

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des hydrocarbures énergies renouvelables et science de la terre et de l'univers

Département des énergies renouvelables

MEMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Filière : génie mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique

Présenté Par :

LEGOUGUI Asaad Taha

AZIZI Abdenour

-THÈME-

---

**Application des méthodes d'intelligence artificielle dans la modélisation**

**Optimale des générateurs photovoltaïques**

---

Soutenue le : 11/06/ 2023

Président	Dernouni M'Hamed	Dr	Univ.Ouargla
Examineur	Ammari Chouaib	Dr	Univ.Ouargla
Rapporteur	Sadok HADJADJ	MCA	Univ.Ouargla
Co Rapporteur	Med Bilal DANOUNE	Dr	Univ.Ouargla

Année universitaire 2022/2023

*Merci*

*Il est temps de mettre un terme à ce manuscrit et à ces  
années*

*Les travaux de recherche ont été menés au laboratoire  
de chimie de l'Université Kasdi Merbah, sous la  
direction de M. S. Hajjaj et co encadreur Med Bilal  
Danon.*

*Pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée et pour  
ses encouragements constants.*

*Je tiens à remercier M. Darnouni Mohamed pour  
l'honneur qu'il m'a fait d'accepter de présider le jury de  
cette thèse.*

*J'exprime également ma profonde gratitude à M.  
Ammari Chuaib qui a accepté de revoir mon travail.*

*Enfin, dans ces dernières lignes, je voudrais remercier  
mes parents, mes sœurs et mes frères pour les conseils  
et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués,  
ainsi que pour leur soutien moral et financier. Sans  
eux, je ne serais pas où je suis et qui je suis.*

*Merci encore à tous....*

## *Dédicace*

*Au nom de Dieu, le Très Miséricordieux, le Très Miséricordieux Louange à Dieu, Seigneur des mondes, et prières et paix soient sur le dernier des prophètes et messagers, le Messager de Dieu, Muhammed, sa famille et ses compagnons .*

*A celle que je préfère à moi-même, à la précieuse dans les yeux de laquelle je vois l'espoir, mon ange dans la vie et le sens de l'amour, dont la supplication a été le secret de ma réussite et sa tendresse, le baume de mes blessures, ma chère maman , qui a passé sa vie pour me voir dans le meilleur de la santé et du bonheur, à qui Dieu m'a recommandé avec droiture et bonté et m'a donné des années Ma vie, dont j'ai courbé le dos fatigué pour atteindre ce stade, mon père bien-aimé, mes frères et toute ma famille, je vous dédie ma graduation avec tous ses efforts et sa persévérance.*

*Aux professeurs superviseurs, un merci spécial au Prof. Dr. Danon Muhammad Bilal, et à l'honorable Professeur Sadouq Hajjaj à la direction du Département des énergies renouvelables, et à tous les professeurs respectés. Nous vous remercions pour votre soutien et votre dévouement, et puissiez-vous toujours être en bonne santé et en bonne santé.*

# Table des matières

Remerciement.....	1
Dédicace .....	2
Liste des figures .....	3
Liste des tableaux.....	4
Liste des algorithmes.....	5
Notions et symboles.....	6
Liste des abréviations.....	6
Introduction Générale .....	7
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les Systèmes photovoltaïques</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>8</b>
I.1. Définition de cellule Photovoltaïques.....	8
<b>I.2Principe de fonctionnement de la cellule PV .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3 Principales technologies de cellules solaires photovoltaïques .....</b>	<b>9</b>
I.3.1Cellule en silicium monocristallin .....	9
I.3.2 cellules hétérojonctions (de couches minces).....	10
I.3.3Cellule au silicium poly cristallin .....	11
I.3.4 Cellule solaire amorphe.....	11
<b>I.4Association des groupes photovoltaïques .....</b>	<b>11</b>
I.4.2Association en série .....	12
I.4.3Association en parallèle.....	13
I.4.4Association en série et en arallèle .....	14
<b>I.5 Paramètres de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.1. Courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>) .....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.2. Tension à circuit ouvert (V<sub>co</sub>) .....</b>	<b>15</b>

<b>I.5.3. Rendement de la cellule (<math>\eta</math>)</b> .....	15
<b>I.5.4. Puissance débitée</b> .....	15
<b>I.5.5. Facteur de forme (FF)</b> .....	16
<b>I.6 Caractéristiques et les propriétés de la cellule PV</b> .....	16
<b>I.7 Exploitation d'énergie photovoltaïque</b> .....	18
<b>I.7.1. Système photovoltaïque autonome</b> .....	18
<b>I.7.2. Installation photovoltaïque connectée au réseau</b> .....	19
<b>I.8 Modélisation d'une cellule PV</b> .....	20
<b>I.8.1. Modèle électrique d'un Générateur photovoltaïque</b> .....	20
<b>I.8.2 Modélisation par modèle d'une seule diode</b> .....	20
<b>I.8.3 Modèle à deux diodes</b> .....	22
<b>I.9 Conclusion</b> .....	24

## CHAPITRE II : Extraction des paramètres Par les méthodes Classiques

<b>Introduction</b> .....	26
<b>II.2 Méthode analytique (Gauss-Seidel)</b> .....	26
<b>II.2.1 Définition Méthode (Gauss-Seidel)</b> .....	26
<b>1. Condition de circuit ouvert</b> .....	27
<b>2. Condition de court-circuit</b> .....	27
<b>3. Point de puissance maximale</b> .....	28
<b>II.3 Méthode de Villalva</b> .....	29
<b>II.3.1 Définition Méthode de Villalva</b> .....	29
<b>1. Courant photoélectrique (<math>I_{ph}</math>)</b> .....	30
<b>2. Courant de saturation inverse (<math>I_s</math>)</b> :: .....	30
<b>3. Facteur d'idéalité (<math>n</math>)</b> .....	30
<b>II.4 Application numérique</b> .....	32
1. La <b>Différence</b> entre la méthode analytique et la méthode Villalva .....	34
<b>II.5 les avantages et les inconvénients de chaque méthode</b> .....	34

<b>II.6 Conclusion.....</b>	<b>35</b>
-----------------------------	-----------

CHAPITRE III Identification des paramètres De panneau PV par les méthodes

Méta-heuristiques

<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2 Méthodes d'optimisation Métaheuristiques .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3 Méthode d'optimisation par Harris Hawks .....</b>	<b>37</b>
<b>1.Phase d'exploration.....</b>	<b>38</b>
<b>2. Transition de l'exploration à l'exploitation .....</b>	<b>39</b>
<b>3.Phase d'exploitation .....</b>	<b>39</b>
<b>III.4 Algorithme 1 Pseudo-code de l'algorithme HHO .....</b>	<b>40</b>
<b>III.5 Application sur le modèle à une seule diode.....</b>	<b>41</b>
<b>III.5.1 Fonction objective (FO) .....</b>	<b>41</b>
<b>III.5.2.1 Étapes expérimentales.....</b>	<b>42</b>
<b>III.5.2.2 Étapes d'implémentation du HHO.....</b>	<b>42</b>
<b>III .6 Résultats et discussion .....</b>	<b>42</b>
<b>III.6.1 Caractérisation IV et PV R.T.C France .....</b>	<b>42</b>
<b>III.6.2 Caractérisation IV et PV des panneaux (Photowatt-PWP 201).....</b>	<b>43</b>
<b>III.6.3. Convergence de la méthode .....</b>	<b>45</b>
<b>III.7 Analyse statistique .....</b>	<b>46</b>
<b>III.8 Conclusion .....</b>	<b>47</b>

CONCLUSION GENERALE

<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>49</b>
----------------------------------	-----------



## Liste des figures

Figure (1) : Schéma d'une cellule photovoltaïque	8
Figure 2 : une cellule en silicium monocristallin	8
Figure 3 : Cellule couches minces	9
Figure 4: Cellule en silicium poly cristallin	10
Figure 5 : cellule photovoltaïque amorphe	10
Figure 6 : Mise en série des cellules PV dans le module et protection par des diodes by pass.	11
Figure 7 : Caractéristique courant tension de $N_s$ cellule en série	12
Figure 8: Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle	13
Figure 9 : Facteur de forme	15
Figure 10 : Caractéristique I-V d'une cellule PV	15
Figure 11: Schéma de principe d'une installation photovoltaïque autonome	16
Figure 12 : Structure d'un système PV connecté au réseau.	18
Figure 13 : Schéma block du générateur photovoltaïque	19
Figure14 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	20
Figure 15 : Organigramme pour l'identification $R_s$ et $R_p$	29
Figure 16 : la courbe PV estime par la méthode de Gauss-Seidel	31
Figure 17 : la courbe PV estime par la méthode des Villalva	31
Figure 18 : Différentes phases de HHO	40
Figure 19 : organigramme d'optimisation par Harris Hawks	41
Figure 20 : La courbe IV de panneau des RTC France	42
Figure 21 : La courbe PV de panneaux RTC France	42
Figure 22 : La courbe IV de panneau (Photowatt-PWP 201)	43
Figure 23 : La courbe PV de panneau (Photowatt-PWP 201)	43
Figure 24 : Courbe de convergence de panneau (RTC France)	44
Figure 25 : Courbe de convergence de panneau (Photowatt-PWP 201)	44

## Liste des tableaux

Tableau (1) valeur du facteur d'idéalité basée sur la technologie cellulaire	29
Tableau (2) Paramètres du modèle après identification	31
Tableau (3) Résultats de la méthode d'analyse	31
Tableau (4) Résultats de la méthode Villalva	32
Tableau (5) Les limites supérieures et inférieures de paramètres	40
Tableau (6) Les paramètres optimaux des panneaux	43

## **Liste des algorithmes**

<b>Algorithme</b>	<b>Page</b>
<b>Algorithme I :</b> Méthode analytique (Gauss-Seidel)	26
<b>Algorithme II :</b> Méthode de Villalva	29
<b>Algorithme III :</b> Méthode d'optimisation par Harris Hawks	37

## Notions et symboles

$V_{coNs}$  : Somme des tensions en circuit-ouvert en série.

$I_{ccNs}$  : Courant de court-circuit des cellules en série.

$N_s$  : Nombre des modules en série.

$P$  : La puissance fournie par la cellule

$P_m$  : Puissance maximale

$N_p$  : Nombre de cellules dans le panneau en parallèle.

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit

$V_{co}$  : Tension a circuit ouvert

$\eta$  : Les rendement

$I$  : Le courant de cellule

$V$  : La tension de cellule

$E$  : l'éclairement solaire

$S$  : la surface de la cellule

$FF$  : Facteur de forme

$D$  : Diode matérialisant

$R_s$  : Séries de résistances

$R_p$  : Résistance shunt

$I_{ph}$  : le photo-courant de la diode

$T$  : est la température

$E$  : est le rayonnement solaire

$\alpha_i$  : est le taux de la variation de courant en fonction de température appelé aussi coefficient de courant (A/K)

$I_D$  : Le courant de la diode

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)

$K_i$  : Le coefficient de température sur le courant de court-circuit

$K_v$  : Unité de mesure de la tension électrique

$K_p$  : La constante de position

## **Liste des abréviations**

ANN :	Les réseaux de neurones artificiels
AE :	Les algorithmes évolutionnaires
DE:	L'évolution différentielle
HHO :	L'optimisation Harmony Search
NOCT :	La température nominale de fonctionnement de la cellule
SSE :	La Somme des erreurs au carré
MAE :	L'Erreur absolue moyenne
RMSE :	L'Erreur quadratique moyenne
$I_s(A)$ :	Sont les courants de saturation inverse des diodes
$n (-)$ :	Représentent les facteurs d'idéalité

Introduction

Générale

## Introduction Générale

La production d'énergie représente un défi majeur pour les années à venir, en raison de la croissance continue des besoins énergétiques des sociétés industrialisées et de la demande croissante en énergie dans les pays en développement pour soutenir leur développement. Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre et une augmentation de la pollution. De plus, une consommation excessive de ces ressources naturelles épuise dangereusement les réserves d'énergie pour les générations futures. [1].

Le remplacement des sources d'énergie renouvelables par des combustibles fossiles est un tournant important dans le secteur de l'énergie et une étape nécessaire pour relever les défis environnementaux et économiques auxquels le monde est confronté. D'autre part, les sources d'énergie renouvelables fournissent des sources d'énergie propres et illimitées, telles que l'énergie solaire, qui peuvent produire de l'électricité et répondre aux besoins énergétiques du monde. Cette énergie dépend de l'exploitation de la lumière du soleil et de sa conversion en énergie électrique à l'aide de systèmes appelés panneaux solaires [photovoltaïques (Pv)]. L'un des principaux facteurs qui a conduit le monde à utiliser cette source d'énergie est la modélisation solaire, qui aide les concepteurs à produire facilement la quantité l'énergie de cette source

La modélisation des modules PV implique généralement l'approximation des courbes de tension non linéaire (I-V). Des méthodes basées sur des circuits équivalents ont été largement utilisées pour caractériser ces modules. Le modèle le plus simple d'une source de courant en parallèle avec un

La diode [2,3] consiste en une source de courant en parallèle avec la diode. Cela nécessite la détermination de trois paramètres typiques : le photo courant ( $I_{pv}$ ), le courant de saturation de la diode ( $I_0$ ) et le facteur d'idéalité ( $n$ ). La version améliorée comprend également une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance parallèle ( $R_p$ ) dans le circuit [2,3].

Cependant, ce modèle a des limites lorsqu'il est soumis à de grands changements de température, car il ne prend pas en compte le coefficient de tension en circuit ouvert,  $K_v$  [4]. De plus, il est plus adapté aux unités cristallines (monocristallines et polycristallines), mais présente des imprécisions importantes lorsqu'il est appliqué aux technologies à couches minces [5].

Pour pallier ces limitations, d'autres modifications ont été proposées par plusieurs auteurs [6]. Parmi eux, le modèle qui comprend une résistance en parallèle avec une diode ( $R_p$ ) présente un bon compromis entre simplicité et précision [7]. Ce modèle, appelé modèle  $R_p$ , nécessite la détermination de cinq paramètres :  $I_{pv}$ ,  $I_o$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $R_p$ .

Cependant, en raison de la complexité inhérente de l'équation du module PV, un calcul rigoureux est nécessaire pour déterminer ses cinq paramètres. Parmi eux, seuls  $I_{pv}$  et  $I_o$  peuvent être déduits analytiquement. Les paramètres restants, à savoir  $a$ ,  $R_s$  et  $R_p$ , doivent être spécifiés numériquement. Cette généralisation indique qu'il s'agit d'une approche itérative basée sur des méthodes numériques telles que Gauss-Seidel.

