

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

Université Ferhat Abbas–SETIF
UFAS (ALGERIE)

Mémoire
Présenté à la Faculté des Sciences
Département de Physique
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Energétique et mécanique des fluides

Par

DJESSAS Zahira

THEME

**EXTRACTION DES PARAMETRES
PHYSIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE A
DEUX EXPONENTIELS PAR LA METHODE
DES ALGORITHMES GENETIQUES**

Soutenu Publiquement le .../.../.....

:

Devant la commission d'examen :

Président	Dr L. Zouaoui	M.C	U.F.A. Sétif
Rapporteur	Dr Z. Ouennoughi	Pr.	U.F.A. Sétif
Examineur	Dr M. Chegaar	M.C	U.F.A. Sétif
Invité	Dr A. Ferhat Hamida	C.C.	U.F.A. Sétif

Remerciements

Je voudrais d'abord dire toute ma gratitude et mes sincères remerciement à tous qui ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire notamment :

Mon encadreur **Pr Z. Ouennoughi** Professeur à l'Université de Sétif, pour ses conseils judicieux durant toute la période de mon travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie **Dr L. Zouaoui** Maître de conférences à l'Université de Sétif, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger mon mémoire : **Dr M. Chegaar** Maître de conférences à l'Université de Sétif et **Dr A. Ferhat hamida** Chargé de cours à l'Université de Sétif.

Je remercie tous mes enseignants du département de physique en particulier ceux de la filière énergétique pour leur orientation pendant ma formation.

Un très grand et très spécial merci à mes parents, et à toute ma famille. Que toutes les personnes et tous mes amis qui m'ont soutenu moralement soient assurés de l'expression de ma reconnaissance.

Sommaire

SOMMAIRE	I
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: RAPPELS THEORIQUES	4
I. JONCTION P-N ET CELLULE SOLAIRE	5
I.1. Introduction.....	5
I.2. Rayonnement solaire	5
I.2.1. Masse d'Air.....	5
I.2.2. Spectre solaire	6
I.3. Systèmes photovoltaïques.....	8
I.3.1. Systèmes photovoltaïques indépendants.....	8
I.3.1.1. Le système de régulateur de charge.....	9
I.3.1.2. Les batteries	9
I.3.1.3. Système connecté à un réseau local.....	9
I.3.2. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	10
I.4. La conversion photovoltaïque.....	10
I.4.1. L'absorption de la lumière.....	11
I.4.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques	11
I.4.3. La collecte des charges	12
I.5. Physique de la cellule solaire	13
I.5.1. La diode	13
I.5.2. La jonction p-n	13
I.5.2.1. Polarisation en sens direct	14
I.5.2.2. Polarisation en sens inverse	15
I.6. La structure d'une cellule solaire	15
I.6.1. Caractéristique courant-tension.....	16
I.6.2. Schéma équivalent d'une cellule solaire	16
I.6.2.1. Cas d'une cellule solaire idéale.....	16
I.6.2.2. Cas d'une cellule solaire réelle	17
I.7. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire.....	18
I.7.1. Courant et tension maximal	18
I.7.2. Courant de court circuit	19

I.7.3. Tension de circuit ouvert	20
I.8. Influence de l'éclairement et la température.....	20
I.8.1. Influence de l'éclairement	20
I.8.2. Influence de la température.....	22
I.9. Pertes dans les cellules solaires	23
I.9.1. Absorption incomplète.....	23
I.9.2. Excès d'énergie	23
I.9.3. La résistance série	23
I.9.4. La résistance parallèle.	23
I.9.5. Le rendement de collecte	23
I.9.6. Réflexion à la surface	23
I.9.7. Facteur de forme.....	23
I.10. Module photovoltaïque	24
I.11. Conclusion	24

CHAPITRE II: SIMULATION DE LA CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION.....25

II. CARACTERISTIQUE COURANT TENSION D'UNE CELLULE SOLAIRE	26
II.1. Introduction	26
II.2. Caractéristique d'une cellule solaire idéale	26
II.3. Influence du facteur d'idéalité et du photocourant.....	27
II.4. Influence de la la résistance série et parallèle	29
II.4.1. Influence de la résistance série.	30
II.4.2. Influence de la résistance shunt.	30
II.5. Cellule solaire à double exponentielle	33
II.6. Simulation de la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire basée sur les solutions analytiques explicites.....	34
II.6.1. Fonction de Lambert	34
II.6.2. Caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire par la fonction de Lambert.	35
II.7. Conclusion	39

CHAPITRE III:EXTRACTION DES PARAMETRES 40

III. METHODE D'EXTRACTION DES PARAMETRES	41
III.1. Introduction	41
III.2.Méthode d'optimisation vertical.....	42
III.2.1. Principe de la méthode	42
III.2.2. Validation de la méthode	44
III.2.2.1. Algorithme de Newton	44
III.2.2.2. Tests de la méthode.....	44
III.3. Méthode des algorithmes génétiques	45
III.3.1. Historique	46
III.3.2. Analogie avec le fonctionnement biologique.....	46
III.3.3. Principes des algorithmes génétiques	46
III.3.3.1. Codage d'une population.....	47
III.3.3.2. Le mécanisme de la population initial	47
III.3.3.3. Fonction d'évaluation et fonction de fitness	47
III.3.3.4. Les opérateurs permettant de diversifier	47
III.3.3.5. Les paramètres de dimensionnement	48
III.3.4. Comment fonctionne un Algorithme génétique	48
III.3.5. Variantes.....	49
III.3.5.1. Codage.....	50
III.3.6. Les opérateurs génétiques	50
III.3.6.1. La sélection.....	50
III.3.6.2. Croisement.....	52
III.3.6.3. La mutation	54
III.3.7. Valeurs des paramètres génétiques.....	55
III.3.8. Extarction des paramètres d'une cellule solaire par la méthode des AGs	55
III.3.8.1. Application à la cellule solaire une seule exponentielle	56
III.3.8.2. Validation de la méthode.....	57
III.3.8.3. Cellule solaire à double exponentielle	59
III.4. Conclusion.....	60
CONCLUSION GENERAE	62
BIBLIOGRAPHIE.....	64

Liste des symboles utilisés

Symbole	Description
AM	Air masse
θ	L'Angle entre la direction du soleil et la direction du lieu
E_g	Energie de la bande interdite (gap)
E_c	Energie de la bande de conduction
E_v	Energie de la bande de valence
λ	Longueur d'onde
ν	Fréquence de rayonnement
h	Constante de Planck
I_{obs}	Courant d'obscurité
I_s	Courant de saturation
μ	La mobilité
D_p	Coefficient de diffusion des trous
D_n	Coefficient de diffusion des électrons
L_p	Longueur de diffusion des trous
L_n	Longueur de diffusion des électrons
I_d	Courant de la diode
V	Tension
E	L'irradiation du rayonnement incident (éclairage)
q	Charge électrique
T	Température
I_{ph}	Le photocourant
n	Facteur d'idéalité
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance parallèle (shunt)
G_p	Conductance parallèle (shunt)
I_{cc}	Courant de court circuit

V_{co}	Tension de circuit ouvert
P_m	Puissance maximale
I_m	Courant maximum
V_m	Tension maximum
k	Constante de Boltzmann
F_F	Facteur de forme
PV	Photovoltaïque
CC	Courant continue
CA	Courant Alternatif
AG	Algorithme génétique
MOV	Méthode d'optimisation verticale
MOL	Méthode d'optimisation latérale
LES	Méthode de moindre carrée
$I - V$	Courant-tension
$X1$	Parent1
$X2$	Parent2
$E1$	Enfant1
$E2$	Enfant2
X'	Des individus mutés
P_c	Probabilité de croisement
P_m	Probabilité de mutation
Si	Silicium
B	Bore
P	Phosphore

Principales constantes

Charge de l'électron	$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Planck	$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Constante de Boltzmann	$k = 1,380 \times 10^{-23}, \text{ J.K}^{-1}$

Introduction générale

Le mot « photovoltaïque » vient de « photons » qui signifient lumière et de « volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électronique.

Mais c'est le savant français Antoine Becquerel qui, le premier en 1839, observa le changement de la tension d'une électrode en platine sous l'effet de l'illumination de la lumière [1]. Einstein en expliqua le mécanisme en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire.

La première cellule solaire à base de silicium fut développée dans les laboratoires Bell en 1954. Le rendement était de 6% mais fut rapidement augmenté à 10% [2].

Durant de longues années, la principale application des cellules solaires resta le domaine spatial. Leurs intérêts dans une utilisation terrestre rebondissent dans les années 1970. Aujourd'hui, le développement de l'industrie des semi-conducteurs et ses très nombreuses avancées (tant en termes de qualité du matériau que de développement des équipements) a favorisé la très large expansion des cellules solaires [2].

De plus, le besoin total d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique. La disponibilité des sources d'énergie est limitée dans ce monde, c'est pourquoi la recherche de nouvelles sources s'avère très indispensable. On distingue actuellement plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

Le photovoltaïque est la plus utilisé des énergies renouvelables. Cette dernière provient directement du soleil.

La question qui se pose est comment convertir cette énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques permettent cette conversion. Ce sont des composants semi-conducteurs capables de convertir cette énergie.

Notre mémoire est composé de trois parties.

Dans la première partie nous allons présenter le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule solaire. Nous allons également aborder le principe de conversion photovoltaïque, les paramètres caractéristiques de la cellule

solaire, l'architecture de la cellule solaire ainsi que l'effet de la température et l'éclairement sur la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire.

Dans le deuxième chapitre nous allons étudier la cellule solaire et ses caractéristiques courant-tension (I-V). Ces derniers ont été simulés en utilisant un programme en langage FORTRAN 90.

Le chapitre trois traite les méthodes d'extraction des paramètres. Parmi ces méthodes on a abordé la méthode d'optimisation verticale (VOM) et on s'est intéressé particulièrement à l'extraction des cinq paramètres caractérisant la cellule solaire à savoir le courant de saturation I_s , le facteur d'idéalité n , la résistance série R_s , la conductance parallèle G_p et le photocourant I_{ph} .

Enfin nous avons étudié l'extraction des paramètres par la méthode des algorithmes génétiques. En premier on a présenté une étude théorique de cette méthode qui montre une grande analogie avec le fonctionnement en biologie. Puis on a présenté une étude pratique ; où la méthode des algorithmes génétiques a été appliquée à une cellule solaire à une seule exponentielle sous illumination puis un modèle à deux exponentielles sous illumination et à l'obscurité pour extraire les paramètres caractéristiques.

Notre travail est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Rappels théoriques

I. Jonction p-n et cellule solaire

I.1. Introduction

Les cellules solaires sont des éléments qui convertissent directement le rayonnement lumineux (solaire) en électricité. Cette conversion de la lumière en électricité, est appelée effet photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique des cellules solaires et en particulier une brève présentation de l'élément énergétique essentiel que constitue le rayonnement solaire. Nous aborderons également le phénomène photovoltaïque.

I.2. Rayonnement solaire

Nous nous intéressons en premier lieu à la source d'énergie que constitue le soleil et plus particulièrement au spectre solaire. L'énergie du Soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du Soleil, notamment sous forme d'onde électromagnétique (lumière) [1].

La distribution des radiations lumineuses émises par le soleil est déterminée par la température de la surface de ce dernier, à savoir 5800K environ. On peut considérer que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. L'énergie par unité de surface ou irradiance, fournie par le soleil, hors atmosphère et sous incidence normale, est constante et voisine de 1.33 KW/m^2 [2].

I.2.1. Masse d'Air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement va subir plus de transformations. On appelle *masse d'air* ou *Air Mass* en anglais le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour

atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu. A l'aide des points O, A et M et l'angle θ représentés à la figure I-1, on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère [1]:

$$OM = \frac{OA}{\sin \theta} \quad (\text{I.1})$$

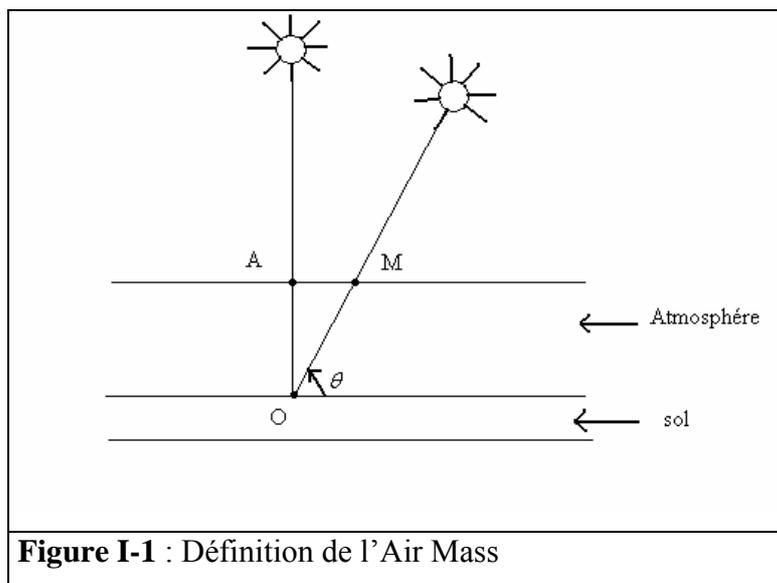
Donc l'Air Mass

$$AM = \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I.2})$$

Dans l'expression AMx, x désigne ce rapport $\frac{OM}{OA}$ on définit :

- AM1: position du soleil au zénith (au niveau de la mer);
- AM2 : Le soleil à 30°
- Si le soleil est à 48° on AM1.5.

Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère.

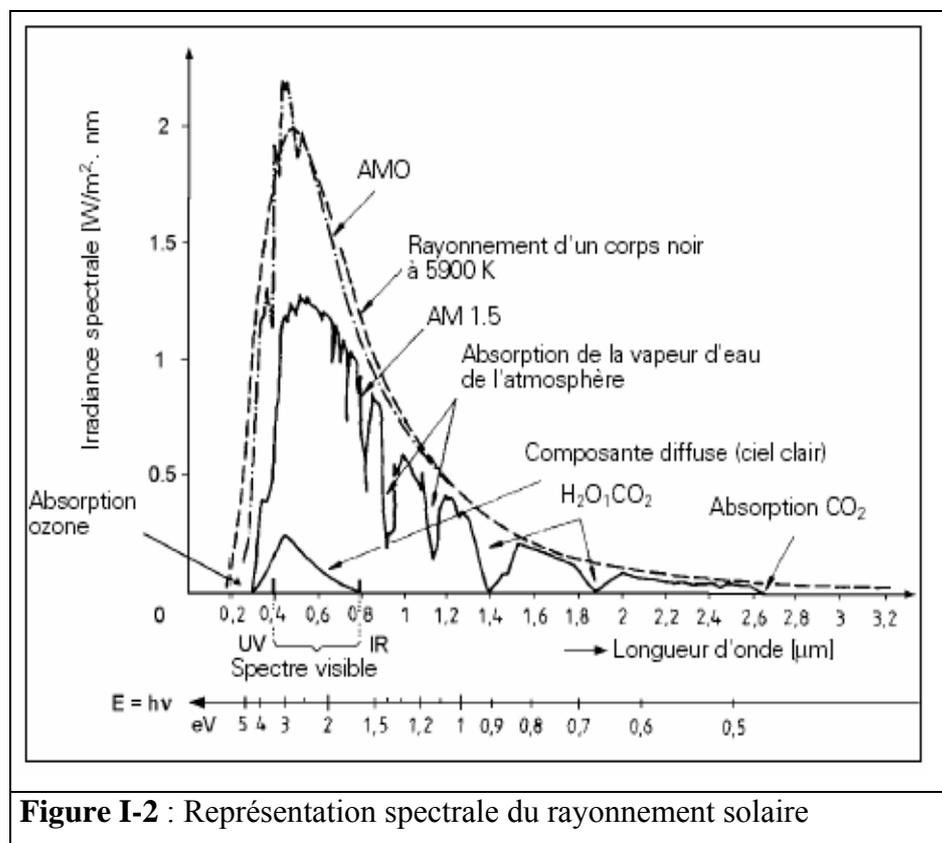


I.2.2. Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm . La figure I-2 montre la variation spectrale du rayonnement solaire. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande ultraviolet ($<0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2\text{kW/m}^2$ (1200W/m^2) [3]



On voit clairement sur le spectre AM1.5 les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le gaz carbonique CO_2 et la vapeur d'eau. On a représenté sur (la figure I-2) le spectre d'un corps noir dont la température 5900K, très proche du spectre solaire AM0. Le soleil est donc souvent assimilé à un corps noir [1].

I.3. Système photovoltaïque

On appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaire à l'alimentation d'une application en toute fiabilité. Il est composé d'un module photovoltaïque, d'un régulateur et d'une batterie.

Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins d'1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque. Il existe 2 types de systèmes photovoltaïques.

I.3.1. Systèmes photovoltaïques indépendants

C'est un système photovoltaïque (*figure I-3*) qui alimente l'utilisateur en électricité (sans être connecté au réseau électrique). En effet, ces systèmes appelés aussi " autonomes " sont des systèmes qui ne dépendent pas de l'existence d'un réseau d'électricité. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible : dans les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne et en désert.

