

---

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma Faculté des sciences et de la Technologie  
Département D'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**  
**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Electronique**  
**Spécialité : Instrumentation**

---

## **Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque**

---

Présenté par :

**BENKASSIS Amira**

Sous la direction de :

**MENASRIA Azzeddine**

**Juin 2024**

---

# REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions Allah, le Tout Puissant de nous avoir donné la santé, la force, la patience et la capacité de mener à bon terme ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon promoteur *Mr Menasria Azzeddine* pour son assistance et ces conseils tout le long de ce travail.

Mes remerciements également à tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail en témoignant ainsi l'intérêt qu'ils portent à ce sujet, son oublier tout la famille de l'institut d'électronique.

Enfin j'exprime toute ma gratitude à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

## DEDICACES

Je dédie ce travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à :

À mes très chers parents À mes frères À mes sœurs À mon cher mari, pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail. À mes chers enfants LYDIA, JOUD, LAITH, À tous ceux qui, ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

---

## RESUME

Cette étude présente une étude approfondie de la modélisation du comportement d'un panneau solaire photovoltaïque ISOFOTON I-50 PV. Deux approches de modélisation sont explorées : un modèle à diode unique et un modèle à double diode. L'identification précise des paramètres de ces modèles est essentielle pour la simulation, l'optimisation et la maintenance des systèmes photovoltaïques. Différentes méthodes d'identification des paramètres sont discutées, notamment l'utilisation de mesures expérimentales et de données fournies par le fabricant. Les performances des modèles sont évaluées en comparant les courbes I-V simulées aux courbes expérimentales.

L'identification des paramètres de chaque modèle nécessite la détermination préalable du vecteur de courant prédit. Deux catégories de méthodes de résolution sont employées :

Méthodes basées sur des mesures expérimentales: Elles exploitent les mesures réelles de courant et de tension enregistrées à partir du panneau solaire. Trois techniques sont utilisées pour résoudre l'équation du courant : Newton-Raphson, Lambert-W et les algorithmes génétiques.

Méthode basée sur les caractéristiques du panneau: Elle utilise les données spécifiques du panneau, telles que la puissance maximale, la tension nominale et le courant nominal. Les paramètres optimaux du modèle sont obtenus en résolvant un système d'équations non linéaires. Les performances des deux modèles (diode unique et double diode) sont évaluées et comparées. Les résultats de simulation révèlent que le modèle à double diode offre une précision supérieure dans tous les cas. Cependant, le modèle à seule diode présente une convergence de l'algorithme d'optimisation plus robuste en raison du nombre réduit de paramètres à optimiser.

---

## ملخص

نقدم في هذه المذكرة دراسة لنمذجة سلوك الواح الطاقة الشمسية الضوئية ISOFOTON I-50 PV- حيث نبين نهجين من النمذجة: نموذج الصمام الثنائي الاحادي ونموذج الصمام الثنائي المزدوج. يعد التحديد الدقيق لمعاملات هذه النماذج أمر ضروري لمحاكاة وتحسين وصيانة نظم الخلايا الكهروضوئية. وتناقش أساليب مختلفة لتحديد المعلمات, على وجه الخصوص استخدام القياسات التجريبية والبيانات المقدمة من قبل الشركة المصنعة. يتم تقييم أداء النماذج من خلال مقارنة منحنيات الجهد الحالي المحاكاة مع المنحنيات التجريبية. يتطلب تحديد معاملات كل نموذج التحديد الأولي للمتجه الحالي المتوقع. يتم استخدام فنتين من طرق الدقة : الأساليب القائمة على القياسات التجريبية: يستغلون القياسات الحقيقية من التيار والجهد المسجل من الألواح الشمسية. يتم استخدام ثلاث تقنيات لحل المعادلة الحالية : Newton-Raphson, Lambert-W ،Newton-Raphson و خوارزميات علم الوراثة تعتمد الطريقة على خصائص اللوحة : حيث تستخدم البيانات المحددة من اللوحة ، مثل الطاقة القصوى والجهد المقنن والتيار المقنن . ال يتم الحصول على المعلمات المثلى للنموذج عن طريق حل نظام المعادلات غير الخطية. يتم تقييم ومقارنة أداء النموذجين (الصمام الثنائي الاحادي والصمام الثنائي المزدوج). تكشف نتائج المحاكاة أن نموذج الصمام الثنائي المزدوج يوفر دقة فائقة في أي حال. ومع ذلك ، فإن نموذج الصمام الثنائي الواحد له تقارب في الخوارزمية تحسين أكثر قوة بسبب انخفاض عدد المعلمات المراد تحسينها.

---

**ABSTRACT:**

This document presents a study of the modeling of the behavior of an ISOFOTON I-50 PV photovoltaic solar panel. Two modeling approaches are explored: a single diode model and a double diode model. The precise identification of the parameters of these models is essential for the simulation, optimization and maintenance of photovoltaic systems. Various methods for identifying parameters are discussed, including the use of experimental measurements and data provided by the manufacturer. The performance of the models is evaluated by comparing the simulated I-V curves with the experimental curves. The identification of the parameters of each model requires the preliminary determination of the predicted current vector. Two categories of resolution methods are used : Methods based on experimental measurements: They exploit the real current and voltage measurements recorded from the solar panel. Three techniques are used to solve the current equation: Newton-Raphson, Lambert-W and genetic algorithms. Method based on the characteristics of the panel: It uses the specific data of the panel, such as the maximum power, the rated voltage and the rated current. The optimal parameters of the model are obtained by solving a system of nonlinear equations. The performances of the two models (single diode and double diode) are evaluated and compared. The simulation results reveal that the dual-diode model offers superior accuracy in all cases. However, the single-diode model has a convergence of the optimization algorithm that is more robust due to the reduced number of parameters to be optimized.

---

---

## TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

DEDICACE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1

### *CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE*

I.1. INTRODUCTION:..... 3

I.2. TYPES D'ENERGIES RENOUVELABLES: ..... 3

I.3. AVANTAGES DES ENERGIES RENOUVELABLES: ..... 3

I.4. DEFIS DES ENERGIES RENOUVELABLES: ..... 4

I.5. LES RAYONNEMENTS SOLAIRE : ..... 4

I.6. L'INTENSITE DU RAYONNEMENT SOLAIRE : ..... 5

I.7. LES PANNEAUX SOLAIRES : ..... 6

I.8. UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE : ..... 6

I.8.1. Fonctionnement des panneaux solaires: ..... 7

I.9. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ..... 7

*I.9.1. Structure d'une cellule photovoltaïque: ..... 7*

I.10. TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES: ..... 8

I.10.1. Efficacité d'une cellule photovoltaïque: ..... 8

I.10.2. Applications des cellules photovoltaïques: ..... 8

I.10.3. Avantages des cellules photovoltaïques:..... 9

I.11. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : ..... 9

I.12. TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES : ..... 10

*I.12.1. Cellules photovoltaïques en silicium cristallin:..... 11*

*I.12.2. Cellules photovoltaïques à couches minces: ..... 11*

*I.12.3. Cellules photovoltaïques organiques: ..... 11*

*I.12.4. Cellules photovoltaïques à pérovskite ..... 11*

I.13. LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES SOLAIRES (CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE) : ..... 12

---

---

I.13.1.	Les cellules monocristallines .....	12
I.13.2.	Les cellules poly cristalline:.....	12
I.13.3.	Les cellules amorphes :.....	13
I.14.	PARAMETRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	13
I.14.1.	Types de système PV : .....	13
I.14.2.	. <i>Systèmes PV raccordés au réseau</i> :.....	14
I.14.3.	<i>Systèmes PV autonomes(SPA)</i> : .....	14
I.14.4.	<i>Systèmes PV hybrides</i> .....	15
I.15.	REGROUPEMENT DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	15
a.	<i>Association en série</i> : .....	15
b.	<i>Association en parallèle</i> : .....	16
I.16.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE PV : [9] .....	16
I.16.1.	Avantages de l'énergie solaire:.....	16
I.16.2.	<i>Inconvénients de l'énergie solaire</i> :.....	17
I.17.	CONCLUSION :.....	18
II.1.	INTRODUCTION :.....	19
II.2.	PARAMETRES CLES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	19
II.2.1.	Sensibilité à la lumière :.....	20
II.2.2.	Durée de vie :.....	20
II.3.	FACTEURS INFLUENÇANT LES PARAMETRES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE:.....	20
II.4.	MODELISATION DE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE :.....	20
II.4.1.	Modèles empiriques pour la modélisation de panneaux photovoltaïques.....	21
II.4.2.	Modèles physiques pour la modélisation de panneaux photovoltaïques.....	21
II.4.3.	Modèles physiques couramment utilisés : .....	22
II.4.4.	Choix entre les deux approches :.....	22
II.5.	MODELISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	22
II.6.	MODELISATION DES CELLULES PV :.....	23
II.6.1.	Modélisation du générateur photovoltaïque d'une seule diode: .....	23
II.6.2.	<i>Relation I – V du modèle à une seule diode</i> : .....	24

---

---

II.6.3.	Modèle à deux diodes : .....	26
II.7.	MODELE MATHEMATIQUE AVEC CINQ PARAMETRES INCONNUS : .....	27
II.8.	CONCLUSION : .....	27
II.9.	METHODES D'ESTIMATION DES PARAMETRES D'UN MODULE PV .....	28
II.9.1.	Méthodes Analytiques.....	28
II.9.2.	Méthodes itératives .....	29
II.9.3.	Méthodes Evolutives (Intelligentes) .....	29
II.9.4.	Méthode analytique <i>Fonction de Lambert-W</i> : .....	31
II.9.5.	Méthode itérative de <i>Newton-Raphson</i> : .....	32
II.9.6.	Méthode évolutive Algorithme génétique <i>GA</i> : .....	33
II.10.	SIMULATION : .....	35
II.10.1.	Influence des différents paramètres sur les caractéristiques courant et puissance : .....	35
II.11.	SIMULATION MODEL PV DE <i>SEULE DIODE</i> A QUATRE PARAMETRES : .....	37
II.12.	CALCUL DES PARAMETRES DU MODELE A DOUBLE DIODES POUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES .....	40
II.13.	IDENTIFICATION UTILISANT LA RESOLUTION D'UN SYSTEME D'EQUATIONS NON LINEAIRES.....	40
II.14.	LES PARAMETRES OPTIMAUX DES DEUX MODELES PV: .....	41
II.15.	SIMULATION DE MODELE ET LA RECHERCHE DES PARAMETRES PV : .....	41
II.16.	CONCLUSION .....	43

---

---

## LISTE DE FIGURES

<b>FIGURE I.1:</b> Spectre du rayonnement solaire	<b>05</b>
<b>FIGURE I.2:</b> Types de rayonnements solaires reçus au sol.	06
<b>FIGURE I.3:</b> Fonctionnement des panneaux solaires	07
<b>FIGURE I.4:</b> Structure d'une cellule photovoltaïque	08
<b>FIGURE I.5:</b> Absorption de la lumière solaire dans une cellule photovoltaïque	09
<b>FIGURE I.6 :</b> Mouvement des charges dans une cellule photovoltaïque	10
<b>FIGURE I.7:</b> Génération d'un courant électrique dans une cellule photovoltaïque.	10
<b>FIGURE I.8:</b> Cellule photovoltaïque monocristalline	12
<b>FIGURE I.9:</b> Cellule photovoltaïque poly-cristalline	13
<b>FIGURE I.10:</b> Cellule photovoltaïque amorphe.	13
<b>FIGURE I.11:</b> Systèmes PV raccordés au réseau.	14
<b>FIGURE I.12:</b> Systèmes PV autonomes	14
<b>FIGURE I.13:</b> Association en série de cellules photovoltaïques	16
<b>FIGURE I.14:</b> Association en parallèle de cellules photovoltaïques	16
<b>FIGURE II.1:</b> Une cellule Photovoltaïque : dont (a) : est sa structure Physique et (b) : son modèle de circuit équivalent	23
<b>FIGURE II.2:</b> Schéma du modèle à une seule diode.	24
<b>FIGURE II.3:</b> Modèle à 4 paramètres	25
<b>FIGURE II.4</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin-modèle 2-DRs	26
<b>FIGURE II.5:</b> Modèle à Cinq paramètres	27
<b>FIGURE III .1</b> Classification des différentes méthodes d'extraction des paramètres d'un module PV	28
<b>FIGURE III .2 :</b> Modèle de la cellule photovoltaïque réelle	31
<b>FIGURE III .3 :</b> <i>Caractéristique <math>I = f(V)</math> en fonction de l'éclairement</i>	36
<b>FIGURE III .4 :</b> <i>Caractéristique <math>P = f(V)</math> en fonction de l'éclairement</i>	36
<b>FIGURE III .5 :</b> <i>Caractéristique <math>P = f(V)</math> en fonction de la température</i>	37
<b>FIGURE III .6 :</b> <i>Caractéristique <math>I = f(V)</math> en fonction de la température</i>	37
<b>FIGURE III.7</b> Comparaison des $I(V)$ réel et $I(V)$ prédit	38
<b>FIGURE III.8.</b> Comparaison des courants réel et calculé	38
<b>FIGURE III.9 :</b> Comparaison des puissances réelle et calculée	39
<b>FIGURE III.10:</b> Comparaison des $P(V)$ réelle et $P(V)$ calculée	39
<b>FIGURE III .11 :</b> Modèle PV à deux diodes[19]	41
<b>FIGURE III.12 :</b> Erreur de simulation modèle à deux diodes	42
<b>FIGURE III .13.</b> Comparaison des deux courants réel et prédit.	42
<b>FIGURE III .14</b> Comparaison des puissances du pv.	43
<b>FIGURE III .15 :</b> Caractéristique $I - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diodes comportant cinq paramètres inconnus	43
<b>FIGURE III .16 .:</b> Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle	43

---

---

<b>TABLEAU III-1.</b> <i>Caractéristiques électriques typiques du panneau PV</i>	35
<b>TABLEAU III.2.</b> Les quatre paramètres d'un Modèle PV	38
<b>Tableau III .3.:</b> les résultats d'une seule diode	31
<b>Tableau III .4 :</b> les résultats d'une deux diodes	45

---

### Introduction générale :

Ces dernières années la consommation mondiale d'électricité est un enjeu crucial, étant donné sa forte corrélation avec le développement industriel, des transports et des communications. Vous avez également soulevé des points importants concernant les ressources non renouvelables et les avantages des énergies renouvelables telles que l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie éolienne, la biomasse et le photovoltaïque. Il est effectivement nécessaire d'optimiser les systèmes de conversion en électricité pour les énergies renouvelables, de manière à réduire les coûts, tout en améliorant la fiabilité et le rendement. Les progrès dans ce domaine sont essentiels pour favoriser une transition effective vers ces sources d'énergie plus durables.

