

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT MECANIQUE

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Réalisé par

**Boudraa Houssef Eddine**

**Houacine Abdessalem**

Filière : Génie mécanique

Option : Installation énergétique et turbo machine

---

**Optimisation et extraction des paramètres d'un  
module PV par les méthodes méta-heuristiques**

---

**Encadreur :**

**Mm R.Doumane**

**Promotion : 2020/2021**

# Remerciement

Je remercie tout d'abord **Allah** le tout miséricordieux le très miséricordieux, "Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah ne nous avait pas guidés".

AL-A'RAF -43-

**A mes chers parents**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

**A mes chères sœurs** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

**A mes chers frères**, pour leur appui et leur encouragement,

**A toute ma famille** pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

**A mon encadreur Mm R. Doumane** pour nous aider avec ce mémoire et nous accompagner avec patience et sincérité tout cette période, pour ses informations précieuses et ses explications.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible,

Merci d'être toujours là pour moi.

# Résumé

L'avenir énergétique doit être axé sur les énergies non polluantes et renouvelables. Le dimensionnement est une étape indispensable dans l'optimisation des systèmes à énergies renouvelables et ce, du fait de leur nature intermittente.

Ce travail s'articule autour de la modélisation et la commande non linéaire des systèmes de production des Energies renouvelables tels que les systèmes photovoltaïques, la compréhension théorique des photovoltaïques a attiré beaucoup d'attention dans la recherche. Pour aider à la conception et à l'évaluation des performances des panneaux photovoltaïques, un modèle développé est utilisé. Le modèle n'est autre qu'un circuit électrique équivalent avec des composants de base (une source, des résistances et une diode ou plus). Les modèles à une et deux diodes sont les plus populaires dans la littérature. Des paramètres de circuit équivalents doivent être obtenus, à partir d'un ensemble de données expérimentales ou d'une fiche technique du fabricant, afin de construire un modèle. L'objectif est d'obtenir des valeurs qui donnent un modèle précis. Le problème est abordé comme un problème d'optimisation, où l'erreur quadratique moyenne (RMSE), entre les données expérimentales et calculées, est la fonction à optimiser. En optant pour des modèles d'optimisation pour la résolution des problèmes difficiles. Dans le but de réaliser notre objectif, nous avons proposé deux contributions essentielles qui sont : l'optimisation de l'essaim de particules (PSO) et l'évolution différentielle (DE). Les algorithmes susmentionnés sont adaptés à l'extraction des paramètres PV à l'aide de MATLAB. Les algorithmes sont ensuite comparés en fonction de la précision des résultats obtenus.

## Abstract

The Energy future must be focused on non-polluting and renewable energies. The sizing is an essential step in the optimization of renewable energy systems, due to their intermittent nature.

This project is based on the modeling and nonlinear control of renewable energy systems such as

This work focuses on the modeling and nonlinear control of renewable energy systems such as photovoltaic systems, the theoretical understanding of photovoltaics has attracted a lot of attention in the research. To assist in the design and performance evaluation of photovoltaic panels, a developed model is used. The model is nothing but an equivalent electrical circuit

with basic components (a source, resistors and one or more diodes). The one and two diode models are the most popular in the literature. Equivalent circuit parameters must be obtained, from a set of experimental data or a manufacturer's data sheet, in order to build a model. The goal is to obtain values that yield an accurate model. The problem is approached as an optimization problem, where the root mean square error (RMSE), between the experimental and calculated data, is the function to be optimized. By opting for optimization models to solve difficult problems. In order to achieve our goal, we have proposed two essential contributions which are: particle swarm optimization (PSO) and differential evolution (DE). The aforementioned algorithms are adapted to extract the PV parameters using MATLAB. The algorithms are then compared based on the accuracy of the results obtained.

# Table des matières

<b>Remerciement.....</b>	<b>.....</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>.....</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>.....</b>
<b>La liste des figures.....</b>	<b>.....</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>.....</b>
<b>Nomenclature:.....</b>	<b>.....</b>
<b>Introduction générale :.....</b>	<b>1</b>
<b>I Energie solaire :.....</b>	<b>3</b>
I.1 Définition et catégories.....	3
I.2 Rayonnement solaire :.....	3
I.2.1 Les caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre :.....	4
I.2.2 Comment le rayonnement solaire entre dans l’atmosphère :.....	4
I.3 L’exploitation de l’énergie solaire.....	5
I.3.1 L’énergie solaire thermique.....	5
I.3.2 L’énergie solaire thermodynamique.....	6
I.3.3 L’énergie solaire photovoltaïque (PV) :.....	7
I.4 Enjeux par rapport à l'énergie.....	8
I.5 Historique :.....	9
I.6 Conclusion :.....	10
<b>II Energie solaire photovoltaïque :.....</b>	<b>11</b>
II.1 Introduction :.....	11
II.2 Définition :.....	11
II.3 Fonctionnement scientifique.....	12
II.3.1 La constitution d’un module photovoltaïque :.....	12
II.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	13
II.3.3 Les principaux composants d'un système photovoltaïque.....	15
II.4 Les types des cellules :.....	16
II.4.1 Le solaire photovoltaïque non concentré.....	16
II.4.2 Le solaire photovoltaïque concentré.....	18
II.5 Paramètres photovoltaïques :.....	22

II.6	Influence de la résistance : .....	24
II.7	Influence des paramètres extérieurs : .....	25
II.8	Les modèles des cellules PV : .....	27
II.8.1	Modèle idéal : .....	27
II.8.2	Modèle à une diode : .....	28
II.8.3	Modèle à deux diodes : .....	29
II.9	Les avantages et les inconvénients : .....	30
II.9.1	Avantages.....	30
II.9.2	Limites.....	30
II.10	Acteurs majeurs.....	31
II.11	Historique : .....	31
II.12	Conclusion : .....	33
<b>III.</b>	<b>Optimisation par Les méthodes métaheuristiques .....</b>	<b>34</b>
III.1	INTRODUCTION : .....	34
III.2	Une brève histoire de la metaheuristique: .....	34
III.3	Classification des algorithmes d'optimisation : .....	35
III.3.1	Algorithmes d'optimisation locale : .....	35
III.3.2	Algorithmes d'optimisation globale : .....	36
III.4	Optimisation des essaims de particules (PSO) : .....	36
III.4.1	Les étapes de l'algorithme : .....	37
III.5	Algorithme d'évolution différentielle (DE) .....	38
III.6	Étapes de DE : .....	39
III.6.1	Initialisation : .....	39
III.6.2	Mutation : .....	39
III.6.3	Croisement : .....	39
III.6.4	Sélection.....	40
III.7	Conclusion : .....	41
<b>IV.</b>	<b>Simulation et Analyse des résultats .....</b>	<b>42</b>
IV.1	Introduction : .....	42
IV.2	Les Méthodes d'extraction des paramètres : .....	42
IV.2.1	Méthode analytique : .....	42
IV.2.2	Méthode metaheuristique : .....	43
IV.2.3	Résultats : .....	44
IV.3	Résultats de PSO : .....	44
IV.4	Résultats de DE : .....	51
IV.5	Discussion des résultats: .....	58
IV.6	Tableaux comparatifs : .....	59

IV.7	Conclusion :	60
v.	<b>Conclusion générale :</b>	<b>61</b>
vi.	<b>Bibliographie</b>	<b>62</b>

# La liste des figures

Figure I-1 Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde [1].....	5
Figure I-2 :un dispositif de conversion de l'énergie solaire thermique .....	6
Figure I-3 : L'énergie solaire thermodynamique .....	7
Figure I-4 :L'énergie solaire photovoltaïque .....	8
Figure I-5:L'évolution des surfaces installées dans l'Union européenne .....	10
Figure II-1 Cellules photovoltaïques .....	12
Figure II-2: Ruban métallique d'une cellule. ....	13
Figure II-3:Constitution d'une cellule photovoltaïque .....	14
Figure II-4 : système photovoltaïque connecté au réseau .....	15
Figure II-5 : Cellule monocristallin .....	16
Figure II-6 : Cellule polycristallin .....	17
Figure II-7: Amorphous Silicone .....	18
Figure II-8 : Cellule organique.....	19
Figure II-9 : couches minces .....	20
Figure II-10 : Le Telluride de cadmium.....	20
Figure II-11 : Cuivre Indium diSelenide.....	21
Figure II-12 : Cuivre Indium Gallium diSelenide.....	22
Figure II-13 : Courbe IV de cellule PV .....	22
Figure II-14 : L'effet de la résistance série sur la courbe de la cellule I(V).....	24
Figure II-15 : L'effet de la résistance en parallèle sur la courbe de la cellule I(V).....	25
Figure II-16: Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'irradiation.....	26
Figure II-17 : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour différentes températures ..	26
Figure II-18 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal- .....	27
Figure II-19 : schéma équivalent du Modèle à une diode.....	29
Figure II-20 : schéma équivalent d'un modèle à 2 diodes .....	29
Figure III-1 : Représentation schématique du mouvement d'une particule dans PSO.....	37

## Liste des tableaux

Tableau IV-1 : paramètres du modèle extraits et RMSE en utilisant PSO .....	51
Tableau IV-2: paramètres du modèle extraits et RMSE en utilisant DE .....	58
Tableau IV-3: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme .....	59
Tableau IV-4: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme .....	59
Tableau IV-5: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme .....	60
Tableau IV-6: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme .....	60

# Nomenclature:

[J] :	Unité de mesure de L'énergie. 1GJ = $10^9$ J, $10^6$ kJ, $10^3$ MJ.
[W] :	Unité de mesure de la puissance électrique
°C :	Le degré Celsius
AIE :	Agence internationale de l'énergie
CEA :	Commissariat de l'énergie atomique
CNRS :	Centre national de la recherche scientifique
UE :	Union européenne
CO <sub>2</sub> :	Le dioxyde de carbone
CdTe :	Le tellure de cadmium
AsGa :	L'arséniure de gallium
CIS :	Le diSelenide d'indium de cuivre
CIGS :	Cuivre Indium Gallium diSelenide
EVA :	Ethylène Acétate de Vinyle)
W <sub>c</sub> :	Watt crête
DC :	Courant continu
AC :	Courant alternatif
a-Si :	Le silicium amorphe
PV :	Photovoltaïque
I <sub>cc</sub> :	Courant de court-circuit
V <sub>co</sub> :	Tension de circuit ouvert
FF :	Facteur de forme
$\delta$ :	Le rendement
$P_{in}$ :	La puissance lumineuse incidente
$P_{max}$ :	La puissance maximale

GPV :	générateur photovoltaïque
$I_{ph}$ :	le photon courant
G :	l'éclairement solaire
I-V :	courant tension
P-V :	puissance tension
I :	courant
$I_0$ :	courant de saturation.
$V_T$ :	potentielle thermodynamique.
K :	la constante de Boltzmann ( $1.38.10^{-23}$ Joules/Kelvin).
T :	la température
q :	la charge d'un électron = $1,6.10^{-19}C$ .
$\alpha$ :	le facteur d'idéalité de la jonction.
V :	la tension aux bornes de la cellule
$R_s$ :	Résistance série
$R_p$ :	Résistance shunt
$I_D$ :	Courant de diode
$N_s$ :	Nombre de cellules connectées en série
STC :	les conditions d'essai normalisé
LCOE :	coût actualisé de l'énergie
PSO :	Optimisation des essaims de particules
DE :	L'évolution différentielle
RMSE :	L'erreur quadratique moyenne
CDER :	Centre de Développement des Energies Renouvelables

## Introduction générale :

Le monde se développe à pas de géant ; un développement qui a soulevé le besoin de plus en plus de puissance. Satisfaire un tel besoin coûte cher ; la pollution a augmenté proportionnellement à l'augmentation de la demande d'électricité. Heureusement, il existe de nombreuses alternatives respectueuses de l'environnement pour la production d'électricité. Potentiellement, à l'avenir, la demande d'électricité sera principalement couverte par des sources renouvelables.

Le photovoltaïque concerne la production d'électricité à partir de l'énergie solaire ; le domaine est devenu d'un grand intérêt au cours des dernières années. Le coût des panneaux photovoltaïques a diminué, tandis que des améliorations de l'efficacité sont observées ; Cela a conduit de nombreuses entreprises et personnes à investir en elles. La théorie sur le photovoltaïque est très importante ; Que ce soit à des fins pédagogiques ou techniques ; C'est un aspect clé dans l'amélioration de la qualité de l'énergie obtenue à partir des PV. Un modèle précis donne de grandes informations sur le comportement des panneaux solaires ; un comportement généralement exprimé par des relations mathématiques reliant le courant et la puissance à la tension (I-V et P-V), dans différentes conditions thermiques et d'éclairage. La modélisation donne de grandes informations en termes de conception et d'évaluation des performances. Au fil des années, divers modèles ont été proposés; Les modèles à simple et double diode ont été largement utilisés. Quel que soit le modèle de circuit adopté pour le système PV, trouver les paramètres de circuit optimaux nécessite la solution d'équations transcendantes reliant les caractéristiques I-V du dispositif PV. Dans ce projet, l'accent est mis sur le modèle à diode unique ; également connu sous le nom de modèle à cinq paramètres. L'objectif principal est d'obtenir les cinq paramètres, avec des valeurs optimales, pour construire un modèle précis qui décrit le comportement des panneaux solaires. Dans la littérature sur l'estimation des paramètres PV, de nombreuses méthodes ont émergé ; méthodes analytiques, méthodes itératives et méthodes méta-heuristiques. Dans ce travail, l'intérêt est consacré à cette dernière méthode. Il existe en fait deux types d'entrées de données pour effectuer des calculs ; Elle se fait soit à partir des données expérimentales issues du module, ce qui est la voie choisie ici, soit à partir des données fournies sur la fiche technique du fabricant. Les données sont entrées dans des programmes MATLAB qui sont des adaptations d'algorithmes d'optimisation pour répondre à l'objectif d'extraction de paramètres.

- **Energie solaire** : on commence la mémoire avec chapitre sur l'énergie solaire en forme général, définition, fonctionnement....
- **Energie solaire photovoltaïques** : Dans ce chapitre, le principe du PV, la technologie PV ainsi que les modèles à une et deux diodes seront présentés.
- **Optimisation par Les méthodes métaheuristiques** : ce chapitre donne des informations sur le fonctionnement des algorithmes d'optimisation métaheuristiques utilisés (PSO et DE).
- **Simulation et Analyse des résultats** : ce chapitre présente les méthodes d'estimation des paramètres PV, et montre les résultats des travaux effectués à l'aide des algorithmes précités

## **I. Energie solaire :**

### **I.1 Définition et catégories**

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est ainsi à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité ;
- le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité [1].

### **I.2 Rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est l'énergie qui vient du Soleil.

Les réactions nucléaires se produisent dans le noyau solaire, libérant une grande quantité d'énergie. Cette énergie se rend sur Terre à travers les ondes électromagnétiques: le rayonnement solaire.

### I.2.1 Les caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre :

- L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :
  - l'énergie solaire envoyée par le Soleil, qui fluctue avec son activité de fusion ;
  - la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui est par exemple importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical ;
  - la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil dans le ciel et donc l'énergie reçue par unité de surface au sol [1].

Le rayonnement solaire est distribué sur un large spectre d'amplitude non uniforme avec la forme typique d'une cloche, comme cela est typique du spectre d'un corps noir avec lequel la source solaire est modélisée. Par conséquent, il n'est pas concentré sur une seule fréquence.

Le maximum de rayonnement est focalisé sur la bande de rayonnement ou de lumière visible avec un pic à 500 nm en dehors de l'atmosphère terrestre selon la loi de Wien.

Lors du franchissement de l'atmosphère, le rayonnement solaire est soumis à des phénomènes de réflexion, de réfraction, d'absorption et de diffusion par les différents gaz atmosphériques à un degré variable en fonction de la fréquence. Par conséquent, le sol du spectre solaire est irrégulier par rapport à celui détecté dans les seuils externes de l'atmosphère avec la présence de bandes d'absorption ou de réflexion typiques [2].

### I.2.2 Comment le rayonnement solaire entre dans l'atmosphère :

En raison des caractéristiques de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire subit certaines altérations pour le traverser et atteindre la surface.

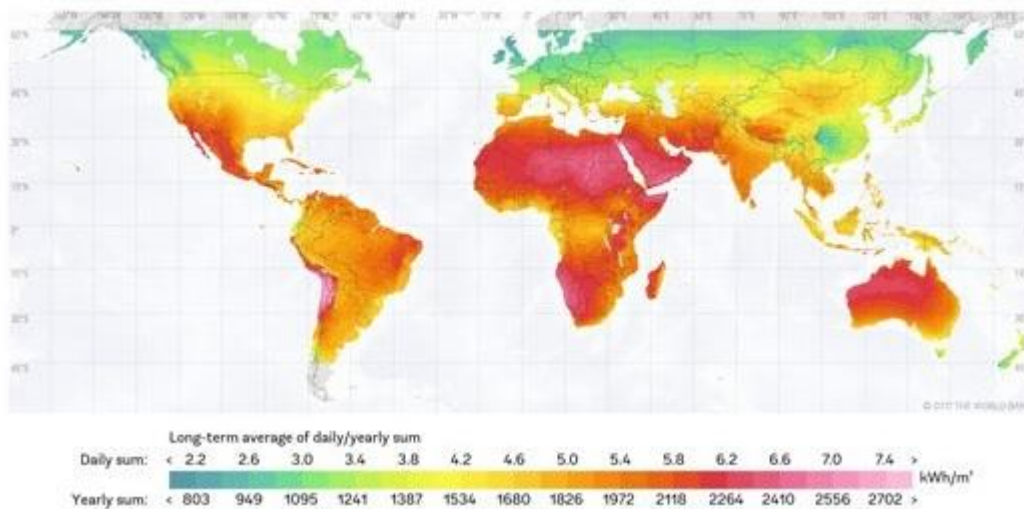
#### **Bilan radiatif**

En moyenne, la Terre reçoit  $1\,366\text{ W / m}^2$  (constante solaire) du Soleil. Ceci est lié aux seuils de l'atmosphère et du plan perpendiculaire aux rayons solaires entrants: il faut donc tenir compte du fait que le rayonnement solaire dans La Terre atteint une calotte sphérique pendant 1 440 minutes chaque jour, diminuant de 75%. L'atmosphère à son tour filtre les rayons du soleil dans une certaine mesure, comme le fait chaque corps, provoquant:

- Une réflexion et une rétrodiffusion des rayons, dues à leur albédo, aux nuages et aux gaz atmosphériques eux-mêmes.

- Une absorption qui provoque une augmentation de la température, à la suite de laquelle il émet un rayonnement dans n'importe quelle direction selon la loi de Wien. Cependant, cette absorption est modeste dans la bande de lumière visible, ce qui la rend transparente aux rayons directs du soleil.

Environ la moitié du rayonnement solaire traverse l'atmosphère sans altération. Le rayonnement est appelé rayonnement net. La moitié du rayonnement net contribue finalement à l'évaporation des masses d'eau, par conséquent, l'énergie solaire disponible représente environ un quart de l'énergie totale émise [2].



*Figure I-1 Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde*

### I.3 L'exploitation de l'énergie solaire

Trois familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui.

#### I.3.1 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire :

- en usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires.
- en usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, dessalement, etc.

De fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-

ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz (dit « caloporteur ») qui la transporte vers un réservoir de stockage de chaleur [1].



*Figure I-2 : un dispositif de conversion de l'énergie solaire thermique*

### **I.3.2 L'énergie solaire thermodynamique**

L'énergie thermique du soleil permet également de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Le principe est identique à celui d'une centrale électrique classique : la production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité. Ce processus nécessite des températures importantes (de 250°C à plus de 1 000°C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs vers un fluide caloporteur.

Parmi les technologies de concentration majeures peuvent être citées :

- les centrales solaires cylindro-paraboliques avec concentration linéaire, équipées d'auges paraboliques ;
- les centrales solaires à miroirs de Fresnel avec concentration linéaire, équipées de lames de miroirs légèrement incurvées ;
- les centrales solaires à tour avec héliostats renvoyant le rayonnement sur le concentrateur ;
- les paraboles solaires Dish-Stirling avec une concentration ponctuelle, équipées d'un moteur Stirling (moteur à air chaud).

Elles permettent le stockage d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Ce stockage permet de diminuer les conséquences de l'intermittence de la ressource solaire en permettant, par exemple, de continuer à produire de l'électricité après le coucher du soleil [1].



*Figure I-3 : L'énergie solaire thermodynamique*

### **I.3.3 L'énergie solaire photovoltaïque (PV) :**

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique ou la technique associée. L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du soleil directement en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

Bien que comptant encore pour une très faible part de la production mondiale d'électricité (environ 2% en 2017 selon l'AIE), le solaire photovoltaïque se voit promettre un grand avenir grâce aux progrès attendus, à la baisse des coûts, à sa simplicité et à sa polyvalence. Pouvant fonctionner avec ou sans raccordement à un réseau, elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison (capteurs sur le toit) ou d'une industrie.

