

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Génie électrique

Présenté par

BOUCHOUAREB Nabil - OMRANI Djafar

Thème

Étude comparative pour l'extraction des paramètres d'un module photovoltaïque basée sur un teste expérimental.

Soutenu le 08/06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. KECHIDA Ridha	Maitre de conférences	Président
Dr. GACEM Abdelmalek	Maitre de conférences	Rapporteur
Dr. LAMMOUCHI Zakaria	Maitre de conférences	Examineur

Année Universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu

Qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

A la suite Nous tenons à remercier vivement

Docteur et Prof GACEM Abdelmalek promotrice qui

a proposé et dirigé ce travail.

Nous tenons également à remercier messieurs

KECHIDA Ridha, LAMMOUCHI Zakaria les membres

de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont

contribué de près ou de loin, participé à

l'élaboration de ce modeste mémoire.

Résumé

La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la relation courant tension (IV). La détermination des paramètres, de cette dernière, joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Ce travail présente l'application des méthodes d'optimisations pour identifier les paramètres inconnus du modèle qui régissent la relation courant-tension d'une cellule solaire. Afin d'évaluer l'efficacité des paramètres extraits, un modèle d'une diode (SDM) a été utilisé et comparé aux données ceux expérimentaux d'un module photovoltaïque. Les paramètres extraits seront comparée avec différentes techniques d'estimation de paramètres pour démontrer l'efficacité de l'approche proposée.

Mots clés : cellule solaire, algorithme d'optimisation, paramètre électriques, caractéristique courant-tension.

ملخص

يتطلب نمذجة الخلايا الشمسية بشكل أساسي صياغة علاقة الجهد (I – V) يلعب تحديد معاملات هذه العلاقة دوراً مهماً في نمذجة الخلايا الشمسية. يقدم هذا العمل تطبيقاً لطرق تحسين لتحديد المعلمات غير المعروفة لنموذج يتحكم في علاقة التيار-الجهد للخلية الشمسية. من أجل تقييم فاعلية المعلمات المستخرجة، يتم استخدام نموذج ذو ديود واحد (SDM) ومقارنته بقياسات البيانات التجريبية لنظام او وحدة كهروضوئية سيتم مقارنة المعلمات المستخرجة مع تقنيات تقدير المعلمات المختلفة لإثبات فعالية النهج المقترح.

الكلمات المفتاحية : الخلايا الشمسية، خوارزميات تحسين الجينية، المعلمات كهربائية، خصائص كهربائية.

Sommaire

Remercîments	I
Résumé	II
Sommaire.....	III
Liste des tableaux.	V
Liste des Figures.....	V
Liste des symboles.....	VI
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : Rappel sur les cellules photovoltaïques</i>	
I.1 Introduction	4
I.2 Le soleil.....	4
I.2.1 L'énergie solaire.....	4
I.2.2. Rayonnement solaire	5
I.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques	5
I.4 Effet photovoltaïque.....	7
I.4.2. Effet de l'éclairement.....	9
I.7 Système photovoltaïque	11
I.7.1.Système photovoltaïque avec stockage électrique	11
I.7.2 Système photovoltaïque a couplage direct sans batterie	12
<i>Chapitre II: Circuits Equivalents et Modèles Mathématiques</i>	
II.1 Introduction.....	14
II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque	15
II.2.1 Modèle à une diode.....	15
II.2.2 Modèle à deux diodes	16
II.3 Modèles mathématiques	17
II.3.1 Modèle Sandia	17
II.3.2 Modèle Madison	18
II.4 Sélection d'un modèle	19
II.5 Choix du module photovoltaïque.....	19
<i>Chapitre III : Méthodes Méta-heuristiques</i>	
III.1 Introduction	21
III.3 Fonction objectif :.....	21
III.4 Classification des méthodes d'optimisations :	21

III.4.1 Les métras heuristiques à solution unique :	22
III.4.2. Les métras heuristiques à solution multiple.....	22
III.5.Algorithme de coucou search (CS).....	23
III .5.1. Principaux composants de recherche coucou (CS).....	24
III.6. L'algorithme génétique	25
III.6.1.Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.....	25
III.6.1.1. avantages des algorithmes génétiques:.....	25
III.6.1.2.Inconvénients des algorithmes génétiques:	26
III.7. Algorithme PSO	27
III.7.1.Avantages et inconvénient L'algorithme d'optimisation par essai de particules PSO ...	28
III.8. Conclusion :	29

Chapitre IV Simulation et Résultats

IV.1 Introduction.....	32
IV.2 Résultats de l'étude sur la cellule solaire.....	32
IV.3 Résultats de l'étude sur le module solaire STP6-120/ 36	36
IV.4 Conclusion.....	39
Conclusion générale	51
<i>Références bibliographiques</i>	53

Liste des tableaux.

Chapitre I

Tableau(I.1) :les caractéristique principales de soleil.	4
Tableau (I.2) : caractéristiques de ces trois types de cellules solaires.....	10

Chapitre IV

Tableaux(IV.1). Les plages de recherche des meilleurs paramètres.....	32
Tableau(IV.2):Résultats des paramètres électriques d'un modèle à seule diode.....	33
Tableau(IV.3):Résultats des paramètres électriques d'un modèle à deux diodes.....	33
Tableau(IV.4).: Résultats de simulation a ITLBO pour model double diode.....	35
Tableau IV.5.:Résultats des paramètres électriques d'un module STP6-120/ 36.....	36
Tableau(IV.6):Résultats de simulation pour STP6-120/36.....	38-39

Liste des Figures

Chapitre I

Figure (I.1): Schéma simplifié d'un système photovoltaïque autonome.....	6
Figure (I.2): Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau.....	7
Figure. (I.4) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température	8
Figure. (I.5) : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température	9
Figure. (I.6) : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement	9
Figure.(I.7) : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement	10
Figure. (I.8) : GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti- retour	11
Figure. (I.9) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.....	12
Figure. (I.10) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.....	12

Chapitre II

Figure. (II.1) : caractéristique type d'un générateur photovoltaïque.....	14
Figure. (II.2) : schéma bloc de générateur photovoltaïque.....	14
Figure (II.3) : schéma équivalent d'une cellule PV modèle diode	15
Figure(II.4) : schéma équivalent d'une cellule PV modèle à deux diodes0.....	16

Chapitre III

Figure. (III.1) Classification des méthodes d'optimisations	22
Figure. (III.2) : Exemple d'une solution multiple et unique.....	23
Figure. (III.3) : Un oiseau coucou.....	24

Chapitre IV

Figure. (IV.1) : Comparaison des valeurs mesurées et estimées pour un modèle a une seule diode: (a)caractéristique-V, (b) caractéristique-V.....	34
Figure. (IV.2) : Comparaison des valeurs mesurées et estimées pour un modèle a une double diode: (a)caractéristique-V, (b) caractéristique-V.....	34
Figure. (IV.3): L'erreur entre le courant-puissance mesurée et le courant-puissance de simulation en utilisant le CS pour le modèle SD.....	35
Figure. (IV.4): Comparaison des valeurs mesurées et estimées pour module STP6-120/ 36 : (a)caractéristique-V, (b) caractéristique-V.....	37
Figure. (IV.5): L'erreur entre le courant-puissance mesurée et le courant-puissance de simulation en utilisant le CS pour le module STP6-120/ 36.....	37

Liste des symboles

I_{ph}	: Courant photo généré ou photo courant
V	: Tension
V_{co}	: Tension de circuit ouvert
I_{cc}	: Courant de court-circuit
I_{obsc}	: Courant d'obscurité
I_s	: Courant de saturation de la diode
V_T	: Potentiel thermique
K	: Constante de Boltzmann
T	: Température effective des cellules en Kelvin (K)
R_s	: Résistance série
R_{sh}	: Résistance shunt
T_a	: Température absolue
q	: Charge de l'électron
H_v	: Energie du photon
H	: Constante de Planck
c	: Vitesse de la lumière
λ	: Longueur d'onde
Si	: Silicium
Ge	: Germanium
Se	: Sélénium
GaAs	: Arséniure de gallium
CdTe	: Tellure de cadmium
P	: Puissance
I_{mp}	: Courant à la puissance maximale
V_{mp}	: Tension à la puissance maximale
FF	: Facteur de forme
V_{coNs}	: La somme des tensions en circuit ouvert de (Ns) cellules en série
I_{ccNs}	: Courant de court-circuit de (Ns) cellules en série
I_{ccNp}	: La somme des courants de court circuit de (Np) cellule en parallèle
I_{cc}	: Courant de court circuit
V_{co}	: Tensions en circuit ouvert
V_{coNp}	: Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle
N_s	: Nombre des cellules en série

N_p	: Nombre des cellules en parallèle
PV	: Photovoltaïque
A	: Facteur d'idéalité de la jonction
P_{max}	: Puissance maximale
P_i	: La puissance d'éclairement reçue par unité de surface (W)
S	: Surface de la cellule photovoltaïque (m ²)
η	: Rendement
G	: Rayonnement incident (W/m ²),
T_J	: Température de jonction (K),
AM	: Nombre d'air-masse,
G_r	: Rayonnement de référence (1000 W/m ²),
T_{Jr}	: Température de jonction référence (25°C),
f₁	: fonction du nombre d'air-masse,
f₂	: fonction de l'angle d'incidence β du rayonnement sur le capteur PV,
I_{scr}	: Intensité de court-circuit de référence,
V_{ocr}	: Tension de circuit ouvert de référence,
V_{MPr}	: Tension de puissance maximale de référence,
μ_{Voc}	: Coefficient de dépendance en température du de la tension de circuit ouvert.
μ_{Vmp}	: Coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale.
μ_{Imp}	: Coefficients de dépendance en température du courant de puissance maximale.
I	: Intensité aux bornes du capteur (A),
V	: Tension aux bornes du capteur (V),
I_s	: Courant de saturation inverse de diode (A),
n	: Paramètre d'ajustement,
T_j	: Température de jonction,
I	: Courant délivré par le module.
I_d	: Courant de diode.
T_a	: Température ambiante.
E_G	: Irradiation solaire.
E_{ref}	: Irradiation de référence 1000 W/m ² .
T_{ref}	: Température de référence 25°C.
A	: Facteur d'idéalité de la jonction.

Introduction générale

Introduction général

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

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité [1, 2, 3]. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

Dans ce travail, nous étudions l'extraction des paramètres électriques de la cellule photovoltaïque, ce travail est articulé autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie photovoltaïque, deuxième chapitre caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque, troisième chapitre méthodes Méta-heuristiques pour extraire les différents paramètres d'une cellule photovoltaïque et quatrième chapitre s'étaler sur la simulation et Résultats.

Chapitre I

Rappel sur les cellules

photovoltaïques

I.1 Introduction

Ce premier chapitre est basé sur les principes généraux et fondamentaux de l'énergie photovoltaïque, aussi le chapitre est constitué de trois grandes parties. La première partie est consacrée sur l'étude générale sur le soleil et l'énergie solaire, aussi il parle de rayonnement solaire et ses différents types. La deuxième partie est concentré sur l'action photovoltaïque, les types de panneaux photovoltaïques et le principe des fonctionnent. A la fin de ce chapitre, on parle de l'association des panneaux solaires et des différents types de connexion de ces panneaux, ainsi que ses caractéristiques électriques et de leurs performances. Enfin, nous avons résumé ce chapitre et exprimé les principaux points.

I.2 Le soleil

Le soleil est l'étoile qui représente le centre de notre système solaire. Il donne la lumière et la chaleur à la terre et aux autres planètes qui compose ce système solaire. Ces planètes tournent autour de soleil qui est composé de différent gaz comme l'hydrogène et l'Hélium et autre composante .Le soleil est considéré comme une source très importante de l'énergie. A partir de la conversion de 700 million de tonnes d'hydrogènes en hélium qui permet de produise 5 millions de tonnes de pure énergie [1]. Le soleil est le plus grand étoile de notre système et a les propriétés d'un corps noir avec une température de 5777 Kelvin. [1]. Le tableau suivant exprime les caractéristiques principales de soleil (Tableau I.1)

Diamètre (Km)	1392000	Masse volumique (Kg/m3)	1408
Masse (Kg)	2.1030	Vitesse (Km/s)	217
surface (Km²)	6091012	Volume (Km3)	1411018
Distance du centre (Km)	251017		

Tableau (I.1) : les caractéristiques principales de soleil.