Il est encourageant de constater que le photovoltaïque offre une alternative attrayante aux sources traditionnelles en raison de ses nombreux avantages, y compris la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, la minimisation de l'impact environnemental de la fabrication de ces systèmes est une préoccupation légitime dans la transition vers des énergies plus durables.

Les énergies renouvelables jouent un rôle dans la transition vers un futur plus durable et respectueux de l'environnement. Les avancées dans des domaines tels que l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque sont essentielles pour réduire notre dépendance aux énergies fossiles et limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Il est vrai que les énergies renouvelables ont fait des progrès significatifs ces dernières années, devenant de plus en plus compétitives en termes de coût et de performance par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Cependant, il est également important de continuer à améliorer les systèmes de conversion de l'énergie en électricité pour garantir une efficacité et une fiabilité optimales.

L'énergie photovoltaïque, en particulier, présente de nombreux avantages en tant que source d'énergie propre et renouvelable. Elle peut être utilisée à différentes échelles, de petites installations domestiques (*panneaux solaires*) à de grandes centrales solaires, offrant ainsi une flexibilité d'application. Malgré ses avantages, des défis subsistent en termes de coût, d'efficacité et de fiabilité, ce qui peut encore freiner son adoption à grande échelle.

Il est important de continuer à investir dans la recherche et le développement des énergies renouvelables pour surmonter ces obstacles et permettre une transition plus rapide vers un mix énergétique durable et diversifié.

Effectivement, l'intégration des générateurs photovoltaïques au réseau électrique nécessite des interfaces électroniques de puissance et des stratégies de contrôle spécifiques pour optimiser leur performance et garantir une alimentation stable et de qualité.

De plus, ces générateurs d'énergies photovoltaïques nécessitent de nouvelles interfaces électroniques de puissance et des stratégies de contrôle pour améliorer l'efficacité et la qualité.

Ce mémoire se concentre sur la modélisation et la simulation non linéaire de systèmes solaires photovoltaïques. Il est divisé en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente une introduction aux principes fondamentaux du photovoltaïque. Il aborde les concepts clés tels que :

- ✓ L'effet photovoltaïque et la conversion du rayonnement solaire en électricité
- ✓ Les différents types de cellules photovoltaïques, y compris les cellules en silicium cristallin, polycristallin et amorphe
- ✓ Les caractéristiques électriques des cellules PV, telles que la tension à circuit ouvert, le courant de court-circuit et la puissance maximale
- ✓ Les facteurs qui affectent les performances des cellules PV, tels que l'ensoleillement, la température et le vieillissement

Le deuxième chapitre présente les différents modèles utilisés pour simuler le comportement électrique des panneaux PV. Les modèles couramment utilisés incluent :

- ✓ Le modèle équivalent à circuit
- ✓ Le modèle à une diode
- ✓ Le modèle à deux diodes

Chaque modèle a ses propres avantages et inconvénients, et le choix du modèle approprié dépend de l'application et du niveau de précision requis.

Le troisième chapitre présente les résultats de la modélisation d'un panneau PV spécifique. Les résultats typiques incluent :

- ✓ Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau PV sous différentes conditions d'irradiations et de température.
- ✓ L'effet de la température sur les performances du panneau PV
- ✓ Une comparaison des performances de différents modèles de simulation

La stratégie de contrôle utilisant l'algorithme GA et *Newton Raphson* pour le modèle d'une diode de quatre paramètres et le modèle à deux diodes de cinq paramètres. Cet algorithme est utilisé pour les mesures réelles de  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  et comparé aux mesures  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  à choisir la moindre erreur.

## **CHAPITRE I :**

# **GNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAIQUE**



### I.1. Introduction:

Les énergies renouvelables, souvent désignées par l'acronyme EnR, regroupent les sources d'énergie dont le renouvellement est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. Contrairement aux énergies fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, qui s'épuisent sur des millions d'années, les EnR se renouvellent naturellement à un rythme plus rapide que leur consommation.

Ces sources d'énergie sont souvent appelées "vertes" ou "propres" car elles produisent peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et de polluants atmosphériques, contrairement aux combustibles fossiles qui contribuent au changement climatique et à la pollution de l'air.

Dans ce chapitre, nous présenterons le principe de la conversion photoélectrique et nous allons donner une description de la cellule photoélectrique, ses performances et aussi ses types, ainsi qu'un modèle de la cellule. [1]

### I.2. Types d'énergies renouvelables:

On distingue généralement cinq grandes catégories d'énergies renouvelables [2]:

- A. **L'énergie solaire:** Exploite l'énergie du soleil sous forme de chaleur et de lumière. On distingue l'énergie solaire photovoltaïque (conversion directe du rayonnement solaire en électricité) et l'énergie solaire thermique (production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage).
- B. **L'énergie éolienne:** Utilise la force du vent pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité.
- C. **L'énergie hydraulique:** Tire parti de la force de l'eau en mouvement (chutes d'eau, rivières, courants marins) pour produire de l'électricité.
- D. **La biomasse:** Convertit la matière organique (bois, cultures énergétiques, déchets agricoles, etc.) en énergie sous forme de chaleur, d'électricité ou de biocarburants.
- E. **La géothermie:** Exploite la chaleur interne de la Terre pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

### I.3. Avantages des énergies renouvelables:

- **Durabilité:** Elles contribuent à réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique.
- **Propre:** Elles ne produisent pas de polluants atmosphériques nocifs pour la santé humaine et l'environnement.

- **Sûreté énergétique:** Elles permettent une production d'énergie plus locale et décentralisée, ce qui renforce la sécurité d'approvisionnement.
- **Création d'emplois:** Le secteur des énergies renouvelables est en plein essor et crée de nombreux emplois dans la fabrication, l'installation et la maintenance.
- **Développement durable:** Elles favorisent un développement économique et social plus durable en préservant les ressources naturelles pour les générations futures [2].

#### I.4. Défis des énergies renouvelables:

- **Intermittence:** Certaines sources renouvelables, comme l'énergie solaire et éolienne, sont intermittentes, ce qui signifie que leur production varie en fonction des conditions météorologiques. Cela nécessite des solutions de stockage d'énergie pour garantir un approvisionnement en électricité fiable.
- **Coût initial:** Les technologies renouvelables peuvent avoir un coût initial plus élevé que les centrales électriques traditionnelles, bien que les prix aient tendance à baisser avec le temps.
- **Impact sur l'environnement:** L'installation de certaines infrastructures d'énergies renouvelables peut avoir un impact sur l'environnement local, notamment sur la faune et la flore. Il est important de minimiser ces impacts en adoptant des pratiques durables.
- **Besoin d'un réseau intelligent:** L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique nécessite un réseau intelligent capable de gérer les flux d'énergie intermittents et de garantir la stabilité du système [2].

#### I.5. Les Rayonnements solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible.

*Le spectre solaire* se répartit approximativement comme suit :

- 5 % d'ultraviolets (UV)
- 3 % de lumière visible
- 52 % d'infrarouge

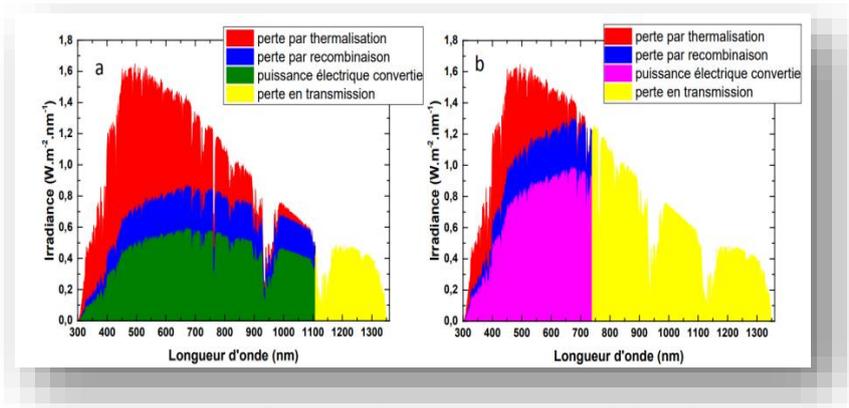


FIGURE I.1: Spectre du rayonnement solaire [3].

## I.6. L'intensité du rayonnement solaire :

Est variable en fonction de plusieurs facteurs :

- **La distance entre la Terre et le Soleil:** Plus la Terre est proche du Soleil, plus l'intensité du rayonnement est élevée.
  - **L'angle du soleil:** L'intensité du rayonnement est plus forte lorsque le soleil est haut dans le ciel.
  - **La couverture nuageuse:** Les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire, ce qui diminue son intensité.
  - **La composition de l'atmosphère:** L'atmosphère terrestre absorbe une partie du rayonnement solaire, en particulier les rayons ultraviolets nocifs.
- Le rayonnement solaire joue un rôle essentiel dans de nombreux processus naturels, tels que :
- **La photosynthèse:** Processus par lequel les plantes captent l'énergie du soleil pour produire de la nourriture.
    - *Le cycle de l'eau:* Le soleil chauffe l'eau des océans et des rivières, ce qui entraîne son évaporation, la formation de nuages et les précipitations.
    - *Le climat:* Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie pour le système climatique terrestre.

L'homme exploite également le rayonnement solaire pour produire de l'énergie

- **Énergie solaire photovoltaïque:** Conversion de la lumière du soleil en électricité.
- **Énergie solaire thermique:** Utilisation de la chaleur du soleil pour chauffer l'eau ou des bâtiments.

Le rayonnement solaire peut être classé en plusieurs catégories, notamment le **rayonnement direct**, le **rayonnement global**, le **rayonnement diffus** et le **rayonnement réfléchi**.

Le rayonnement direct fait référence à la quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre sans être diffusé ou réfléchi. Le rayonnement global, quant à lui, englobe à la fois le rayonnement direct et le rayonnement diffus, qui est celui qui a été dispersé dans l'atmosphère avant d'atteindre la surface terrestre.

Enfin le rayonnement réfléchi qui est renvoyé par des surfaces réfléchissantes comme la neige ou l'eau. Ces différents types de rayonnement solaire jouent un rôle crucial dans de nombreux processus naturels et sont étudiés de près pour mieux comprendre leur impact sur notre environnement.

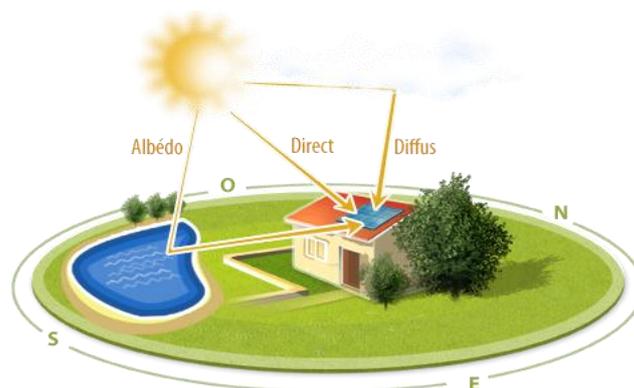


FIGURE I.2: Types de rayonnements solaires reçus au sol.

### I.7. Les panneaux solaires :

*L'énergie solaire photovoltaïque* est un procédé innovant de conversion de la lumière du soleil en électricité à l'aide de *panneaux solaires*. Cette technologie durable et respectueuse de l'environnement repose sur l'utilisation de *cellules photovoltaïques* qui captent la lumière du soleil et la transforment directement en électricité. Les panneaux solaires sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles, formant ainsi un système capable de produire de l'électricité de manière continue. Cette énergie renouvelable présente de nombreux avantages, tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la diminution de la dépendance aux combustibles fossiles. Grâce à son potentiel de production d'électricité propre et durable, l'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle essentiel dans la transition vers une économie plus verte et plus durable. [4]

### I.8. Un générateur photovoltaïque :

Les panneaux solaires, également appelés modules photovoltaïques, sont des dispositifs qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Ils sont constitués de cellules photovoltaïques, qui sont des semi-conducteurs (généralement du silicium) qui produisent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

### I.8.1. Fonctionnement des panneaux solaires:

**Absorption de la lumière du soleil :** Lorsque la lumière du soleil atteint un panneau solaire, elle est absorbée par les cellules photovoltaïques.

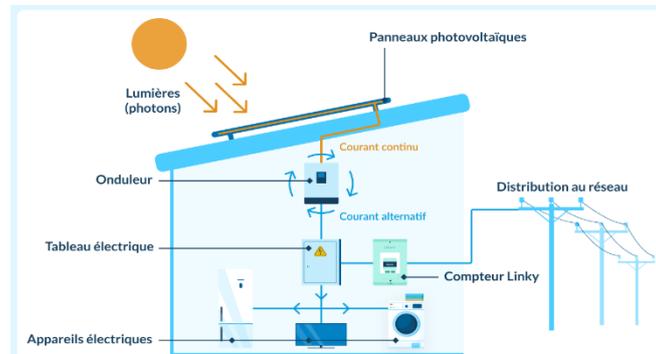


FIGURE I.3: Fonctionnement des panneaux solaires

**Production d'électrons :** L'énergie de la lumière du soleil provoque la libération d'électrons dans les cellules photovoltaïques.

**Création d'un courant électrique :** Le mouvement de ces électrons libres crée un courant électrique continu (CC).

## I.9. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est un composant électronique qui convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce phénomène physique se produit lorsque des photons, les particules constituant la lumière, frappent un matériau semi-conducteur et libèrent des électrons. Le mouvement de ces électrons libres génère un courant électrique.

### I.9.1. Structure d'une cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est généralement composée de plusieurs couches :

- ✓ *Couche de surface antireflet:* Réduit la de lumière réfléchiée par la cellule.
- ✓ *Couche de contact supérieure:* Permet de collecter les électrons produits.
- ✓ *Couche de semi-conducteur* (généralement du silicium): C'est le cœur de la cellule où se produit l'effet photovoltaïque.
- ✓ *Couche de jonction p-n:* Crée un champ électrique qui favorise le mouvement des électrons.
- ✓ *Couche de contact inférieure:* Permet de collecter les trous (électrons manquants) et de les diriger vers le circuit externe.