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24 heures sur 24, cette application nécessite

l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'électricité en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement [1].



*Figure I-4 :L'énergie solaire photovoltaïque*

### **I.4 Enjeux par rapport à l'énergie**

#### **Répondre aux enjeux économiques et environnementaux**

L'énergie solaire est souvent considérée comme l'énergie de l'avenir : elle est renouvelable et potentiellement inépuisable à l'échelle humaine. L'enjeu est de taille dans le contexte de dérèglement climatique et de fortes variations des cours des ressources fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole). Ce fort potentiel couplé à la nécessité de réduire les gaz à effet de serre font de l'énergie solaire un axe de développement privilégié aujourd'hui.

#### **Accroître la rentabilité et le rendement**

L'investissement initial dans une centrale solaire est toujours important mais, une fois l'installation amortie, ses frais de fonctionnement sont faibles. De nombreux pays ont mis en place des systèmes d'incitation financière (sous forme de détaxation, de subventions, ou de tarifs avantageux pour le rachat de l'énergie produite) afin d'encourager l'innovation et les premières installations.

L'utilisation de ces systèmes de production d'énergie solaire se justifie immédiatement dans les situations où il est très coûteux de transporter des combustibles (fossiles), de procéder à un

raccordement au réseau électrique, comme pour des appareils isolés (balises marines, horodateurs) ou dans des zones isolées ou peu peuplées [1].

### I.5 Historique :

#### - Du passé jusqu'à présent :

**1839** : Antoine Becquerel (1788-1878) découvre le phénomène photovoltaïque et invente la pile photovoltaïque.

**1912** : première mise en œuvre d'un capteur cylindro-parabolique inventé par Charles Vernon Boys (1855-1944), un physicien anglais.

**1949** : Félix Trombe (1906-1985), un chimiste française, développe les systèmes passifs de chauffage solaire et notamment le « mur Trombe ». Il participe également au développement des fours solaires successifs du site d'Odeillo.

**1959** : lancement de Vanguard I, le premier satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque.

**Années 70** : les deux chocs pétroliers relancent l'intérêt porté aux énergies solaires.

**Années 80** : les développements sont freinés pour des raisons de rentabilité liées notamment aux technologies trop coûteuses.

**Années 1990** : un nouvel essor s'amorce.

**Années 2000** : les énergies solaires thermique et photovoltaïque se développent rapidement.

**Entre 2007 et 2009** : leurs productions énergétiques respectives ont été multipliées par 2 et par 7.

**2012** : la puissance photovoltaïque mondiale raccordée aux réseaux dépasse la barre des 100 GW.

**À fin 2017** : les capacités photovoltaïques mondiales avoisineraient 400 GW électriques selon l'AIE. Les capacités solaires thermiques déployées dans le monde atteindraient quant à elles 472 GW thermiques. (Énergie solaire, 2019)



*Figure I-5: L'évolution des surfaces installées dans l'Union européenne [1]*

### - Futur

Dans le monde, des projets de centrales électriques voient le jour presque partout. Selon Patrick Jourde et Jean-Claude Muller, chercheurs au Commissariat de l'énergie atomique (CEA) et au CNRS, 5% de la surface des déserts permettraient de produire toute l'électricité dont a besoin la planète.

L'électricité d'origine solaire (solaire photovoltaïque et thermodynamique confondus) pourrait représenter jusqu'à 20% à 25% de la production mondiale d'électricité d'ici 2050, estimait l'AIE en mai 2010 lors de la Conférence plan solaire méditerranéen organisée par la présidence espagnole de l'UE [1].

## I.6 Conclusion :

Dans cette section, nous avons brièvement présenté l'intérêt d'énergie renouvelable solaire.

Trois sources d'énergie solaire, qui produisent directement l'électricité, sont ainsi présentées. Parmi ces sources renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque qui a connue des progrès immenses et devient source renouvelable prometteuse dans l'avenir. De plus, sa maintenance relativement facile.

C'est donc cette technologie que va être mise en évidence dans ce travail.

Notre but est de contribuer au développement et à l'optimisation d'une installation utilisant cette source. Dans les sections suivantes, on va détailler les concepts de cette source, puis définir la problématique.

## **II. Energie solaire photovoltaïque :**

### **II.1 Introduction :**

L'énergie solaire, c'est une énergie qui se classe dans la catégorie des énergies renouvelables, car elle est considérée comme inépuisable, à l'échelle humaine au moins. C'est une énergie dite verte parce que sa production n'émet pas -- directement -- non plus de CO<sub>2</sub> [3].

Énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur (le silicium, le CdTe, l'AsGa, le CIS, etc.) d'un photon en électron.

Outre les avantages liés à l'absence de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux.

### **II.2 Définition :**

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique [4].



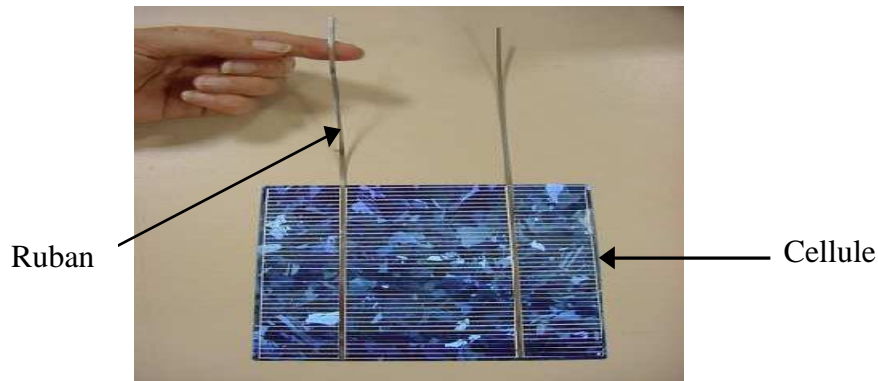
*Figure II-1 Cellules photovoltaïques*

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité [4].

## **II.3 Fonctionnement scientifique**

### **II.3.1 La constitution d'un module photovoltaïque :**

- câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)



**Figure II-2: Ruban métallique d'une cellule.**

- les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR
- connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- les 2 câbles unipolaires sont raccordés

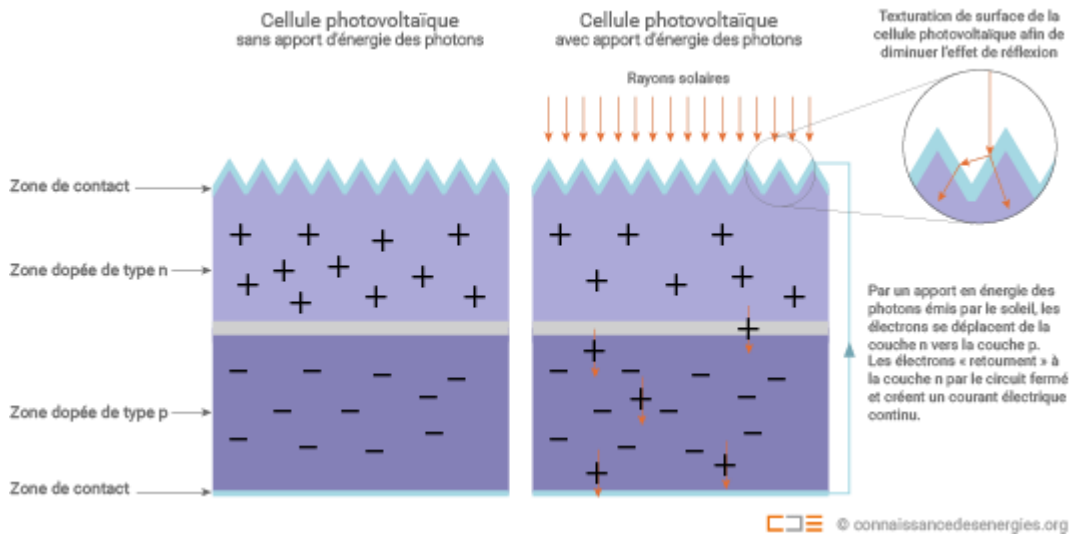
### II.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit

d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p [4].



**Figure II-3: Constitution d'une cellule photovoltaïque**

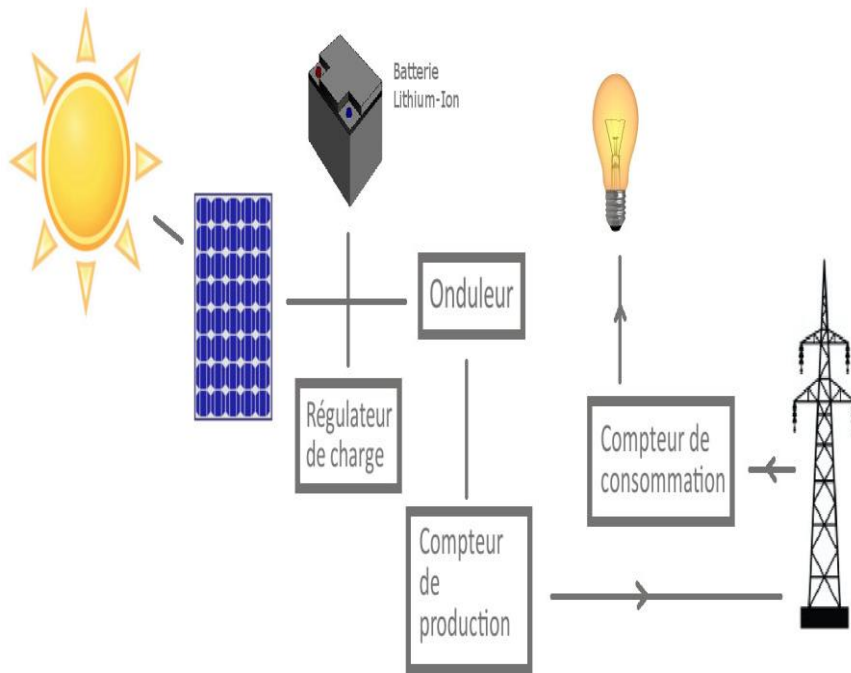
En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité (courant continu) [4].

Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles [5].

### II.3.3 Les principaux composants d'un système photovoltaïque



*Figure II-4 : système photovoltaïque connecté au réseau*

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent du type d'application :

➤ En site isolé les principaux composants sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- chargeur/régulateur DC/DC
- Système de stockage (batteries, condensateurs, ...)
- Eventuellement un onduleur si la consommation est alimentée en courant alternatif.

#### **Facultatif :**

- Eventuellement un groupe électrogène en appoint
- système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

➤ En système photovoltaïque connecté au réseau les principaux composants sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- Coffret de coupure et de protection courant continu DC
- Onduleurs
- Coffret de coupure et de protection courant alternatif AC

#### **Facultatif :**

- système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

**Remarque :** Le coffret de protection peut être de type AC/DC en intégrant les protections continues (entrée onduleur DC) et alternatives (sortie onduleur AC).

La structure de support peut-être un élément très important en cas d'intégration au bâtiment.

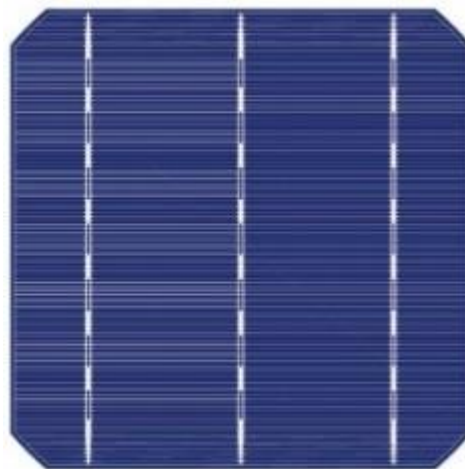
## II.4 Les types des cellules :

### II.4.1 Le solaire photovoltaïque non concentré

Les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial.

#### Les cellules monocristallines

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse [4].



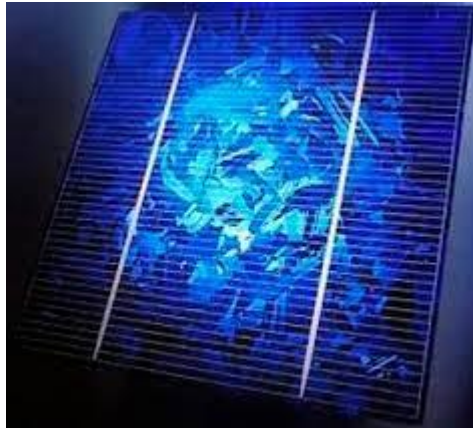
*Figure II-5 : Cellule monocristallin*

#### Les cellules polycristallines

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre.

Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules polycristallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé de 12% à 17% selon l'institut allemand Fraunhofer [4].

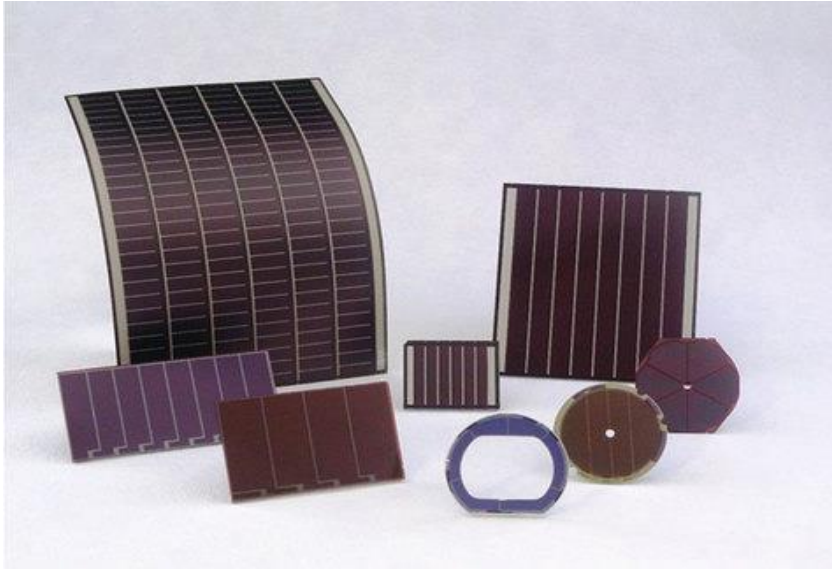


*Figure II-6 : Cellule polycristallin*

**Le silicium amorphe (a-Si) :**

Est une forme non cristalline de silicium qui est largement utilisée dans les calculatrices, l'électronique grand public et les produits de jardin solaire qui nécessitent un petit courant à basse tension. Parmi les différents types de cellules photovoltaïques disponibles, le silicium amorphe a la plus forte absorption de lumière de plus de 40 fois supérieure à celle du silicium cristallin. L'avantage de ceci est qu'une couche beaucoup plus mince de matériau de silicium amorphe est nécessaire pour faire une cellule PV mince de film réduisant les coûts de fabrication et le prix.

Les cellules de silicium amorphe présentent divers avantages et inconvénients. Du côté positif, le silicium amorphe peut être déposé sur une variété de substrats rigides et flexibles à faible coût tels que les polymères, les métaux fins et les plastiques ainsi que le verre teinté pour l'intégration des bâtiments. Cependant, du côté négatif, deux des principaux inconvénients du silicium amorphe (a-Si) est son très faible rendement de conversion allant de 7 à 9% lorsqu'il est neuf, se dégradant en quelques mois d'exposition au soleil à moins de 5 % [6].



*Figure II-7: Amorphous Silicone*

#### **II.4.2 Le solaire photovoltaïque concentré**

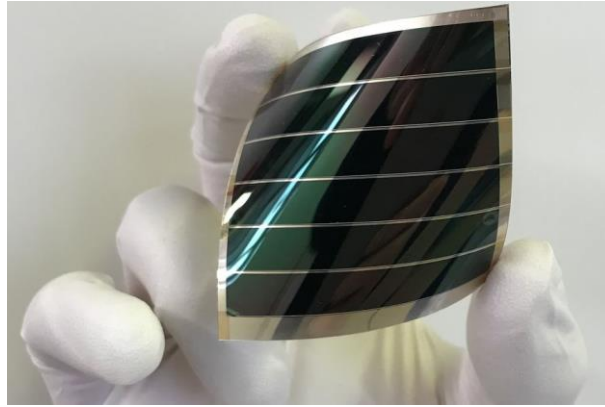
Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. A puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe.

Cette technologie devrait pénétrer le marché dans un avenir proche.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85%. Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46%.

#### **Les cellules organiques (polymères)**

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques. D'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements dépassant légèrement 10% en laboratoire mais pourraient servir de base au développement d'une filière industrielle. (Solaire photovoltaïque, 2017)



*Figure II-8 : Cellule organique*

### **Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque**

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche<sup>(6)</sup> ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique [4].

### **Cellule solaire à couche mince**

Les cellules solaires à couche mince sont d'autres types de cellules photovoltaïques qui ont été initialement développées pour des applications spatiales avec un meilleur rapport puissance-taille et poids par rapport aux dispositifs de silicium cristallin précédents. Les panneaux photovoltaïques en couches minces sont produits par impression ou pulvérisation d'une mince couche semi-conductrice de matériau PV sur un substrat en verre, métal ou feuille plastique.

En appliquant ces matériaux en couches minces, l'épaisseur globale de chaque cellule photovoltaïque est sensiblement plus petite qu'une cellule cristalline de coupe équivalente, d'où le nom de « couche mince ». Comme les matériaux photovoltaïques utilisés dans ces types de cellules photovoltaïques sont pulvérisés directement sur un substrat de verre ou de métal, le processus de fabrication est donc plus rapide.

Cependant, bien que les matériaux en couches minces aient une absorption de lumière plus élevée que les matériaux cristallins équivalents, les cellules PV en couches minces souffrent d'une faible efficacité de conversion cellulaire en raison de leur structure cristalline non absorbante, nécessitant des cellules de plus grande taille. Les matériaux semi-conducteurs utilisés pour les types de cellules photovoltaïques à couche mince comprennent : le Telluride de cadmium, le silicium amorphe et le diSelenide d'indium de cuivre ou CIS [6].



*Figure II-9 : couches minces*

**Le Telluride de cadmium (CdTe) :**

Est un matériau semi-conducteur poly cristallin à base de cadmium et de tellure. Le Telluride de cadmium à couche mince a un niveau élevé d'absorption de la lumière, de sorte que la quantité de CdTe requise peut être assez minime avec moins de 1,0 micron de matériau semi-conducteur est nécessaire pour absorber efficacement la lumière du soleil pour que le dispositif solaire fonctionne [6].



*Figure II-10 : Le Telluride de cadmium*

**Cuivre Indium diSelenide (CIS) :**

Est un autre type de matériau semi-conducteur polycristallin composé de cuivre, Indium et sélénium ( $\text{CuInSe}_2$ ). Les cellules photovoltaïques de type CIS en couches minces peuvent produire des rendements de conversion de près de 10 %, soit près du double de celui du silicium amorphe sans subir les mêmes problèmes de dégradation extérieure en raison de leur film plus

épais. De plus, les cellules de la CEI sont l'un des composés semi-conducteurs les plus absorbants qui absorbent jusqu'à 90 % du spectre solaire.

Bien que Copper Indium diSelenide, les cellules CIS sont efficaces, la complexité de la formulation du composé semi-conducteur les rend difficiles à fabriquer et coûteux. En outre, l'indium est un matériau relativement coûteux en raison de sa disponibilité limitée avec des problèmes de sécurité de fabrication préoccupants, car le séléniure d'hydrogène est un gaz extrêmement toxique [6].



*Figure II-11 : Cuivre Indium diSelenide*

**Cuivre Indium Gallium diSelenide (CIGS) :**

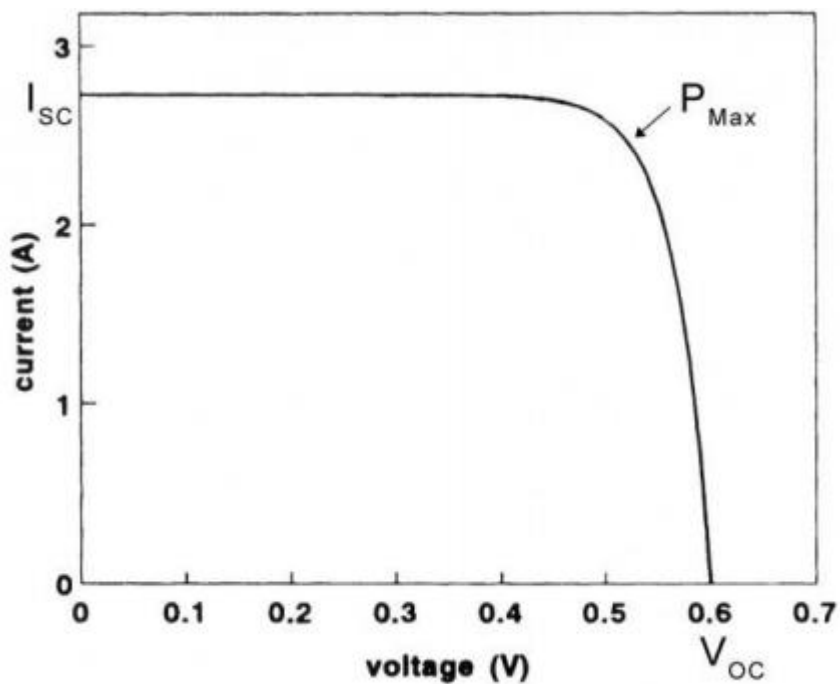
Est un autre type de cellule photovoltaïque. Il s'agit essentiellement d'un matériau à couche mince poly-cristalline de type P basé sur le matériau semi-conducteur précédent de l'indium de cuivre (CIS). L'ajout de petites quantités du composé Gallium (Ga) produit une cellule photovoltaïque avec une efficacité de conversion supérieure d'environ 12% à partir de la même quantité de lumière du soleil avec une tension en circuit ouvert d'environ 0,7 volt. C'est parce que le gallium, qui est un liquide semblable au mercure à température ambiante, augmente l'écart de bande absorbant la lumière de la cellule, qui correspond plus étroitement au spectre solaire, améliorant ainsi sa conductivité permettant aux électrons de se déplacer librement à travers la cellule vers les électrodes [6].