Par conséquent, les valeurs de  $a$ ,  $R_s$  et  $R_p$  ne peuvent pas être calculées simultanément pour des environnements spécifiques tels que la température et le rayonnement. Par exemple, dans certaines études, la valeur de  $R_s$  peut être observée, mais la valeur de l'affectation est toujours constante car  $R_p$  est considéré comme infini. Dans d'autres approches, les valeurs de  $a$  et  $R_s$  sont estimées, mais l'effet de  $R_p$  n'est pas pris en compte dans le calcul. Dans d'autres cas, les valeurs de  $R_s$  et  $R_p$  sont calculées simultanément, mais une valeur constante doit être utilisée

Le comportement physique du module photovoltaïque est fortement influencé par l'intensité du rayonnement solaire et la température. Il est donc essentiel de calculer simultanément tous les paramètres du modèle. En l'absence de cela, comme le montrent les méthodes mentionnées précédemment, cela entraîne une certaine dégradation de la précision. Récemment, de nombreuses recherches ont été menées pour résoudre ce problème en utilisant des techniques d'intelligence artificielle telles que la logique floue (FL) [8] et les réseaux de neurones artificiels (ANN) [9-10].

Les techniques d'algorithme évolutionnaire (AE) ont attiré beaucoup d'attention en raison de leur capacité à gérer des fonctions non linéaires sans avoir besoin d'informations dérivées. Il s'agit d'une méthode d'optimisation aléatoire qui semble être très efficace dans l'optimisation de problèmes objectifs de valeur réelle. Diverses techniques AE telles que l'algorithme génétique (GA) [21, 22] et l'évolution différentielle (DE) [23] sont utilisées dans le calcul des paramètres photoélectriques. Cependant, ces méthodes nécessitent de grandes quantités de données en entrée. De plus, plusieurs difficultés de calcul sont observées, notamment une convergence lente, une faible vitesse et un nombre élevé de répétitions [24, 25].

Récemment, un autre type de technique connu sous le nom d'optimisation Harry-Hawks (HHO) a été introduit [26]. Il présente trois avantages distincts : (1) il est capable de déterminer avec

précision l'emplacement de l'optimum global, quel que soit l'état initial ; (2) il converge rapidement ; (3) il utilise peu de paramètres de contrôle.

Considérant les nombreux avantages du HHO, ce travail propose une méthode pour calculer les valeurs de  $a$ ,  $R_s$  et  $R_p$  en même temps pour différentes conditions environnementales.

Contrairement aux méthodes précédentes, cette approche permet d'effectuer le calcul à tout moment, quel que soit le point d'intensité de rayonnement et la température (autres que STC). En conséquence, le calcul des 3 paramètres du modèle devient plus simple et plus flexible. De plus, la vitesse du processus de calcul rend l'intégration du HHO dans le simulateur PV plus efficace.

Le but de cette étude est de développer un modèle mathématique fiable, approprié et précis en utilisant des méthodes d'optimisation pour extraire les paramètres optimaux des panneaux photovoltaïques.

Cette thèse est organisée en trois chapitres. Le premier chapitre traite du principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques et des différentes configurations qui augmentent la puissance de sortie du système. L'énergie photovoltaïque produite peut être injectée sur le réseau ou utilisée hors réseau. Ce chapitre explique également les principaux composants qui garantissent une utilisation optimale de l'énergie photovoltaïque. Différents modèles mathématiques utilisés pour la modélisation et la simulation des installations photovoltaïques sont également abordés dans ce chapitre.

Ensuite, nous passons au deuxième chapitre, dans lequel nous comparons deux méthodes d'estimation à quatre et cinq paramètres afin de choisir la méthode d'estimation la plus adaptée à chaque technologie de module PV.

Dans le troisième chapitre, nous développerons un modèle mathématique pour extraire les paramètres optimaux en utilisant la méthode d'optimisation HHO.

Enfin, nous concluons par une conclusion générale.

**CHAPITRE I :**  
**Généralités sur les**  
**Systèmes photovoltaïques**

### Introduction

La vérification de la corrélation directe entre l'énergie solaire et l'énergie électrique L'énergie solaire est constituée des rayons de lumière et de chaleur émanant du soleil, et l'homme l'exploite et en profite depuis l'Antiquité grâce à des moyens technologiques en constante évolution. Les techniques d'utilisation de l'énergie solaire comprennent l'utilisation de l'énergie thermique du soleil, que ce soit pour le chauffage direct ou dans le cadre d'un processus automatisé de conversion de mouvement ou d'énergie électrique, ou pour produire de l'électricité par des phénomènes photovoltaïques à l'aide de panneaux de cellules photovoltaïques. est réalisée par le biais des panneaux solaires composés de multiples cellules photovoltaïques. La cellule photovoltaïque joue un rôle clé dans la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique, et elle est fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur.

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les concepts fondamentaux des panneaux photovoltaïques en mettant l'accent sur la cellule photovoltaïque en tant qu'élément essentiel d'un générateur d'énergie solaire. Nous aborderons également les différentes configurations de cellules photovoltaïques pour former un générateur d'énergie solaire. Nous étudierons également les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque en mettant en évidence les principaux domaines d'utilisation [4].

### I.1. Définition de cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui expose la lumière, le produit électrique est idéal pour l'effet photovoltaïque. L'alimentation électrique est proportionnelle à l'incident de l'ampoule et dépend de la réparation des cellules. Le téléphone va continuer à connecter la tension et la connexion entre les deux appareils est reliée à un chargeur électrique (généralement un interrupteur marche-arrêt, avec un simple chargeur de batterie électrique).

Les cellules photovoltaïques disposent d'une fréquence plus élevée d'installations de semi-conducteurs, base principale de silicium et de semi-conducteurs plus rares : cuivre-indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$ , ou CIS), cuivre, d'indium et gallium ( $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ , également appelé CIGS), le cadmium ( $\text{CdTe}$ ), etc. Elle apparaît également à la suite de fines plaques à la surface de la peau.

Les cellules sont reliées aux modules photovoltaïques ou aux panneaux solaires photovoltaïques, en fonction de récupération.

### I.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV

Une cellule PV est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant de l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement d'une cellule PV fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semiconducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérées, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (f.é.m.) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La Figure (1) illustre la constitution d'une cellule PV à base de silicium.

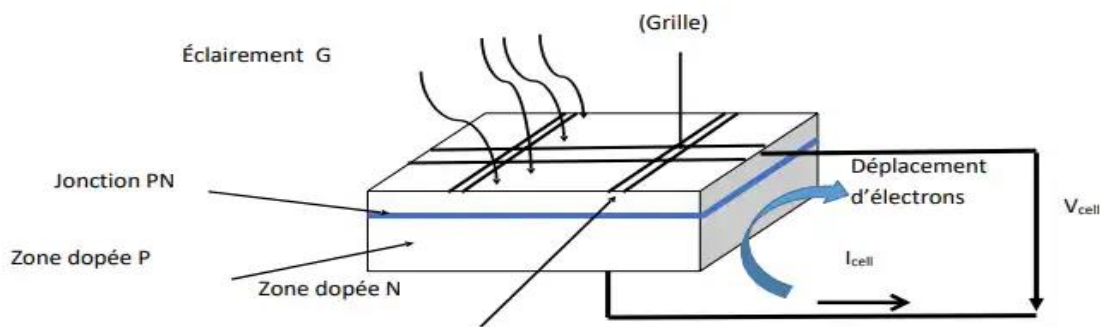


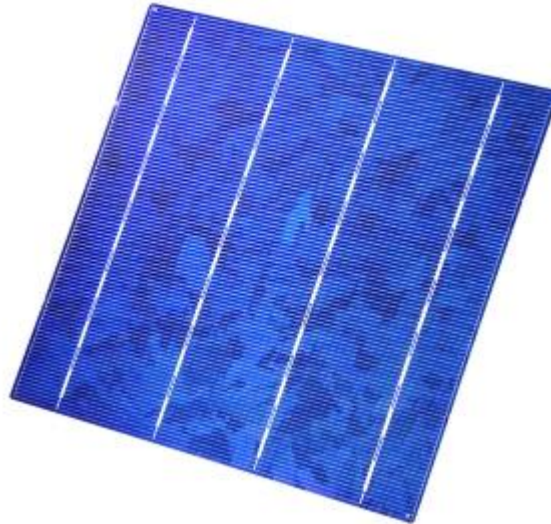
Figure (1) : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

### I.3 Principales technologies de cellules solaires photovoltaïques

Trois principales catégories de cellules solaires se démarquent

#### I.3.1 Cellule en silicium monocristallin

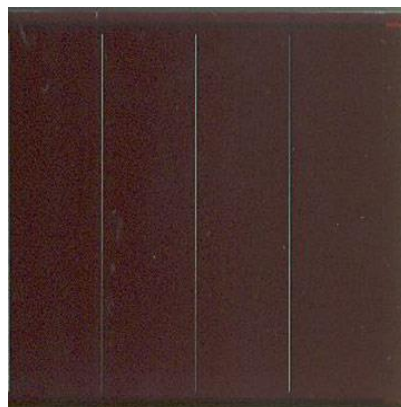
Utilisent du silicium dopé comme matériau actif. Cette technologie est la plus ancienne et représente la part prédominante du marché, en raison de sa robustesse et de ses performances (les rendements des modules varient de 12 à 20 % et leur durée de vie atteint près de 30 ans) [6].



**Figure 2 : une cellule en silicium monocristallin**

### **I.3.2 cellules hétérojonctions (de couches minces)**

Les cellules solaires à couche mince, dont l'épaisseur peut varier de quelques dizaines de micromètres, sont conçues pour absorber la majeure partie du rayonnement solaire. Leur rendement est légèrement inférieur, allant de 7 à 13 %. Elles utilisent des couches absorbantes poly cristallines ou amorphes, telles que le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), le GaAs, le CdTe, le CuInSe<sub>2</sub> et sa variante le Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS). Cependant, en raison de la toxicité de certains de ces matériaux et de leurs coûts élevés, ce type de cellules ne représente pas plus de 15 % du marché [7].



**Figure 3 : Cellule couches minces**

### I.3.3 Cellule au silicium poly cristallin

La cellule solaire en silicium multi cristallin, également appelée poly cristallin, est composée de cristaux assemblés mesurant de 1 mm à environ 2 cm, appelés "grains". La formation de multiples cristaux se produit pendant le processus de refroidissement du silicium dans le lingot. Les cellules photovoltaïques de ce type ont une apparence bleutée, mais elles ne sont pas uniformes. On peut observer des motifs créés par la présence des cristaux distincts [8]

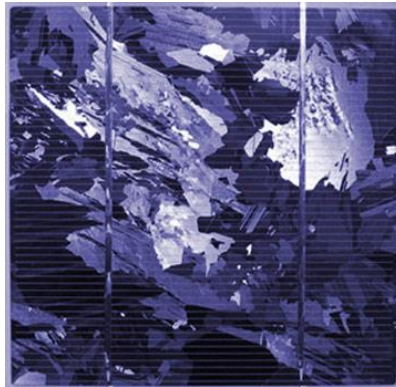


Figure 4: Cellule en silicium poly cristallin

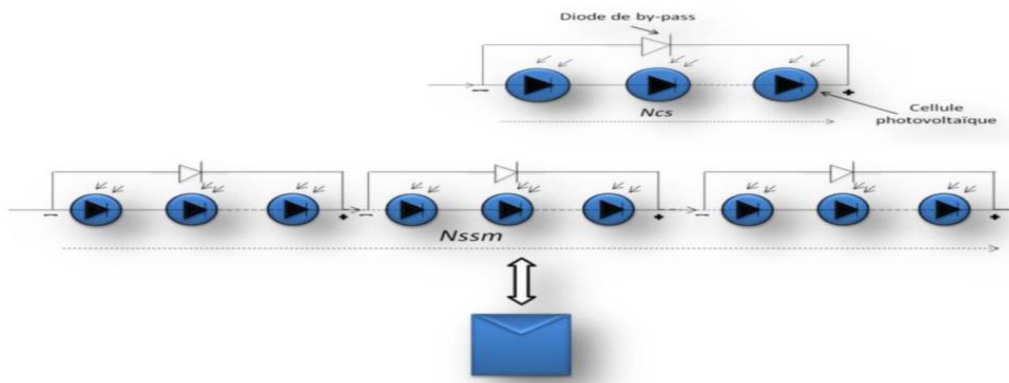
### I.3.4 Cellule solaire amorphe

Le panneau solaire amorphe se distingue comme l'option parfaite en remplacement des panneaux solaires photovoltaïques conventionnels. Sa légèreté, sa flexibilité et sa capacité de pliage en font un choix remarquable. Il se présente sous la forme de rouleaux, qui peuvent être aisément découpés et installés sur n'importe quel type de toiture, sans risque d'endommager la charpente. Cette caractéristique constitue souvent un problème avec les panneaux solaires traditionnels, qui sont plus lourds.

### I.4 Association des groupes photovoltaïques

Les cellules solaires sont généralement connectées en série dans les modules photovoltaïques couramment disponibles sur le marché. Cette configuration en série permet d'augmenter la puissance globale du module. Un module photovoltaïque standard comprend généralement 36 ou 72 cellules. Afin de protéger les modules contre le phénomène de point chaud (hot-spot) résultant d'un déséquilibre d'éclairement, une diode de contournement en silicium, également appelée "diode by-pass", est montée en parallèle inversé sur une branche de dix-huit cellules en série, en vue d'une meilleure protection des cellules. Une autre approche consiste à connecter chaque cellule individuelle à une diode de by-pass. D'autres architectures de connexion des diodes de by-pass dans le module ont été proposées, comme illustré dans la Figure I.5.

Cependant, ces propositions ne sont pas largement mises en œuvre en raison de la complexité de fabrication qui en découle [9] [10].

