

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

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Thème

ÉTUDE ET IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES
ÉLECTRIQUES DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Soutenu le :

Présenté par :

Mr. Ammar FILALI

Membres de jury :

Président :

Pr. Messaoud HAMOUDA Univ. d'ADRAR

Encadré par :

Dr. Fateh FERROUDJI (M.R.B) URERMS ADRAR

Examineurs

Dr. Nouar AOUN (M.R.B) URER ADRAR

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

- Mes chers parents.
- Mes frères et mes sœurs.
- Ma femme.
- A mon collègue Samir IBRIR.
- Toutes mes collègues surtout : Sadek KHELAF & Mohamed BOUGUERNE

Amar FILALI

Étude & Identification des Paramètres Électriques des Modules Photovoltaïques

Ammar FILALI

RÉSUMÉ

Dans ce travail nous avons étudié l'effet des paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque pour le modèle à simple diode et extraire ces paramètres en utilisant les algorithmes génétiques. Le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque et leurs différents paramètres électriques, l'effet des paramètres électriques (R_s , R_{sh} , I_0 et n) sur les caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule, le facteur de forme, le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale et l'applicabilité des algorithmes génétiques pour étudier le comportement physique des dispositifs photovoltaïques sont représenté.

Les résultats indiquent que les deux techniques GA mono objectif et multi-objectif présentent une meilleure stratégie conventionnelle d'extraction de paramètres, en termes de convergence et exactitude, elles fournissent des solutions optimales globales. Les comparaisons prometteuses entre les caractéristiques expérimentales et nos simulations de modèle à simple diode ajusté par les AGs ont indiqué que l'approche développée est particulièrement appropriée pour être implémentée dans des simulateurs de composants électroniques pour étudier les dispositifs photovoltaïques.

Mots clés :

Algorithmes génétiques, cellule photovoltaïque, module photovoltaïque, paramètres électriques, techniques GA.

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études.

Je tiens tout particulièrement à remercier vivement, mon Directeur de Mémoire, le Docteur (Maître de Recherche) **FERROUDJI Fateh**, à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharienne (URER-MS), Adrar, pour la qualité du sujet de recherche qu'il m'a proposé, pour m'avoir fait bénéficier de ses connaissances scientifiques, ses conseils et son énorme aide.

Nous tenons à remercier:

HAMOUDA Messaoud Professeur (M.A.A) de l'université d'Adrar et directeur de l'URER-MS Adrar de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

AOUN Nouar Maître de Recherche (M.R.B) de l'URER-MS, Adrar qui a accepté de juger ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous mes amis.

Je remercie mes parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis. Ma reconnaissance envers eux est inexprimable.

Table des matières

Résumé	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Table des figures	
Table des tableaux	
Introduction générale	2

SOMMAIRE

CHAPITRE 1

Rappel sur les Cellules Photovoltaïques

1.1 Introduction	5
1.2 Fonctionnement d'une cellule solaire	5
1.3 Les différents types de cellules photovoltaïques	6
1.3.1 Cellule en silicium monocristallin	6
1.3.2 Cellule en silicium polycristallin	7
1.3.3 Cellule silicium amorphe	8
1.3.4 Les cellules III-V multi-jonction	9
1.3.5 Cellule organique	9
1.3.6 Cellule nanocristalline	10
1.4 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	11
1.5 Effet de l'éclairement et de la température sur I-V	12
1.5.1 Effet de la température	12
1.5.2 Effet de l'éclairement	13
1.6 Les modules photovoltaïques	14
1.7 Association des cellules photovoltaïques	15
1.7.1 Association en série	15
1.7.2 Association en parallèle	15
1.8 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	16
1.8.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque	16

1.8.2	Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	16
1.9	Conclusion	17

CHAPITRE 2

Les Algorithmes Génétiques

2.1	Introduction	19
2.2	Les algorithmes évolutionnaires (AE)	19
2.3	Algorithmes génétiques	20
2.4	Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques AGs	21
2.5	Les caractéristiques des algorithmes génétiques	22
2.5.1	Codage	22
2.5.2	Génération de la population initiale	23
2.5.3	La fonction d'évaluation	24
2.6	Opérateurs génétiques	24
2.6.1	Opérateur de sélection	24
2.6.2	Opérateur de croisement	26
2.6.3	Opérateur de mutation	27
2.6.4	Opérateur de remplacement	27
2.7	Critères de convergence	28
2.8	Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques	29
2.8.1	Avantages des AGs	29
2.8.2	Inconvénients des AGs	30
2.9	Conclusion	30

CHAPITRE 3

Effet des Paramètres Électriques sur la Cellule Photovoltaïque

3.1	Introduction	32
3.2	Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque	32
3.2.1	Cellule idéale	32
3.2.2	Cellule solaire réelle	33
3.4.3	Conditions aux limites	33
3.3	Les différents paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque	33

3.3.1	Le courant de court-circuit (I_{cc})	33
3.3.2	Tension de circuit ouvert (V_{co})	34
3.3.3	Facteur de forme, FF	34
3.3.4	Rendement de conversion η	34
3.3.5	Point de puissance maximale P_m	34
3.4	Effet des paramètres électriques de la cellule	35
3.4.1	Effet de la résistance série	35
3.4.2	Effet de la résistance shunt	37
3.4.3	Effet de courant de saturation de la diode	39
3.4.4	Effet de Facteur d'idéalité	41
3.5	Conclusion	43

CHAPITRE 4

Extraction des Paramètres Électriques de la Cellule Photovoltaïque

4.1	Introduction	45
4.2	Détermination expérimentale de la caractéristique $I(V)$	45
4.3	Identification des paramètres électriques en utilisant les algorithmes génétiques	46
4.3.1	Méthodologie de calcul	46
4.3.2	Définition des paramètres électriques	47
4.3.3	Procédé d'évaluation (fonction de fitness)	48
4.4	Résultats et discussion	49
4.4.1	Implémentation des paramètres de la technique (AG)	49
4.4.2	Extraction mono objectif des paramètres électriques	50
4.4.3	Extraction multi-objectifs des paramètres électriques	52
4.6	Conclusion	56
	Conclusion générale et perspectives	58
	Références bibliographiques	61

Table des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 :	Principe de Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	5
Figure 1.2 :	Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	6
Figure 1.3 :	Cellule photovoltaïque monocristalline	7
Figure 1.4 :	Cellule photovoltaïque poly-cristalline	8
Figure 1.5 :	Cellule photovoltaïque amorphe	8
Figure 1.6 :	Cellule photovoltaïque multi-jonction	9
Figure 1.7 :	Cellule solaire tout organique sur substrat souple	10
Figure 1.8 :	Cellule solaire nanocristalline	11
Figure 1.9 :	Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque	12
Figure 1.10 :	Effet de la température sur la caractéristique I-V	12
Figure 1.11 :	Effet de la température sur la caractéristique P-V	13
Figure 1.12 :	Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V	13
Figure 1.13 :	Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V	14
Figure 1.14 :	Module photovoltaïque	14
Figure 1.15 :	Association en série de N_s cellules solaires	15
Figure 1.16 :	Association en parallèle de N_p cellules solaires identiques	16

Chapitre 2

Figure 2.1 :	Différentes classes d'algorithmes évolutionnaires	20
Figure 2.2 :	Principe général des algorithmes génétiques	21
Figure 2.3 :	Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique	22
Figure 2.4 :	Illustration schématique du codage des variables réelles	23
Figure 2.5 :	La sélection par roulette	25
Figure 2.6 :	Croisement en 1 point	26
Figure 2.7 :	Croisement en 2 points	26
Figure 2.8 :	Croisement uniforme	27
Figure 2.9 :	Représentation schématique d'une mutation	27

Chapitre 3

Figure 3.1 :	Schéma équivalent d'une cellule idéale	32
Figure 3.2 :	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	33
Figure 3.3 :	L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique ; (a) I(V) et (b) P(V)	36
Figure 3.4 :	L'effet de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique ; (a) I(V) et (b) P(V)	38
Figure 3.5 :	L'influence de courant de saturation I_0 de la diode sur la caractéristique ; (a) I(V) et (b) P(V)	40
Figure 3.6 :	L'influence de facteur d'idéalité n sur la caractéristique ; (a) I(V) et (b) P(V)	42

Chapitre 4

Figure 4.1 :	Montage électrique pour relever la caractéristique I(V)	46
Figure 4.2 :	Organigramme de l'approche évolutionnaire proposée pour la détermination des paramètres électriques du module photovoltaïque	47
Figure 4.3 :	Courbe expérimentale [42] et simulé de la caractéristique I-V du module photovoltaïque a) : $T=298.4^\circ\text{K}$ et $E=762\text{W/m}^2$, (b): $T=299.1^\circ\text{K}$ et $E=778\text{W/m}^2$, (c): $T=301.1^\circ\text{K}$ et $E=749\text{W/m}^2$, (d): $T=300.2^\circ\text{K}$ et $E=753\text{W/m}^2$	52
Figure 4.4 :	Courbe expérimentale [42] et simulé de la caractéristique I-V du module photovoltaïque (a) : $T=298.4^\circ\text{K}$ et $E=762\text{W/m}^2$, (b): $T=299.1^\circ\text{K}$ et $E=778\text{W/m}^2$, (c): $T=301.1^\circ\text{K}$ et $E=749\text{W/m}^2$, (d): $T=300.2^\circ\text{K}$ et $E=753\text{W/m}^2$	55

Table des tableaux

Tableau 3.1 :	Les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de résistance série R_s	35
Tableau 3.2 :	Les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de résistance shunt R_s	37
Tableau 3.3 :	Les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de courant de saturation I_o	39
Tableau 3.4 :	Les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de facteur d'idéalité	41
Tableau 4.1 :	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque de type ISOFTON 106W ..	45
Tableau 4.2 :	Paramètres de GA utilisés dans cette application	49
Tableau 4.3 :	les paramètres extraits de la cellule en utilisant les algorithmes génétiques pour les quatre modèles	50
Tableau 4.4 :	Les paramètres extraits de la cellule en utilisant la méthode multi-objective	53
Tableau 4.5 :	Erreur relative Pour les quatre modèles	56

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La production de l'énergie est un grand défi pour les années à venir. En effet les besoins énergétiques qui augmentent de plus en plus à cause l'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés, la multiplication des équipements domestiques et l'augmentation du parc automobile. Par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin fortement d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de cette demande d'énergie est assurée par l'importation de ressources d'énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre (le climat de la terre évolue vers le mauvais et les sources naturelles d'eau se raréfient) et le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Aujourd'hui, Il y'a de diverses sources renouvelables propres et incontournable qui sont utilisées pour la génération d'énergie électrique, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie de biomasse ...etc. [1].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité [2, 3]. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

Dans ce travail, nous étudions l'extraction des paramètres électriques de la cellule photovoltaïque pour le modèle à simple diode en utilisant les algorithmes génétiques.

Ce travail est articulé autour de 4 chapitres :

Le premier chapitre présente le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, évoque ensuite leurs différents types et détaille les principales caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque. Ensuite, nous aborderons l'influence de l'éclairement et de la température sur les performances électriques des modules photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre nous exposons les algorithmes évolutionnaires et Algorithmes génétiques AGs, présentons ensuite le principe de fonctionnement des AGs et leurs caractéristiques principales, puis nous aborderons les opérateurs génétiques. Et enfin, on décrit les avantages et les inconvénients des algorithmes génétiques.

Le troisième chapitre, qui présente la première partie de résultats des travaux réalisés durant le mémoire. D'abord, on présente le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque dans les deux cas idéale et réelle, ensuite on décrit les différents paramètres électriques d'une cellule solaire, afin de pouvoir connaître l'effet de ces paramètres sur le comportement électrique de la cellule solaire. Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel MATLAB 7.1.

Le dernier chapitre de cette mémoire présente la deuxième partie des résultats. Ce chapitre est concerné à l'extraction des paramètres électriques en utilisant les approches d'optimisation évolutionnaires (AGs). Les résultats obtenus par notre approche d'optimisation sont validés en calculant l'erreur relative aux résultats expérimentaux.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

**RAPPEL SUR LES CELLULES
PHOTOVOLTAÏQUES**

1.1 Introduction

Ce chapitre présente des éléments importants liés à la cellule photovoltaïque qui seront présentés. En premier lieu, on va présenter le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, évoquer ensuite leurs différents types et détailler les principales caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque : le courant court-circuit, la tension de circuit-ouvert, le courant maximum et la tension maximum correspondant à la puissance maximale. Ce chapitre sera consacré à l'étude de l'impact de l'éclairement et la température sur les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque afin d'analyser le comportement électrique des cellules solaires avec les paramètres climatiques.

1.2 Fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [4].

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants (figure I.1):

- 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 semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

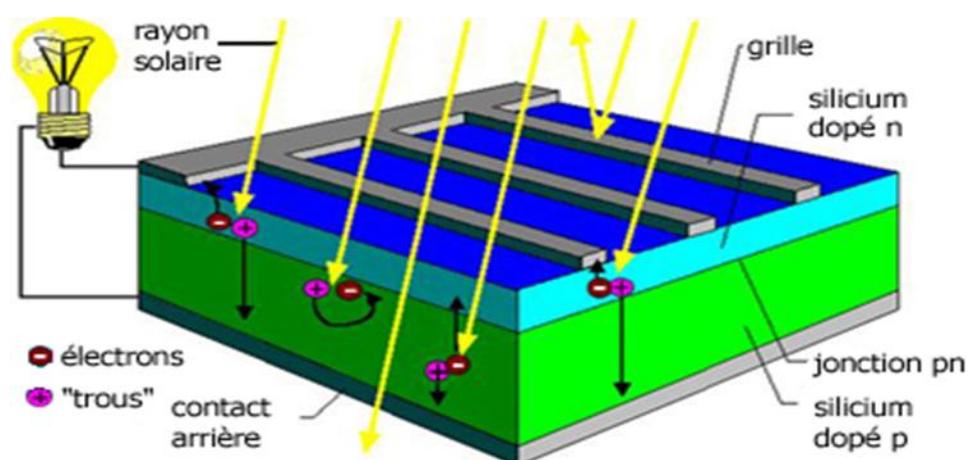


Figure 1.1: Principe de Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron / trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n.

D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 1.2.

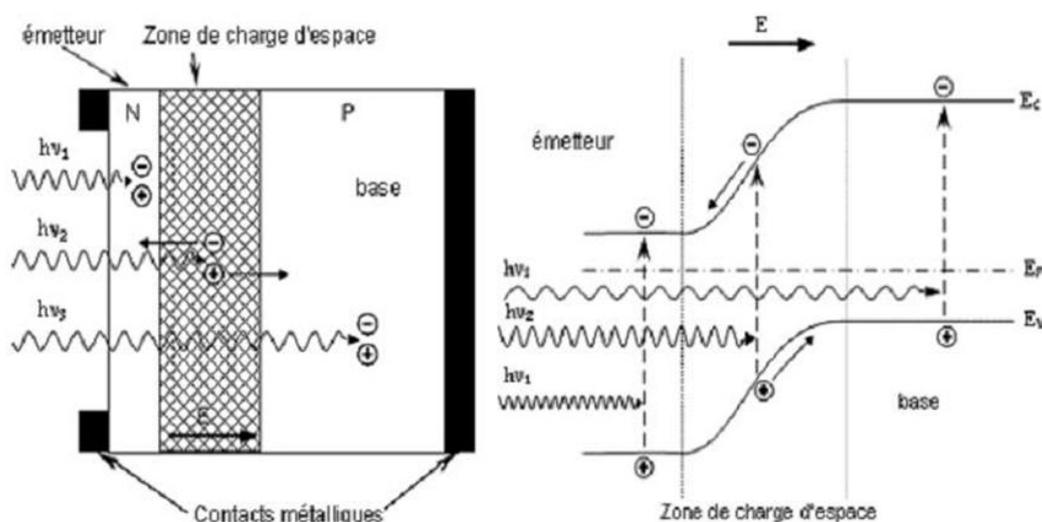


Figure 1.2 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [5].

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

- **Dans la zone *n* ou *p*,** les porteurs minoritaires 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 photo-courant de diffusion.
- **Dans la zone de charge d'espace,** le pair électron / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région *n*, les trous vers la région *p*. On aura un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [3].

1.3 Les différents types de cellules photovoltaïques

1.3.1 Cellule en silicium monocristallin

Il s'agit de la technologie donnant des valeurs record en termes de rendement de conversion pour ce matériau: plus de 25% en laboratoire [7]. Il existe deux méthodes de fabrication. La méthode dite de Czochralski est couramment employée dans l'industrie aujourd'hui encore et consiste en la croissance d'un monocristal de silicium sous forme de lingot à partir d'un creuset de silicium fondu. La méthode « [Float zone](#) » donne des puretés de matériau bien supérieures car elle est conduite sous vide (pas de pollution par l'oxygène) et

que le procédé s'affranchit de la présence du creuset et donc des impuretés métalliques qu'il est susceptible d'introduire dans le monocristal.

Si les rendements commerciaux sont de l'ordre de 17%, ce qui constitue le meilleur rendement pour des panneaux photovoltaïques produits en masse de quelques technologies que ce soit, la technologie souffre de rendements médiocres en lumière faible et/ou diffuse, et de coûts de production extrêmement élevés.



Figure 1.3 : Cellule photovoltaïque monocristalline.

1.3.2 Cellule en 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. 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 [8].



Figure 1.4 : Cellule photovoltaïque poly-cristalline.

1.3.3 Cellule silicium 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 éclairément 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 m^2). 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 performances au cours du temps.