- ✓ *Substrat de support*: Assure la rigidité et la protection de la cellule.

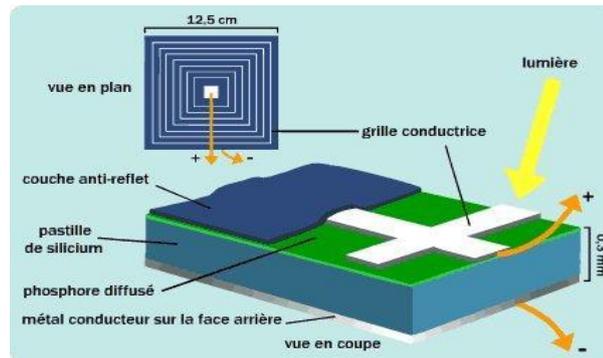


FIGURE I.4: Structure d'une cellule photovoltaïque

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V pour un courant nul (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ). [5]

### I.10. Types de cellules photovoltaïques:

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont fabriquées à partir de silicium, mais d'autres matériaux semi-conducteurs sont également utilisés, tels que le sélénure de cuivre-indium ( $CuIn(Se)_2$ ) ou le tellure de cadmium ( $CdTe$ ).

#### I.10.1. Efficacité d'une cellule photovoltaïque:

L'efficacité d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance lumineuse reçue. Elle est généralement comprise entre 15 et 25 % pour les cellules en silicium cristallin.

#### I.10.2. Applications des cellules photovoltaïques:

Les cellules photovoltaïques sont utilisées dans une large gamme d'applications, notamment

- *Production d'électricité à grande échelle* : Les centrales solaires photovoltaïques utilisent des millions de cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité qui est ensuite injectée dans le réseau électrique.
- *Production d'électricité pour les particuliers et les entreprises* : Les panneaux solaires photovoltaïques installés sur les toits des maisons ou des bâtiments permettent aux particuliers et aux entreprises de produire leur propre électricité.

- *Produits solaires portables* : Des cellules photovoltaïques sont intégrées dans des calculatrices, des montres et des chargeurs de téléphone portables pour les alimenter en énergie solaire.
- *Satellites et véhicules spatiaux* : Les cellules photovoltaïques fournissent l'énergie électrique nécessaire aux satellites et aux véhicules spatiaux.

### I.10.3. Avantages des cellules photovoltaïques:

*Énergie renouvelable et durable* : Les cellules photovoltaïques exploitent une source d'énergie inépuisable et propre, le soleil.

*Réduction des émissions de gaz à effet de serre* : L'énergie solaire ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui contribue à lutter contre le changement climatique.

*Modules de plus en plus fins et légers*: Facilite l'intégration sur des toits ou des structures fines.

*Coût en baisse constante* : Les prix des cellules photovoltaïques ont considérablement baissé ces dernières années, les rendant plus accessibles.

### I.11. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est un composant essentiel des panneaux solaires qui convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce phénomène physique se produit en plusieurs étapes clés :

- *Absorption de la lumière solaire*:

Lorsque la lumière du soleil atteint la surface de la cellule photovoltaïque, les photons (particules de lumière) sont absorbés par le matériau semi-conducteur, généralement du silicium.

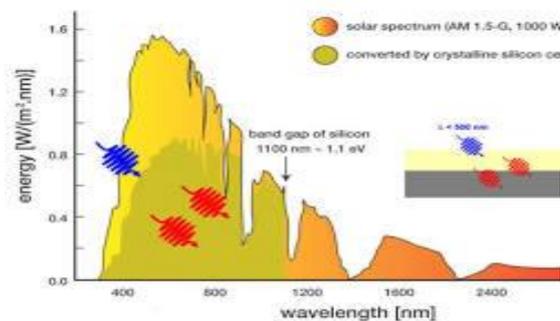


FIGURE I.5: Absorption de la lumière solaire dans une cellule photovoltaïque

- *Création de paires électron-trou*:

Ce processus crée des électrons libres dans la bande de conduction et laisse des trous (l'absence d'électrons) dans la bande de valence. Ces paires électron-trou constituent les porteurs de charge électrique.

▪ *Mouvement des charges sous champ électrique:*

La structure de la cellule photovoltaïque, avec sa jonction p-n, crée un champ électrique interne qui attire les électrons libres vers la couche de contact supérieure et les trous vers la couche de contact inférieure.

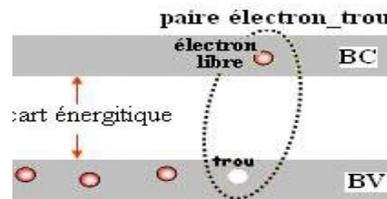


FIGURE I.6 : Mouvement des charges dans une cellule photovoltaïque

▪ *Génération d'un courant électrique:*

Le mouvement dirigé des électrons et des trous vers leurs contacts respectifs génère un courant électrique continu (CC) dans un circuit externe.

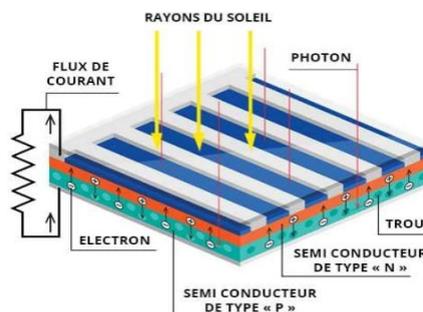


FIGURE I.7: Génération d'un courant électrique dans une cellule photovoltaïque.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V pour un courant nul (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ). [5]

**I.12. Technologies des cellules photovoltaïques :**

Il existe différentes technologies de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules.

### *I.12.1. Cellules photovoltaïques en silicium cristallin:*

**Technologie la plus mature et la plus répandue:** Utilisant des cristaux de silicium de haute pureté, ces cellules offrent une efficacité comprise entre 15 et 25%.

#### **Types**

- **Monocristallin:** Efficacité la plus élevée, mais coût plus important.
- **Polycristallin:** Moins cher que le monocristallin, mais efficacité légèrement inférieure.

**Avantages:** Fiabilité éprouvée, production d'énergie stable, large disponibilité.

**Inconvénients:** Coût plus élevé que d'autres technologies, rigidité limitant l'intégration sur certains supports.

### *I.12.2. Cellules photovoltaïques à couches minces:*

- **Technologie prometteuse avec un fort potentiel de réduction des coûts:** Utilisant des couches minces de matériaux semi-conducteurs sur un substrat flexible, ces cellules offrent une efficacité de 5 à 15%.
- **Types:**
  - **Amorphe:** Moins chère à produire, mais efficace la plus basse du groupe.
  - **Cuivre-indium-gallium-séléniure (CIGS):** Efficacité élevée et flexibilité.
  - **Tellure de cadmium ( CdTe ):** Efficacité élevée, mais questions environnementales liées au cadmium.
- **Avantages:** Légèreté, flexibilité, fabrication à basse température, potentiel de production à grande échelle.
- **Inconvénients:** Efficacité généralement inférieure aux cellules en silicium cristallin, durée de vie à long terme moins bien établie pour certaines technologies.

### *I.12.3. Cellules photovoltaïques organiques:*

- **Technologie émergente basée sur des matériaux organiques:** Cellules légères, flexibles et potentiellement moins chères à produire, avec une efficacité de 1 à 5%.
- **Avantages:** flexibilité, transparence potentielle, faible consommation d'énergie grise pour la fabrication.
- **Inconvénients:** efficacité encore faible, stabilité et durabilité à long terme à démontrer, production à grande échelle non encore optimisée.

### *I.12.4. Cellules photovoltaïques à pérovskite*

- **Technologie récente avec un fort potentiel d'innovation:** Cellules prometteuses avec des efficacités atteignant 25%, pouvant surpasser le silicium cristallin.
- **Avantages:** Potentiel d'efficacité élevé, faible coût de fabrication envisageable, flexibilité possible.
- **Inconvénients:** Technologie jeune avec des défis de stabilité et durabilité à relever, fabrication à grande échelle encore à développer.

### I.13. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules.

#### I.13.1. Les cellules monocristallines

- Cellule solaire de première génération.
- L'obtention de cristaux purs nécessite beaucoup d'énergie.
- Méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très coûteuse.
- Le taux de rendement de la lumière directe du soleil (12-16%) (23% en laboratoire).

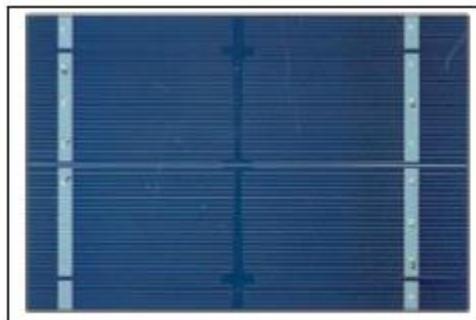


FIGURE I.8: Cellule photovoltaïque monocristalline

#### I.13.2. Les cellules poly cristalline:

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important.

- Le rendement est de 11-13% (18% en laboratoire).
- Processus nécessitant moins d'énergie.
- Constituer un petit silicium monocristallin, ce qui peut réduire le coût de fabrication.



**FIGURE I.9:** Cellule photovoltaïque poly-cristalline

### **I.13.3. Les cellules amorphes :**

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [6]



**FIGURE I.10:** Cellule photovoltaïque amorphe.

## **I.14. Paramètres de la cellule photovoltaïque**

### **I.14.1. Types de système PV :**

Les systèmes photovoltaïques se déclinent en plusieurs configurations, chacune adaptée à des besoins et des situations spécifiques. Voici les trois principaux types de systèmes PV:

**I.14.2.. Systèmes PV raccordés au réseau:**

Ces systèmes sont connectés au réseau électrique public. Ils produisent de l'électricité solaire qui est injectée dans le réseau lorsque la production dépasse la consommation du foyer. L'excédent d'électricité peut être compensé par un crédit d'énergie auprès du fournisseur d'électricité, ou vendu directement au réseau selon les réglementations locales

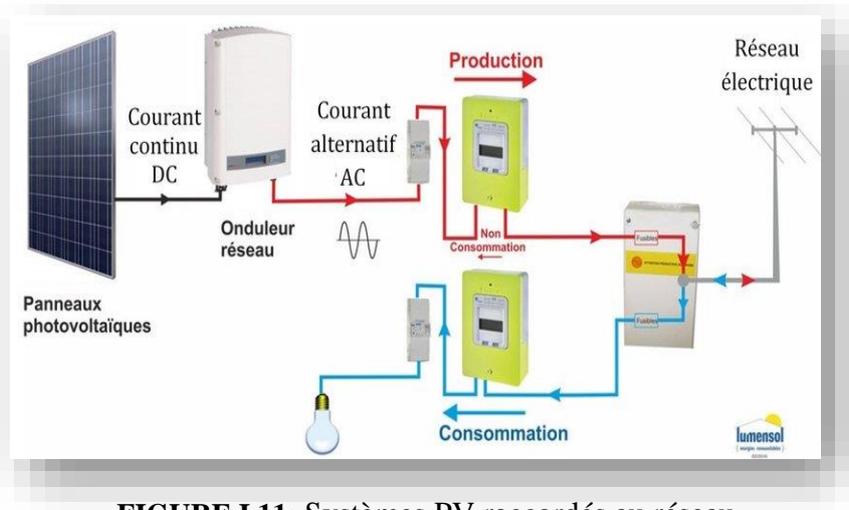


FIGURE I.11: Systèmes PV raccordés au réseau.

**I.14.3. Systèmes PV autonomes (SPA):**

Les systèmes photovoltaïques autonomes (SPA), également appelés systèmes hors réseau, sont des systèmes de production d'électricité solaire qui ne sont pas connectés au réseau électrique public. Ils sont généralement utilisés dans des zones isolées ou éloignées du réseau, où le raccordement au réseau est impossible ou trop onéreux.

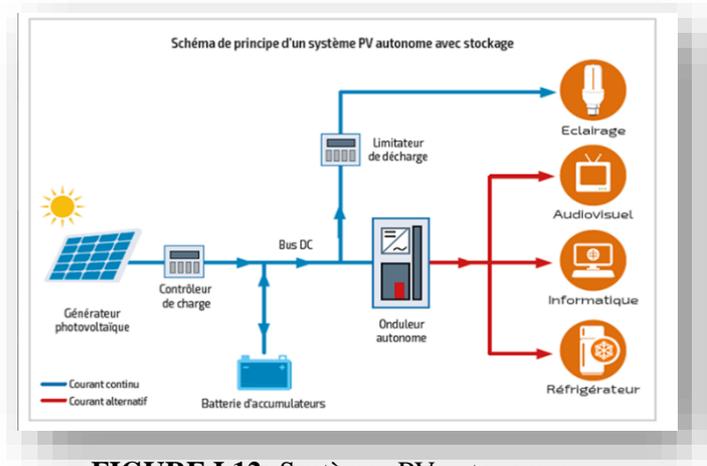


FIGURE I.12: Systèmes PV autonomes

*Principe de fonctionnement d'un SPA:*

- **Production d'électricité:** Des panneaux solaires photovoltaïques convertissent l'énergie du soleil en électricité continue (CC).
- **Stockage d'énergie:** Un accumulateur, généralement une batterie, stocke l'électricité produite pendant la journée pour la rendre disponible la nuit ou en cas de faible ensoleillement.
- **Distribution d'énergie:** Un onduleur convertit l'électricité continue stockée dans la batterie en courant alternatif (CA), compatible avec la plupart des appareils électriques.

#### ***I.14.4. Systèmes PV hybrides***

Ces systèmes combinent les avantages des systèmes raccordés au réseau et autonomes. Ils sont connectés au réseau électrique, mais disposent également d'un système de stockage par batterie pour une certaine autonomie

### **I.15. Regroupement des cellules photovoltaïques**

Le regroupement des cellules photovoltaïques est une étape cruciale dans la fabrication de modules et de panneaux solaires photovoltaïques. Il permet d'augmenter la tension et le courant produits par les cellules individuelles, afin d'obtenir une puissance électrique utilisable pour alimenter divers appareils ou pour l'injection dans le réseau électrique.