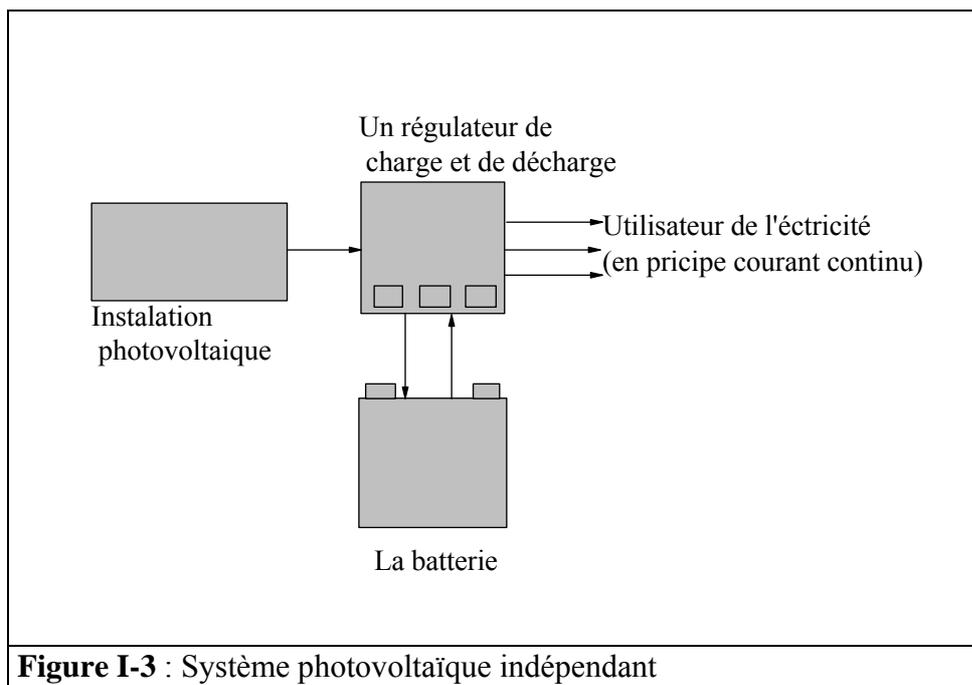


Figure I-3 : Système photovoltaïque indépendant

I.3.1.1 Le système de régulation de charge

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Presque toutes les installations autonomes sont équipées d'un régulateur qui contrôle le flux d'énergie allant des cellules solaires vers la batterie et les utilisateurs.

I.3.1.2 Les batteries

Il existe très peu d'installations autonomes qui n'ont pas besoin de stocker de l'énergie, cependant, elles existent.

- L'énergie photovoltaïque peut faire fonctionner une pompe pour les besoins en eau dans une région isolée sans forcément avoir recours à une batterie de stockage.
- Une autre utilisation serait pour pomper l'eau d'une piscine.
- On peut aussi relier des ventilateurs directement sur les panneaux PV si on contente des heures de soleil pour leur fonctionnement. Une batterie s'impose, dans la majorité des cas.

Cette batterie aura pour le rôle de maintenir en service une charge en période de faible ensoleillement ou en l'absence d'ensoleillement. Dans les systèmes nécessitant un stockage de l'énergie électrique, la batterie électrochimique à accumulateur constituera souvent l'option la plus simple et la plus adéquate ; on se contente des heures de soleil pour leur fonctionnement.

I.3.1.3 Système connecté à un réseau local

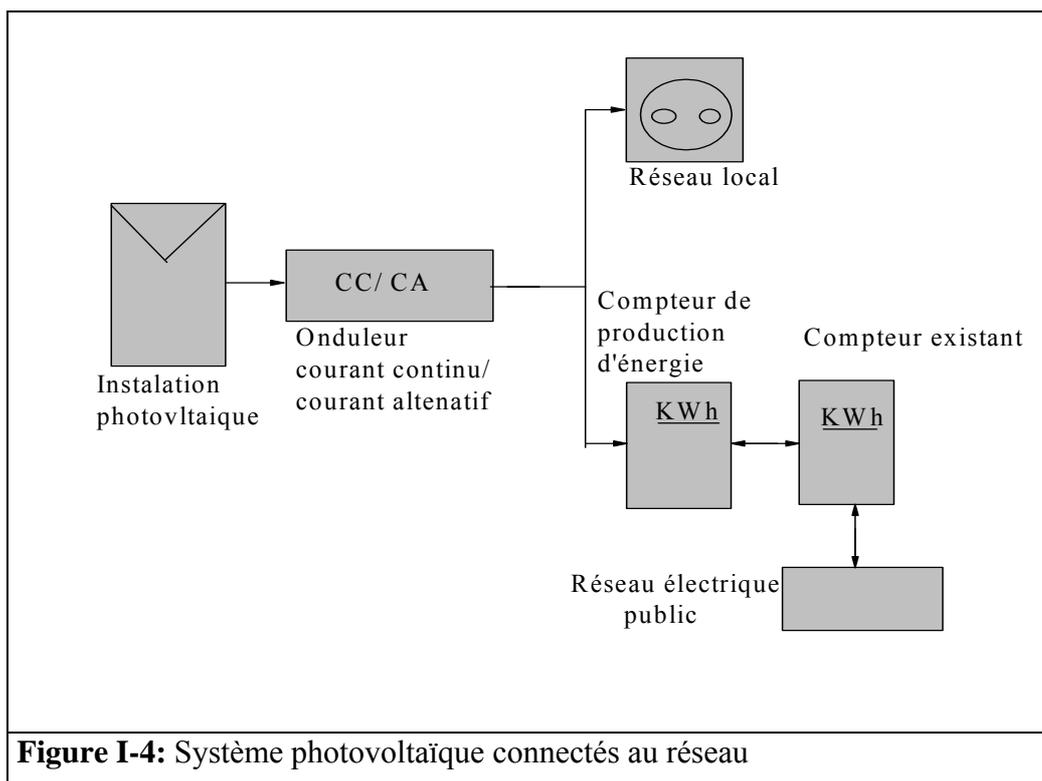
Dans certains cas, on alimentera de nombreux utilisateur à partir de cellules solaires. L'exemple le plus courant est celui d'une petite île où le réseau local servant à l'approvisionnement d'énergie des habitants sera alimenté par l'énergie solaire.

I.3.2. Système photovoltaïque connectés au réseau

Par système photovoltaïque connecté au réseau, on entend un système dont le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu-courant alternatif.

Le convertisseur ou onduleur remplit les fonctions suivantes :

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- Sécurité.



I.4. La conversion photovoltaïque [1] :

La conversion d'énergie nécessite trois phénomènes physiques

- l'absorption de la lumière dans le matériau
- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

- la collecte des charges

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

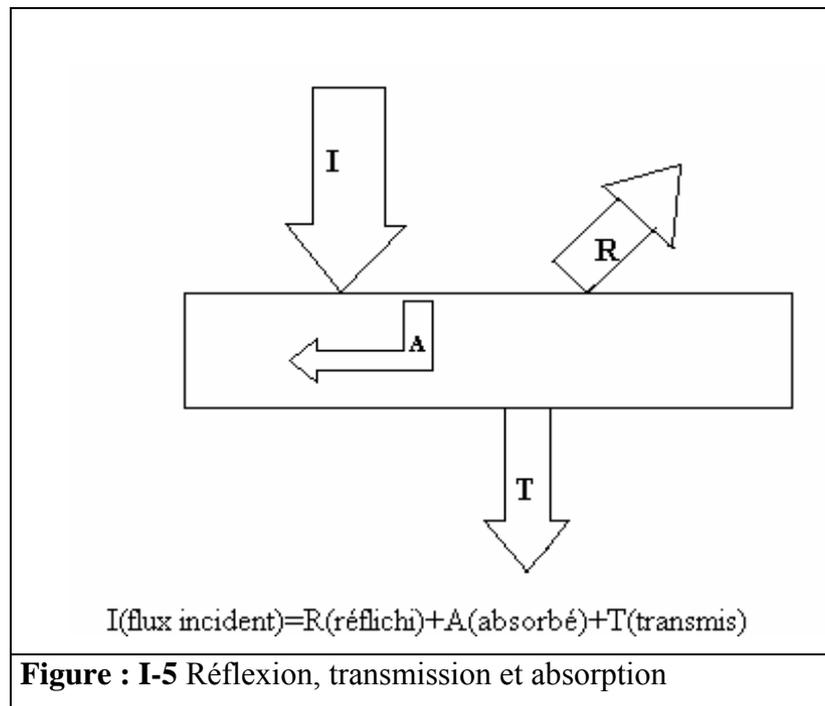
I.4.1. L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons, chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde.

Ces photons peuvent pénétrer dans certains matériaux, et généralement, un rayon qui arrive sur un solide subit les événements optiques suivants :

- *la réflexion* : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;
- *la transmission* : la lumière traverse l'objet ;
- *l'absorption* : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

Ce sont les propriétés optiques du matériau rencontré qui conditionnent la répartition de ces diverses contributions.



I.4.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques :

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité.

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-conductrice.

Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour. Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau.

Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les « attire » ensuite vers l'extérieur.

I.4.3. La collecte des charges [1,5]

Le rayonnement solaire est constitué de photon transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{I.3})$$

Avec :

E : Énergie en Joule.

λ : Longueur d'onde en m.

ν : Fréquence en Hz.

h : Constante de Planck

Les électrons créés par les photons seront collectés avant de reprendre leur énergie initiale, afin de fournir un courant électrique.

La structure périodique des atomes dans un solide entraîne des bandes d'énergie interdites pour l'électron et chaque matériau est caractérisé par une largeur de bande interdite (gap) exprimé en eV dont la valeur détermine la nature de matériau (conducteur ; semi-conducteur, isolant). Si E_v est l'énergie maximale de la première bande d'énergies autorisées (bande de valence) et E_c l'énergie maximale de la seconde bande d'énergie premières (bande de conduction) la largeur de la bande interdite E_g du matériau est donnée par :

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{I.4})$$

Les photons dont l'énergie est supérieure à E_g peuvent faire passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction laissant ainsi un

trou dans la bande de valence. L'électron et le trou ainsi libérés doivent rapidement être collectés.

I.5. Physique de la cellule solaire

La cellule solaire est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

La cellule solaire est donc liée très fortement à la diode est très facile de comprendre que l'équation qui exprime la caractéristique d'une cellule solaire est similaire à celle d'une diode.

I.5.1. la diode

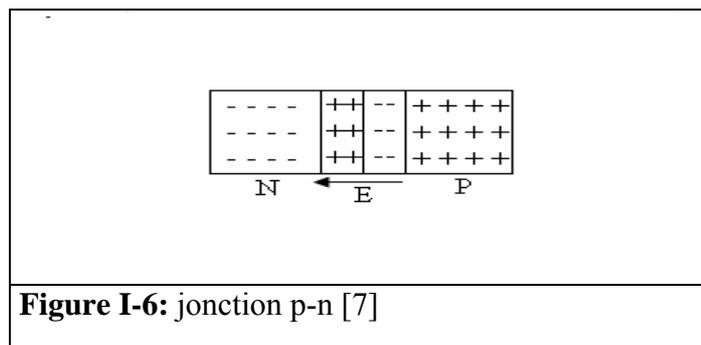
La diode est à la base des composants semi-conducteurs. Son fonctionnement est semblable à celui d'un interrupteur commandé qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens. La fonction diode a existé bien avant l'arrivée du silicium, ou utilisant ; alors des tubes à vides (les lampes) par l'effet thermoélectrique. Le Silicium a apporté les avantages suivants : coût, fiabilité, simplicité d'utilisation [6].

I.5.2. La jonction p-n

Lorsqu'on met en contact deux semi-conducteurs à dopage opposé (de type p et de type n), on obtient un élément très connu qui s'appelle jonction pn ou diode.

Donc la jonction p-n est l'endroit où la zone de type p (majoritaire en trous, minoritaires en électrons) et la zone de type n (majoritaire en électrons, minoritaire en trous) se rencontre.

Deux types de dopage sont possibles.



- Le dopage de type n, qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers pentavalents (ex : le phosphore) qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal [7].
- Le dopage de type p utilise des atomes trivalent (ex : le bore) dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire [7].

L'échange de porteurs dans la zone de charge spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer la diffusion des charges et rétablir l'équilibre thermodynamique. Le courant est nul dans le cas d'une jonction pn non polarisée.

I.5.2.1 polarisation en sens direct [6]

La barrière de potentiel interne empêche toute circulation de courant. Si on applique un champ externe à l'aide d'un générateur en branchant le pôle (+) à la zone p et le pôle (-) à la zone n, on peut contrebalancer les effets du champ interne et permettre au courant de circuler. La densité du courant total à travers la jonction est :

$$J = J_p(-x_n) + J_n(x_p) \quad (I.5)$$

Si S est la surface de la jonction, on trouve que

$$I = -S \left(\frac{qD_p p_n}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} \right) \left[\exp\left(\frac{V}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

C'est l'équation de la caractéristique idéale de la diode.

Où D_n , D_p sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous, L_p et L_n sont les longueurs de diffusions de porteurs et D et μ sont liés par la relation d'Einstein et μ la mobilité :

$$V_{th} = \frac{D}{\mu} = \frac{KT}{q} \quad (I.7)$$

Le courant total est pratiquement le courant direct dû aux porteurs majoritaires dès que la tension atteint quelque mv. Le phénomène d'attraction des électrons libres de la partie n par les trous de la partie p (diffusion) n'est plus contrarié et le générateur va pouvoir injecter des électrons dans la zone n et les repomper par la zone p.

I.5.2.2 Polarisation en sens inverse [6] :

Si on branche le générateur dans le sens inverse du cas précédent, on renforce le champ électrique interne et on empêche le passage des porteurs majoritaires, les électrons libres sont repoussés dans la zone n et les trous dans la zone p. On accentue la séparation des charges (zone de déplétion) par contre, les porteurs minoritaires (trous pour la zone n et électrons libres pour la zone p) peuvent traverser la jonction et reboucler par le générateur il forme le courant inverse I qui dépend essentiellement de la température, le courant est donné par :

$$I = S \left(\frac{qD_p p_n}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} \right) \left[\exp\left(\frac{V}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (I.8)$$

Comme $V < 0$ on trouve une augmentation de barrière de potentielle de la jonction, le champ extérieur repousse les charges qui vont se trouver à une distance sensiblement proportionnelle à $|V|$, créant ainsi une capacité proportionnelle à cette distance donc à $|V|$.

I.6. La structure d'une cellule solaire :

La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction pn, le courant *sous obscurité* dans telle structure est donné par la formule suivante [2] :

$$I_{obs} = I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (I.9)$$

I_{obs} : Le courant sous obscurité.

I_s = Le courant de saturation de la diode.

q = charge de l'électron.

V = tension appliquée.

k = constante de Boltzmann.

T = température absolu en Kelvin

Et *sous éclaircissement* le courant est donné par la formule

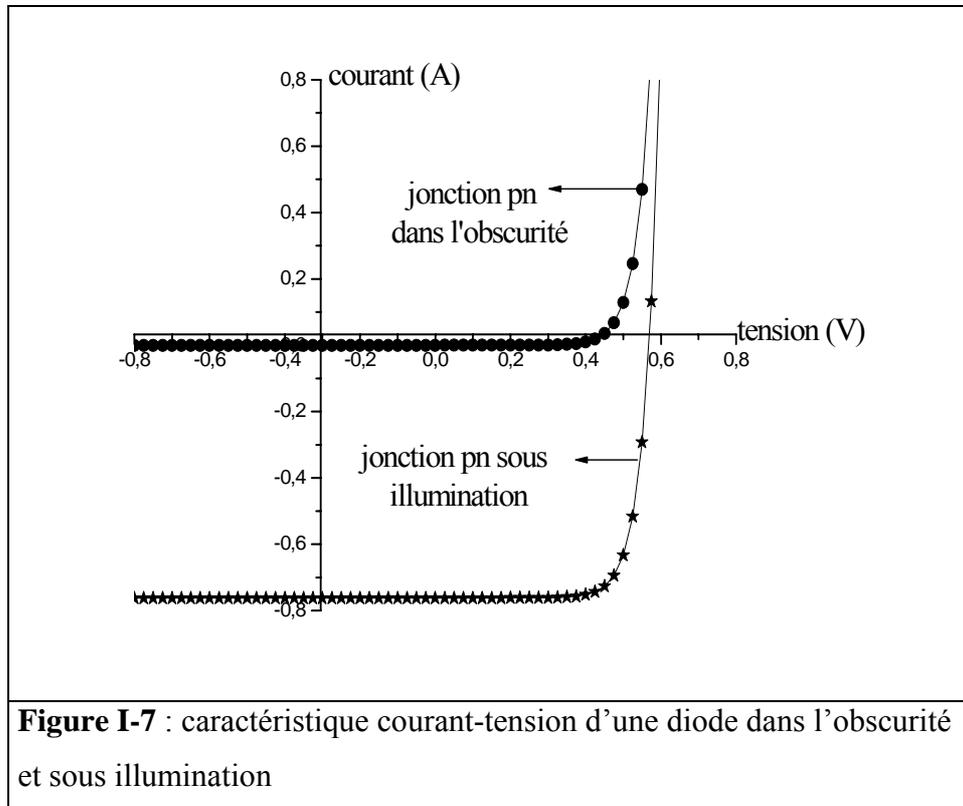
$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (I.10)$$

Avec:

I_{ph} = photocourant de la diode

I.6.1. Caractéristique courant-tension [1]

On a représenté sur la *figure I-7* les deux caractéristiques courant-tension de se cellule solaire :



On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à courbe sous obscurité d'une valeur I_{cc} , qui traduit la génération constante du courant pour la lumière. Cette valeur est appelée *courant de court-circuit*, puisque c'est le courant que génère la cellule sous éclairement à tension nulle (en court circuit). La valeur V_{co} à l'inverse, est *la tension de circuit ouvert*, tension de la cellule solaire sous éclairement à courant nul

I.6.2. Schéma équivalent d'une cellule solaire

I.6.2.1 Cas d'une cellule solaire idéale [5] :

La cellule solaire est dite idéal si la relation courant-tension est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (I.11)$$

La cellule solaire sous éclairage peut-être schématisé par un générateur de courant I_{ph} (un courant inverse proportionnel à la lumière incidente) en parallèle avec une diode délivrant un courant.

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (I.12)$$

Nous obtenons ainsi le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale, présenté sur la figure suivante :

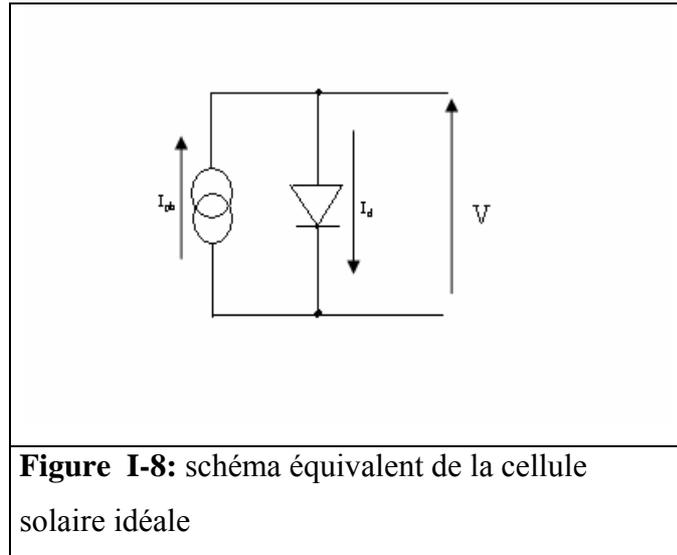


Figure I-8: schéma équivalent de la cellule solaire idéale

I.6.2.2 Cas d'une cellule solaire réelle [5] :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte de deux résistances ; une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions, et une résistance R_{sh} (shunt) en parallèle avec le générateur de courant qui caractérise les divers courant de fuite dus à la diode.