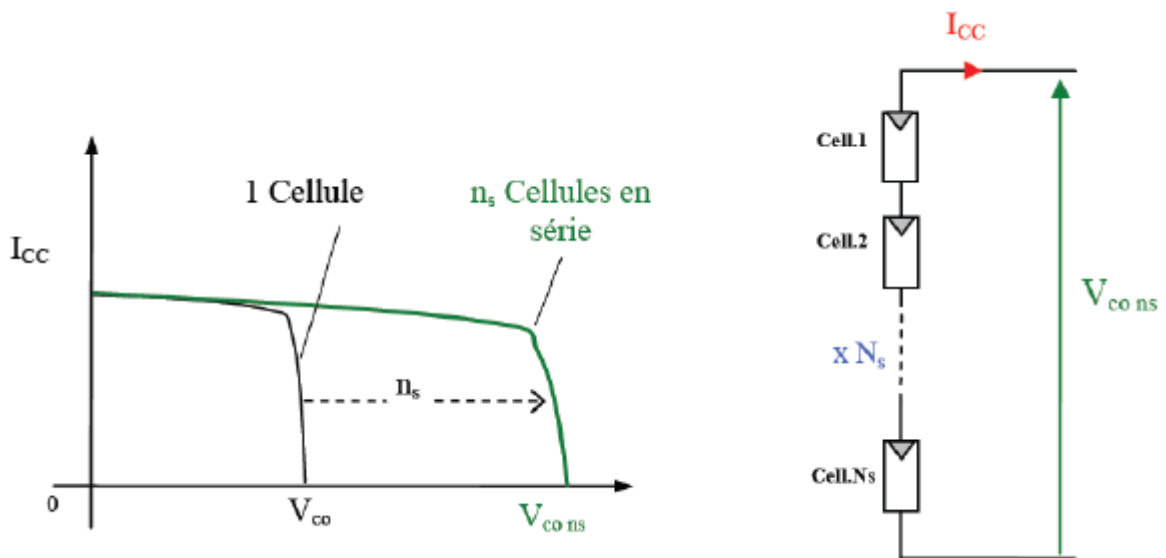


**Figure 5 : Mise en série des cellules PV dans le module et protection par des diodes by pass.**

Les modules photovoltaïques jouent un rôle crucial en assurant la protection des cellules solaires contre les éléments atmosphériques, en offrant un soutien mécanique solide, et en permettant la connexion électrique entre les cellules et l'extérieur. En résumé, ils protègent, soutiennent et facilitent la production d'énergie solaire.

#### **I.4.2 Association en série**

L'association en série de modules photovoltaïques consiste à les connecter les uns après les autres pour augmenter la tension du système. Cela permet d'optimiser l'efficacité, réduire les pertes de câblage et les coûts d'installation [11].



**Figure 6: Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série**

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (1)$$

$$I_{cc} = I_{cc} \cdot N_s$$

$$P_m = N_s(I \cdot V)$$

Avec :  $V_{coNs}$  : Somme des tensions en circuit-ouvert en série .

$I_{ccNs}$  : Courant de court-circuit des cellules en série .

$N_s$ : Nombre des modules en série.

$P_m$  =Puissance maximale.

### I.4.3 Association en parallèle

L'association en parallèle de modules photovoltaïques consiste à les connecter côte à côte pour augmenter le courant total du système. Cela permet d'obtenir des courants plus élevés et de minimiser les pertes de câblage. Il est important de veiller à ce que les tensions des modules soient similaires pour éviter des déséquilibres [11].

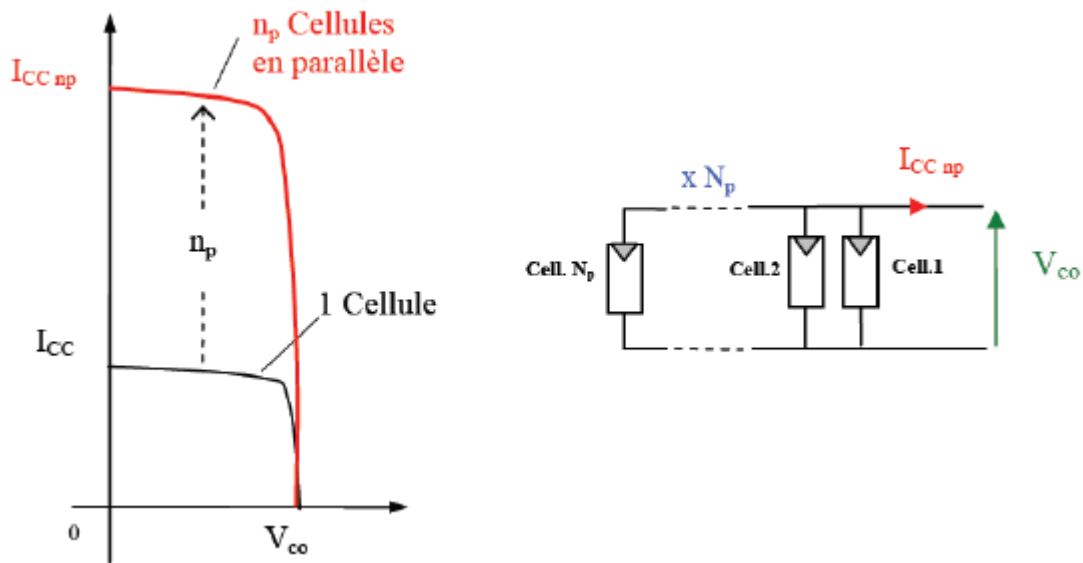


Figure 7: Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

$$I'_{cc_{np}} = N_p \cdot I_{cc} \quad (2)$$

$N_p$ : Nombre de cellules dans le panneau en parallèle.

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit.

### I.4.3 Association en série et en parallèle

Branchement mixte : en série et en parallèle. C'est le branchement qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue (en volts, V), les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte. Il convient d'avoir des produits de même tension et de même intensité/capacité. Un ensemble monté en série s'appelle un "string", il est possible d'ajouter des panneaux de mêmes tensions dans les strings pour augmenter la tension (en volts, V). Ou alors d'ajouter un ou plusieurs strings si vous avez besoin de plus d'intensité pour plus de puissance.

Les batteries mises en série ou en parallèle doivent être de la même marque, du même type, et avoir la même capacité et état

### I.5 Paramètres de la cellule photovoltaïque

#### I.5.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

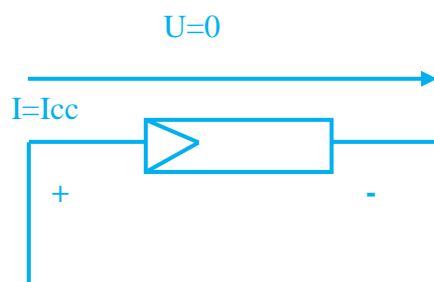
Le courant de court-circuit, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. Il croît linéairement avec l'intensité d'éclairage de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [11].

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$I_{sc} = [I_{ph_{stc}} + \alpha (T_c - T_{c_{stc}})] \frac{G}{G_{stc}} \quad (3)$$

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit dans des condition de test standard

( stc :  $G = 1000 \text{ w/ m}^2$  et  $T = 25 \text{ C}^\circ$ )

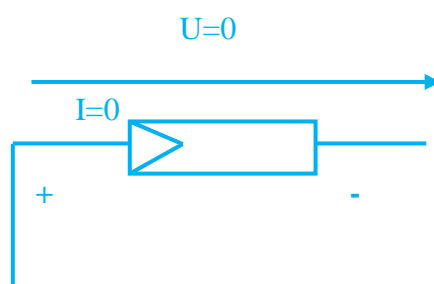


## I.5.2. Tension à circuit ouvert (Vco)

La tension de circuit ouvert, exprimée en millivolts, est mesurée lorsque aucun courant ne circule dans la cellule. Cette valeur dépend de la différence des travaux de sortie entre les électrodes et de la résistance Shunt. Elle diminue avec l'augmentation de la température et varie en fonction de l'intensité lumineuse [12]..

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_{oc} = nVt \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (5)$$



## I.5.3. Rendement de la cellule ( $\eta$ )

Le rendement des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance, on le considère comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  et est décrit par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{V \times I}{E \times S} \quad (6)$$

I : Le courant de cellule

V : La tension de cellule

E : l'éclairement solaire

S : la surface de la cellule

L'amélioration de la productivité photovoltaïque dépend de la compréhension et du développement d'un concept d'appareil

## I.5.4. Puissance débitée

La puissance fournie par la cellule est le produit  $I.V$ . Il s'écrit comme [11] suit :

$$P = I \cdot V \left[ I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{V_t} - 1 \right) \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \right] \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right| P = P_m = 0 \quad (8)$$

### I.5.5. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) est un paramètre qui indique l'efficacité maximale d'une cellule lorsqu'elle est associée à une tension ( $V_{oc}$ ) et un courant ( $I_{cc}$ ). Il est défini comme le rapport entre l'énergie maximale de la cellule et le produit de  $V_{oc}$  et  $I_{cc}$ . Graphiquement, le FF est mesuré par la "perpendiculaire" à la courbe de la cellule et est représenté par l'aire d'un rectangle qui englobe la courbe. Sa valeur est déterminée par l'équation suivante [13]:

$$FF = \frac{P_{MAX}}{P_T} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad (9)$$

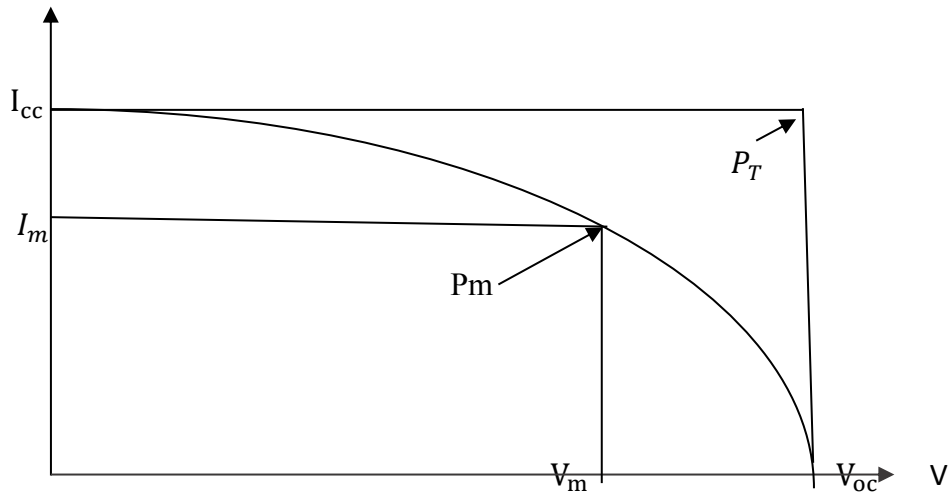


Figure 8 : Facteur de forme

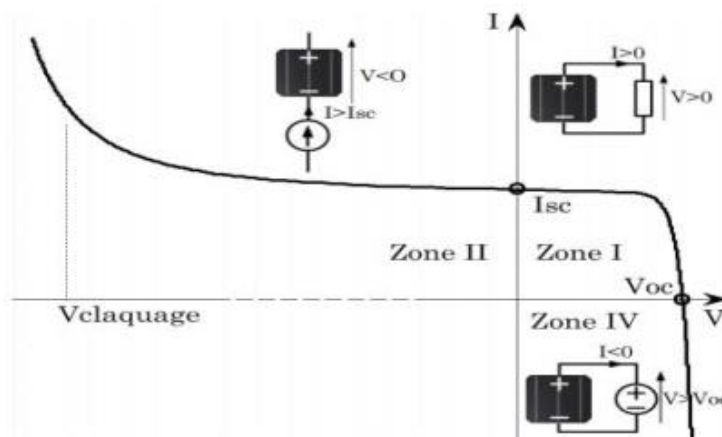
Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc.

### I.6 Caractéristiques et les propriétés de la cellule PV

Dans cette description, on parle de deux points de fonctionnement importants d'une cellule photovoltaïque : le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). Le

le courant de court-circuit fait référence au courant qui circule lorsque la cellule est court-circuitée, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune résistance dans le circuit. Ce courant est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière, ce qui signifie que plus la surface de la cellule est grande, plus le courant de court-circuit sera élevé. De plus, le courant de court-circuit dépend également de l'intensité de la lumière absorbée par la cellule.

La tension de circuit ouvert, quant à elle, est la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'il n'y a pas de courant qui circule. Pour une cellule de type cristallin, cette tension a une valeur d'environ 0,6 V. Ces deux points de fonctionnement,  $I_{cc}$  et  $V_{oc}$ , délimitent le fonctionnement de la cellule photovoltaïque en trois zones différentes [11] :



**Figure 9 : Caractéristique I-V d'une cellule PV.**

Cette caractéristique courant-tension est un rapport entre la tension et le courant fourni par la cellule photovoltaïque :

- **Zone I** : Dans cette zone, la cellule fonctionne comme un générateur. Le courant ( $I$ ) varie de 0 à  $I_{cc}$  (courant de court-circuit), tandis que la tension ( $V$ ) varie de 0 à  $V_{oc}$  (tension de circuit ouvert). C'est le fonctionnement normal de la cellule lorsqu'elle délivre la puissance produite à la charge.
- **Zone II** : Dans cette zone, la cellule fonctionne comme un récepteur. Le courant ( $I$ ) est supérieur à  $I_{sc}$ , tandis que la tension ( $V$ ) est négative ( $V < 0$ ). Lorsque le courant est forcé à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. Si cette tension atteint une limite appelée tension de claquage (Claquage), la cellule peut être endommagée. La valeur de la tension de claquage varie généralement entre -10 V et -30 V pour les cellules cristallines.
- **Zone III** : Dans cette zone, la cellule fonctionne à nouveau comme un récepteur. Le courant ( $I$ ) est inférieur à 0, tandis que la tension ( $V$ ) est supérieure à  $V_{oc}$ . Lorsque la tension aux bornes de la cellule dépasse sa tension de circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une certaine limite, la cellule peut être irrémédiablement endommagée.

Il est important de noter que les cellules photovoltaïques ont des spécifications de fonctionnement spécifiques fournies par les fabricants, et elles doivent être utilisées dans les conditions recommandées pour éviter tout dommage ou mauvais fonctionnement. [11].