L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro structures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo présentent des rendements de laboratoire de plus de 21% et de 16% en production industrielle [8].

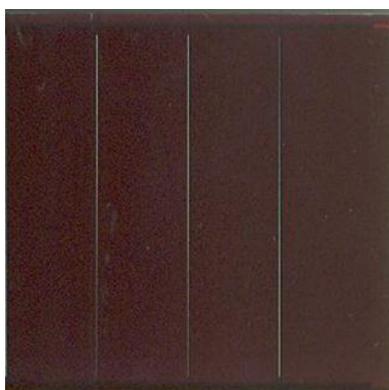


Figure 1.5 : Cellule photovoltaïque amorphe.

1.3.4 Les cellules III-V multi-jonction

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 épit-axiale, 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 [9].

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.

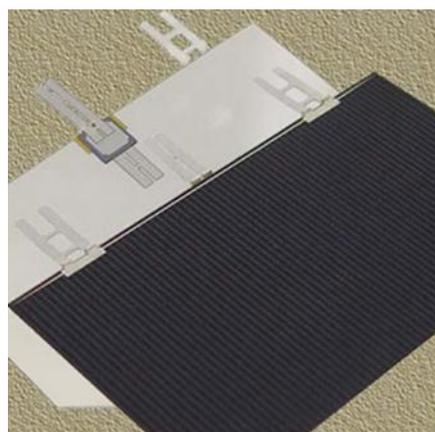


Figure 1.6 : Cellule photovoltaïque multi-jonction.

1.3.5 Cellule organique :

Observe depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion (<10-5%), cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables [10], conformément aux prédictions de Merrit en 1978 [11]. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0.95% de rendement de conversion.

Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « **humides** » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « **plastiques** ».

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures) [12].

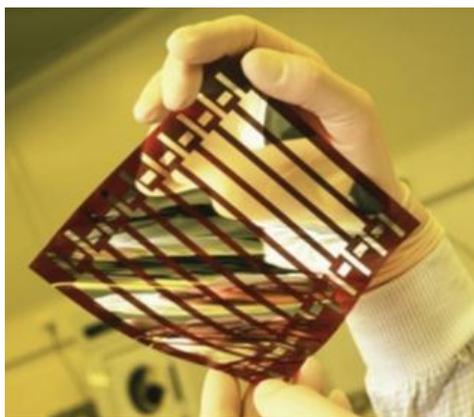


Figure 1.7 : Cellule solaire tout organique sur substrat souple.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie à des applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes [13].

1.3.6 Cellule nanocristalline

Une des dernières générations de photopiles; Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques; Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire; Procédé et coût de production encore plus bas.

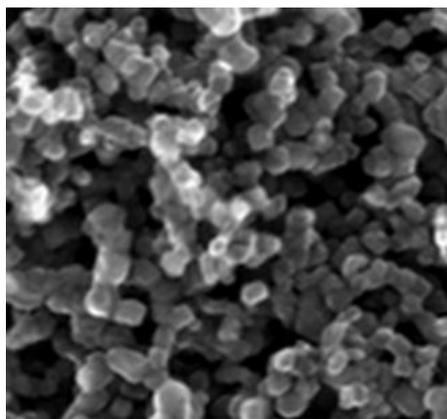


Figure 1.8 : Cellule solaire nanocristalline.

1.4 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

L'équation globale pour modéliser la cellule réelle est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Où : R_s résistance série (Ω), R_{sh} résistance shunt (Ω), K constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23}$), q charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}$ C), T température de la cellule ($^{\circ}\text{K}$), I_{ph} courant photo-généré, I_s courant de saturation de la diode et n facteur d'idéalité de la diode.

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit ($V=0$)
- La tension en circuit ouvert ($I=0$)
- La puissance maximale : elle est le produit de la tension maximale (V_m) et le courant maximale (I_m).elle est défini par la relation suivante: $P_{max} = V_m \cdot I_m$.
- Le facteur de forme **FF** : C'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit $I_{sc} \cdot V_{oc}$. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.2)$$

- Le rendement de conversion d'énergie η :

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance incident [14].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

P_{in} : la puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

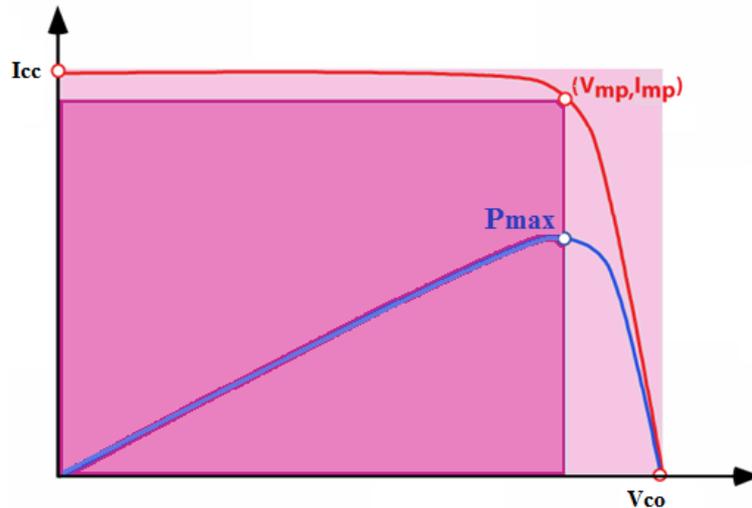


Figure 1.9 : Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque.

1.5 Effet de l'éclairement et de la température sur I-V

La forme des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ de la cellule photovoltaïque dépendent de l'éclairement et la température qui modifient les valeurs I_{CC} , V_{CO} , I_{mp} et V_{mp} . Par conséquent, le rendement d'une cellule solaire fortement dépend de l'éclairement et de la température.

1.5.1 Effet de la température

La température est un paramètre important puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, susceptible de les échauffer.

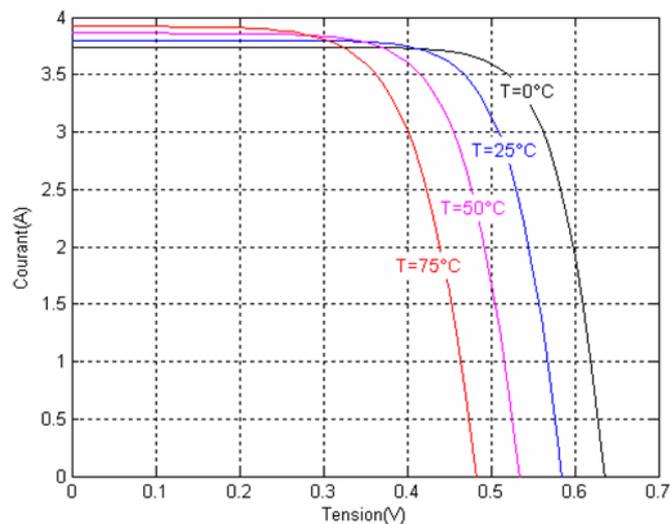


Figure 1.10 : Effet de la température sur la caractéristique I-V.

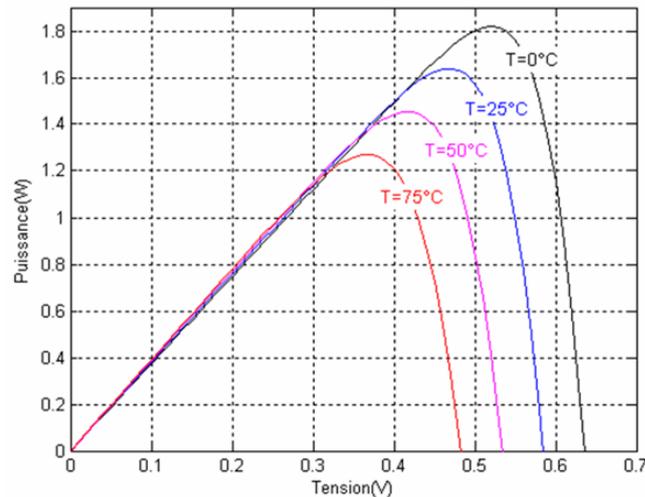


Figure 1.11 : Effet de la température sur la caractéristique P-V.

La figure 1.9 et figure 1.10 permet de montrer l'impact de la température sur les caractéristiques : courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$.

De cette figure, on constate que l'augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}) et la diminution de la tension en circuit ouvert (V_{co}) est provoqué par une augmentation de la température ambiante. On remarque également que le point de puissance maximum peut connaître des variations significatives. L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_{mp}) et un léger accroissement du courant (I_{mp}) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m).

1.5.2 Effet de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Sans éclairement, il n'y a pas de photon et donc pas de création de paire photo-générée et donc pas de courant.

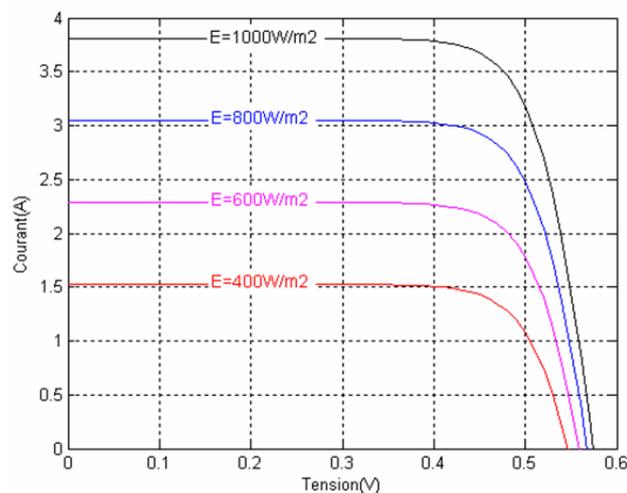


Figure 1.12 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V.

La figure suivante représente les caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'une cellule PV en fonction de l'éclairement, à une température constante.

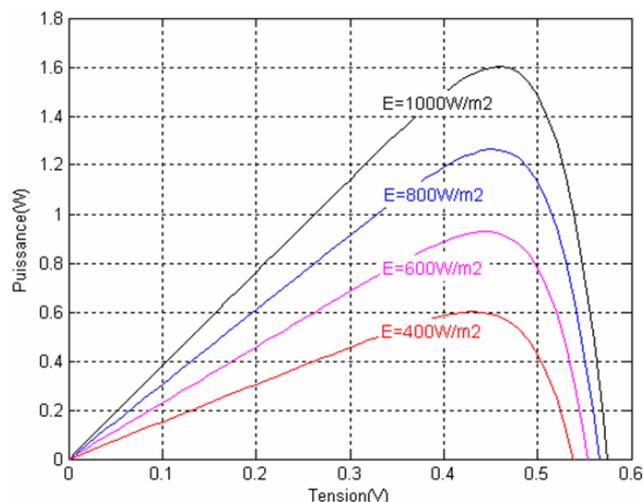


Figure 1.13 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

De cette figure, On remarque que le photo-courant qui est pratiquement égale le courant court-circuit est proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux. On remarque également que la tension V_{max} correspondante à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

1.6 Les modules photovoltaïques

Par définition, un module photovoltaïque est un ensemble de cellules solaires assemblées et exposées au rayonnement solaire pour générer une puissance électrique exploitable [15]. En effet, une cellule élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) : entre 0,5 et 1,5 V selon les technologies. Alors, les cellules sont associées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque avec une tension et un courant plus élevé afin de produire plus de puissance, (figure 1.13).



Figure 1.14 : Module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique.

1.7 Association des cellules photovoltaïques

1.7.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [16].

La figure 1.14 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série N_s cellules identiques.

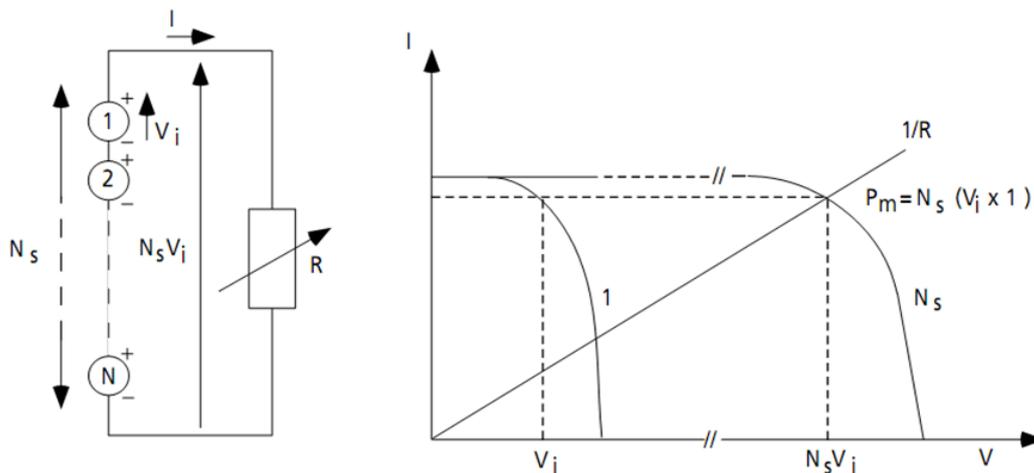


Figure 1.15 : Association en série de N_s cellules solaires.

1.7.2 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 [16].

La figure 1.15 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles N_p cellules identiques.

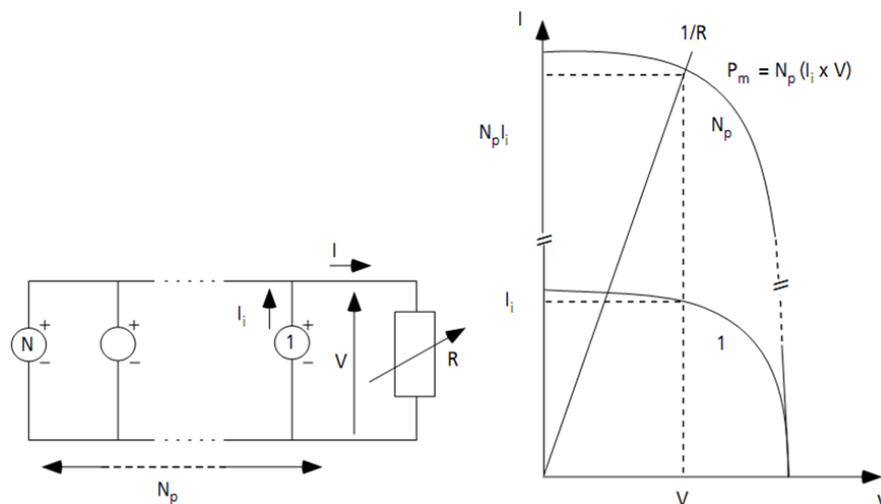


Figure 1.16 : Association en parallèle de N_p cellules solaires identiques.

1.8 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.8.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [17] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

1.8.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [17].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base sur les cellules photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques $I-V$ et $P-V$, leur modèle électrique équivalent et leurs principales grandeurs caractéristiques. Nous avons ensuite décrit l'influence des divers paramètres : l'éclairement et la température sur leur caractéristique et leurs paramètres électriques puis nous avons abordé l'association des cellules en série et en parallèle. Finalement nous avons présenté les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

LES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous exposons d'abord les algorithmes évolutionnaires et Algorithmes génétiques AGs, présentons ensuite le principe de fonctionnement des AGs et leurs caractéristiques principales, puis nous aborderons les opérateurs génétiques : sélection, croisement, mutation, remplacement, enfin nous décrirons les Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.

2.2 Les algorithmes évolutionnaires (AE)

Les algorithmes évolutionnaires sont des méthodes stochastiques d'optimisation globale basées sur la théorie Darwinienne de l'évolution des espèces biologiques, ils utilisent à la fois les principes de la survie des individus les mieux adaptés et ceux de la propagation du patrimoine génétique qui s'inspirent des mécanismes de sélection naturelle et des phénomènes génétiques tel que des mécanismes d'évolution de la nature : croisements, mutations, sélections, etc. Pour utiliser ces algorithmes, il faut disposer d'une population d'individus. Chaque individu dispose d'une chaîne chromosomique qui dirige son comportement. Cette chaîne s'apparente à l'ADN dans les organismes vivants. Comme dans les systèmes naturels, des croisements sont réalisés périodiquement et permettent à l'algorithme de créer la génération suivante d'individus, ainsi des mutations sont aussi effectuées. Ces mutations évitent à l'ensemble de la population de converger vers une solution qui ne serait pas optimale. Il existe plusieurs types de ces algorithmes mais l'idée essentielle est la même : simuler l'évolution d'une population dans un espace de recherche à l'aide de trois opérateurs: sélection, croisement, mutation [18, 19].

Malgré la simplicité du processus évolutionnaire, la fabrication d'un algorithme évolutionnaire efficace est une tâche difficile, car les processus évolutionnaires sont très sensibles aux choix algorithmiques et paramétriques. L'expérience a prouvé que les réussites les plus importantes sont fondées sur une très bonne connaissance du problème à traiter, et une compréhension délicate des mécanismes évolutionnaires.

On distingue quatre grandes familles d'algorithmes évolutionnaires comme indiqué par la figure 2.1 [20,21].