*Figure II-12 : Cuivre Indium Gallium diSelenide*

## II.5 Paramètres photovoltaïques :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire PV. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique  $I(V)$ .



*Figure II-13 : Courbe IV de cellule PV*

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

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

**Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )**

Comme son nom l’indique, c’est la tension aux bornes de la cellule lorsqu’elle n’est pas connectée à une charge ou lorsqu’elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l’éclairement de la cellule [7].

$$v_{co} = \frac{kT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \qquad \text{Équation II-1}$$

Avec :

$KT_c/q$  : : représentant la potentielle thermodynamique

$T_c$ : est la température absolue

$q$  : la constante de charge d’électron,  $1.602 \cdot 10^{-23}C$

$K$ : la constante de Boltzmann,  $1.38 \cdot 10^{-23}J/k$

$I_{ph}$  : le courant photonique

$I_s$  : le courant de saturation

**Facteur de forme FF :**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d’une cellule ou d’un générateur PV : c’est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l’objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [8]. .

Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{v_{co} \cdot I_{cc}} \qquad \text{Équation II-2}$$

**Le rendement  $\delta$ :**

Le rendement,  $\delta$  des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$

$$\delta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad \text{Équation II-3}$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

**II.6 Influence de la résistance :**

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique  $I(V)$ .

**Influence de la résistance série :**

La figure (2-17) montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque.

La résistance en série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance.

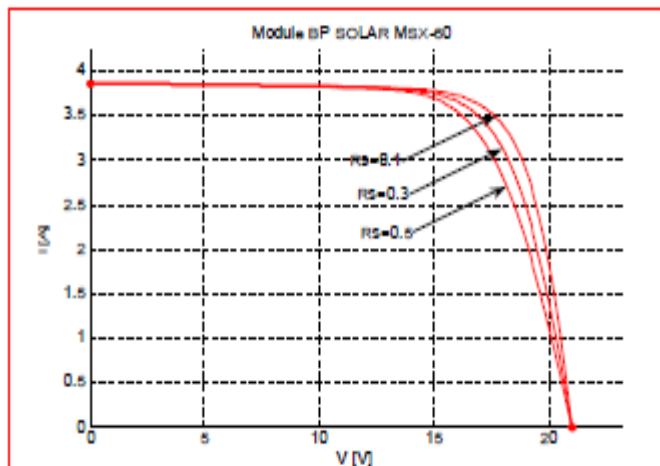
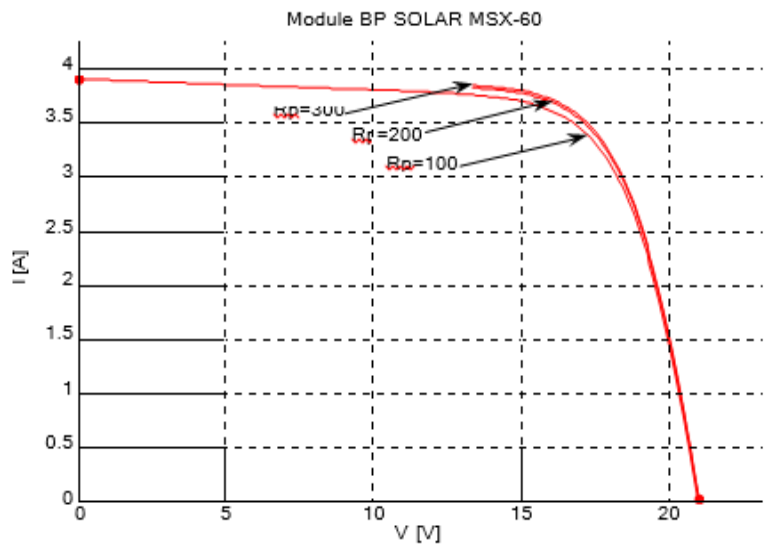


Figure II-14 : L'effet de la résistance en série sur la courbe de la cellule  $I(V)$

- Les performances du module PV diminuent quand la résistance  $R_s$  augmente, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance  $R_s$  soit la plus petite que possible.



**Figure II-15 : L'effet de la résistance en parallèle sur la courbe de la cellule I(V)**

- Les performances du module PV diminuent quand la résistance  $R_p$  diminue, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance  $R_p$  soit la plus grande que possible.

Pour permettre un ensemble cohérent de comparaisons pour un modèle donné, la même condition de référence est choisie pour chaque modèle, (la performance de la cellule solaire est normalement évaluée dans les conditions d'essai normalisé (STC), où un spectre solaire moyen de AM 1.5 est employé, l'éclairement est normalisé à  $1000\text{W/m}^2$ , et la température de  $25^\circ\text{C}$ ).

## II.7 Influence des paramètres extérieurs :

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

### Influence de l'éclairement :

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante  $25^\circ\text{C}$ , figure 2-19, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale  $P_{max}$ . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (à vide) varie très peu.

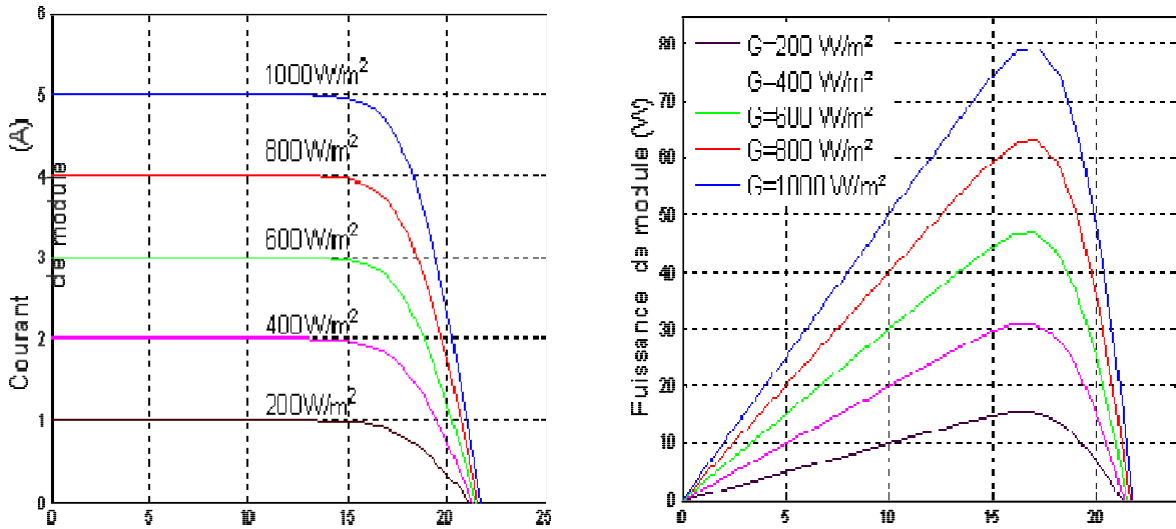


Figure II-16: Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'irradiation

**Influence de la température :**

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires.

La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure 2-20 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000W.m-2.

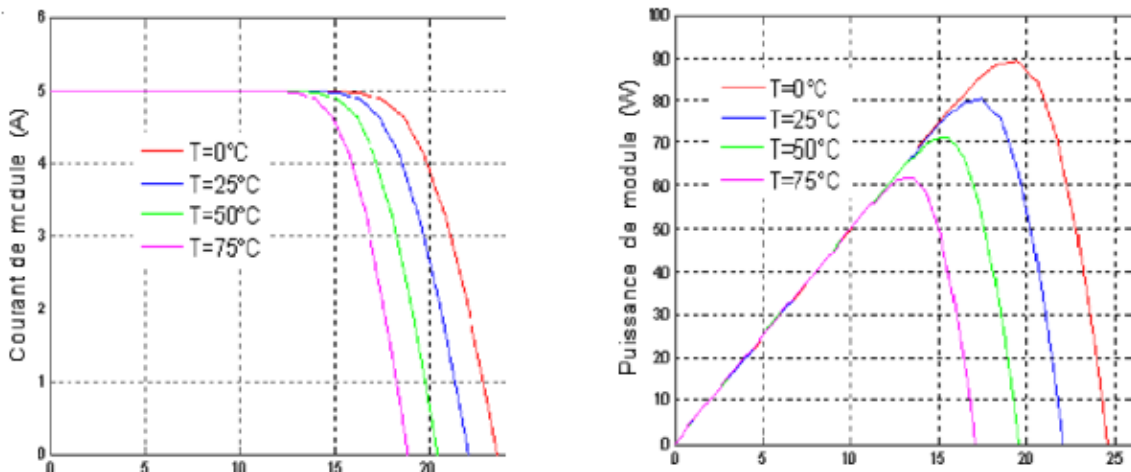


Figure II-17 : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour différentes températures

Si la température croît à irradiation constante, la tension à vide  $V_{co}$  décroît avec la température. Plus la température est élevée plus  $V_{co}$  est faible et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur  $I_{cc}$  peut être négligée dans la majorité des cas.

**Conclusion :**

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

**II.8 Les modèles des cellules PV :**

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

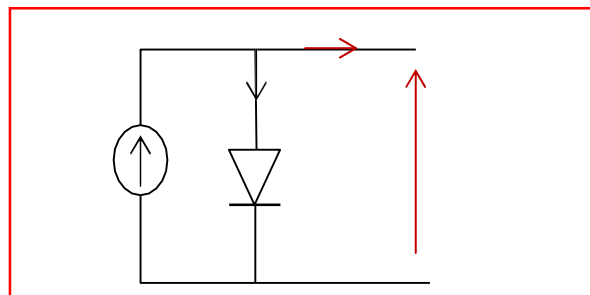
On présentera deux modèles du GPV à savoir :

- Model idéal
- Modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle)

**II.8.1 Modèle idéal :**

Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque représentée dans la figure II-18, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle [9].

La source du courant produit le photon courant  $I_{ph}$  qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire  $G$ .



**Figure II-19 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal-**

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit:

$$I = I_{PV} - I_D \quad \text{Équation II-4}$$

Avec :

I : courant fourni par la cellule

$I_{PV}$  : photon-courant de la cellule proportionnelle à l'éclairement (G)

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V}{\alpha V_T} \right) - 1 \right] \quad \text{Équation II-5}$$

Avec :  $V_T = \frac{k.T}{q}$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V}{\alpha V_T} \right) - 1 \right] \quad \text{Équation II-6}$$

Avec :

$I_0$  : courant de saturation inverse de la diode.

$V_T$ :potentielle thermodynamique.

$k$  : la constante de Boltzmann ( $1.38.10^{-23}$  Joules/Kelvin).

$T$  : la température de la cellule en Kelvin.

$q$  : la charge d'un électron = $1,6.10^{-19}$ C.

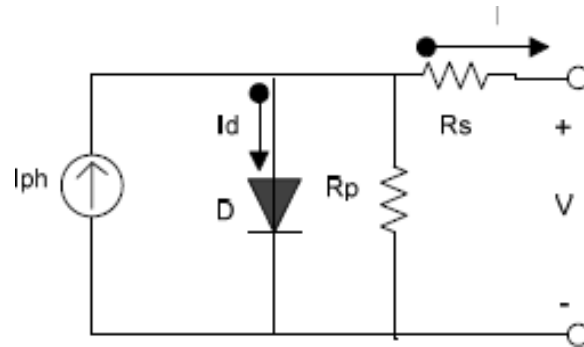
$\alpha$  : le facteur d'idéalité de la jonction.

$V$  : la tension aux bornes de la cellule.

### II.8.2 Modèle à une diode :

En fait, la cellule solaire n'est pas exactement idéale. C'est pourquoi des modèles plus précis ont été développés pour donner des résultats plus réalistes dans l'analyse. En d'autres termes, Eq. (II-7) ne décrit pas avec précision le comportement d'une cellule PV. Un modèle plus pratique est le modèle mono-diode représenté à la figure II-20. Les résistances série et parallèle ont été ajoutées au modèle précédent. Des résultats plus précis sont obtenus à partir de ce modèle, bien qu'il consomme plus de temps de calcul. Équation II-8 donne le courant de sortie :

$$I = I_0 - I_{ph} \left[ \exp \left( \frac{V + I R_s}{\alpha V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad \text{Équation II-9}$$



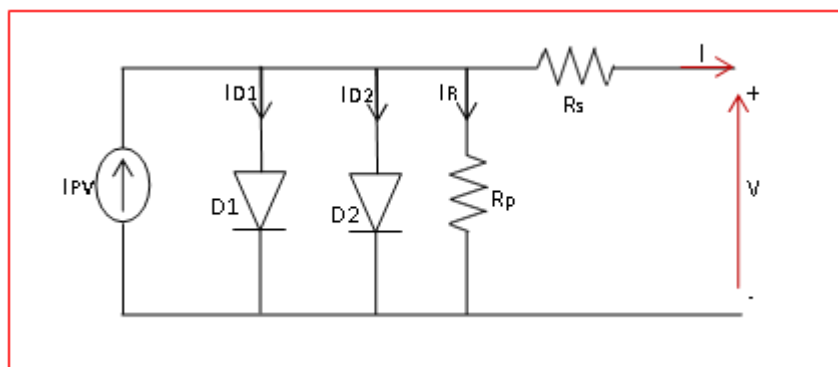
*Figure II-21 : schéma équivalent du Modèle à une diode*

### II.8.3 Modèle à deux diodes :

Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme du transfert des charges à l'intérieur de la cellule, la diode supplémentaire permet de reproduire dans le schéma équivalent les effets chimiques de recombinaison des électrons.

Les modèles à diode unique ont été fondés sur l'hypothèse que la perte de recombinaison dans la région d'appauvrissement est absente. Dans une cellule solaire réelle, la recombinaison représente une perte considérable, qui ne peut être adéquatement modélisés en utilisant une seule diode. L'examen de cette perte entraîne un modèle plus précis connu par le modèle à deux diodes. Toutefois, l'inclusion de la diode supplémentaire augmente les paramètres à sept (nouveaux paramètres:  $I_{02}$ ,  $a_2$ . Le principal défi est maintenant d'estimer les valeurs de tous les paramètres du modèle, tout en maintenant un effort de calcul raisonnable.

Le modèle à deux diodes est présenté comme suit :



*Figure II-22 : schéma équivalent d'un modèle à 2 diodes*

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

$$I = I_{pv} - I_{0s} \left[ \exp\left(\frac{V+R_s}{a_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+R_s}{a_2 V_{T2}}\right) \quad \text{Équation II-10}$$

Avec :

$I_{01}$  : courant de saturation inverse de la diode D1.

$I_{02}$  : courant de saturation inverse de la diode D2.

$V_{T1}$ :potentielle thermodynamique de la diode D1.

$V_{T2}$ :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.9 Les avantages et les inconvénients :

### II.9.1 Avantages

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.
- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle (par exemple, la ferme solaire de Toul-Rosières en Lorraine) [4].

### II.9.2 Limites

- La technologie photovoltaïque est encore coûteuse même si son coût de production (LCOE) a fortement baissé au cours des dernières années (avec un coût de production de 70 à 90 \$/MWh dans certaines zones aujourd'hui, des installations photovoltaïques

atteignent parfois localement une « parité de prix » avec des moyens « conventionnels » de production électrique).

- Les panneaux photovoltaïques les plus répandus, faits de silicium cristallin, sont lourds, fragiles et difficiles à installer.
- Une centrale requiert de vastes espaces bien que la densité tende à être améliorée (exemple de la centrale photovoltaïque de Bresse-sur-Issole en Provence : 1,2 hectare par mégawatt installé).
- L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.
- L'énergie électrique n'est pas « directement » stockable, c'est-à-dire sous sa forme primaire. Il est en revanche possible de la stocker « indirectement » dans des batteries sous forme chimique ou dans des accumulateurs cinétiques sous forme mécanique. Les technologies existantes sont encore coûteuses [4].

## II.10 Acteurs majeurs

Durant plusieurs années, les installations de panneaux photovoltaïques ont été accélérées par des programmes nationaux d'incitations financières telles que des tarifs de rachats bonifiés de l'électricité produite pour le réseau public. Les États jouent donc un rôle clé dans le développement de la filière.

Le marché mondial de cellules et de panneaux photovoltaïques est dominé par une poignée de pays (Chine, Taïwan, Japon, Malaisie, Allemagne, États-Unis). La société chinoise Suntech Power est devenue en 2009 le premier producteur mondial de panneaux photovoltaïques. Sharp (Japon), JA Solar (Chine) et First Solar (Malaisie) sont d'autres grands noms de ce secteur (auquel il convenait notamment d'ajouter, jusqu'à 2012, l'entreprise allemande Q-Cells qui a déposé le bilan cette année-là) [4].

## II.11 Historique :

### - **Passé et présent**

**1839** : Antoine Becquerel publie un mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatif à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant.

**1877** : W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium, et C. Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium.

**1905** : Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique, ce pour quoi il obtient un prix Nobel en 1921.

**1954** : D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, deux ingénieurs des Bell Téléphone Laboratoires (États-Unis), annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6 %, la recherche progresse jusqu'à obtenir un rendement de 9%, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque.

**1959** : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques.

**Années 1970** : les crises pétrolières renforcent l'intérêt et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque, L'Université Delaware est à l'origine de la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques en 1973.

**1978** : le premier mégawatt crête installé est atteint dès 1978.

**De 2010 à 2016** : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW).

- En 2014, le solaire (photovoltaïque et thermodynamique inclus) a généré près de 197,1 TWh d'électricité dans le monde, soit environ 0,8% de la production mondiale d'électricité selon les dernières données de l'Irena.
- A fin 2016, la capacité installée du parc mondial solaire photovoltaïque a dépassé 300 gigawatts (GW) installés, selon la PV Market Alliance.

Selon l'AIE, les filières photovoltaïque et thermodynamique auront des contributions équivalentes en 2050 en termes de production énergétique. Environ 80% de la production mondiale de modules photovoltaïques est encore à base de plaquettes de silicium cristallin. Le reste utilise des couches minces déposées sur une surface, solution plus économique en matière de coûts de fabrication mais avec des rendements inférieures [4].

### - **Futur**

L'industrie du photovoltaïque se tourne aujourd'hui vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future.

Enfin, la recherche sur le stockage d'électricité sera également importante. Ce thème transversal de l'énergie concerne plus particulièrement le solaire photovoltaïque puisque le caractère compétitif de cette technologie dépendra beaucoup de la capacité à adapter sa production pour répondre aux besoins ponctuels [4].

### **II.12 Conclusion :**

Dans cette section, nous avons présenté un système de production photovoltaïque. Le contexte nous a permis de présenter le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, les différents types et modèles, les composants et propriétés d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque en fonction de la température et de l'éclairement, ainsi les avantages et les inconvénients.

### III. Optimisation par Les méthodes métaheuristiques

#### III.1 INTRODUCTION :

La complexification croissante des problèmes d'optimisation, a entraîné le développement d'une grande quantité de méthodes de résolution. La globalité de ces techniques d'optimisation dans les différentes publications, se devise typiquement en deux grandes classes dont le premier classement des méthodes exactes (déterministes). Et une grande partie de l'effort de recherche dans le second classement les méthodes approchées (stochastique), plus spécifiquement dans les domaines de la recherche Meta heuristique.

Plusieurs définitions des Meta heuristiques ont été proposées dans la littérature, parmi lesquelles:

**Définition 1 :** « Le mot Meta heuristique est dérive de la composition de deux mots grecs : méta qui signifie « au-delà » ou « a un plus haut niveau » et heuristique du grec Erikson qui signifie « je trouve » d'où le célèbre Eureka d'Archimède. Une heuristique, ou méthode approximative, est un algorithme qui fournit rapidement (en temps polynomial) une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation NP difficile.