I.2.1 L'énergie solaire

La meilleure ressource d'énergie pour la terre c'est le soleil qui donne un rayonnement solaire avec une grande quantité et de façon continue. Cette énergie émis par le soleil est absorbé par la terre pendant une heure seulement peut être suffisante à couvrir les besoins de monde pendant une année. Le soleil produit une grande énergie toujours, et la terre absorbe une petite quantité de cette énergie à cause de la grande distance (150 million Km) entre le soleil et la terre. [2]

L'énergie solaire est disponible partout sur terre. Chaque mètre carré reçoit en moyenne de 2 à 3 kWh/jour en Europe du Nord, 4 à 6 kWh/jour en région Provence Alpes Côte d'Azur

(PACA), ou entre les tropiques et en Algérie reçoit, soit près de 3000 heures d'ensoleillement par an et une irradiation variant entre 4 et 7 kWh/jour près de 1700 kWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays.[3]

I.2.2. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m². La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m². En résumé, la constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est : $E = 1367 \text{ W/m}^2$ [4]

I.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques

I.3.1 Systèmes photovoltaïques autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui produit de l'électricité, mais qui fonctionne indépendamment du réseau électrique. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés où il serait beaucoup trop coûteux de raccorder l'habitation ou le local que l'on souhaite alimenter en électricité. La différence majeure avec une installation photovoltaïque standard (raccordée au réseau), c'est la présence de batteries. Une installation photovoltaïque autonome doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a plus de soleil. Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée. [5]

Le système photovoltaïque du site isolé est composé de :

- **Panneau Photovoltaïque** : produire de l'énergie électrique à partir de la lumière.
- **Parafoudre** : protéger le système contre les surtensions d'origine atmosphérique comme la foudre.
- **Régulateur charge/décharge** : Il est installé entre la batterie et le panneau Photovoltaïque ; Il sert à contrôler le courant qui rentre ou qui sort de la batterie afin d'éviter qu'elle ne soit endommagée par un excès de charge ou de décharge.
- **Onduleur** : L'onduleur convertit le courant continu sortant de la batterie en courant alternatif nécessaire au fonctionnement de la majorité des appareils électriques domestiques.
- **Batterie** : permet le stockage de l'énergie électrique à fin de garantir une autonomie du système dans les jours non ensoleillés.
- **Disjoncteur de protection** : C'est un disjoncteur à courant continu qui est installé entre le panneau Photovoltaïque et le régulateur pour isoler et protéger le système lors de la maintenance du panneau ou quand survient un défaut électrique

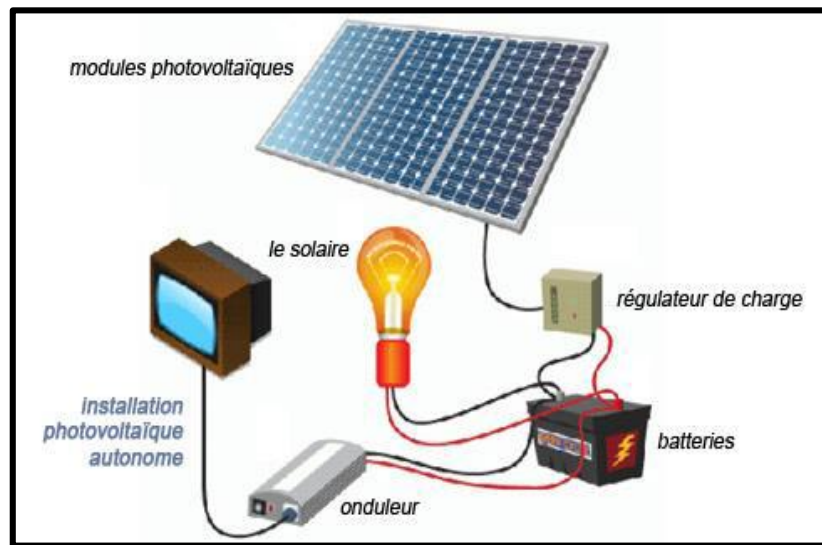


Figure (I.1) : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque autonome

I.3.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Le système de production d'électricité photovoltaïque raccordé au réseau se compose

- **Les modules photovoltaïques** : C'est l'élément qui permet de convertir l'énergie du soleil en énergie électrique.

- **Les onduleurs** : Le rôle de l'onduleur est donc de convertir le courant continu CC fourni par les modules en courant alternatif CA utilisable par ces appareils. Le processus de conversion entraîne une perte d'énergie. Par conséquent, il convient de choisir un onduleur ayant une faible perte d'énergie (moins de 10%).
- **Dispositifs de protection** : Une application photovoltaïque exige des protections électriques. Cependant, elles doivent être conformes aux normes applicables à une installation électrique photovoltaïque. Les appareils électriques doivent être protégés par une mise à la terre, par des fusibles, disjoncteurs, parafoudres, interrupteurs, sectionneurs contre tous les défauts électriques pouvant survenir dans les circuits de l'application (surtension, surcharge, fuite de courant, court-circuit etc...).
- **Câblage électrique** : Câble en cuivre, connecteurs DC, boîte de jonction ou boîtier de raccordement constituent le câblage électrique du système photovoltaïque à raccorder à l'application. Le câblage doit faire l'objet d'une attention particulière car en basse tension toute chute de tension peut être préjudiciable au système. Il doit respecter les normes applicables aux installations photovoltaïques et être dimensionné en fonction du courant maximum admissible et de la chute de tension admissible.
- **Dispositifs de comptage** : Ces éléments permettent de quantifier la quantité d'énergie électrique injectée dans le réseau public.

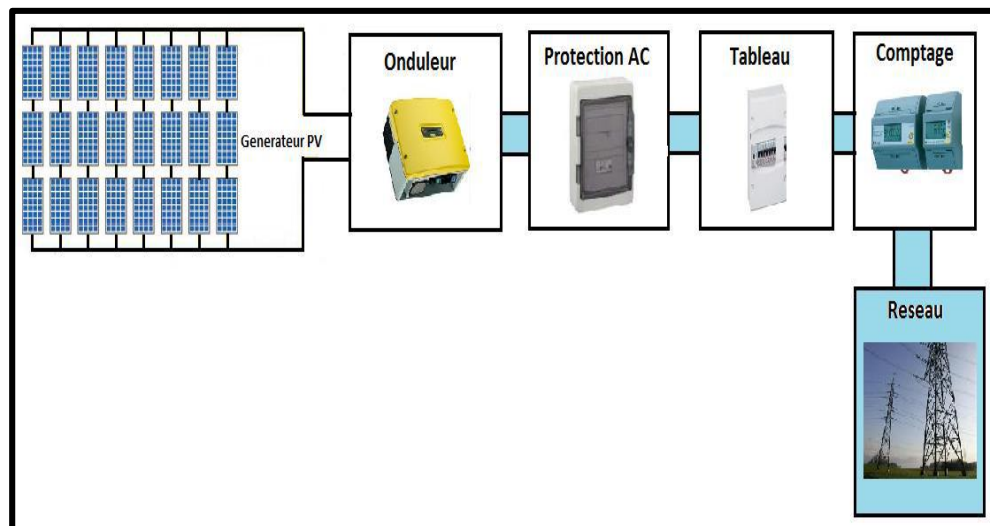


Figure (I.2) : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

I.4 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium [7]

I.4.1 Effet de la température

L'équation de Boltzmann donne $I_{sc} = I_0 \exp\left(q \frac{I_0}{kT}\right)$, l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques [I-V] et [P-V] d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures : Pour la figure (I.3) on observe que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, donc on dit que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue, et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.4).

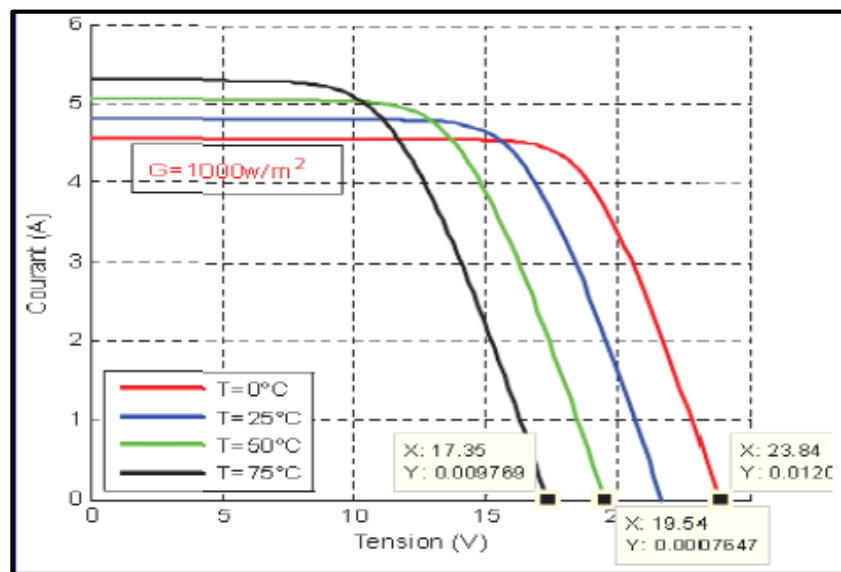
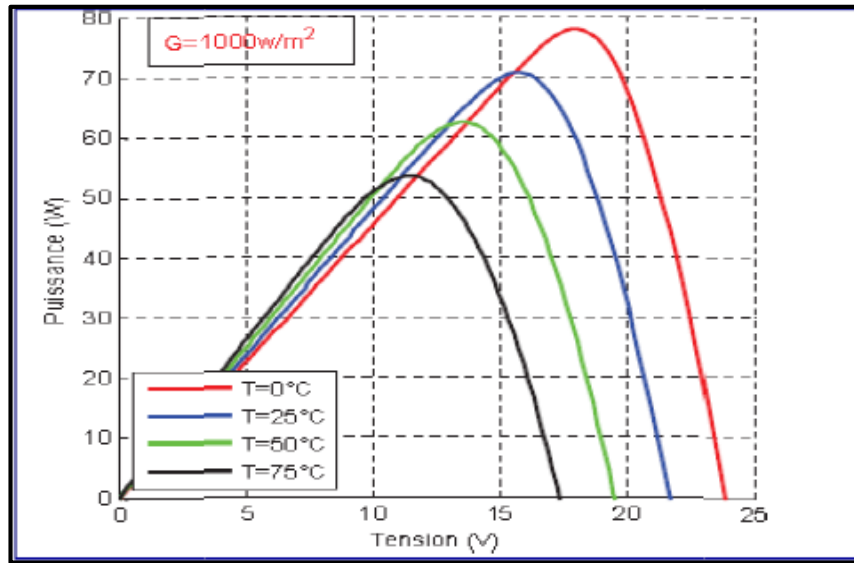


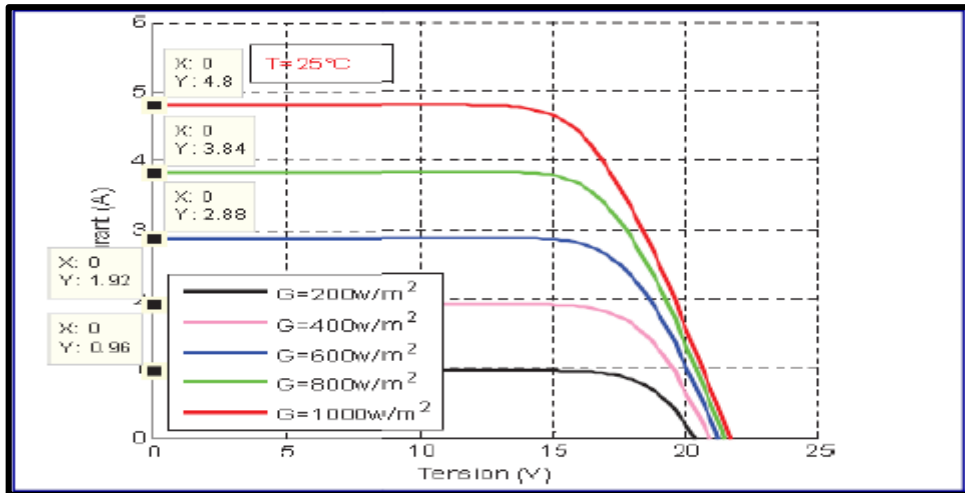
Figure (I.3) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température



Figure(I.4) : La caractéristique de $P = f(V)$ en fonction de température

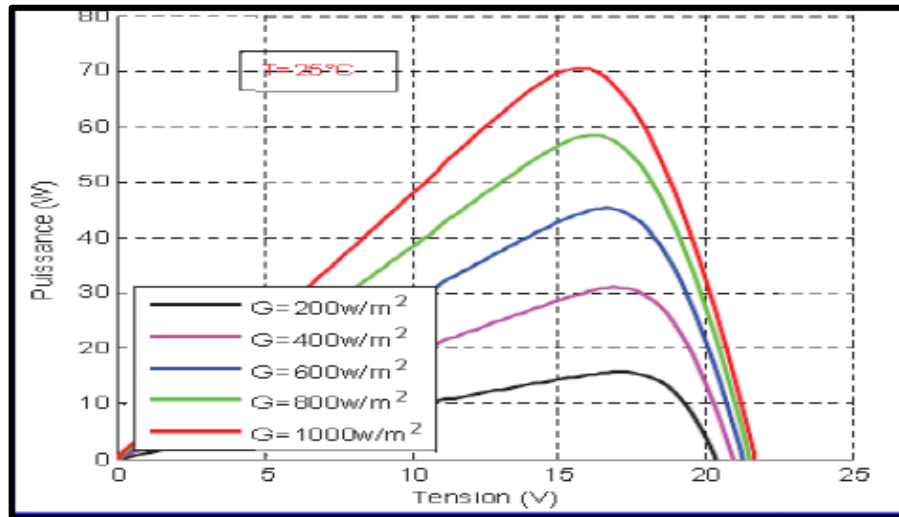
I.4.2. Effet de l'éclairement

Le même travail comme précédente, on fixe la température pour des différentes irradiances solaires.