Deux méthodes principales sont utilisées pour le regroupement des cellules photovoltaïques

#### **a. Association en série:**

- **Principe:** Les cellules sont connectées les unes à la suite des autres, de sorte que le courant circule à travers toutes les cellules en série.
- **Effets:**
  - **Tension augmentée:** La tension totale à la sortie du groupement est égale à la somme des tensions individuelles de chaque cellule.
  - **Courant inchangé:** Le courant électrique reste identique à celui d'une cellule individuelle.
- **Application:** Cette configuration est utilisée pour augmenter la tension produite par les cellules, ce qui est particulièrement utile pour les applications nécessitant des tensions élevées, comme l'alimentation de certains appareils électroniques.

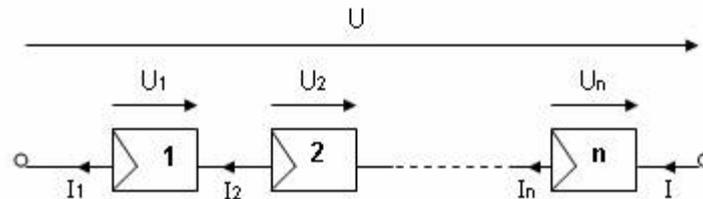


FIGURE I.13: Association en série de cellules photovoltaïques

**b. Association en parallèle:**

**Principe:** Les cellules sont connectées les unes aux autres de manière à ce que leurs bornes positives soient reliées entre elles et leurs bornes négatives entre elles.

**Effets:**

- **Tension inchangée:** La tension totale à la sortie du groupement reste la même que celle d'une cellule individuelle.
- **Courant augmenté:** Le courant électrique total est la somme des courants individuels de chaque cellule.

**Application:** Cette configuration est utilisée pour augmenter le courant produit par les cellules, ce qui est particulièrement utile pour les applications nécessitant des courants élevés, comme l'alimentation de moteurs électriques ou l'injection dans le réseau électrique.

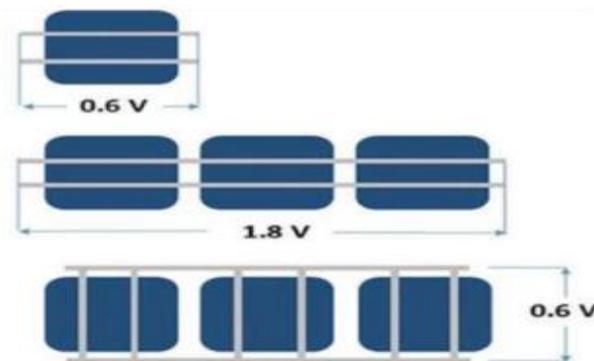


FIGURE I.14: Association en parallèle de cellules photovoltaïques

**I.16. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire PV : [9]**

**I.16.1. Avantages de l'énergie solaire:**

- ✚ **Énergie renouvelable et durable:**
  - Le soleil est une source d'énergie inépuisable à l'échelle humaine, contrairement aux combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel dont les réserves sont limitées.

- L'exploitation de l'énergie solaire ne produit ni émissions de gaz à effet de serre ni polluants atmosphériques, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la protection de l'environnement.

**+ Diversification du mix énergétique:**

- L'énergie solaire permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de diversifier les sources d'approvisionnement énergétique.
- Cela renforce la sécurité énergétique des pays et des régions en réduisant les importations d'énergie et en augmentant l'autonomie énergétique.

**+ Avantages économiques:**

- La production d'énergie solaire crée des emplois dans les secteurs de la fabrication, de l'installation, de la maintenance et de la gestion des projets solaires.
- L'autoproduction d'électricité solaire permet aux particuliers et aux entreprises de réduire, voire de supprimer, leurs factures d'énergie.
- Les investissements dans l'énergie solaire peuvent générer des économies importantes sur le long terme.

**+ Avantages sociaux et environnementaux:**

- L'accès à l'énergie solaire peut améliorer la qualité de vie des populations dans les zones rurales isolées et non raccordées au réseau électrique.
- L'énergie solaire contribue à la réduction de la pollution atmosphérique et des émissions de gaz à effet de serre, améliorant ainsi la santé publique et l'environnement.

**+ Applications diverses:**

- L'énergie solaire peut être utilisée pour une large gamme d'applications, y compris la production d'électricité pour les maisons, les entreprises, les industries et l'agriculture.
- Elle peut également être utilisée pour le chauffage de l'eau, le pompage d'eau, l'éclairage et d'autres applications hors réseau.

### *1.16.2. Inconvénients de l'énergie solaire:*

**+ Coût initial:**

- L'investissement initial pour installer un système solaire photovoltaïque peut être élevé, bien que les prix aient considérablement baissé ces dernières années.
- Le coût peut constituer un frein à l'adoption de l'énergie solaire pour certains particuliers et entreprises.

**+ Intermittence de la production:**

- La production d'énergie solaire dépend de la présence du soleil, ce qui signifie qu'elle est intermittente et varie en fonction des conditions météorologiques et de l'heure de la journée.
- Des solutions de stockage d'énergie et des réseaux électriques intelligents sont nécessaires pour pallier cette intermittence et garantir une alimentation fiable.

 **Surface nécessaire:**

- L'installation de panneaux solaires nécessite une surface adéquate, généralement sur les toitures ou les terrains.
- Cela peut poser des contraintes pour certains particuliers ou entreprises disposant d'un espace limité.

 **Impact environnemental potentiel:**

- L'installation de panneaux solaires peut avoir un impact sur l'environnement naturel et le paysage, notamment en zones sensibles.
- Il est important de minimiser ces impacts en adoptant des pratiques d'installation durables et en choisissant des sites adaptés.

 **Recyclage des panneaux solaires:**

- La fin de vie des panneaux solaires pose des questions de recyclage et de gestion des déchets électroniques.
- Des solutions de recyclage efficaces et durables doivent être développées pour minimiser l'impact environnemental des panneaux solaires en fin de vie.

### **I.17. Conclusion :**

En conclusion, le chapitre I offrira une analyse approfondie de l'énergie solaire photovoltaïque, mettant en lumière ses principes fondamentaux, ses technologies innovantes, ses applications diversifiées et ses perspectives prometteuses. L'objectif est de fournir une compréhension claire et complète de cette source d'énergie renouvelable qui s'impose comme un élément crucial dans la construction d'un avenir énergétique durable.

# C

## HAPITRE II :

# M

## ODÉLISATION D'UN GNÉRATEUR

# P

## HOTOVOLTAIQUE

## II.1. Introduction :

Le système photovoltaïque se compose d'un générateur électrique et de plusieurs composants électriques qui adaptent l'énergie électrique produite aux dispositifs récepteurs. Dans ce chapitre, nous modéliserons une cellule photoélectrique par un modèle d'une diode et deux diodes. Ce modèle doit être modélisé de telle façon que tous les paramètres soient facilement calculés et en évitant le plus possible des équations complexes.

## II.2. Paramètres clés d'une cellule photovoltaïque :

### ❖ *Tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ):*

C'est la tension maximale générée par la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge (circuit ouvert).

Elle dépend des caractéristiques de la jonction p-n de la cellule et des conditions d'éclairage.

### ❖ *Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ):*

C'est le courant maximal produit par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée (ses bornes sont reliées entre elles).

Il dépend de l'intensité lumineuse et des propriétés du matériau semi-conducteur.

### ❖ *Puissance maximale ( $P_m$ ):*

C'est la puissance électrique maximale que la cellule peut fournir sous des conditions d'éclairage et de charge spécifiques (généralement *STC* - Standard Test Conditions).

Elle est généralement exprimée en watts (W) et dépend de l'efficacité de conversion de la cellule.

### ❖ *Rendement de conversion ( $\eta$ ):*

- C'est le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance lumineuse incidente reçue.
- Il s'exprime en pourcentage (%) et représente l'efficacité de la cellule à convertir l'énergie solaire en électricité.

### ❖ *Facteur de remplissage (ou facteur de forme - fill factor (FF) en anglais) (FF):*

- C'est un indicateur de la forme de la courbe I-V (courant-tension) de la cellule.
- Il représente le rapport entre la puissance maximale réelle et la puissance maximale théorique que la cellule pourrait délivrer si sa courbe I-V était rectangulaire.

### ❖ *Température de fonctionnement:*

- La performance des cellules photovoltaïques est affectée par la température. L'efficacité de conversion diminue généralement avec l'augmentation de la température.

Les températures élevées peuvent également raccourcir la durée de vie des cellules.

### **II.2.1. Sensibilité à la lumière :**

La quantité d'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'intensité lumineuse.

La sensibilité à la lumière est généralement mesurée en courant de court-circuit par unité d'irradiance ( $mA/cm^2$ ).

### **II.2.2. Durée de vie :**

La durée de vie d'une cellule photovoltaïque est le temps pendant lequel elle peut conserver une performance acceptable. Elle est généralement exprimée en années et dépend de la qualité des matériaux, de la technologie de fabrication et des conditions d'utilisation.

En plus de ces paramètres clés, d'autres caractéristiques peuvent être importantes pour certaines applications, telles que la résistance à la radiation, la résistance à la corrosion et la tolérance à l'ombre. Il est important de noter que les valeurs de ces paramètres peuvent varier en fonction du type de cellule photovoltaïque, des conditions d'éclairage et de la température.

### **II.3. Facteurs influençant les paramètres d'une cellule photovoltaïque:**

**Type de matériau semi-conducteur:** Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus courant, mais d'autres matériaux comme le GaAs ou le SiGe peuvent être utilisés [9].

**Technologie de fabrication:** La technologie de fabrication affecte la qualité des matériaux et la structure de la cellule, influençant ainsi ses performances.

**Conditions d'éclairage:** L'intensité et le spectre de la lumière solaire affectent la quantité d'énergie absorbée par la cellule et donc sa production d'électricité.

**Température:** La température ambiante affecte l'efficacité de conversion de la cellule et sa durée de vie.

**Vieillessement:** Les cellules photovoltaïques peuvent se dégrader avec le temps, ce qui diminue leur performance.

### **II.4. Modélisation de panneau photovoltaïque :**

La modélisation de panneaux photovoltaïques est un élément crucial pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes d'énergie solaire. Elle permet de prédire le comportement électrique du panneau en fonction de divers facteurs tels que l'ensoleillement, la température et la charge connectée. [7]

Deux approches principales existent pour la modélisation de panneaux photovoltaïques :

### II.4.1. Modèles empiriques pour la modélisation de panneaux photovoltaïques

Les modèles empiriques pour la modélisation de panneaux photovoltaïques sont basés sur des données expérimentales et des ajustements mathématiques. Ils ne nécessitent pas une compréhension approfondie des mécanismes physiques sous-jacents du fonctionnement des cellules photovoltaïques, ce qui les rend plus simples à implémenter et à utiliser.

#### A. *Modèle de puissance maximale (Pm):*

Ce modèle est l'un des plus simples et utilise trois paramètres clés pour estimer la puissance maximale ( $P_m$ ) du panneau photovoltaïque :

- **Tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ):** Tension maximale générée par la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge.
- **Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ):** Courant maximal produit par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée.
- **Facteur de remplissage ( $FF$ ):** Indicateur de la forme de la courbe I-V (courant-tension) de la cellule.

La puissance maximale est calculée par :

$$P_m = V_{oc} * I_{sc} * FF \quad (II.1)$$

Ce modèle offre une estimation rapide de la puissance maximale du panneau dans des conditions d'ensoleillement standard.

#### B. *Modèle à une diode:*

Ce modèle représente la cellule photovoltaïque par une diode idéale et des résistances parasites. Il prend en compte les pertes de tension et de courant dues aux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge dans la cellule. L'expression du courant ( $I$ ) produit par la cellule dans ce modèle est donnée par :

$$I_{pv} = I_{sc} [\exp(V_{pv}/V_t) - 1] - (R_p V_{pv} / R_{sh}) \quad (II.2)$$

Où :

- **$V_t$ :** Tension thermique (environ 26 mV à température ambiante)
- **$R_p$ :** Résistance série parasite
- **$R_{sh}$ :** Résistance shunt parasite

Ce modèle offre une meilleure précision que le modèle de puissance maximale, mais il nécessite l'estimation des valeurs des résistances parasites  $R_p$  et  $R_{sh}$ .

### II.4.2. Modèles physiques pour la modélisation de panneaux photovoltaïques

Les modèles physiques pour la modélisation de panneaux photovoltaïques sont basés sur les principes physiques de la conversion photovoltaïque. Ils prennent en compte les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs, la structure de la cellule et les mécanismes de recombinaison des porteurs de charge.

Ces modèles permettent de simuler le comportement du panneau dans des conditions variées, telles que différentes intensités d'ensoleillement, températures et charges connectées. Ils offrent une meilleure précision que les modèles empiriques, mais ils sont également plus complexes à implémenter et à utiliser.

### **II.4.3. Modèles physiques couramment utilisés :**

#### **A. Modèle à deux diodes:**

Ce modèle est une extension du modèle à une diode et représente la cellule photovoltaïque par deux diodes idéales en parallèle, chacune avec sa propre tension de seuil et son facteur d'émission. Il prend en compte les pertes de recombinaison dans la zone de jonction et dans la zone quasi neutre de la cellule.

#### **B. Modèle à paramètres équivalents:**

Ce modèle représente la cellule photovoltaïque par un circuit électrique équivalent composé de sources de tension, de résistances et de diodes. Il permet de modéliser les différentes sources de pertes de tension et de courant dans la cellule.

### **II.4.4. Choix entre les deux approches :**

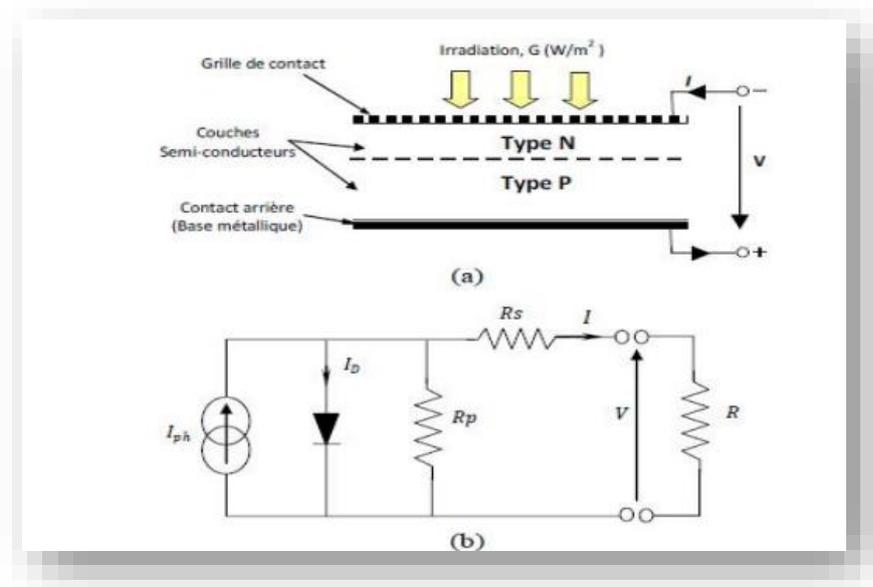
Le choix entre un modèle empirique et un modèle physique dépend de l'application et du niveau de précision requis.