Si V est la tension aux bornes de la diode, l'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (I.13)$$

$$I_{ph} = I + I_d + I_{sh} \quad (I.14)$$

$$I_{sh} = (V + IR_s) / R_{sh} \quad (I.15)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.16)$$

$$\text{On pose: } R_{sh} = 1/G_p \quad (I.17)$$

Donc l'équation devient :

$$I = I_{ph} - \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - G_p(V + IR_s) \quad (\text{I.18})$$

Le schéma équivalent de la cellule solaire est le modèle représenté à la figure suivante :

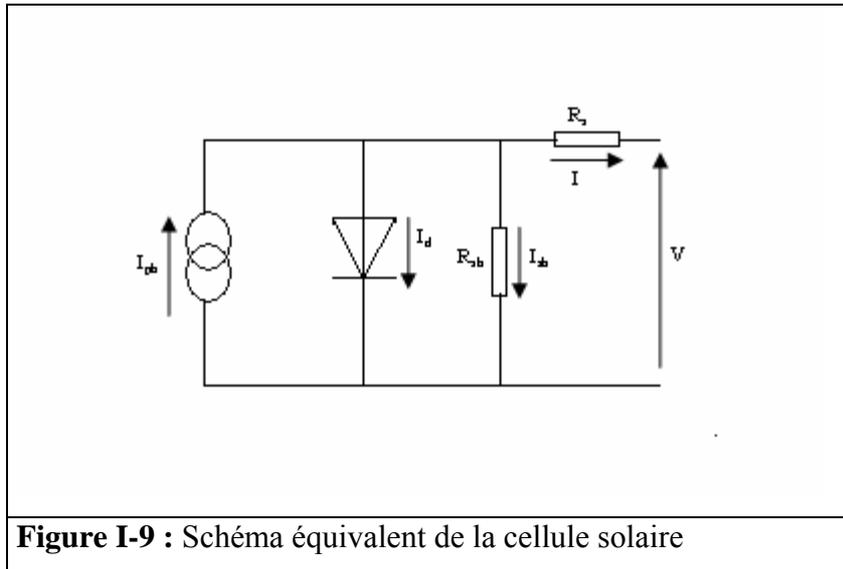


Figure I-9 : Schéma équivalent de la cellule solaire

I.7. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire [2] :

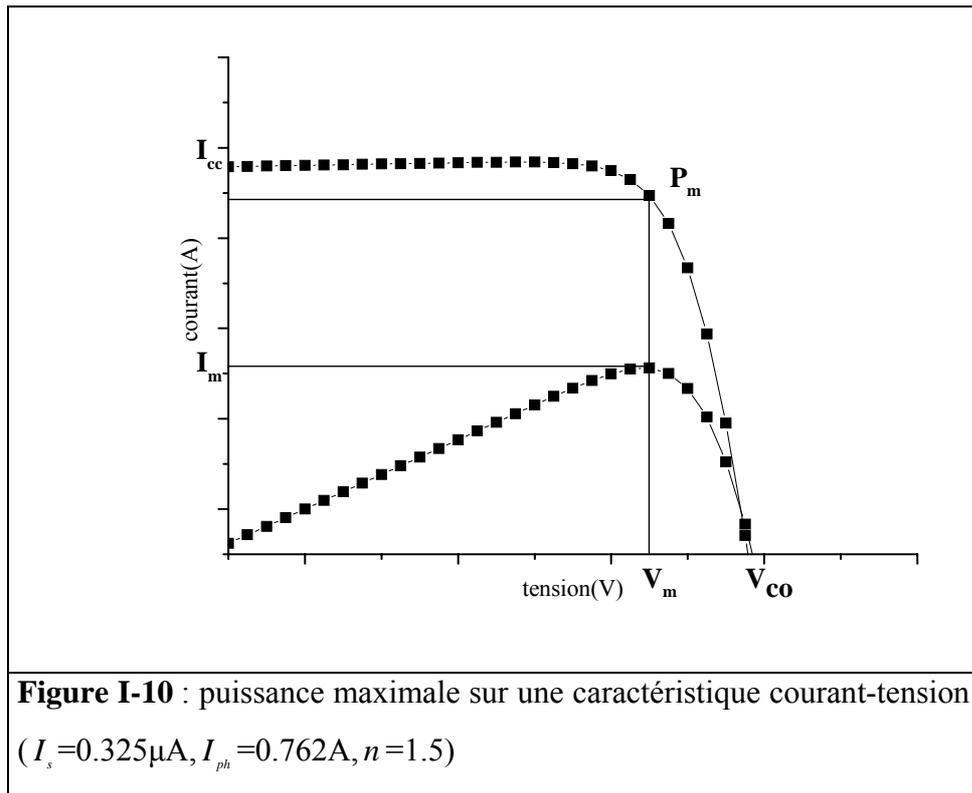
Le comportement d'une cellule solaire est généralement étudié à partir de quatre principales grandeurs I_{cc} , V_{co} , I_m , V_m :

I.7.1. Courant et tension maximale

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque sous illumination est le paramètre essentiel, c'est le point idéal de la caractéristique courant-tension. Les valeurs de tension (V_m) et de courant (I_m) tel que $P_m = I_m \times V_m$, appelés également tension et courant maximums, sont importantes aussi.

On a tracé sur la figure suivante la caractéristique courant-tension sous lumière d'une cellule solaire, les valeurs des paramètres utilisés pour générer la courbe I - V sont tirées de la référence [8].

Le point P_m situé au coude de la caractéristique, est dit point de puissance maximale.



I.7.2. courant de court-circuit [9]

Le courant de court circuit I_{cc} est la valeur de courant lorsque la tension est nul ($V = 0$), dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.18), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(R_s I_{cc})}{nkT}} - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{I.19})$$

Pour la plupart des cellules solaires (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_s \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{nkT}} - 1 \right)$ devant I_{ph} . l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{I.20})$$

Pour une cellule au silicium $I_{cc} = 30 \text{ A/cm}^2$ pour un éclairement maximal.

I.7.3. tension de circuit ouvert [9]

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (la tension maximal d'une cellule solaire ou du générateur photovoltaïque)

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \log \left[\frac{I_{ph}}{I_s} - 1 \right] \quad (I.21)$$

I.7.4. Le facteur de forme

Le facteur de forme est égal au rapport de la puissance maximal au produit $I_{cc} \times V_{co}$, ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins carrée de la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale a 1, la puissance P_m sera égal à $I_{cc} \times V_{co}$. Généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

I.7.5. Le rendement

Le rendement η définit le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule solaire

Si S est la surface de la cellule et E l'éclairement le rendement énergétique s'écrit:

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.22)$$

$$\eta = F_F \times V_{co} \times \frac{I_{cc}}{E \times S} \quad (I.23)$$

I.8. Influence de l'éclairement et de la température:

La température et l'éclairement modifier la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire, pas dans sa forme générale, mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} et le produit $I_m \times V_m$

I.8.1. Influence de l'éclairement

Le photocourant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineuses. Le photocourant crée dans une cellule solaire est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire [9].

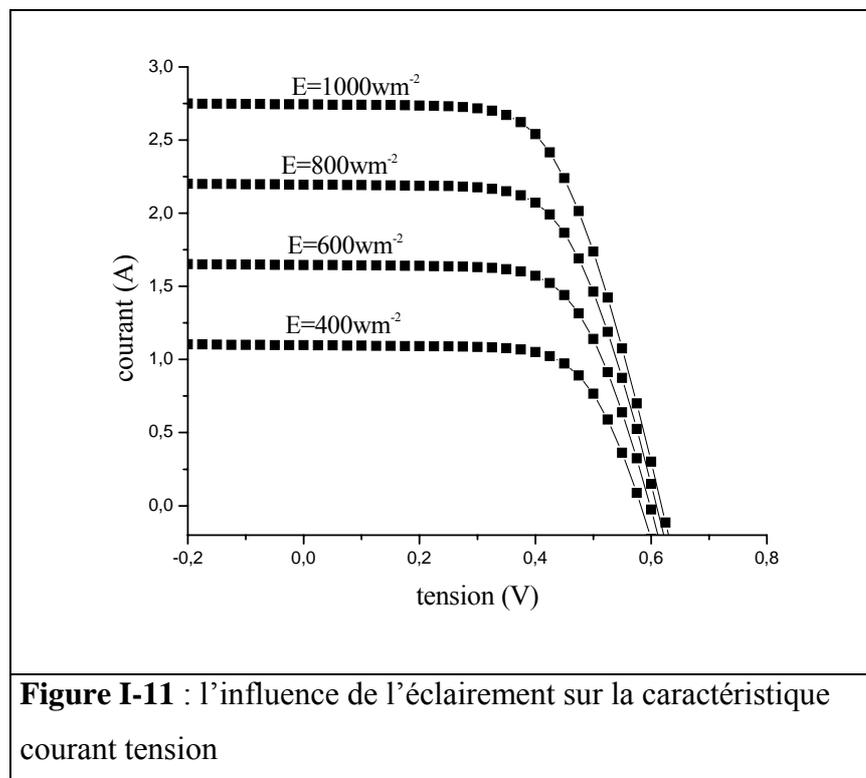
La figure I-11 présente les caractéristiques d'une cellule au Silicium de 10 cm de diamètre. On a tracé la variation du courant par rapport à la tension pour plusieurs éclairements. La variation de I_{cc} avec l'éclairement est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$I_{cc} = I_{ph} = \alpha(T)ES \quad (I.24)$$

- E : est l'éclairement
- S : la surface de la cellule en m^2
- $\alpha(T)$: un coefficient dépendant faiblement de la température il est de l'ordre $0,35A/W$ pour une cellule solaire au silicium pour un diamètre 10 cm [4]. le courant de la cellule est donné par les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - G_p (V - IR_s) \quad (I.25)$$

$$I = \alpha(T)ES - I_s \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - G_p (V - IR_s) \quad (I.26)$$



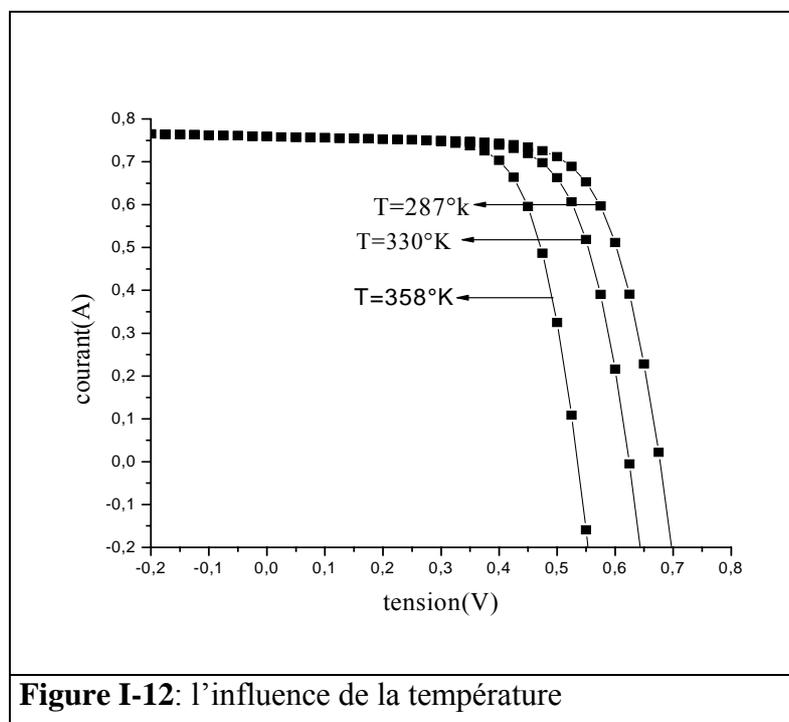
On remarque que l'accroissement de l'éclairement provoque une augmentation proportionnelle au photocourant [10]. Par contre la tension de circuit ouvert présente une légère diminution lorsque l'éclairement diminue.

I.8.2. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, il faut garder à l'esprit que sur la majeure partie d'énergie incidente, une très faible proportion est réfléchiée par la surface du capteur et environ 13% est extraite sous forme énergie électrique. En conséquence c'est plus de 85% de l'énergie incidente qui devra être dissipée en chaleur [11]

La figure I-12 montre l'influence de la température, sur la caractéristique de la cellule solaire lorsque la température varie, on observe une augmentation du photocourant lorsque la température croît, mais également le courant de la diode augmente très rapidement avec la température.

Il en résulte une diminution de la tension de circuit ouvert. L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension V_m et un léger accroissement du courant I_m et par la suite une baisse de la puissance P_m



I.9. Pertes dans les cellules solaires

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Ces pertes sont citées ci-dessous.

I.9.1. Absorption incomplète

Les photons dont l'énergie est inférieure à la largeur de la bande interdite (E_g) sont soit dissipés en chaleur, soit absorbés par les contacts ohmiques. Plus E_g est élevée, plus ce phénomène est probable [12].

I.9.2. Excès d'énergie

Les photons d'énergie supérieure au gap ne pourront générer qu'une seule paire électron-trous. L'excès d'énergie est dissipé en chaleur. Dans ce cas, plus E_g est élevée, moins ce phénomène est probable [12].

I.9.3. La résistance série

La résistance série R_s qui caractérise essentiellement la résistance d'accès au cœur de la cellule solaire, peut varier de 1 à 3 Ω [11].

I.9.4. La résistance parallèle

La résistance parallèle R_p traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur, elle peut aussi être due à un court-circuit sur le bord de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [13].

I.9.5. Le rendement de collecte

Correspondant au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photogénérés.

I.9.6. Réflexion à la surface

Une partie de la radiation incidente est réfléchi à la surface de la cellule.

I.9.7. Facteur de forme

Le facteur de forme est limité à 0.89% du fait de la caractéristique exponentielle de la caractéristique courant-tension.

I.10. Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de cellules solaires assemblées pour une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière, la cellule solaire ne produit qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W avec une tension de moins d'1 volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque.

Les connexions en séries de plusieurs cellules augmentent la tension pour même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Un assemblage de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et l'ensemble des panneaux d'une installation s'appelle un champ photovoltaïque (*figure I-13*)

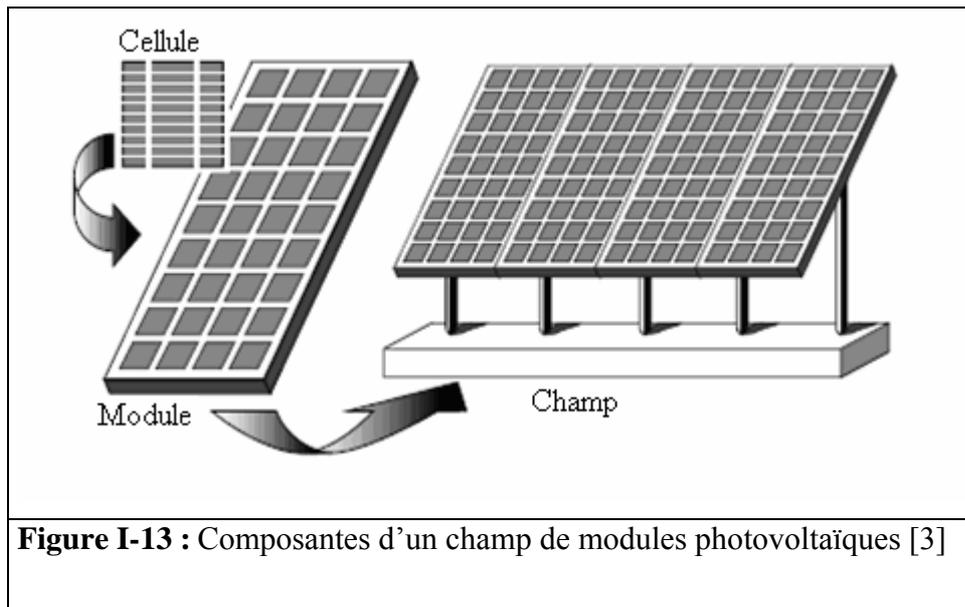


Figure I-13 : Composantes d'un champ de modules photovoltaïques [3]

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des rappels théoriques sur les cellules photovoltaïques, la physique de la cellule, la conversion et le système photovoltaïque et la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire

Chapitre II

Simulation de la caractéristique IV

II. Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la simulation de la caractéristique courant-tension (I - V) d'une cellule solaire, ayant pour paramètres, un courant de saturation I_s , un facteur d'idéalité n et un photocourant I_{ph} . La relation qui lie le courant à la tension est donnée par :

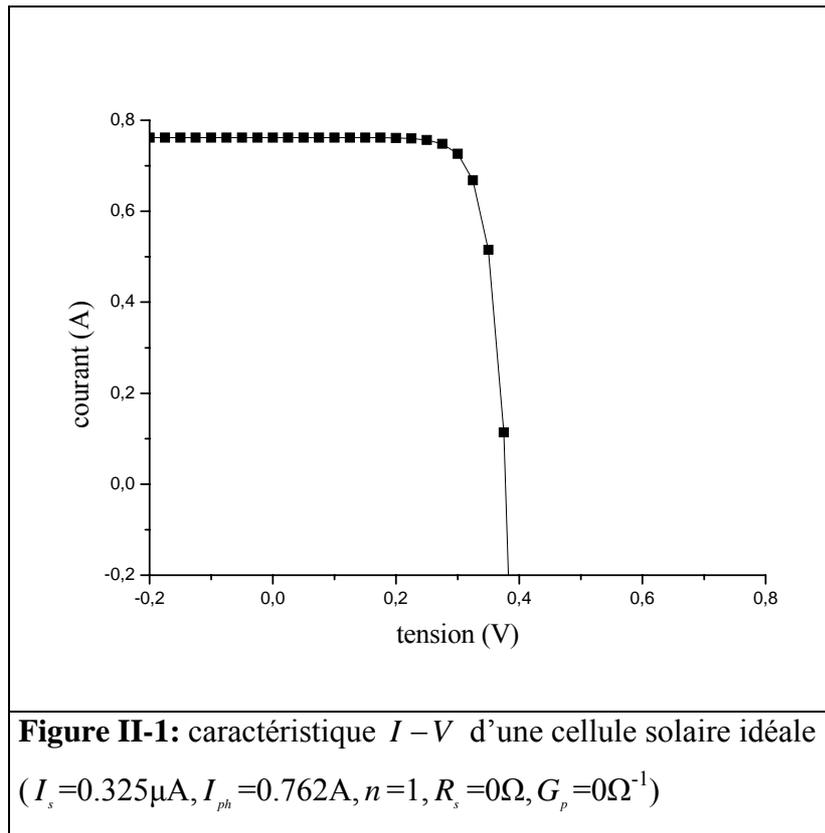
$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(V - IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - G_p (V - IR_s) \quad (\text{II.1})$$

Où k est la constante de Boltzmann, T la température, q la charge électrique et V est la tension appliquée.