Figure(I.5) : La caractéristique $I = f(v)$ en fonction de l'éclairement

Et en variant l'éclairement comme indiqué sur les figures (I.5 et I.6). On observe dans la figure (I.5) que pour l'éclairement $G = 1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc} = 4.8 \text{ A}$ et pour $G = 800 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc} = 3.84 \text{ A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I.6).



Figure(I.6) : La caractéristique P=f(v) en fonction de l'éclairement

I.5. Types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types de technologies photovoltaïques qui dominent le marché mondial : le silicium monocristallin, le silicium poly-cristallin et silicium amorphe. Le tableau ci-dessous résume certaines caractéristiques de ces trois types de cellules solaires :

	LE SILICIUM MONOCRISTALLIN	LE SILICIUM POLYCRISTALLIN	LE SILICIUM AMORPHE
Rendement :	15% STC	12 à 14% STC	5 à 7% STC
Puissance des panneaux:	5 à 150Wc	5 à 150Wc	0.5 à 60Wc
Gamme d'éclairement:	100 à 1000W/m ²	200 à 1000W/m ²	de 20lux à 1000W/m ²
Usage:	tous usages extérieurs de forte et moyenne puissance (télécommunication, balisage, relais, habitat.).	même usage que le silicium monocristallin	électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices.), électronique de faible consommation en extérieur
La Structure des atomes			
Les différent type des cellules			

Tableau (I.2) : caractéristiques de ces trois types de cellules solaires

I.6. Protection classique d'un générateur photovoltaïque

La protection des appareils électriques est nécessaire dans le secteur industriel pour obtenir une durée de vie moyenne plus élevée et éviter les défauts qui entraînent une interruption de la production. Dans le cas des générateurs photovoltaïques, ils sont protégés de côté électrique contre les courants de retour, en particulier si ils fonctionnent dans

l'obscurité. Deux types de protection sont utilisés dans les installations des générateurs solaires, voir la figure (I.7).

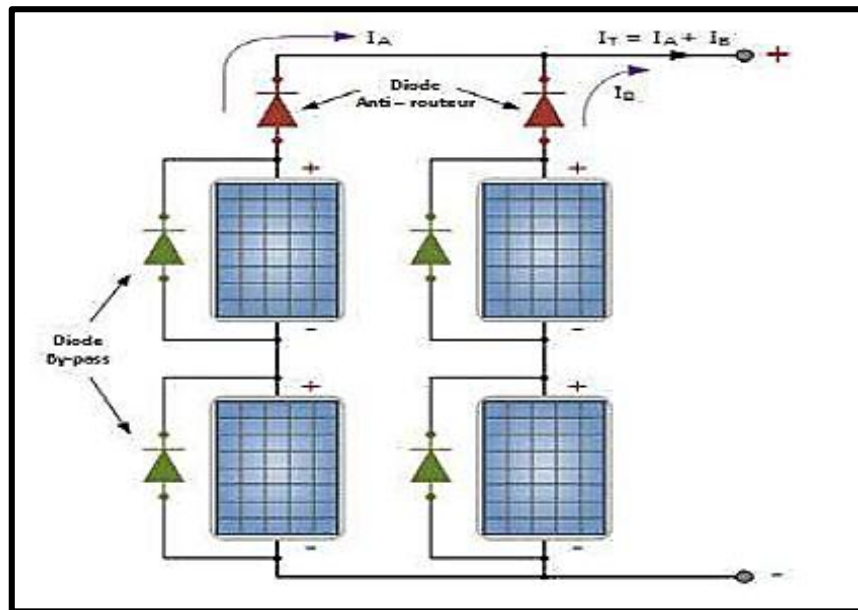


Figure (I.7) : GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti- retour

I.7 Système photovoltaïque

Le module solaire est l'élément de base d'un système photovoltaïque, dont le générateur solaire est composé des modules photovoltaïques connecté en série, en parallèle ou en série et parallèle, cette connexion détermine la puissance du fonctionnement de l'ensemble. Ce système est relié à un régulateur d'énergie. Il y a deux catégories de ce régulateur PWM ou MPPT, qui contrôlent un convertisseur d'un type différent dépendant de l'impédance de la charge connecté.

Soit un convertisseur DC - AC (onduleur) ou soit un convertisseur DC - DC (hacheur), il existe deux types de système photovoltaïque :

- Système Photovoltaïque avec Stockage Electrique.
- Système Photovoltaïque a Couplage Direct sans Batterie.

I.7.1. Système photovoltaïque avec stockage électrique

L'énergie électrique produite par les panneaux solaires GPV peut être utilisée directement pour l'alimentation électrique ou stockée dans des unités de stockage électriques, qui sont des batteries chimiques. La figure (I.8) montre un schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

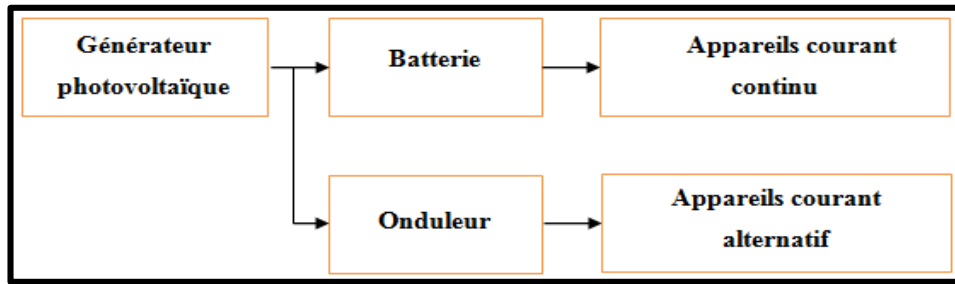


Figure. (I.8) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

I.7.2 Système photovoltaïque a couplage direct sans batterie

L'énergie électrique produite par les panneaux solaires GPV alimente la charge directement seulement, c'est-à-dire que cette énergie n'est pas stockée, voire la figure (I.9).



Figure. (I.9) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct

Chapitre II
Circuits Equivalents et
Modèles Mathématiques

II.1 Introduction

Le photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques courant tension $I=f(V)$ figure (II-1); Cette modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu par le capteur figure (II-2). Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et de la température de la cellule.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty$, $I = 0$, $V = V_{oc}$) ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance $P = V_{max} / I_{max}$ fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale, et vaut P_{max} .

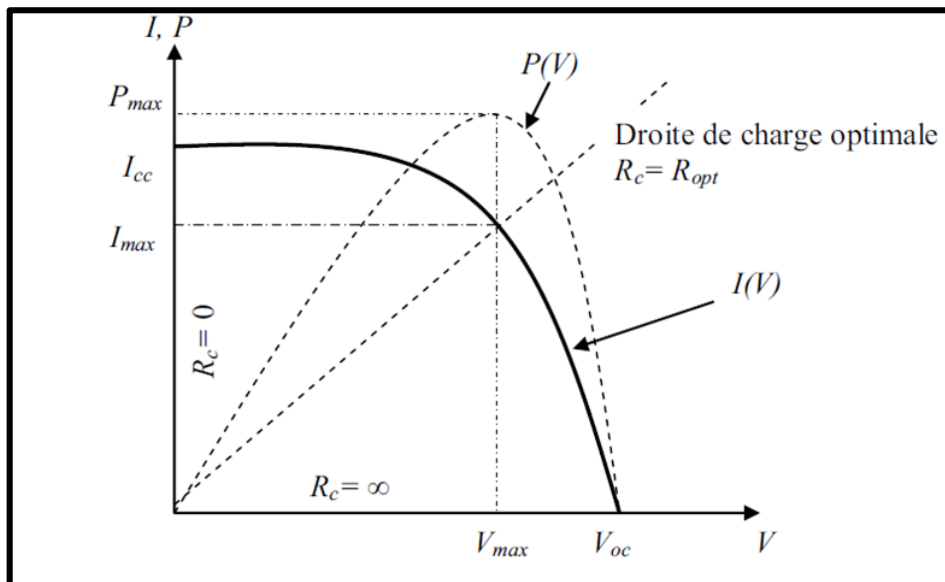


Figure. (II.1) : caractéristique type d'un générateur photovoltaïque.

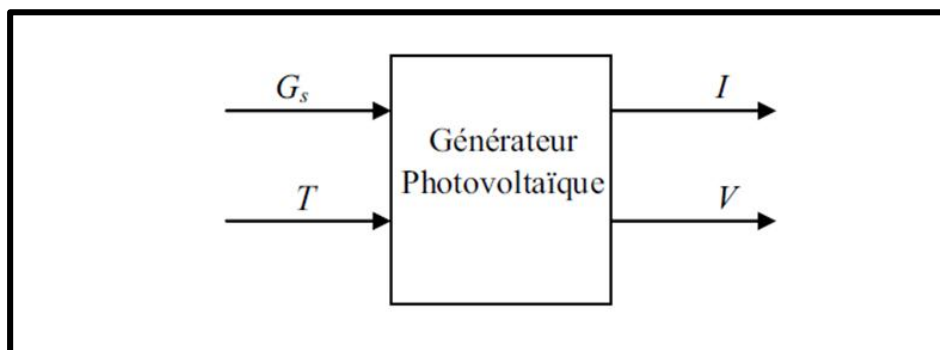


Figure. (II.2) : schéma bloc de générateur photovoltaïque.

Le rendement énergétique de la cellule solaire est défini par P_{\max}/P , où P est la puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule. Pour la valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c , le rendement de la cellule solaire est maximum, et vaut P_{\max}/P . La valeur R_{opt} n'est pas une constante caractéristique pour une cellule donnée, mais dépend du spectre du rayonnement incident et de la température de la jonction. En fait, le rendement diminue lorsque la température augmente, ce qui conduit parfois à construire des capteurs hybrides résultant de la combinaison d'un capteur thermique et d'une cellule solaire, qui permettent de produire simultanément de l'eau chaude et d'augmenter le rendement photovoltaïque en refroidissant la cellule.

La puissance fournie par la cellule solaire ($P = VI$) et son rendement (P/P_y) dépendent du matériau utilisé et de la technologie de fabrication (silicium amorphe, silicium polycristallin, silicium monocristallin), de la géométrie de la jonction (épaisseur des couches, multicouches, etc.) et des paramètres extérieurs (température, spectre et puissance du rayonnement incident, circuit électrique extérieur connecté à la cellule, etc.).

II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle photovoltaïque, il faut retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. On présentera deux modèles du GPV :

- Modèle à une diode.
- Modèle à deux diodes.