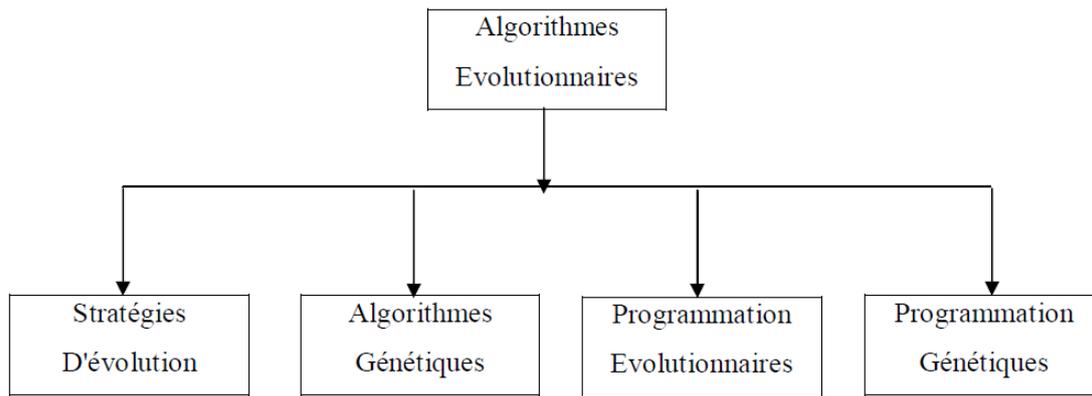


Figure 2.1: Différentes classes d'algorithmes évolutionnaires.

2.3 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques AGs, ont été initialement développés par John Holland (1975), ses collègues et ses étudiants, à l'université du Michigan dans deux buts principaux [22]:

1. Mettre en évidence et expliquer rigoureusement les processus d'adaptation des systèmes naturels.
2. Concevoir des systèmes artificiels qui possèdent les propriétés des systèmes naturels.

Leurs champs d'application sont très vastes. Outre l'économie, ils sont utilisés pour l'optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues, multi modales, bruitées...), traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...), optimisation d'emploi du temps, optimisation de design, contrôle de systèmes industriels, apprentissage des réseaux de neurones etc. La raison de ce grand nombre d'application est claire c'est la simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour des problèmes complexes, les AGs peuvent être utilisés pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production, centrale nucléaire...) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes [22].

De plus, les AGs utilisent deux stratégies importantes pour trouver une solution ou un ensemble de solutions. Ces stratégies sont : l'exploration et l'exploitation. Elles permettent de trouver le maximum global (solution du problème) du fait qu'elles sont complémentaires. Si l'exploration investigue l'ensemble des solutions de l'espace de recherche, la phase d'exploitation quant à elle se sert de la connaissance des solutions pour aider à trouver de meilleures solutions. La combinaison de ces deux stratégies peut être tout à fait efficace [23].

2.4 Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques AGs

Les algorithmes génétiques sont des approches d'optimisation qui utilisent des techniques dérivées de la science génétique et de l'évolution naturelle : la sélection, la mutation et le croisement. Pour utiliser ces approches, on doit disposer des éléments suivants:

1. Le codage d'un élément de population: une fonction qui permet de modéliser les données du problème réel dans des données utilisables par l'algorithme génétique.
2. Une fonction pour générer la population initiale : la génération de la population initiale est importante puisque cette génération représente le point de départ de l'algorithme et son choix influe sur la rapidité et l'optimalité de la solution finale.
3. Une fonction à optimiser (la fonction objective) : une fonction qui retourne une valeur d'adaptation pour chaque individu. Cette valeur permet de déterminer la solution pertinente puisque le problème se restreint à chercher le groupe d'individus qui ont les valeurs optimums.
4. Des opérateurs qui permettent d'évoluer d'une population à une autre tout en améliorant la fonction objective. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, alors que 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 (critère d'arrêt), probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation, etc.

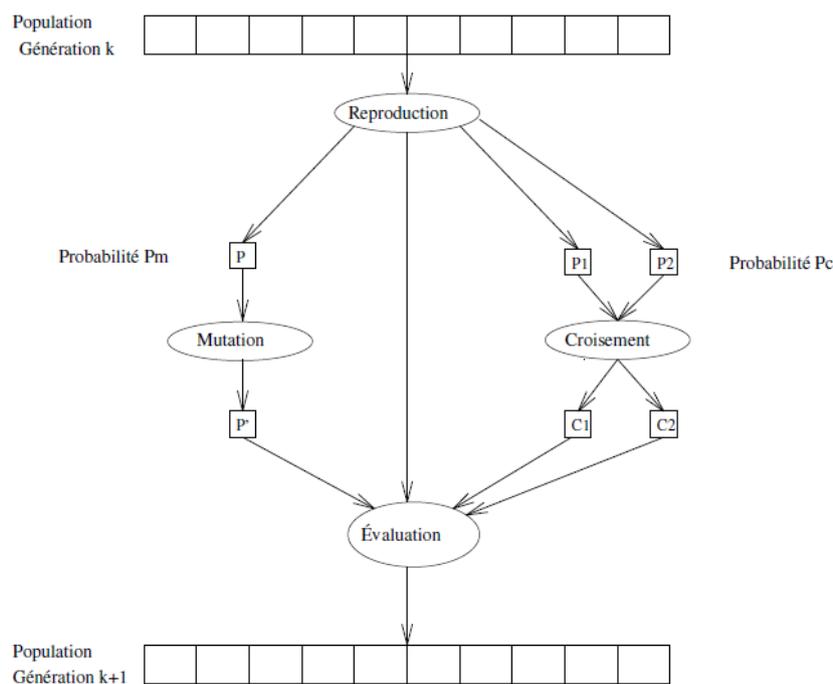


Figure 2.2 : Principe général des algorithmes génétiques.

2.5 Les caractéristiques des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques se caractérisent par quatre aspects : le codage des paramètres du problème, l'espace de recherche, la fonction d'évaluation servant à sélectionner les chromosomes parents, et le hasard qui joue un rôle important dans l'évolution des chromosomes de génération en génération. Nous allons passer en revue ces différents aspects.

2.5.1 Codage

Le codage est une partie très importante des algorithmes génétiques. Il permet de représenter l'individu sous la forme d'un chromosome. Ce chromosome est constitué de gènes qui prennent des valeurs dans un alphabet binaire ou non. Certains auteurs n'hésitent pas à faire le parallèle avec la biologie et parlent de génotype en ce qui concerne la représentation binaire d'un individu, et de phénotype pour ce qui est de sa valeur réelle correspondante dans l'espace de recherche.

Le choix du codage est délicat. Il doit permettre de coder toutes les solutions et permettre la mise en œuvre des opérateurs de reproduction. C'est ainsi que le bon déroulement des algorithmes génétiques sera assuré. Plusieurs type de codages sont utilisés, on citera à titre d'exemple: codage réel, codage binaire, Gray.

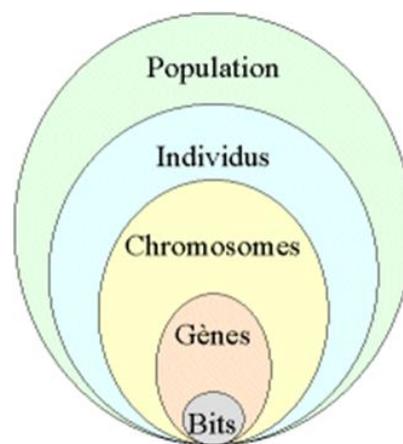


Figure 2.3 : Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement :

- **Le codage binaire:** c'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire $\{0, 1\}$ Un gène est alors représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

Ce cas peut être généralisé à tout alphabet allélique n -aire permettant un codage plus intuitif, par exemple pour le problème du voyageur de commerce on peut préférer utiliser l'alphabet allélique $\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ où c_i représente la ville de numéro i .

- **Le codage réel** : cela peut-être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle.

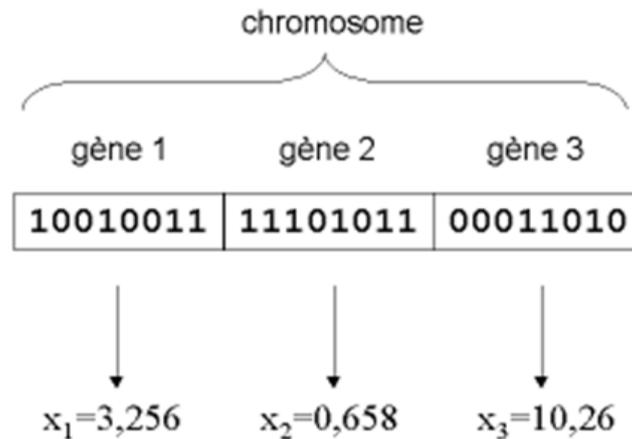


Figure 2.4 : Illustration schématique du codage des variables réelles.

- **Le codage de gray** : Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" entre les codages binaires de deux nombres réels proches, comme mesure de la dis-similarité entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. Et c'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites.

En effet, deux éléments voisins en termes de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : le codage de Gray est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément n et un élément $n+1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère [24].

2.5.2 Génération de la population initiale

Généralement, la population initiale est générée aléatoirement de manière à répartir les individus uniformément sur l'espace de recherche. Néanmoins, si on a une idée de la forme de la (des) solution (s), on peut biaiser cette initialisation en regroupant les individus autour de la région considérée, ce qui est susceptible d'accélérer la convergence de l'algorithme.

D'autre part, si les contraintes n'ont pu être correctement prises en charge par le codage des individus, il est parfois possible de générer une solution initiale qui les satisfait : domaine des gènes, vérification de contraintes élémentaires... Il faut alors veiller à concevoir

des opérateurs qui n'engendrent que des individus admissibles ou prendre en charge les contrevenants pendant l'évaluation.

2.5.3 La fonction d'évaluation

Elle prend en argument l'individu et lui associe un coût de performance. Cette fonction doit guider l'algorithme vers l'optimum en réalisant implicitement une pression des élections dans cette direction. De plus, l'efficacité d'un AG s'appuie pour une grande part, sur la qualité de cette fonction. La mise au point d'une bonne fonction d'adaptation doit respecter plusieurs critères qui se rapportent à sa complexité et à la satisfaction des contraintes du problème. Lorsque la fonction d'adaptation apparaît excessivement complexe, consommant une importante puissance de calcul, la recherche d'une approximation plus simple est souhaitable [25].

2.6 Opérateurs génétiques

Ces opérateurs sont la base des AGs, définissent la manière dont les individus se combinent et s'agencent pendant la phase de reproduction. Les opérateurs qu'on retrouve le plus souvent sont : sélection, croisement et mutation [25].

2.6.1 Opérateur de sélection

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement liée à son efficacité relative au sein de la population.

Une population dite intermédiaire est alors formée par les individus sélectionnés.

Il existe plusieurs méthodes de sélection [27, 28]. On trouve essentiellement quatre types de méthodes de sélection différentes :

- **La sélection par roulette**

La phase de sélection spécifie les individus de la population qui doivent survivre.

La méthode de base, appelée roue de loterie attribue à chaque individu une probabilité de survie proportionnelle à son adaptation dans la population. Lors de la phase de sélection, les individus sont sélectionnés aléatoirement en respectant les probabilités P_i associées pour former la population de la nouvelle génération.

Cette méthode consiste à dupliquer chaque individu de la population proportionnellement à son milieu. Ainsi, les individus ayant la plus grande valeur de fitness auront plus de chance

d'être choisis. Dans une population de N individus, la fonction de sélection est la suivante [28]:

$$P_s(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{j=1}^N F(x_j)} \quad (2.1)$$

En utilisant cette probabilité de reproduction, on peut créer une roue de loterie biaisée. Chaque individu de la population occupe une section de la roue proportionnellement à son adaptation et qui indique aléatoirement quel individu peut se reproduire. Cette méthode n'assure pas la sélection des meilleurs individus et peut être une cause de la convergence prématurée.

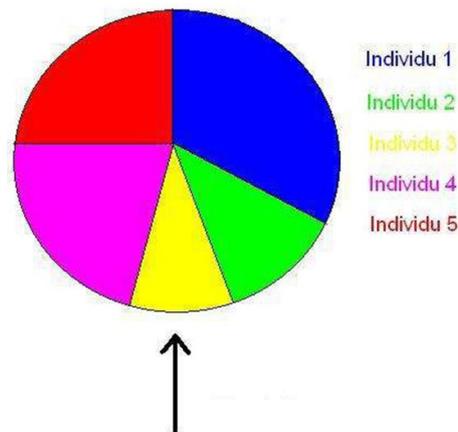


Figure 2.5 : La sélection par roulette.

▪ La méthode élitiste

Cette méthode consiste à sélectionner les n individus dont on a besoin pour la nouvelle génération P' en prenant les n meilleurs individus de la population P après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus.

Il est inutile de préciser que cette méthode est encore pire que celle de la loterie biaisée dans le sens où elle amènera à une convergence prématurée encore plus rapidement et surtout de manière encore plus sûre que la méthode de sélection de la loterie biaisée ; en effet, la pression de la sélection est trop forte, la variance nulle et la diversité inexistante, du moins le peu de diversité qu'il pourrait y avoir ne résultera pas de la sélection mais plutôt du croisement et des mutations.

Là aussi il faut opter pour une autre méthode de sélection.

▪ Sélection par 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 [29].

▪ La sélection stochastique

Contrairement aux méthodes déterministes, les méthodes stochastiques associent aux individus une probabilité de sélection, généralement fonction croissante de leur fonction d'adaptation [28].

2.6.2 Opérateur de croisement

Le croisement est l'opérateur principal des algorithmes génétiques (AGs). Son rôle consiste à choisir aléatoirement deux individus parents parmi ceux sélectionnés pour les combiner et créer deux nouveaux individus enfants. Il joue un rôle important sur la convergence de l'AG, en lui permettant de concentrer une partie de la population autour des meilleurs individus. À chaque type de codage correspondent différents types de croisement.

Pour les AGs avec un codage binaire, on utilise le croisement à un point (chaque bit caractérisant le nouvel individu est celui de l'un de ses « parents » choisi aléatoirement), à multipoints et le croisement uniforme. Selon Deb [30], les AGs avec un codage réel peuvent utiliser la méthode de croisement linéaire (la valeur de l'individu enfant est une combinaison linéaire de celle de ses parents), naïf, mélangé ou encore binaire simulé.

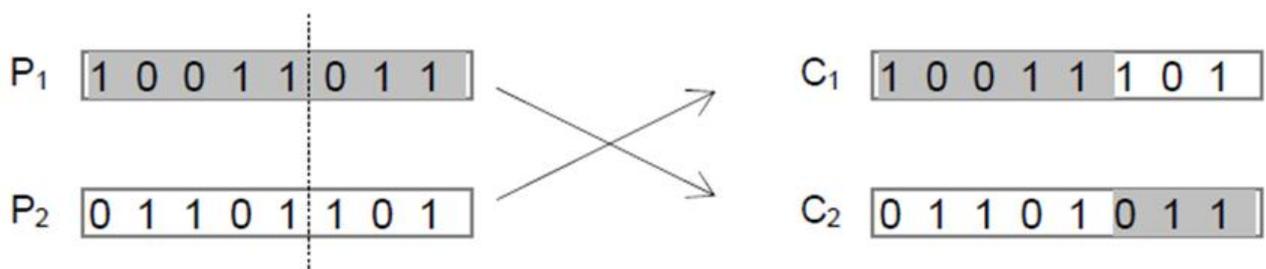


Figure 2.6 : Croisement en 1 point.

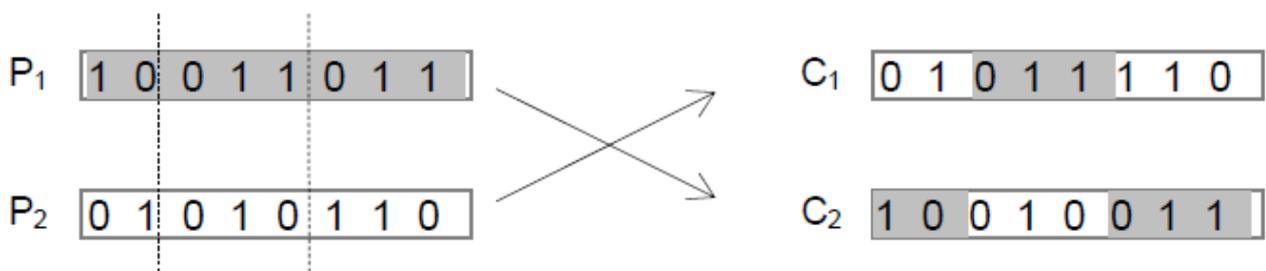


Figure 2.7 : Croisement en 2 points.

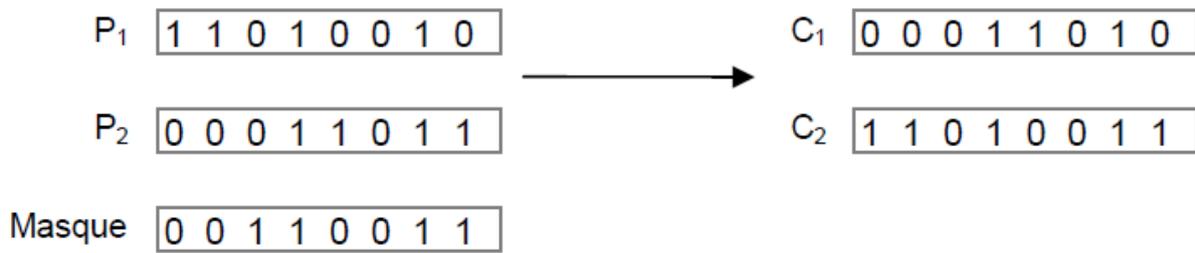


Figure 2.8 : Croisement uniforme.