- ✓ **Modèles empiriques:** Adaptés pour des estimations rapides de la performance du panneau dans des conditions d'utilisation typiques.
- ✓ **Modèles physiques:** Recommandés pour des analyses plus approfondies, des simulations de systèmes complexes ou des études de l'impact de divers facteurs sur la performance du panneau.

### **II.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :**

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Le *modèle idéal* d'une cellule est une source de courant en parallèle avec une diode. Pour tenir compte des effets dissipatifs, deux résistances ont été introduites : la résistance série et la résistance shunt [4].

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures



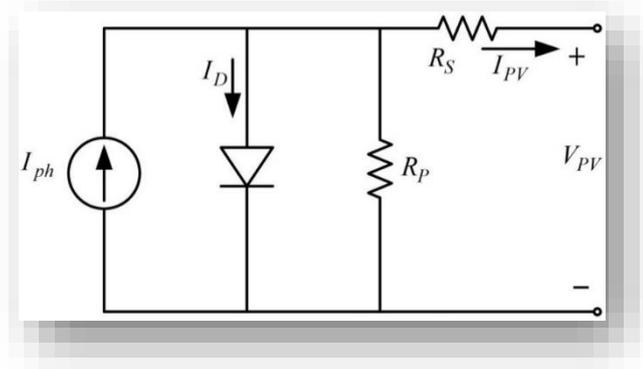
**FIGURE II.1:** Une cellule Photovoltaïque : dont (a) : est sa structure Physique et (b) : son modèle de circuit équivalent

## II.6. Modélisation des cellules PV :

- Modèle a une diode (ou exponentielle simple).
- Modèle a deux diodes (ou double exponentielle).

### II.6.1. Modélisation du générateur photovoltaïque d'une seule diode:

Le modèle à une seule diode est une représentation simplifiée du comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Il s'agit d'un modèle empirique qui utilise une diode idéale, des résistances parasites et une source de courant pour représenter les caractéristiques I-V (courant-tension) de la cellule.



**FIGURE II.2:** Schéma du modèle à une seule diode.

Le schéma du modèle à une seule diode (FIG.II.2) comprend les éléments suivants:

- ✓ **Source de courant  $I_{ph}$ :** Représente le courant généré par l'effet photovoltaïque dans la cellule. Sa valeur dépend de l'intensité lumineuse et des caractéristiques de la cellule.
- ✓ **Une résistance série ( $R_s$ ):** Représente les pertes Ohmiques internes dans la cellule dues à la résistance des matériaux semi-conducteurs et des contacts métalliques.
- ✓ **Une résistance shunt ( $R_{sh}$ ):** Modélise les fuites de courant parasites dans la cellule.
- ✓ **Diode idéale ( $D$ ):** Modélise la jonction p-n de la cellule. Le courant traversant la diode ( $I_d$ ) est donné par l'équation de Shockley :

$$I_d = I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{n.K.T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

$$I_d = I_{sc} * [\exp(V_{pv}/V_t) - 1] \quad (\text{II.4})$$

- ✓  $I_{sc}$ : Courant de court-circuit de la cellule
- ✓  $V_{pv}$ : Tension aux bornes de la cellule
- ✓  $V_t$ : Tension thermique (environ 26 mV à température ambiante)
- ✓  $R_p$ : Résistance série parasite
- ✓  $R_{sh}$ : Résistance shunt parasite

### II.6.2. Relation I – V du modèle à une seule diode:

Le courant total ( $I$ ) traversant la cellule est donné par la somme du courant de la source ( $I_{ph}$ ) et du courant de la diode ( $I_d$ ) :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.4})$$

En remplaçant  $I_d$  par son expression de l'équation de Shockley, on obtient la relation I-V du modèle à une seule diode :

$$I = I_{ph} - I_{sc} * [\exp(V_{pv}/V_t) - 1] + (V / R_p) - (V_{pv} / R_{sh}) \quad (\text{II.5})$$

Cette équation permet de simuler la courbe I-V de la cellule photovoltaïque pour différentes valeurs d'intensité lumineuse et de température.

- $I_d$ : Le courant de la diode.

L'expression du courant de la diode  $I_d$  est donnée par l'équation de Schrockley :

$$I_D = I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II.6})$$

$K$  : Constante de Boltzmann ( $K = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

$n$  : est la facteur d'idéalité de la diode il varie entre 1 et 2.

$q$  : charge de l'électron ( $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

L'expression du courant qui traverse la résistance en parallèle  $R_{sh}$ , 1c est donnée par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

$R_s$ : La résistance shunt de sortie de la cellule

$R_{sh}$ : La résistance série de sortie de la cellule

$V_{pv}$ : Tension de sortie de la cellule

Donc, au final, le modèle à 4 paramètres d'une cellule est donné par l'équation suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] - (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}) / (R_{sh,1c}) \quad (\text{II.8})$$

#### a. Modèle à quatre paramètres :

La figure. II.3 représente un modèle à 4 paramètres

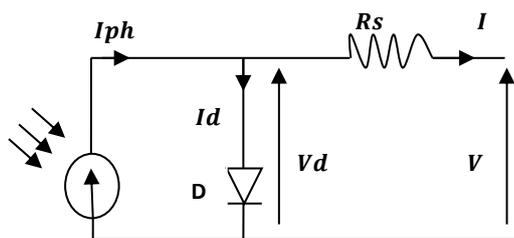


FIGURE II.3: Modèle à 4 paramètres

On ajoute la résistance série  $R_s$  comme 4<sup>ème</sup> paramètre [14]

$R_s$  : représente la résistance des connexions et  $V_d$  sera :

$$V_d - V + R_s I_{rs} = 0 \quad (\text{II.9})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{q \frac{V+I R_S}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Dans les condition normales d'éclairément (1000 W/m<sup>2</sup>) et de température (25 °c) .

$$\frac{KT}{q} = 26 \text{ mv}$$

$$K = 1.38 * 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

$$T = 25 + 273 = 298 \text{ k}$$

$$e = 1.16 * 10^{-19} \text{ C}$$

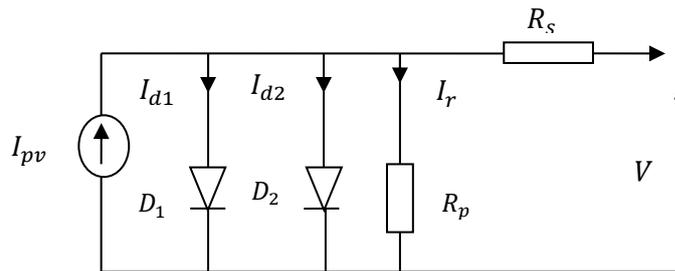
Donc la relation devient :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{V+I R_S}{n * 0.026}} - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

### II.6.3. Modèle à deux diodes :

Nous présenterons un modèle à deux diodes pour l'effet de l'ombrage partiel sur la production d'énergie des panneaux photovoltaïques (PV). A cet effet, une étude complète de toutes les configurations de modules PV disponibles.

Le modèle à deux diodes est présenté comme suit :



**FIGURE II.4** Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin-modèle 2-DRs

L'équation suivante décrit le courant de sortie de la cellule photovoltaïque pour le modèle à deux diodes:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[ -1 + \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A_1 V_{t1}} \right) \right] - I_{02} \left[ -1 + \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A_2 V_{t2}} \right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.12})$$

$I_{d1}$ : Courant de saturation inverse de la diode D1.

$I_{d2}$ : Courant de saturation inverse de la diode D2.

$V_{r1}$ : Potentielle thermodynamique de la diode D1.

$V_{r2}$ : Potentielle thermodynamique de la diode D2. .

$A_1$ : Le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D1.

$A_2$ : Le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D2.

### II.7. Modèle mathématique avec cinq paramètres inconnus :

D'après la figure ci-dessous les cinq paramètres de ce modèle sont :

$I_{ph}$  = courant photonique.

$I_{d1}$  = courant de saturation de la diode 1.

$I_{d2}$  = courant de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A_1 \times (\text{NCS})$ , le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A_2 \times (\text{NCS})$ , le facteur de qualité de la diode 2. NCS = Nombre des cellules en série.

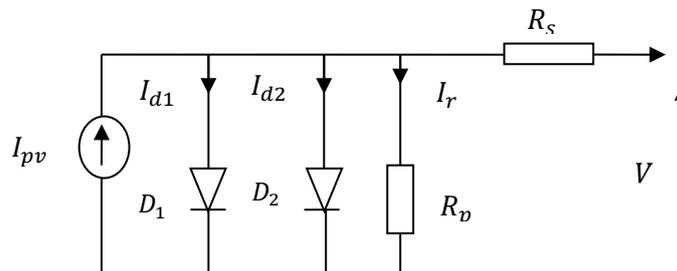


FIGURE II.5: Modèle de deux diodes à Cinq paramètres

### II.8. Conclusion :

La modélisation des cellules solaires comprend principalement la formulation de la relation courant-tension (I-V) dont la détermination des paramètres joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires.

Nous avons présenté dans cette chapitre la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque en utilisant deux modèles PV (modèle d'une seule diode et avec deux diode) avec ces équations.

# **C**HAPITRE III :

## **M**ODELISATION ET SIMULATION D'UN PV PAR UN SEULE DIODE ET A DEUX DIODES



---

## II.9. Méthodes d'estimation des paramètres d'un module pv

Plusieurs techniques d'extraction des paramètres d'un PV ont été proposées récemment et certaines contributions sont actuellement examinées ici. Ces techniques peuvent être regroupées en trois catégories : méthodes analytiques, itératives et les méthodes intelligentes.

Comme illustrées à la Figure III.1. Dans la littérature, l'application de ces méthodes montre que les précisions obtenues des résultats sont différentes d'une méthode à une autre [8].

### II.9.1. Méthodes Analytiques

Les méthodes analytiques sont couramment utilisées pour estimer les paramètres d'un module photovoltaïque. Ces approches résolvent explicitement les équations analytiques, ce qui permet d'économiser du temps de calcul car une équation analytique est suffisante pour obtenir une solution pour un paramètre [71]. Elles ont fait leurs preuves pour certains modèles de modules PV dans des conditions standard de test (STC) ainsi que dans d'autres conditions environnementales. Certaines approches proposent l'utilisation de la fonction de Lambert W.

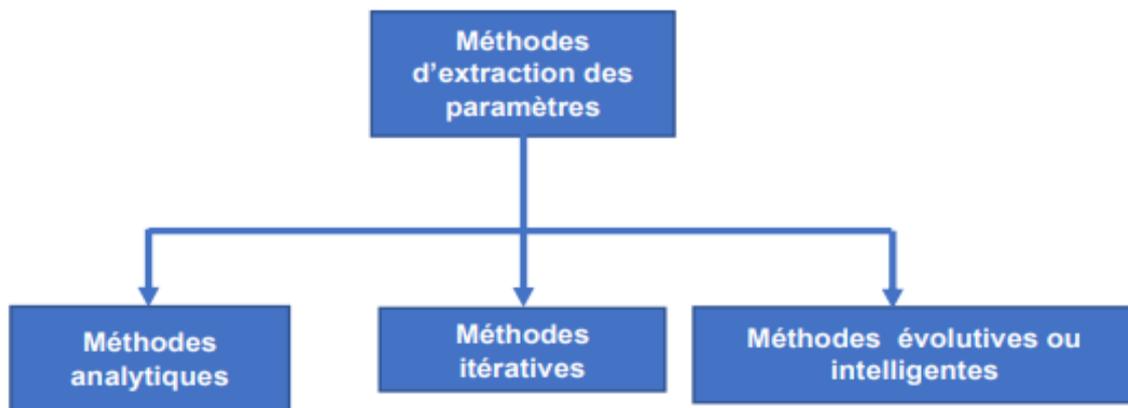


FIGURE III .1 Classification des différentes méthodes d'extraction des paramètres d'un module PV

Femia et al. [10] ont mis au point une méthode pour calculer de manière analytique les résistances en série  $R_s$  et en parallèle  $R_p$  en se basant sur la fonction de Lambert W. Cette méthode décrit de manière explicite le courant de sortie du module PV en fonction de la tension, démontrant de bonnes performances. De manière similaire, Batzelis et al. [11] ont choisi d'exprimer la tension en fonction du courant en utilisant la fonction de Lambert W.

#### ✚ Fonction de Lambert W

La fonction de *LambertW* est en effet un outil mathématique puissant qui permet la résolution analytique de certaines équations. Son utilisation dans le modèle des jonctions non idéales avec

une résistance série  $R_s$  et une résistance shunt  $R_{sh}$  dans les caractéristiques des cellules solaires illustre parfaitement ses avantages. La solution analytique offerte par la fonction de Lambert  $W$  permet de décrire de manière générale le comportement du problème physique, contrairement à la solution numérique qui est conditionnée par des valeurs spécifiques. En outre, la fonction de Lambert  $W$  contribue à l'unification des différents phénomènes en offrant une solution exacte, sans les problèmes de convergence souvent rencontrés avec les méthodes numériques. Sa capacité à être intégrée et dérivée facilite la compréhension des comportements physiques lorsque les paramètres de l'équation varient. L'histoire de la fonction de Lambert  $W$ , introduite par Lambert en 1758 et étudiée par Euler en 1779 avant de prendre son nom en 1959 grâce aux travaux de E.M. Wright, démontre l'importance de cette fonction dans de nombreux domaines. Son utilisation dans des applications variées témoigne de sa pertinence et de sa robustesse dans la résolution de problèmes physiques complexes.