II.2.1 Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Scholey pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. [4]

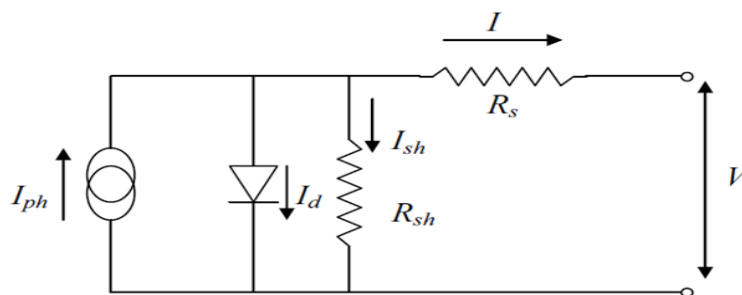


Figure (II.3) : schéma équivalent d'une cellule PV modèle diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II-1)

$$I = -I_{PH} + \frac{V - R_S I}{R_{sh}} + I_S \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_S I)}{AKT} \right\} - 1 \right] \quad (II-1)$$

Où I est courant fourni par la cellule [A]. V est la tension à la borne de la cellule [V]. Et A est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Le I_{ph} varie avec l'irradiante, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence :

$$I_{ph} = + \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \cdot [I_{phref} + \mu_{Ics}(T - T_{ref})] \quad (II-2)$$

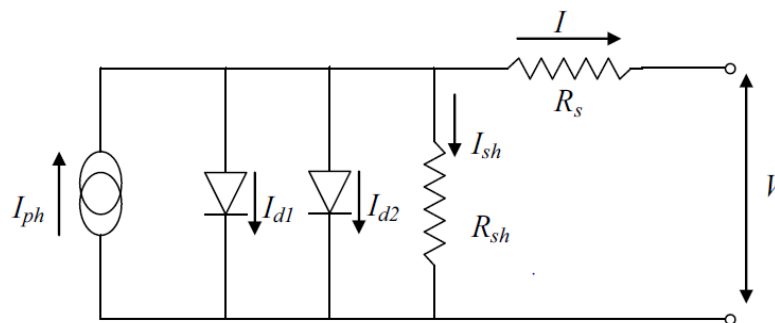
Où Φ et Φ_{ref}. Irradiante effective et de référence [W/m²] et T et T_{ref} sont température effective et de référence [K]. Et μ_{ics} : coefficient de température de la photo courant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible. Le courant de saturation est supposé variable avec la température selon L'expression

$$I_S = I_{Sref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_g}{AK} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad (II-3)$$

Où :E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin E_g = 1,12 eV, Silicium amorphe E_g = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, Cd te = 1,5 eV).

II.2.2 Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure (II-4)



Figure(II.4) : schéma équivalent d'une cellule PV modèle à deux diodes

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II-4)

$$I = -I_{PH} + \frac{V-R_S I}{R_{sh}} + I_{S1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V-R_S I)}{AKT} \right\} - 1 \right] + I_{S2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V-R_S I)}{2AKT} \right\} - 1 \right] \quad (\text{II-4})$$

II.3 Modèles mathématiques

En ce qui concerne la modélisation des capteurs PV, l'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches. La première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur PV une fois installé. C'est le cas des modèles « Sandia » et « Cenerg ». La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs, ce qui est le cas du modèle « Madison ».

II.3.1 Modèle Sandia

Le Sandia National Laboratoire (Albuquerque, USA) a élaboré un modèle de capteur PV, permettant à la fois de tester des capteurs ainsi que d'estimer leur productivité. Les principaux avantages du modèle sont les suivants :

- La variation du spectre solaire en fonction de la position du soleil dans le ciel, et son
- Influence sur le rendement photovoltaïque, est prise en compte
- Le modèle prend aussi en compte l'angle d'incidence du rayonnement direct sur le capteur PV. La face avant du module PV étant en général composée d'une vitre, celle-ci ne laisse pas passer le rayonnement de la même manière suivant l'angle d'incidence du rayonnement. Ce phénomène apparaît dès que l'angle d'incidence (par rapport à la normale au module PV) dépasse 60° ;
- La méthode permet de prendre en compte le fait que les STC (Standard Test Conditions), c'est à dire les conditions de références suivants lesquelles les grandeurs représentant le module sont mesurées par les constructeurs, sont bien différentes des conditions normales de fonctionnement. Dans ces conditions de référence, la température de fonctionnement, des cellules PV est égale à 25°C, ce qui correspond à une température ambiante aux alentours de 0°C, ce qui est rarement le cas dans la pratique ;
- Le modèle peut s'appliquer à la caractérisation d'un capteur PV constitué de plusieurs modules. Les équations déterminantes sont les suivantes :

$$I_{SC} = \frac{G}{G_r} f_1(AM) f_2(\beta) (I_{SCr} + \mu_{ISC} (T_J - T_{Jr})) \quad (\text{II-5})$$

$$I_{MP} = C_0 + G_e (I_{MPr} + \mu_{IMP} (T_J - T_{Jr})) \quad (\text{II-6})$$

$$V_{OC} = V_{OCr} + C_1 \ln(G_e) + \mu_{1sc}(T_J - T_{Jr}) \quad (II-7)$$

$$V_{MP} = V_{MPr} + C_2 \ln(G_e) + C_3 [\ln(G_e)]^2 + \mu_{VMP}(T_J - T_{Jr}) \quad (II-8)$$

$$G_e = \frac{I_{SC}}{I_{SCr}} \quad (II-9)$$

- L'hypothèse qui est utilisée est que les grandeurs V_{OC} , V_{MP} et I_{MP} sont en fonction uniquement d' I_{SC} et de la température de fonctionnement des cellules T_J . Autrement dit, la courbe caractéristique $I(V)$ (qui donne le courant I en fonction de la tension V aux bornes du capteur) est connue pour un couple (T_J, I_{SC}) donné et ne dépend ni de la distribution spectrale du rayonnement incident (fonction de AM) ni de sa distribution angulaire.

II.3.2 Modèle Madison

Ce modèle a été développé par l'université de Madison pour la programmation d'un module de simulation de capteur PV appelé 'PHANTASM' chaîné au programme de simulation thermique de bâtiment, tout comme le modèle 'Cenerg', il se base sur le modèle électrique des cellules appelé 'Modèle à une diode'. Par contre, le modèle développé propose une méthode qui permet de calculer les performances du module PV à partir des données fournies par les constructeurs.

L'équation qui donne l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes du capteur est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q}{n.k.T_j} (V + R_s \cdot I) - 1 \right] \right\} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (II-10)$$

Avec : Le membre de droite de l'équation (II.7) représentant le modèle 'Madison' fait apparaître trois termes équivalents aux trois termes de l'équation (II.6) représentant le modèle 'Cenerg'. Il existe quelques différences à noter entre les deux modèles :

Le premier terme de l'équation du modèle 'Cenerg' (équivalent à la photo courant I_{ph} du modèle 'Madison') est fonction de la température jonction T_j , et dépend d'un terme en G^2 , ce qui n'est pas le cas pour l'expression de la photo courant I_L du modèle 'Madison'. Pour ce calcul, le modèle 'Madison' utilise une hypothèse simplificatrice qui dit que la photo courant est proportionnel au rayonnement incident G , et qu'il ne dépend pas de la température T_j .- Dans l'équation du modèle 'Madison' le calcul du troisième terme, qui est le courant traversant la résistance shunt R_{sh} , fait intervenir la tension aux bornes de la résistance série, R_s . Cette résistance série n'intervient pas dans l'équation du modèle 'Cenerg', car dans ce

modèle pour calculer l'intensité traversant la résistance shunt R_{sh} , la tension aux bornes de la résistance série est négligée.

II.4 Sélection d'un modèle

Les deux modèles « Sandia » et « Cenerg » offrent certainement une meilleure précision que le modèle « Madison ». Cependant, ces deux modèles nécessitent soit d'effectuer des mesures sur site en ce qui concerne le modèle « Sandia », soit des mesures en plus de celles généralement effectuées par les constructeurs en ce qui concerne le modèle « Cenerg ». Le modèle « Madison » propose une méthode de calcul des paramètres du modèle en fonction des données constructeur. A cet effet, nous avons choisis et utilisés le modèle « Cenerg » dans cette étude.

II.5 Choix du module photovoltaïque

Dans notre travail, on a choisi le module photovoltaïque Du type SM110-24 (voir annexe). Le générateur étudié est constitué d'un groupe de deux modules photovoltaïques. Ainsi nous donnons les caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans le tableau (II.1). De celles généralement effectuées par les constructeurs en ce qui concerne le modèle 'Cenerg'. Le modèle 'Madison' propose une méthode de calcul des paramètres du modèle en fonction des données constructeur. A cet effet, nous avons choisis et utilisés le modèle 'Cenerg' dans cette étude.

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation de la cellule photovoltaïque à l'aide d'un modèle à double diode, en comparant ses grandeurs prédites avec celles existant dans la réalité. Nous avons également abordé l'analyse et la comparaison entre les modèles à une seule diode et ceux de double diode on terme des caractéristiques $I - V$ et $P - V$. Cette comparaison nous a permet de constater que le modèle de double diode offrait de meilleures performances, car il est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire.

Chapitre III

Méthodes Méta-heuristiques

III.1 Introduction

En ingénierie, de nombreux problèmes nécessitent l'utilisation de méthodes d'optimisation pour atteindre ou obtenir une solution optimale. Les méthodes déterministes semblent répondre à ce besoin, mais le problème de l'idéalisme local est un véritable piège pour un idéal universel. D'où des méthodes stochastiques dites méta-heuristiques qui évitent généralement ce problème et ont une grande capacité à trouver les meilleures solutions sont généralement utilisées [23]. Parmi ces technologies, celles basées sur l'intelligence de groupe, inspirées de la nature. Dans ce chapitre nous étudierons l'algorithme de recherche de coucou (CS) et l'hybridation des algorithmes de recherche de coucou avec la biogéographie.

III.2 Définition d'optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum donc) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

III.3 Fonction objectif :

La fonction objective (de test, fitness) est une fonction qui, à chaque solution dans l'espace de recherche associe une valeur numérique pour décrire sa qualité ou fitness. Donc la qualité ou fitness d'une solution est proportionnelle à la valeur de la fonction objective. En résumé, la fonction objective est une fonction mathématique qui mesure la qualité d'une solution candidate dans un problème d'optimisation. Elle est utilisée pour guider la recherche de la meilleure solution possible en maximisant ou minimisant une valeur spécifique.

III.4 Classification des méthodes d'optimisations :

La résolution d'un problème d'optimisation est réalisée à l'aide des méthodes d'optimisation dont la classification est illustrée dans Figure III.1. On distingue en premier lieu l'optimisation continue de l'optimisation discrète (ou combinatoire).

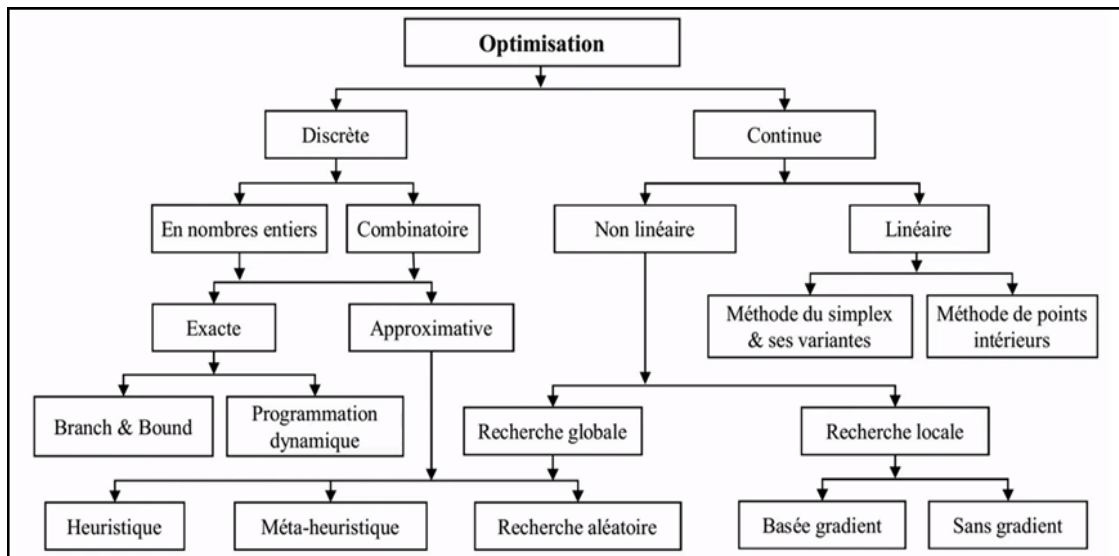


Figure. (III.1) : Classification des méthodes d'optimisations

III.4.1 Les métras heuristiques à solution unique :

Les méta-heuristiques à solution unique sont appelées méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire, commencent avec une seule solution initiale, et par une amélioration itérative, en construisant un ensemble de solutions de coûts décroissants pour un problème de minimisation. Le processus s'arrête si la solution courante ne peut pas être améliorée ou si le nombre d'itérations maximum est atteint. Quelques exemples typiques de cette classe : recuit simulé, recherche tabou, et le recuit micro canonique.... etc. [24].