2.6.3 Opérateur de mutation

Les AGs utilisent l'opérateur de mutation pour conserver la diversité de la population et évite en particulier à l'AG de converger vers un optimum local [31]. Pour les AGs avec un codage binaire, elle consiste à changer la valeur d'un ou plusieurs bits de l'individu de la population parent d'une valeur 1 à la valeur 0, ou réciproquement, avec une probabilité de mutation P_m fixée. Concernant les AGs avec un codage réel, il existe différentes méthodes de mutation telles que la mutation aléatoire, la mutation non uniforme, la mutation distribuée normalement et la mutation polynomiale [30].

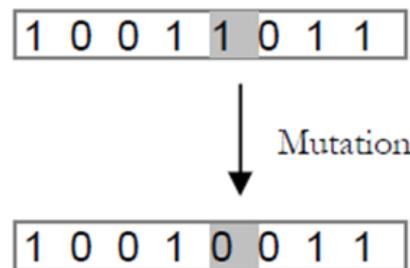


Figure 2.9 : Représentation schématique d'une mutation.

2.6.4 Opérateur de remplacement

Cet opérateur est le plus simple, son travail consiste à réintroduire les descendants obtenus par application successive des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation (la population P') dans la population de leurs parents (la population P).

Ce faisant il vont remplacer une certaine proportion de ceux-ci, proportion pouvant bien sûr être choisie. Le rapport entre le nombre d'individus nouveaux allant être introduits dans la population P et le nombre d'individus de cette population est connu sous le nom de génération gap. On trouve essentiellement 2 méthodes de remplacement différentes :

- **Le remplacement stationnaire:** dans ce cas, les enfants remplacent automatiquement les parents sans tenir compte de leurs performances respectives, et le nombre d'individus de la population ne varie pas tout au long du cycle d'évolution simulé, ce qui implique

donc d'initialiser la population initiale avec un nombre suffisant d'individus. Cette méthode peut être mise en œuvre de 2 façons différentes :

- La première se contente de remplacer la totalité de la population P par la population P' , cette méthode est connue sous le nom de remplacement générationnel et on a donc une génération gap qui vaut 1.
- La deuxième méthode consiste à choisir une certaine proportion d'individus de P' qui remplaceront leurs parents dans P (proportion égale à 100 % dans le cas du remplacement générationnel).

Ce type de remplacement engendre une population ayant une grande variation et de se fait favorise la dérive génétique qui se manifeste d'autant plus que la population est de petite taille. De plus dans bien des cas, étant donné que même un enfant ayant une faible performance remplace forcément un parent, on n'atteint pas la meilleure solution mais on s'en approche seulement.

▪ **Le remplacement élitiste:** L'opérateur d'élitisme [30] permet de conserver les tout meilleurs individus de la population courante. Il est essentiel pour l'optimisation multi-objective. L'élitisme peut être utilisé de manière locale, lorsque deux enfants viennent d'être créés : ils sont comparés à leurs parents. Parmi les quatre individus parents et enfants, seuls les deux meilleurs sont conservés ; les parents sont en concurrence directe avec leurs enfants. Il peut également être utilisé d'une manière globale : une fois la population enfant créée, elle est combinée avec la population parent, et seuls les meilleurs individus sont retenus pour former la nouvelle population. Ainsi, une bonne solution trouvée très tôt dans l'optimisation n'est pas perdue même si une autre meilleure solution est trouvée. Donc l'élitisme accroît la probabilité de créer des meilleurs enfants et d'assurer une convergence rapide vers la solution optimale.

2.7 Critères de convergence

Afin de mettre fin à l'algorithme génétique, trois critères de convergence ont été utilisés dans notre travail, si l'un de ces critères est atteint, le processus d'optimisation se termine en convergeant à la solution optimale. Les critères sont :

1. Quand l'erreur normalisée du meilleur chromosome (la fonction fitness) tend à la plus petite valeur (l'erreur de tolérance fixée) c.-à-d. : lorsqu'une solution optimale S_m est

connue pour un problème donné, on peut aussi arrêter l'algorithme après l'atteinte d'un optimum pratique à cette solution.

$$\left| \frac{S_c - S_m}{S_c} \right| \times 100 < \varepsilon \quad (2.2)$$

Où : S_c est la solution à comparer, S_m est la meilleure solution (solution optimale).

2. Si le meilleur individu de la population reste inchangé pendant un nombre donné t_n dégénération, on considère que l'algorithme a convergé et que cette meilleure solution est l'optimum de cette recherche. Ce critère vérifie la création de nouvelles solutions plus performantes parmi la population.
3. Si le nombre d'itérations atteint le nombre de génération N_{GEN} fixé.

L'algorithme ci-dessous explique le critère de convergence

1. S_c est la solution à comparer ;
A est l'ensemble des solutions qui ont la meilleure fitness ;
 $j = 1$;
2. REPETER
 - (a) comparer S_c avec A (j) par le calcul de $e(j)$;
 - (b) Si ($e(j)$ est minimum) Alors
 $S_m = A(j)$
 - (c) $j = j + 1$;
3. jusqu'à [(e atteint) ou (t_n atteint) ou ($j > N_{GEN}$)]
4. $S_m = A(j)$;

2.8 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

2.8.1 Avantages des AGs

- Les AGs opèrent au niveau du codage des paramètres sans se soucier de leur nature, donc ils s'appliquent à de nombreuses classes de problèmes, qui dépendent éventuellement de plusieurs paramètres de natures différentes (booléens, entiers, réels, fonctions...).
- Pour les mêmes raisons un AG est dans l'idéal totalement indépendant de la nature du problème et de la fonctionnelle à optimiser, car il ne se sert que des valeurs d'adaptation, qui peuvent être très différentes des valeurs de la fonction à optimiser, même si elles sont calculées à partir de cette dernière.
- Potentiellement les AGs explorent tous l'espace des points en même temps, ce qui limite les risques de tomber dans des optimums locaux.
- Les AGs ne se servent que des valeurs de la fonctionnelle pour optimiser cette dernière, il n'y a pas besoin d'effectuer de coûteux et parfois très complexes calculs.

- Les AGs présentent une grande robustesse c'est-à-dire une grande capacité à trouver les optimums globaux des problèmes d'optimisation.

2.8.2 Inconvénients des AGs

- Les AGs ne sont encore actuellement pas très efficaces en coût (ou vitesse de convergence), vis-à-vis de méthodes d'optimisation plus classiques.
- Parfois les AGs convergent très vite vers un individu particulier de la population dont la valeur d'adaptation est très élevée.
- Le respect de la contrainte de domaine par la solution codée sous forme de chaîne de bits pose parfois problème. Il faut bien choisir le codage, voir modifier les opérateurs.
- En pratique l'efficacité d'un AG dépend souvent de la nature du problème d'optimisation. Selon les cas de choix des opérateurs et des paramètres seront souvent critiques, mais aucune théorie générale ne permet de connaître avec certitude la bonne paramétrisation, il faudra faire plusieurs expériences pour s'en approcher.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé et nous avons décrit la nature des algorithmes évolutionnaires et Algorithmes génétiques AGs. Nous avons ensuite présenté le principe de fonctionnement des AGs et leurs caractéristiques principales, puis nous avons abordé les opérateurs génétiques, enfin nous avons présenté les Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.

Au cours de ce chapitre, un algorithme d'optimisation basé sur les principes des algorithmes génétiques a été présenté. Cet algorithme sera appliqué dans le chapitre 4 pour la résolution d'un problème d'identification des paramètres relié au modèle analytique à simple diode d'un module photovoltaïque.

Chapitre III

EFFET DES PARAMÈTRES

ÉLECTRIQUES SUR LA CELLULE

PHOTOVOLTAÏQUE

3.1 Introduction

Dans ce troisième chapitre nous présentons le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque dans les deux cas idéale et réelle, nous avons ensuite décrit les différents paramètres électriques d'une cellule solaire, puis nous avons abordé l'effet des paramètres électriques sur le comportement électrique de la cellule solaire.

3.2 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

3.2.1 Cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (3.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [1].

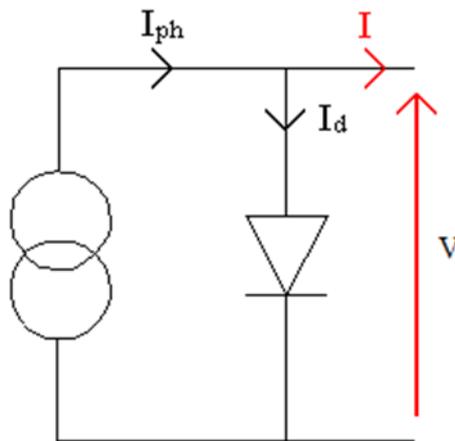


Figure 3.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

$$I_{idéal} = I_{ph} - I_D \quad (3.1)$$

Où: I_{ph} est le courant photo-généré et I_D est le courant traversant la diode.

$$I_{idéal} = I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{q \cdot V_{idéal}}{nK \cdot T}} - 1 \right] \quad (3.2)$$

Où: R_s est la résistance série (Ω), R_{sh} résistance shunt (Ω), K est la constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), q est la charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), T est la température de la cellule ($^{\circ}\text{K}$), I_0 est le courant de saturation de la diode, n est le facteur d'idéalité de la diode et V est la tension de sortie.

3.2.2 Cellule solaire réelle

La figure (3.2) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduits dans ce schéma, elles vont influencer la caractéristique I.V de la cellule. La première est la résistance série, R_s , cette résistance est liée à l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt, R_{sh} qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge.

L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances R_s et R_{sh} s'écrit donc [32] :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.3)$$

$$I = \underbrace{I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right]}_{I_{idéal}} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

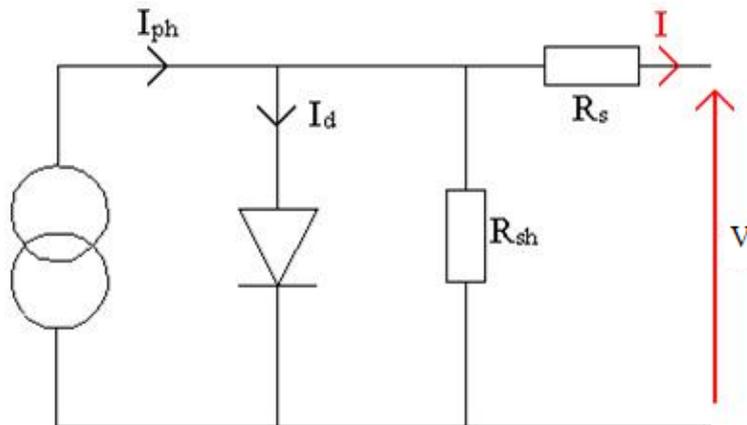


Figure 3.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

3.3 Les différents paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

3.3.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs et est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [33].

3.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{co})

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de Résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [34].

$$V_{co} = \frac{K.T}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (3.5)$$

3.3.3 Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I-V$ Pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV: c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{oc}$.

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable sera également élevée. Les meilleures cellules ont un facteur de forme FF supérieur à 0.7 donc la cellule solaire fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible des caractéristiques idéales [35]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (3.6)$$

3.3.4 Rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance incident [14].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (3.7)$$

Où : P_{in} est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol. P_{max} dans cette formule correspondante au maximum de la puissance dans la diode solaire. Il faut noter qu'un bon rendement de la cellule solaire est assuré avec un band gap (E_g) qui varie entre 0.8 et 1.4eV [36, 37].

3.3.5 Point de puissance maximale P_m

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P = V \cdot I$, pour que P

soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_{max} [38].

3.4 Effet des paramètres électriques de la cellule

Avant d'établir le modèle de cellule solaire à simple diode donné par l'équation. (2), il est important de connaître l'effet des quatre paramètres R_s , R_{sh} , n , et I_0 sur la caractéristique de la cellule solaire qui seront extraites en utilisant les algorithmes génétiques.

Il est à noter que les courbes $I-V$ et $P-V$ de cette section représentent les caractéristiques d'un module photovoltaïque de 54 cellules montées en série. Ces courbes sont tracées en utilisant l'expression implicite du modèle à simple diode (Eq; 3.4) implémentée dans MATLAB 7.2 où les résultats de la simulation sont obtenus dans des conditions standards ($T = 300^{\circ}K$ et $E = 1000W/m^2$)

3.4.1 Effet de la résistance série

La résistance série est la résistance interne de la cellule. Elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [39].

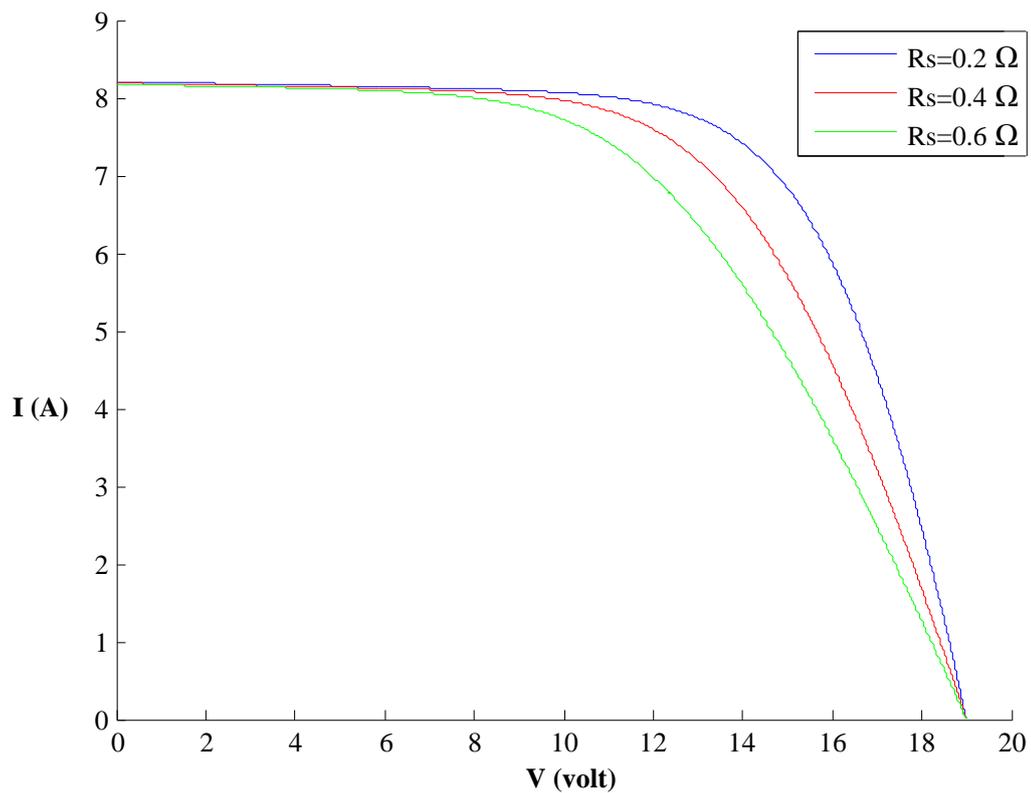
Le tableau (3.1) montre la variations des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF) en fonction de la de résistance série R_s (0.2 Ω , 0.4 Ω , 0.6 Ω) ou les autre paramètres (R_{sh} , I_0 , n), sont fixés

Tableau 3.1: es paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de résistance série R_s

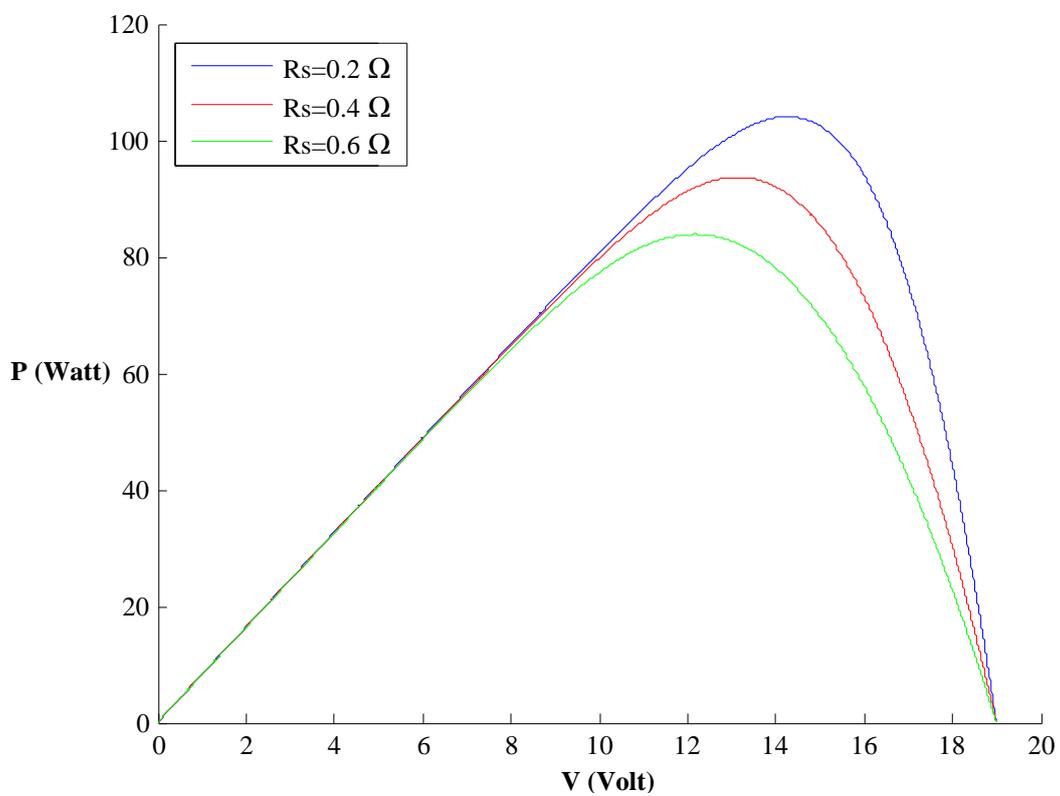
Paramètres	Valeur		
$R_s(\Omega)$	0.20	0.4	0.6
$I_{cc}(A)$	8.20	8.19	8.17
$V_{co}(volt)$	18.99	18.99	18.99
$P_{max}(wat)$	104	93.67	83.86
FF%	66.76	60.22	54.02

Selon le tableau ci-dessus, on remarque que l'augmentation de la résistance série à un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement P_{max} et le facteur de forme FF. Cependant, la tension du circuit ouvert (V_{co}) reste stable avec une légère diminution du courant du court-circuit (I_{cc}).