II.2. Caractéristique I-V d'une cellule solaire idéale

Pour déterminer la courbe caractéristique de la cellule solaire idéale avec $n = 1$, $R_s = G_p = 0$, on part de la caractéristique connue par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$



La figure II-1 illustre les résultats obtenus par l'expression (II. 2) (Le cas idéal pour la cellule solaire). Nous avons simulé la caractéristique $I-V$ en reprenant les valeurs des paramètres avec $n=1$, $I_s=0.235 \times 10^{-6} \text{A}$, $I_{ph}=0.762 \text{A}$ et pour une température $T=300 \text{K}$

La courbe obtenue est très familière pour les spécialistes des cellules solaires. C'est une courbe classique. On remarque que lorsque les valeurs de la tension sont négatives le courant reste constant, est égale à I_{ph}

II.3. Influence du facteur d'idéalité (n) et du photocourant (I_{ph})

Nous avons porté les courbes de la caractéristique $I-V$ données par des différentes valeurs du de facteur d'idéalité (n) et de photocourant (I_{ph}) dans les figures II-2, II-3 respectivement.

On remarque dans la figure II-2 :

Que la diminution de n (facteur d'idéal) provoque une réduction de la tension de circuit ouvert par contre I_{cc} le courant de court-circuit reste constant [14].

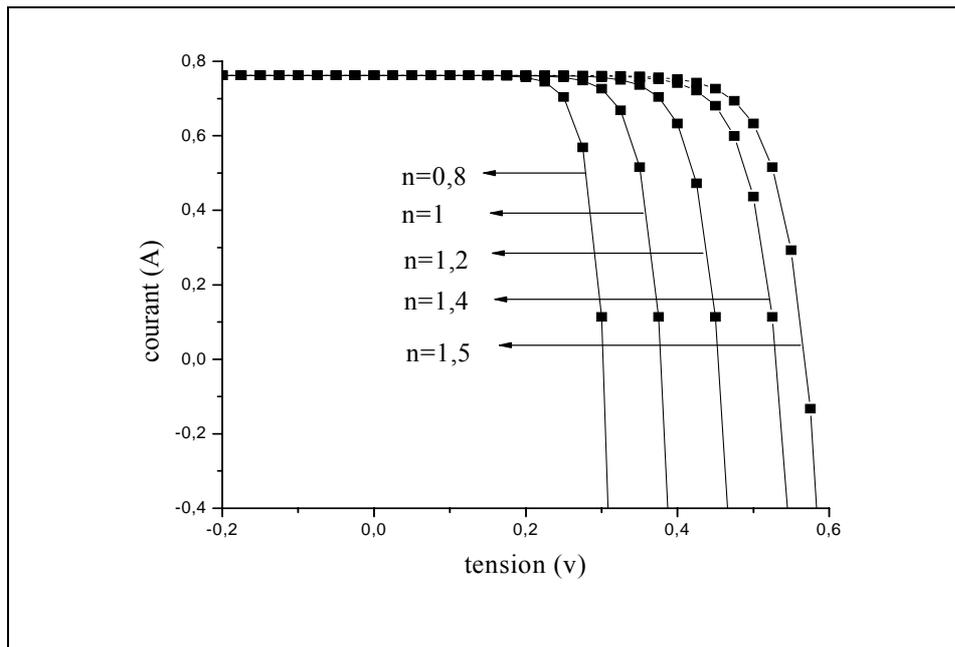


Figure II-2 : effet de facteur d'idéalité sur la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire ($n=1.5$, $I_s=0.235 \cdot 10^{-6}$ A, $I_{ph}=0.762$ A $T=300$ K)

On constate dans la figure II-3, que lorsque le photocourant I_{ph} augmente, le courant de court-circuit I_{cc} croît mais la tension de circuit ouvert présente une légère diminution.

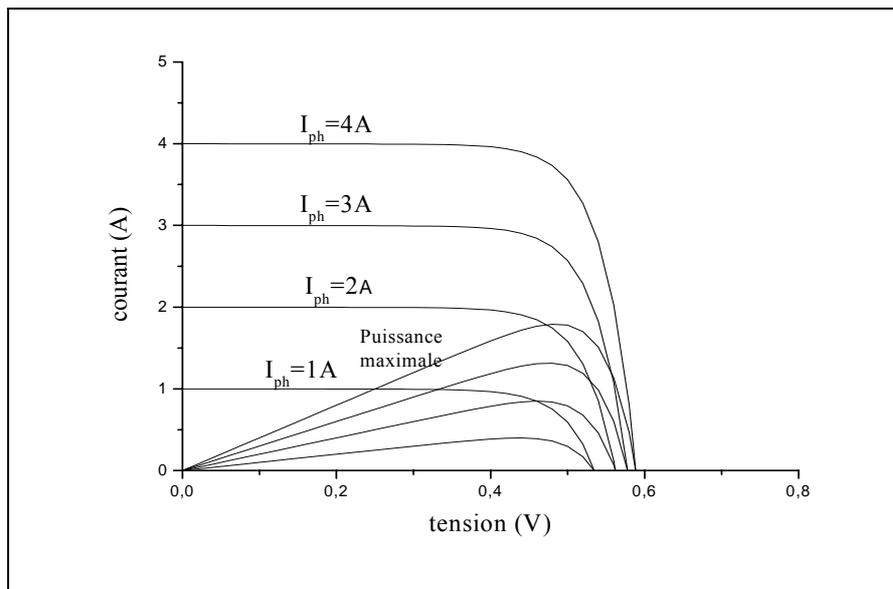


Figure II-3: Effet de photocourant sur la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire ($I_s=1.00E-6$, $n=1.5$, $R_s=0.001\Omega$, $G_p=0.01\Omega^{-1}$) [14]

II.4. Influence de la résistance série et de la conductance

parallèle :

Les performances d'une cellule solaire sont d'autant plus dégradées que si la résistance série est grand et/ou que la résistance shunt est faible.

Si on tient compte de la résistance série R_s et de la conductance parallèle G_p , la caractéristique est alors décrite par la relation

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right] - G_p (V + R_s I) \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II. 3) est la relation courant-tension décrivant le modèle à seule exponentiel. C'est une équation non linéaire et implicite. La solution de cette équation peut être effectuée par la méthode de newton, qui une fois résolue fournit les valeurs des points I - V .

Nous avons appliqué la méthode de newton sur la cellule solaire composée d'une seul diode, les paramètres exacte de la cellule solaire sont $R_s = 0.0454\Omega$, $I_s = 0.325 \times 10^{-6} \text{A}$, $I_{ph} = 0.762 \text{A}$, $n = 1.5$, $G_p = 0.0297\Omega$. La courbe obtenue est similaire à celle de *la figure II-4*

Alors que dans le cas idéal on a $R_s = 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$, ces résistances donnent dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode.

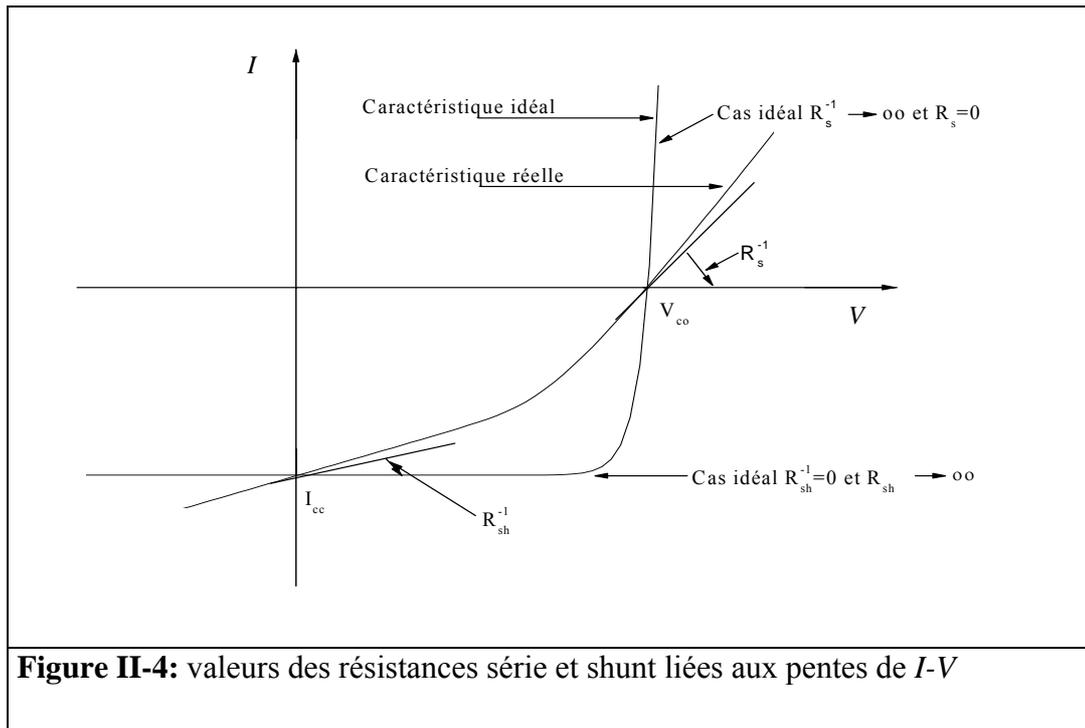
En première approximation et en considérant que R_s présente une valeur faible et que $R_s \ll R_{sh}$ nous pouvons estimer les valeur de R_s et R_p partir de la différenciation de l'expression déduite de (II.3) [15]

$$\left[\frac{dV}{dI} \right]_{I=0} \approx R_s \quad (\text{II.4})$$

$$\left[\frac{dV}{dI} \right]_{V=0} \approx R_{sh} \quad (\text{II.5})$$

Donc $R_s^{-1} = \left[\frac{dI}{dV} \right]_{I=0}$ et $R_{sh}^{-1} = \left[\frac{dI}{dV} \right]_{V=0}$; les pente de la caractéristique

courant-tension d'une cellule solaire sous illumination, calculées $I = 0$ (circuit ouvert) et $V = 0$ (court circuit) donnent respectivement les valeurs inverses de la résistances série et shunt (*la figure II-4*)



II.4.1. Influence de la résistance série R_s

L'effet de la résistance série est montré sur *la figure II-5*, on remarque que la tension de circuit ouvert n'est pas modifiée, mais la caractéristique se déforme très rapidement. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique courant-tension dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule, et le facteur de remplissage est réduit, *la figure (II-7)* si dessus montre la variation des puissances de fonctionnement maximal P_m et de facteur de remplissage F_F [8,14].

II.4.2. Influence de résistance shunt R_{sh}

Quant à la résistance shunt $R_{sh} = \frac{1}{G_p}$, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. Sur *la figure II-6* nous avons rassemblé nos résultats trouvés concernant l'influence de la variation de la résistance shunt sur la caractéristique $I-V$ [15].

On observe que la tension de circuit ouvert n'est pas modifiée, mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique courant-tension de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant

La figure (II-8) montre la variation de la puissance de fonctionnement maximale et le facteur de remplissage [14] en fonction de la variation de G_p .

- $F_F = 0.76$.

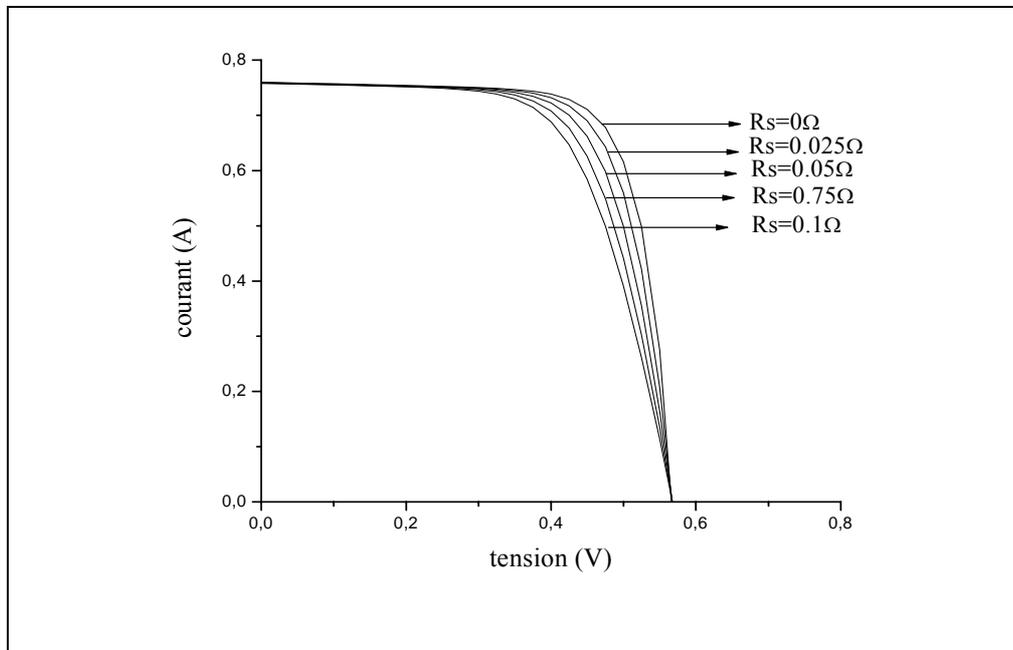


Figure II-5 : Effet de la résistance série sur la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire ($n=1.5$, $I_s=0.235 \cdot 10^{-6}A$, $I_{ph}=0.762A$ $T=300 K$, $G_p=0.0297\Omega^{-1}$)

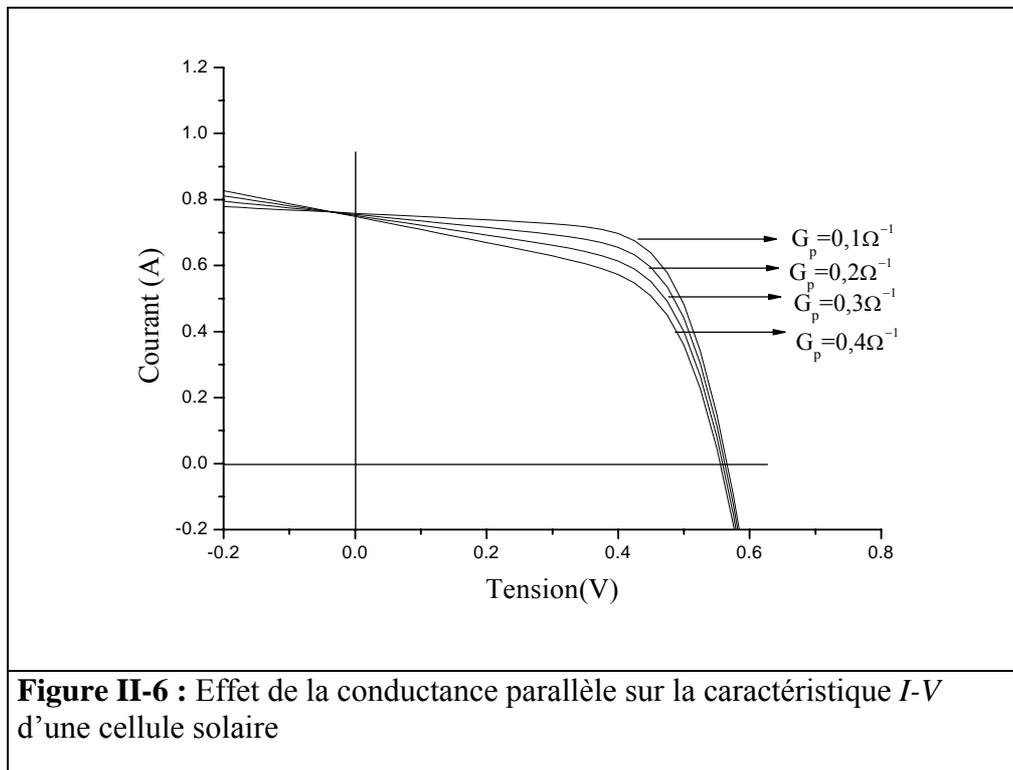
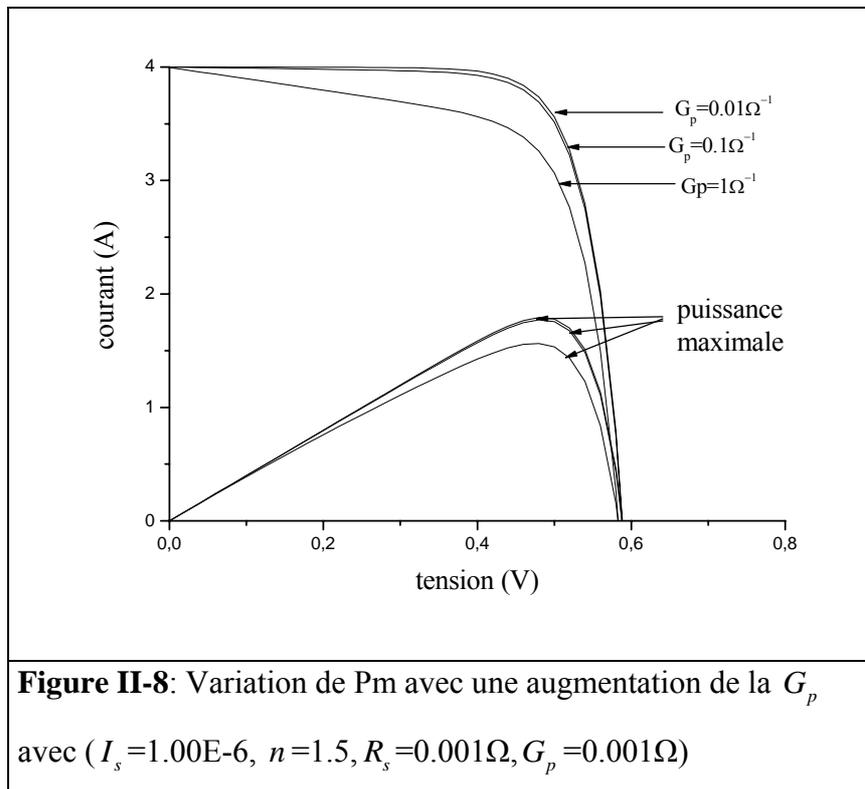
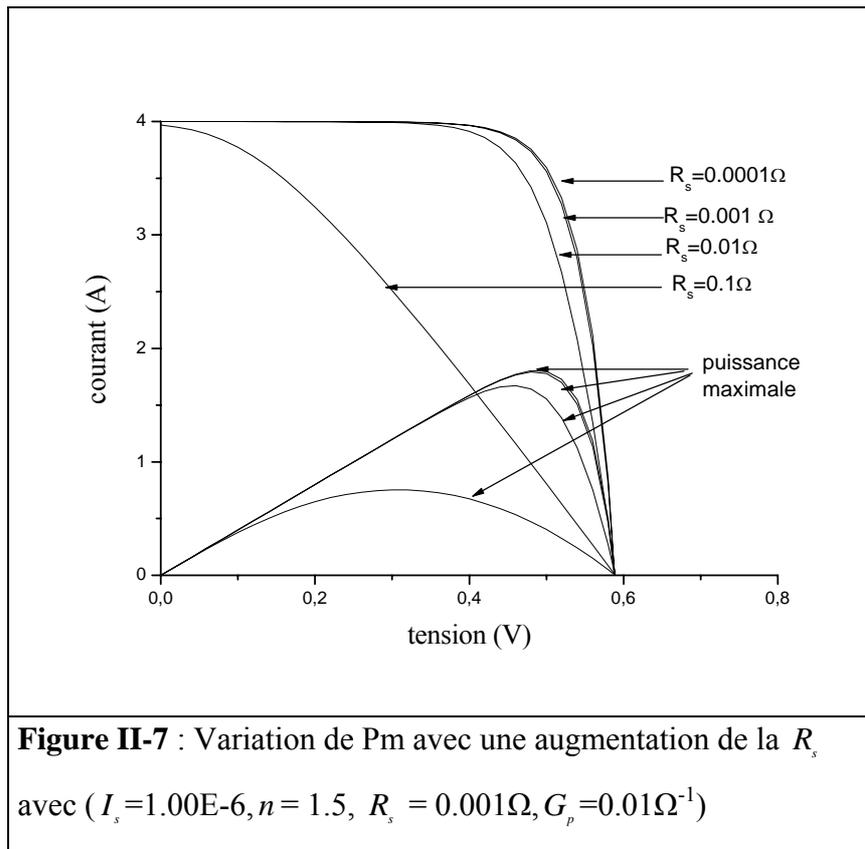