Les méthodes dites méta heuristiques sont des méthodes générales, des heuristiques polyvalentes applicables sur une grande gamme de problèmes. Elles peuvent construire une alternative aux méthodes heuristiques lorsqu'on ne connaît pas l'heuristique spécifique a un problème donne. Selon la définition proposée en 1996 par Osman et Laporte.

**Définition 2 :** « Une Meta heuristique est un processus itératif qui subordonne et guide une heuristique, en combinant intelligemment plusieurs concepts pour explorer et exploiter tout l'espace de recherche. Des stratégies d'apprentissage sont utilisées pour structurer l'information afin de trouver efficacement des solutions optimales, ou presque-optimales».

#### III.2 Une brève histoire de la metaheuristique:

Tout au long de l'histoire, surtout au début de l'histoire humaine, l'approche de la résolution des problèmes a toujours été heuristique ou metaheuristique par essai et erreur. De nombreuses découvertes importantes ont été faites, et souvent par accident; C'est une heuristique :

- Le moment "Eureka!" d'Archimède était un triomphe heuristique.

- Le mathématicien Alan Turing a probablement été le premier à utiliser des algorithmes heuristiques pendant la Seconde Guerre mondiale lorsqu'il travaille les chiffres de l'énigme au parc Bletchley. En 1948, Turing a exposé ses idées novatrices d'intelligence mécanique et l'apprentissage, les réseaux de neurones et les algorithmes évolutifs.
- En 1997, Rainer Storm et Kenneth Price ont développé leur algorithme évolutif basé sur les vecteurs appelé évolution différentielle (DE), qui s'avère plus efficace que les algorithmes génétiques dans de nombreuses applications.
- En 1995, des progrès plus significatifs ont été enregistrés avec le développement de l'optimisation des essaims de particules (PSO) par le psychologue social américain James Kennedy, et l'ingénieur Russell C. Eberhart.

PSO est un algorithme d'optimisation inspiré par l'intelligence des poissons et des oiseaux, et même par le comportement humain.

### **III.3 Classification des algorithmes d'optimisation :**

Il existe de nombreuses possibilités de classification des algorithmes d'optimisation. Principalement, ils peuvent être classés en deux catégories, qui sont : Les algorithmes d'optimisation locale et les algorithmes d'optimisation globale.

La différence entre les deux types peut être clarifiée à l'aide d'une analogie simple : le sommet de chaque montagne est un optimum local puisqu'il s'agit du niveau le plus élevé de son voisinage, mais seul le sommet de la plus haute montagne est un optimum global. En suivant l'analogie, l'optimisation locale trouve un optimum local qui n'est pas très éloigné de l'estimation initiale. Alors que l'optimisation globale recherche un espace plus grand pour trouver un optimum global.

Dans notre travail, tous les algorithmes utilisés sont des algorithmes d'optimisation globale.

#### **III.3.1 Algorithmes d'optimisation locale :**

L'optimisation locale trouve la valeur optimale dans l'ensemble voisin de solutions candidates. En général, les performances de ces méthodes dépendent fortement des valeurs initiales fournies. Cela signifie que l'optimisation peut devoir être exécutée plusieurs fois, avec différentes estimations initiales. La méthode Newton Raphson (NR) est un exemple dans cette catégorie. NR utilise une estimation initiale pour commencer, et les  $n$  itérations sont effectués

jusqu'à ce qu'un optimum local soit obtenu. L'inconvénient est que si l'estimation initiale est éloignée de la solution réelle, cette méthode sera bloquée et divergera.

### III.3.2 Algorithmes d'optimisation globale :

Dans ce projet, des métaheuristicques sont utilisées. Les métaheuristicques peuvent être adaptées pour résoudre un large éventail de problèmes d'optimisation. Ces méthodes sont conçues pour trouver une bonne solution parmi un large ensemble de solutions réalisables avec moins d'effort de calcul que d'autres techniques d'optimisation.

### III.4 Optimisation des essaims de particules (PSO) :

L'algorithme PSO est une méthode d'optimisation méta-heuristique qui a été présentée pour la première fois par Kennedy et Eberhart. Leur idée était inspirée par le comportement social d'animaux tels que le vol des oiseaux ou la migration des poissons. En été, on constate un groupe d'oiseaux (ou un banc de poissons) peuvent voler (nager) ensemble en symbiose en maintenant un contact mutuel entre eux qui se manifeste en actions organisées (recherche de nourriture, protection mutuelle, . . .), le plus souvent utiles pour tous les membres du groupe.

D'un point de vue de modélisation mathématique, ce mouvement collectif d'animaux 'flocking' le résultat d'un comportement d'individus autonomes (position et vitesses distinctes) qui respectent un certain nombre de règles simples et n'impliquant aucune coordination centrale mais qui, au final, arrivent à réaliser des mouvements coordonnés complexes difficile à réaliser autrement.

L'algorithme PSO fait appel à un certain nombre de particules dispersées dans l'espace de recherche. Chaque particule a une vitesse aléatoire, de sorte que l'algorithme dépend à la fois de la position et de la vitesse de chaque particule.

D'un point de vue mathématique, l'algorithme PSO utilise un essaim constitué de particules  $n_p \in \mathbb{N}$ , à savoir  $(X_i)_{i=1;2; \dots; n_p}$  à la recherche de la solution sous-optimale  $X^* \in \mathcal{N}^{q \times 1}$  qui minimise la fonction objectif, appelée  $J \in \mathcal{R}$ . La position et la vitesse des vecteurs de particule  $i^{\text{th}}$  sont respectivement donnés par  $X_i = (X(i;1); X(i;2); \dots; X(i;q))^T$  et  $V_i = (V(i;1); V(i;2); \dots; V(i;q))^T$ .

Ils sont déterminés par les expressions itératives suivantes:

$$V_i^{l+1} = c_0 \cdot V_i^l + c_1 \cdot r_{1,i}^l (X_i^{best,l} - X_i^l) + c_2 \cdot r_{2,i}^l (X_{swarm}^{best,l} - X_i^l) \quad \text{Équation III-1}$$

$$X_i^{l+1} = X_i^l + V_i^{l+1}$$

Où :

- $l = 1; 2; \dots; l_{\max}$  est le nombre d'itérations fourni préalablement par l'utilisateur.
- $C_0, C_1$  et  $C_2$  sont respectivement le facteur d'inertie, les rapports d'apprentissage cognitif (individuel) et social (groupe).
- $r_{1,i}^l$  et  $r_{2,i}^l$  Sont des nombres aléatoires uniformément répartis sur l'intervalle  $[0; 1]$ .
- $X_i^{best,l}$  et  $X_{swarm}^{best,l}$  Sont respectivement la meilleure position obtenue précédemment par la particule et la meilleure position obtenue dans l'ensemble de l'essaim à l'itération en cours  $l$  et qui sont données par [Équation III-2] et [Équation III 3]:

$$X_i^{best,l} = \min_{X_i^l} \{J(X_i^l), 0 \leq j \leq l\} \quad \text{Équation III-3}$$

$$X_{swarm}^{best,l} = \min_{X_i^l} \{J(X_i^l), \forall i\} \quad \text{Équation III-4}$$

### III.4.1 Les étapes de l'algorithme :

En résumé, l'algorithme PSO peut être constitué des étapes-procédures suivantes :

**Étape1 :** Initialiser les  $np$  particules avec des positions choisies au hasard et qui devraient être Précédemment contenues dans l'intervalle  $\Omega \in (X_{\min}; X_{\max})$ , où  $X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}$ . Ensuite, évaluer la fonction objective pour chaque position. Fixer en fin le nombre d'itérations  $l = 0$  et déterminer les solutions initiales  $X_i^{best,l}$  et  $X_{swarm}^{best,l}$  en utilisant Équation III 2 et Équation III 3. Aller à l'étape suivante.

**Étape2 :** Vérifier la condition de fin de recherche. Si elle est satisfaite, algorithme converge alors vers la solution. Sinon, passer à l'étape suivante.

**Étape3 :** Affecter les nouvelles valeurs obtenues à toutes les particules (mises à jour d'équation III-5 Et de Équation III 2 et Équation III 3. Evaluer de nouveau la fonction objective pour chaque position. Ensuite, remplacer le nombre d'itérations  $l$  par  $l+1$  et déterminer  $X_i^{best,l}$  et  $X_{swarm}^{best,l}$ . Revenir à l'étape 2.

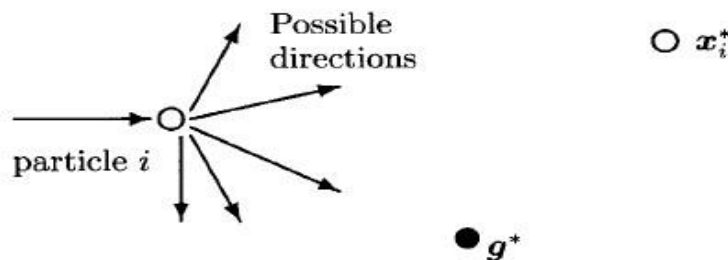


Figure III-1 : Représentation schématique du mouvement d'une particule dans PSO

Organigramme :

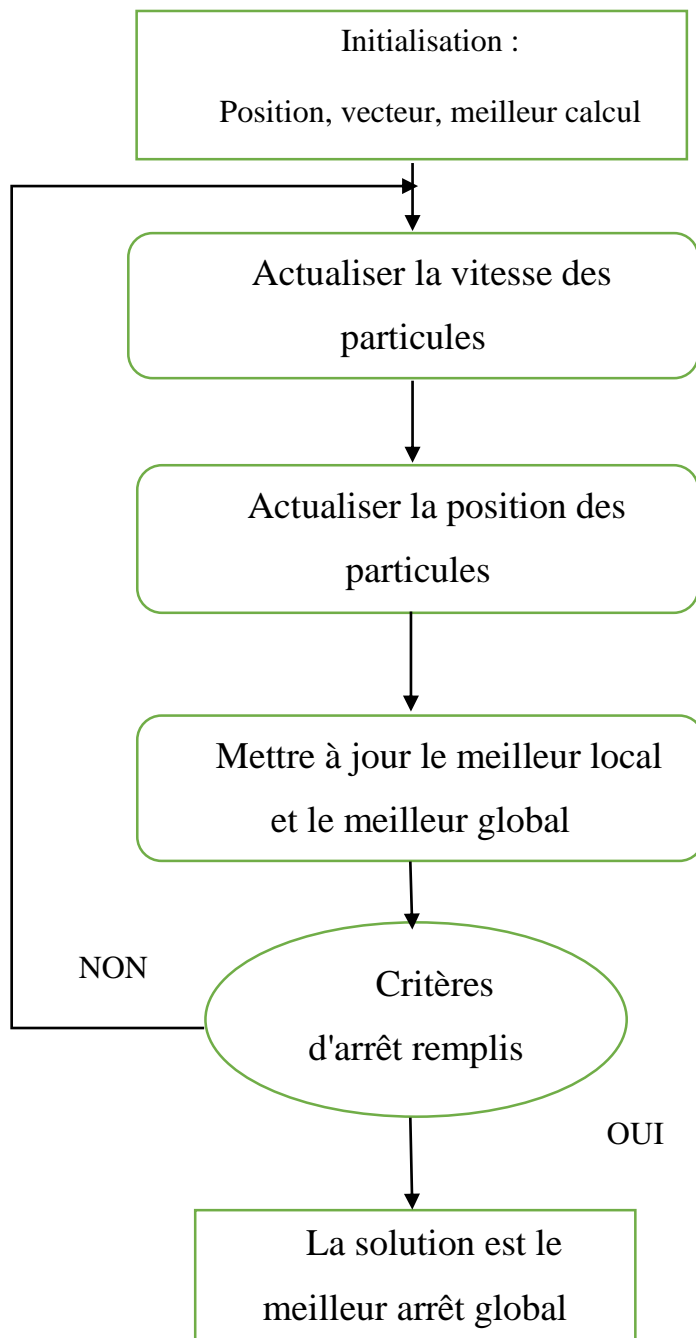


Figure III-2 : Organigramme de l'algorithme PSO

### III.5 Algorithme d'évolution différentielle (DE)

L'évolution différentielle est un algorithme d'évolution d'optimisation basé sur la population, développé pour optimiser des fonctions à paramètres réels et à valeurs réelles. DE commence avec une population aléatoire initiale, indiquée par  $P$ , qui comprend des individus candidats de dimension  $NPD$ . Ainsi, les individus de la génération  $Gth$  de la population initiale peuvent être représentés par  $(x1G, x2G, xNPG)$ , où  $G = 0, 1, \dots, Gmax$  désigne les temps de génération et

$G_{max}$  est le temps maximal de la génération. Chaque individu candidat est en fait un vecteur paramètre de dimension  $D$  (vecteur cible) dans les limites indiquées par  $x_i^G = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D)$ , où  $i$  indique le vecteur paramètre  $i^{th}$ . Ensuite, les individus entrent dans une boucle du processus évolutif jusqu'à ce qu'ils satisfassent le critère de terminaison.

### III.6 Étapes de DE :

#### III.6.1 Initialisation :

Les bornes supérieure et inférieure de chaque paramètre sont définies :  $x_j^L \leq x_j \leq x_j^U$  La population initiale est générée à l'aide de l'équation suivante :

$$x_{i,j} = LB_j + rand * (UB_j - LB_j) \quad \text{Équation III-6}$$

$$j = 1, 2, \dots, D$$

Où :

- rand renvoie un nombre aléatoire uniformément distribué sur l'intervalle (0,1)
- $LB_j$ ,  $UB_j$  sont les bornes inférieure et supérieure dans la dimension  $j^{th}$ , respectivement.

#### III.6.2 Mutation :

Après l'initialisation, la stratégie de mutation est utilisée dans chaque individu  $x_i^G$  pour obtenir le vecteur mutant  $v_i^G$  à la génération  $G$ . Les stratégies de mutation sont présentées ci-dessous :

$$v_i^G = x_{r1}^G + F * (x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad \text{Équation III-7}$$

- Les indices  $r1$ ,  $r2$ ,  $r3$  sont des entiers mutuellement distincts produits aléatoirement à partir de  $\{1, 2, \dots, NP\}$  et ils sont inégaux à l'indice  $i$ .
- Le nombre réel  $F$  est le facteur d'échelle du vecteur de différence.
- $X_{best}^G$  désigne le meilleur individu, c'est-à-dire le vecteur paramètre qui obtient la meilleure valeur de fitness dans la population courante.

#### III.6.3 Croisement :

Dans le but d'augmenter la diversité de la population, l'opération de croisement est effectuée en mélangeant le vecteur cible  $x_i^G$  avec le vecteur muté  $v_i^G$  pour générer le vecteur de croisement (vecteur d'essai)  $u_i^G$  comme suit :

$$u_{i,j}^G = \begin{cases} v_{i,j}^G & \text{if } rand * u_{i,j} \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{i,j}^G & \text{otherwise} \end{cases}$$

Où :

- $i \in [1, NP], j \in [1, D]$
- CR représente le taux de croisement déterminé par l'utilisateur, qui contrôle le nombre de dimensions héritées d'un vecteur mutant.

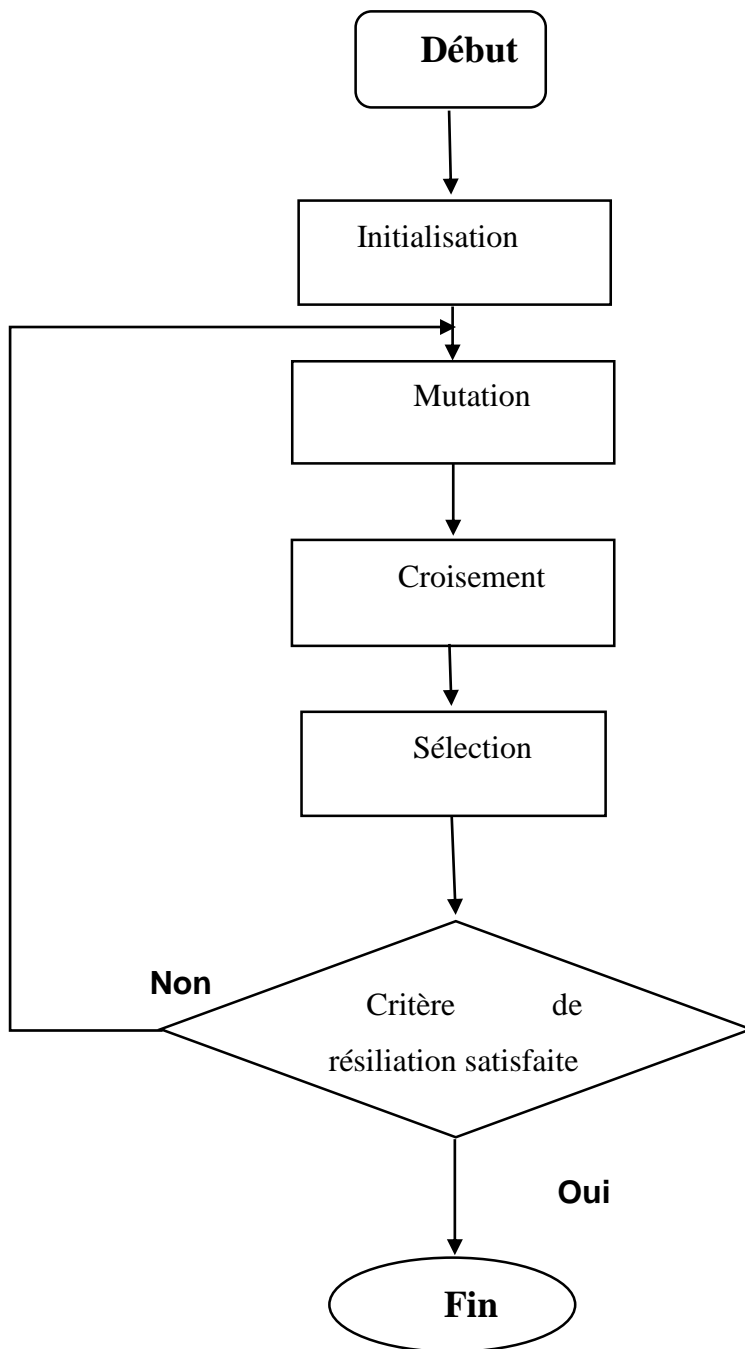
### III.6.4 Sélection

A la fin, DE met en œuvre la sélection gloutonne pour décider si le vecteur cible ou le vecteur d'essai est réservé à la génération suivante. Pour un problème de minimisation, l'opérateur de sélection est le suivant :

$$X_I^{G+1} = \begin{cases} u_i^G & \text{if } f(u_i^G) \leq f(x_i^G) \\ x_i^G & \text{otherwise} \end{cases}$$

Où :  $f(x)$  est la fonction objective (fonction de fitness) à minimiser.

**Organigramme :**



*Figure III-3 : Organigramme de l'algorithme DE*

**III.7 Conclusion :**

Ce chapitre présente une famille de techniques d'optimisation, appelées "métaheuristiques", adaptées à la résolution de problèmes pour lesquels il est difficile de trouver un optimum global ou de bons optimums locaux par des méthodes plus classiques.

Parmi ses méthodes on a choisit l'optimisation des essaims de particules (PSO) et évolution différentiel (DE).

## IV. Simulation et Analyse des résultats

### IV.1 Introduction :

Pour modéliser un module PV, plusieurs paramètres doivent être obtenus. La modélisation est importante, que ce soit à des fins pédagogiques ou pour évaluer réellement les performances d'un panneau PV. L'extraction des paramètres nécessaire à la modélisation d'un module photovoltaïque (PV), qui reste un problème multi-variable et non-linéaire a récemment gagné une attention considérable dans la simulation et le calcul des systèmes photovoltaïques. L'extraction de ces paramètres peut se faire en utilisant soit la fiche technique du fabricant, soit des données expérimentales réelles.

Les méthodes utilisées pour l'extraction peuvent être classées en trois catégories : méthodes analytiques, méthodes itératives et méthodes méta-heuristiques. Dans ce projet, les algorithmes mentionnés dans le chapitre précédent (PSO et DE) ont été adaptés pour répondre à l'objectif d'extraction des paramètres PV d'un modèle à une diode en utilisant des données expérimentales

### IV.2 Les Méthodes d'extraction des paramètres :

Deux méthodes, analytique et méta-heuristique, ont été choisies pour une comparaison des paramètres de sortie et de la puissance de 4 types de panneaux dans ce chapitre.