### I.7 Exploitation d'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est le processus de conversion des particules lumineuses en électricité. Les panneaux solaires sont généralement constitués de plusieurs unités de cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium qui forment un circuit électrique. Lorsque le panneau capte les rayons du soleil, les électrons sont émis et enregistrés sous forme de courant électrique

Là où cette énergie a trouvé plusieurs usages, l'homme l'a exploitée dans plusieurs domaines, notamment

#### I.7.1. Système photovoltaïque autonome

Le premier des 2 types de systèmes photovoltaïques est le système solaire autonome, ou système en îlot, c'est un type d'installation photovoltaïque qui n'est pas connecté au réseau électrique national, mais qui est connecté à un système autonome de stockage d'énergie – batteries électriques – qui stockent l'électricité produite par l'installation et la restituent aux utilisateurs au moment où ils en ont besoin voire la figure (I.8) :

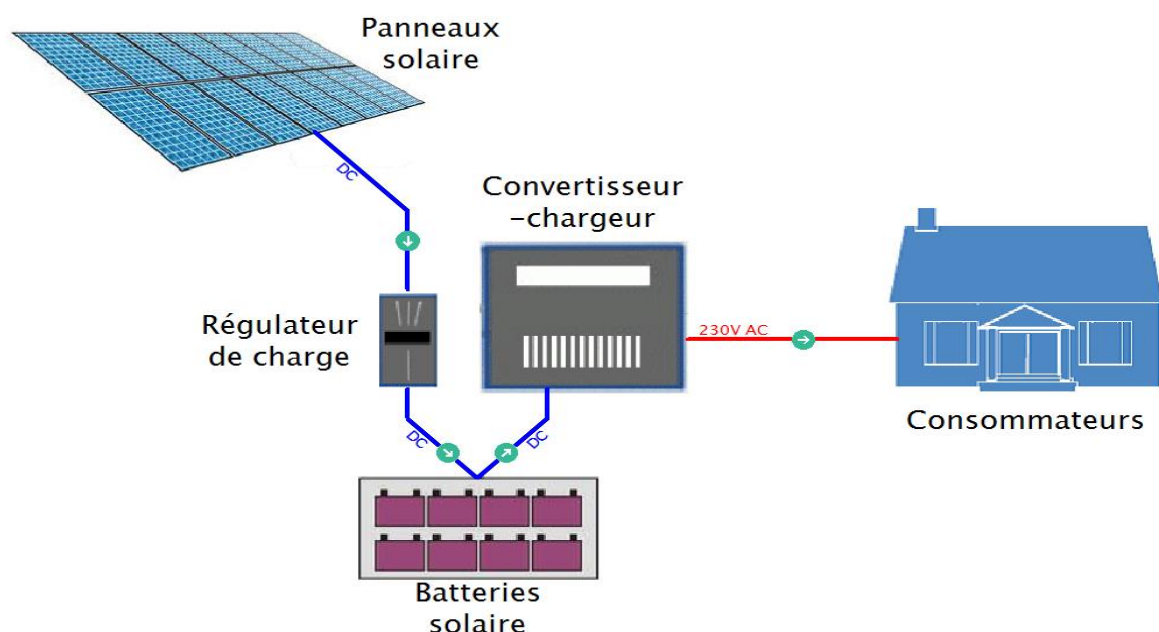


Figure 10: Schéma de principe d'une installation photovoltaïque autonome

Les éléments typiques d'un système autonome sont les suivants :

1. Champ photovoltaïque
2. Onduleur
3. Accumulateur
4. Régulateur de charge

### I.7.2. Installation photovoltaïque connectée au réseau

Le deuxième type de systèmes photovoltaïques est le système photovoltaïque couplé au réseau ou connecté au réseau, qui est un système solaire connecté au réseau électrique national.

Par exemple, (Sonelgaz, Algérie).

Dans ce type d'installation, le réseau électrique national devient un réservoir de stockage infini dans lequel l'énergie est injectée à partir de sources renouvelables lorsque l'installation produit et n'est pas consommée par l'utilisateur, et l'électricité est prélevée au moment du besoin, lorsque l'installation n'est pas produite (la nuit).



**Figure 11 : Structure d'un système PV connecté au réseau.**

Le gros avantage de cette solution est qu'aucune pile n'est nécessaire. Au lieu de stocker de l'énergie, nous recyclons toute l'énergie en l'injectant directement dans le réseau local pour alimenter les maisons jour et nuit lorsqu'il n'y a pas de soleil. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation et un autre dans l'autre sens pour la production

Le Schéma d'installation photovoltaïque grid-connecte se compose de plusieurs éléments :

1. Panneau solaire
2. Onduleur
3. Compteur de production
4. Compteur d'échange

### I.8 Modélisation d'une cellule PV

Concernant la modélisation des capteurs PV, l'étude bibliographique a été réalisée. Il s'avère qu'il y a deux façons.

La première nécessite des mesures sur le capteur photoélectrique une fois qu'il est installé. C'est le cas des modèles

La deuxième façon est de se fier uniquement aux données Fourni par les fabricants, comme dans le modèle

Dans notre travail, nous avons choisi le modèle "générateur".

#### I.8.1. Modèle électrique d'un Générateur photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque est réduit en un schéma :

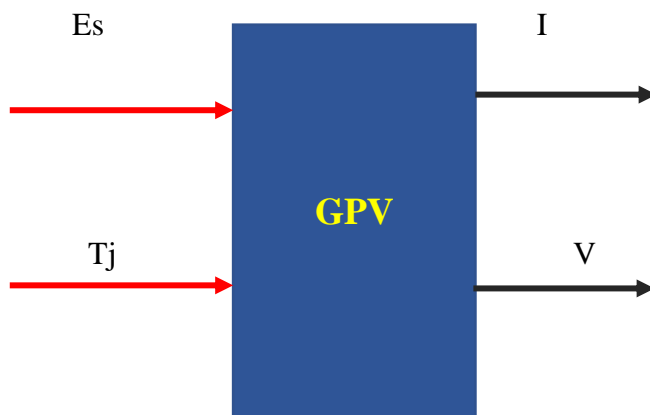


Figure 12 : Schéma block du générateur photovoltaïque

#### I.8.2 Modélisation par modèle d'une seule diode

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance en parallèle  $R_p$  est une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacte et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN

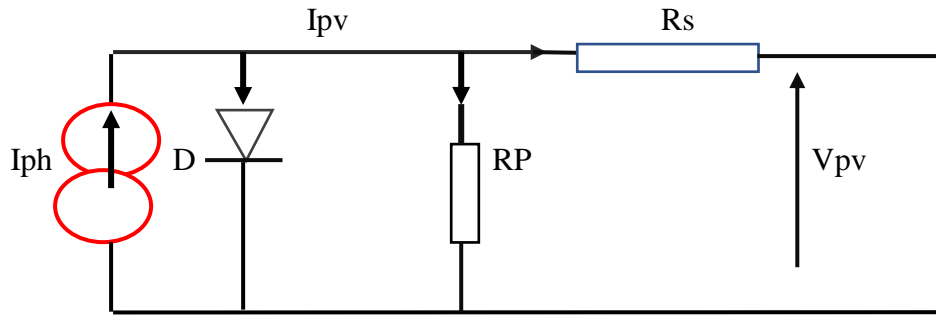


Figure13 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

**D** : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens

**R<sub>s</sub>** : Séries de résistances qui sont des résistances électriques différentes qui tournent sur leur parcours

**R<sub>p</sub>** : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient Entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (4)$$

**I<sub>ph</sub>** Est le photo-courant de la diode est donné exprimer comme suite

$$I_{ph} = [I_{cc} + \alpha_i \times (T - 298.15)] \times \frac{E}{1000}$$

(5)

**I<sub>cc</sub>**: est le courant de court-circuit(A),

**T** : est la température(k),

**E** : est le rayonnement solaire(w/m<sup>2</sup>)

**α<sub>i</sub>** :Représente le taux de la variation de courant en fonction de température est appelé aussi coefficient de courant (A/K)

**I<sub>d</sub>** : est Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \times \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \times I}{A \times V_t}\right) - 1 \right]$$

(6)

Où : V et I sont la tension et courant de sortie.

**A** : constante d'idéalité de la diode  $1 \leq A \leq 2$

**V<sub>t</sub>** =  $\frac{N_s \times K \times T}{q}$  Est la tension thermique

**N<sub>s</sub>** : nombres des cellules en séries

**K** : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)

$q$  :Charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

$I_s$  : est le courant de saturation inverse

$$I_s = \frac{I_{cc} + \alpha_v \times (T - 298.15)}{\exp\left(\frac{V_{co}}{A \times V_t}\right) - 1} \quad (7)$$

$I_p$  : est courant de fuite de la résistance parallèle  $R_p$ .

$$I_p = \frac{V + R_s \times I}{R_p} \quad (8)$$

L'application de la loi des nœuds peut obtenir l'équation du courant de sortie :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (9)$$

$$I = I_{ph} - I_s \times - \frac{V + R_s \times I}{R_p} \quad (10)$$

Pour généraliser le calcul du rayonnement et des différentes températures, on utilise les équations suivantes

$$I_s(T) = I_s(T_{ref}) \times \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \times \exp\left[\left(\frac{q \times E_g}{n \times k}\right) \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (11)$$

$$I_s(T_{ref}) = \frac{I_{cc}(T_{ref})}{\left[\exp\left(\frac{V_{co}}{n \times V_T}\right) - 1\right]} \quad (12)$$

$$I_D = \frac{I_s(T)}{\left[\exp\left(\frac{V + R_s \times I}{n \times V_T}\right) - 1\right]} \quad (13)$$

$\alpha_i$  : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

$T_{ref}$ : La température de référence

$G$  : L'irradiation solaire.

$E_g$ : L'énergie de gap 1,12 eV pour le Silicium (Si) et 1,35 eV pour Germanium (Ge)

$I_{cc}(T_{ref})$ : Le courant dans la température de référence ( $I_{cc}$  donne dans le catalogue de panneaux solaire dans les conditions standards  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $AM=1.5$ ).

### **I.8.3 Modèle à deux diodes**

Actuellement le modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes). Ce modèle est composé de deux exponentiels. Le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent à deux diodes ci-dessous figure (II-4). Il consiste à la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{S1}$  et  $I_{S2}$ , les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{Ph}$ , qui dépend de l'éclairement solaire [33].

La résistance série  $R_s$  rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_p$  traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut.

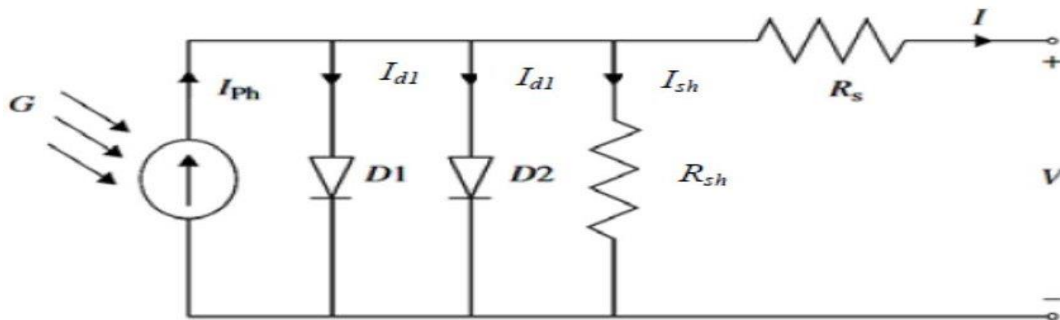


Figure 14: Circuit électrique équivalent à double diode

### **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude des généralités sur l'énergie photovoltaïque et la modélisation. La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la tension et de la relation de courant (I-V), dont l'identification joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Dans ce chapitre, nous avons introduit la modélisation mathématique de la cellule et du générateur photoélectrique en utilisant un modèle photoélectrique (générateur photoélectrique à diode) avec ces équations

## CHAPITRE II :

Extraction des paramètres

Par les méthodes

Classiques

### II.1 Introduction

L'extraction des paramètres des cellules solaires par des méthodes conventionnelles est une étape essentielle dans l'évaluation de leurs performances et de leur efficacité énergétique. Les méthodes conventionnelles sont largement utilisées pour caractériser les cellules solaires et déterminer leurs principales propriétés électriques.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé deux méthodes : la méthode analytique (Gauss Seidel) et la méthode de Villalva

Ces méthodes traditionnelles d'extraction de paramètres sont fiables et reconnues. Ils fournissent des informations précises sur les performances des cellules solaires, ce qui est essentiel pour leur évaluation, leur comparaison et leur utilisation dans les systèmes d'énergie solaire.

Où nous avons essayé de résumer dans ce chapitre le principe d'action de ces deux méthodes et de connaître leurs lacunes, que ce soit en

La complexité d'utilisation et la précision, au niveau de la convergence des résultats et de la rapidité d'extraction de ceux-ci, nous avons utilisé les deux méthodes sur un même modèle une seule diode

Il existe d'autres méthode d'analyse telles que :

- ❖ Méthode de Jacobi
- ❖ Méthode de Relaxation
- ❖ Newton Raphson

### II.2 Méthode analytique (Gauss-Seidel)

#### II.2.1 Définition Méthode Gauss-Seidel:

En algèbre linéaire numérique, la méthode de Gauss-Seidel, également connue sous le nom de méthode de Lippmann, est une méthode itérative utilisée pour résoudre des systèmes d'équations linéaires. Il doit son nom aux mathématiciens allemands Carl Friedrich Gauss et Philipp Ludwig von Seidel.

Le circuit équivalent d'un modèle à une seule diode est une représentation simplifiée du fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque dans des conditions spécifiques de rayonnement solaire et de température. Ce modèle permet d'analyser et de caractériser le comportement électrique de la cellule [15] [16]

Le circuit équivalent du modèle PV d'une seule diode comprend une source de courant  $I_{ph}$  qui représente la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La jonction PN photovoltaïque solaire introduit des pertes, qui sont prises en compte dans le modèle en ajoutant une résistance série  $R_s$  pour représenter les résistances internes en série des cellules et des résistances de contact, ainsi qu'une résistance parallèle  $R_p$  pour tenir compte des courants de fuite. Ce modèle permet de caractériser le comportement de la cellule solaire et d'analyser ses performances.

L'équation (14) donne la caractéristique I-V du module photovoltaïque, qui décrit la relation entre le courant délivré par le module PV, composé de N cellules PV connectées en série, et la tension aux bornes du module. Cette caractéristique permet de visualiser le comportement électrique du module en fonction de la variation de la tension, ce qui est essentiel pour l'analyse et la conception des systèmes photovoltaïques.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (14)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \text{ (STC)}$$

$$I = I_{ph} - I_s \times \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \times I}{n \times V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \times I}{R_p} \quad (15)$$

$$V_t = \frac{N_s \times K \times T}{q} \quad (16)$$

Quatre paramètres inconnus existent dans (15) à savoir introuvable dans la fiche technique, qui sont :  **$I_s, R_s, R_p$**  et  **$n$**  Il n'est pas toujours disponible dans les fiches techniques des appareils des modules PV

Comme mentionné dans la section I, la représentation à diode unique a 4 paramètres inconnus qui doivent être estimés afin de compléter la première partie du modèle PV. Les trois différentes conditions de fonctionnement du module PV sont utilisées pour dériver des équations, qui sont ensuite résolues et utilisées pour obtenir les paramètres requis. Ceux-ci sont

### **1. Condition de circuit ouvert**

Il s'agit de la condition où les bornes de sortie du module PV ne sont pas connectées et la tension aux bornes du module est maximale et égale à la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . Aucun courant ne circule à la sortie, donc  $I = 0$ . Cette condition permet de mesurer la tension maximale que le module PV peut produire en l'absence de charge.