Figure II-6 : Effet de la conductance parallèle sur la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire



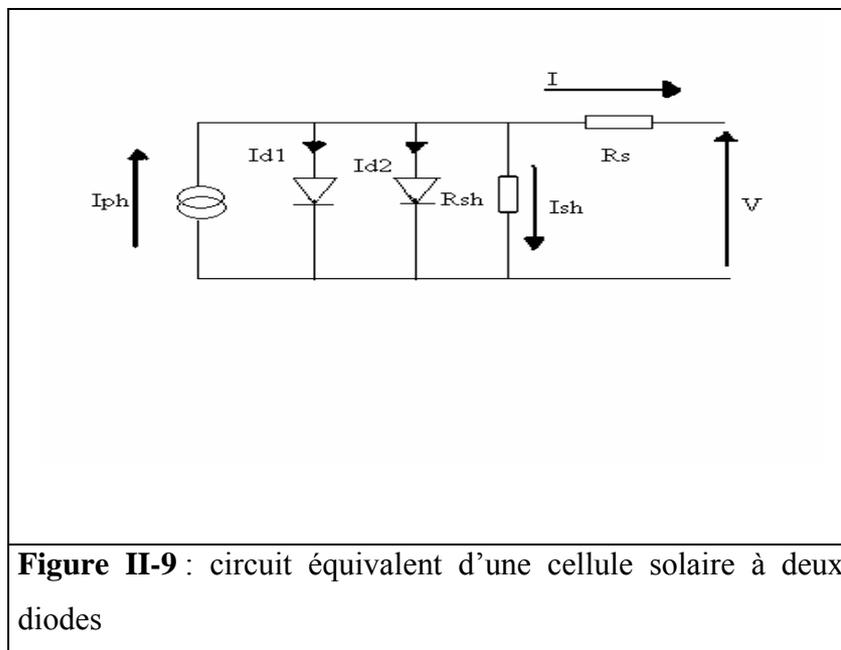
II.5. La cellule solaire à double exponentielle :

Dans cette partie on va considérer le cas d'une cellule à double exponentielle. En considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (Figure II-9). Nous pouvons considérer le schéma équivalent comme étant le cas d'une cellule solaire idéal comprenant une source de courant et deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le photocourant généré ; les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion I_{d1} , et le courant de génération recombinaison I_{d2} dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE).

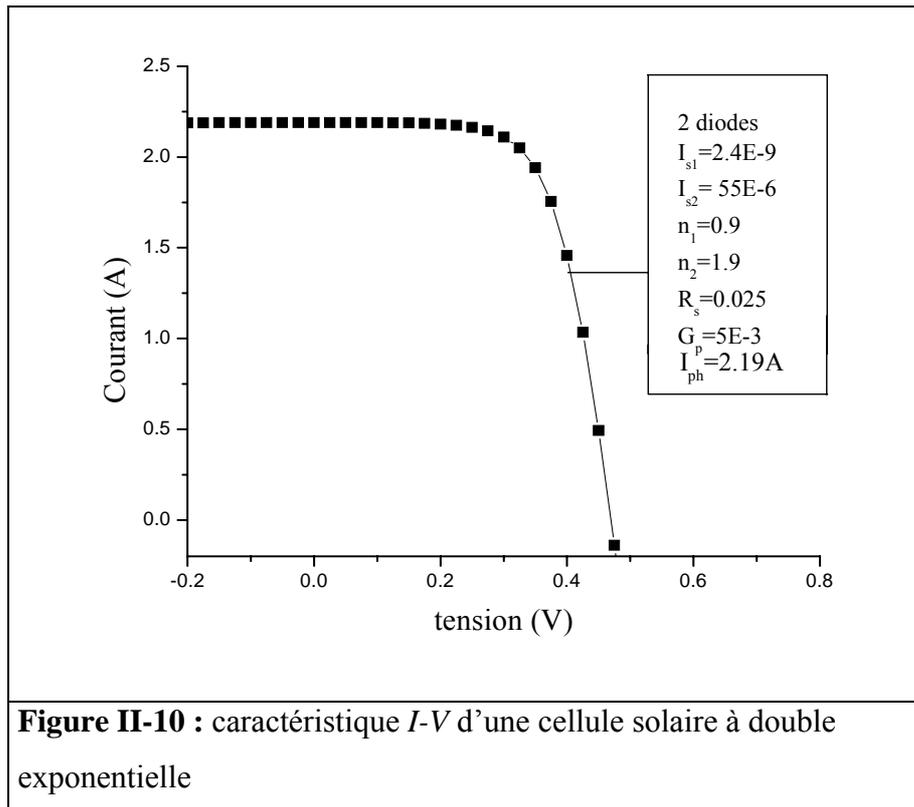
La caractéristique est alors d'écrite par la relation suivante [16] :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right) - G_p (V - IR_s) \quad (\text{II.6})$$

Dans cette expression I_{s1} est le courant de saturation et n_1 le facteur d'idéalité de la première diode ; I_{s2} le courant de saturation et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode.



La figure II-10 représente la caractéristique courant tension à double exponentielle.



II.6. Simulation de la caractéristique I-V d'une cellule solaire basée sur les solutions analytiques explicite [9] :

II.6.1. Fonction de Lambert

La fonction W de Lambert, nommé par Johann Heinrich Lambert, est aussi appelée *la fonction Oméga* et la fonction réciproque de f définie par :

Pour tout nombre complexe W,

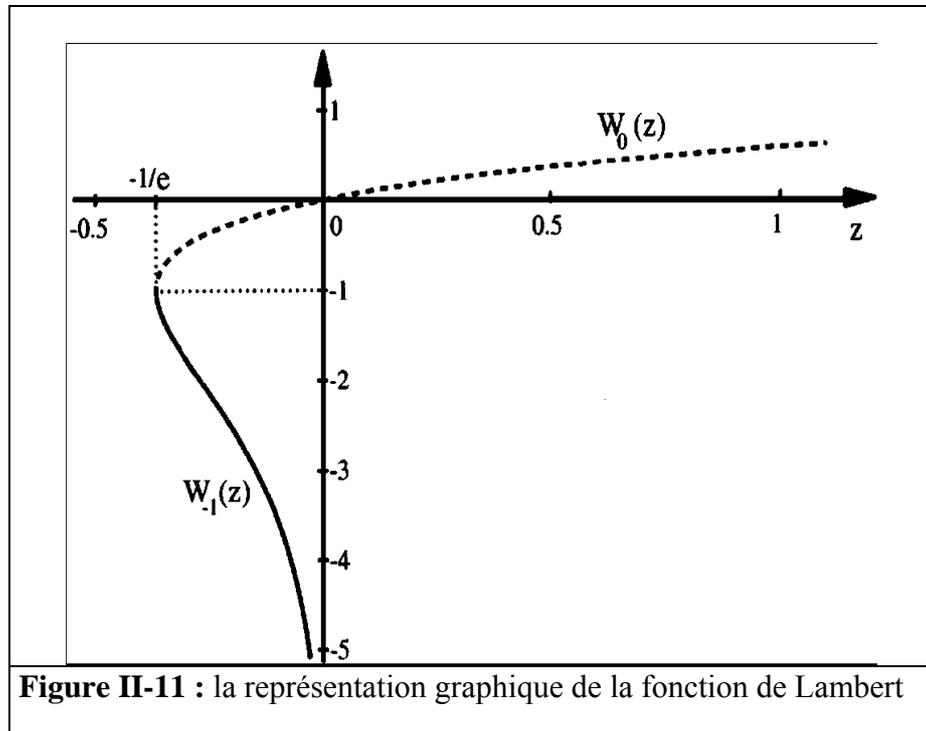
$$f(W) = we^w \tag{II.7}$$

Ce qui implique que pour tous les nombres z nous avons :

$$W(z) \exp W(z) = z \tag{II.8}$$

Si z est réel et $z < -1/e$, alors la fonction W est multiforme dans les nombres complexes. Si z réel et $-1/e \leq z < 0$, il y a deux valeurs réelles pour $W(z)$ la branche satisfaisant $-1 \leq W(z)$ est signifié par $W_0(z)$ est appelé la branche principal de la fonction de Lambert, et l'autre branche satisfaisant $W(z) \leq -1$ est notée par $W_{-1}(z)$. Si z réel et $z \geq 0$ il y a une seule valeur pour $W(z)$, qui appartient aussi à la branche principal $W_0(z)$. C'est cette

branche qui sera utile à nous dans la suite. Les deux branches $W_{-1}(z)$ et $W_0(z)$ sont représentées sur la figure suivante [17]:



La fonction W de Lambert ne peut pas être exprimée à l'aide de fonctions élémentaires. Elle peut être utilisée pour résoudre diverses équations dans divers domaines (mathématique et physiques) qui comportent des exponentielles et apparaît aussi dans les solutions d'équations différentielles.

II.6.2. Caractéristique I - V d'une cellule solaire par la fonction de Lambert

Pour générer les caractéristiques d'une cellule solaire, les méthodes proposées dans ce manuscrit ou d'autres méthodes en littérature sont basées sur des méthodes numériques. La méthode de Newton est la plus utilisée vu sa simplicité et sa rapidité de convergence. Pour éviter ces méthodes numériques ou dans le cas de la méthode de Newton éviter encore le problème du choix du point initial, nous allons exploiter la fonction de Lambert pour résoudre analytiquement l'équation qui simule une caractéristique courant-tension.

En effet si on part de l'équation d'une diode à savoir :

$$I = I_s \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (\text{II.9})$$

Cette équation implicite peut être réarrangée pour devenir explicite en utilisant la fonction de Lambert. Après calcul et en particulier la séparation des termes en I et les termes en V , nous pouvons obtenir l'expression suivante :

$$\frac{(I+I_s)R_s}{nV_T} \exp\left(\frac{(I+I_s)R_s}{nV_T}\right) = \frac{I_s R_s}{nV_T} \exp\left(\frac{(V+I_s R_s)}{nV_T}\right) \quad (\text{II.10})$$

Le terme à gauche dans l'équation (II.10) est une fonction explicite du courant à travers la quantité W tel que :

$$W = \frac{(I+I_s)R_s}{nV_T} \quad (\text{II.11})$$

L'équation (II.10) peut s'écrire donc sous la forme

$$We^W = x \quad (\text{II.12})$$

La solution de l'équation (II.10) est donnée par une fonction multibranche $w = W_k(x)$ dite fonction de Lambert.

Dans notre cas la branche qui satisfait notre problème physique (diode ou cellule solaire est la branche $k = 0$). Qui satisfait $W_0(x) = 0$ pour $x = 0$.

Dans la cas de la diode la solution de l'équation est donnée par :

$$I(V) = \frac{nV_T}{R_s} W_0 \left[\frac{I_s R_s}{nV_T} \exp\left(\frac{(V+I_s R_s)}{nV_T}\right) \right] - I_s \quad (\text{II.13})$$

Il est clair que la courbe $I(V)$ peut être simulé directement et facilement sans recourt à une méthode numérique, mais il faut savoir calculer la fonction de lambert.

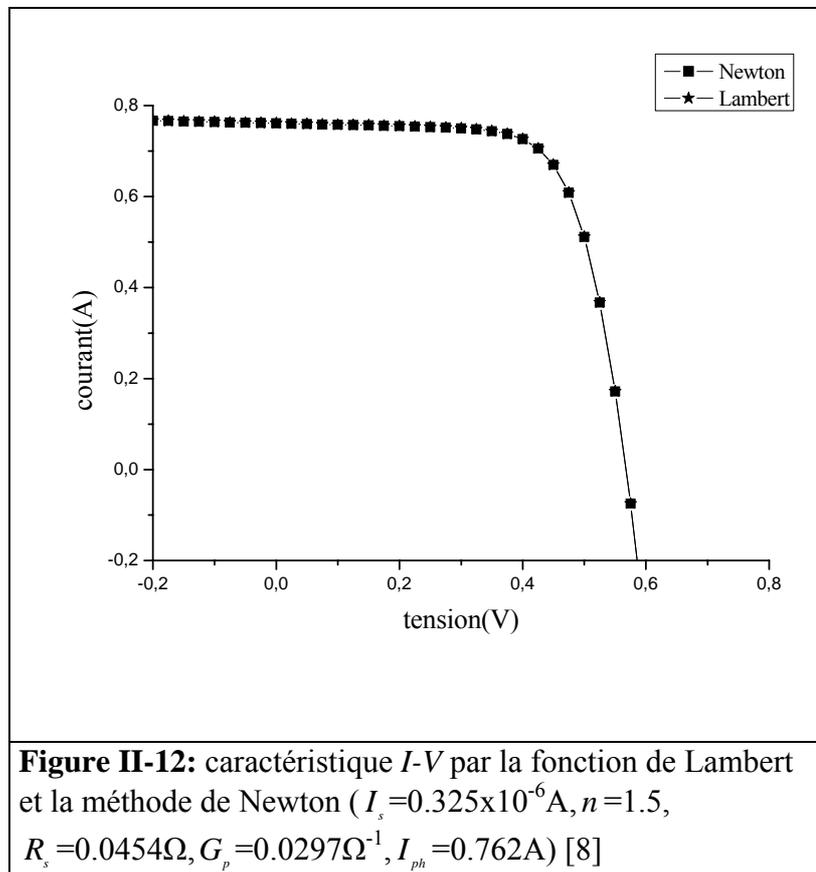
Cette relation a été développée initialement par Banwel et al [18].

Dans le cas d'une cellule solaire d'autres auteurs ont développées les expressions du courant en fonction de la tension ou inversement, la solution approximative pour chaque variable I et V sous forme explicite est donnée par [19] :

$$I = \frac{nV_{th}}{R_s} W \left\{ \frac{I_s R_s}{nV_{th} (1 + R_s G_p)} e^{\left[\frac{V + R_s (I_s + I_{ph})}{nV_{th} (1 + R_s G_p)} \right]} \right\} + \frac{V G_p - (I_s + I_{ph})}{1 + R_s G_p} \quad (II.14)$$

$$V = -nV_{th} W \left[\frac{I_s}{nV_{th} G_p} e^{\left(\frac{I + I_s + I_{ph}}{nV_{th} G_p} \right)} \right] + I \left(R_s + \frac{1}{G_p} \right) + \frac{I_s + I_{ph}}{G_p} \quad (II.15)$$

La figure II-12 représente la caractéristique I-V simulé en utilisant la fonction de Lambert



Pour faire la comparaison, nous avons simulés les caractéristiques I - V par la méthode de Newton et par la fonction de Lambert et les données expérimentales. Ce fait est illustré par la figure (II-13), pour la cellule solaire à 33°C, et par la figure (II-14), pour le module solaire à 45 °C.