### II.9.2. Méthodes itératives

Plusieurs méthodes itératives sont disponibles dans la littérature. Parmi ces méthodes itératives figurent probablement des bonnes méthodes pour estimer les paramètres. La méthode de Newton Raphson (NR) est l'une des meilleures méthodes utilisées [8-10], mais un choix inapproprié des conditions initiales affecte la précision et la convergence des solutions.

#### **Méthode de Newton Raphson (NR)**

La méthode de Newton-Raphson est une méthode itérative puissante pour résoudre des équations non linéaires d'une variable. Elle est basée sur le développement de Taylor et permet d'obtenir des approximations successives de la solution de l'équation avec une convergence quadratique.

L'algorithme de Newton-Raphson est une méthode itérative puissante pour trouver les racines d'une fonction  $f(x)$ . Dans le contexte de la modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque il peut être utilisé pour déterminer le courant prédit  $I_{pv}$

### II.9.3. Méthodes Evolutives (Intelligentes)

Récemment avancées en modélisation de modules PV ont bénéficié de l'application généralisée d'approches évolutives et d'intelligence artificielle pour l'estimation des paramètres, distinguées par leur précision et fiabilité. Plusieurs investigations ont été bâties sur des algorithmes évolutifs populaires incluant les algorithmes génétiques (GA) [7], l'optimisation par essaim particulaire (PSO) [12], le couplage simplifié des oiseaux (SBMO) [13], le balayage par essaim de chats (CSO) [14], l'optimisation par essaim d'abeilles artificielles (ABSO) [15], la recherche de

bactéries (BF) [16], la pollinisation des fleurs (FPA) [17], l'évolution différentielle avec mutation adaptative (DEAM) [18] [93], l'algorithme évolutif basé sur la méthode analytique (EA) [19], et le réseau de neurones artificiels (ANN) [20,21]. Ismail et ses collaborateurs [7] ont déployé l'algorithme génétique pour identifier les paramètres d'un module PV face à des variations de température et d'irradiation, ainsi que des ombrages partiels. Alam et al. [17] ont introduit la FPA, méthode d'optimisation novatrice se distinguant par sa rapidité de convergence vers les paramètres optimaux des modules PV à une ou deux diodes, s'avérant souvent plus performante que les GA et le PSO. Muhsen et al. [18]

L'optimisation des paramètres du modèle panneaux solaires est un problème complexe visant à trouver la combinaison optimale des paramètres pour obtenir la meilleure performance possible. Différentes approches d'optimisation, telles que les algorithmes génétiques, le PSO et les réseaux de neurones, peuvent être utilisées pour résoudre ce problème.

Dans cette étude, nous explorons l'efficacité de ces trois approches en les comparant sur la base de leur capacité à converger vers une solution optimale, leur vitesse de convergence et leur robustesse face à différentes conditions de test. Les résultats de notre analyse comparative fourniront des insights précieux pour les chercheurs et les praticiens cherchant à optimiser les paramètres du modèle Panneaux solaires V.

Dans la suite de ce travail, nous allons présenter les détails de chaque méthode précédente pour la détermination du courant prédit à partir de la solution de l'équation non linéaire du courant fourni par la cellule PV.

L'équation caractéristique  $I - V$  est une équation non linéaire, sa solution nécessite l'application d'une méthode de résolution assurant un vecteur de solutions exactes ou vecteur de solutions approchées. A cet effet, plusieurs méthodes ont été développées pendant ces dernières années pour résoudre cette équation non linéaire. Parmi de celles-ci on peut citer:

- *Fonction de Lambert-W*
- *Méthode de Newton-Raphson.*
- *Méthode de conductance simple.*

En fait maintenant la présentation détaillée de chaque méthode pour la détermination du courant prédit à partir de la solution de l'équation non linéaire du courant fourni par la cellule PV. [12]

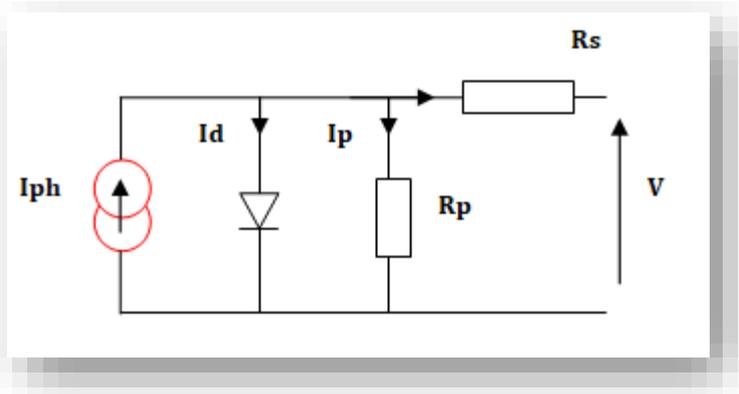


FIGURE III .2 : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.

### II.9.4. Méthode analytique *Fonction de Lambert-W*:

La fonction de *Lambert-W* est définie comme étant la fonction qui vérifie la formule suivante:

$$Z = W(X) e^{W(X)} \tag{III.1}$$

Avec:

$Z$ : représente l'argument de la fonction  $W$ .

$e^{(X)}$  Représente la fonction exponentielle et  $X$  est un vecteur complexe ou réel. Par conséquent, le vecteur  $X$  est obtenu sous la forme  $X = W(Z)$ .

L'application de la fonction de *Lambert-W* sur l'équation qui permet de calculer le courant prédit  $I_{pv}$  peut être simplifiée comme suit:

$$(R_p + R_s)I_{pv} = R_p I_k - R_p I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) - V_{pv} \tag{III.2}$$

Où  $I_k$  est défini par  $I_k = I_{ph} + I_0$ .

Ensuite, en multipliant les deux membres de l'Eq. III.2 Par le terme  $\frac{R_s}{R_p + R_s}$  nous obtenons:

$$R_s I_{pv} = \frac{R_s}{R_p + R_s} (R_p I_k - R_p I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) - V_{pv}) \tag{III.3}$$

Ensuite, le terme  $V_{pv}$  est ajouté dans les deux membres de l'Eq. III.3. Puis, en divisant l'équation obtenue par le terme  $A \cdot V_t$ , nous obtenons :

$$\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A \cdot V_t} = \frac{R_s}{A \cdot V_t (R_p + R_s)} (R_p I_k - R_p I_0 \cdot \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) + \frac{R_p V_{pv}}{R_s}) \tag{III.4}$$

Maintenant, l'eq. III.4 est à nouveau simplifiée, donnant ainsi l'équation suivante:

$$\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t} + \frac{R_p R_S I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} \cdot \exp\left(\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}\right) = \frac{R_S}{A.V_t(R_p+R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S}\right) \quad (III.5)$$

Ensuite, la fonction exponentielle des deux membres de l'Eq. III.5 est calculée, puis multipliée par le terme.  $\frac{R_p R_S I_0}{A.V_t(R_p+R_S)}$  D'où, l'équation résultante est donc donnée par:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}} \right) e^{\left( \frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}} \right)} \\ & = \frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{R_S}{A.V_t(R_p+R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S}\right)} \end{aligned} \quad (III.6)$$

En prenant la fonction de *Lambert-W* des deux membres de l'Eq. III.6, on obtient:

$$\frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}} = LambertW\left(\frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{R_S}{A.V_t(R_p+R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S}\right)}\right) \quad (III.7)$$

Maintenant, l'Eq. III.7 est à nouveau simplifiée, donnant ainsi l'équation suivante:

$$R_p I_0 e^{\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}} = \frac{A.V_t(R_p+R_S)}{R_S} LambertW\left(\frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{R_S}{A.V_t(R_p+R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S}\right)}\right) \quad (III.8)$$

Selon l'Eq.III.8, le terme  $(R_p I_0 e^{\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}})$  est réécrit comme suit:

$$R_p I_0 e^{\frac{V_{pv}+R_S I_{pv}}{A.V_t}} = R_p I_k - (R_p + R_S) - V_{pv} \quad (III.9)$$

Ainsi, le courant de sortie prédit exact est donné en comparant l'Eq. III.11 avec l'Eq. III.9.

Cela donne:

$$I_{pv} = \frac{R_p(I_{ph}+I_0)-V_{pv}}{R_p+R_S} - \left(\frac{A.V_t}{R_S} LambertW\left(\frac{R_S R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_S)} e^{\frac{R_S}{A.V_t(R_p+R_S)} \left(R_p(I_{ph}+I_0)+\frac{R_p V_{pv}}{R_S}\right)}\right)\right) \quad (III.10)$$

L'Eq. (III.10) représente alors la solution exacte de l'équation non linéaire du courant de la cellule PV.

### II.9.5. Méthode itérative de *Newton-Raphson*:

C'est une méthode basée sur l'évaluation de la fonction objective ainsi que sa dérivée dans un point  $x_n$ . La mise à jour de la solution dans chaque itération est assurée par l'équation ci-dessous [13]:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (III.11)$$

Où:

- $x_{n+1}$ : représente la mise à jour de la solution actuelle  $x_n$ .
- $f(x_n)$ : représente l'évaluation de la fonction objective ( $x$ ) à la valeur actuelle  $x_n$  ;
- $f'(x_n)$ : représente l'évaluation de la dérivée de la fonction objective  $f(x)$  dans le point solution  $x_n$

L'application de la méthode de *Newton-Raphson* pour résoudre l'équation non linéaire ci-dessous :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[ -1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (III.12)$$

L'application de la méthode de Newton permet de calculer la valeur du courant  $I_{ph}$  pour chaque itération par :

$$I_{pv\ n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[ -1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}}{-1 - \left(\frac{R_s I_0}{A V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A V_t}\right) - \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (III.13)$$

### II.9.6. Méthode évolutive Algorithme génétique GA:

Les algorithmes génétiques (GA) sont des algorithmes d'optimisation métaheuristiques inspirés des principes de l'évolution naturelle. Ils s'avèrent particulièrement efficaces pour la recherche de solutions optimales dans des problèmes complexes, comme l'optimisation des modèles de cellules solaires.

Les GA fonctionnent en simulant l'évolution biologique au sein d'une population d'individus. Chaque individu représente une solution potentielle au problème d'optimisation, et est codé par un chromosome, une structure de données qui encode les valeurs des paramètres du modèle.

Les étapes principales d'un algorithme génétique incluent:

- **Initialisation et codage de la population:** Création d'une population initiale d'individus générés aléatoirement.

- **Évaluation:** Évaluation de la performance de chaque individu en fonction d'une fonction objective, qui représente la mesure de la qualité de la solution.
- **Sélection:** Sélection des individus les plus performants de la population actuelle pour servir de parents dans la reproduction.
- **Croisement:** Combinaison des chromosomes des parents pour générer de nouveaux individus, les "enfants". Différents opérateurs de croisement peuvent être utilisés, tels que le croisement à un point ou le croisement à deux points.
- **Mutation:** Introduction de modifications aléatoires dans les chromosomes des enfants avec une faible probabilité. La mutation permet d'explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche et d'éviter la convergence prématurée vers un optimum local.
- **Répétition:** Répétition des étapes 2 à 5 jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint, comme un nombre maximum d'itérations ou une valeur de la fonction objective satisfaisante.

Lors de notre travail, nous cherchons à trouver les meilleures valeurs de  $I_{ph}$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  et  $A_i$  pour minimiser au minimum l'erreur quadratique moyenne  $MSE$  définie dans l'équation III.14. Cette erreur provient des différences entre les mesures réelles du courant  $I_{pvi}$  et les valeurs prédites  $\check{I}_{pvi}$  [17]. Le problème consiste à optimiser les paramètres du modèle PV en respectant certaines contraintes.

$$MSE(x) = 1/n \sum_{i=1}^n (I_{pvi} - \check{I}_{pvi}(x))^2 \tag{III.14}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_{phmin} \\ R_{smin} \\ R_{pmin} \\ A_{min} \end{bmatrix}}_{x_{min}} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} I_{ph} \\ R_s \\ R_p \\ A \end{bmatrix}}_x \leq \underbrace{\begin{bmatrix} I_{phmax} \\ R_{smax} \\ R_{pmax} \\ A_{max} \end{bmatrix}}_{x_{max}}$$

La fonction du Matlab GA :

$$x = ga (FUN, nvars, Ainq, binq, Aeq, beq, lb, ub) \tag{III.15}$$

Sachant que :

- ✓  $FUN$  : représente le critère à minimiser (Fitness function) ;
- ✓  $nvars$  : représente le nombre des paramètres à optimiser ;
- ✓  $Ainq, binq$  : représente les coefficients décrivant les contraintes linéaires d'inégalités, qui sont souvent définies par  $Ainq \cdot x \leq binq$  ;
- ✓  $Aeq, beq$  représente les coefficients décrivant les contraintes linéaires d'égalités, qui sont souvent définies par  $Aeq \cdot x = beq$  ;

- ✓  $lb, ub$ . représente les coefficients décrivant les contraintes de borne, qui sont souvent définies par  $lb \leq x \leq ub$  ; Dans notre cas, les coefficients décrivant les contraintes linéaires sont imposées par :  $A_{inq} = [ \quad ], b_{inq} = [ \quad ]$   $A_{eq} = [ \quad ]$  et  $b_{eq} = [ \quad ]$

## II.10. Simulation :

L'étude expérimentale concentrée sur l'analyse du comportement d'un panneau solaire de type ISOFOTON I-50 PV. Les panneaux solaires ISOFOTON I-50 PV sont des modules photovoltaïques en silicium cristallin monocristallin d'une puissance nominale de 50 W. Ils sont couramment utilisés dans des applications résidentielles et commerciales.

Ses caractéristiques électriques typiques sont récapitulées dans le Tableau III-1 ci-dessous :

Paramètres	Valeurs
Puissance maximal $P_{max}$	39.10 W
Tension optimale $V_m$	14.9 V
Courant optimal $I_m$	2.62 A
Nombre de cellules	36

**Tableau III-1.** Caractéristiques électriques typiques du panneau PV

### II.10.1. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques courant et puissance :

Les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  des panneaux solaires fournissent des informations précieuses sur leur comportement électrique et permettent de comprendre l'influence de l'éclairement et de la température sur leurs performances. Ces informations sont essentielles pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

#### A. Influence de l'éclairement:

Les figures (III.3) montrent les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un panneau solaire sous différentes conditions d'éclairement. On observe clairement que :

- ✚ Le courant produit par le panneau solaire augmente proportionnellement à l'éclairement. Cela signifie que plus la quantité de lumière reçue par le panneau est importante, plus le courant généré sera élevé. La tension produite par le panneau solaire est moins

sensible à l'éclairement que le courant. Cependant, une légère augmentation de la tension peut être observée avec une augmentation de l'éclairement.