### **2. Condition de court-circuit**

Il s'agit de la condition où les bornes de sortie du module PV sont connectées ensemble (court-circuitées), de sorte que la tension à travers le panneau PV,  $V$ , est égale à 0. À ce point, le courant maximal circule à travers le module PV, et il est égal au courant de court-circuit,  $I_{cc}$ . Cette condition permet de mesurer le courant maximal que le module PV peut fournir lorsqu'il est court-circuité.

### 3. Point de puissance maximale

Au point de puissance maximale, le courant circulant à la sortie du module PV est égal à  $I_m$  et la tension aux bornes du module photovoltaïque est égale à  $V_m$ . C'est le point où le module PV produit la puissance maximale,  $P_m$ . Il est déterminé par la combinaison optimale de courant et de tension pour obtenir la puissance maximale de sortie du module PV.

Pour calculer les quatre paramètres ( $R_s$ ,  $R_p$ ,  $I_{ph}$ ,  $I_s$  et  $n$ ) nous avons besoin de quatre équations linéaires basées sur les paramètres connus ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $K_I$ ,  $K_v$  et  $n$ ) que nous trouvons écrits dans le document technique du panneau photovoltaïque afin d'obtenir enfin l'équation I-V distinctive de l'unité photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque comporte quatre cas

#### 1. Condition Sous la condition de court-circuit : ( $V=0$ , $I=I_{cc}$ )

Dans ce cas, nous compensons la valeur  $V=0$  et  $I=I_{cc}$  Dans ce cas, nous compensons l'équation (15)

$$I_{cc}=I_{ph}-I_s\left(\exp\left(\frac{0+R_s.I_{cc}}{n.V_t}\right)-1\right)-\left(\frac{0+R_s.I_{cc}}{R_p}\right) \quad (16)$$

Et de là, il devient l'équation de  $I_{ph}$  :

$$I_{ph}=I_{cc}+I_s\left(\exp\left(\frac{R_s.I_{cc}}{n.V_t}\right)-1\right)-\left(\frac{R_s.I_{cc}}{R_p}\right) \quad (17)$$

#### 2. Condition de court-circuit ( $V_{co}$ , $0$ )

Dans ce cas, il devient  $V=V_{co}$  et  $I=0$  Nous compensons les valeurs précédentes dans l'équation et nous obtenons l'équation () :

$$0=I_{cc}-I_s\left(\exp\left(\frac{V_{co}+R_s.0}{n.V_t}\right)-1\right)-\left(\frac{V_{co}+R_s.0}{R_p}\right) \quad (18)$$

Et de lui nous obtenons l'équation des  $I_s$  qui est devenue

$$I_s=I_{cc}-\left(\exp\left(\frac{V_{co}}{n.V_t}\right)-1\right)-\left(\frac{V_{co}}{R_p}\right) \quad (19)$$

#### 3. Point de puissance maximal ( $V_m$ , $I_m$ )

Dans ce cas, nous composons les valeurs  $V = V_m$  et  $I=I_m$  On compense dans l'équation(20)

$$I_m=I_{cc}-I_s\left(\exp\left(\frac{V_m+R_s.I_m}{n.V_t}\right)-1\right)-\left(\frac{V_m+R_s.I_m}{R_p}\right) \quad (20)$$

**4.4eme point dérivation**  $(\frac{dp}{dv} | i = i_m, v = v_m | )$

Nous différencions dans l'équation (15) et  $(I=I_m, V=V_m)$

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{I=I_m, V=V_m} = 0$$

$$\frac{dP}{dV} = 1 \cdot [ I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V+R_s I}{n V_t}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V+R_s I}{R_p}\right) ] + V \left[ 0 - \frac{I_s}{n V_t} \exp\left(\frac{V+R_s I}{n V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_p} = 0$$

En conséquence, nous obtenons une éq

$$R_p = \frac{1}{I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{n V_t}\right) - 1 \right] + V_m \left( \frac{V_m + R_s I_m}{R_p} \right) + \frac{V_m I_s}{n V_t} \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{n V_t}\right)} \tag{21}$$

Maintenant, nous avons quatre équations non linéaires (17), (19) et (22) et quatre paramètres indéfinis ( $I_{ph}, R_s, R_p, I_s$ ), et pour résoudre ce problème, nous avons besoin de méthodes mathématiques analytiques. Dans ce chapitre, notre étude était basée sur la méthode de Gauss-Seidel, qui est une méthode numérique utilisée pour résoudre un système d'équations linéaires. Équations. Cette méthode permet d'avancer progressivement vers la solution finale du système en mettant à jour les valeurs des variables à chaque étape.

Gauss-Seidel nécessite de définir une valeur initiale pour les variables et d'effectuer des mises à jour itératives jusqu'à ce que la progression vers la solution finale s'arrête.

**II.3 Méthode de Villalva**

**II.3.1 Définition Méthode Villalva :**

La méthode Villalva doit son nom au professeur Marcelo Gradella Villalva de faculté de génie électrique et informatique, la méthode Villalva est utilisée pour extraire des paramètres.

Dans le modèle à diode unique, nous représentons la cellule PV comme une source de courant photoélectrique  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode de jonction P-N. Cette représentation est basée sur l'équation de Schrockley pour une jonction P-N semi-conductrice sous éclairage [17].

L'équation de Schrockley décrit le courant à travers une diode en fonction de la tension appliquée. Pour une diode P-N sous éclairage, l'équation de Schrockley est modifiée pour tenir compte du courant photoélectrique généré par la lumière incidente.

Les pertes dans une cellule PV sont généralement représentées par des résistances de dérivation. La résistance de dérivation en parallèle, notée  $R_p$ , correspond au courant de fuite à travers la jonction P-N. D'autre part, la résistance série, notée  $R_s$ , représente les pertes dues à la résistance de contact entre le silicium et les surfaces des électrodes.

Dans le modèle à une seule diode, il est nécessaire de prendre en compte cinq paramètres inconnus pour le caractériser. Ces paramètres sont les suivants:

**1. Courant photoélectrique (I<sub>ph</sub>)**

$$I_{ph} = I_{cc} \times \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) \tag{23}$$

**2. Courant de saturation inverse (I<sub>s</sub>) :**

Le courant I<sub>s</sub> est exprimé comme suit :

$$I_s = \frac{I_{cc} + K_i(T-298) - \left(\frac{V_{oc}}{R_p}\right)}{\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v(T-298)}{nV_t}\right) - 1} \tag{24}$$

**3. Facteur d'idéalité (n) :** Il représente le facteur de qualité de la diode et reflète le comportement non idéal de la jonction P-N. Il est généralement compris entre 1 et 2, et une valeur plus élevée indique une diode plus idéale (Résumer selon le tableau suivant)

Tableau (1) valeur du facteur d'idéalité basée sur la technologie cellulaire [17]

<b>Technologies cellulaire</b>	<b>Facture d'idéalité</b>
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
a-Si-H tandem	3.3
a-Si-H triple	5.0
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

**Résistance de dérivation (R<sub>p</sub>) et Résistance série (R<sub>s</sub>)**

Au point de puissance maximale, nous multiplions les deux côtés de l'équation (15) par V<sub>m</sub> nous trouvons que:

$$I_m \times V_m = V_m \times I_{ph} - V_m \times \left[ I_s \exp\left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{nV_t}\right) - 1 \right] - V_m \times \left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{R_p}\right)$$

$$P_m = V_m \times I_{ph} - V_m \times \left[ I_s \exp\left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{nV_t}\right) \right] - V_m \times \left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{R_p}\right)$$

De l'équation () précédente, nous extrayons la valeur de R<sub>p</sub> :

$$R_p = \frac{V_m(V_m + R_s I_m)}{V_m I_{ph} - V_m \left( \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{n V_t}\right) - 1 \right) - P_m} \quad (25)$$

Dans l'équation (23), (34), toutes les valeurs des paramètres sont connues sauf la valeur de la résistance  $R_s$  et la résistance  $R_p$ . Pour les calculer, on donne une valeur approximative de  $R_s = 0$  avec le calcul de la valeur du  $R_p$  en même temps. Le couple  $R_s$  et  $R_p$  correspondent à la valeur calculée du point de puissance maximale  $P_m$ . Avec la valeur donnée dans la fiche technique suivante est  $P_{me}$  (Point de puissance maximum estimé) apprécier la valeur  $I_{ph} = I_{cc}$  la valeur départ  $R_s = 0$

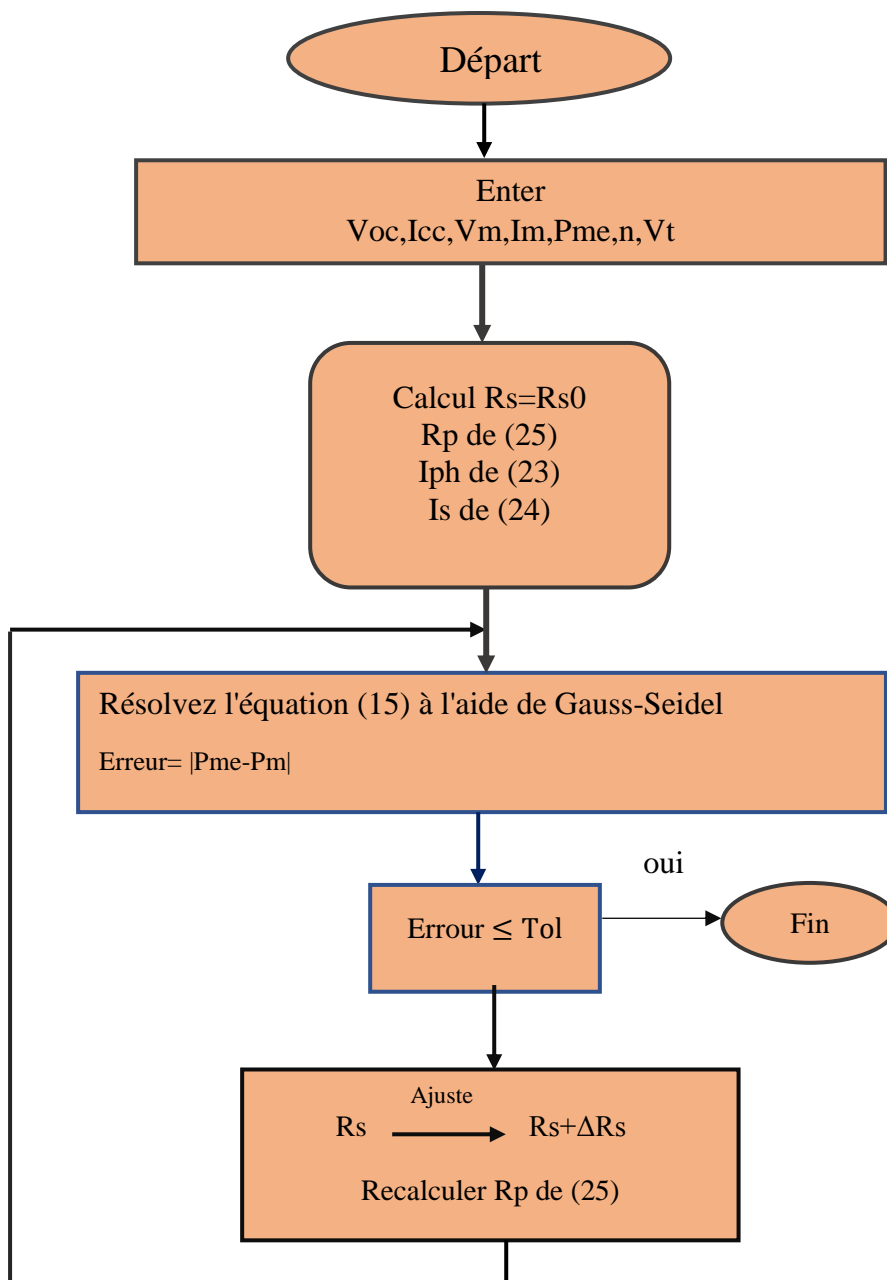


Figure 15 : Organigramme pour l'identification  $R_s$  et  $R_p$

### II.4 Application numérique

Après avoir consulté les méthodes précédentes (Analytique et Villalva), nous allons effectuer l'application numérique pour comparer les résultats estimés avec les résultats expérimentaux.

Pour vérifier la validité des résultats, nous utilisons un échantillon du panneau photovoltaïque. Les paramètres physiques du panneau photovoltaïque sont présentés dans le tableau ci-dessous après visualisation :

**TABLEAU (2) Paramètres du modèle après identification**

Paramets	Valeurs
Pme	0.03218W
Vco	0.6V
Vm	0.459V
Icc	0.8404A
Im	0.764A
Ns	1
Np	1
NOCT	45°C
Ki	0.04K
Kv	0.0035K
Kp	-0.045K

#### •Méthode Analytique (Gauss-Seidel)

Tableau (3) Résultats de la méthode d'analyse

	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	n (-)	$I_s(A)$	Pm estimé (W)
Une seule diode	2.5203e-24	62.052	2.1117	2.1503e-05	0.3218

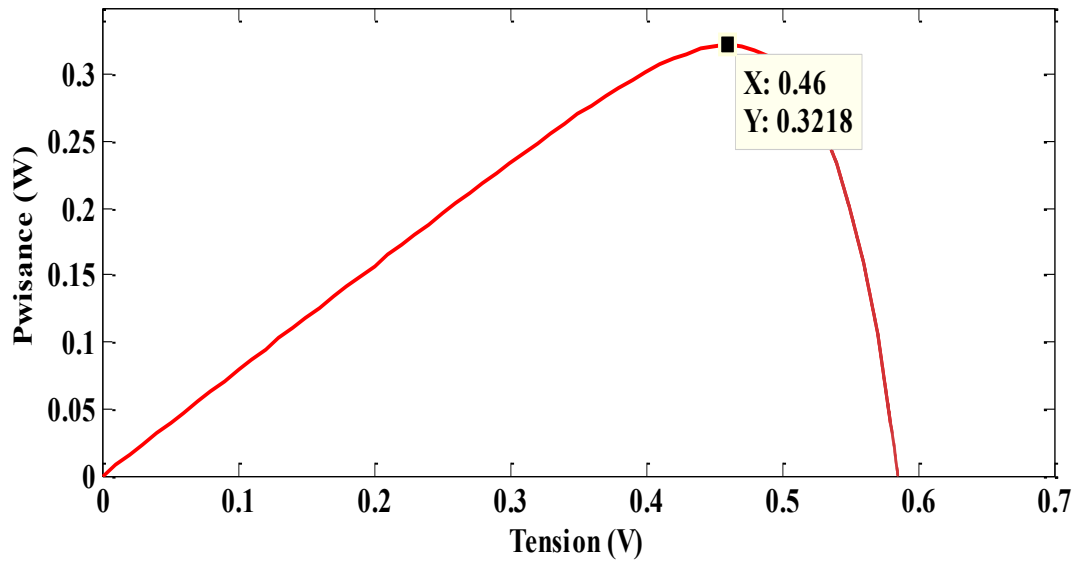


Figure 16 : la courbe PV estime par la méthode de Gauss-Seidel

○ Méthode Villalva

Tableau (4) Résultats de la méthode Villalva

	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	Pm estimé (W)
Une seule diode	0.1	67.0289	0.3507