La figure (3.3) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$



(a)



(b)

Figure 3.3 : L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique ; (a) $I(V)$ et (b) $P(V)$.

Comme le montre la figure (3.3), on observe que la tension de circuit ouvert (V_{co}) ne change pas de valeur ($V_{co} = 18.99 V$) lorsque on augmente la valeur de la résistance série R_s . Cependant les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ se déforment très rapidement sous une légère variation de R_s de l'ordre de $m\Omega$. Cette influence se traduit par une diminution de la pente des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension et une diminution de la tension V_{mp} correspondante au point de fonctionnement (puissance maximale) P_{max} lorsque R_s augmente.

3.4.2 Effet de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du Courant qui intervient entre les bornes opposées d'une photopile [40].

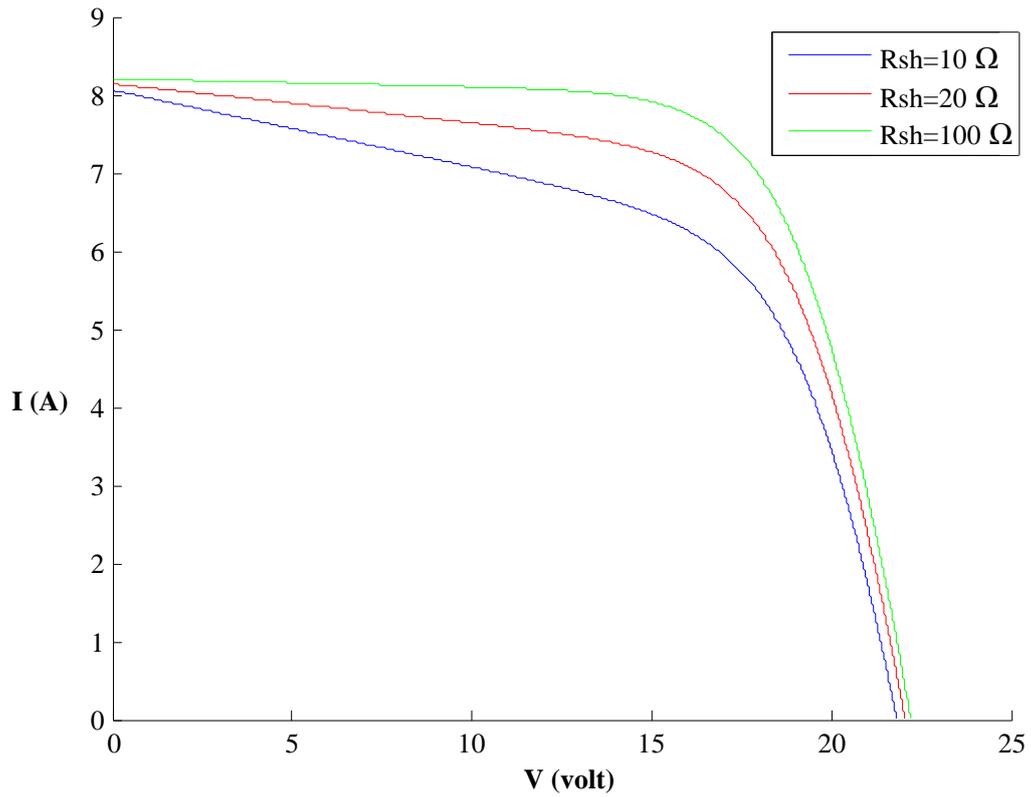
Le tableau (3.2) montre la variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour des différentes valeurs de la résistance shunt R_{sh} (10 Ω , 20 Ω et 100 Ω) ou les autres paramètres (R_s , I_0 et n), sont fixés.

Tableau 3.2: les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de résistance shunt R_s

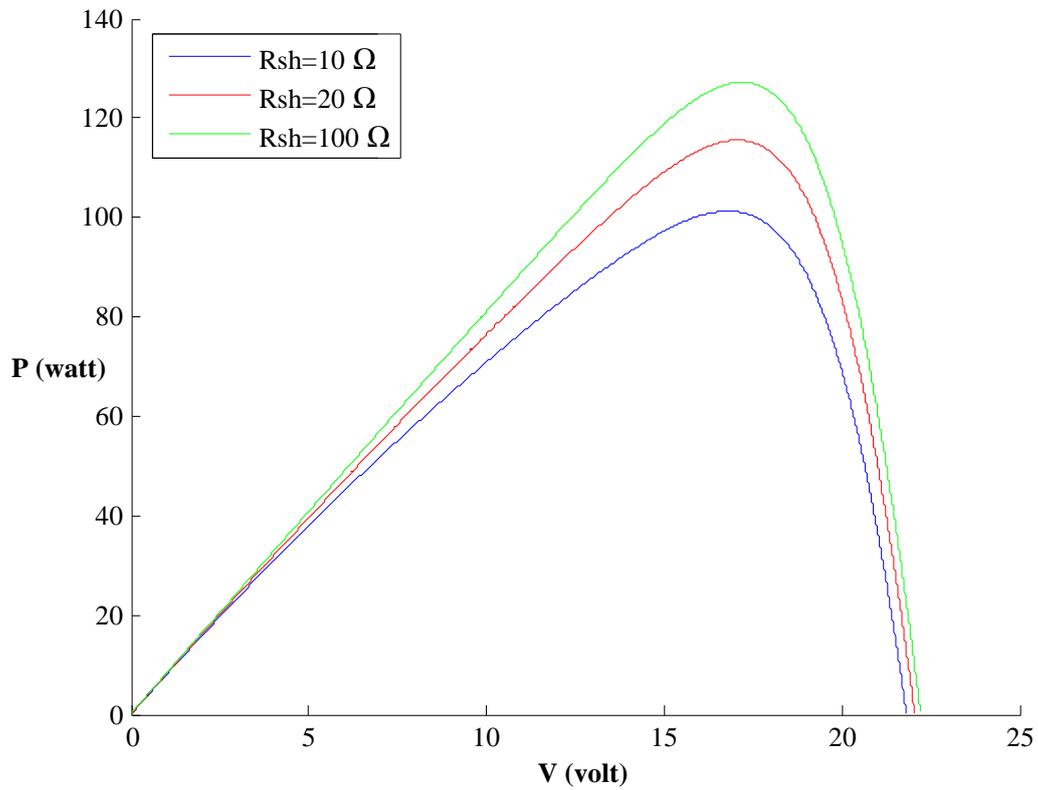
Paramètres	Valeur		
$R_s(\Omega)$	10	20	100
$I_{cc}(A)$	8.06	8.14	8.20
$V_{co}(volt)$	21.81	22.04	22.2
$P_{max}(watt)$	101.2	115.5	127.2
FF%	57.59	64.39	69.83

D'après le tableau 3.2, on constate que lorsque on augmente la résistance shunt R_{sh} à le point de fonctionnement P_{max} et le facteur de forme FF augmentent d'une façon considérable. Cependant, la tension du circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) augmentent d'une façon légère.

La figure (3.4) suivante montre l'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$.



(a)



(b)

Figure 3.4 : L'effet de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique ; (a) $I(V)$ et (b) $P(V)$.

Les résultats obtenus (figure 3.5) montre une légère augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) due à l'augmentation de R_{sh} . L'influence de R_{sh} est évident sur le comportement des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ qui se déforment rapidement, cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique $I(V)$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement d'une source de courant (basse tension). En outre, on remarque que lorsque R_s augmente, la tension V_{mp} correspondante au point de fonctionnement légèrement augmente avec une augmentation importante de la puissance maximale P_{max} (figure 3.4b)

3.4.3 Effet de courant de saturation de la diode

Le courant de saturation de la diode interne d'une cellule solaire peut être assez bien estimé à l'aide de la formule (3.8). En effet, lorsque la cellule solaire est en circuit ouvert, le courant s'annule. Tout le courant fournit par le générateur de courant est compensé par la diode interne. On peut donc écrire, après simplification [41]:

$$I_{cc} = I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{co}}{n \cdot V_T}\right) \quad (3.8)$$

On en déduit l'expression du courant de saturation : $I_0 = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{V_{co}}{n \cdot V_T}\right)}$

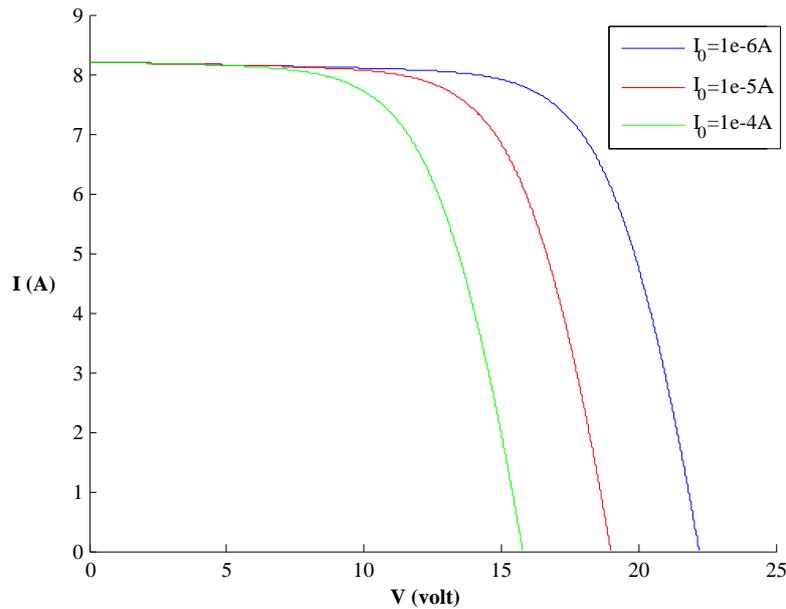
Le tableau (3.2) représente la variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour des différentes valeurs du courant de saturation (I_0) de la diode (10^{-6} A, 10^{-5} A et 10^{-1} A). Ou les autres paramètres (R_s , R_{sh} et n), sont fixés

Tableau 3.3: les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de courant de saturation I_0 .

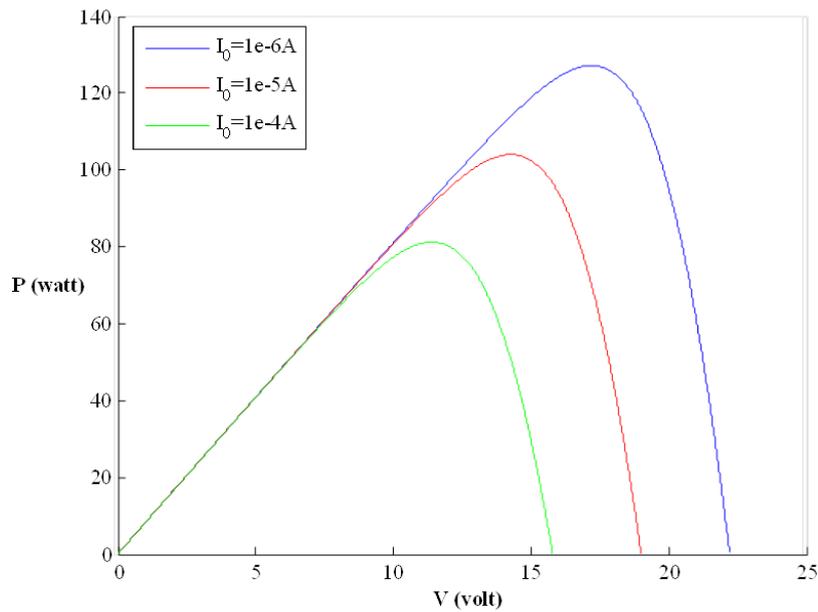
Paramètres	Valeur		
I_0 (A)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
I_{cc} (A)	8.20	8.20	8.20
V_{co} (volt)	22.2	18.99	15.78
P_{max} (watt)	127.2	104	81.23
FF%	69.83	66.76	62.73

Dans le tableau 3.3, on constate que pour des valeurs fixes de R_s , R_{sh} et n , on peut obtenir un point de fonctionnement P_{max} maximal et un facteur de forme FF maximal par la diminution du courant de saturation (I_0). Cette diminution n'a aucune influence sur le courant du court-circuit (I_{cc}), mais elle provoque une diminution de la tension du circuit ouvert (V_{co})

La figure (3.5) illustre l'impact du courant de saturation (I_0) de la diode sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$. On constate que l'augmentation du courant de saturation (I_0) de la diode provoque une forte réduction de la tension de circuit ouvert (V_{co}) par contre le courant de court-circuit (I_{cc}) reste constant ($I_{cc} = 8.20 A$). En outre, cette augmentation, provoque une diminution de la tension V_{mp} correspondante au point de fonctionnement et par conséquent une diminution importante de la puissance maximale P_{max} et le facteur de forme FF (figure 3.5b).



(a)



(b)

Figure 3.7: L'influence de courant de saturation (I_0) de la diode sur la caractéristique ; (a) $I(V)$ et (b) $P(V)$.

3.4.4 Effet de Facteur d'idéalité

Le facteur d'idéalité est égal à 1 pour une diode idéale, mais peut monter jusqu'à 2, lors de la prise en compte du courant de génération – recombinaison. L'expression de n est obtenue en dérivant le logarithme népérien de I par rapport à V [41]

$$n = \frac{1}{v_T} \cdot \frac{dv}{d \ln(I)} \quad (3.9)$$

On relèvera des écarts de tension et de courant dans la partie proche de V_{co} qui est une droite, après avoir converti l'échelle de courant en logarithme.

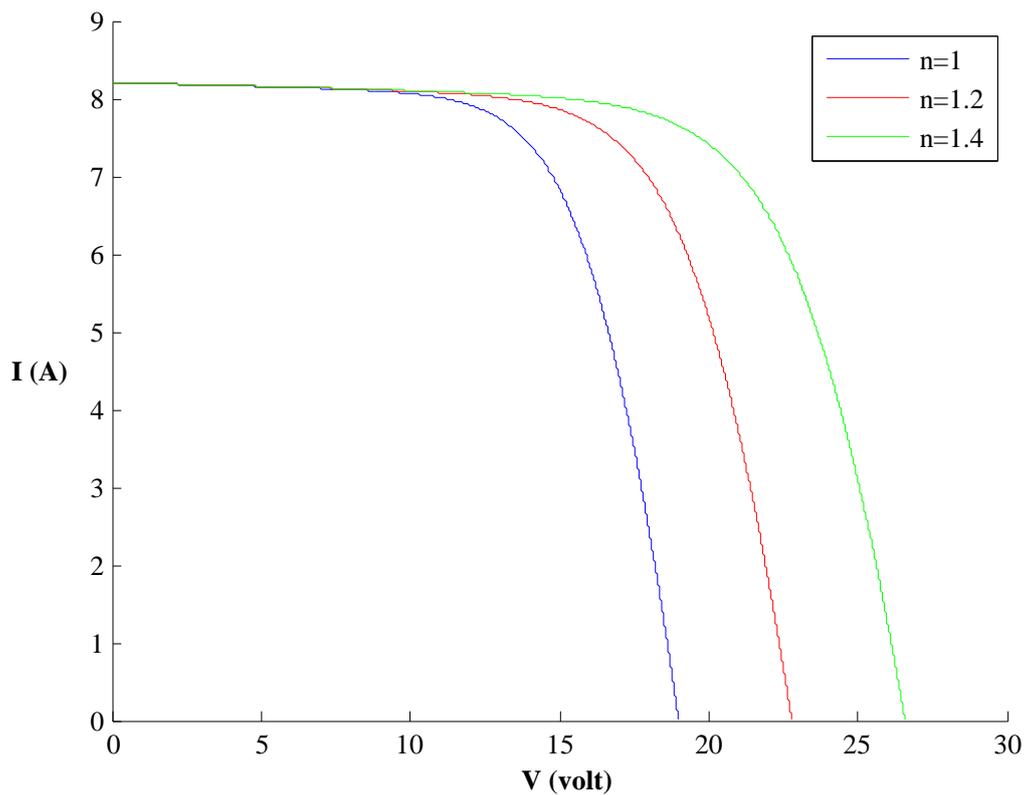
Le tableau (3.2) représente la variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour des différentes valeurs du facteur d'idéalité (n) de la diode entre 1 et 2 (1, 1.2 et 1.4). Ou les autres paramètres (R_s , R_{sh} et I_0), sont fixés

Tableau 3.4 : les paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} et FF) pour chaque valeur de facteur d'idéalité.