#### IV.2.1 Méthode analytique :

La méthode choisie pour la modélisation est celle d'un système électrique équivalent à une diode présentée par les équations suivantes :

Le courant délivré par une cellule photovoltaïque est donné par :

$$I = I_{ph} - I_s * \exp\left(\frac{V+R_s*I}{aV_t} - 1\right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad \text{Équation IV-1}$$

#### Expressions analytiques pour l'extraction des paramètres du modèle :

Les Expressions analytiques suivantes présentent les paramètres de base du modèle choisi

:

$$a = \frac{V_m + I_m R_{s0} - V_{oc}}{V_T \left[ \ln\left(I_{sc} - \frac{V_m}{R_{p0}} - I_m\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}\right) + \frac{I_m}{I_{sc} - \left(\frac{V_{oc}}{R_{p0}}\right)} \right]} \quad \text{Équation IV-2}$$

$$I_0 = \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p} \right) * \exp \left( - \frac{V_{oc}}{nV_T} \right) \quad \text{Équation IV-3}$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{nV_T}{I_0} \exp \left( - \frac{V_{oc}}{nV_T} \right) \quad \text{Équation IV-4}$$

$$R_{s0} = \left( - \left( \frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} \right) \quad \text{Équation IV-5}$$

$$R_p = R_{p0} = - \left( \frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{sc}} \quad \text{Équation IV-6}$$

$$I_{ph} = I_{sc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \quad \text{Équation IV-7}$$

#### IV.2.2 Méthode metaheuristique :

C'est la méthode de simulation choisie dans ce travail, Il s'agit d'une méthode assez nouvelle par rapport aux précédentes. Dans cette méthode, aucune estimation initiale n'est nécessaire, seule la plage autorisée des paramètres à optimiser est fournie. Cela permet une plus grande flexibilité pour examiner de nombreuses solutions candidates potentielles et améliorer leur aptitude en conséquence.

La fonction objective à minimiser est l'erreur quadratique moyenne (RMSE) du courant expérimental et estimé. La RMSE est donnée par l'équation :

$$I(\theta) = I_{ph} - I_s * \exp \left( \frac{V_{i,measured} + R_s I_{i,measured}}{aV_t} - 1 \right) - \frac{V_{i,measured} + R_s I_{i,measured}}{R_p} \quad \text{Équation IV-8}$$

$$F(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i,mesurer} - I_{i,estimer})^2} \quad \text{Équation IV-9}$$

$$I = I_{ph} - I_s * \exp \left( \frac{V + R_s I}{N_s a V_T} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad \text{Équation IV-10}$$

$\theta = [a, I_0, I_{ph}, R_p, R_s]$  : Paramètre à calculés

Les étapes à suivre dans cette partie de simulation par les méthodes méta-heuristiques pour l'extraction des paramètres PV sont présentées ci-dessous :

- Tous les algorithmes utilisés dans cette section sont des algorithmes basés sur la population.
- Les données expérimentales (courant et tension) des modules PV sont lues à partir de fichiers Excel. Les quatre modules PV utilisés sont : **Condor CEM150M, Kyocera KC125 GHT, Sanyo HIP-190B2-BO-01, et Siliken SLK60P6L.**

## Chapitre 4 : Simulation et Analyse des résultats

- Le nombre d'itérations et le nombre de populations sont choisis. En règle générale, puisque le nombre de paramètres est de cinq, le nombre de populations est choisi pour être dix fois supérieur (nombre de populations = 50). Le nombre maximal d'itérations est fixé à 1000.

- Les coefficients de l'algorithme sont initialisés ; ces coefficients peuvent être ajustés au cours du programme en fonction de l'algorithme.

- Une population initiale aléatoire est initialisée dans les limites des paramètres. Chaque membre de la population  $pop_i$  est un vecteur des cinq paramètres d'intérêt :

$$Pop_i = [a ; R_p ; I_{pv} ; I_o]$$

- Le fitness (RMSE) de chaque membre de la population (solution candidate) est évalué.

- Les membres de la population sont mis à jour, les conditions limites étant vérifiées et respectées, afin d'obtenir un meilleur RMSE.

- Les algorithmes fonctionnent pendant un nombre défini d'itérations et donnent la plus petite valeur de RMSE obtenue.

- À la fin de l'exécution des programmes MATLAB, les résultats voulus sont obtenus : Les 5 paramètres du modèle de diode unique, les courbes I-V avec les courants expérimentaux et calculés, et un graphique de la RMSE en fonction du nombre d'itérations.

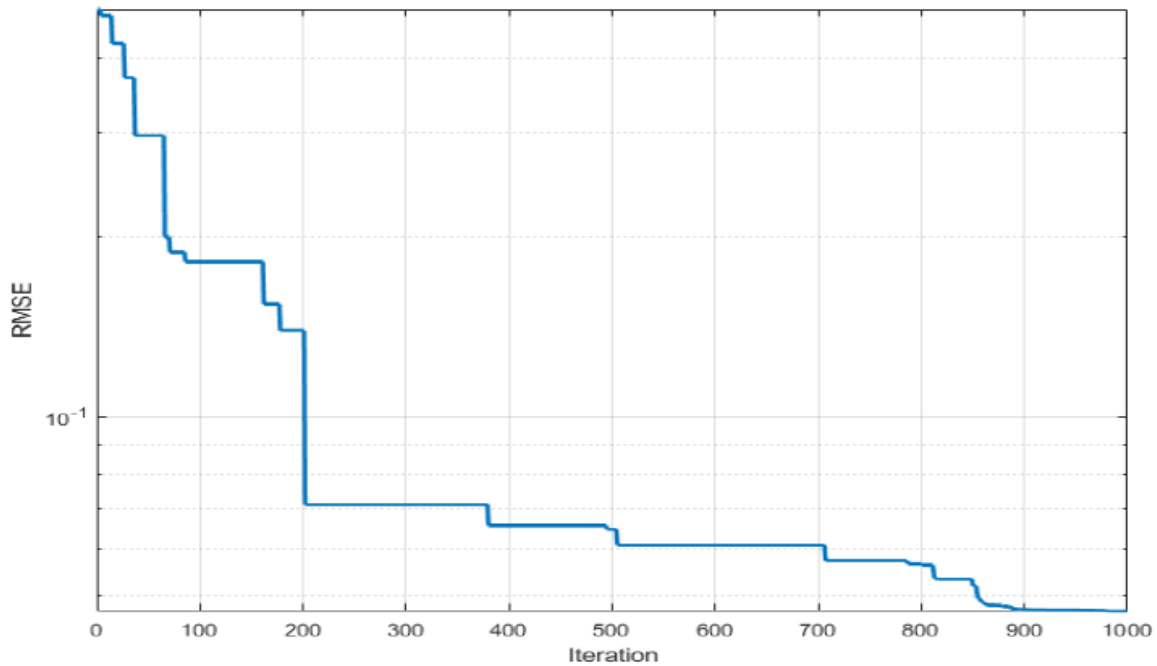
### IV.2.3 Résultats :

Dans cette partie où nous allons comparer les valeurs expérimentales données par le centre de recherche CDER filière de Ghardaïa pour la journée 08-08-2016 les données expérimentales mesurées représentent le courant et la tension délivrés par les panneaux en fonction de la variation de la résistance de charge fixe par le chercheur. Des graphes montrant la RMSE en fonction du nombre d'itérations et des courbes montrant la puissance maximale de chaque module.

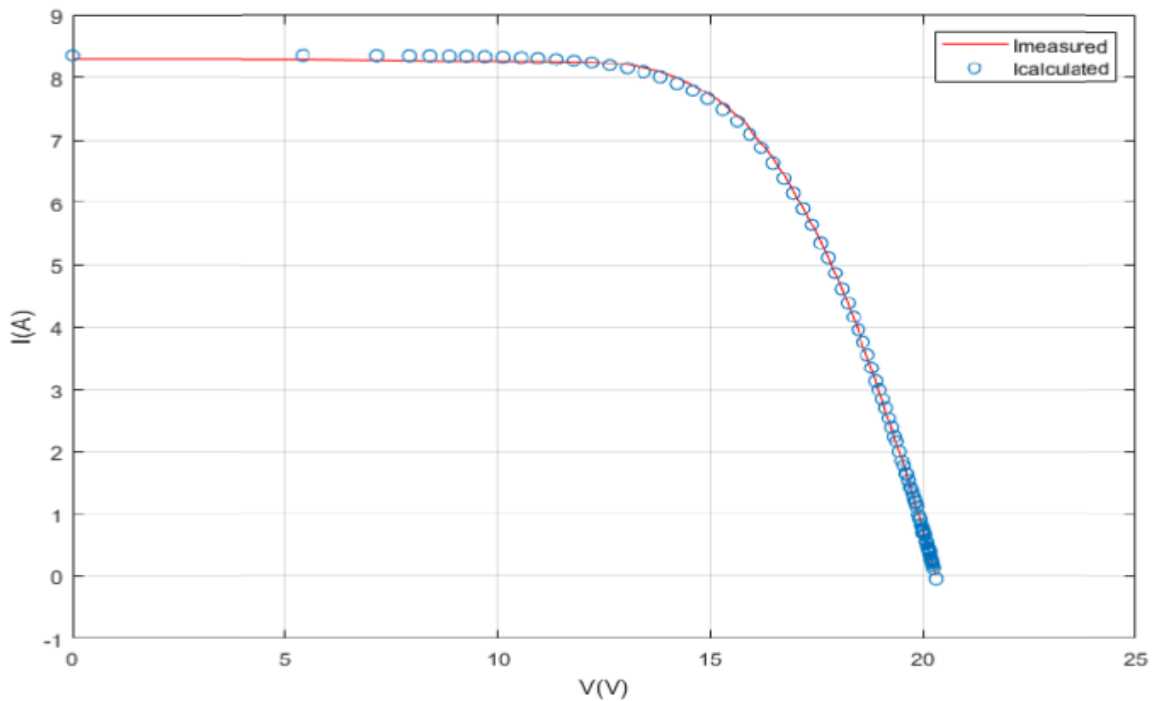
### IV.3 Résultats de PSO :

Dans ce qui suit nous allons présenter les résultats de la fitness du modèle PSO ainsi que les paramètres de I obtenus par cette méthode.

**Condor CEM150M :**



*Figure IV-1 : RMSE en fonction du nombre d'itérations obtenue avec la méthode PSO pour le panneau condor*



*Figure IV-2 : les deux courbes superposent I-V pour les courants calculés par PSO et mesurés du module PV Condor CEM150M.*

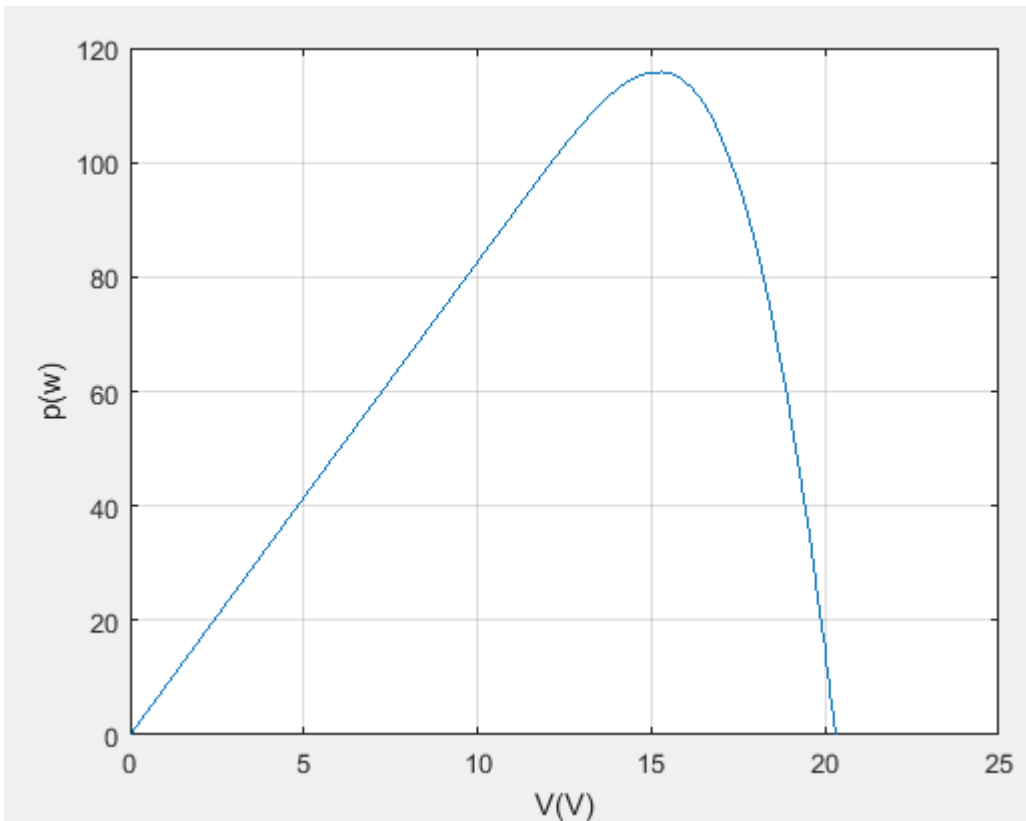


Figure IV-3 : Courbe P-V obtenue par Pso du module PV

**Kyocera KC125GHT:**

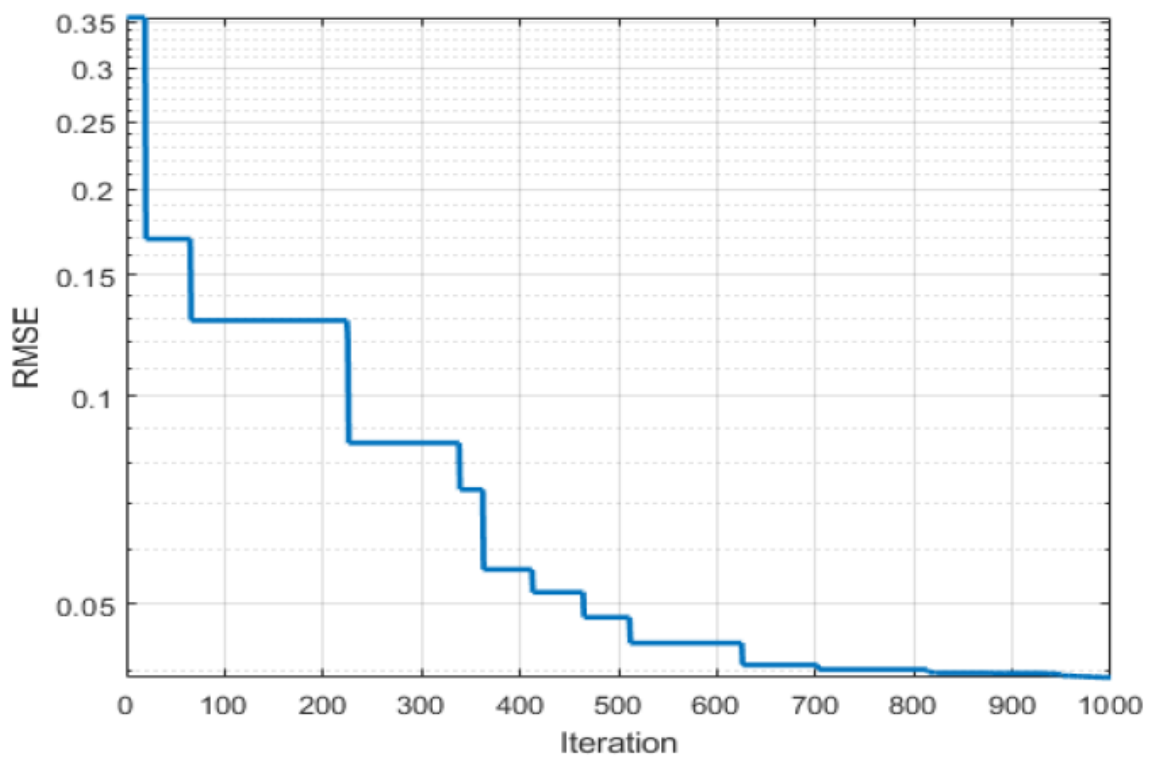
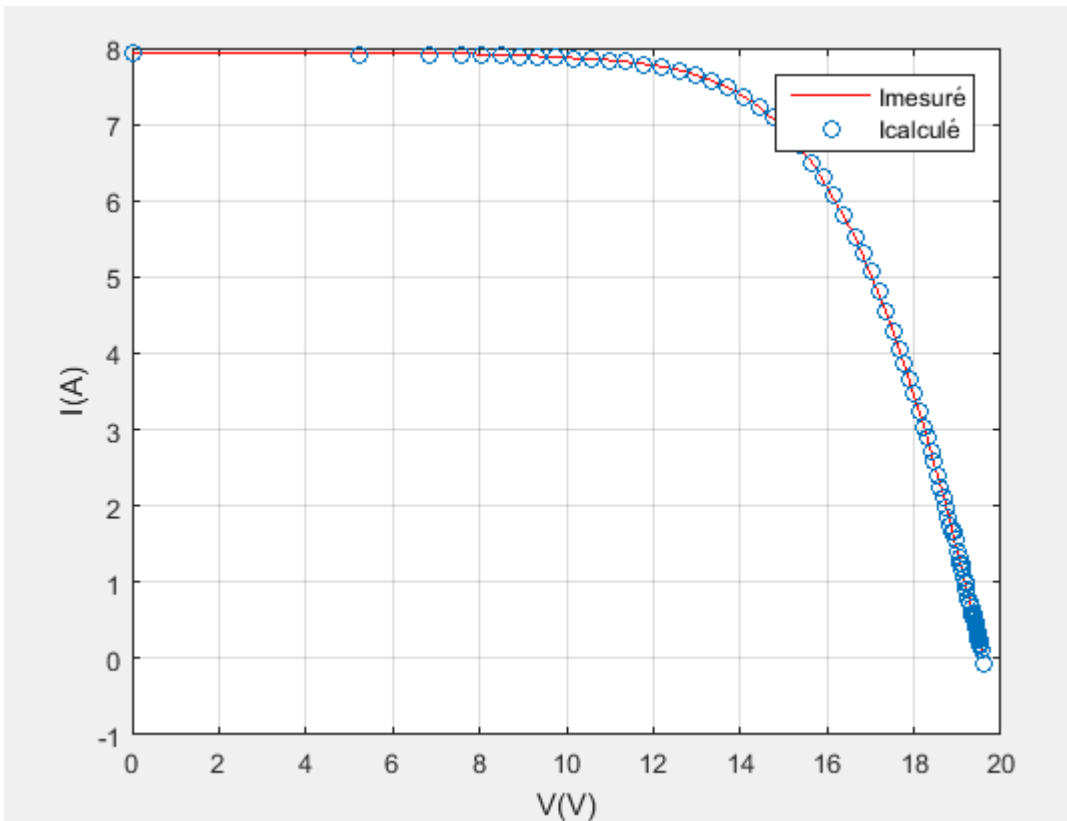
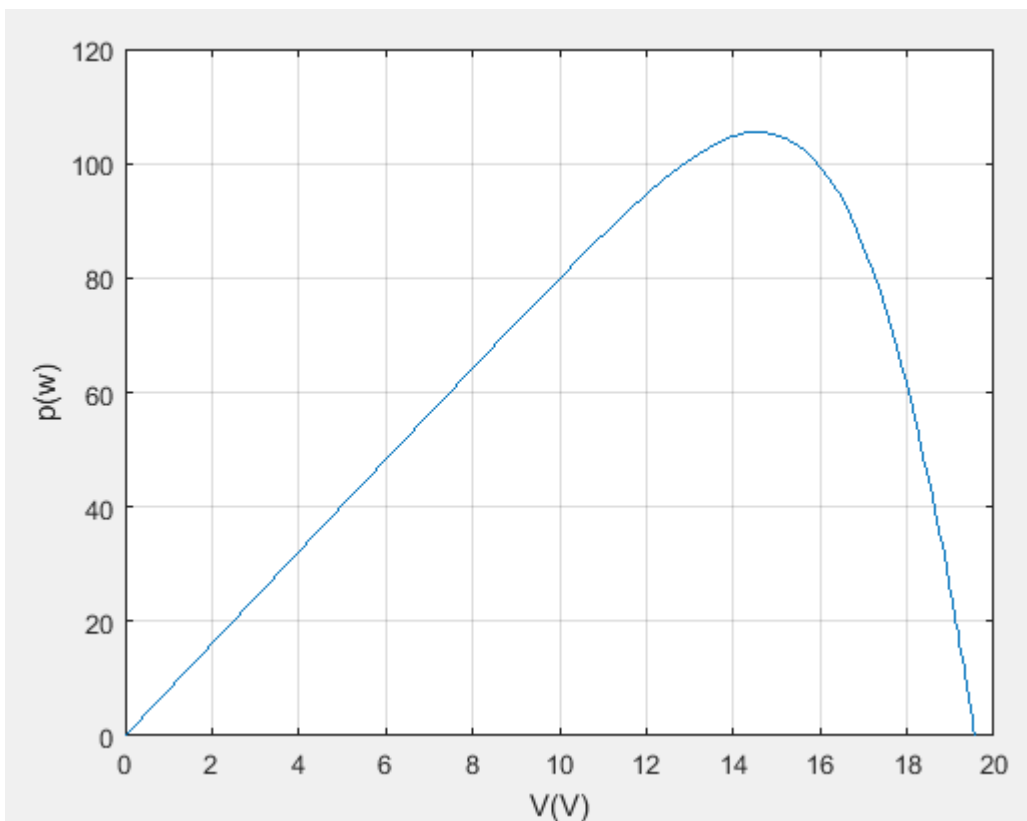


Figure IV-4 : Graphe RMSE en fonction de l'itération en utilisant PSO sur les données du module PV Kyocera KC125GHT.