III.4.2. Les métras heuristiques à solution multiple

Les méta-heuristiques à solution multiple travaillent sur un ensemble de points de l'espace de recherche en commençant avec une population de solution initiale puis de l'améliorer au fur et à mesure des itérations. Elles ont une capacité à parcourir les grands espaces de recherche mais n'ont pas un fort pouvoir d'intensification et peuvent avoir tendance à converger lentement. L'objectif de ces méthodes est d'utiliser la population comme un facteur de diversité. Cette méta heuristique en globe : les algorithmes évolutifs (Colonies de fourmi, algorithmes génétiques, Evolution différentielle), Essaim particulaire, SFLA, etc.) [25].

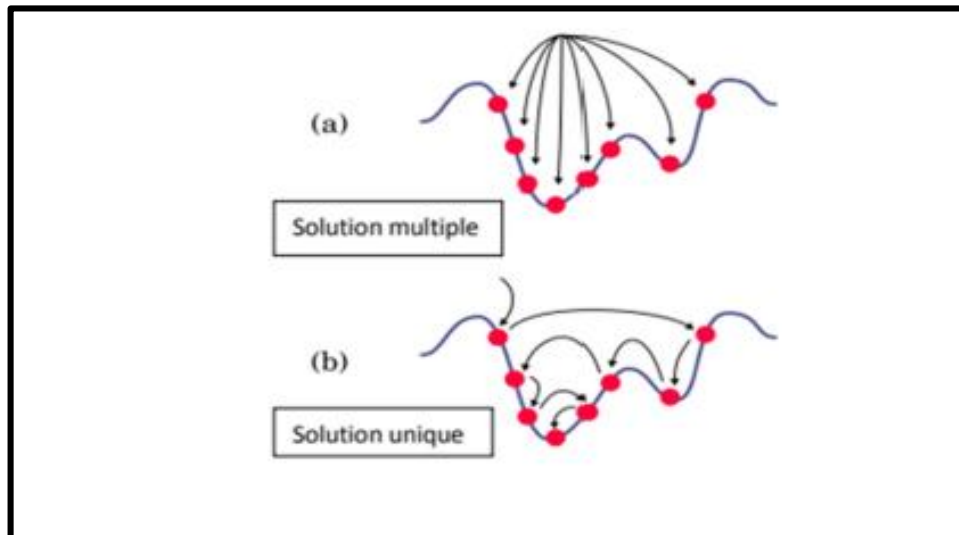


Figure. (III.2) : Exemple d'une solution multiple et unique

III.5.Algorithme de coucou search (CS)

L'algorithme de coucou search une méthode d'optimisation méta heuristique inspirée par la nature. Elle se base sur le système productif agressif des oiseaux coucou.

Il est calqué sur le comportement des femelles coucou lors de la période de couvaion. Les oiseaux coucou sont des oiseaux fascinants. Ils se nourrissent principalement d'insectes et de chenilles velues. Il se nourrit dans les arbres et les broussailles, à découvert. Ils vivent aux lisières des forêts et dans les clairières, les fermes, les marais, les dunes côtières et les campagnes ouvertes, les zones cultivées avec des arbres et des buissons, et près des roselières. Quelques espèces des oiseaux coucou ont un système agressif, en effet :

Ils pondent leurs œufs des nids d'autres oiseaux, ils peuvent aussi enlever les œufs des autres pour augmenter la probabilité d'éclosion de leurs propres œufs. Lorsqu'un oiseau haut découvre qu'un œuf étranger est dans le nid, il engage un conflit direct avec le coucou parasite, comme il abandonne le nid en cours, ou bien il construit un autre ailleurs.



Figure. (III.3) : Un oiseau coucou

III .5.1. Principaux composants de recherche coucou (CS)

Dans la recherche coucou, les nids ont les caractéristiques suivantes :

- Nombre de nids fixés
- Un nid est un individu dans une population.
- Le nombre de nids est égal à la taille de la population.
- Les tanières abandonnées consistent à remplacer des individus de la population par nouveau.
- Un œuf dans le nid représente une solution.

Par conséquent, nous pouvons conclure de ces caractéristiques que pour notre problème A partir de l'optimisation combinatoire, le nid est représenté comme un individu dans la population sa propre solution.

Les coucous peuvent pondre un œuf dans un nid et laisser l'œuf. Les propriétés suivantes :

- Les œufs au nid sont la solution adoptée par l'individu population.
- (Cuckoo's Egg) est une nouvelle solution candidate pour une place a la population

Dans notre problème, un nid de meilleure qualité d'œuf nous mènera vers les nouvelles générations. Ce qui veut dire que la qualité d'un œuf de Coucou est directement liée à sa capacité de donner un nouveau coucou.

III.6. L'algorithme génétique

L'algorithme génétique (Génétiq ue Algorithm e) est une méthode d'optimisation basée sur le processus de sélection naturelle et d'évolution dans la nature. Il est inspiré par les principes de la génétique et de la sélection naturelle de Darwin.

Le principe de base de l'algorithme génétique est de simuler l'évolution d'une population de solutions candidates afin de trouver la meilleure solution possible à un problème d'optimisation.

L'algorithme génétique commence par générer une population initiale de solutions candidates, souvent de manière aléatoire. Chaque solution est représentée sous forme de code génétique, généralement sous la forme d'une chaîne de bits ou d'un vecteur de valeurs réelles.

Ensuite, l'algorithme génétique applique les opérations de sélection, de croisement et de mutation pour créer de nouvelles générations de solutions. La sélection est basée sur la qualité des solutions, où les meilleures solutions ont une probabilité plus élevée d'être sélectionnées pour la reproduction. Le croisement consiste à échanger des parties des codes génétiques des solutions parentes pour créer de nouvelles solutions. La mutation est utilisée pour introduire une exploration aléatoire en modifiant certains éléments du code génétique.

Après chaque génération, les solutions sont évaluées en utilisant une fonction objective qui mesure leur qualité. Les meilleures solutions sont conservées pour la génération suivante, tandis que les moins performantes sont éliminées.

Le processus d'évolution se répète pendant un certain nombre d'itérations ou jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint. Cela permet à l'algorithme génétique de converger vers une solution optimale ou quasi-optimale du problème.

III.6.1. Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (Génétiq ue Algorithmes) présentent plusieurs avantages et inconvénients.

III.6.1.1. avantages des algorithmes génétiques:

- Exploration de l'espace de recherche : Les algorithmes génétiques sont capables d'explorer de manière globale l'espace des solutions possibles, ce qui les rend adaptés à des problèmes complexes avec de multiples optimums locaux.

- Adaptabilité : Les algorithmes génétiques peuvent s'adapter à des problèmes d'optimisation dynamiques ou changeants, car ils peuvent facilement ajuster la population de solutions en fonction de nouvelles contraintes ou objectifs.
- Parallélisme naturel : Les algorithmes génétiques peuvent être facilement parallélisés, car les évaluations de fitness des solutions individuelles peuvent être effectuées indépendamment.
- Exploration et exploitation équilibrées : Les opérations de croisement et de mutation permettent d'explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche, tandis que la sélection favorise les solutions de haute qualité, équilibrant ainsi l'exploration et l'exploitation.
- Pas de dépendance aux dérivées : Contrairement à certaines méthodes d'optimisation basées sur des dérivées, les algorithmes génétiques ne nécessitent pas de connaître les dérivées de la fonction objectif, ce qui les rend applicables à un large éventail de problèmes.

III.6.1.2. Inconvénients des algorithmes génétiques:

- Requiert des paramètres : Les algorithmes génétiques ont plusieurs paramètres qui doivent être définis, tels que la taille de la population, les taux de croisement et de mutation. Le choix de ces paramètres peut avoir un impact significatif sur les performances de l'algorithme.
- Temps de calcul : Les algorithmes génétiques peuvent nécessiter un temps de calcul important, en particulier pour des problèmes complexes ou avec de grandes populations.
- Risque de convergence prématurée : Il est possible que les algorithmes génétiques convergent prématurément vers un optimum local et ne trouvent pas la meilleure solution globale possible.
- Difficulté à traiter des contraintes : L'incorporation de contraintes dans les algorithmes génétiques peut être complexe et nécessite souvent des techniques spécifiques telles que des méthodes de pénalisation ou des opérateurs spéciaux.
- Dépendance à la représentation des solutions : Le choix de la représentation des solutions (par exemple, chaînes de bits, vecteurs réels) peut influencer les performances des algorithmes génétiques et peut nécessiter une adaptation spécifique pour différents types de problèmes.

Il est important de noter que les avantages et les inconvénients des algorithmes génétiques peuvent varier en fonction du problème spécifique et de la mise en œuvre de l'algorithme. Il est recommandé de faire des expérimentations et d'ajuster les paramètres pour obtenir les meilleurs résultats pour un problème donné.

III.7. Algorithm PSO

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (Particle Swarn Optimisation, PSO) est une méthode d'optimisation inspirée du comportement social des essaims d'oiseaux ou de poissons. Dans cet algorithme, un groupe de particules est utilisé pour explorer l'espace de recherche afin de trouver la meilleure solution possible à un problème donné.

Chaque particule représente une solution potentielle et se déplace dans l'espace en fonction de sa propre expérience et de l'expérience collective du groupe. À chaque étape de l'algorithme, les particules ajustent leur position en fonction de leur meilleure solution personnelle (meilleure performance obtenue jusqu'à présent) et de la meilleure solution globale trouvée par l'ensemble du groupe.

L'idée fondamentale du PSO est que les particules se guident mutuellement vers des régions de l'espace de recherche prometteuses, en exploitant les informations partagées sur les positions et les performances des autres particules. Cela favorise l'exploration de l'espace de recherche tout en permettant une convergence vers des solutions de haute qualité.

L'algorithme PSO est souvent utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes dans divers domaines tels que l'ingénierie, la finance, l'optimisation de réseaux et la recherche opérationnelle. Sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à trouver rapidement des solutions de bonne qualité en font un outil puissant pour résoudre des problèmes réels.

En résumé, l'algorithme PSO est une technique d'optimisation inspirée du comportement social des essaims. Il utilise un groupe de particules pour explorer l'espace de recherche et trouver la meilleure solution possible. Grâce à la coopération et à l'interaction entre les particules, le PSO permet de résoudre efficacement une large gamme de problèmes d'optimisation.

III.7.1. Avantages et inconvénient L'algorithme d'optimisation par essai de particules PSO

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (Particule Swarn Optimisation, PSO) présente plusieurs avantages qui en font une méthode populaire pour résoudre des problèmes d'optimisation :

- Simplicité et facilité d'implémentation : Le PSO est un algorithme relativement simple à comprendre et à mettre en œuvre. Il ne nécessite pas de connaissances spécialisées approfondies en mathématiques ou en optimisation, ce qui le rend accessible aux utilisateurs de différents domaines.
- Recherche globale : Le PSO est capable d'explorer efficacement l'espace de recherche en utilisant l'interaction entre les particules. Il a la capacité de rechercher des solutions de manière globale, ce qui signifie qu'il peut trouver des solutions potentiellement optimales même dans des espaces de recherche complexes et multidimensionnels.
- Parallélisme : Le PSO est intrinsèquement parallèle, ce qui signifie qu'il peut être facilement adapté pour fonctionner sur des architectures informatiques parallèles ou distribuées. Cela permet d'accélérer le processus d'optimisation en effectuant des calculs simultanément sur plusieurs particules.
- Adaptabilité : Le PSO est capable de s'adapter aux changements dynamiques de l'environnement ou des contraintes du problème. Les particules peuvent ajuster leur comportement en fonction des nouvelles informations disponibles, ce qui permet une exploration continue de l'espace de recherche et une adaptation aux conditions changeantes.
- Convergence rapide : Grâce à la coopération et à la communication entre les particules, le PSO est souvent capable de converger rapidement vers des solutions de haute qualité. Cela en fait une méthode efficace pour trouver des solutions optimales ou quasi-optimales en un temps raisonnable.
- Robustesse : Le PSO est généralement robuste face aux problèmes non linéaires, multimodaux et à bruit élevé. Il peut trouver des solutions robustes même en présence de perturbations ou de variations importantes dans le paysage de recherche.