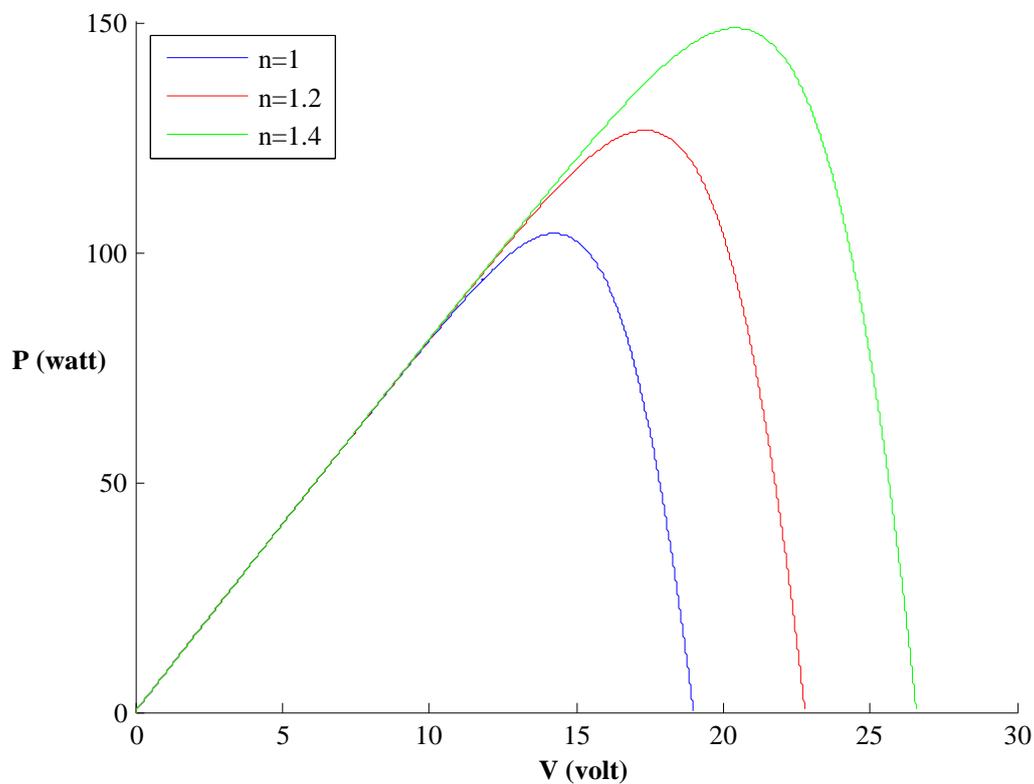
Paramètres	Valeur		
n	1	1.2	1.4
I_{cc} (A)	8.20	8.20	8.20
V_{co} (volt)	18.99	22.78	26.57
P_{max} (watt)	104	126.4	148.7
FF%	66.76	67.66	68.22

D'après le tableau 3.4, on remarque que le facteur d'idéalité n influe contrairement à l'influence du courant de saturation c.-à-d. l'augmentation de n permet d'obtenir une cellule à un point de fonctionnement P_{max} maximal et un facteur de forme FF maximal. Cette augmentation n'a aucune influence sur le courant du court-circuit (I_{cc}), mais elle provoque une forte augmentation de la tension du circuit ouvert (V_{co})

La figure (3.9) suivante montre l'influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$.



(a)



(b)

Figure 3.9 : L'influence de facteur d'idéalité n sur la caractéristique ; (a) $I(V)$ et (b) $P(V)$.

On constate que l'augmentation du facteur de forme (I_o) de la diode provoque une forte augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) par contre le courant de court-circuit (I_{cc}) reste constant ($I_{cc} = 8.20 A$). D'autre part, cette augmentation, provoque une augmentation de la tension V_{mp} correspondante au point de fonctionnement, de même on observe une augmentation importante de la puissance maximale P_{max} et le facteur de forme FF (figure 3 .5b).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a représenté le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque et leurs paramètres électriques. Ce modèle à une exponentielle est le modèle le plus adapté pour une bonne compréhension des phénomènes physiques intervenant dans chaque région de la cellule (émetteur, base et région de charge d'espace) et décrit le comportement électrique de la caractéristique $I(V)$ En se basant sur ce modèle, on a montré impact des paramètres électriques (R_s , R_{sh} , I_0 et n) sur les caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule, ainsi le facteur de forme et le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Chapitre IV

EXTRACTION DES

PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES

CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation de la technique d'optimisation utilisée qui se base sur les principes des algorithmes génétiques tels qu'ils ont été décrits au chapitre 2. Ce chapitre est organisé comme suit : d'abord, la définition de la caractéristique expérimentale du panneau photovoltaïque sera présentée. Ensuite, une expérience d'identification des paramètres électriques du module photovoltaïque sera présentée et discutée. Elle correspond à l'ajustement de chaque courbe synthétique de la caractéristique I-V pour différentes températures et différents éclairages. Cette expérience démontre évidemment l'efficacité et la précision de notre approche proposée (GAs) et valide les paramètres obtenus employés dans le modèle électrique à simple diode. Le but de ce chapitre est de valider les résultats obtenus par notre approche d'optimisation évolutionnaire développée (AGs) en calculant l'erreur relative aux résultats expérimentaux.

4.2 Détermination expérimentale de la caractéristique $I(V)$

La base de données expérimentales utilisée dans notre travail est obtenue par un module photovoltaïque de type *ISOFTON 106W* composé de 36 cellules solaires monocristallines montées en série qui sont considérées de même type.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque de type ISOFTON 106W.

Paramètres	Valeur
Puissance maximale P_{mpp}	100 W
Tension de crête maximale I_{mpp}	6.10
Tension de crête maximale V_{mpp}	17.4 V
Tension à circuit ouvert V_{oc}	21.6 V
Courant de court-circuit I_{sc}	6.54 A
Rendement	12.4%
Facteur de forme	75.0%
Nombre de cellules en série n_s	36 Monocristalline

La figure 4.1 illustre le montage électrique utilisé pour tracer la caractéristique $I(V)$. Les points courant-tension de la caractéristique $I(V)$ sont obtenus par la variation de la résistance

variable R qui représente la charge ou le point du circuit ouvert ($I = 0$) est déterminé pour $R = +\infty$ et le point du court-circuit ($V = 0$) est déterminé pour $R = 0$.

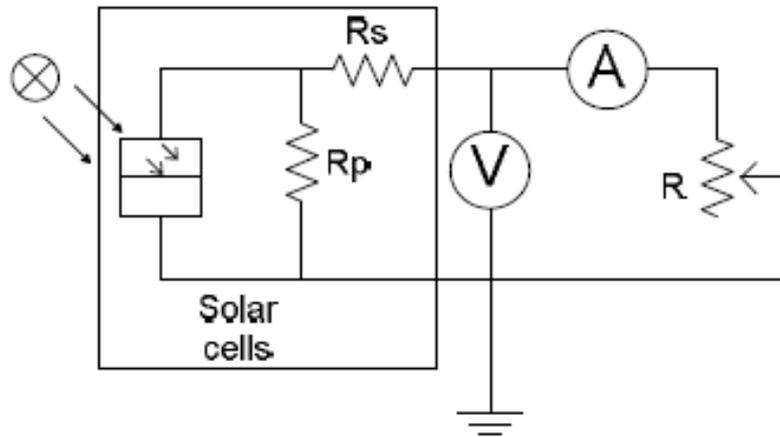


Figure 4.1 : Montage électrique pour relever la caractéristique $I(V)$.

La base donnée expérimentale des caractéristiques $I(V)$ est obtenue pour différentes valeurs de température et d'éclairement. Cette dernière sera exploitée pour extraire les paramètres électriques du module (R_s , R_{sh} , I_o et n) en utilisant les algorithmes génétiques.

4.3 Identification des paramètres électriques en utilisant les algorithmes génétiques.

4.3.1 Méthodologie de calcul

Les stratégies conventionnelles d'extraction de paramètres, telles que les méthodes de gradient ou les méthodes directes comme la méthode de « région de confiance » [42] « quatre points » [43] et « région de confiance » fournissent une succession des optimums locaux. Ailleurs, la méthode d'extraction de paramètres par les AGs fournit des solutions optimales globales de la caractéristique $I-V$ du module photovoltaïque étudié. Actuellement, il existe beaucoup de modèles électriques des modules photovoltaïques (simple diode, double diode, ect...). Dans notre travail on a choisi le modèle à simple diode pratiquement défini par cinq paramètres R_s , R_{sh} , I_o , n et I_{ph} à cause de sa simplicité et qu'il utilise peu de paramètres. Dans ce chapitre on a considéré que le photo courant I_{ph} égale le courant de court-circuit I_{cc} (voir par exemple [44]). Par conséquent le nombre de paramètres électriques (qui seront ajustés par les AGs) est réduit à quatre paramètres R_s , R_{sh} , I_o et n .

Dans cette application, on présente l'applicabilité des algorithmes génétiques pour l'extraction des paramètres de cellule photovoltaïque, par l'utilisation de modèle électrique à une diode

L'organigramme de l'approche évolutionnaire proposé pour trouver les courbes optimales et ajustées à celles obtenues par expérience est présenté par la figure 4.2. Le procédé d'optimisation arrête le calcul évolutionnaire lorsque le critère d'arrêt soit satisfait.

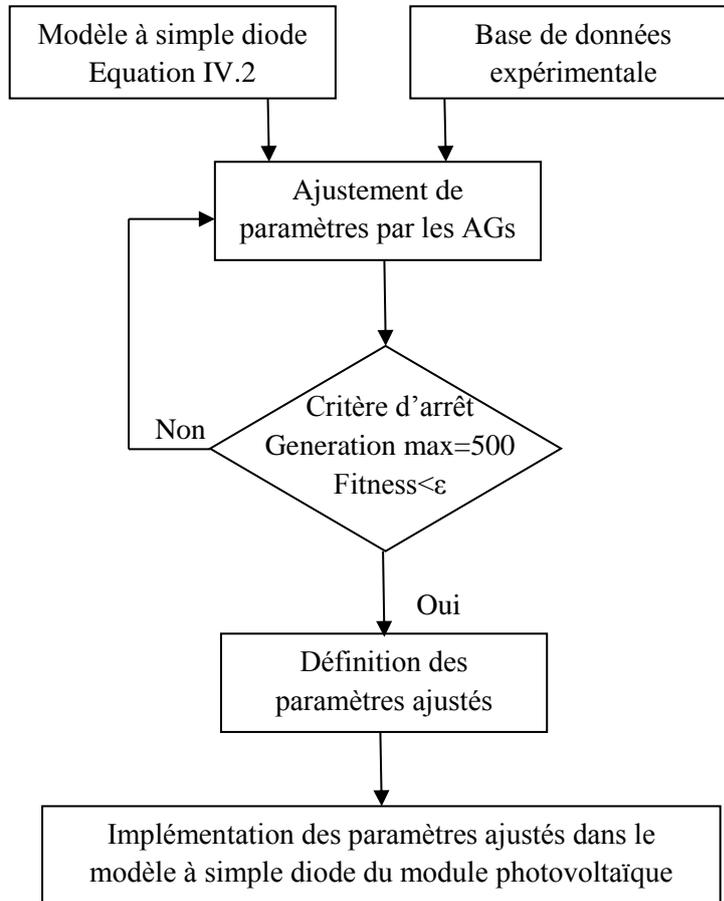


Figure 4.2 : Organigramme de l'approche évolutionnaire proposée pour la détermination des paramètres électriques du module photovoltaïque.

4.3.2 Définition des paramètres électriques

Dans cette application, les paramètres du modèle à une diode (4 paramètres) sont regroupés dans un vecteur appelé chromosome, ces paramètres sont optimisés par la minimisation de la fonction fitness en terme de qualité d'adaptation pour des données expérimentales exploitées.

Selon la caractéristique expérimentale $I-V$ du module photovoltaïque, il est important de trouver la meilleure configuration des paramètres pour ajuster les résultats simulés (expression implicite) en se basant sur les résultats expérimentaux. Les paramètres à ajuster peuvent être définis en tenant en compte la minimisation de l'erreur associée à l'optimisation.

Dans la simulation des modules photovoltaïques, la relation entre le vecteur d'entrée (la tension V et le chromosome C) et la fonction implicite à ajustée le courant (I) est donnée par l'expression:

$$I = h(V, C) \quad (4.1)$$

Où : C est le vecteur de paramètres de construction pour le modèle à simple diode du module photovoltaïque qui sera optimisé en utilisant les AGs. Le nouveau modèle à simple diode qui sera ajusté par les AGs peut être défini comme:

$$I_{GA} = I_{ph} - I_{0_GA} \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V + R_{s_GA} \cdot I)}{n_{GA} \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + R_{s_GA} \cdot I}{R_{sh_GA}} \quad (4.2)$$

Les coefficients R_{s_GA} , R_{sh_GA} , I_{0_GA} et n_{GA} représentent les paramètres d'ajustement (les éléments du vecteur C) qui vont être optimisés par les AGs afin d'identifier les paramètres électriques du modèle à simple diode ajusté du module photovoltaïque.

4.3.3 Procédé d'évaluation (fonction de fitness)

La fonction fitness f utilisée pour l'évaluation des chromosomes et l'ajustement des paramètres est définie par:

$$f = \frac{1}{M} \sum_V \left[\frac{I_{mes} - I_{GA}}{I_{mes}} \right]^2 \quad (4.3)$$

Où M représente la taille de la base de données expérimentale ' mes ' et ' GA ' indiquent les données expérimentales et les données calculées par la technique des AGs respectivement.

La différence entre les données expérimentales et les données calculées par la technique des AGs s'appelle l'erreur normalisée (l'erreur moyenne quadratique RMS), cette dernière est employée pour évaluer la déformation des courbes I - V calculées par rapport à celles mesurées. Notre problème d'ajustement de paramètres comprend m points de la caractéristique I - V , chacun représente le courant fournit par le module photovoltaïque pour une tension V appliquée.

Notre objectif est de minimiser la fonction fitness (minimisation de RMS) afin d'obtenir la meilleure solution (meilleur chromosome) dans la population pour assurer l'exactitude et la précision de notre modèle à simple diode qui est défini par les paramètres extraits en utilisant les AGs. .

4.4 Résultats et discussion

4.4.1 Implémentation des paramètres de la technique (AG)

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

- Le tournoi: est la méthode utilisée pour la sélection, cette méthode sélectionne chaque parent par le choix aléatoire des individus puis elle choisit le meilleur individu pour être individu parent.
- Le croisement dispersé 'Scattered crossover': il crée un vecteur binaire aléatoirement, puis il sélectionne les gènes suivant le vecteur créé où le '1' sélectionne le gène du premier parent et le '0' sélectionne le gène du deuxième parent, la combinaison des gènes sélectionnés a le rôle de produire l'enfant de la prochaine génération.
- La mutation uniforme : est un processus en deux étapes. D'abord, l'algorithme choisit une fraction du vecteur d'entrées de l'individu pour la mutation, où chaque entrée a une probabilité de d'être mutée (taux de mutation). Dans la deuxième étape, l'algorithme remplace chaque entrée choisie par un nombre aléatoire choisi uniformément à partir du vecteur d'entrées.

Notre processus d'optimisation est assuré par une population de 20 individus pour chaque génération et 100 générations. Les paramètres utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau 4.2.

Pour cette configuration, la fonction fitness était de Fitness de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} et presque 100% des cas soumis ont été étudiés correctement. Ce résultat est obtenu après 50 évaluations des paramètres dans à peu près 5 minutes en utilisant Windows 7 avec un intel core i3 (2.20Ghz) avec une RAM (4GB).

Tableau 4.2 : Paramètres de GA utilisés dans cette application.

Paramètres d'AG	Valeurs
La taille de la population	20
Le nombre Maximum de générations	100
Type de la fonction fitness	Proportionnel
La sélection	Tournoi
Le croisement	Dispersé
La mutation	Uniform
Taux de mutation	0.5
Taux de reproduction 0.1	0.1

4.3.2 Extraction mono objectif des paramètres électriques

Dans cette partie, on va optimiser les quatre paramètres du modèle à simple diode ajusté (Eq 4.2) pour une chaque caractéristique à une température T et un éclairement E donné.

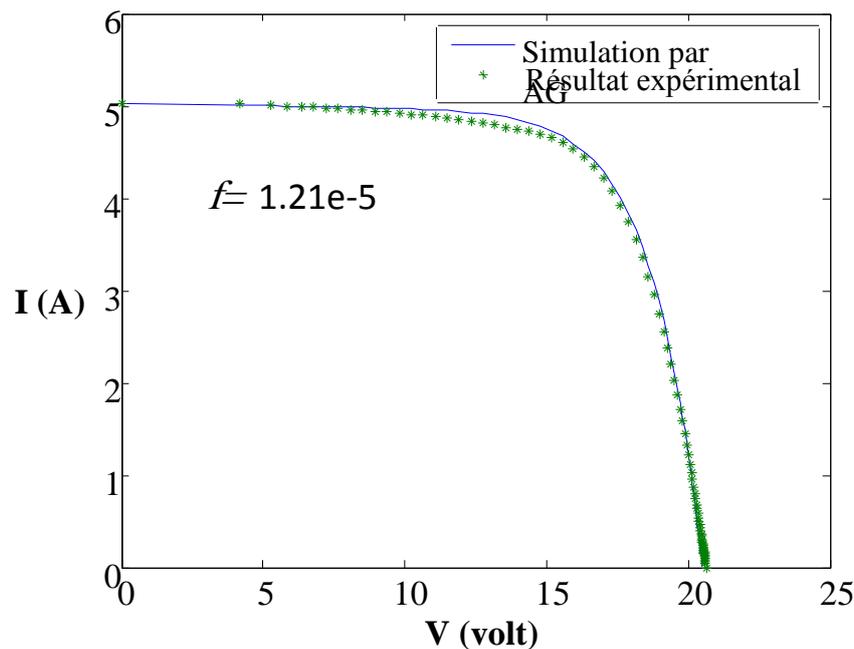
Les tableaux (4.3) montre les paramètres électriques (R_s , R_{sh} , I_0 et n) extraits du module photovoltaïque pour les conditions de l'éclairement et température données (a) : $T = 298.4^\circ K$ et $E = 762 W/m^2$, (b): $T = 299.1^\circ K$ et $E = 778 W/m^2$, (c): $T = 301.1^\circ K$ et $E = 749 W/m^2$, (d): $T = 300.2^\circ K$ et $E = 753 W/m^2$ respectivement.