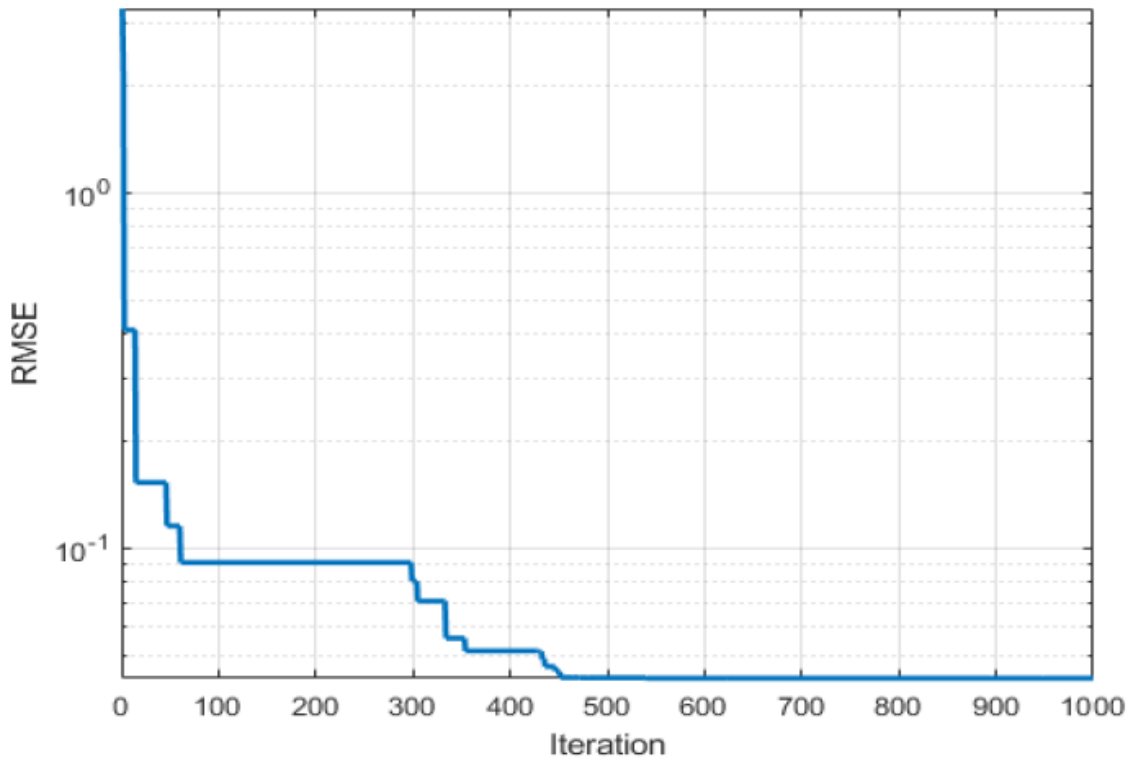


*Figure IV-5: les deux courbes superposent I-V pour les courants calculés par PSO et mesurés module PV Kyocera KC125GHT.*

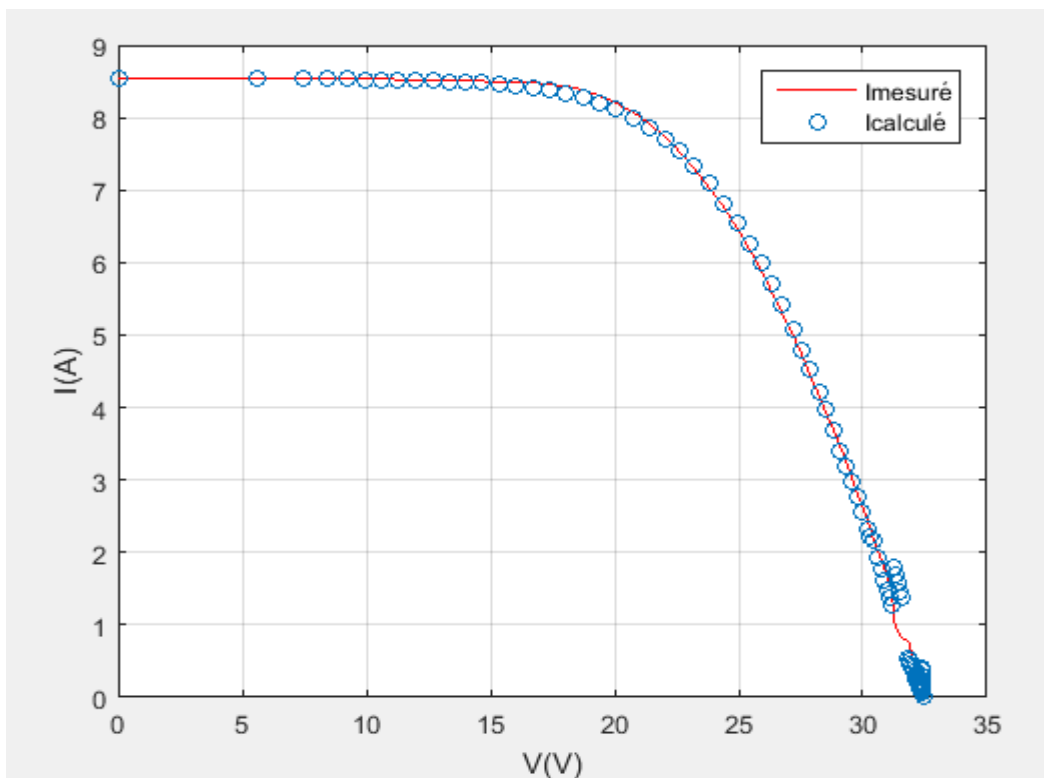


*Figure IV-6 : Courbe P-V montrant les puissances calculées (par Pso) du module PV*

**Siliken SLK60P6L:**



*Figure IV-7 : Graphe RMSE en fonction de l'itération en utilisant PSO sur les données du module PV Siliken SLK60P6L.*



*Figure IV-8 : les deux courbes superposent I-V pour les courants calculés par PSO et mesurés du module PV Siliken SLK60P6L*

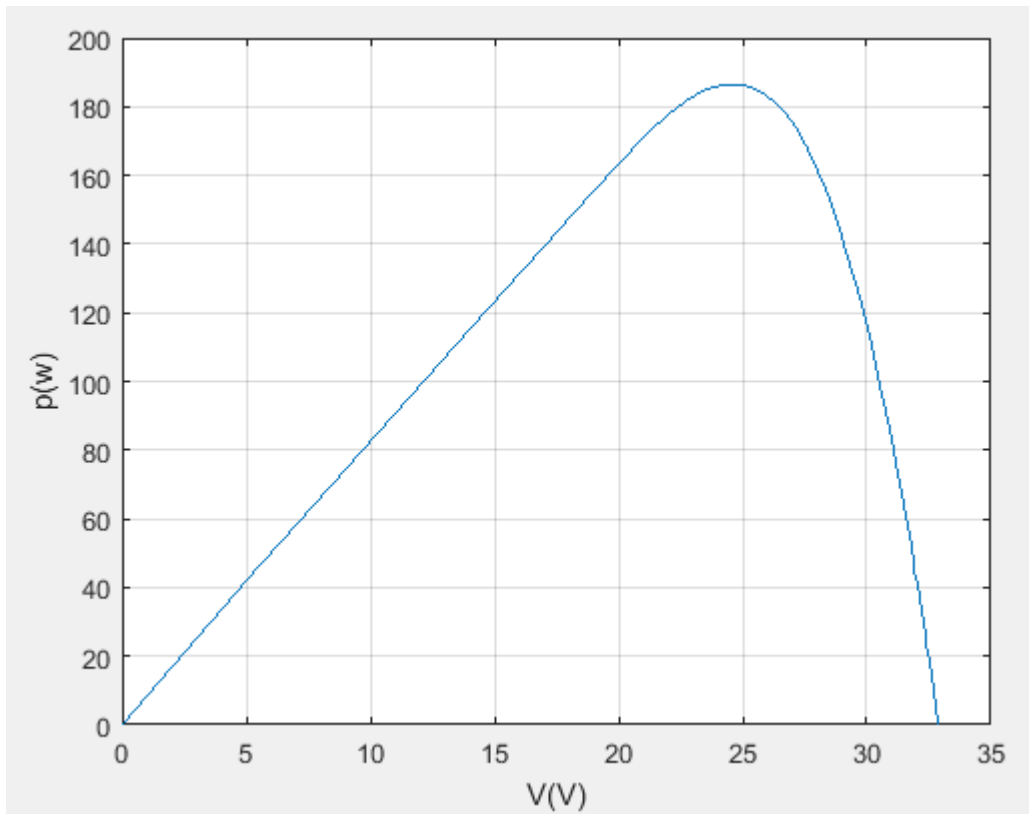


Figure IV-9 : Courbe P-V montrant les puissances calculées par (Pso) du module PV

Sanyo HIP-190B2-BO-01:

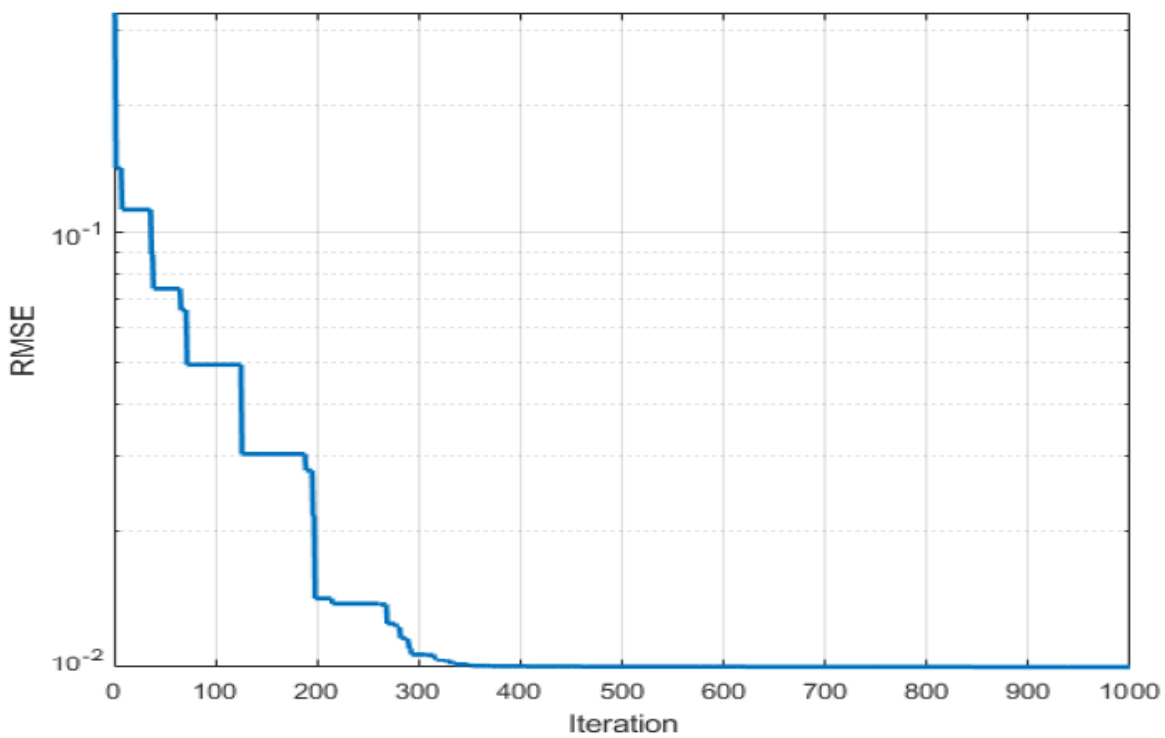
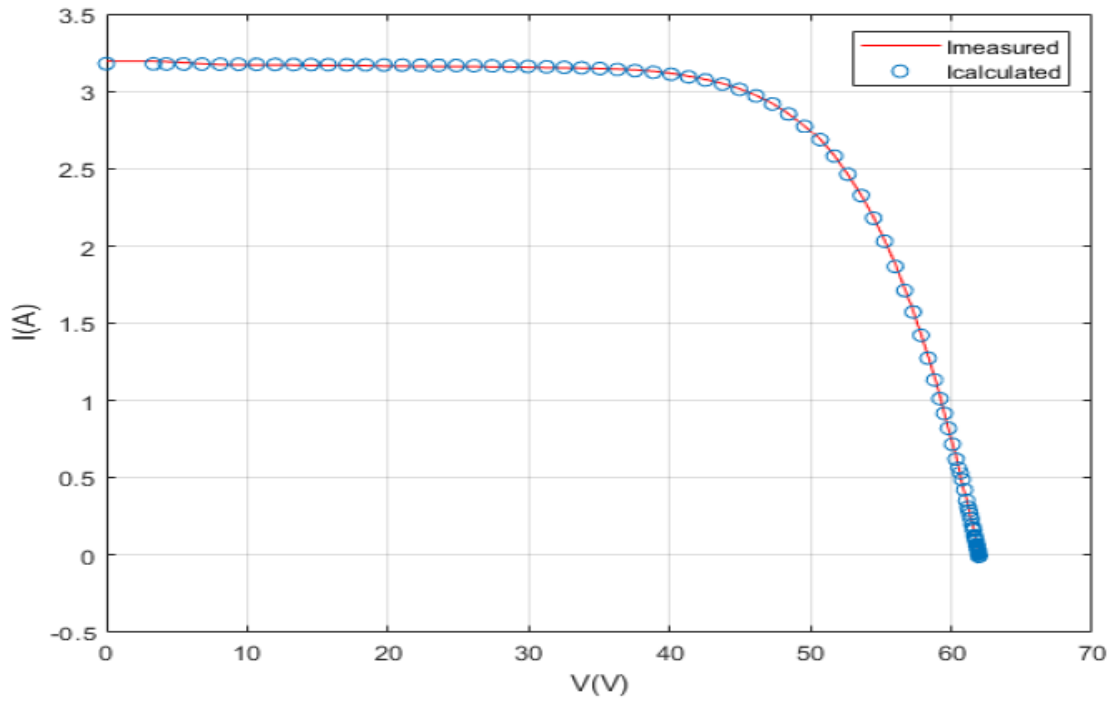
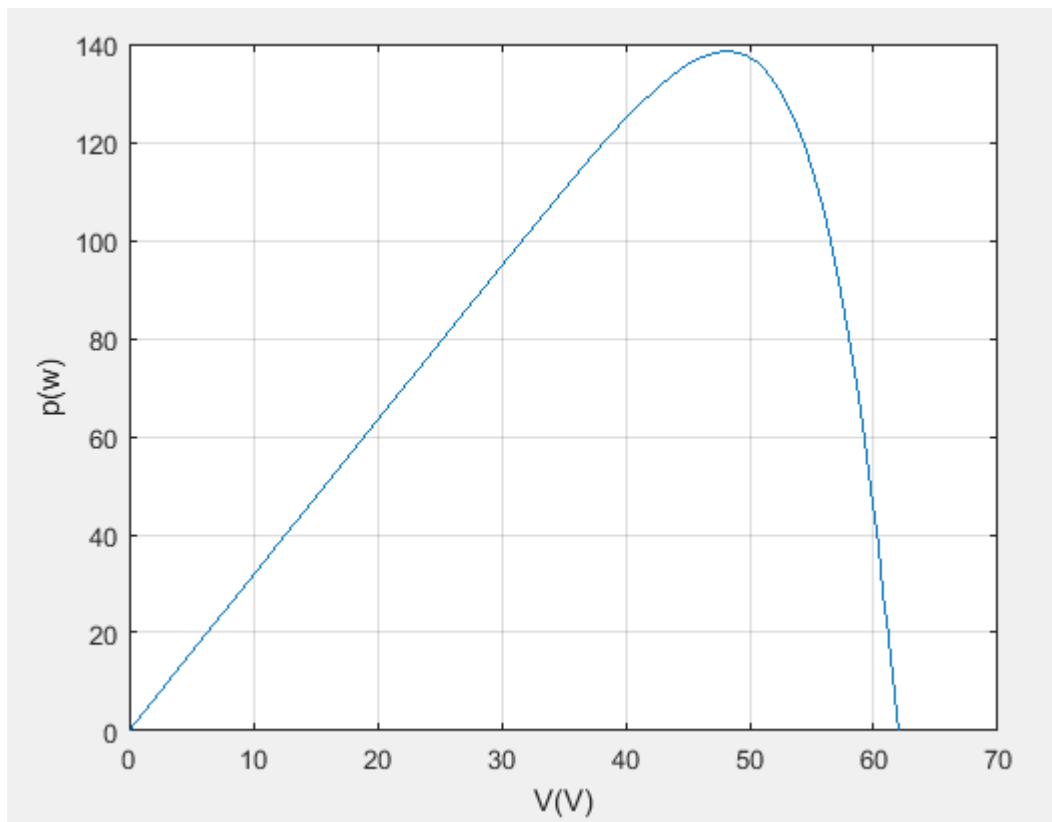


Figure IV-10 : Graphe RMSE en fonction de l'itération en utilisant PSO sur les données du module PV Sanyo HIP-190B2-BO-01.



*Figure IV-11: les deux courbes superposent I-V pour les courants calculés par PSO et mesurés du module PV Sanyo HIP-190B2-BO-01*



*Figure IV-12: Courbe P-V montrant les puissances calculées par (PSO) du module PV*

- Le tableau suivant résumé les résultats obtenus pour les différents panneaux basées sur la méthode PSO

PV module	$a$	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{ph}(A)$	$I_0(A)$	RMSE	Pmax(w)
Condor CEM150M	1.3033	0.2460	$2.070 \cdot 10^3$	8.3183	$1.7658 \cdot 10^{-6}$	0.0369	116
Kyocera KC125GHT	1.3479	0.2376	$1.065 \cdot 10^3$	8.0657	$6.1658 \cdot 10^{-6}$	0.0406	107
Siliken SLK60P6L 210Wp	1.3301	0.3759	$3.397 \cdot 10^3$	8.3035	$4.1984 \cdot 10^{-6}$	0.0446	188
Sanyo HIP-190B2-BO-01	1.7343	0.8780	$2.252 \cdot 10^3$	3.1901	$6.5997 \cdot 10^{-6}$	0.0122	148

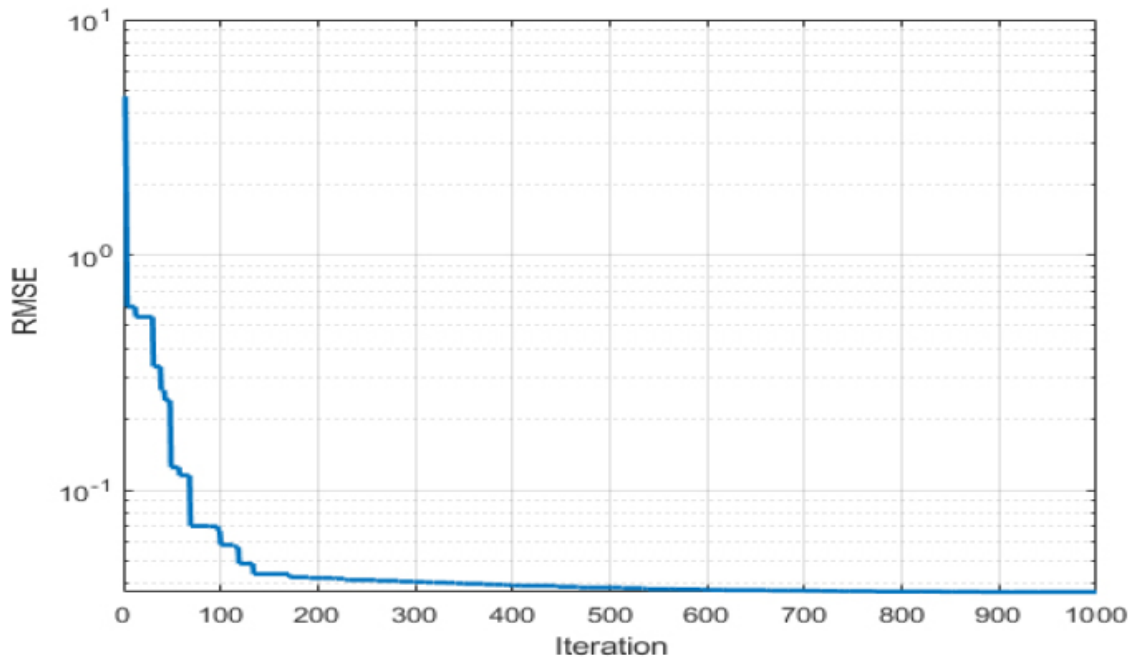
**Tableau IV-1 : paramètres du modèle extraits et RMSE en utilisant PSO**

#### IV.4 Résultats de DE :

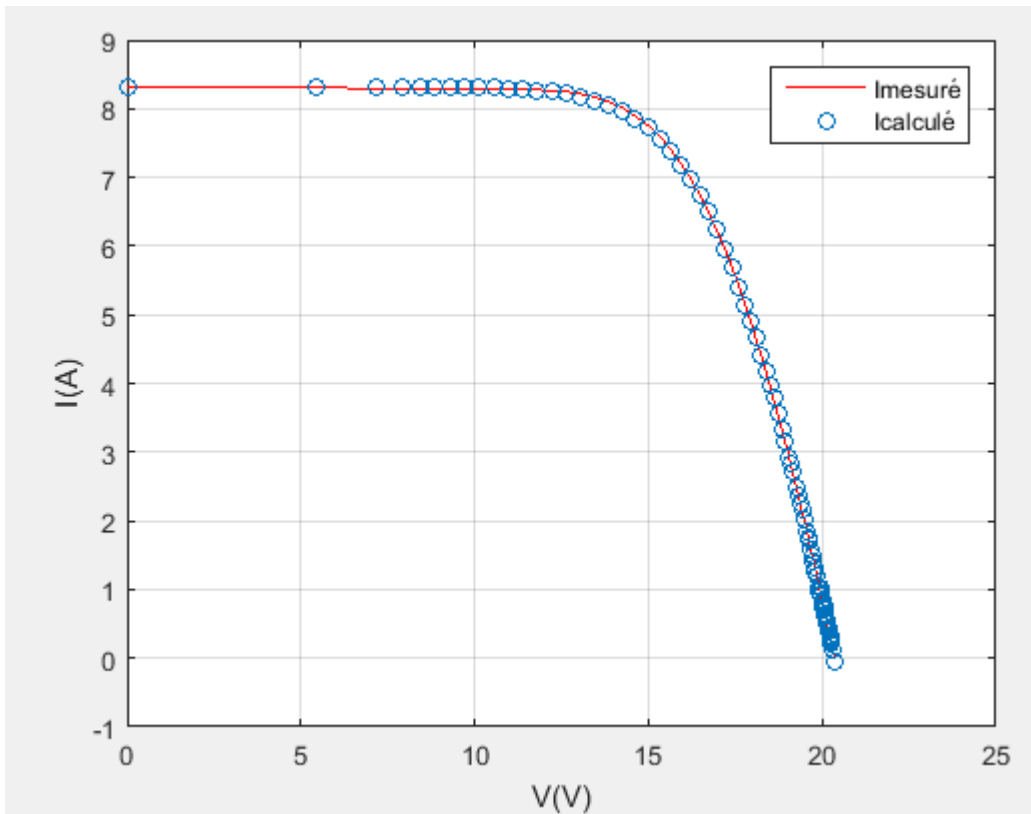
Cette deuxième méthode d'optimisation est choisie pour confirmer les résultats de la première méthode .ainsi que pour choisir la meilleure méthode.