- ✚ La puissance produite par le panneau solaire, donnée par le produit du courant et de la tension Figure, augmente de manière significative avec l'éclairement. Cela signifie que le panneau solaire est plus efficace lorsque l'ensoleillement est important.

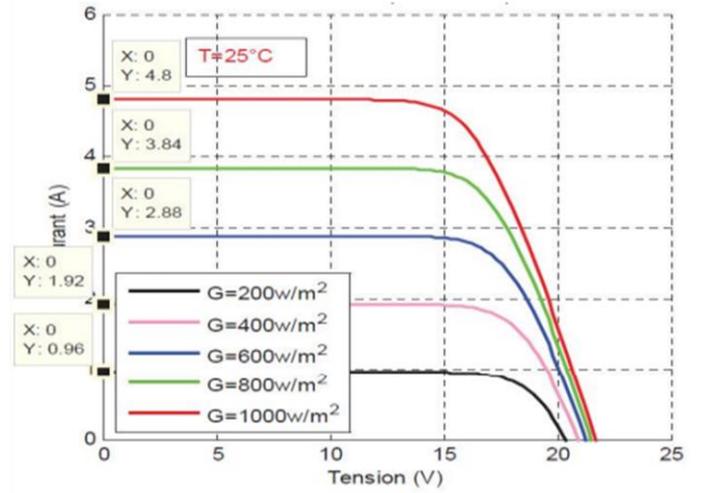


FIGURE III .3 : Caractéristique  $I = f(V)$  en fonction de l'éclairement

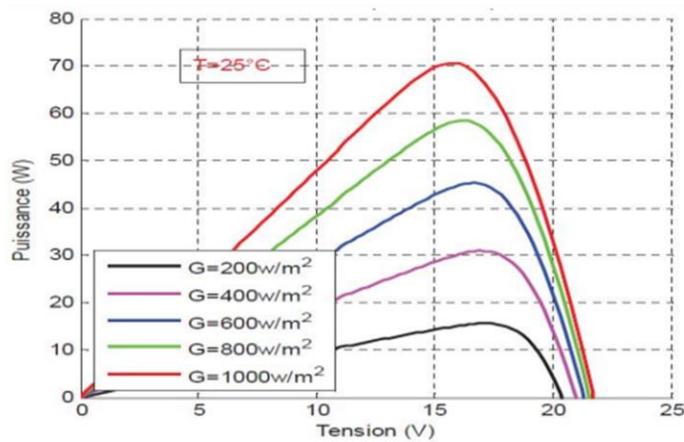


FIGURE III .4 : Caractéristique  $P = f(V)$  en fonction de l'éclairement

**B. Influence de la température :**

Les figures (III.5) montrent les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un panneau solaire sous différentes conditions de température. On observe clairement que :

- ✚ Le courant produit par le panneau solaire diminue avec l'augmentation de la température. Cet effet est dû à une augmentation de la résistance interne du panneau

avec la température. La tension produite par le panneau solaire diminue également légèrement avec l'augmentation de la température.

- ✚ La puissance produite par le panneau solaire, donnée par le produit du courant et de la tension, diminue avec l'augmentation de la température. Cela signifie que le panneau solaire est moins efficace lorsque la température est élevée.

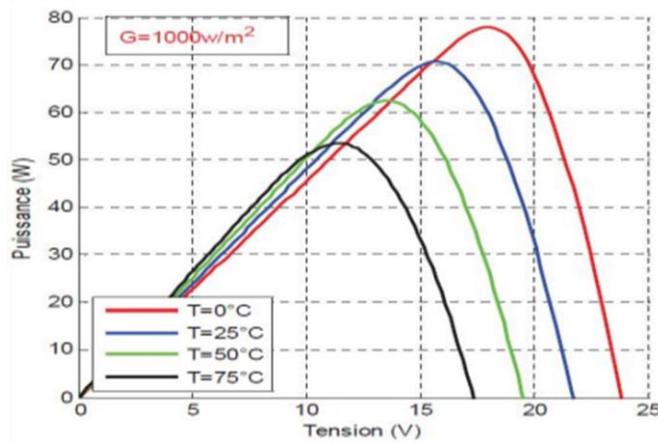


FIGURE III .5 : Caractéristique  $P = f(V)$  en fonction de la température

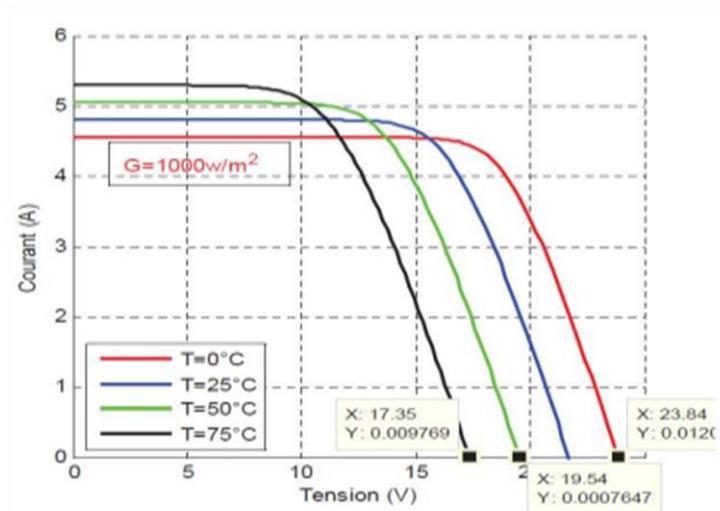


FIGURE III .6 : Caractéristique  $I = f(V)$  en fonction de la température

### II.11. Simulation model PV de seule diode à quatre paramètres :

Les résultats des quatre paramètres Tableau III.3 modèle Photovoltaïques que nous avons obtenu par l'algorithme GA pour générer les courbes I-V et P-V permet d'analyser le comportement du système photovoltaïque et de comparer ses performances avec les données réelles.

	$I_{ph}$	$A1$	$A2$	$R_s$	$R_p$	$MSE$
GA	1.7579	1.9	-	0.61568	167.16	$4.7 \times 10^{-4}$
Newton-R	1.8146	1.000	-	8.2663	21111.62	$5.3 \times 10^{-4}$

Tableau III.3. Les quatre paramètres d'un Modèle PV

Les Figures III.7 et III.8 montrent une comparaison entre le courant réel mesuré sur le système PV et le courant prédit par le modèle AG. On observe une bonne concordance entre les deux courbes, indiquant que le modèle AG parvient à capturer efficacement le comportement électrique du panneau solaire.

Ce résultat confirme l'efficacité de l'algorithme d'optimisation pour fournir le modèle PV souhaité.

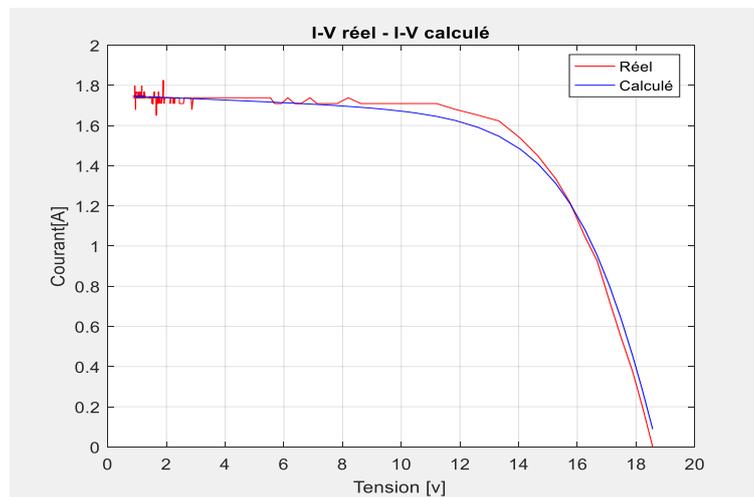


Figure III.7 Comparaison des  $I(V)$  réel et  $I(V)$  prédit

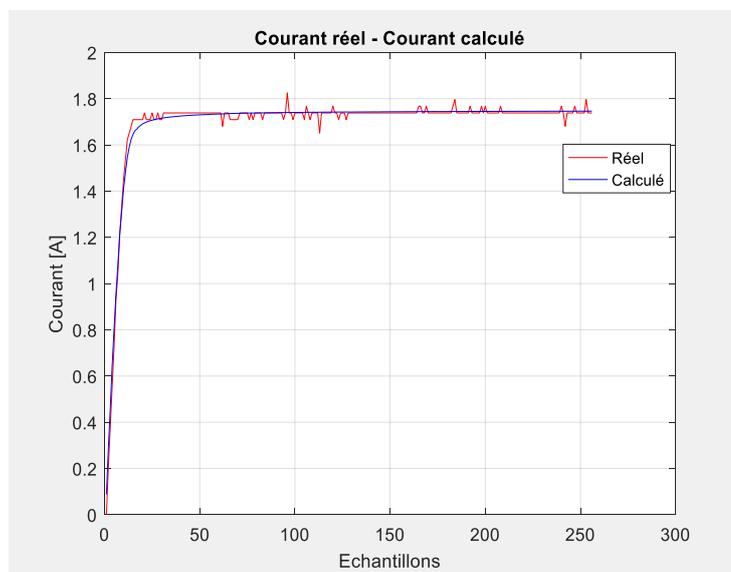


Figure III.8. Comparaison des courants réel et calculé

De manière similaire les figures (III.9 et III.10) comparent la puissance réelle produite par le système PV à la puissance prédite par le modèle AG. La tendance des courbes est similaire, confirmant la capacité du modèle à prédire la puissance produite par le panneau solaire.

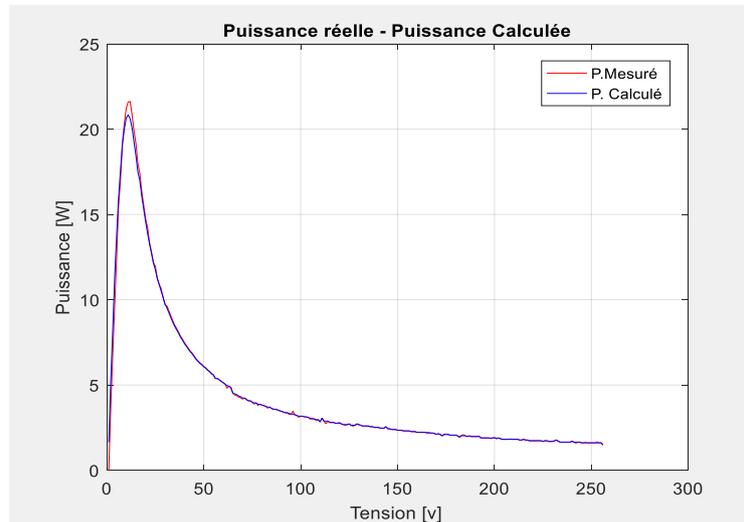


FIGURE III.9 : Comparaison des puissances réelle et calculée

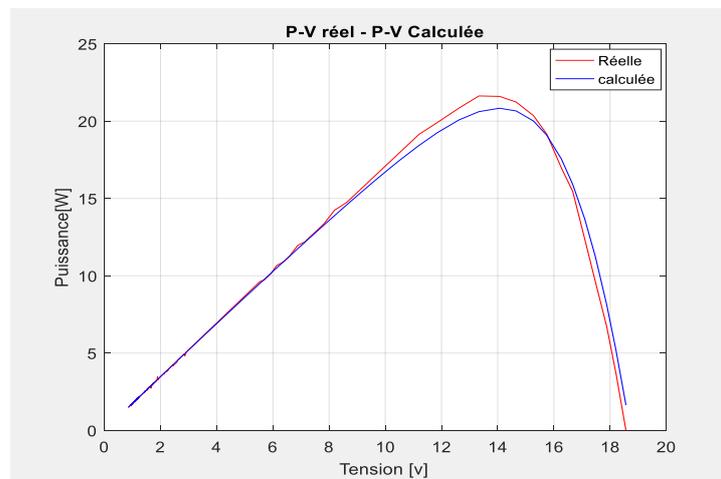


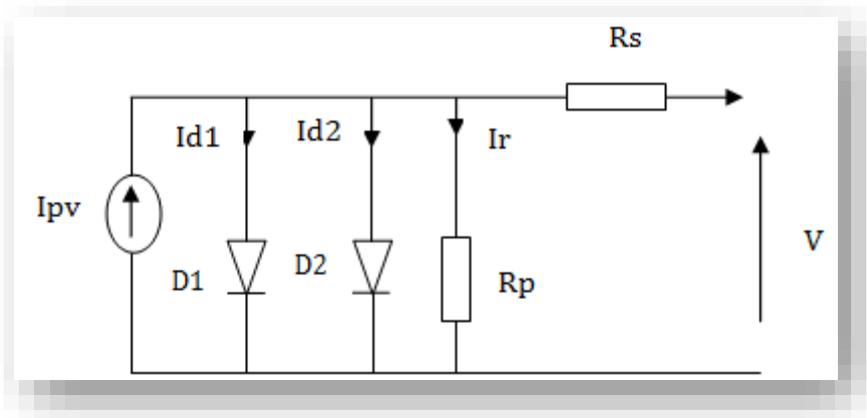
Figure III.10: Comparaison des P(V) réelle et P(V) calculée

## PARTIE 2 : Simulation du paramètre d'un model PV à deux diodes

### II.12. Calcul des paramètres du modèle à double diodes pour les cellules photovoltaïques

L'identification des paramètres du modèle à double diodes (**Figure III .11**) est une étape cruciale dans la modélisation et la simulation des cellules photovoltaïques.

Deux méthodes couramment utilisées pour cette tâche sont la méthode de Newton-Raphson et l'algorithme génétique. L'identification des paramètres du modèle nécessite des données expérimentales ou des caractéristiques du panneau solaire.