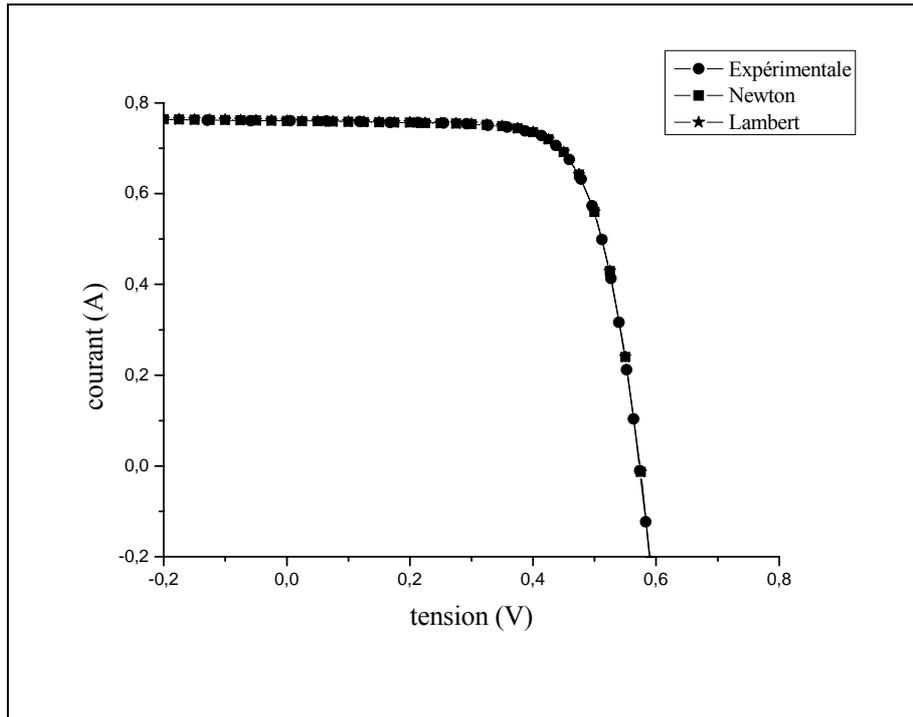


Figure II-13 : caractéristique I - V par la fonction de Lambert, la méthode de Newton et les données expérimentales d'une cellule solaire ($I_s = 0.3223 \times 10^{-6} \text{ A}$, $n = 1.4837$, $R_s = 0.0364 \Omega$, $G_p = 0.0186 \Omega^{-1}$, $I_{ph} = 0.7608 \text{ A}$) [20]

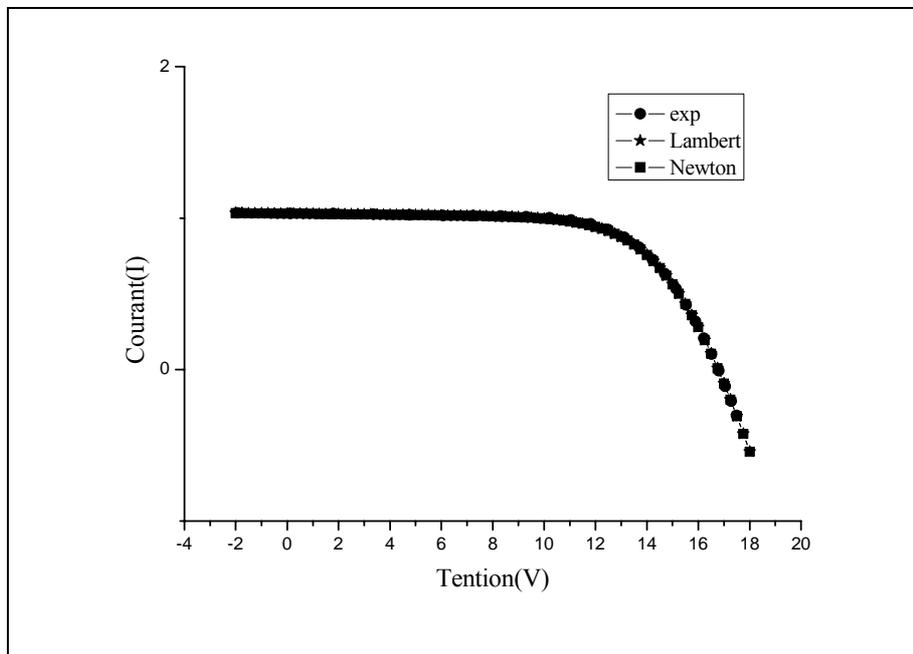


Figure II-14 : caractéristique I - V par la fonction de Lambert, la méthode de Newton et les données expérimentales d'une module solaire ($I_s = 3.2876 \times 10^{-6} \text{ A}$, $n = 48.45$, $R_s = 1.2057 \Omega$, $G_{ph} = 0.00182 \Omega^{-1}$, $I_{ph} = 0.10318 \text{ A}$) [20]

II.7. Conclusion

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de certains paramètres : la résistance série R_s , la conductance parallèle G_p , le photocourant I_{ph} et l'éclairement E sur la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire.

Nous avons utilisé une méthode de calcul analytique par la fonction de Lambert pour éviter le choix du point initial dans la méthode de Newton.

Pour extraire les paramètres d'une cellule solaire nous avons utilisé la méthode d'optimisation verticale, et la méthode des algorithmes génétiques. Ce point fera l'objet de notre troisième chapitre.

Chapitre III

Extraction des paramètres

III. Méthode d'extraction des paramètres

III.1. Introduction

Il existe plusieurs méthodes d'extraction et estimation des paramètres d'une cellule solaire, la majorité de ces méthodes [8-21] sont basés sur une estimation au sens des moindres carrés entre le courant expérimentale et le courant théorique. Les bases de ces méthodes sont très connues. Nous donnons ci-dessous une explication abrégée [12-21].

Puisque N valeurs expérimentales et théoriques représentés respectivement $I_i^{\text{exp}}, I_i^{\text{th}}$ $i=1, N$ nous avons obtenues les valeurs théoriques en utilisant un certain modèle du courant (équation (II. 1)) pour un certain ensemble des paramètres nous cherchons les valeurs des paramètres qui minimisent (optimisent) le critère :

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} (I_i^{\text{exp}} - I_i^{\text{th}}) \quad (.1)$$

Par rapport aux paramètres de la cellule solaires l'analyse mathématiques nous révèle que se minimum est atteint au point où le gradient g de S par rapport aux paramètres s'annule, dans le cas où les paramètres de la cellule solaire (I_s, R_s, n, G_p, I_{ph}) le gradient S s'exprime par :

$$\text{grad}(S) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial I_s} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial R_s} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial G_p} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial I_{ph}} = 0 \end{array} \right\} \quad (.2)$$

Il s'agit de résoudre un système d'équation non linéaire, en utilisant une méthode numérique de type Newton-Raphson [22-23] qui permet de trouver la solution.

Récemment les méthodes d'optimisation vertical (MOV) [24] et latérale (MOL) [21] en été proposées. Elles minimisent respectivement les fonctions objectives.

$$S_V = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right)^2 \quad (.3)$$

et

$$S_L = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{V_i^{ex} - V_i^{th}}{V_i^{th}} \right)^2 \quad (.4)$$

La recherche du minimum se fait de la même manière que pour la méthode de moindre carré (LES), c'est-à-dire, on résout le système d'équation non linéaires donné par le gradient de la fonction objectif choisie par un algorithme efficace. Ces méthodes sont devenues très répandues, vu leurs précisions et leurs efficacités. L'extraction des paramètres par la méthode (MOV) fait l'objet de la partie suivante.

III.2.Méthode d'optimisation vertical

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à extraire les paramètres essentiels I_s, R_s, n, G_p , et I_{ph} à partir de la caractéristique $I-V$ pour caractériser les cellules solaires par la méthode (MOV) [12], la caractéristique $I-V$ est alors donné par la relation suivante

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right] - G_p (V + R_s I) \quad (.5)$$

On donne ci-dessous le principe, la validation et le test de la méthode. En suite nous appliquerons la méthode à une cellule solaire commerciale en utilisant un modèle à une seule exponentielle.

III.2.1. Principe de la méthode

Nous supposant N valeurs expérimental I_i^{exp} ($i = 0..N-1$) qui représente les régions directe et/ou inverse de la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire, où la méthode consiste à trouver les valeurs des paramètres qui

minimisent la somme des erreurs relatives quadratique entre les courants expérimentaux I_i^{exp} et théorique I_i^{th} générés par l'équation (III.5)

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{I_i^{\text{ex}} - I_i^{\text{th}}}{I_i^{\text{th}}} \right)^2 \quad (.6)$$

La différence fondamentale entre les deux méthodes (MOV) et (LES) est que la méthode (MOV) optimise l'erreur relative et (LES) optimise l'erreur absolue. La méthode (LES) ne prend pas en considération les faibles valeurs du courant au cours de l'optimisation, par contre la méthode (MOV) toutes les valeurs du courant seront significatives dans les processus d'optimisation

La solution de l'équation (III.6) nécessite que le gradient de la fonction S soit nul. Ceci conduit à la résolution du système d'équations non linéaires suivant :

$$g = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial I_s} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_i^{\text{th}}}{\partial I_s} \frac{I_i^{\text{ex}}}{(I_i^{\text{th}})^2} \left(\frac{I_i^{\text{ex}} - I_i^{\text{th}}}{I_i^{\text{th}}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_i^{\text{th}}}{\partial n} \frac{I_i^{\text{ex}}}{(I_i^{\text{th}})^2} \left(\frac{I_i^{\text{ex}} - I_i^{\text{th}}}{I_i^{\text{th}}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial R_s} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_i^{\text{th}}}{\partial R_s} \frac{I_i^{\text{ex}}}{(I_i^{\text{th}})^2} \left(\frac{I_i^{\text{ex}} - I_i^{\text{th}}}{I_i^{\text{th}}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial G_p} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_i^{\text{th}}}{\partial G_p} \frac{I_i^{\text{ex}}}{(I_i^{\text{th}})^2} \left(\frac{I_i^{\text{ex}} - I_i^{\text{th}}}{I_i^{\text{th}}} \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial I_{ph}} = -2 \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial I_i^{\text{th}}}{\partial I_{ph}} \frac{I_i^{\text{ex}}}{(I_i^{\text{th}})^2} \left(\frac{I_i^{\text{ex}} - I_i^{\text{th}}}{I_i^{\text{th}}} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (.7)$$

La solution de cette équation se calcule par la méthode de Newton, pour trouver les valeurs des paramètres I_s, R_s, n, G_p et I_{ph}

Il est bien connu que la méthode de Newton et toutes celles qui en dérivent (quasi-Newton) sont à convergence quadratique [22]. Ceci a pour conséquence que pour que l'algorithme converge, il faut que le point initial choisi soit très proche de la solution exacte. En plus, la méthode de Newton possède ses propres conditions de convergences. Le choix de point initial et la

convergence de la méthode doivent être soigneusement traités surtout que la (MOV) possède des minimums locaux [25].

III.2.2 Validation de la méthode

III.2.2.1 Algorithme de Newton

L'algorithme de Newton-Raphson est la généralisation du processus de Newton dans le cas multidimensionnel. Il s'applique à la recherche d'un minimum d'une fonction. Le problème initial est donc légèrement différent puisque l'on recherche un vecteur $X_k = (I_{s_k}, R_{s_k}, n_k, G_{p_k}, I_{phk})^T$, le vecteur généré par l'algorithme de Newton à k^{eme} étape. Si J_k , est le Jacobien (Hessien) du système (gradient) calculé à l'étape k . L'algorithme de Newton génère à l'étape $k+1$ le vecteur X_{k+1} par la récurrence [11-18].

$$X_{k+1} = X_k - J_k^{-1} g_k \quad (.8)$$

La convergence de l'algorithme de Newton n'est pas toujours garanti cependant elle est constatée le plus souvent si le choix de point initial est judicieux. En pratique, on utilise cette méthode pour optimiser une solution approchée, suffisamment proche de la solution optimale.

III.2.2.2 Test de la méthode

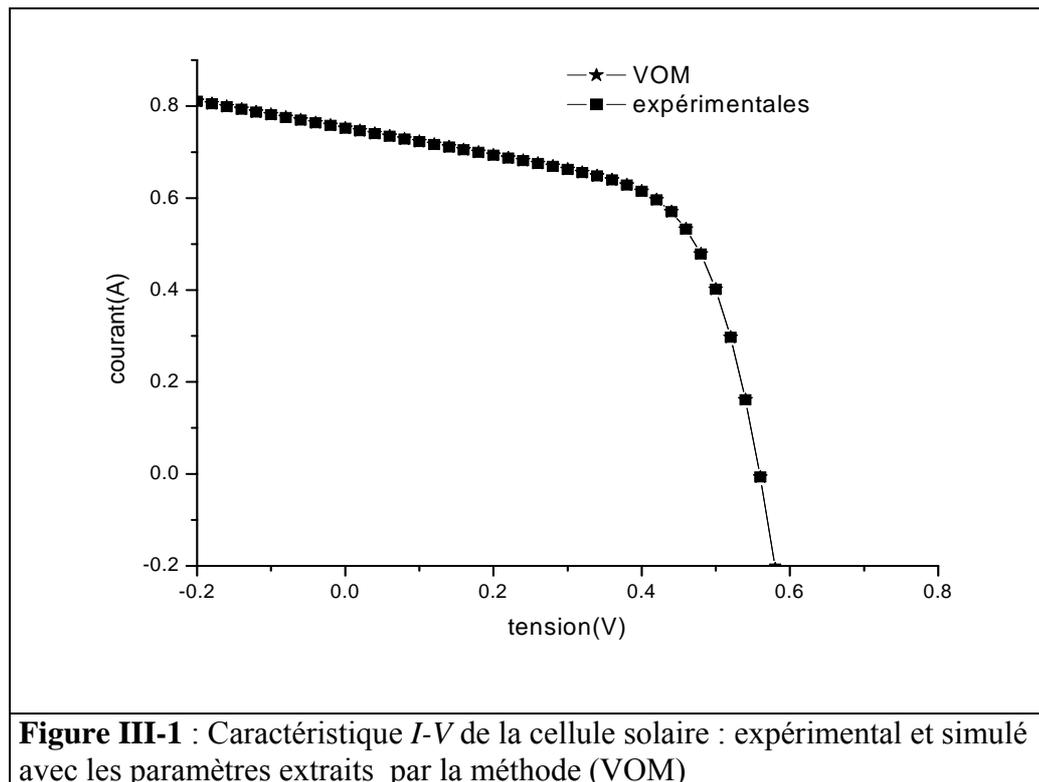
Pour valider la méthode de Newton nous l'avons appliquée à la cellule solaire théorique étudiée par sellai et al [8], les valeurs exactes de la cellule solaire sont $I_s = 0.325 \times 10^{-6}$ A, $n = 1.5$, $R_s = 0.0454 \Omega$, $G_p = 0.0297 \Omega^{-1}$, $I_{ph} = 0.762$ A.

Le premier test est celui de l'effet du choix du point initial. Nous avons testé notre méthode pour plusieurs points initiaux avec une petite augmentation de la valeur initiale donc lorsqu'on s'éloigne de la valeur exacte le nombre d'itération croit et la méthode diverge, les valeurs des paramètres trouvées sont données dans le tableau (III-1).

La figure (III.1) illustre la parfaite coïncidence entre la caractéristique I - V expérimental et simulée, avec les paramètres extraits par la méthode (MOV)

Tableau III-1 : Valeurs théorique et extraites des paramètres de la cellule solaire par la méthode (MOV)

Paramètre	Valeur théorique [8]	Par la (MOV)[24]
I_s (A)	0.325×10^{-6}	0.318094
R_s (Ω)	0.0454	0.045381
n	1.5	1.499999
G_p (Ω^{-1})	0.0297	0.029730
I_{ph} (A)	0.762	0.762000



III.3.Méthode des algorithmes génétiques

Dans cette partie Nous proposons une présentation simple de ces nouveaux outils d'optimisation que sont les algorithmes génétiques. Ce sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la

génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection, ect...

III.3.1. Historique

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont commencé dans les années cinquante lorsque plusieurs biologistes américains ont simulé des structures biologiques sur ordinateur. Puis entre 1960 et 1970, John Holland, sur la base des travaux précédents, développa les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. Malheureusement, les ordinateurs de l'époque n'étaient pas assez puissants pour envisager l'utilisation des algorithmes génétiques sur des problèmes réels de grande taille.

La parution de l'ouvrage de référence écrit de Goldberg [26] qui décrit l'utilisation des algorithmes génétiques dans le cadre de résolution de problèmes concrets a permis de mieux faire connaître ces derniers à la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation.

III.3.2. Analogie avec le fonctionnement biologique

Les algorithmes génétiques étant basé sur des phénomènes biologiques, il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique.

Les organismes vivants sont tout d'abord constitués de cellules comportant des chromosomes qui correspondent en fait à des chaînes d'ADN. L'élément de base de ces chromosomes (le caractère de la chaîne d'ADN) est un gène. Sur chacun de ces chromosomes, une suite de gènes constitue une chaîne qui code les fonctionnalités de l'organisme (la couleur des yeux, ...). L'AG génère aléatoirement une population initiale. Il opère, ensuite à un croisement des meilleurs chromosomes. Dans un cas simple, un gène sera représenté par un bit (0 ou 1), chromosome par une chaîne de bits et un individu par un ensemble de chaîne de bits.

III.3.3. principes des algorithmes génétiques

Le but d'un algorithme génétique est d'optimiser une fonction donnée appelée fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation ou encore fonction de

fitness dans un espace de recherche précis (aussi appelé espace d'état). La fonction agit comme une « boîte noire » pour l'algorithme génétique. Dans le cas général. Un algorithme génétique a besoin de cinq composants fondamentaux :

III.3.3.1 codage d'une population

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. En effet, les algorithmes génétiques agissent sur une population d'individus, et non pas sur un individu isolé. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un chromosome. Une population est donc un ensemble de chromosome. Chaque chromosome code un point de l'espace de recherche. L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome.

III.3.3.2 Un mécanisme de la population initial

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

III.3.3.3 Fonction d'évaluation et fonction de fitness

Pour calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, on utilise une *fonction d'évaluation*. L'évaluation d'un individu ne dépendant pas de celle des autres individus, le résultat fournit par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante : c'est le rôle de la fonction *fitness*.

Cette méthode permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population.