Dans cette partie nous allons présenter les mêmes figures comme la précédente à savoir l'erreur de la méthode d'optimisation et les caractéristiques I-V et P-V.

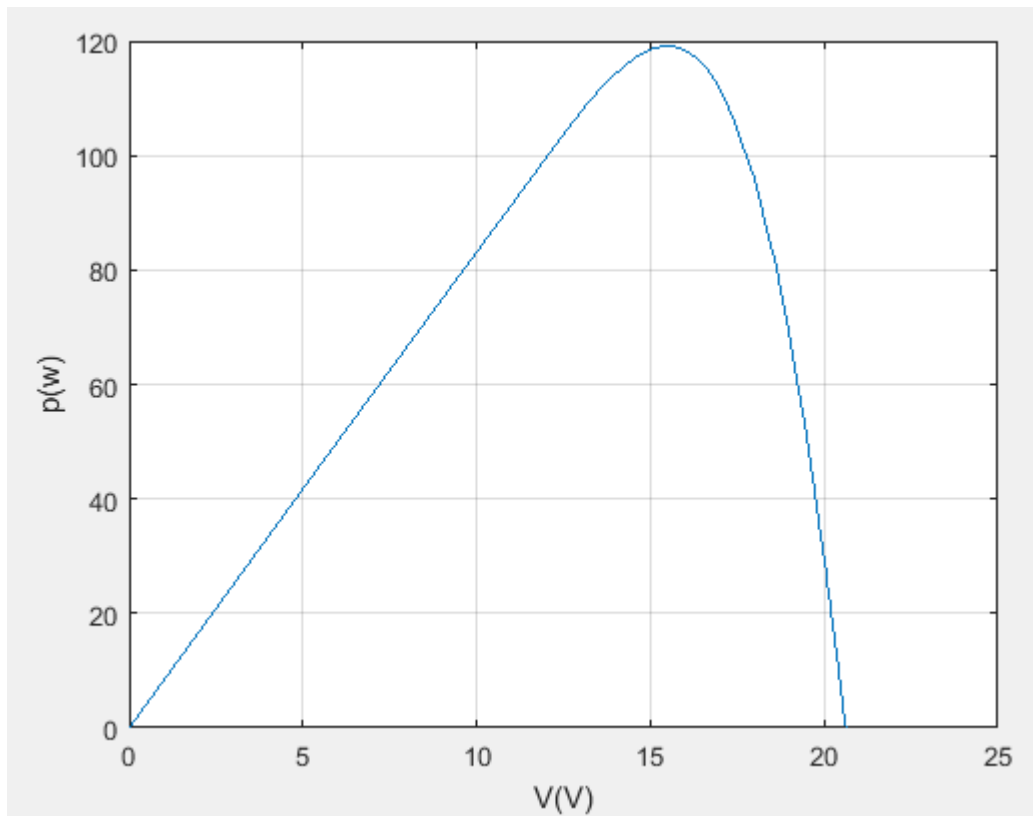
##### Condor CEM150M :



**Figure IV-13: Graphe RMSE en fonction de l'itération du module PV Condor CEM150M**

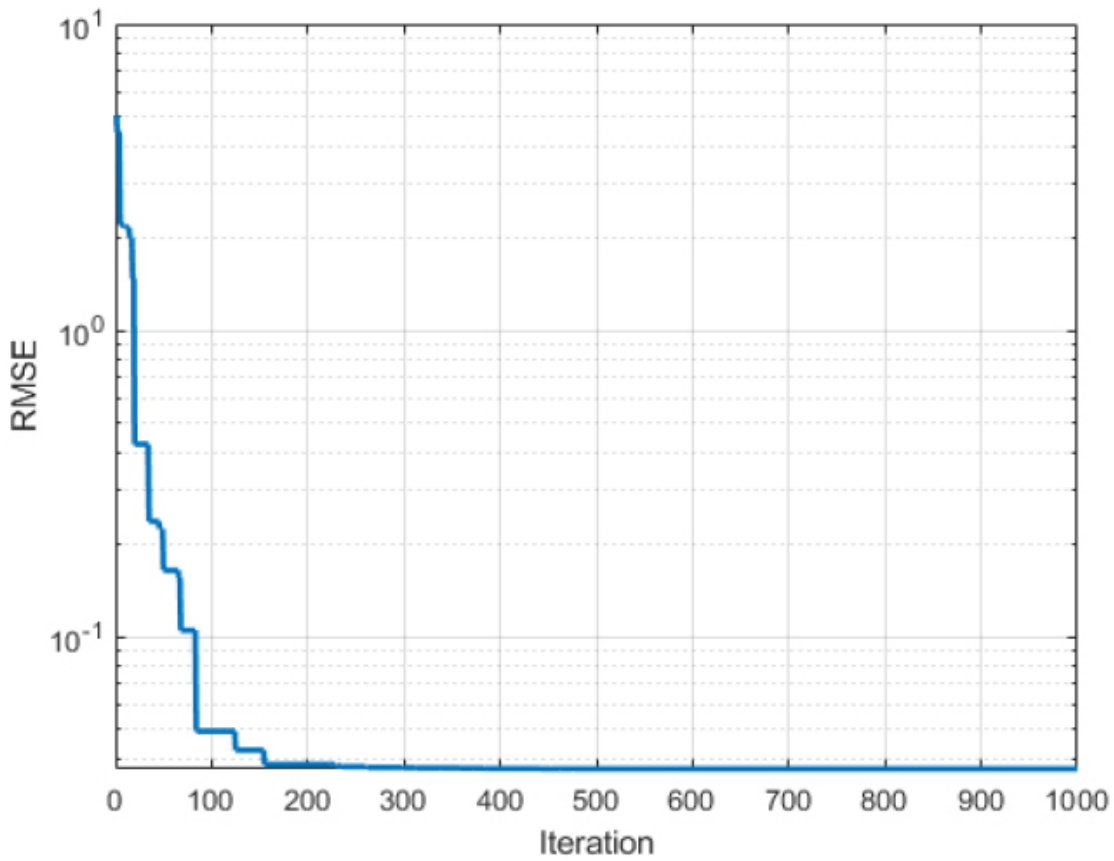


*Figure IV-14: les deux courbes superposées I-V pour les courants calculés par DE et mesurés du module PV Condor CEM150M*

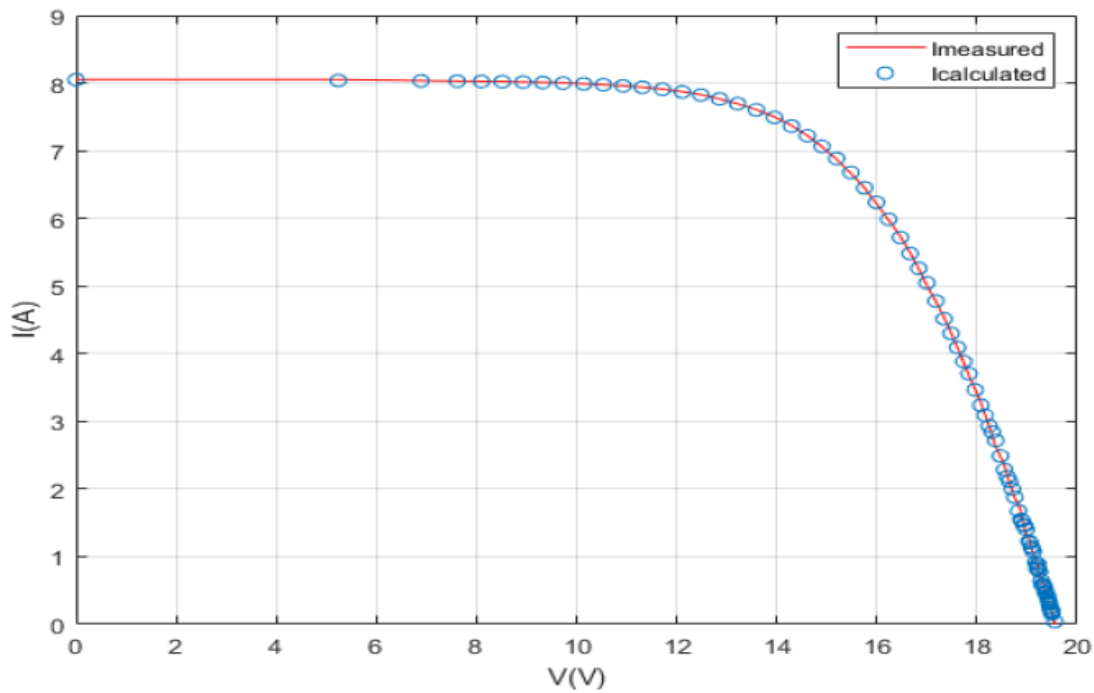


*Figure IV-15: Courbe P-V montrant les puissances calculés (par DE) du module PV*

**Kyocera KC125GHT :**



*Figure IV-16: Graphe RMSE en fonction de l'itération du module PV Kyocera KC125GHT*



*Figure IV-17: les deux courbes superposées I-V pour les courants calculés par DE et mesurés du module PV Kyocera KC125GHT*

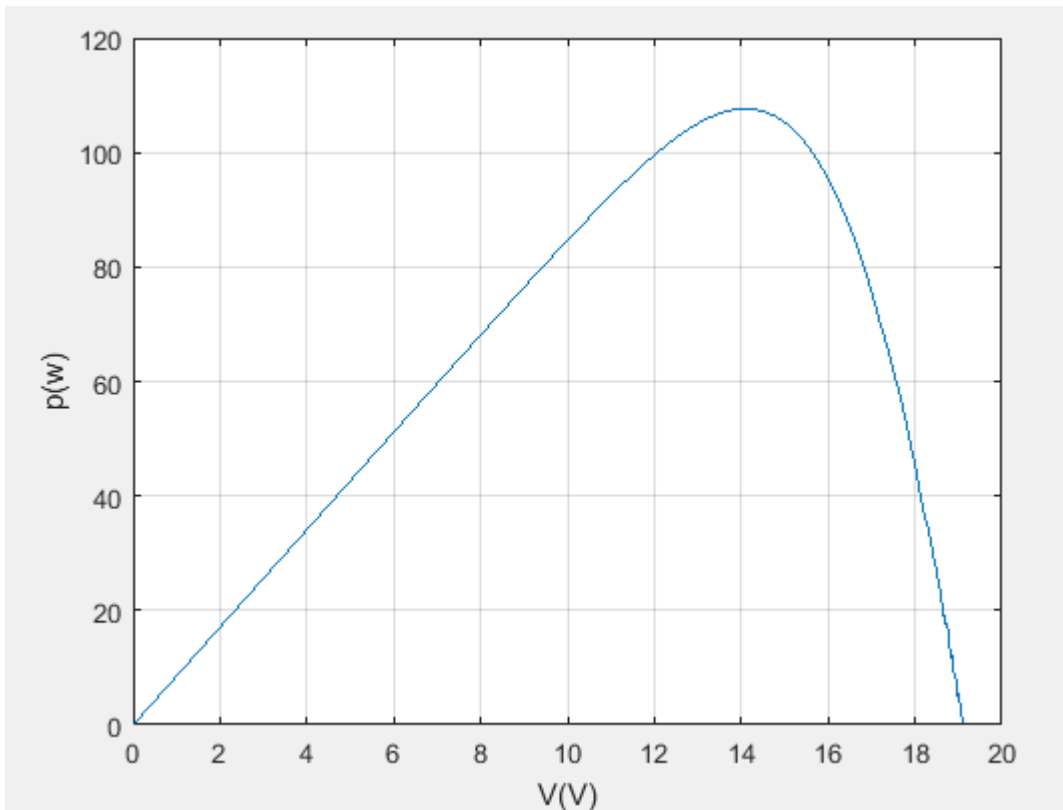


Figure IV-18: Courbe P-V montrant les puissances calculés (par DE) du module PV

Siliken SLK60P6L :

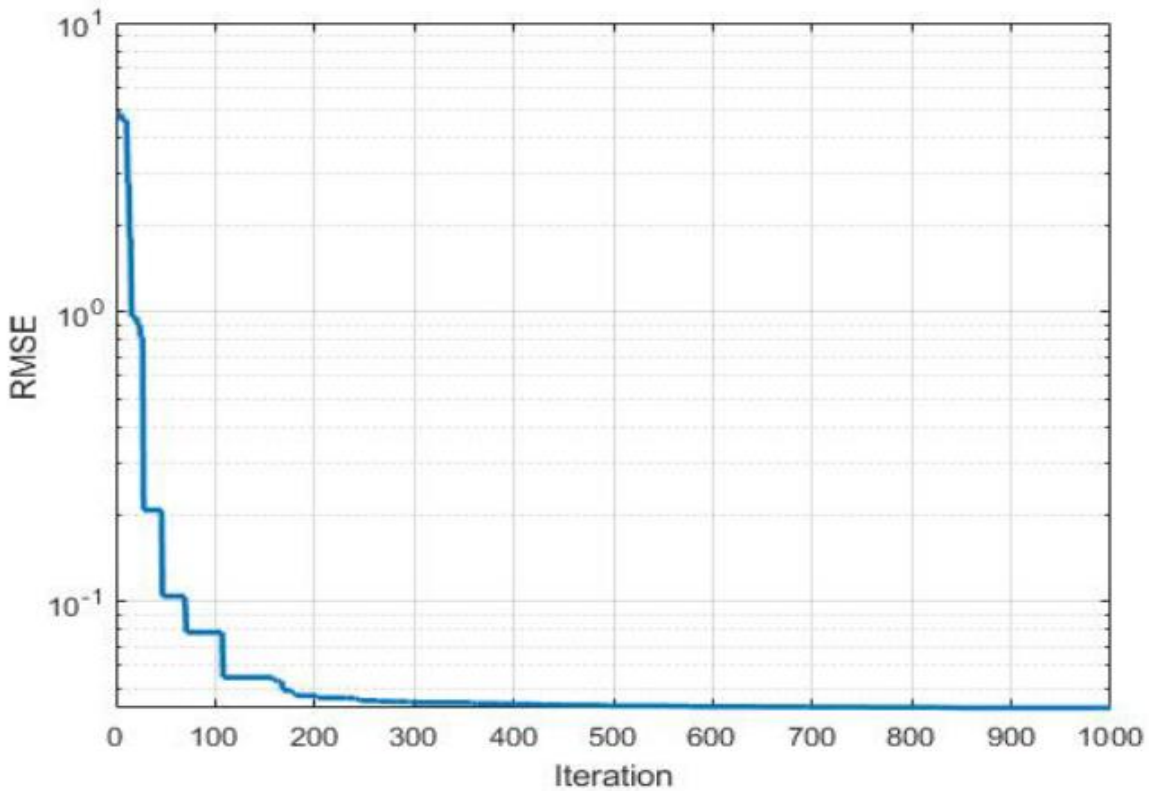


Figure IV-19: Graphe RMSE en fonction de l'itération du module PV Siliken SLK60P6L

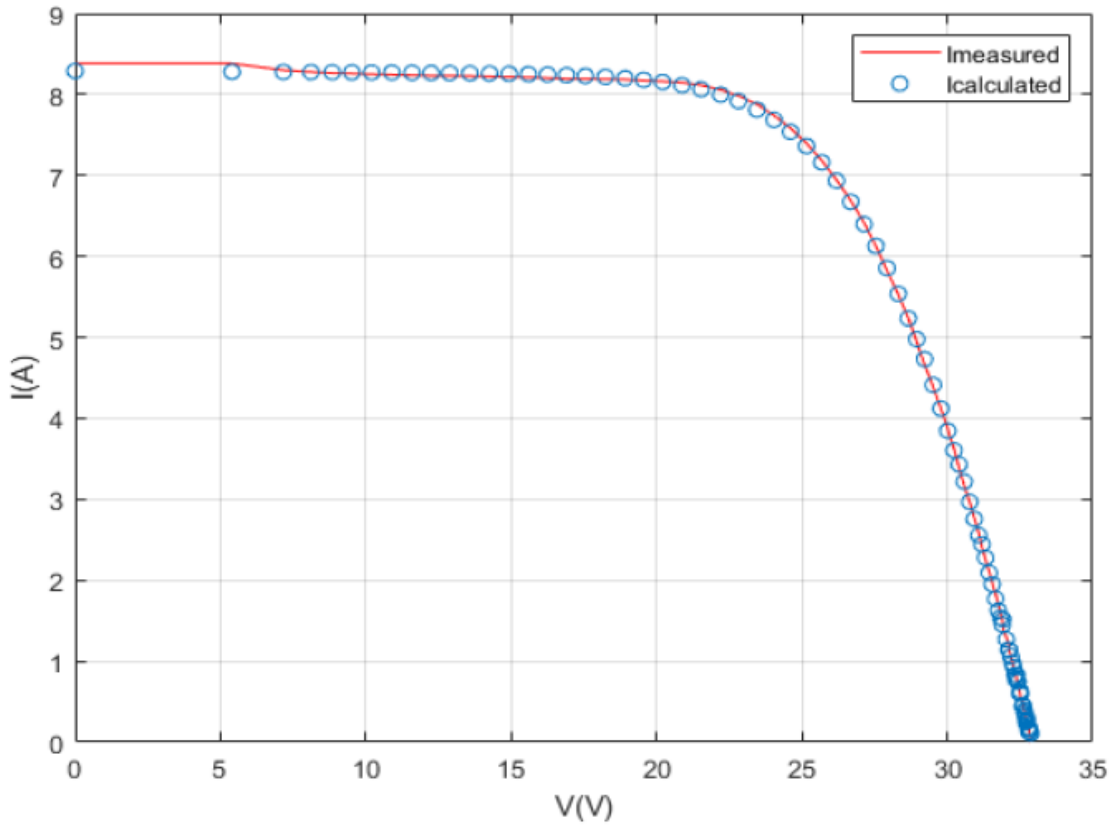


Figure IV-20: les deux courbes superposées  $I$ - $V$  pour les courants calculés par DE et mesurés du module PV Siliken SLK60P6L

