parameters based on single or multiple pin structures'. *Vacuum* 84 (2010) 326-329, 2010.
- [72] S. Alem, R. de Bettignies, J.-M. Nunzi, 'Efficient polymer-based interpenetrated network photovoltaic cells', *Appl. Phys. Lett.* 84 (2004) 2178-2180, 2004.
- [73] H-K Lyu, J.H. Sim, S-H. Woo, K.P. Kim, J-K. Shin, Y.S. Han, 'Efficiency enhancement in large-area organic photovoltaic module using theoretical power loss model', *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 2380-2383, 2011.

- [74] R.B. Ross, C.M. Cardona, D.M. Guldi, S.G. Sankaranarayanan, M.O. Reese, N. Kopidakis, J. Peet, B. Walker, G.C. Bazan, E.V. Keuren, B.C. Holloway, M. Drees, 'Endohedral fullerenes for organic photovoltaic devices', *Nat. Mater.* 8 (2009) 208–212, 2009.
- [75] C. Lungenschmied, G. Dennler, H. Neugebauer, S.N. Sariciftci, M. Glatthaar, T. Meyer, A. Meyer, 'Flexible, long-lived, large-area, organic solar cells', *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 91 (2007) 379–384, 2007.
- [76] M. Chegaar, N. Nehaoua, A. Bouhemadou, 'Organic and inorganic solar cells parameters evaluation from single I–V plot', *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 1376–1379, 2008.
- [77] A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez, J. Muci, 'New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I–V characteristics', *Solar Energy Mater Solar Cells* 90 (2006) 352–361, 2006.
- [78] F. Djeflal, T. Bendib, 'Multi-objective genetic algorithms based approach to optimize the electrical performances of the gate stack double gate (GSDG) MOSFET', *Microelectronics Journal*, 42 (2011) 661–666, 2011.
- [79] P.-C. Chang, J.-C. Hsieh, C.-Y. Wang, 'Adaptive multi-objective genetic algorithms for scheduling of drilling operation in printed circuit board industry', *Appl. Soft Comput.* 7 (2007) 800–806, 2007.
- [80] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T., 'A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II', *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002.
- [81] Nicolas J., 'Modélisation et résolution approchée de problème de tournées multi-objectif', thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [82] I. BELAIDI, K. MOHAMMEDI, B. BRACHEMI, 'Mise en oeuvre de l'Algorithme NSGAI pour l'Optimisation Multi-Objectif des paramètres de coupe en Fraisage en bout', 19ème Congrès Français de Mécanique, 2009.