Tableau 4.3 : Les paramètres extraits de la cellule en utilisant les algorithmes génétiques pour les quatre modèles.

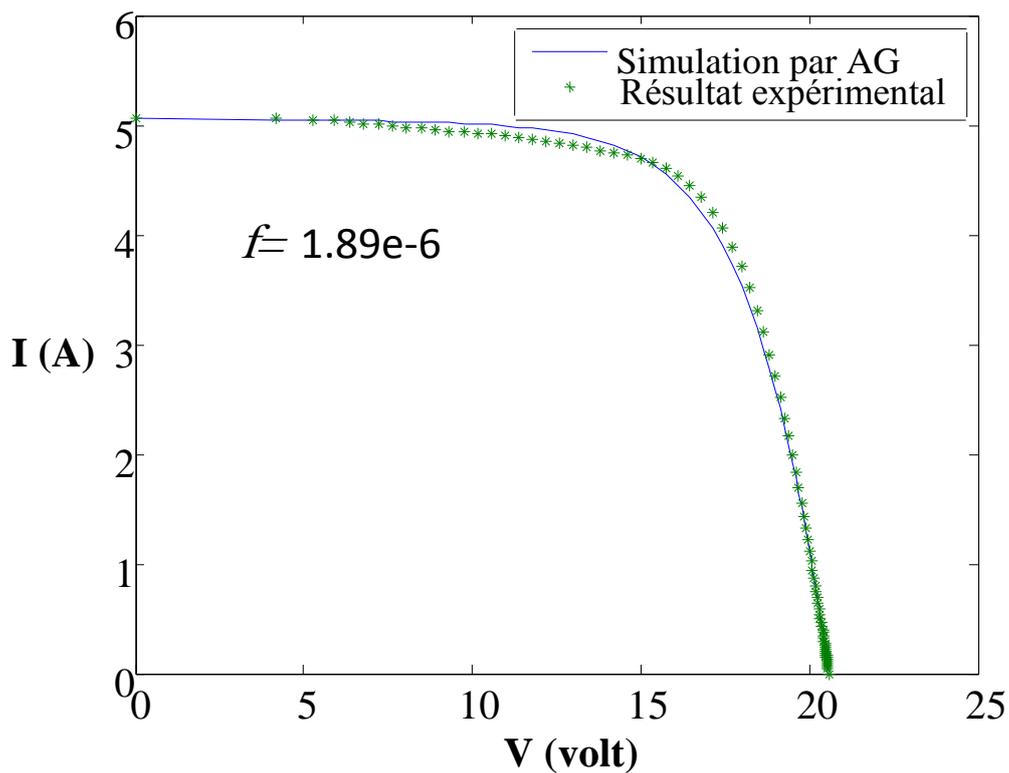
Modèle	Paramètres			
	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	I_0 (A)	n
$T = 298.4^\circ K$ et $E = 762 W/m^2$	0.005	265.45	3.81×10^{-5}	1.87
$T = 299.1^\circ K$ et $E = 778 W/m^2$	0.10	265.12	6.94×10^{-5}	1.98
$T = 301.1^\circ K$ et $E = 749 W/m^2$	0.003	150.63	8.56×10^{-5}	1.98
$T = 300.2^\circ K$ et $E = 753 W/m^2$	0.10	256.36	5.10×10^{-5}	1.90

Une fois les paramètres électriques du circuit équivalent sont déterminés, on peut tracer la caractéristique $I(V)$ à l'aide de l'expression du modèle à simple diode (Eq 4.2). La comparaison entre les caractéristiques expérimentales et les caractéristiques simulées sont illustrées dans la figure 4.3.

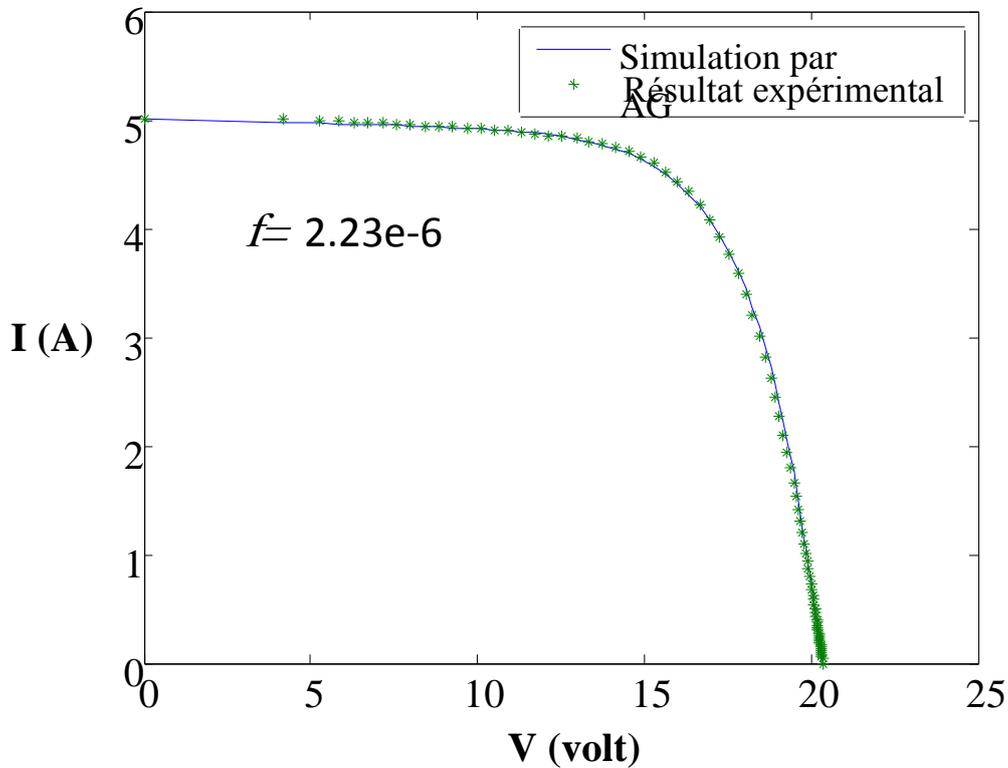
Les figures suivant montre la caractéristique I-V expérimentale et celle simulé en utilisant l'algorithme génétique.



(a)



(b)



(a)

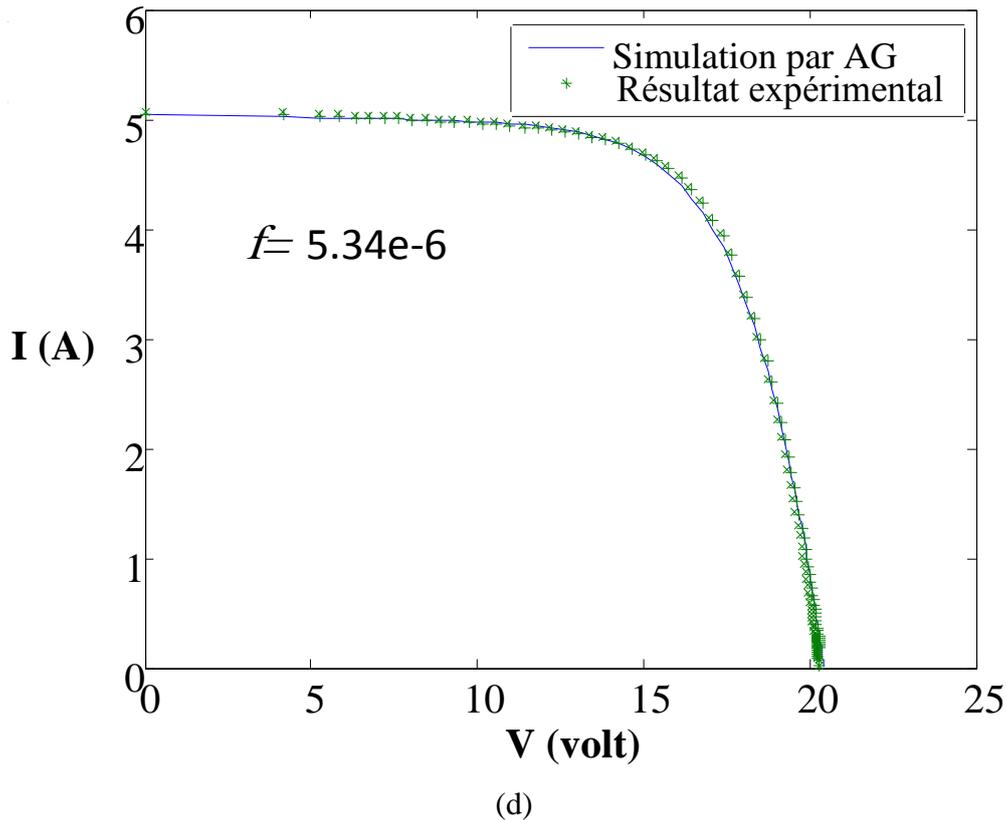


Figure 4.3 : Courbe expérimentale [42] et simulé de la caractéristique I-V du module photovoltaïque
a) : $T = 298.4^{\circ}\text{K}$ et $E = 762\text{W}/\text{m}^2$, (b): $T = 299.1^{\circ}\text{K}$ et $E = 778\text{W}/\text{m}^2$, (c): $T = 301.1^{\circ}\text{K}$ et $E = 749\text{W}/\text{m}^2$, (d): $T = 300.2^{\circ}\text{K}$ et $E = 753\text{W}/\text{m}^2$.

La figure 4.3 montre un bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux prévus qui ont été obtenus par la technique des AGs, ce qui montre l'exactitude de notre approche proposée pour extraire les paramètres électrique des modules photovoltaïques.

4.3.3 Extraction multi-objectifs des paramètres électriques

Dans la deuxième expérience évolutionnaire, la complexité du problème sera étendue. Cette fois, l'objectif de l'évolution du problème est d'ajuster les quatre caractéristiques $I(V)$ à différente température et éclairement afin d'obtenir une combinaison unique des paramètres électriques qui vérifient les résultats mesurés.

Dans cette expérience, nous avons utilisé le principe des algorithmes génétiques multi-objectif (MOGA) ou la fonction fitness est modifiée et donnée par:

$$f = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 + w_4 \cdot f_4^{\circ} \quad (4.4)$$

où: f_1, f_2, f_3 et f_4 représentent les fonction fitness des quatre caractéristique $I(V)$ respectivement calculées à l'aide de l'équation(IV.3). w_1, w_2, w et w_4 représentent les poids où $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$.

Afin d'extraire les paramètres électriques du modèle analytique à simple diode qui décrit le comportement des quatre caractéristiques $I(V)$ pour différent valeur de température et éclairement, il faut minimiser la fonction fitness f (minimisation de RMS) pour d'obtenir la meilleure solution (meilleur chromosome) dans la population pour rapprocher notre modèle à simple diode aux résultats expérimentaux [45].

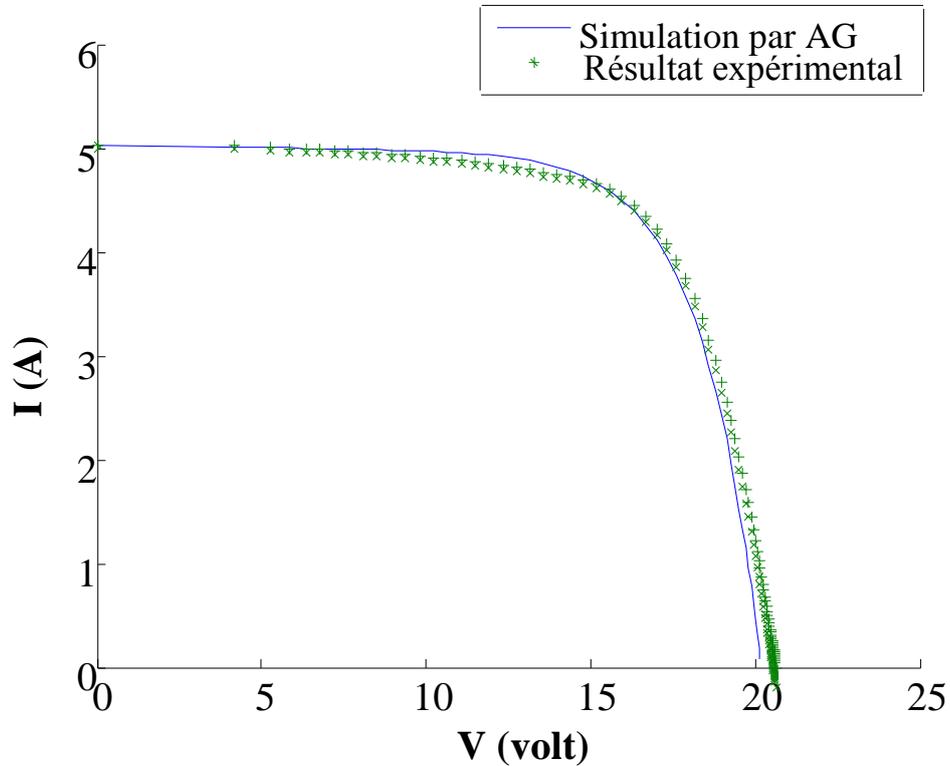
Le tableau (4.5) montre les paramètres (R_s, R_{sh}, I_0, n) extraits du module photovoltaïque

Tableau 4.4 : Les paramètres extraits de la cellule en utilisant la méthode multi-objective.

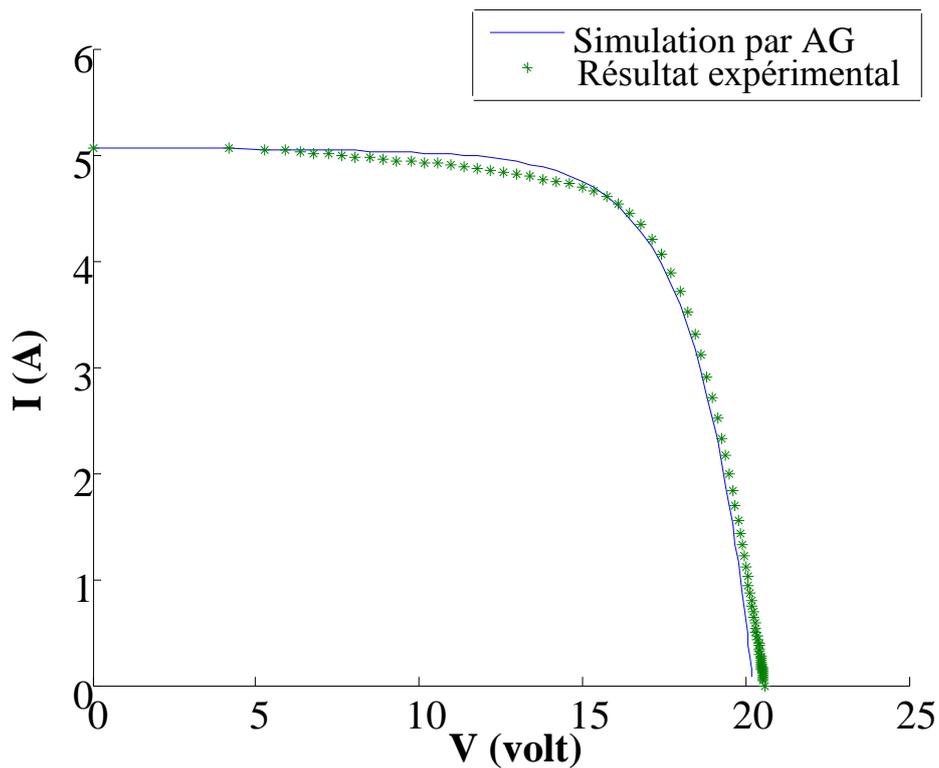
$R_s (\Omega)$	$R_{sh} (\Omega)$	$I_0 (A)$	n
1.19e-5	291.68	6.60e-5	1.94

Les paramètres électriques extraits du tableau 4.5 nous a permis de tracer les caractéristiques $I(V)$ à l'aide de l'expression du modèle à simple diode (Eq 4.2).