Bien que l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (Particule Swarn Optimisation, PSO) présente plusieurs avantages, il existe également certains inconvénients à prendre en compte :

- Sensibilité aux paramètres : Le PSO comporte plusieurs paramètres, tels que la taille du groupe de particules, les coefficients d'inertie et les limites de vitesse. La performance du PSO peut être sensible à ces paramètres, ce qui nécessite une sélection et une adaptation soigneuses pour obtenir de bons résultats. Trouver les valeurs optimales pour ces paramètres peut être un défi, en particulier pour des problèmes complexes.
- Risque de stagnation : Le PSO peut être sujet à la stagnation, c'est-à-dire qu'il peut converger prématurément vers une solution suboptimale ou rester coincé dans une région locale de l'espace de recherche. Cela peut se produire si les particules perdent la diversité et n'explorent pas suffisamment l'espace de recherche. La stagnation peut être atténuée en utilisant des mécanismes de diversification, tels que la perturbation aléatoire ou l'introduction de nouvelles solutions.
- Dépendance de l'initialisation : Les performances du PSO peuvent être sensibles à l'initialisation des particules. Une mauvaise initialisation peut entraîner une exploration inefficace de l'espace de recherche ou une convergence rapide vers des solutions de mauvaise qualité. Une initialisation aléatoire peut parfois nécessiter plusieurs exécutions pour obtenir des résultats satisfaisants.
- Limitations pour les problèmes à dimensions élevées : Le PSO peut rencontrer des difficultés pour résoudre des problèmes avec un grand nombre de variables ou des espaces de recherche de dimensions élevées. L'explosion combinatoire de l'espace de recherche peut rendre l'exploration inefficace et augmenter le temps de convergence de l'algorithme.
- Manque de garantie de convergence globale : Contrairement à certains autres algorithmes d'optimisation, le PSO ne fournit pas de garantie formelle de convergence globale vers une solution optimale. Bien que le PSO puisse souvent trouver des solutions de haute qualité, il n'est pas garanti qu'il atteindra la meilleure solution possible pour tous les problèmes.

III.8. Conclusion :

Ce chapitre aborde différentes méthodes d'amélioration utilisées pour optimiser les performances des systèmes. Ces méthodes visent à trouver les meilleures solutions possibles pour un problème donné. Chacune de ces méthodes a ses propres avantages, inconvénients et domaines d'application. Le choix de la méthode dépend du problème spécifique et des contraintes liées à celui-ci. L'utilisation de techniques d'amélioration peut grandement

améliorer les performances et la qualité des solutions dans de nombreux domaines, tels que l'optimisation des systèmes, la planification, la conception, etc.

*Chapitre IV Simulation et
Résultats*

IV.1 Introduction

L'objectif principal de cette étude est d'extraire les meilleurs paramètres du modèle mathématique des cellules et modules PV à l'aide d'un algorithme de recherche de coucou (CS), afin d'assurer un lien meilleur et plus fiable entre la simulation et l'expérimentation. Essai.

Les simulations ont été réalisées sous MATLAB, sur un ordinateur Intel (R) Coré (TM) i3-3110M CPU @ 2,40 GHz avec 4 Go de RAM sous Windows XP.

Selon la simulation, les paramètres suivants sont utilisés dans l'algorithme amélioré GAGM :

- Le nombre de générations est de 500 à 1000 itérations et le nombre de population est de 60 nids.
- Les probabilités de découverte et taille de pas sont respectivement $K = 0,75$ et $L = 0,01$.

Dans cette section, l'algorithme propose CS a été appliqué aux différents cas suivants :

- Cas 1 : Extraction des paramètres pour la cellule solaire R.T.C commercial silicium France, les données expérimentales pour la mesure courant-tension sous $1000\text{W}/\text{m}^2$ à $33\text{ }^\circ\text{C}$ fournies dans [EXTRA]..
- Cas 2 : Extraction des paramètres pour le module poly cristallin STP6-120/36 constitué de 36 cellules connectées en série, les données expérimentales de mesure courant-tension sous $1000\text{W}/\text{m}^2$ à $55\text{ }^\circ\text{C}$ fournies dans [EXTRA].

Les plages de recherche des meilleurs paramètres du modèle mathématique de la cellule solaire R.T.C France, du module poly cristallin STP6-120/36 sont données dans le tableau 1.

Paramètres	SD et DD cellule		STP6-120/36 Module	
	MIN	MAX	MIN	MAX
I_{ph} [A]	0	1	0	8
I_{s1}, I_{s2} [μA]	0	1	0	50
R_{sh} [Ω]	0	0,5	0	0,5
R_s [Ω]	0	100	0	100
n_1, n_2	1	2	1	2

Tableaux(IV.1). Les plages de recherche des meilleurs paramètres

IV.2 Résultats de l'étude sur la cellule solaire

Dans cette étude de cas, nous nous concentrons sur l'évaluation des performances de différents algorithmes d'optimisation pour l'extraction de paramètres de modèles de cellules solaires à simple et double diode. Plus particulièrement, nous comparons les résultats obtenus

par l'algorithme CS proposé avec ceux des autres algorithmes. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) obtenues par chaque algorithme sont présentées dans le tableau (IV.2) pour le modèle à simple diode, et dans le tableau (IV.3) pour le modèle à double diode.

	$I_{ph}(A)$	$I_s (\mu A)$	$R_s(\Omega)$	Rsh (Ω)	A	RMSE
PSO	0.7607	0.3294	0.0363	54.3015	1.4831	9.8533 e-4
GOTLBO	0.7608	0.3226	0.0364	53.3388	1.4811	9.8658 e-4
BHCS	0.7608	3230210	0.0364	53.7185	1.4812	9.8302 e-4
MLBSA	0.7608	0.3281	0.0364	53.7185	1.4811	9.8203 e-4
CS	0.760776	3230210.	0.0363771	53.7185	1.48118	9.8202 e-4

Tableau(IV.2):Résultats des paramètres électriques d'un modèle à seule diode.

	$I_{ph}(A)$	Is1 (μA)	Is2 (μA)	$R_s(\Omega)$	Rsh (Ω)	α_1	α_2	RMSE
PSO	0.7608	0.2717	0.2595	0.0366	53.6187	1.4668	1.9161	9.9244 e-4
BHCS	0.7507	0.7499	0.2259	0.0367	55.4854	1.9999	1.4510	9.84 e-4
MLBSA	0.7610	0.2947	0.1373	0.0366	53.1210	1.4730	1.9938	10.069 e-4
CS	0.7507	0.26324	0.4485	0.0365	54.8038	1.4638	2	9.83 e-4

Tableau(IV.3):Résultats des paramètres électriques d'un modèle à deux diodes.

Nos résultats montrent que l'algorithme CS présente de meilleures performances par rapport aux autres algorithmes, avec des valeurs RMSE plus faibles pour les modèles à simple et double diode. Pour valider la précision de l'extraction des paramètres, nous comparons les valeurs simulées et mesurées des caractéristiques I-V et P-V des modèles. Les comparaisons pour les modèles à simple et double diode sont illustrées dans les figures (IV.2) et (IV.3), respectivement. Les graphiques démontrent une concordance étroite entre les valeurs simulées obtenues par l'algorithme CS proposé et les mesures expérimentales.

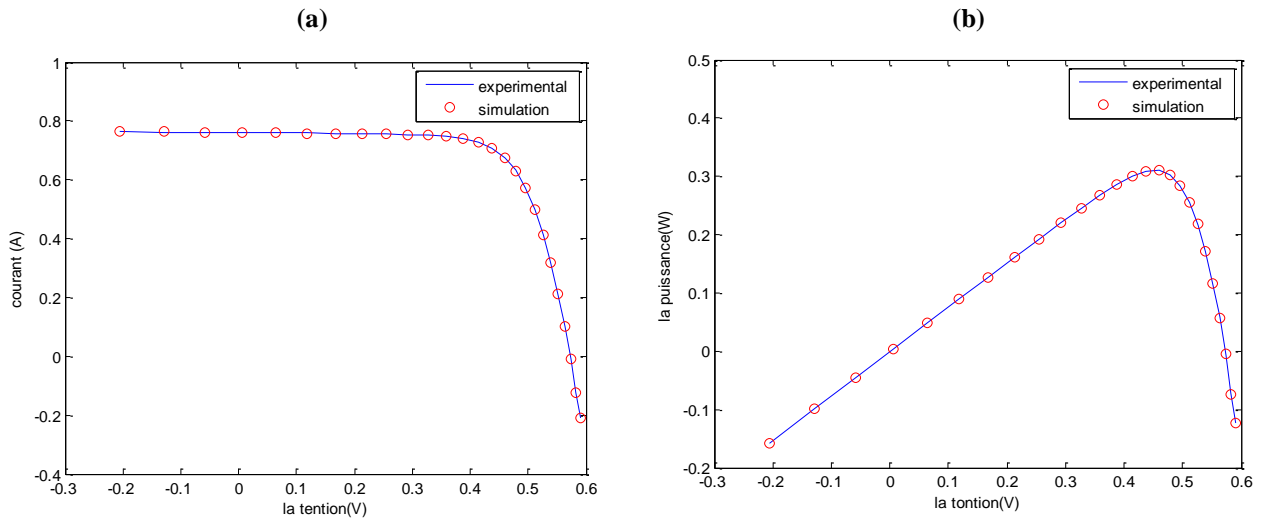


Fig. (IV.1) : Comparaison des valeurs mesurées et estimées pour un modèle a une seule diode:

(a)caractéristique-V, (b) caractéristique-V

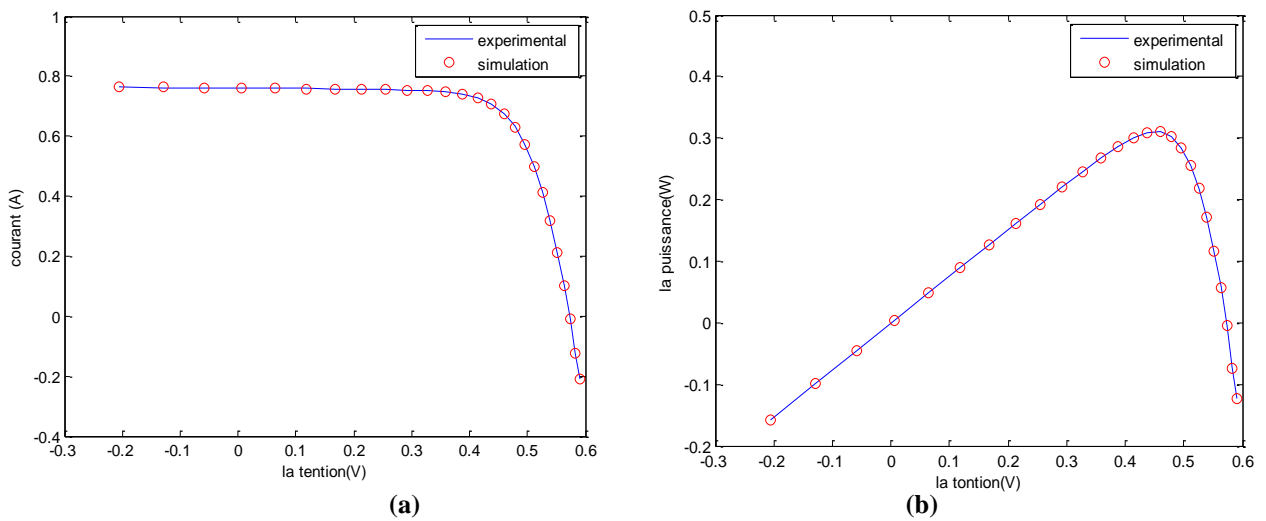


Fig. (IV.2) : Comparaison des valeurs mesurées et estimées pour un modèle a une double diode:

(a)caractéristique-V, (b) caractéristique-V

En outre, nous examinons l'erreur absolue du courant-puissance pour les modèles à simple diode obtenus par l'algorithme proposé. Les résultats sont présentés dans la figure (IV.3) Le tableau (IV.4) présente les résultats simulés obtenus par l'algorithme CS proposé pour les modèles à simple diode. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de l'algorithme CS pour estimer avec précision les paramètres des modèles.