III.3.3.4 Des opérateurs permettant de diversifier

La population Au cours des générations et d'explorer en théorie la quasi-intégration de l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour

but de garantir l'exploration de l'espace d'état.

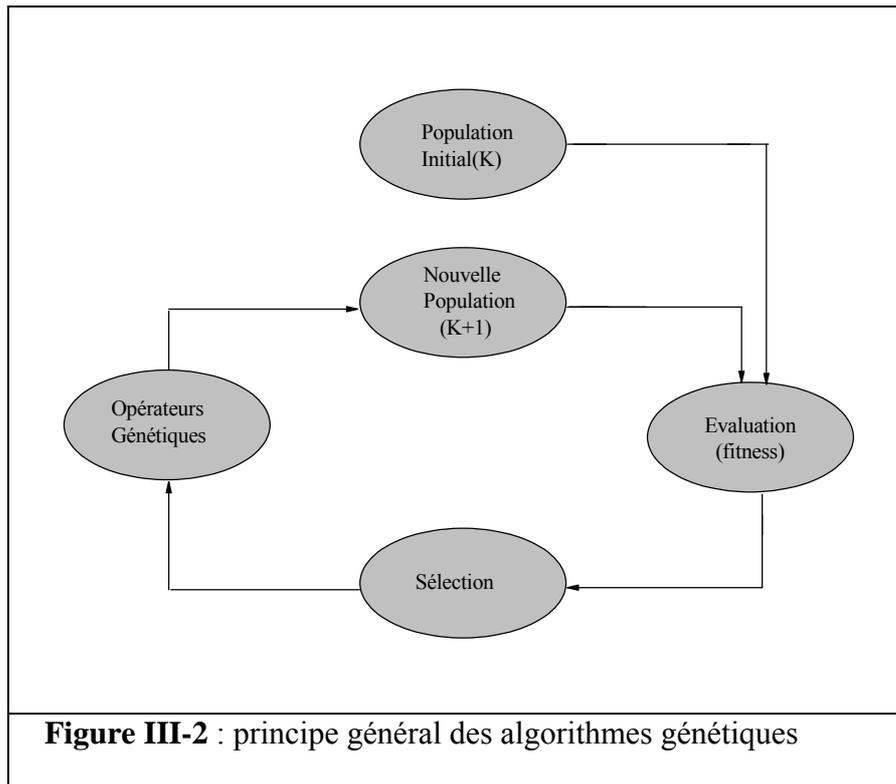
III.3.3.5 Des paramètres de dimensionnement

Tels que la taille de la population, nombre total de générations ou le critère d'arrêt de l'algorithme, les probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

III.3.4. Comment fonctionne un algorithme génétique [27]

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur *la figure (III-2)*, et repose sur les étapes suivantes :

- Produire une population initiale d'individus aléatoires.
- Exécuter itérativement les sous étapes suivantes jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt :
 - Assignez une valeur d'aptitude à chaque individu de la population en utilisant la fonction d'évaluation
 - Créez une nouvelle population de chromosomes en appliquant les opérateurs suivantes : les opérations sont appliquées à des chromosomes choisis de la population avec une probabilité basée sur l'aptitude.
 - ↳ *Reproduction* : Reproduire un individu existant en le copiant dans la nouvelle population.
 - ↳ *Croisement* : Créer deux nouveaux individus à partir de deux individus existants par recombinaison génétique de leurs chromosomes.
 - ↳ *Mutation* : Créez un nouvel individu à partir d'un individu existant en subissant une mutation
- L'individu qui est identifié par la méthode de désignation du résultat est retourné comme étant le meilleur chromosome produit.



On commence par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération K à la génération $K+1$, les trois opérations de sélection, croisement et de mutation sont répétées pour les éléments de la population K . des couples de parents X_1 et X_2 sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c et génère des couples d'enfants E_1 et E_2 . D'autres éléments X sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m et génère des individus mutés X' . Le niveau d'adaptation des enfants (E_1 , E_2) et des individus mutés X' sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population. De génération en génération, la taille de la population reste constante. Différents critères d'arrêt de l'algorithme peut être choisis [28]:

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixé à priori.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus.

III.3.5. Variantes

En fait, les algorithmes génétiques sont une famille d'algorithme basés autour des mêmes idées. Cependant il existe beaucoup de variantes possibles suivantes la représentation choisie, les opérateurs de croisement, de mutation et

de sélection. La section suivante présente les choix les plus courants qui définissent les variantes.

III.3.5.1 Codage

Est une modélisation d'une solution d'un problème donné sous forme d'une séquence de caractères appelée chromosome ou chaque caractère, dit aussi gène, représente une variable ou une partie de problème. La tâche principale consiste à choisir le contenu des gènes qui facilite la description du problème et respecte ses contraintes. La littérature définit deux types de codage : binaire et réel [27].

- **Codage binaire**

Le codage classique utilise l'alphabet binaire : 1,0. Dans ce cas le chromosome représente simplement une suite de 0 et de 1. Le codage binaire est également indépendant des opérateurs génétiques (croisement et mutation) du moment où ces derniers ne nécessitent aucune spécification. Dans la pratique, le codage binaire peut présenter des difficultés [27].

- **Codage réel**

Pour certains problèmes d'optimisation, il est plus pratique d'utiliser un codage réel des chromosomes. Un gène est ainsi représenté par un nombre réel au lieu d'avoir à coder les réels en binaire puis les décoder pour les transformer en solutions effectives. Le codage réel permet d'augmenter l'efficacité d'un algorithme génétique et d'éviter des opérateurs de décodages supplémentaires. En effet, un chromosome codé en réel est plus court que celui codé en binaire [27].

III.3.6 Les opérateurs génétiques

L'algorithme génétique réalise l'optimisation par la manipulation d'une population de chromosomes. A chaque génération, l'algorithme génétique crée un ensemble de nouveaux chromosomes au de diverses opérations appelées opérateurs génétiques

III.3.6.1 La sélection

A partir d'une population initiale de m individus, l'algorithme génétique sélectionne une population intermédiaire de m individus en faisant une sélection sur la population initiale (un même individu peut être sélectionné plusieurs fois ou peut ne pas être sélectionné du tout, en fonction de la valeur

de sa fonction d'évaluation).

Les m individus de la population se croisent deux à deux (les couples se forment aléatoirement) pour construire m nouveaux individus. Ces individus passent par un opérateur de mutation (qui agit aléatoirement avec une possibilité faible 2-3% de bits) pour former une nouvelle population.

On réitère ensuite le procédé à partir de cette population jusqu'à obtenir une solution que l'on juge satisfaisante. On a déjà proposé une méthode mais il existe plusieurs autres techniques de sélection plus efficaces parmi lesquelles on trouve :

➤ **Sélection par roulette**

La sélection des individus par le système de la roulette s'inspire des roues de loterie. A chacun des individus de la population est associé un secteur d'une roue. L'angle du secteur étant proportionnel à la qualité de l'individu qu'il représente. Vous tournez la roue et vous obtenez un individu. Les tirages des individus sont ainsi pondérés par leur qualité. Et presque logiquement, les meilleurs individus ont plus de chance d'être croisé et de participer à l'amélioration de notre population.

➤ **Sélection par tournoi**

Le principe de la sélection par tournoi augmente les chances pour les individus de piètre qualité de participer à l'amélioration de la population. Le principe est très rapide à implémenter. Un tournoi consiste en une rencontre entre plusieurs individus pris au hasard dans la population. Cette technique utilise la sélection proportionnelle sur des paires l'individu, puis choisit pour ces paires l'individu qui a le meilleur score d'adaptation.

➤ **Sélection uniforme**

La sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation. Chaque individu a donc une probabilité $1/P$ d'être sélectionné, où P est le nombre total d'individus dans la population.

➤ **L'élitisme**

Cette méthode de sélection permet de mettre en avant les meilleurs individus de la population. Ce sont donc les individus les plus prometteurs qui vont participer à l'amélioration de notre population. Cette méthode a l'avantage de permettre une convergence (plus) rapide des solutions, mais au détriment de la diversité des individus.

III.3.6.2 Croisement (hybridation)

A partir de deux individus, on obtient deux nouveaux individus qui héritent de certaines caractéristiques de leurs parents. L'hybridation sélectionne des gènes parmi deux individus appelés parents. A partir de ces gènes sont générés les enfants.

La probabilité d'hybridation représente la fréquence à laquelle les hybridations sont appliquées.

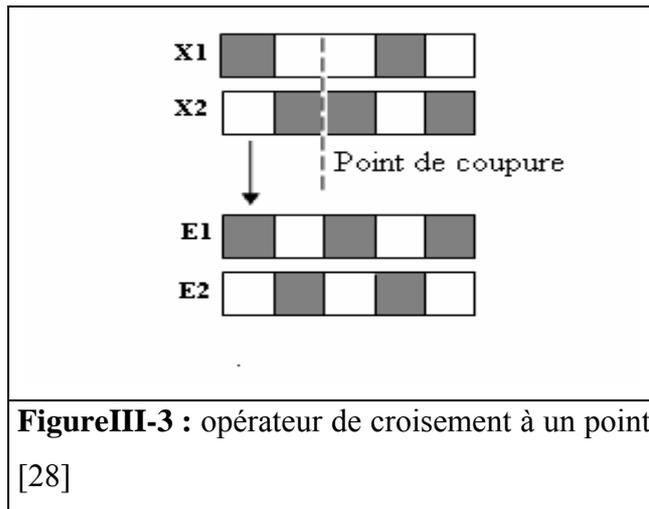
- S'il n'y a pas d'hybridation, les fils est l'exacte copie des parents.
- S'il y a hybridation, les fils sont composé d'une partie de chacun de leurs parents.
- Si la probabilité est de 0%, la nouvelle génération la copie de la précédente.
- Si la probabilité est fixée à 100%, tous les descendants sont générés par l'hybridation.

L'hybridation est mise en place pour que les nouveaux chromosomes gardent le meilleur parti des chromosomes anciens. Ceci dans le but d'obtenir, peut être, de meilleurs chromosomes. Néanmoins, il est quand même important qu'une partie de la population survive à la nouvelle génération.

Classiquement, les croisement sont envisagés avec deux parents (X_1 , X_2) et génèrent deux enfants. Cette combinaison des parents utilise la notion de *points de coupures* qui correspond aux points au niveau desquels s'effectuera l'échange de matériel génétique [27].

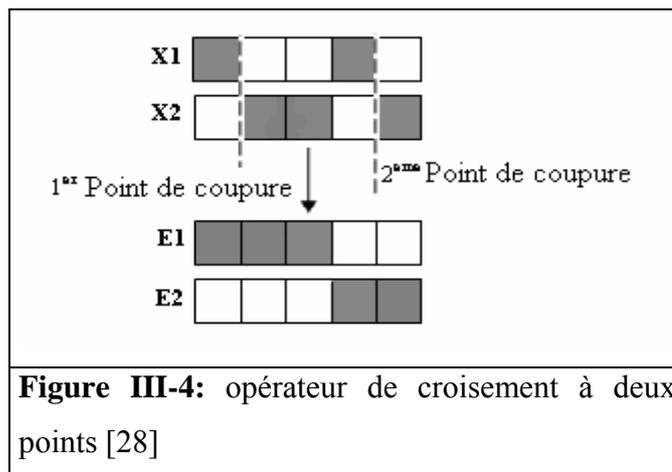
➤ Croisement à un point

Le croisement à un point est le croisement le plus simple. Pour effectuer ce type de croisement, on sélectionne aléatoirement un point de coupure K qui soit compris entre 1 et $L-1$ (L est la longueur du chromosome) puis on subdivise le génotype de chacun des parents en deux parties de part et de l'autre part de ce point. On échange ensuite les deux sous chaînes terminales de chacun des chromosomes, ce qui produit deux enfants [28].



➤ **Croisement multipoints**

Ce type de croisement peut être vu comme une généralisation du croisement à un point, en découpant le chromosome non pas en 2 sous chaînes mais en K sous chaînes [28].



➤ **Croisement uniforme**

Le croisement uniforme peut être vu comme un croisement multipoint dont le nombre de coupures est indéterminé a priori. Pratiquement on utilise un « masque de croisement », engendré aléatoirement pour chaque couple d'individus, qui est un mot binaire de même longueur que les chromosomes. S'il est égal à 1, l'enfant 1 reçoit l'allèle correspondant du parent 1 et l'enfant 2 reçoit celui de parent 2. Sinon l'échange se fait dans l'autre sens (Figure III-5) [28]

Parents1	0	1	1	0	1	1	0	1
Parents2	1	0	0	0	1	0	1	1
Masque	0	1	0	1	0	0	1	1
Fils1	1	1	0	0	1	0	0	1
Fils2	0	0	1	0	1	1	1	1
Figure III-5 opérateur de croisement uniforme								

III.3.6.3 La mutation

La mutation est définie étant la modification aléatoire d'une partie d'un chromosome. Elle constitue une exploration aléatoire de l'espace des chaînes. C'est un phénomène qui a un rôle théoriquement plus marginal : il est là pour éviter une perte irréparable de la diversité. Différentes manières de mutation d'un chromosome sont aussi définies dans la littérature [27].

➤ Mutation en codage binaire

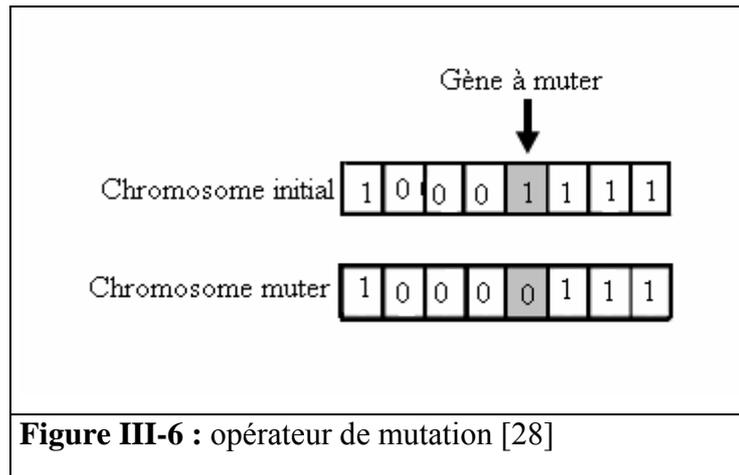
Dans un algorithme génétique simple, la mutation en codage binaire est la modification aléatoire occasionnelle (de faible probabilité) de la valeur d'un caractère de la chaîne [27].

➤ Mutation en codage réel

Pour le codage réel, les opérateurs de mutation les plus connus et les plus utilisés sont les suivantes :

- L'opérateur **d'inversion simple** : consiste à choisir aléatoirement de deux points de coupure et inverser les positions des bits situés au milieu.
- L'opérateur **d'insertion** : consiste à sélectionner au hasard un bit et une position dans le chromosome à muter, puis à insérer le bit en question dans la position choisie
- L'opérateur **échangé réciproque** : cet opérateur permet la sélection de deux bits et les inter changés.

L'utilisation de probabilité ne signifie pas que la méthode n'est qu'une exploration aléatoire. Les AGs utilisant des choix aléatoires comme des outils pour guider l'exploration à travers les régions de l'espace de recherche, avec une amélioration probable [27].



III.3.7. Valeurs des paramètres génétiques [27]

Les paramètres qui conditionnent la convergence d'un algorithme génétique sont :

- La taille de la population d'individu ;
- Le nombre maximal de génération ;
- La probabilité de croisement ;
- La probabilité de mutation ;

Les valeurs de tels paramètres dépendant de la problématique étudiée. Ainsi il n'existe pas de paramètres qui soient adaptés à la résolution de tous les problèmes qui peuvent être posés un algorithme génétique. Cependant, certaines valeurs sont souvent utilisées et peuvent être de bon point de départ pour démarrer une recherche de solutions à l'aide d'un AG.

- La probabilité de croisement est choisie dans l'intervalle $[0.7, 0.99]$;
- La probabilité de mutation est choisie dans l'intervalle $[0.001, 0.01]$.

III.3.8. Extraction des paramètres d'une cellule solaire par la méthode des algorithmes génétiques

Dans cette partie on propose une technique basé sur des algorithmes génétiques afin d'améliorer l'exactitude des paramètres extraits d'une cellule solaire. Les résultats obtenus par cette méthode sont exposés ci dessous sous forme d'exemples.

III.3.8.1 Application à la cellule solaire un seule exponentielle

Nous avons appliqué la méthode à la cellule solaire avec une seule exponentielle sous illumination, les valeurs des paramètres utilisés sont comme suit : $I_s = 0.325 \times 10^{-6} \text{ A}$, $R_s = 0.0454 \Omega$, $I_{ph} = 0.0762 \text{ A}$, $n = 1.5$, $G_p = 0.0297 \Omega^{-1}$, utilisé par Sellai et al [8], la détermination des paramètres du modèle est basée sur la précision des caractéristiques I - V simulés.

La relation courant tension d'une cellule solaire sous illumination est donnée par l'équation (III.1). Les paramètres qui peuvent être déterminés dans ce cas sont I_{ph} le photocourant, I_s courant de saturation, R_s la résistance série, G_p la conductance parallèle et n le facteur d'idéalité.