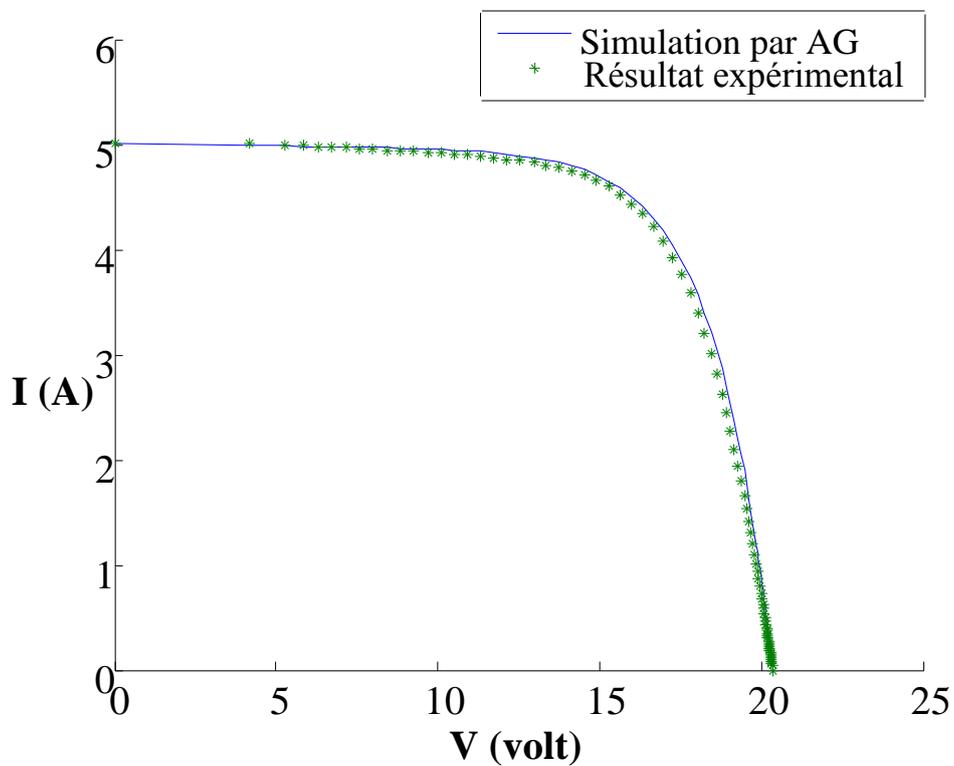
La figure suivante montre la comparaison entre les caractéristiques expérimentales et les caractéristiques simulées en utilisant les algorithmes génétiques multi-objectifs



(a)



(b)



(a)

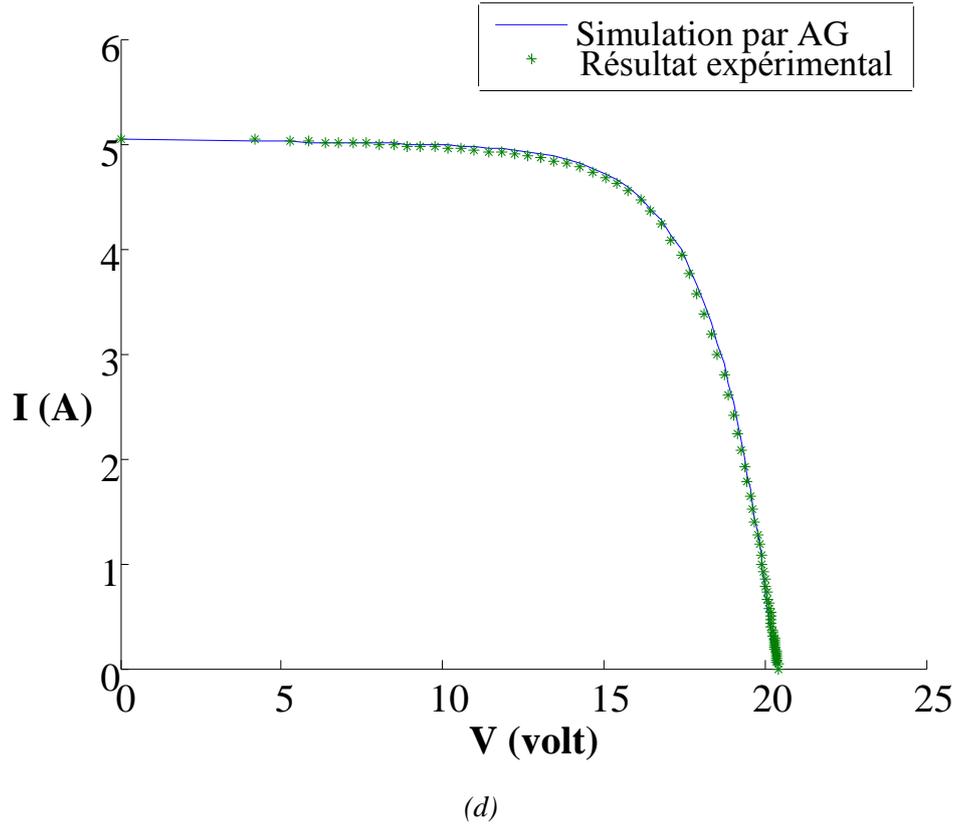


Figure 4.3: Courbe expérimentale [42] et simulé de la caractéristique I-V du module photovoltaïque (a) : $T = 298.4^{\circ}\text{K}$ et $E = 762\text{W}/\text{m}^2$, (b): $T = 299.1^{\circ}\text{K}$ et $E = 778\text{W}/\text{m}^2$, (c): $T = 301.1^{\circ}\text{K}$ et $E = 749\text{W}/\text{m}^2$, (d): $T = 300.2^{\circ}\text{K}$ et $E = 753\text{W}/\text{m}^2$.

Dans la figure IV.4 les caractéristiques $I(V)$ obtenues par notre modèle électrique à simple diode (en utilisant notre approche MOGA) sont comparées avec celles obtenues expérimentalement [45] ou un très bon accord a été obtenu pour différents paramètres climatiques (température et éclairement).

Afin de tester la précision des courbes obtenues, nous avons calculé les écarts relatifs moyens : absolu (MAE) et quadratique (RMSE), ainsi les erreurs relatives dans les trois régions : circuit ouvert ($Er_{I_{oc}}$), court-circuit ($Er_{I_{cc}}$) et puissance maximale ($Er_{P_{max}}$). Ces erreurs sont données par les expressions ci-dessous:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |e_i|^2}{N}} \quad (4.5)$$

$$MAE = \sqrt{\frac{\sum |e_i|}{N}} \quad (4.6)$$

$$Er_{V_{co}} = h|_{I=0} \quad (4.7)$$

$$Er_{I_{cc}} = e|_{V=0} \quad (4.8)$$

$$Er_{P_{max}} = k|_{P=P_{max}} \quad (4.9)$$

Tel que :

$$e_i = \frac{(I_i - GA - I_{i-mes})}{I_{i-mes}} \times 100, \quad e = \frac{(I_{GA} - I_{mes})}{I_{mes}} \times 100, \quad h = \frac{(V_{GA} - V_{mes})}{V_{mes}} \times 100 \quad \text{et} \quad = \frac{(P_{GA} - P_{mes})}{P_{mes}} \times 100$$

Les écarts relatifs moyens absolus (MAE) et quadratiques (RMSE), ainsi les erreurs relatives dans les trois régions : circuit ouvert ($Er_{V_{oc}}$), court-circuit ($Er_{I_{cc}}$) et puissance maximale ($Er_{P_{max}}$) sont calculées et donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4.5 : Erreur relative Pour les quatre modèles.

Modèle	Paramètres				MAE (%)
	Er_V _{oc} (%)	Er_I _{cc} (%)	Er_P _{max} (%)	RMSE (%)	
T = 298.4°K et E = 762W/m ²	1.32	4.15 10 ⁻⁶	1.48	4.05	3.81
T = 299.1°K et E = 778W/m ²	1.6	4.15 10 ⁻⁶	0.86	3.93	3.61
T = 301.1°K et E = 749W/m ²	0.06	4.15 10 ⁻⁶	1.42	2.94	2.12
T = 300.2°K et E = 753W/m ²	0.48	4.15 10 ⁻⁶	0.56	3.53	2.99

Le tableau ci-dessus démontre que notre approche MOGA est suffisante pour obtenir l'accord entre les caractéristiques obtenues, par implémentation des paramètres ajustées, et celles obtenues expérimentalement avec une erreur relative acceptable. Ce qui assure l'applicabilité des approches évolutionnaires pour étudier le comportement physiques des cellules photovoltaïques.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'applicabilité des algorithmes génétiques pour étudier le comportement physique des dispositifs photovoltaïques. L'objectif de ce chapitre était l'extraction des paramètres électriques du module photovoltaïque qui a été accomplie dans un temps relativement faible et sans besoin d'intervention de l'utilisateur pendant le processus d'optimisation

Les résultats indiquent que la technique GA mono objectif présente une meilleure stratégie conventionnelle d'extraction des paramètres, en termes de convergence et exactitude, elles fournissent des solutions optimales globales.

Les comparaisons prometteuses entre les caractéristiques expérimentales et nos simulations de modèle à simple diode ajusté par les AGs ont indiqué que l'approche développée est particulièrement appropriée pour être implémentée dans des simulateurs de composants électroniques pour étudier les dispositifs photovoltaïques.

**CONCLUSION GÉNÉRALE
& PERSPECTIVES**

Conclusion générale et perspectives

La principale contribution de ce travail de mémoire est étudié l'effet des paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque pour le modèle à simple diode et extraire ces paramètres en utilisant les algorithmes génétiques.

La première partie de ce travail consiste à un rappel les généralités sur les cellules photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques $I-V$ et $P-V$, leur modèle électrique équivalent et leurs principales grandeurs caractéristiques. Ainsi que l'influence des divers paramètres : l'éclairement et la température sur leur caractéristique et leurs paramètres électriques puis nous avons abordé l'association des cellules en série et parallèle. Cette partie est clôturée une présentation sur les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

En deuxième partie nous avons décrit la nature des algorithmes évolutionnaires et Algorithmes génétiques AGs. Ensuite, nous avons présenté le principe de fonctionnement des AGs et leurs caractéristiques principales, puis nous avons abordé les opérateurs génétiques, Finalement nous avons présenté les avantages et les inconvénients des algorithmes génétiques.

Dans la troisième partie on a représenté le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque et leurs différents paramètres électriques. Ensuite nous avons abordé l'effet des paramètres électriques (R_s , R_{sh} , I_0 et n) sur les caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule, ainsi le facteur de forme et le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Enfin, nous avons montré l'applicabilité des algorithmes génétiques pour étudier le comportement physique des dispositifs photovoltaïques. L'objectif de ce chapitre était l'extraction des paramètres électriques du module photovoltaïque qui a été accomplie dans un temps relativement faible et sans besoin d'intervention de l'utilisateur pendant le processus d'optimisation

Les résultats indiquent que les deux techniques GA mono objectif et multi-objectif présentent une meilleure stratégie conventionnelle d'extraction de paramètres, en termes de convergence et exactitude, elles fournissent des solutions optimales globales.

Les comparaisons prometteuses entre les caractéristiques expérimentales et nos simulations de modèle à simple diode ajusté par les AGs ont indiqué que l'approche développée est particulièrement appropriée pour être implémentée dans des simulateurs de composants électroniques pour étudier les dispositifs photovoltaïques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] **M. El-Ashry**, « *Renewables 2010 Global Status Report* », (Paris: REN21 Secretariat). Copyright Deutsche (GTZ) GmbH, 2010.
- [2] **T. Huld, M. Šuri, and D. Dunlop**, « *Comparison of Potential Solar Electricity Output from Fixed-Inclined and Two Axis Tracking Photovoltaic Modules in Europe, in Progress in Photovoltaic* » Research and Applications, Vol. 16, pp. 47-59, 2008.
- [3] **Parallax**, « *Experiments with Renewable Energy Student Guide* », version1.2004.
- [4] **F.Z. Zerhouni, M. Zegrar, S. K. Brahim et A. B. Stambouli**, « *Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique* », Revue des Energies Renouvelables, 11 (1), pp. 41- 49, 2008.
- [5] **H. Mathieu**, « *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques* », 2^{ème} édition, Masson 1990.
- [6] **Xi. Zhenqiang, D. Yang, W. Dan, C. Jun, X. Li and D. Que**, « *Investigation of texturization for monocrystalline silicon solar cells with different kinds of alkaline* », Renewable Energy, 29(13), pp. 2101-2107, 2004.
- [7] **J. Zhao, A. Wang, M.A. Green et F. Ferrazza**, *Applied Physics Letters* 1998, 73, 1991.
- [8] **A. Luque**, « *Practical Handbook of Photovoltaic* », 2nd Edition, 2012.
- [9] **M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa and W. Warta**, « *Solar Cell efficiency tables (Version 31)* » Progress in Photovoltaic: Research and Applications, 16 (1), pp. 61-67, 2008.
- [10] **C.W. Tang**, « *Two-layer organic photovoltaic cell* », Applied Physics Letters, 48, 183, 1986.
- [11] **V.Y. Merritt**, « *Organic Photovoltaic Materials: Squarylium and Cyanine-TCNQ Dyes* », IBM Journal of Research and Development, 22, pp. 353-371, 1978.
- [12] **V. Stéphane**, « *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion* ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [13] **L. Bailly**, « *Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [14] **S.M. Sze**, « *Physics of semiconductor Devices* », 2nd edition, Wiley and Son, Inc., 1981.
- [15] **A. Labouret, M. Viloz**, « *Energie solaire photovoltaïque* », 3^{ème} édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [16] **A.B. Legarreta**, « *Réalisation de Technique MPPT numérique* », Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Université Virgile, Septembre 2006.
- [17] **R. Khezzar, M. Zereg et A. Khezzar**, « *Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque* », Revue des Energie Renouvelables, 13 (3), pp. 379-388, 2010.

- [18] **S. Baudot-Roux**, « *Algorithmes évolutionnaires, hybridation* », Mathematics 2000, Eurogen 97, 98, 99.
- [19] **P. Lucidarme**, « *Apprentissage et adaptation pour des ensembles de robots réactifs coopérants* ». Proc. ICRA'02, Washington, 2002.
- [20] **R. Dupas**, « *Amélioration de performance des systèmes de production: apport des algorithmes évolutionnistes aux problèmes d'ordonnancement cycliques et flexibles* », Université d'Artois 2004.
- [21] **A. Nabonne**, « *Algorithmes évolutionnaires et problèmes inverses* », chapitre 8, juin 2004.
- [22] **D. Beasley et R. Martin**, « *An Overview of Genetic Algorithms* », Part 2, department of Computing Mathematics, University of Wales College of Cardiff, CF2 4YN, 1993.
- [23] **A. Nabonne**, « *Algorithmes évolutionnaires et problèmes inverses* », chapitre 8, juin 2004.
- [24] **T. Vallé et M. Yildizoğlu**, « *Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie* », Université de Nantes et Université Montesquieu Bordeaux IV 2001.
- [25] **N. Lassouaoui, L. Hamami et N. Nouali**, « *Les algorithmes génétiques application à la segmentation des images* », RIST Vol.14 N°02 Année 2004.
- [26] **C.A. Coello**, « *An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multi objective Optimization in Engineering Design* », PHD. Dissertation, Department of Computer Science, Tulane University, 1996.
- [27] **Gen. M. and Cheng. R.**, « *Genetic Algorithms and Engineering Design* », John Wiley & Sons, 1997.
- [28] **N. Benahmed**, « *Optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés: sélection et pondération des primitives par algorithme génétique* », Université du Québec ,2002.
- [29] **R. L. Haupt, and S. E Haupt**, « *Practical Genetic Algorithms* », 2nd edition, John Wiley & Sons edition, New York, USA, 2004.
- [30] **K. K. Deb**, « *Multi-Objective Optimisation using Evolutionary Algorithms* », Edited by John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [31] **E. Gildemyn**, « *Caractérisation des procédés de fabrication de pièces de sécurité automobile. Optimisation multi-objectifs de la mise en forme* », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [32] **S. M. Sze**, « *Physics of semiconductor Devices* », 2nd edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.
- [33] **M. Oukachmih**, « *Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques* », Thèse 2003, Université Toulouse-Paul Sabatier.
- [34] **R. Radbeh**, « *Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones* ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [35] **P. Stéphane**, « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques* », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

- [36] **A. H. Wilson**, « *The Theory of Electronic Semiconductors* », Proc. Royal Society, 133, pp. 458-491, 1931 DOI: 10.1098/rspa.1931.0162.
- [37] **H. Ibach**, « *Physics of Surfaces and Interfaces* », Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. ISBN-13 978-3-540- 34709-5.
- [38] **A. Labouret, P. Cumunel, J.P. Braun et B. Faraggi**, « *cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque* », Dunod, 3^{ème} édition, Paris, 2001.
- [39] **Z.M. Salameh and C. Liang**, « *Optimum Switching Points for Array Reconfiguration Controller*», IEEE Conference on Photovoltaic Specialists, pp.971-976. 21-25 May 1990.
- [40] **A. Ricaud**, « *Photopiles solaire : de la physique de conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés* », presses polytechniques et universitaires romandes 1997.
- [41] **W. Kim and W. Choi**, « *A novel parameter extraction method for the one diode solar cell model*», Solar Energy, 84, pp.1008–1019, 2010.j
- [42] **S. Yadir, M. Benhmida, M. Sidki, E. Assaid and M. Khaidar**, « *New method for extracting the model physical parameters of solar cells using explicit analytic solutions of current-voltage equation* », IEEE International Conference on Microelectronics (ICM), pp. 390 – 393, 2009.
- [43] **A. Maoucha, F. Djefal, D. Arar, N. Lakhdar, T. Bendib and M.A. Abdi**, « *An accurate organic solar cell parameters extraction approach based on the illuminated I-V characteristics for double diode modeling* », First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, pp. 74 – 77, 2012.
- [44] **W. Kim, W. Choi**, « *A novel parameter extraction method for the onediode solar cell model* », Solar Energy, Vol 84, pp1008–1019, 2010.
- [45] **N. Seddaoui, L. Rahmani and A. Chauder**, « *Parameters extraction of photovoltaic module at reference and real conditions* », 46th International Universities Power Engineering Conference, 5-8th September 2011, Soest, Germany.