**FIGURE III .11** : Modèle PV à deux diodes

D'après la méthode *Newton-Raphson* pour calculer  $I_{pv}$  en trouve que l'équation devient :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_{01} \left[ -1 + \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_1 \cdot V_{t1}} \right) \right] - I_{02} \left[ -1 + \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_2 \cdot V_{t2}} \right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (III.16)$$

### II.13. Identification utilisant la résolution d'un système d'équations non linéaires

Cette méthode présente d'extraire les paramètres des cellules PV par l'utilisation d'un modèle électrique exponentiel double, le but de la méthode II est recommandé de n'utiliser que des courbes expérimentales pour extraire les paramètres Panneaux solaires  $I-V$  et  $P-V$ . Pour cette raison, la définition du système d'équations n'est pas la linéarité est basée sur la sélection et les conditions des trois points spécifiques suivants:

- $P1 \rightarrow (0, I_{sc})$  : le courant égal au courant de court-circuit et la tension égale à zéro ;
- $P2 \rightarrow (V_{oc}, 0)$  : la tension égale à la tension en circuit ouvert et le courant égal à zéro ;

- $P3 \rightarrow (Vm, Im)$  : le point fournissant la puissance maximale  $Pmax$  ;
- $P4 \rightarrow \left(\frac{dp}{dv}\right)_{v_{pv}=v_m} \Big|_{I_{pv}=I_m}$  {  $I_{pv}=I_m$  : la condition assurant le  $MPP$ .

**II.14. Les Paramètres optimaux des deux modèles PV :**

En comparant les courbes simulées aux données mesurées, il est possible d'ajuster les paramètres du modèle jusqu'à obtenir une bonne correspondance.

$V_{oc}$	$I_{ph}$	$I_{cc}$	$R_s$	$R_p$	$A_1$	$A_2$	$MSE$
<b>18,560</b>	1.757	2.990	1.175	191.610	1.051	1.052	$2.365 \times 10^{-4}$

Tableau III .4 : Les résultats de modèle a deux diodes

**II.15. Simulation de modèle et la recherche des paramètres PV :**

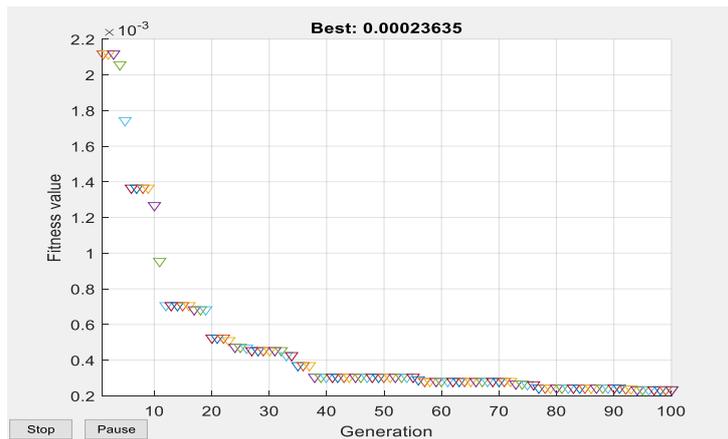


FIGURE III.12 : Erreur de simulation modèle à deux diodes

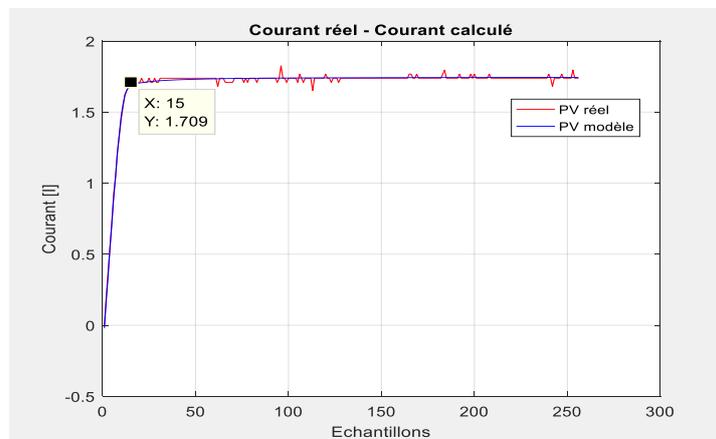


FIGURE III .13. Comparaison des deux courants réel et prédit

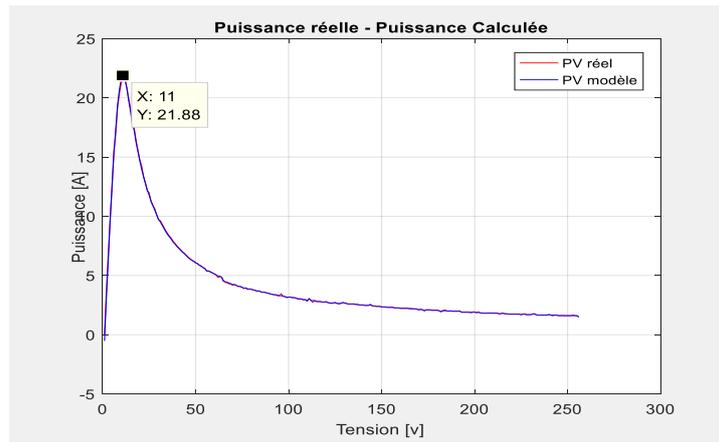


FIGURE III .14 Comparaison des puissances du PV.

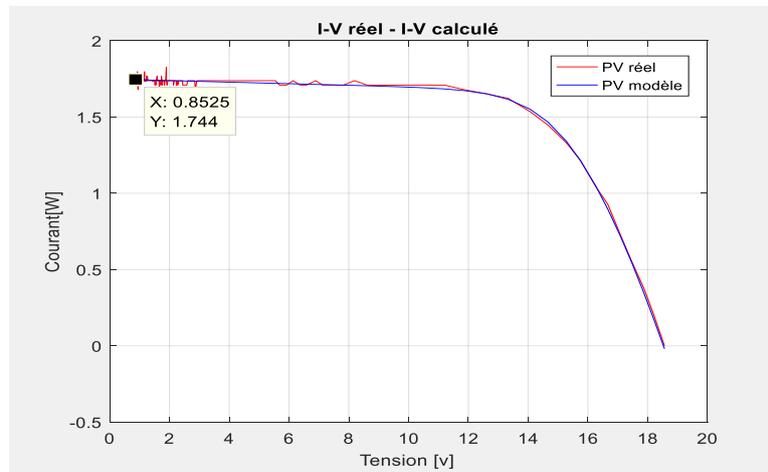


Figure III .15 : Caractéristique  $I - V$  du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus.

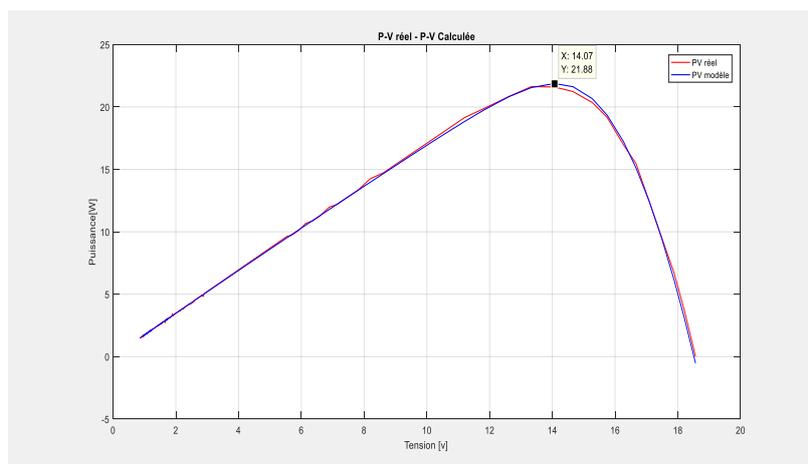


Figure III.16 : Caractéristique  $P - V$  du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus.

Les courbes (**figure III .14 et III .16**) représentent la relation entre le courant et la tension, puissance et tension pour différentes valeurs des paramètres.

D'après la **figure III.16**, on peut observer que pour un courant de  $I = 1.55 \text{ A}$ , la puissance maximale produite par le panneau solaire est de  $P = 21.88 \text{ W}$ .

La **figure III.14** présente les valeurs de la tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) fournies par le modèle photovoltaïque. Ces valeurs sont respectivement de  $V_{co} = 18,56 \text{ V}$  et  $I_{sc} = 1,774 \text{ A}$ .

En comparant ces valeurs aux résultats expérimentaux obtenus précédemment, on remarque une légère différence :

- ✓ ***Voc expérimentale:*** 12,95 V
- ✓ ***Voc modèle:*** 18,56 V
- ✓ ***Isc expérimentale:*** 1,774 A
- ✓ ***Isc modèle:*** 2,99 A

La comparaison des courbes I-V d'un système PV réel et du modèle à double diode à 5 paramètres permet d'évaluer la précision du modèle. Une bonne adéquation entre les deux courbes indique que le modèle capture efficacement le comportement électrique du système PV réel.

D'après les résultats des optimisations des deux modèles PV, nous remarquons que l'erreur lors de l'utilisation d'une deux diode sont plus précis que lors de l'utilisation d'une seule diode.

## **II.16. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé deux modèles PV modèle d'une seule diode et a deux diodes, où nous avons traité l'équation de chaque modèle par méthode de *newton -raphson* séparément, afin de trouver les paramètres inconnus et d'assurer l'amélioration des paramètres de chaque modèle, nous avons utilisé l'algorithme génétique (GA) qui assure une bonne réduction du critère MSE. Les résultats de la simulation nous ont également montré que les propriétés électriques obtenues à partir d'un modèle mathématique à cinq paramètres garantissent une meilleure précision par rapport à un modèle à quatre paramètres.

---

## Conclusion Générale

Dans cette mémoire nous avons abordé le domaine de l'énergie solaire, à travers la modélisation électrique d'un panneau solaire photovoltaïque de type ISOFOTON I-50 PV en utilisant deux approches différentes.

La première approche consiste en une modélisation à base d'une seule diode, tandis que la deuxième approche utilise un modèle à base de deux diodes.

Les résultats principaux indiquent que les deux modèles permettent une bonne reproduction des courbes I-V et P-V du panneau, mais celui à deux diodes offre une meilleure précision, notamment dans des conditions de faible luminosité et de températures élevées.

Les méthodes d'identification des paramètres des modèles sont variées, avec des algorithmes génétiques d'optimisation heuristique offrant une flexibilité et une efficacité accrues.

En conclusion, le choix du modèle dépend des besoins spécifiques de l'application, le modèle à diode unique étant plus adapté pour la simplicité et la rapidité, tandis que le modèle à deux diodes est recommandé pour une meilleure précision dans des conditions variées.

Cette étude offre une analyse détaillée des deux approches et de leurs performances, contribuant ainsi à une meilleure compréhension du comportement électrique des panneaux solaires photovoltaïques.

---

## BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Chan, D. S., & Phang, J. C. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from IV characteristics. *IEEE Transactions on Electron devices*, 34(2), 286-293.
- [2] Araujo, G. L., & Sanchez, E. (1982). A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(10), 1511-1513
- [3] Helali, K. (2012). Modelisation d'une cellule photovoltaïque: etude comparative. Master in Electrotechnique, Université Mouloud Mammri de Tizi-Ouzou.
- [4] Bessemoulin, P., & Oliviéri, J. (2000). Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La météorologie*, 2000(31), 42-59.
- [5]. Delagnes, D., & Flèche, B. (2007). Energie solaire photovoltaïque. Doc. juin 2007.
- [6] Chegaar, M., Ouennoughi, Z., & Hoffmann, A. (2001). A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-state electronics*, 45(2), 293-296.
- [7] Moussi, A., & Saadi, A. (2002). Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque. *LARHYSS Journal*, 158.
- [8] Sujatha, M. S., Lakshmi, B., Kumar, N. M. G., & Girish, N. (2020). MPPT Using P&O and IC Based PI Controller for Solar PV System with Charge Controller. *Helix-The Scientific Explorer| Peer Reviewed Bimonthly International Journal*, 10(02), 184-194.
- [9] Mr FEROUANI ABDELMADJID. Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS). Thèse de doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2016.
- [10] B. Gélis, V. Creuze, C. Glaize, F. Lecat et V. Thomas, 'Travaux Pratiques de Caractérisation de Panneaux Photovoltaïques', In CETSIS: 10ième Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, pages 001 - 006, 2013.
- [11] A. Ayang, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, N. Essiane Salomé, and N. Djongyang, "Parameters estimation of single-diode Photovoltaic module/array using least square estimator: A comparative study" ,*5th International Conference on Control & Signal Processing (CSP-2017) Proceeding of Engineering and Technology- PET* Vol.26

- 
- [12]. J. Soon and K.S. Low, "Photovoltaic model identification using particle swarm optimization with inverse barrier constraint," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3975-3983, 2012.
- [13] A. Askarzadeh and L. dos Santos Coelho, "Determination of photovoltaic modules parameters at different operating conditions using a novel bird mating optimizer approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 608-614, 2015.
- [14] L. Guo, Z. Meng, Y. Sun, and L. Wang, "Parameter identification and sensitivity analysis of solar cell models with cat swarm optimization algorithm," *Energy conversion and management*, vol. 108, pp. 520-528, 2016.
- [15] A. Askarzadeh and A. Rezazadeh, "Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 943-949, 2013.
- [16] M. A. Awadallah, "Variations of the bacterial foraging algorithm for the extraction of PV module parameters from nameplate data," *Energy conversion and management*, vol. 113, pp. 312-320, 2016.
- [17] D. Alam, D. Yousri, and M. Eteiba, "Flower pollination algorithm based solar PV parameter estimation," *Energy Conversion and Management*, vol. 101, pp. 410-422, 2015.
- [18] H. Muhsen, A. B. Ghazali, T. Khatib, and I. A. Abed, "Extraction of photovoltaic module model's parameters using an improved hybrid differential evolution/electromagnetism-like algorithm," *Solar Energy*, vol. 119, pp. 286-297, 2015.
- [19] M. Barukčić, V. Čorluka, and K. Miklošević, "The irradiance and temperature dependent mathematical model for estimation of photovoltaic panel performances," *Energy conversion and management*, vol. 101, pp. 229-238, 2015.
- [20] F. Bonanno, G. Capizzi, G. Graditi, C. Napoli, and G. M. Tina, "A radial basis function neural network based approach for the electrical characteristics estimation of a photovoltaic module," *Applied Energy*, vol. 97, pp. 956-961, 2012.