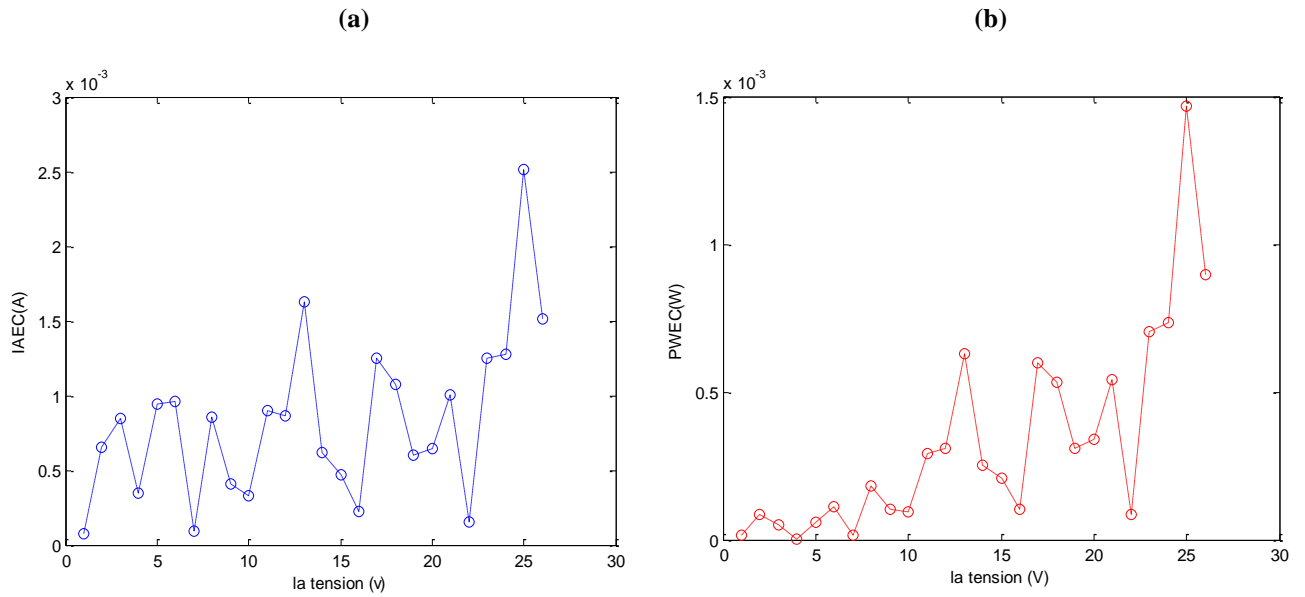


Figure (IV.3) : L'erreur entre le courant-puissance mesurée et le courant-puissance de simulation en utilisant le CS pour le modèle SD.

Tableau(IV.4).: Résultats de simulation a ITLBO pour model double diode

Item	V (V)	I _{measured} (A)	I _{simulated} (A)	I _{AEC} (A)	M _{measured} (W)	Simulated (W)	I _{AEP} (W)
1	-0.2057	0.764	0.76398342	0.00001658	-0.1571548	-0.15715139	0.0000341
2	-0.1291	0.762	0.76260370	0.00060370	-0.0983742	-0.09845214	0.00007794
3	-0.0588	0.7605	0.76133714	0.00083714	-0.0447174	-0.04476662	0.00004922
4	0.0057	0.76	0.76017400	0.000326	0.00433485	0.00433299	0.00000186
5	0.0646	0.759	0.75910827	0.00089173	0.049096	0.04903839	0.00005761
6	0.1185	0.757	0.75812202	0.00087798	0.0899415	0.08983746	0.00010404
7	0.1678	0.757	0.75718848	0.00018848	0.1270246	0.12705623	0.00003163
8	0.2132	0.7555	0.75624423	0.00075577	0.1613924	0.16123127	0.00016113
9	0.2545	0.754	0.75517766	0.00032234	0.19227475	0.19219271	0.00008204
10	0.2924	0.7505	0.75372286	0.00027714	0.2204696	0.22038856	0.00008104
11	0.3269	0.7465	0.75139611	0.00089611	0.24533845	0.24563139	0.00029294
12	0.3585	0.7385	0.74729616	0.00079616	0.26762025	0.26790568	0.00028543
13	0.3873	0.728	0.73999138	0.00149138	0.28602105	0.28659866	0.00057761
14	0.4137	0.7065	0.72726488	0.00073512	0.3011736	0.30086948	0.00030412
15	0.4373	0.6755	0.70683581	0.00033581	0.30895245	0.3090993	0.00014685
16	0.459	0.632	0.67523011	0.00026989	0.3100545	0.30993062	0.00012388
17	0.4784	0.573	0.63088763	0.00111237	0.3023488	0.30181664	0.00053216
18	0.496	0.499	0.57214027	0.00085973	0.284208	0.28378157	0.00042643
19	0.5119	0.413	0.49957059	0.00057059	0.2554381	0.25573018	0.00029208
20	0.5265	0.3165	0.41355632	0.00055632	0.2174445	0.2177374	0.0002929
21	0.5398	0.212	0.31724207	0.00074207	0.1708467	0.17124727	0.00040057
22	0.5521	0.1035	0.21208148	0.00008148	0.1170452	0.11709018	0.00004498
23	0.5633	0.01	0.10267156	0.00082844	0.05830155	0.05783489	0.00046666
24	0.5736	-0.01	-0.00929723	0.00070277	-0.005736	-0.00533289	0.00040311
24	0.5833	-0.123	-0.12439038	0.00139038	-0.0717459	-0.7255691	0.00081101
26	0.59	-0.21	-0.20914692	0.00085308	-0.1239	-0.12339668	0.00050332
Σ	-	-	-	0.01731854	-	-	0.00655394

IV.3 Résultats de l'étude sur le module solaire STP6-120/ 36

Dans cette étude de cas, nous nous concentrons sur l'évaluation des performances de différents algorithmes d'optimisation pour l'extraction de paramètres de modèles de module solaires à simple diode. Plus particulièrement, nous comparons les résultats obtenus par l'algorithme CS proposé avec ceux des autres algorithmes. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) obtenues par chaque algorithme sont présentées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.5: Résultats des paramètres électriques d'un module STP6-120/ 36.

Algorithms	$I_{ph}(A)$	$I_s (\mu A)$	$R_s (\Omega)$	Rsh (Ω)	A	RMSE
LIAYA	7.4672	2.2536	0.1635	5925	1.2571	1.6731e-2
MLPSA	7.4725	2.3350	0.0046	22.2199	1.2601	1.6601e-2
SATLBO	7.4725	2.3350	0.0046	22.2199	1.2601	1.6601e-2
TLABC	7.4725	2.3349	0.0046	22.2117	1.2601	1.6601e-2
CS	7.4751	2.6441	0.1635	1022.1380	1.2862	1.6188e-2

Nos résultats montrent que l'algorithme CS présente de meilleures performances par rapport aux autres algorithmes, avec des valeurs RMSE. Pour valider la précision de l'extraction des paramètres, nous comparons les valeurs simulées et mesurées des caractéristiques I-V et P-V de module **STP6-120/ 36**. Les sont illustrées dans la figure (IV.5)

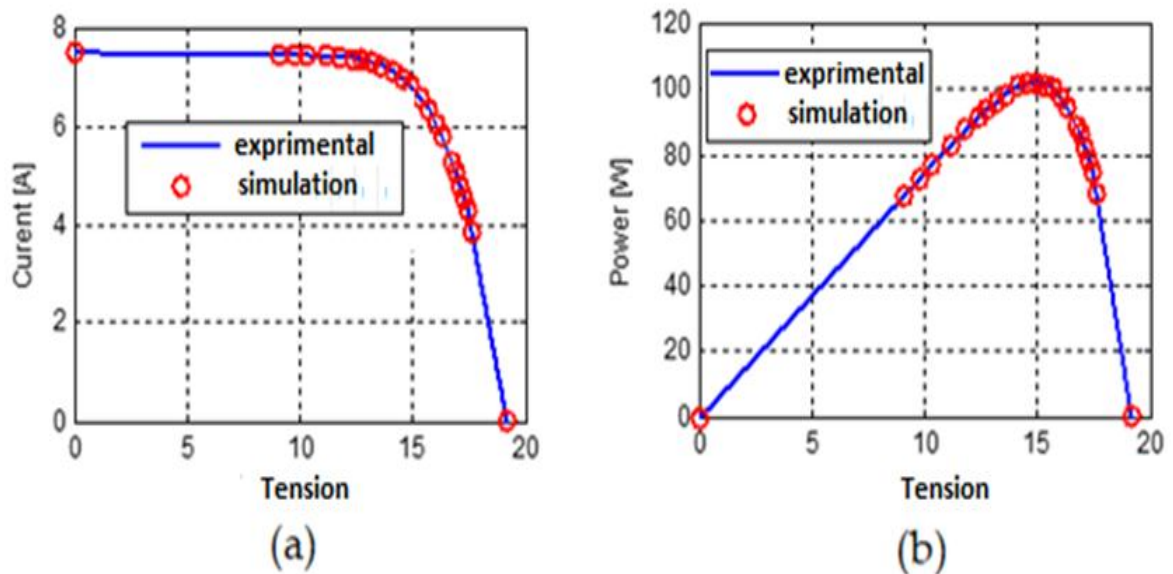


Figure. (IV.4) : Comparaison des valeurs mesurées et estimées pour module STP6-120/ 36 :
 (a)caractéristique-V, (b) caractéristique-V

En outre, nous examinons l'erreur absolue du courant pour module obtenus par l'algorithme proposé. Les résultats sont présentés dans la figure. (IV.4) : Le tableau (IV.6):présente les résultats simulés obtenus par l'algorithme CS proposé. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de l'algorithme CS pour estimer avec précision les paramètres des modèles.

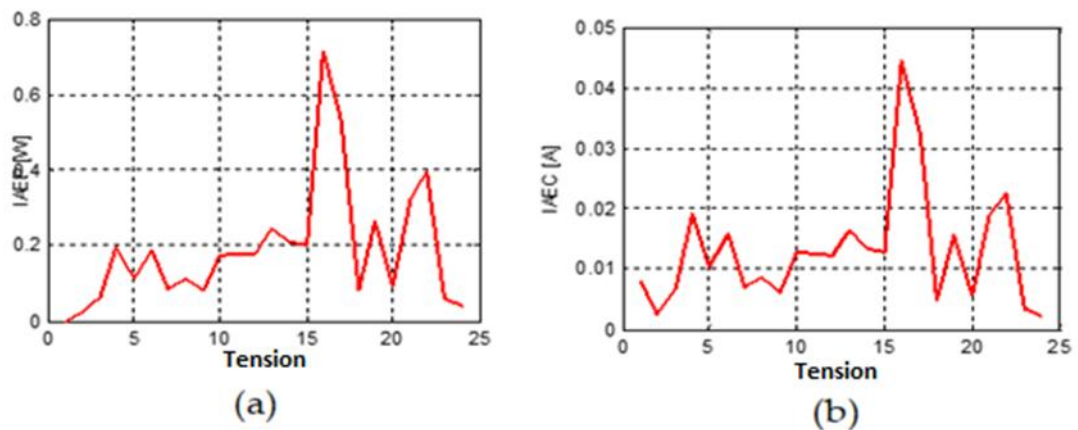


Figure. (IV.5) : L'erreur entre le courant-puissance mesurée et le courant-puissance de simulation en utilisant le CS pour le module STP6-120/ 36.

Tableau (IV.6): Résultats de simulation pour STP6-120/36.