Les valeurs des paramètres qu'on a trouvés sont rassemblées dans le tableau (III-2). Dans ce travail le processus des algorithmes génétiques a été programmé par le choix :

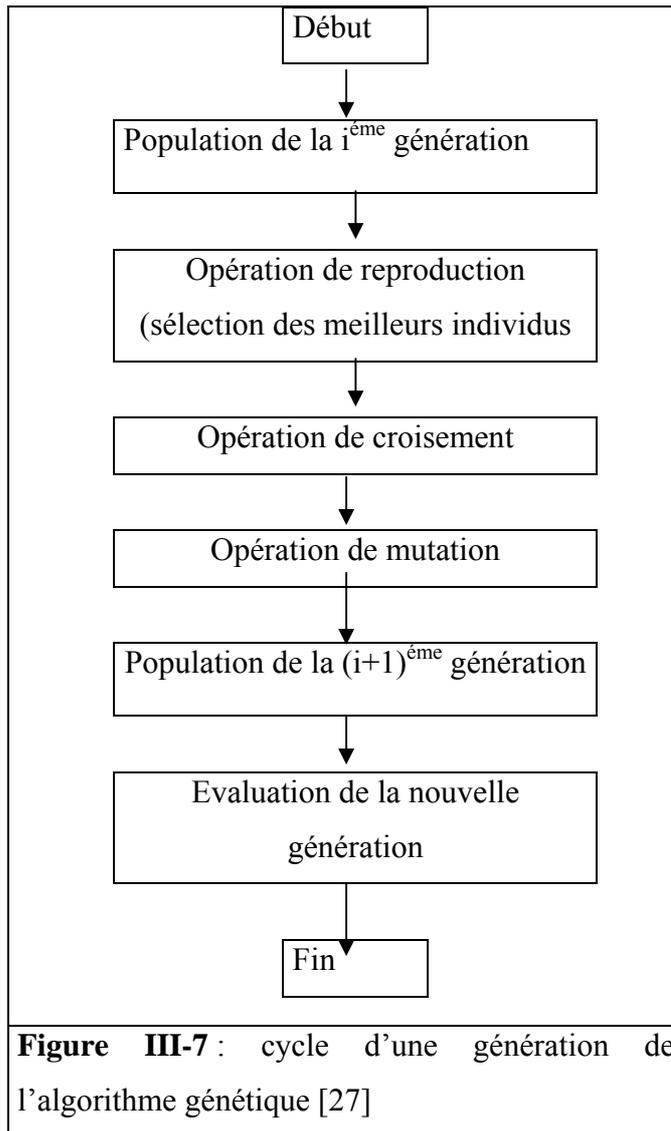
1. La taille de population (nombre de chromosome) $\text{pop-size} = 80$ chromosome.
2. une taille de génération (génération max) pour assurer la convergence de la méthode et de trouver une solution exacte satisfaisante.
3. une plus grande génération jusqu'à 500 générations, rendre les calculs plus longs, la technique a été adoptée pour les parents testés.
4. Le croisement : le simple croisement de point a été exécuté avec taux de croisement égal $P_c = 0.5$ suivi d'une opération de mutation où les gènes de chromosomes donnés ont aléatoirement, s'ils rencontrent le taux de mutation (probabilité) choisi à $P_m = 0.02$.

Tableau III-2 : Valeurs théoriques et extraites des paramètres de la cellule solaire sous illumination à une exponentielle par la méthode des (AG)			
Paramètre	Valeurs théoriques	Méthode des AG	Les gammes initiales précisaient
I_{ph} (A)	0.762	0.763	[0-1]
I_s (μ A)	0.325	0.339	[$0-1 \times 10^{-6}$]
n	1.5	1.473	[1-2]
R_s (Ω)	0.0454	0.0454	[0.01-0.6]
G_p (Ω^{-1})	0.0297	0.0185	[0.01-0.05]

III.3.8.2 Validation de la méthode

➤ Organigramme de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique repose fondamentalement sur la recherche d'un ou des extrema d'une fonction d'adaptation (aussi appelé fonction adéquation). Il s'agit donc d'un algorithme itératif de recherche globale dont le but est d'optimiser la fonction d'adéquation. Pour atteindre cet objectif l'algorithme travaille en parallèle sur une population de chromosomes, distribués dans l'entièreté de l'espace de recherche. L'algorithme démarre alors avec une population initiale cherchant la combinaison optimale des paramètres correspondant à la meilleure solution. A chaque génération, est crée une nouvelle population avec le même nombre de chromosomes. Au fur et à mesure des générations, les chromosomes vont tendre en général vers l'optimum de la fonction d'adéquation. Le cycle d'une génération de cette méthode d'optimiser est illustré par l'organigramme (*la Figure III-7*). Ce dernier montre bien que le cycle est constitué d'un ensemble d'étapes qui servent de base de l'implémentation de l'algorithme génétique [27].



➤ **Condition de la méthode**

La méthode d'optimisation par algorithmes génétiques requiert la définition de plusieurs paramètres d'une importance majeure pour aboutir des bons résultats. Il s'agit du nombre d'itérations (génération max) et la dimension de la population (taille de la population de chaque paramètre qui optimise) d'une part et des probabilités de croisement et du mutation d'autre part. il faut donc décider des types de sélection, de croisement et de mutation ainsi que leurs probabilité [27]

➤ **Test de la méthode**

Pour valider la méthode nous l'avons appliquée à la cellule solaire théorique sous illumination utilisé par sellai [8]. Les paramètres exacts de la cellule solaire sont $I_s = 0.325 \times 10^{-6} \text{A}$, $R_s = 0.0454 \Omega$, $I_{ph} = 0.0762 \text{A}$, $n = 1.5$,

$G_p = 0.0297 \Omega^{-1}$. Nous avons procédé à plusieurs tests.

Le premier test est celui de l'effet de la taille de population, nous avons testé notre méthode pour plusieurs nombres de chromosome. Il est clair que plus le nombre de chromosome augmente plus l'extraction des paramètres se rapproche les valeurs théoriques. A titre d'illustration, le tableau (III-3) donne le nombre nécessaire de chromosome pour extraire les paramètres de la cellule solaire sous illumination. Ces résultats traduisent une amélioration par rapport au nombre de chromosome (taille de population =80), On remarque que le résultat se rapproche plus de la valeur théorique. Cette amélioration s'explique par l'augmentation du paramètre « nombre de chromosomes »

Pour faire la comparaison, nous avons calculés la déviation standard σ entre les données expérimentables et les données générées avec chacune de nombre de chromosomes selon l'expression [12]

$$\sigma = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{cal,i}}{I_i} - 1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (III.9)$$

Les résultats que nous avons obtenus sont reportés sur le tableau (III-3). On remarque que le nombre de chromosome (taille de population =80) donne la meilleur déviation standard (0.58%) pour la cellule solaire sous illumination.

Tableau III-3 : extraction des paramètres d'une cellule solaire par rapport au nombre de chromosome						
Taille de population	Valeurs théoriques et extrait par l'AG					σ (%)
	I_{ph} (A)	I_s (μ A)	$n = 1.5$	R_s (Ω) = 0.0454	G_p (Ω^{-1}) = 0.0297	
30	0.757	0.818	1.568	0.0443	0.0305	1.94
50	0.749	0.567	1.529	0.0446	0.0301	2.02
80	0.763	0.339	1.473	0.0454	0.0185	0.58

III.3.8.3 Cellule solaire à double exponentielle

Nous avons ensuite appliqué la méthode à une cellule solaire sous illumination et l'obscurité, décrite par deux exponentielles (équation (II-6)). La première exponentielle au mécanisme de diffusion et la deuxième au mécanisme de recombinaison. Nous avons simulé la caractéristique $I-V$ en

reprenant les valeurs des paramètres utilisés par [29] dans la cellule sous illumination et dans l'obscurité les valeurs des paramètres utilisés par A. Ferhat Hamida et al [12] les valeurs trouvées sont données dans *les tableaux (III-4), (III-5)* successivement.

Tableau III-4 : Valeurs théoriques et extraites des paramètres de la cellule solaire à deux exponentielles sous illumination par la méthode (AG)

Paramètre	Valeurs théoriques	Méthode des AG	Les gammes initiales précisaient
I_{ph} (A)	2.19	2.20	[0 - 2.5]
I_{s1} (nA)	2.4	1.51	[0 - 2.4]
n1	0.9	0.87	[0.8 - 1]
I_{s2} (μ A)	55	42.7	[0 – 60]
n2	1.9	1.74	[1 - 2]
R_s (m Ω)	25	24	[10 - 30]
G_p (Ω^{-1})	0.005	0.006	[0.01 – 0.005]

Tableau III-5 : Valeurs théoriques et extraites des paramètres de la cellule solaire à deux exponentielles dans l'obscurité par la méthode (AG)

Paramètre	Valeurs théoriques	Méthode des AG	La méthode (VOM)	Les gammes initiales précisaient
I_{s1} (A)	9.3×10^{-10}	8.39×10^{-10}	9.29×10^{-10}	[0 - 9.4×10^{-10}]
n1	1.1	1.07	1.9	[1 - 1.5]
I_{s2} (A)	1.0×10^{-4}	1.68×10^{-4}	1.05×10^{-4}	[1.5×10^{-4} - 2×10^{-4}]
n2	5.5	5.57	5.54	[5 - 6]
R_s (m Ω)	8	7.99	7.68	[0.001 - 0.02]
G_p (Ω^{-1})	6.66×10^{-3}	6.49×10^{-3}	6.67×10^{-3}	[0.001 - 0.08]

III.4. Conclusion

Nous nous sommes intéressés de cette étude au problème d'optimisation par la méthode (MOV). L'analyse de la constatation expérimentale doit s'appuyer sur les paramètres d'une cellule solaire qui

minimisent la somme des erreurs relatifs quadratique entre les valeurs expérimentales et simulées du courant.

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des paramètres parmi ces études, la méthode des algorithmes génétiques. Dans cet partie on a présenté un aperçu général sur la méthode des algorithmes génétiques son historique, sa théorie et son application pour les cellules solaires.

Nous avons conclu que cette méthode conduit à une détermination exacte des paramètres utile d'une cellule solaire avec un seul exponentiel sous illumination et double exponentielle sous illumination et à l'obscurité. Nous avons remarqué que les avantages d'utilisation de la méthode des algorithmes génétiques sont très efficaces pour la convergence de la méthode. On conclut que les paramètres pris en compte (dans ce contexte, on peut varier différentes paramètres à savoir la taille de la population, la génération max, les probabilités de croisement et de mutation) jouent un rôle primordial au niveau de résultats. En effet le choix des bons paramètres. Ce choix de paramètres n'est pas standard, il est propre à chaque problème.

Conclusion générale

La cellule solaire, est un dispositif semi-conducteur qui convertit des photons (la lumière) en électricité. Fondamentalement, le dispositif doit accomplir deux fonctions :

- Photo génération de transporteurs de charges (électron trous) dans un matériel d'absorption de la lumière.
- Séparation des transporteurs des charges, de préférence en un contact conducteur qui transmettra l'électricité.

L'objectif de notre travail est l'extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire à deux exponentielles par la méthode des algorithmes génétiques.

Dans la deuxième partie nous avons présenté les résultats simulés de la caractéristique courant-tension de la cellule solaire en fonction de la variation de certains paramètres (le facteur d'idéal n , le photocourant I_{ph} la résistance série R_s , la conductance parallèle G_p).

Les courbes simulées ont montré l'influence de ces paramètres sur la courbe $I-V$, on remarque les mêmes valeurs de n, R_s, G_p, I_s l'augmentation de photocourant correspond à une augmentation du courant de court circuit I_{cc} , l'augmentation du facteur idéal correspond à une augmentation du tension du circuit ouvert V_{co} , pour la variation de la résistance série R_s , la conductance parallèle G_p on a observé que la tension de circuit ouvert n'est pas modifiée, mais la caractéristiques se déforme très rapidement.

Nous avons consacré le troisième chapitre à l'extraction des paramètres par deux méthodes d'optimisation sont la méthode d'optimisation vertical (VOM) et la méthode des algorithmes génétiques, la méthode d'optimisation vertical est basé sur la minimisation de la somme des erreurs relatives quadratiques entres les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques du courant. Nous avons utilisé aussi la méthode des algorithmes génétiques et on a extrait les paramètres d'une cellule solaire à une seule diode sous illumination et deux diodes à l'obscurité et sous illumination, on observe que les avantages d'utilisation de cette méthode sont énormes surtout pour la convergence de la méthode.

Bibliographie

- [1] A. LABOURET, M. VILLOZ « énergie solaire photovoltaïque » le manuel du Professionnel, édition Dunod, Paris, 2003
- [2] S.Quoizola, Epitaxie en phase valeur de silicium sur silicium me soporeux pour report sur Substrats économiques et application photovoltaïque bas cout, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatisme, L'institute National des Sciences appliquées de Lyon, N d'ordre :(03ISAL0078) 2003.
- [3] J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER, B .SADA SY «le pompage photovoltaïque» manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, édition Multi Mondes IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français,1998.
- [4] Centrales photovoltaïques « Guides pour le dimensionnement et la réalisation de projet » à l'usage des bureaux d'ingénieurs
- [5] H.Chenoufi, optimisation des procède technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion, Mémoire de Magister, Dépt. Electronique, Univ Batna, 2005
- [6] T.Belkacemi, S.Hallal , simulation des caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky avec barrière inhomogène, mémoire de l'ingénieur, faculté des science département de physique Univ. Sétif, 2005
- [7]C. Frédéric, C .Thomas, Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire de satellite, mémoire de l'ingénieur, faculté de l'ingénieur. Département d'Electronique 2002
- [8] A. Sellai, Z. Ouennoughi, « extraction of illuminated solar cell and Schottky diode parameters using a genetic algorithm »International Journal of Modern Physics Vol. 16, No. 7(2005) 1043-1050
- [9] Y.PANKOW, Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque, thèse doctorat de l'école national supérieur d'Arts et Métiers, 2004

- [10] Bernard Equer, Energie solaire photovoltaïque, volume1, Ellipses Edition Marketing et l'Unesco, 1993.
- [11] Alain Ricaud « Photopiles solaires » de la physique de la conversion photovoltaïque aux Filières, matériaux et procédés, première édition ISBN 2-88074-326-5, 1997
- [12] A. Ferhat Hamida, Modélisation des phénomènes de transport et étude du rendement dans les structures métal/isolant/semi-conducteur, Thèse de doctorat d'état, Depat. Electronique, Fac. Sci. Ingé, Univ. Sétif, 2006
- [13] Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Thèse de doctorat, Lyon, 2005.
- [14] PV Spice « Simulation of Solar Cell Properties with Electronic Circuit Simulation Software »
- [15] B BROUSSE, réalisation et caractérisation de cellule photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physiques, thèse de doctorat, Univ DE LIMOGES, 2004
- [16] Bruno Thuillier, Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellule photovoltaïques en silicium multicristallin, Thèse de doctorat, Lyon, 2001.
- [17] F. Chapeau, A. Monir « Numerical Evaluation of the Lambert W Function and Application to Generation of generalized Gaussian Noise With Exponet » IEEE Tranaction on Signal Processing, VOL. 50 (2002), No 9, pp .2160-2165
- [18] T.C Banwell, A.Jayakumar "Exact analytical solution for current flow through diode with series resistance" ELECTRONICS LETTERS Online Vol. 36 No. 4 (2000) pp 291-292
- [19] A. Ortiz-Conde, Francisco J. G Sanchez, J. Muci, «New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics » *Solar Energy Materials & Solar Cells* , Vol. 90(2006), pp . 352-361

- [20] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch and C. Boutrit, « «Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers », *Int. J Solar energy*, Vol.4, pp. 1-12, 1986
- [21] A. Ortiz-conde, Yansheng Ma, J. Tomson, E. Santos, F. J. Lion, F. J. Garcia Sanchez, M. Lei, J. Finol, and P. Layman, « Direct extraction of semiconductor diode parameters using lateral optimization method » *Solide-State Electronics*, Vol.43(1999), pp. 845-848
- [22] R.L.Burden and J.D.Faires, *Numerical Analysis*, Prindle, Weber & Schmidt, Bston, 1985
- [23] T. Richard McClla, *introduction to Numerical Methods and FORTRON Programming*, J.Wiley & Sons, Inc. New York, London. Sydney
- [24] A. Ortiz-conde, Yansheng Ma, J. Tomson, E. Santos, J. J. Lion, F. J. Garcia Sanchez, M. Lei, J. Finol and P. Layman, « Parameters extraction using lateral and vertical optimization », *Proc. 22nd Intl. Conf0 on Microelectronics (MIEL-2000)*, vol. 1, Nis, Serbia, May 14-17, 200, pp. 165-168
- [25] H. Wong and W. H. Lam, « A Robust Parameter Extraction Method for diode with Series Resistance » *Proc. IEEE Electron Device Meeting*, Hong Kong, Jun. 30, 2001. pp. 38-41
- [26] David E. Goldberg “Algorithmes génétiques Exploitation optimisation et apprentissage automatique” édition -Wesley, France SA 1994
- [27] N.Zerari, *les algorithmes génétiques en maintenance, mémoire de magister, Dépat de l’informatique, Fac. Sci Ingé, Univ Batna, 2006*
- [28] A. Samah, *Algorithme génétique pour le problème d’ordonnancement dans la synthèse de haut niveau pour contrôleurs dédiés, Départ de l’informatique, Fac. Sci Ingé, Univ Batna, 2006*
- [29] Joseph A Jervase, Hadj Bourdoucen and Ali-Lawati « Solar cell parameter extraction Using genetic algorithm » *Meas. Sci. Technol.* Vol. **12** (2001), pp 1922–1925

الملخص:

تعتبر الخلايا الشمسية قاعدة التكوين للأنظمة الضوئية و كذلك للتحويل إلى الطاقة الشمسية و على هذا الأساس تتعلق دراستنا بدراسة الخاصية شدة التيار بدلالة التوتر الكهربائي على الخلية الشمسية بطريقة نيوتن ودالة لمبار وكذلك بتقنية التقدير التي أساسها الخوارزمية الوراثة بهدف تطوير استخراج العناصر الخلية الشمسية بطريقة اثنان ثنائي القطب و هو النمط النظري الذي تتوصل إليه و النتائج المتحصل عليها توافق إلى حد كبير النتائج التجريبية

الكلمات المفتاحية الخلية الشمسية، استخراج العناصر، الخوارزمية الوراثة

Abstract:

Solar cells are system basis for photovoltaic structures and the solar energy conversion. Our study concerns the simulation of the I-V characteristics by the classic model of a solar cell using the Newton method and the Lambert function. Then we propose a novel technique of optimization based on genetic algorithms to improve the accuracy of the extracted using direct techniques application a two diode model. The results obtained are similar to the experimental.

Key words: solar cells, extraction, parameters, Genetic algorithms

Résumé :

Les cellules solaires sont les structures de base des systèmes photovoltaïques et de la conversion de l'énergie solaire. Notre étude concerne la simulation de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en s'appuyant sur le modèle classique basée sur la méthode de Newton et la fonction de Lambert. Ensuite la technique d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques pour améliorer l'extraction des paramètres des cellules solaires a été appliquée. Le modèle à deux exponentiels est le modèle théorique qui sera retenue, et les résultats obtenus sont comparables avec ceux mesurés expérimentaux.

Mots-clés : Cellule solaire, extraction de paramètres, Algorithmes génétiques