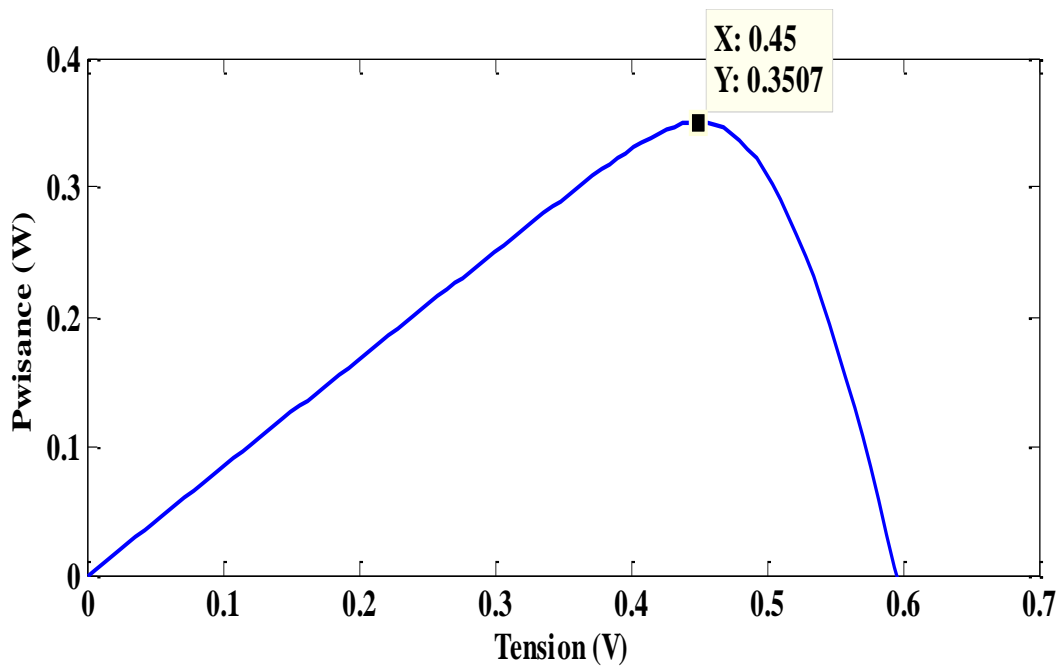


Figure 17 : la courbe PV estime par la méthode des Villalva

Pour choisir la méthode d'évaluation la plus appropriée, la méthode analytique présente le rapport d'erreur le plus faible par rapport à la méthode Villalva parce que ses résultats sont plus précis. Villalva est également plus rapide dans les résultats de calcul.

### 1. La Différence entre la méthode analytique et la méthode Villalva

La différence entre la méthode analytique et la méthode Villalva : La méthode analytique donne des résultats plus précis que la méthode Villalva, qui est moins précise. La méthode Villalva ne prend pas plus de temps à calculer, et la méthode analytique est l'inverse.

## II.5 les avantages et les inconvénients de chaque méthode

### ○ Méthode de Villalva

#### **Avantages**

**Simplicité** : La méthode Villalva est relativement simple à réaliser, ne nécessitant pas d'équipement spécialisé ou complexe.

**Accessibilité** : Elle peut être utilisée par un large éventail de personnes, sans nécessiter de compétences techniques avancées.

#### **Inconvénient**

**Contraintes d'information obtenues** : Villalva peut fournir des renseignements limités, ce qui peut rendre le diagnostic ou l'évaluation moins précis

**Sensibilité à la technique de réalisation** : La méthode Villalva peut donner des résultats variables en fonction de la technique utilisée, ce qui peut affecter la fiabilité des informations obtenues.

### ○ Méthode analytique

#### **Avantages**

Capable d'extraire des paramètres importants des cellules solaires avec une précision relative élevée

#### **Inconvénients**

Il faut beaucoup de temps et d'efforts pour calculer les valeurs estimées des paramètres

### II.6 Conclusion

Notre étude dans ce chapitre met en évidence l'objectif de la modélisation des panneaux solaires, qui est de décrire leur fonctionnement dans toutes les conditions d'utilisation. Nous avons proposé deux méthodes pour déterminer les différents paramètres, et il ressort de cette étude que la méthode analytique (méthode de Gauss-Seidel) se rapproche le plus des données

## CHAPITRE III

Identification des paramètres

De panneau PV par les méthodes

Méta-heuristiques

### III.1 Introduction

Les métaheuristiques sont des méthodes d'optimisation qui visent à résoudre des problèmes complexes en utilisant des stratégies générales basées sur l'expérience et l'amélioration progressive. Elles cherchent à trouver des solutions proches de l'optimum pour des problèmes qui ne peuvent pas être résolus de manière traditionnelle. Contrairement aux algorithmes traditionnels, les métaheuristiques sont flexibles et peuvent être appliquées à divers problèmes. Parmi les exemples de métaheuristiques, on trouve la recherche locale, l'optimisation par essais particuliers, le recuit simulé, l'algorithme génétique, etc. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie industrielle, les mathématiques, l'informatique, l'intelligence artificielle, etc. Les métaheuristiques sont des outils puissants pour résoudre des problèmes d'identification des paramètres inconnus.

Et dans ce chapitre, nous avons utilisé (Harris Hawks Optimisation (HHO)) Pour identifier et modéliser deux types de panneaux photovoltaïques.

### III.2 Méthodes d'optimisation Métaheuristiques

Contrairement aux méthodes à solution unique qui font intervenir une seule solution, les Méthodes de recherche à population manipulent un ensemble de solutions appelé Population. Le principe général de toutes ces méthodes consiste à combiner des solutions entre elles pour en former de nouvelles en essayant d'hériter des 'bonnes' caractéristiques des solutions parents. Un tel processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Parmi ces algorithmes à population, la méthode d'optimisation par Harris Hawks :

### III.3 Méthode d'optimisation par Harris Hawks

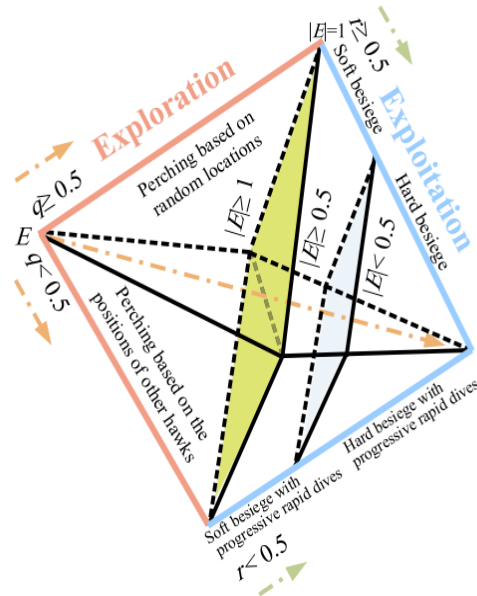
La méthode Harris Hawks (HHO) est un algorithme métaheuristique inspiré du comportement de chasse des faucons Harris, une espèce de proie trouvée dans les Amériques. C'est un algorithme d'amélioration inspiré de la nature utilisé pour résoudre des problèmes d'amélioration complexes. L'algorithme HHO imite la stratégie de chasse coopérative des faucons Harris, travaillant ensemble dans une structure hiérarchique pour augmenter leurs chances de capturer des proies. Ce comportement collaboratif constitue la base de la stratégie de recherche de l'algorithme. Son principe est basé sur trois étapes

1. Phase d'exploration
2. Transition de l'exploration à l'exploitation
3. Phase d'exploitation

La figure (16) montre toutes les phases de HHO, c'est-à-dire qu'elles sont décrites dans les sous-sections suivantes



(A)



(B)

Figure 18 : Différentes phases de HHO

### 1.Phase d'exploration

Pour la phase, on utilise les équations ci-dessous :

$$X_i(t+1) = \{X_{rand}(t) - r_1|X_{rand}(t) - 2r_2X(t)|, \quad q \geq 0.5 \quad (26)$$

$$X_i(t+1) = (X_{rabbit}(t) - r_3X_m(t) - Y) - r_3(LB + r_4(UB - LB)) \quad q < 0.5 \quad (27)$$

Quand

$X_i(t+1)$  : est la position des faucons dans l'itération suivante

$X_{rand}(t)$  : est un faucon sélectionné au hasard dans la population actuelle

$X_{rabbit}$  : représente la position du lapin

$X(t)$ : est le vecteur de position actuelle des faucons  $r_1, r_2, r_3$ , et  $r_4$  sont des nombres aléatoires entre 0 et 1 et actualisés à chaque itération

$q$  : des nombres aléatoires dans l'ensemble de (0, 1)..

$X_{perry}$ : est la position de proie

LB et UB sont les limites supérieure et inférieure des variables, respectivement. La position moyenne des faucons est calculée à l'aide de l'équation (3)

$$X_m(t) = \frac{\sum_{i=0}^N X_t}{N} \quad (28)$$

$X_m(t)$  : est la position moyenne des faucons dans l'itération actuelle

T : est l'itération actuelle

N : est le nombre total de faucons

$X_i(t)$  : est le vecteur de position de chaque faucon.

## 2. Transition de l'exploration à l'exploitation

L'algorithme HHO peut passer de l'exploration à l'exploitation, puis changer entre différents comportements d'exploitation en fonction de l'énergie d'évasion de la proie. L'énergie de la proie diminue considérablement pendant son comportement d'évasion. Pour modéliser ce fait, l'énergie de la proie est conçue de la manière suivante

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (29)$$

Où E indique l'énergie d'échappement de la proie, T est le nombre maximal d'itérations et  $E_0$  est l'état initial de son énergie. Dans HHO,  $E_0$  change aléatoirement à l'intérieur de l'intervalle  $(-1, 1)$  à chaque itération. Lorsque la valeur de  $E_0$  diminue de 0 à  $-1$ , le lapin est physiquement en panne, tandis que lorsque la valeur de  $E_0$  augmente de 0 à 1, cela signifie que le lapin se renforce. La dynamique l'énergie qui s'échappe E a une tendance décroissante au cours des itérations. Lorsque l'énergie qui s'échappe  $|E| \geq 1$ , les faucons recherchent différentes régions pour explorer un emplacement de lapin, par conséquent, le HHO effectue la phase d'exploration, et lorsque  $|E| < 1$ , l'algorithme tente d'exploiter le voisinage des solutions lors des étapes d'exploitation. En bref, l'exploration se produit lorsque  $|E| \geq 1$ , alors que l'exploitation se produit dans les étapes ultérieures lorsque  $|E| < 1$ .

## 3.Phase d'exploitation

Dans cette phase, les faucons Harris attaquent la proie en fonction de la position détectée lors de la phase précédente. Cependant, le lapin tente toujours de s'échapper et les faucons suivent la stratégie de poursuite. Par conséquent, HHO est conçu sur la base de quatre stratégies possibles de techniques d'attaque. Deux variables indiquent quelle stratégie sera exécutée, r et  $|E|$ . Alors que  $|E|$  est l'énergie d'échappement du lapin, r désigne la probabilité d'évasion, où  $r < 0,5$  indique une plus grande chance pour le lapin de réussir à s'échapper et  $r \geq 0,5$  pour échec à s'échapper. La phase d'exploration et les quatre types d'exploitation sont illustrés à la figure 2. Dans ce qui suit, un résumé de chaque stratégie d'attaque est présenté :

1. Siège doux
2. Assiéger dur
3. Soft Besiege avec des plongées rapides progressives
4. Plongées rapides progressives Assiège dur

Le pseudo code de l'algorithme pour minimiser une fonction quel qanât et donner dessous :

### III.4 Algorithme 1 Pseudo-code de l'algorithme HHO

---

**Inputs:** La taille de la population N et le nombre maximum de Iterations T

**Outputs:** L'emplacement du lapin et sa valeur de fitness

Initialiser la population aléatoire  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$

**While** (la condition d'arrêt n'est pas remplie) **faire**

Calculer les valeurs de fitness des faucons

Set Xrabbit as the location of rabbit (best location)

**For** (chaque faucon ( $X_i$ )) **faire**

Mettre à jour l'énergie initiale  $E_0$  et la force de saut  $J$  ▷

$E_0 = 2 \text{rand}() - 1$ ,  $J = 2(1 - \text{rand}())$

Mettez à jour le E en utilisant Eq.

**Si** ( $|E| \geq 1$ ) **alors** ▷ **Phase d'exploration**

Mettez à jour le vecteur de localisation à l'aide de l'équation.

**Si** ( $|E| < 1$ ) **alors** ▷ **Phase d'exploitation**

**Si** ( $r \geq 0.5$  et  $|E| \geq 0.5$ ) **alors** ▷ **Soft assiege**

Mettez à jour le vecteur de localisation à l'aide de l'équation.

Sinon si ( $r \geq 0.5$  et  $|E| < 0.5$ ) **alors** ▷ **Assiège dur**

Mettez à jour le vecteur de localisation à l'aide de l'équation.

Sinon si ( $r < 0.5$  et  $|E| \geq 0.5$ ) **alors** ▷ **Soft assiege**

Avec des plongées rapides progressives

Mettez à jour le vecteur de localisation à l'aide de l'équation.

Sinon si ( $r < 0.5$  et  $|E| < 0.5$ ) **alors** ▷ **Assiège dur**

Avec des plongées rapides progressives

Mettez à jour le vecteur de localisation à l'aide de l'équation.

Retour Xrabbit

### III.5 Application sur le modèle à une seule diode

Pour extraire les cinq paramètres du modèle à une seule diode, à savoir  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $R_p$ , le chercheur doit d'abord définir une fonction objective. Cette fonction objective sera utilisée pour mesurer la qualité de l'ajustement entre les données expérimentales et les valeurs simulées du courant-tension (I-V). L'objectif est de minimiser cette fonction en ajustant les paramètres du modèle de manière itérative jusqu'à ce que l'ajustement entre les données expérimentales et simulées soit optimal.