	Item	V (V)	I _{measured} (A)	I _{simulated} (A)	I _{AEC} (A)	P _{measured} (W)	P _{simulated} (W)	I _{AEP} (W)
1	0	7.48	7.47098129	0.00901871	0	0	0	0
2	9.06	7.45	7.45253755	0.00253755	67.497	67.51999023	0.02299023	
3	9.74	7.44	7.44671497	0.00671497	72.4656	72.53100378	0.06540378	
4	10.32	7.42	7.43909223	0.01909223	76.5744	76.77143185	0.19703185	
5	11.17	7.41	7.42026500	0.01026500	82.7697	82.88436008	0.11466008	
6	11.81	7.38	7.39587315	0.01587315	87.1578	87.34526186	0.18746186	
7	12.36	7.37	7.36326479	0.00673521	91.0932	91.00995282	0.08324718	
8	12.74	7.34	7.33148307	0.00851693	93.5116	93.40309430	0.10850570	
9	13.16	7.29	7.28412985	0.00587015	95.9364	95.85914884	0.07725116	
10	13.59	7.23	7.21776060	0.01223940	98.2557	98.08936657	0.16633343	
11	14.17	7.1	7.08813731	0.01186269	100.607	100.43890575	0.16809425	
12	14.58	6.97	6.95844905	0.01155095	101.6226	101.45418714	0.16841286	
13	14.93	6.83	6.81486011	0.01513989	101.9719	101.74586142	0.22603858	
14	15.39	6.58	6.56792937	0.01207063	101.2662	101.08043298	0.18576702	
15	15.71	6.36	6.34872743	0.01127257	99.9156	99.73850787	0.17709213	
16	16.08	6	6.03749239	0.03749239	96.48	97.08287761	0.60287761	
17	16.34	5.75	5.77681380	0.02681380	93.955	94.39313755	0.43813755	
18	16.76	5.27	5.27376516	0.00376516	88.3252	88.38830404	0.06310404	
19	16.9	5.07	5.08193389	0.01193389	85.683	85.88468272	0.20168272	
20	17.1	4.79	4.78583302	0.00416698	81.909	81.83774459	0.07125541	
21	17.25	4.56	4.54628941	0.01371059	78.66	78.42349232	0.23650768	
22	17.41	4.29	4.27392907	0.01607093	74.6889	74.40910509	0.27979491	
23	17.65	3.83	3.83228232	0.00228232	67.5995	67.63978290	0.04028290	

24	19.21	0	0.00116434	0.00116434	0	0.02236700	0.02236700
Σ	-	-	-	0.27616043	-	-	3.90429992

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'applicabilité d'algorithme CS pour étudier le comportement physique des dispositifs photovoltaïques. L'objectif de ce chapitre était l'extraction des paramètres électriques des différents modules photovoltaïques qui a été accomplie dans un temps relativement faible et sans besoin d'intervention de l'utilisateur pendant le processus d'optimisation. Les résultats indiquent que la technique des CS présente une meilleure stratégie conventionnelle d'extraction des paramètres, en termes de convergence et exactitude, elle fournit des solutions optimales globales.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est donc transformée en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, En effet le silicium contenu dans les semi – conducteurs, nous permet d'utiliser la lumière comme source d'électricité à travers les cellules photovoltaïques. Les panneaux solaires, constitué d'un grand nombre de ces cellules, permet d'utiliser l'effet photovoltaïque dans la vie courante.

Le but dans ce mémoire était l'extraction des paramètres électriques pour différents modules photovoltaïques en utilisant l'algorithme CS. Le modèle analytique déduit à partir d'un circuit électrique équivalent, on rencontre dans la littérature plusieurs modèles en particulier les modèle a une diode et a deux diodes. Les caractéristiques courant-tension (I-V) de ces modules ont été basés sur le modèle à simple diode.

Dans la première partie du mémoire nous avons présenté les notions fondamentales nécessaires pour la compréhension du comportement de la cellule photovoltaïque, leur principe de fonctionnement et ses différentes caractéristiques. Ensuite, nous avons donné les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Pour la deuxième partie, nous avons donné le modèle analytique d'une cellule photovoltaïque basé sur une seule diode. Ensuite, une approche basée sur les algorithmes génétiques à été développée afin d'extraire les paramètres électriques (I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} , n) des différents modules photovoltaïques pour différentes valeur d'éclairement .

Dans la dernière partie nous avons décrit une méthode évolutionnaire qui est CS. Leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques principales ont été abordé. Puis, nous avons présenté les différents opérateurs génétiques.

Enfin, nous avons montré l'applicabilité CS pour étudier le comportement physique des dispositifs photovoltaïques. L'extraction des paramètres électriques des modules photovoltaïques a été accomplie dans un temps relativement faible et sans besoin d'intervention de l'utilisateur pendant le processus d'optimisation .

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

Références
bibliographiques

- [1] **W.U.Huynh, J.J.Dittmer, A.P.Alivisatos**, Science, 295(2002)2425; b) B. Sun, E.Marx, N. C. Greenham, Nano Lett, 3(2003)961.
- [2] **N, Bellel**. 'Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type Collecteur', thèse de magistère, Université de Constantine 2016.
- [3] **AkassawaTchapoSingo** « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockagehybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université deHenri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [4] **José Miguel Navarro** « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [5] **M.N.Mchalikhet CH.Hmada**''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université KasdiMerbah–OUARGLA 2013.
- [6] **k.riad**«Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques». Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - SETIF , 05 Mars 2015.
- [7] **H.Kamelia**, Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative, Mémoire de Magister En Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri De TIZI-OUZOU 25 / 06 / 2012.
- [8] **L. Ahlam, B. Halima**, Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments halogènes, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2018/2019.
- [9] **G. Abd El kader, H. Mohamed El Amine**, Extraction Des Paramètres Du Module Photovoltaïque Installé Dans Un Site Saharien, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, UniversitéAhmedDraia-ADRAR, 2021.
- [10] **B.Ahlam, CH. Imane**, Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2018/2019.
- [11] **M, Capderou**. 'Atlas solaire de l'Algérie', O.P.U, Alger 1985.
- [12] Site internet la cellule photovoltaïque'.
- [13] **A. Bousskine, N. Guermouche**, 'Contribution à l'étude des Systèmes de Pompage Photovoltaïque ', Mémoire d'ingénieur, Université de BEJAIA, 2010.

- [14] **O.Ouisseme, D.Yaakoub**, Identification de Paramètre d'une Panneau Photovoltaïque à l'aide d'un Algorithme de Colonies de Fourmis, Mémoire Master Académique, Université SAAD DAHLAB de BLIDA.
- [15] **SARKAR, MdNazmul Islam**. « Effect of various modelparameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis». Renewable: Wind, Water, and Solar.(2016), vol. 3, no 1, p. 13.
- [16] **Alonso Corinne** « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul SabatierToulouse III, 2003.
- [17] **RoshanakRadbeh** «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [18] **PAULESCU Marius, PAULESCU Eugenia, GRAVILA Paul, et al.** «Weather modeling and for ecasting of PV systems operation». Springer-Verlag London (2013).
- [19] **H.Yatimi, E.Aroudam, etM.Louzazni**. «Modiling and simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK».MATEC Web of coferences, EDP Sciences.
- [20]**D. Narimene**, « Eude et Optimisation en Environnement Matlab/Simulink d'un système de Pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université des Frères Mentouri Constantine, 2014.
- [21] **E. Karatepe, M. Boztepeet M. Colak** « Neural Network Based Solar-Cell Model ». Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°9-10, pp. 1159-1178, 2006.
- [22] **W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman** « Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance ». SolarEnergy 80, pp. 78-88, 2006.
- [23] **R. Khezzar** . « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [24] **G. Notton**. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.
- [25] **Adel et Shahat** « PV cell module modeling and simulation for smart grid applications ». Journal of Theoretical and Applied Information Technology, JATIT All rights reserved pp 9-20, 2010.

- [26] **Salima. Kebaili. Achour. Betka** « Efficiency Model Of DC/DC PWM Converter Photovoltaic Applications ». GCREEDER, Amman-Jordan, March 31st –April 2nd, pp1-5, 2009.
- [27] **H.Abdelouahed et A.Abdelhafid**, « Identification Et Modélisation Des Panneaux Photovoltaïque A L'aide De Méthodes Métaheuristiques ». Mémoire Master Académique, Université d'ElOued, 24/09/2020.
- [28] **T.U. Townsend** « A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [29] **Kelvin Ukoima et EkweOgbonnayaAgwu**, Three-Diode Model And Simulation Of Photovoltaic (PV) Cells, Michael Okpara University of Agriculture, Umudike, Vol. 5, No 1, June 2019.
- [30] **J. W. Bishop**, "computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits", Solar Cells, vol.25, pp 7389, 1988.
- [31] **B. Mazhari**, An improved solar cell circuit model for organic solar cells, Indian Institute of Technology, Kanpur 208016 INDIA, Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1021–1033, 15 July 2005.
- [32] **A. Blorfan**, ‘ contribution à l’étude de l’association d’une source photovoltaïque et d’un filtre actif’, thèse pour obtenir le grade de docteur de l’Université de Haute-Alsace.
- [33] **R. Casas, C. Aguilar, J. Rodrigo, P. Almonacid F. and Pérez-Higueras P** ; « Energy conversion and management », Energy Conversion and Management 78 N° 527–536, 2013.
- [34] www.optique-ingenieur.org/fr
- [35] **Oliva D, Aziz MAE et Hassanien AE**. Parameter Estimation of photovoltaic cells using an improved chaotic whale optimization algorithm. Apple Energy 2017;200:141–54.
- [36] **W.C. Benmoussa*, S. Amara et A. Zerga**. Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d’une cellule solaire au silicium monocristallin, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie. Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306.
- [37] **K. Amira**, Elaboration de nouvelles phases du silicium en couche mince, mémoire de MAGISTER, 2008.

- [38] **Abdessamad Malaoui**, Nouvelle méthode d'amélioration de la qualité des mesures électriques : Application à l'extraction des paramètres intrinsèques des cellules photovoltaïques, Université Sultan Moulay Slimane, Maroc, Vol. 15 No. 2 Apr. 2016.
- [39] **A. Malaoui et A. Elmansouri**, Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc. Vol. 13 N°2, 25 Juin 2010.
- [40] **Javier Cubas , Santiago Pindado and Carlos de Manuel**. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function, Universidad Politécnica de Madrid, Pza. del Cardenal Cisneros 3, Madrid 28040, Spain, *Energies* **2014**, 7. 26 June 2014.
- [41] **Alonso Corinne** « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [42] **Angel Cid Pastor** « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [43] **Cabal. Cédric** « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [44] **Shuijia Li, Wenyin Gong, Xuesong Yan, Chengyu Hua, Danyu Bai, Ling Wang et Liang Gao**. Parameter extraction of photovoltaic models using an improved teaching learning-based optimization, *Energy Conversion and Management* 186 (2019) 293–305.
- [45] **A.Salma et B. Wahida** , Mémoire de Fin d'Étude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE "Extraction des paramètres électriques des modules photovoltaïques basée sur les algorithmes génétiques." Centre Universitaire d'El-oued promotion 2018.
- [46] **Dr.MEFTAH Kamel et SEDIRA Lakhdar** 'optimisation', Université BISKRA, 2018/2019
- [47] **Mehdi ROUAN SERIK**. 'Application de métaheuristiques hybrides pour l'optimisation multiobjectif dans les réseaux de capteurs sans-fil', thèse de doctorat, Université AHMED BEN BELLA d'ORAN, 26/09/2018

- [48] **Ilhem BOUSSAÏD**. ‘Perfectionnement de métaheuristiques pour l’optimisation continue’, thèse de doctorat, université DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIEHOUARI BOUMEDIENE, 29 juin 2013
- [49] **CHRISTIAN BLUM et ANDREA ROLI**. ‘Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison’, ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 3, September 2003, pp. 268–308.
- [50] **Reem Y. Abdelghany , Salah Kamel , Hamdy M. Sultan, Ahmed Khorasy, Salah K. Elsayed et Mahrous Ahmed** ‘Development of an Improved Bonobo Optimizer and Its Application for Solar Cell Parameter Estimation’, Sustainability 2021, 13, 3863.
- [51] **Malik Sh. Braik , Abdelaziz I. Hammouri, JaffarAtwan et Mohammed Azmi Al-Betar** ‘White Shark Optimizer: A novel bio-inspired meta-heuristic algorithm for global optimization problems’, Knowledge-Based Systems · February 2022.
- [52] **PavelTrojovský et Mohammad Dehghani**‘Pelican Optimization Algorithm: A Novel Nature-Inspired Algorithm for Engineering Applications’ Sensors 2022, 22, 855..