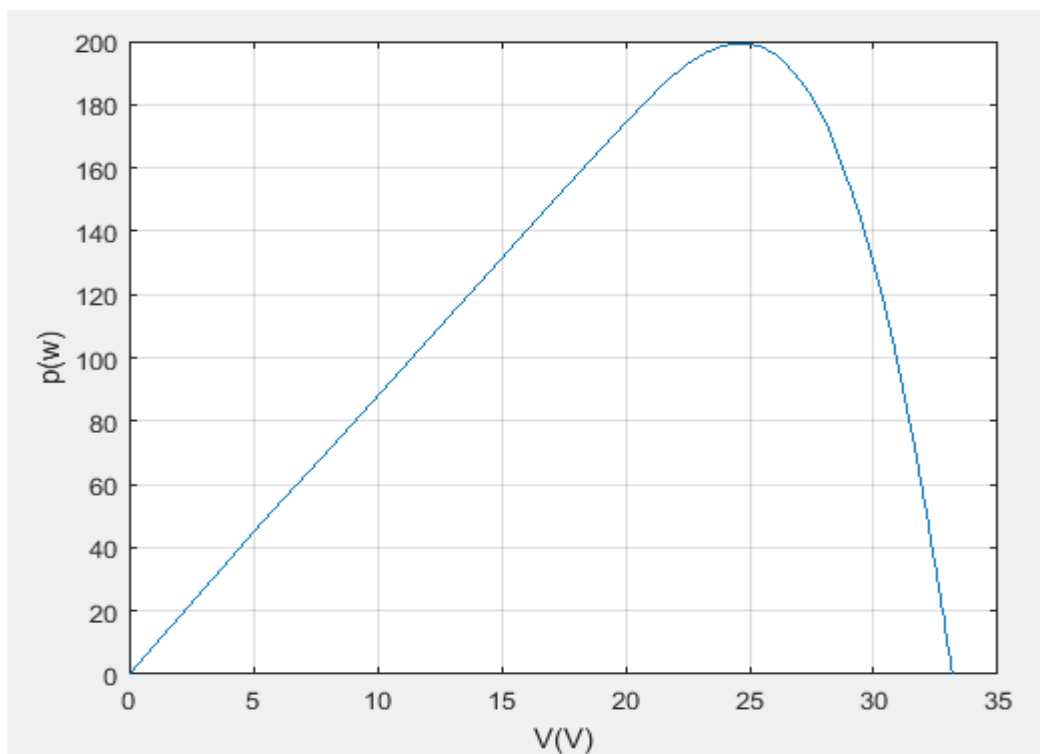
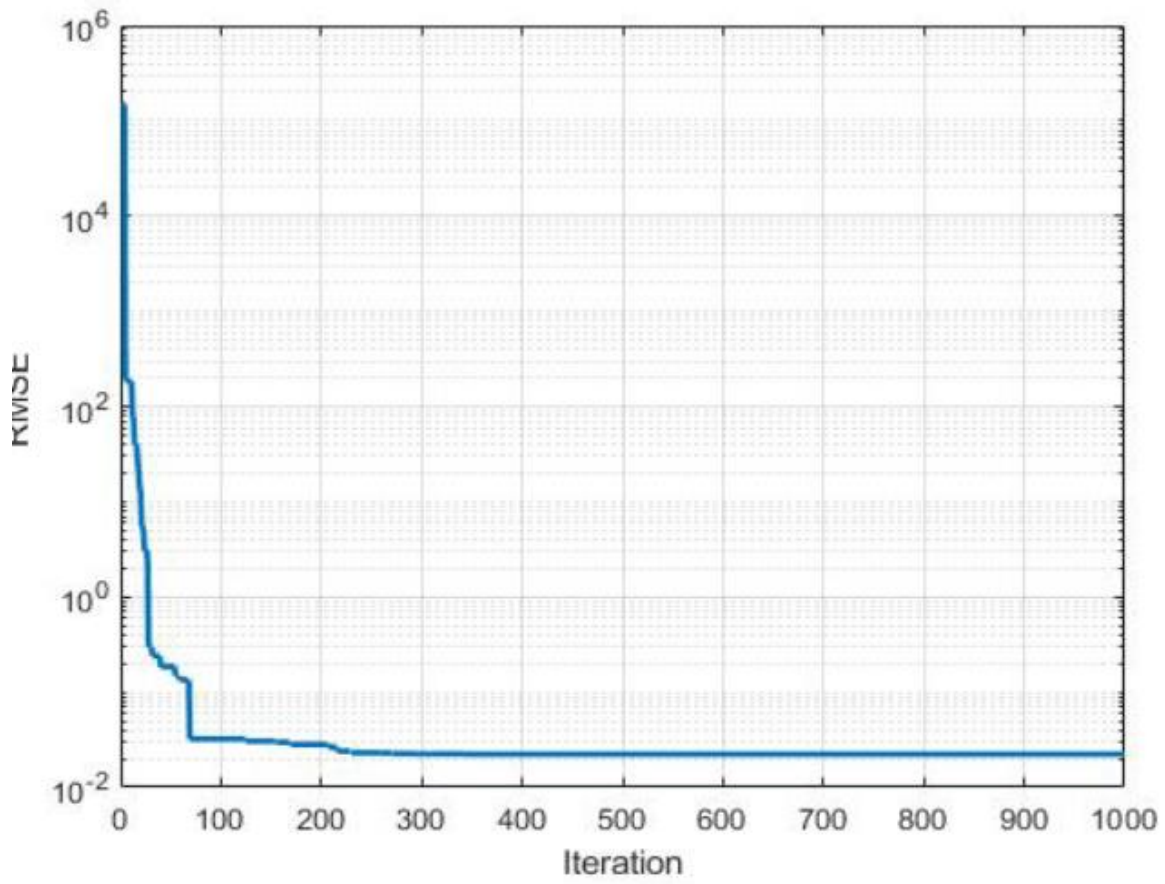


Figure IV-21: Courbe  $P$ - $V$  montrant les puissances calculés (par DE) du module PV Siliken SLK60P6L

**Sanyo HIP-190B2 :**



*Figure IV-22: Graphe RMSE en fonction de l'itération du module PV Sanyo HIP-190B2*

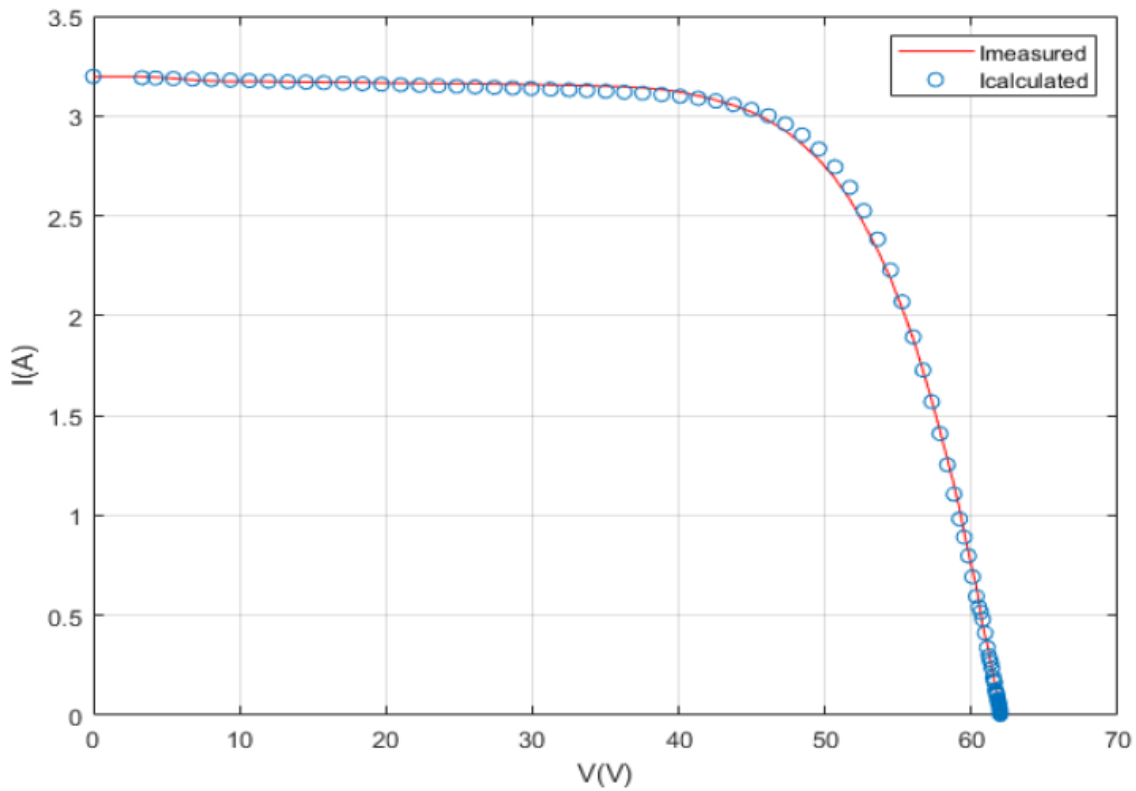


Figure IV-23: les deux courbes superposées  $I$ - $V$  pour les courants calculés par DE et mesurés du module PV Sanyo HIP-190B2.

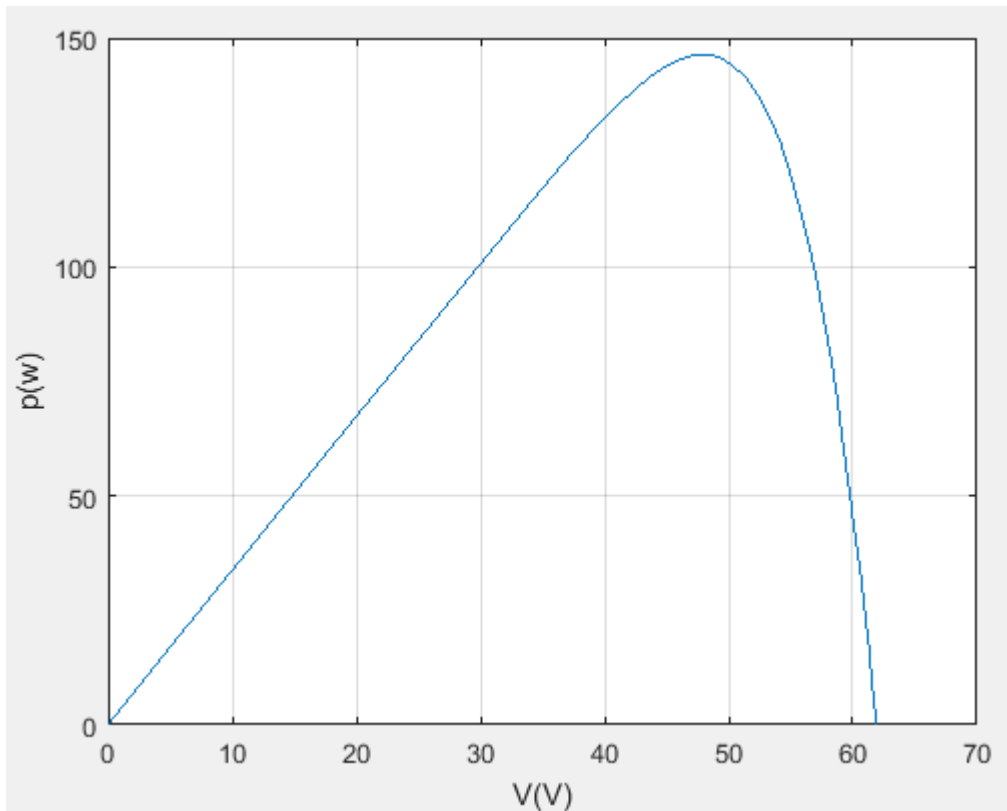


Figure IV-24: Courbe  $P$ - $V$  montrant les puissances calculés (par DE) du module PV Sanyo HIP-190B2

## Chapitre 4 : Simulation et Analyse des résultats

Dans les figures précédentes on constate que :

- **LES figures des RMSE:** ces figures Sont présentées pour tous les types de panneaux choisis. Les courbes obtenus montrent l'erreur entre les deux résultats (mesuré et calculé) en fonction de nombre d'itération, on voit que l'erreur diminue jusqu'à atteindre un nombre optimal d'itération (dans le premier cas (PSO) 1000 itérations et (DE) 500 itérations pour le deuxième).
- **Les figure I-V :** d'après ces graphes, on voit que les résultats du courant calculé et mesuré sont presque identique ce qui explique que l'erreur est presque nulle qui confirme la validité des résultats obtenus par nos deux programmes d'optimisations PSO et DE.
- **les figures P-V :** ces courbes montrent la puissance obtenue par le programme en fonction de la tension. Ces courbes aussi nous permettent d'identifier la puissance maximale pour chaque panneau.

PV module	$a$	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{ph}(A)$	$I_0(A)$	RMSE	Pmax (w)
Condor CEM150M	1.2942	0.2477	$4.902 \cdot 10^3$	8.3140	$1.5837 \cdot 10^{-6}$	0.0205	119
Kyocera KC125GHT	1.3956	0.2269	$5.00 \cdot 10^2$	8.0534	$1.0000 \cdot 10^{-5}$	0.0070	108
Siliken SLK60P6L 210Wp	1.2672	0.3950	$5.924 \cdot 10^2$	8.2955	$2.0269 \cdot 10^{-6}$	0.0274	200
Sanyo HIP- 190B2-BO- 01	2.0000	1.4566	$5.00 \cdot 10^2$	3.2069	$4.0000 \cdot 10^{-8}$	0.0151	145

*Tableau IV-2: paramètres du modèle extraits et RMSE en utilisant DE*

### IV.5 Discussion des résultats:

Les algorithmes utilisés ont donné de très bonnes valeurs RMSE, ce qui montre que la différence entre les données expérimentales et calculées est très faible ; cela signifie que les paramètres obtenus sont précis. Par conséquent, les modèles sont fiables et peuvent être utilisés pour représenter les modules avec précision. En inspectant les courbes I-V obtenues, on peut voir que les points de données calculés à l'aide des paramètres extraits s'alignent presque parfaitement avec les courbes I-V expérimentales, ce qui confirme la précision des modèles obtenus.

## Chapitre 4 : Simulation et Analyse des résultats

Les courbes représentant la valeur RMSE en fonction du nombre d'itérations donnent un aperçu du comportement des cinq algorithmes dans le processus de recherche des valeurs optimales des paramètres pour obtenir la meilleure valeur RMSE possible. On peut dire que les algorithmes conservent le même modèle pendant l'optimisation ; par exemple, PSO a un comportement de graphe en forme d'escalier, c'est comme si la valeur RMSE était conduite vers le bas (vers des valeurs plus faibles) mais dans des marches relativement larges. Cela fait que PSO, en général, prend un plus grand nombre d'itérations pour trouver son meilleur RMSE possible, par rapport aux autres algorithmes. Une autre observation est que presque tous les graphiques montrent que la meilleure valeur possible de RMSE est atteinte bien avant le nombre déterminé d'itérations maximales ; il n'est donc pas nécessaire d'augmenter ce nombre à la recherche de meilleurs résultats.

### IV.6 Tableaux comparatifs :

#### a) Condor CEM150M:

algorithmes	$a$	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{ph}$ (A)	$I_0$ (A)	RMS E	Pmax(w)
PSO	1.448 3	0.221 6	$4.223 \cdot 10^3$	8.359 4	$8.2937 \cdot 10^{-6}$	0.0472	116
DE	1.294 2	0.247 7	$4.902 \cdot 10^3$	8.314 0	$1.5837 \cdot 10^{-6}$	0.0205	119

*Tableau IV-3: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme*

#### b) Kyocera KC125GHT:

Algorithmes	$a$	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{ph}$ (A)	$I_0$ (A)	RMS E	Pmax(w)
PSO	1.357 8	0.233 5	$4.471 \cdot 10^2$	8.043 3	$6.8308 \cdot 10^{-6}$	0.0390	107
DE	1.395 6	0.226 9	$5.00 \cdot 10^2$	8.053 4	$1.0000 \cdot 10^{-5}$	0.0070	108

*Tableau IV-4: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme*

**c) Siliken SLK60P6L:**

Algorithmes	$a$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p(\Omega)$	$I_{ph}$ (A)	$I_0$ (A)	RMS E	Pmax(w)
PSO	1.2818	0.3912	$9.356 \cdot 10^2$	8.2890	$2.4152 \cdot 10^{-6}$	0.0429	187
DE	1.2672	0.3950	$5.924 \cdot 10^2$	8.2955	$2.0269 \cdot 10^{-6}$	0.0274	200

**Tableau IV-5: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme**

**d) Sanyo HIP-190B2-BO-01:**

Algorithmes	$a$	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{ph}$ (A)	$I_0$ (A)	RMS E	Pmax(w)
PSO	1.6765	0.9788	$2.397 \cdot 10^3$	3.1822	$4.1867 \cdot 10^{-6}$	0.0095	148
DE	2.0000	1.4566	$5.00 \cdot 10^2$	3.2069	$4.0000 \cdot 10^{-8}$	0.0151	145

**Tableau IV-6: Tableau comparatif des paramètres extraits et des valeurs RMSE de l'algorithme**

**IV.7 Conclusion :**

Ce chapitre a couvert notre approche de l'extraction des paramètres des diodes uniques ; l'approche est basée sur l'utilisation de techniques métaheuristiques sur le problème formulé comme une optimisation. Différents algorithmes ont été utilisés, leurs comportements ont été observés, certains donnant des résultats plus précis, mais dans l'ensemble, tous les résultats obtenus ont une bonne adéquation et sont satisfaisants.

D'après les tableaux comparatifs ci-dessus, DE est clairement en tête en termes de valeurs RMSE ; il présente trois meilleures valeurs RMSE sur quatre. Elle n'a même pas atteint une valeur supérieure à 0,274 ce qui montre l'efficacité de cette méthode d'optimisation pour l'extraction des paramètres PV du modèle à une seule diode.

### **V. Conclusion générale :**

L'énergie solaire est considérée comme la principale énergie de l'avenir ; cette désignation a conduit la littérature sur le photovoltaïque à se développer rapidement au fil des années. Dans ce projet, l'intérêt était orienté vers un aspect particulier, à savoir la modélisation du photovoltaïque. Cela nous a permis d'acquérir une grande compréhension du photovoltaïque, dans le cadre de la réalisation de ce projet. Le fait de passer de vastes domaines de recherche à des domaines plus restreints a rendu le travail très intéressant, car une vue d'ensemble aide toujours à comprendre plus de détails mis ensemble.

Notre travail a commencé par expliquer le principe de base des PV, ce qui est essentiel avant d'entrer dans des aspects plus approfondis. Ensuite, différents modèles équivalents ont été présentés : la représentation de la cellule PV idéale, le modèle à une diode et le modèle à deux diodes. Ensuite, les paramètres qui représentent ces modèles (facteur d'idéalité, résistance série, résistance parallèle, courant photo-généré et courant de saturation de la diode) ont été introduits. Ensuite, la lumière a été faite sur les techniques d'optimisation, mais surtout sur les techniques qui nous intéressent, c'est-à-dire les métaheuristiques. Les algorithmes d'optimisation utilisés ont été définis en profondeur, car ils constituent l'outil principal pour résoudre nos problèmes par la suite. Pour en venir à la section principale, qui était l'adaptation de ces algorithmes pour répondre à l'objectif principal du projet, qui est l'extraction des paramètres du modèle PV à une seule diode, le problème a été formulé comme un problème d'optimisation avec le RMSE comme fonction objective. Deux algorithmes ont été utilisés (PSO et DE) et les résultats obtenus ont été précis comme le montre le graphique. A la fin, certaines comparaisons ont été effectuées, et il s'est avéré que la méthode DE a donné les meilleures valeurs globales de la fonction objective, sans pour autant discréditer la précision de l'autre technique.

Le sujet de ce projet est très important et intéressant, car l'obtention de modèles avec une grande précision permet une meilleure conception et évaluation du photovoltaïque, ce qui conduira à de grandes avancées dans le domaine.

## VI. Bibliographie

- [1] *Énergie solaire*. (2019, août 6). Récupéré sur connaissance des énergies: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [2] *énergies renouvelables*. (2017, décembre 23). Récupéré sur L'Observatoire des énergies renouvelables: [http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaique.asp](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp)
- [3] GradellaVillalya, M., Gazoli, J. R., & RuppertFilho, E. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL 24 NO 5. Récupéré sur IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS.
- [4] *Photovoltaic Types*. (2016, juin 15). Récupéré sur alternative energy tutorials: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-types.html>
- [5] Planas, O. (2015, mai 13). *energie solaire*. Récupéré sur energie solaire: <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/rayonnement-solaire>
- [6] *Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?* (2020, juin 19). Récupéré sur Futura Planète: <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-quest-ce-energie-solaire-photovoltaïque-14/>
- [7] Radbeh, R. (2008). *Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones*. Limoges: Université de Limoges.
- [8] *Solaire photovoltaïque*. (2017, mars 21). Récupéré sur Connaissance des énergies: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>
- [9] Stéphane, P. (2009). *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*. Toulouse: Université de Toulouse.