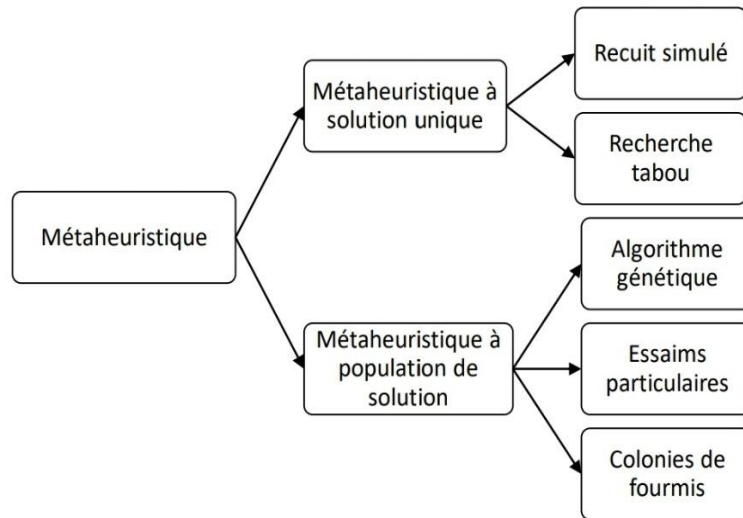


Figure 19 : organigramme d'optimisation par Harris Hawks

#### III.5.1 Fonction objective (FO)

Un modèle mathématique est considéré comme précis lorsque les points expérimentaux et simulés du courant-tension (I-V) sont presque identiques. Habituellement, l'erreur SSE entre les données expérimentales et simulées est utilisée comme fonction objectif. L'objectif final est de régler les paramètres inconnus de manière à minimiser l'erreur SSE de manière optimale.

$$SSE(I, V, I_s, I_s, n, R_s, R_p) = \sum_{i=1}^N [I_{exp}(i) - I_{est}]^2 \quad (30)$$

$$FO = \text{minimise (SSE)} \quad (31)$$

Le module des **Aishwarya Khan** Tan et al. (1986), cellule solaire au silicium de 57 mm de diamètre (RTC France)

**TABEAU (5) Les limitées supérieurs et inférieurs de paramètres.**

<b>Parameter</b>	<b>Limit inferior</b>	<b>Limit superior</b>
<b>I<sub>ph</sub> (A)</b>	0	2
<b>I<sub>s</sub>(A)</b>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup>
<b>n (-)</b>	1	2
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	0	1
<b>R<sub>p</sub>(KΩ)</b>	0.1	10

### III.5.2.1 Étapes expérimentales

Pour appliquer les algorithmes d'optimisation, un certain nombre d'expériences doivent d'abord être réalisées afin de trouver les points courant-tension expérimentales. Dans cette étude, deux panneaux solaires *i.e.*, R.T.C France et Photowatt-PWP 201 de 36 cellules en séries sont utilisés pour l'investigation. Les données réelles courant-tension de ces panneaux sont obtenus à partir des références [18] et [19].

Les données de panneaux R.T.C France et Photowatt-PWP 201 sont extraites dans les conditions suivantes respectivement (Eclairement= 1000 et T=33 ° C et Eclairement= 1000 et T=45 ° C). Le détail sur les panneaux peut être trouvé sur [20].

### III.5.2.2 Étapes d'implémentation du HHO

Afin de mener une étude significative, nous avons comparé les résultats de deux types différents de panneaux photovoltaïques, en fixant les coefficients de contrôle pour HHO conformément aux recommandations de l'article original. Le nombre d'agents a été fixé à 30 particules. Les résultats ont été exécutés 1000 fois et les meilleurs paramètres ont été sélectionnés.

## III .6 Résultats et discussion

### III.6.1 Caractérisation IV et PV R.T.C France

Il est essentiel de se rappeler qu'il existe 5 paramètres indéfinis à optimiser. Les paramètres extraits sont ensuite réutilisés dans le modèle pour estimer les courbes I-V de deux types de panneaux photovoltaïques. La figure (20) et figure (21) présente les courbes I-V et PV estimées superposées aux données mesurées. À partir de cette dernière figure, nous pouvons observer que l'utilisation de la méthode d'optimisation de Harris Hawkes conduit à de bons résultats. Les courbes expérimentales et estimées sont bien coincées. Par conséquent, nous pouvons conclure que l'optimisation globale est bien explorée.

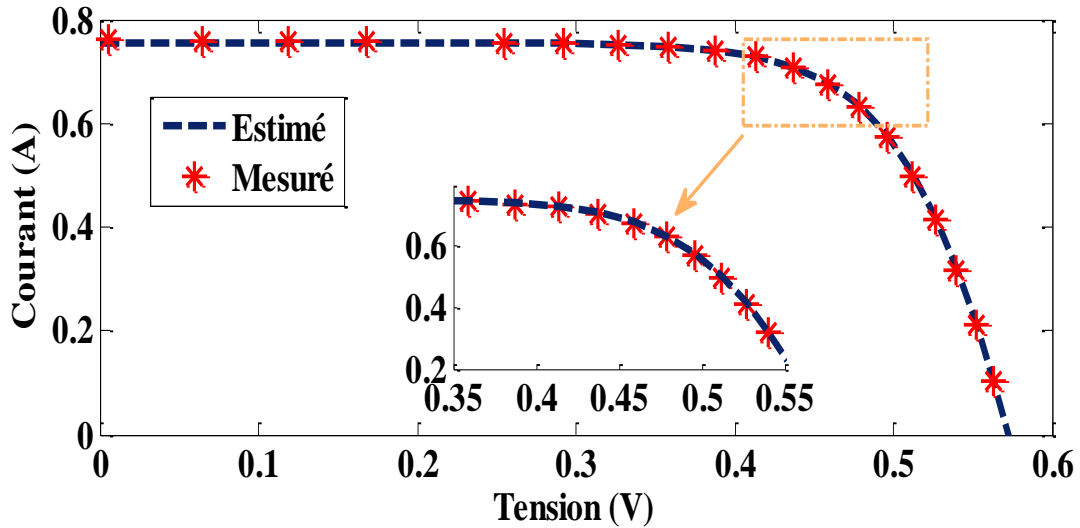


Figure 20: La courbe IV de panneau des RTC France

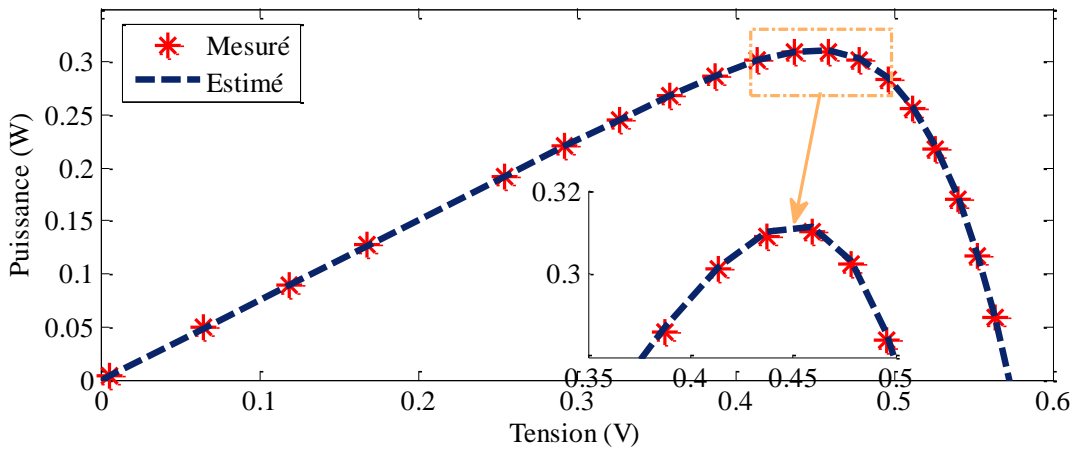


Figure 21 : La courbe PV de panneaux RTC France

### III.6.2 Caractérisation IV et PV des panneaux (Photowatt-PWP 201)

La figure (22) et la figure (23) présentent les courbes I-V et PV estimées superposées aux données mesurées. Dans cette dernière figure, nous constatons que les valeurs extraites expérimentalement et les valeurs de la fiche technique correspondent dans une certaine mesure, ce qui signifie que la méthode d'optimisation des Harris Hawks nous donne des résultats très satisfaisants. Les courbes calculées et les données mesurées se superposent bien. Par conséquent, nous pouvons conclure que l'optimisation globale a été bien étudiée.

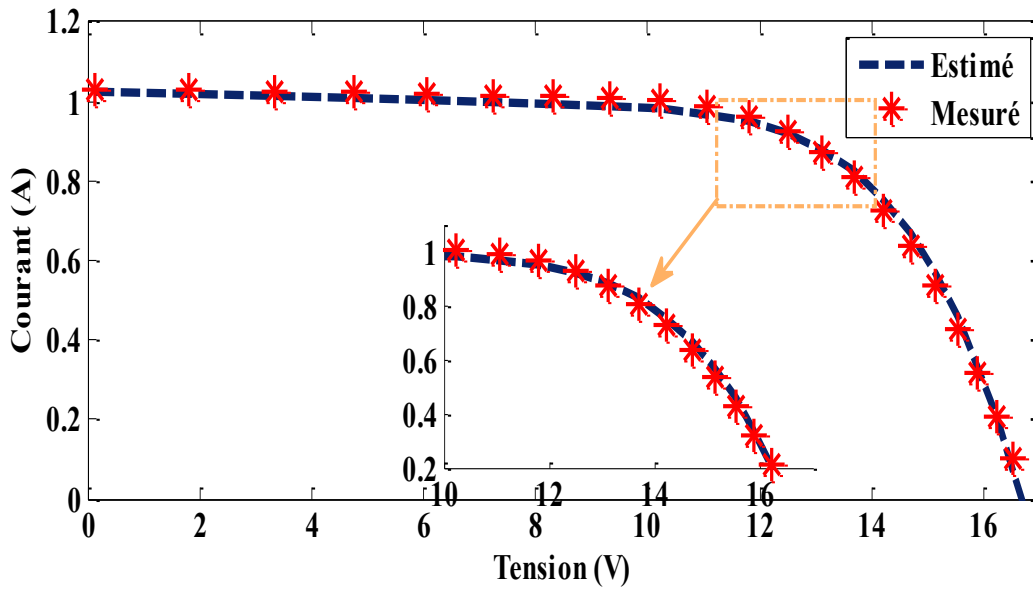


Figure 22 : La courbe IV de panneau (Photowatt-PWP 201)

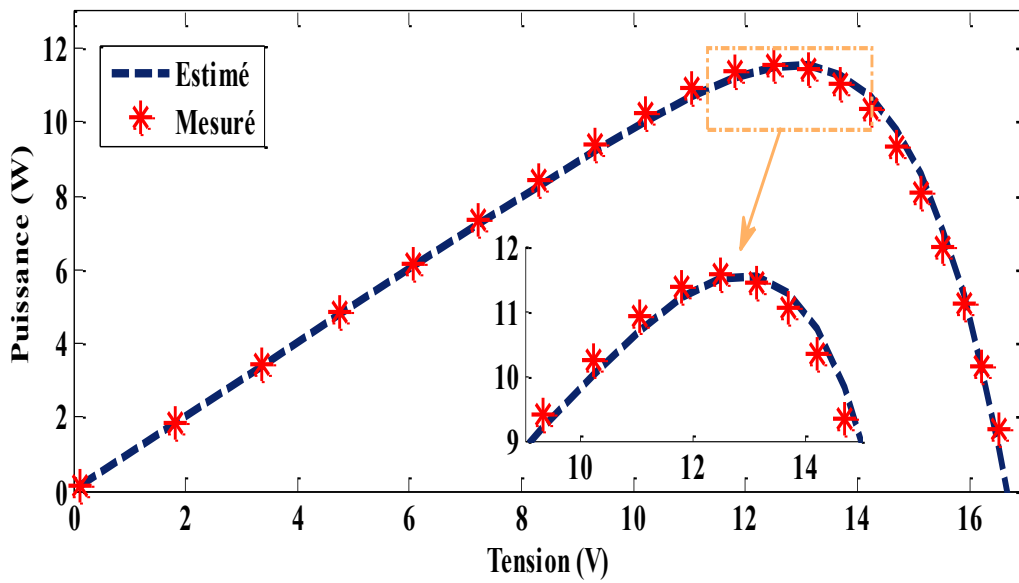


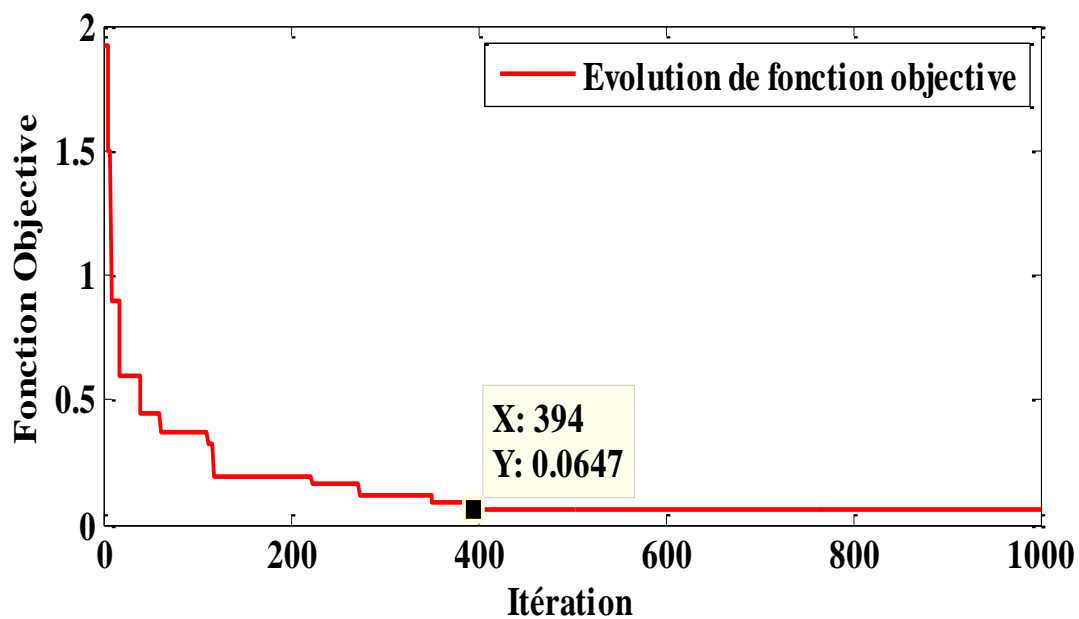
Figure 23: La courbe PV de panneau (Photowatt-PWP 201)

**TABEAU (6) : Les paramètres optimaux des panneaux**

Parameter/ panneaux	Panneaux(1)	Panneaux(2)
<b>I<sub>ph</sub> (A)</b>	0.7740	1.0335
<b>I<sub>s</sub>(A)</b>	9.7722e-08	9.0678e-07
<b>n (-)</b>	1.1348	1.2994
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	0.3585	0.9891
<b>R<sub>p</sub>(Ω)</b>	8.8599e+03	277.5434
<b>SSE</b>	2.6805	0.0111
<b>MAE</b>	0.2073	0.0187
<b>RMSE</b>	0.3414	0.0225
<b>Iterations consumes</b>	394	400

### III.6.3. Convergence de la méthode

La figure (24) et figure (25) représente l'évolution de la fonction objective en fonction du nombre d'itérations. D'après la figure (24) et figure (25), la méthode d'optimisation de Harris Hawkes a montré une bonne convergence vers la solution optimum dans les deux types de panneaux. Une convergence rapide a été remarquée. Le nombre d'itérations consommé pour atteindre la solution dans le premier cas est 394 itérations, tandis que 400 itérations sont utilisées pour achever des bons résultats dans le deuxième cas.



**Figure 24 : Courbe de convergence de panneau (RTC France)**

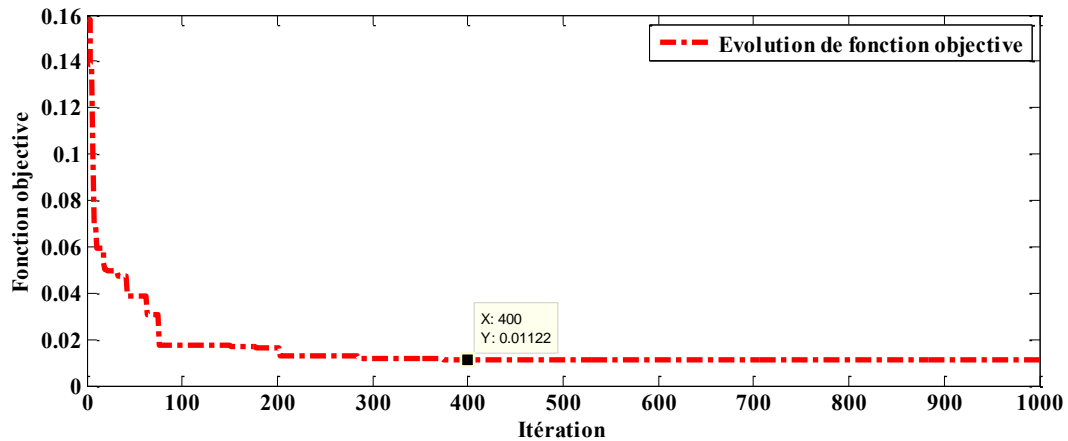


Figure 25 : Courbe de convergence de panneau (Photowatt-PWP 201)

### III.7 Analyse statistique

Les méthodes d'optimisations utilisées sont stochastiques. Elles produisent des solutions approximatives. A cet effet, des indices statistiques doivent être utilisés pour mesurer la qualité de la solution générée. RMSE et MAE ont été adoptés pour estimer l'écart des résultats de simulation par rapport aux données expérimentales.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N [I_{exp}(i) - I_{est}(i)]^2 / N} \quad (40)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^N (|I_{exp}(i) - I_{est}(i)|) / N \quad (41)$$

Résultats sont illustrés sur le tableau (6), nous l'avons remarqué. HHO (Harris Hawkes Optimisation) a été en mesure d'atteindre d'excellents résultats en raison de l'efficacité de ses étapes d'exploration et d'exploitation. Cette méthode permet d'extraire des solutions de haute qualité grâce à son approche performante.

### III.8 Conclusion

La détermination précise des paramètres des panneaux photovoltaïques a un impact significatif sur l'estimation des performances des générateurs photovoltaïques. Pour obtenir davantage de précision dans ce domaine, nous avons utilisé la méthode d'optimisation Harris Hawkes (HHO) pour deux types différents de panneaux photovoltaïques. Cette méthode repose sur l'application de l'intelligence artificielle pour extraire les paramètres optimaux des panneaux photovoltaïques.

Les résultats obtenus dans cette étude ont été très encourageants et satisfaisants, avec une erreur minimale et une bonne concordance entre les valeurs mesurées et simulées. La méthode HHO a rapidement convergé après un nombre d'itérations faible et acceptable.

À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que les méthodes exploratoires ont une grande capacité à modéliser de manière précise les caractéristiques des cellules photovoltaïques, non seulement pour un type spécifique, mais pour tous les types de panneaux photovoltaïques.

CONCLUSION  
GÉNÉRALE

### Conclusion Générale

En conclusion, un panneau photovoltaïque est une technologie moderne et efficace pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique utilisable. Notre étude a mis en évidence l'importance d'une extraction précise des paramètres des panneaux photovoltaïques pour assurer une performance efficace des systèmes solaires. Les méthodes mathématiques telles que la méthode de Villalva et la méthode de Gauss-Seidel sont des outils puissants pour estimer ces paramètres. Ces méthodes nous permettent de comprendre comment les panneaux solaires fonctionnent dans différentes conditions et d'identifier les paramètres critiques tels que  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$  et l'efficacité des modules solaires.

Il convient de noter que les techniques d'IA jouent un rôle important dans l'amélioration de l'extraction des paramètres des panneaux photovoltaïques. L'utilisation de techniques telles que des algorithmes comme celui sur lequel nous avons basé notre étude, qui est la méthode d'optimisation de Harry Hawks, permet une exploitation efficace des données et une précision accrue dans l'estimation des paramètres.

Grâce à ces méthodes, nous pouvons améliorer les performances des systèmes d'énergie solaire et augmenter leur efficacité. Cela nous permet d'avoir un aperçu des performances des panneaux solaires et des technologies utilisées, aidant à prendre des décisions éclairées et à optimiser la conception et le fonctionnement des systèmes d'énergie solaire.

En bref, l'extraction des paramètres des panneaux photovoltaïques à l'aide de méthodes mathématiques et d'applications de l'intelligence artificielle contribue à accroître la durabilité environnementale et à s'appuyer sur les énergies renouvelables, ce qui favorise un équilibre entre les besoins énergétiques et la préservation de l'environnement.

# References

## References

- [1] Yun Tiam, T., Kirschen, D.S., et al., 2004. A model of PV generations suitable for stability analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 19 (4), 748–755.
- [2] Kajihara, A., Hayakawa, A.T., 2005. Model of photovoltaic cell circuits under partial shading. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2005. ICIT 2005*.
- [3] Khouzam, K., L. Cuong, et al. (1994). Simulation and real-time modelling of space photovoltaic systems. In: *1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994. Conference Record of the Twenty-fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1994*
- [4] Walker, G., 2001. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *Journal of Electrical & Electronics Engineering Australia* 21 (1), 8.
- [5] Weidong, X., Dunford, W.G., et al., 2004. A novel multimethod for photovoltaic cells. In: *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04*.
- [6] Chenni, R., Makhlouf, M., et al., 2007. A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy* 32 (9), 1724–1730.
- [7] Matagne, E., Chenni, R., et al., 2007. A photovoltaic cell model based on nominal data only. In: *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives POWERENG 2007*.
- [8] Ishaque, K., Salam, Z., et al., 2011. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2), 586–594.  
<https://biblus.accasoftware.com/fr/les-differents-types-de-systemes-photovoltaiques-caracteristiques-et-avantages/>
- [9] Khouzam, K., L. Cuong, et al. (1994). Simulation and real-time modelling of space photovoltaic systems. In: *1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994. Conference Record of the TwentyFourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1994*
- [10] Walker, G., 2001. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *Journal of Electrical & Electronics Engineering Australia* 21 (1), 8
- [11] Elshatter, T. F., M. E. Elhaggee, et al. (1997). Fuzzy Modeling and Simulation of Photovoltaic. In: *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Spain*.
- [12] Balzani, M., Reatti, A., 2005. Neural network based model of a PV array for the optimum performance of PV system. *Research in Microelectronics and Electronics, 2005 PhD*.
- [13] Syafaruddin, Karatepe, E., et al., 2010. Development of Real-Time Simulator Based on Intelligent Techniques for Maximum Power Point Controller of Photovoltaic System, vol. 6(4), p. 20.

- [14] A. Kousseila B. Abderrahmane << Modélisation et optimisation des paramètres d'un module photovoltaïque par les outils d'intelligence artificielle>> PFE des master Université Abderrahmane Mira \_Bégaia
- [15] REYNAUD. Jean-François, “Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques”, Thèse Doctorat, Université Toulouse III, Le :4 Janvier 2011.
- [16]B. Flèche, D. Delagnes, “Energie solaire photovoltaïque”, juin 07
- [ 17] L.Bun, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV", thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
- [18] R.KHENFER, "Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques", doctorat en sciences, université farehat abbas- setif 1,algerie 2015.
- [19] R.Lahcene Z. Djallal << Etude et détection de défauts dans un système photovoltaïque >> Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj PPE des master
- [20] MEKLIICHE Said << Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium >> PPE des master 2016/2017 PP.21
- [21] S. Rekia. S.Hafsa << Modélisation et simulation d'une cellule Photovoltaïque organique par réseau neuronale artificiel >> Université de ahmed daraia -adrar-PPE des Master 7.10
- [22] << Structure d'un système PV connecté au réseau.>>9 août, 2010 ligne]. Available: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaïque/predimensionner-l-installation/>
- [23] Askarzadeh Al, dos Santos Coelho L. Détermination des paramètres des modules photovoltaïques dans différentes conditions de fonctionnement à l'aide d'une nouvelle approche d'optimisation de l'accouplement des oiseaux. Energy Convers Manage 2015; 89: 608–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.025>. 52
- [24] Barukčić M, Hederić Z, Špoljarić Z. Estimation des courbes I-V des panneaux photovoltaïques à l'aide des courbes I-V des fabricants et de la stratégie d'évolution. Energy Convers Manage 2014; 88: 447–
- [25]T.R. Ayodele, A.S.O. Ogunjuyigbe et E.E. Ekoh, «Évaluation des algorithmes numériques utilisés pour extraire les paramètres d'un modèle photovoltaïque à diode unique», Technologies et évaluations énergétiques durables, vol. 13 p. 51-59, 2016.
- [26] Vun Jack Chin, Zainal Salam, and KashifIshaque, “ Modélisation cellulaire et techniques d'estimation des paramètres du modèle pour l'application de simulateur photovoltaïque: un examen,” AppliedEnergy., vol. 154, pp. 500– 519, 2015
- [27] El-Ghazali Talbi. METAHEURISTICS FROM DESIGN TO IMPLEMENTATION.

Wiley.

[28] Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872.

[29] Gong, W., & Cai, Z. (2013). Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution. *Solar Energy*, 94, 209-220.

[30] Sihwail, R., Omar, K., Ariffin, K. A. Z., & Tubishat, M. (2020). Improved harris hawks optimization using elite opposition-based learning and novel search mechanism for feature selection. *IEEE Access*, 8, 121127-121145.

[31] Maxime BOMBRUN, Abdoulaye SENE. L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d'ordonnancement. Rapport d'ingénieur, Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications, 2011.

[32] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science*, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.

[33] AkihKiro Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system," Thèse de Master de l'Université de California, Septembre 2005.

**Résumé :**Le travail présenté dans une note de fin d'études porte sur la fin de cette étude liée aux systèmes d'énergie solaire photovoltaïque, car cette étude vise à créer un modèle mathématique précis et fiable pour extraire les réglages optimaux du panneau photovoltaïque dans diverses conditions de fonctionnement.

Afin de répondre à nos attentes et de nous assurer que nous sommes en mesure de choisir la méthode optimale d'estimation des paramètres de la technologie photovoltaïque. Nous avons utilisé deux méthodes analytiques, la méthode analytique (Gauss-Seidel) et la méthode Villalva, qui ont été utilisées pour extraire les quatre et six paramètres sur le modèle à une seule diode.

Afin de créer et de développer un modèle mathématique précis avec une fiabilité suffisante pour extraire les paramètres du panneau photovoltaïque, nous avons étudié la méthode d'optimisation, qui est l'optimisation de Harris Hawks. Grâce à des études expérimentales, nous avons conclu que la méthode d'optimisation de Harris Hawkes a une grande capacité et précision pour modéliser le comportement

Mots clés: Panneau photoélectrique intelligence artificielle méthodes analytiques

**Resume :**The work presented in a graduation note deals with the end of this study related to photovoltaic solar energy systems, as this study aims to create an accurate and reliable mathematical model to extract the optimal settings for the photovoltaic panel in various operating conditions

In order to achieve our expectations and to ensure that we are able to choose the optimal method for estimating photovoltaic technology parameters. We used two analytical methods, the analytical method (Gauss-Seidel) and the Villalva method, which were used to extract the four and six parameters on the single diode model.

In order to create and develop an accurate mathematical model with sufficient reliability to extract the parameters of the photovoltaic panel, we studied the optimization method, which is the Harris Hawkes optimization. Through experimental studies, we concluded that the Harris Hawkes optimization method has high ability and accuracy to model the semi-accurate behaviour of photovoltaic cells in different conditions.

Keywords: Photoelectric panel artificial intelligence analytical methods

ملخص

يعالج العمل المقدم في مذكرة تخرج نهاية الدراسة هاته المتعلقة بنظم الطاقة الشمسية الكهروضوئية حيث تهدف هاته الدراسة الى خلق نموذج رياضي دقيق ذا موثوقية لاستخراج الاعدادات المثلى للوح الكهروضوئي في مختلف حالات التشغيل

من أجل تحقيق توقعاتنا وضمان قدرتنا على اختيار الطريقة الأمثل لتقدير معلمات التكنولوجيا الكهروضوئية. قمنا باستعمال طريقتين تحليليتين هما الطريقة التحليلية (Gauss-Seidel) وطريقة فيليفا حيث تم استعمالهما لاستخراج المعلمات الاربعة والستة على نموذج الصمام الثنائي الفردي

ولخلق وتطوير نموذج رياضي دقيق ذا موثوقية كافي لاستخراج معلمات اللوح الكهروضوئي درسنا طريقة التحسين وهي التحسين هاريس هوكس ومن خلال الدراسات التجريبية استنتجنا ان طريقة التحسين هاريس هوكس لها قدرة ودقة عاليتين لنمذجة السلوك شبه الدقيق للخلايا الكهروضوئية في ظل ظروف مختلفة

الكلمات المفتاحية: لوحة كهروضوئية - طرق تحليلية للذكاء الاصطناعي