

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**  
N° : .....



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**FILIERE : ELECTRONIQUE**  
**OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: ROUBI Abd arrhmen Charaef Eddine**

**KECHROUD Ramzi**

**Intitulé :**

**Proposition d'un modèle de prédiction basé sur l'algorithme de Grey Wolf pour la production d'énergie du module photovoltaïque**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr Bouras Mounir	Université De M'sila	Président
Pr Oudira Houcine	Université De M'sila	Encadreur
Pr Mezache Amar	Université De M'sila	Co-encadreur
Dr Kahlouche Ahmed	Université De M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2020 /2021**

## **Résumé:**

L'utilisation d'un modèle fiable de module photovoltaïque (PV) est la principale étape de la prévision énergétique et aussi un outil important de surveillance et de supervision. À cette fin, la modélisation PV implique principalement la formulation de la courbe courant / tension non linéaire (I-V). Ce travail présente l'application de la méthode de recherche de Grey Wolf pour identifier les paramètres des modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. La technique proposée permet l'extraction des paramètres inconnus du modèle qui régissent la relation courant-tension d'une cellule solaire. Les paramètres extraits ont été testés par rapport plusieurs caractéristiques IV statiques du module PV collectées dans différentes conditions de fonctionnement. Le modèle MPP dynamique a également été dérivé et simulé en utilisant les paramètres extraits par rapport aux mesures dynamiques réelles MPP d'un système connecté au réseau situé dans le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à Alger.

**Mots clés :** Extraction, Cellule solaire, Optimisation, modèle MPP dynamique.

**Abstract:** The use of a reliable model of a photovoltaic (PV) module is the main step for energy prediction and an important tool for monitoring and supervision. To this end, PV modeling primarily involves the formulation of the non-linear current versus voltage (I-V) curve. This paper presents the application of the Grey Wolf simplex search method for identifying the parameters of solar cell and photovoltaic module models. The proposed technique allows the extraction of the unknown model parameters, namely, the generated photocurrent, saturation current, series resistance, shunt resistance, and ideality factor that govern the current-voltage relationship of a solar cell. The extracted parameters have been tested against several static IV characteristics of the PV module collected at different operating condition. Comparative study among different parameter estimation techniques is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. The dynamic MPP model has also been derived and simulated using the extracted parameters against MPP real dynamic measurements of a grid connected system located in the Centre de Developpement des Energies Renouvelables (CDER) in Algiers.

**Index Terms:** GW algorithm, Optimization, Parameters extraction, Photovoltaic module, dynamic MPP model.

## ملخص:

استخدام نموذج دقيق للوحدة الكهروضوئية هي الخطوة الرئيسية في مجال التنبؤ بالطاقة، كما أنها أداة هامة للرصد والمراقبة.

لهذا الغرض، النمذجة الكهروضوئية تتضمن صياغة منحني التيار/التوتر الغير خطي (I-V).

هذا العمل يعرض تطبيق طريقة بحث غراي وولف لتحديد معايير نماذج الخلايا الشمسية والنماذج الكهروضوئية.

التقنية المقترحة تسمح باستخلاص معايير غير معروفة للنموذج الذي ينظم العلاقة تيار/توتر لخلية شمسية.

المعايير المستخرجة اختبرت بالمقارنة مع عدة خصائص VI ثابتة للنموذج الكهروضوئي المجمع في مختلف شروط العمل.

كذلك نموذج MPP الديناميكي تم اشتقاقه ومحاكاته باستخدام معايير مستخرجة بالنسبة لقياسات ديناميكية حقيقية.

MPP نظام متصل بالشبكة يقع في مركز التطوير للطاقات المتجددة (CDER) في الجزائر العاصمة.

**الكلمات المفتاحية:** خوارزمية GW ، الخلايا الشمسية ، الوحدة الكهروضوئية ، نموذج MPP الديناميكي، استخراج المعايير، التحسين.

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et  
miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience  
d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur  
«Houcine Oudira», son précieux conseil et son aide durant  
toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury  
pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant  
d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.  
Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes  
qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail*

*Je dédie ce travail :*

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser  
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma très cher mon père (rabbi yarhmou)*

*A ma très chère ma mère, que dieu la garde et la  
Protège pour leurs soutien moral et financier, pour  
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mes frères Oussama, Houdheyfa*

*Mon neveu et mon petit frère Rassim et Ma sœur*

*A tout familles Roubi*

*Aux chers amis (es)*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment*

*A tous mes collègues de la promotion 2021.*

*Abd Arrhmen Charaf Eddine*

*Je dédie ce modeste travail à :*

- *Mon père en hommage de son sacrifice pour notre bien.*
- *Ma chère mère.*
- *Mes frères.*
- *Mes sœurs.*
- *Toute ma familles (kechroud).*
- *A tous ce que j'aime et qui m'aiment*
- *Tous ceux qui m'ont offert de l'aide de près ou de loin.*
- *A tous mes collègues de la promotion 2021.*

*ramzi*

Résumé.....	i
Remerciements.....	iii
Dédicaces .....	iv
Sommaire .....	vi
Liste des symboles et abréviation.....	ix
Liste des figures .....	xii
Liste des tableaux .....	xv
Introduction générale .....	01
<b>Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques</b>	
I.1. Introduction.....	05
I.2 Définition et Historique du photovoltaïque .....	05
I.3.L'énergie solaire .....	06
I.4. Potentiel solaire en Algérie.....	07
I.5.Le rayonnement solaire.....	08
a. Le rayonnement direct.....	09
b. Le rayonnement diffus.....	09
c. Le rayonnement réfléchi (albédo).....	09
d. Le rayonnement global.....	09
I.6. La conversion de lumière en électricité.....	09
I.7. La cellule photovoltaïque.....	10
I.8.1.Technologie des cellules solaires.....	10
I.8.2.Fabrication des cellules photovoltaïques.....	12
I.8.3.Principe de foisonnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	12
I.9.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	13
I.10.Générateur photovoltaïque.....	14
I.10.1 Association des cellules.....	15
a. Association en série.....	15

b. Association en paille.....	15
c. Association série-paille.....	16
I.11.Caractéristique électriques d’une cellule photovoltaïque.....	16
I.11.1.Facteur de forme FF .....	17
I.11.1.Le rendement.....	18
I.12.Avantages et inconvénients de l’énergie photovoltaïque.....	18
I.13. Conclusion.....	19
<b>Chapitre II : Simulation d’un générateur photovoltaïque</b>	
II.1. Introduction .....	21
II.2.Différents modèles électriques d’une cellule PV.....	21
II.2.1 Cellule photovoltaïque idéale .....	21
II.2.2. Cellule photovoltaïque réelle.....	22
II.3. Modèle électrique de module photovoltaïque .....	25
II.3.1. Modèle à une diode .....	25
II.3.2. Modèle à deux diodes.....	27
II.4. Modèles en puissance du module photovoltaïque.....	27
II.5 Modèle explicite du module photovoltaïque.....	28
II.6 Caractéristique de module photovoltaïque.....	29
II.6.1CaractéristiquesI(V) etP(V).....	30
II.7 Caractéristique de module photovoltaïque .....	31
II. 8Influence de paramètres climatiques sur un générateur photovoltaïque.....	32
II.8.1 Influence de l’éclairement sur le générateur .....	32
II.8.2 Influence de température sur le générateur.....	34
II.9 Influence de l’association des cellules PV sur le GPV.....	34
II.9.1 Influence de l’association série des cellules PV .....	35
II.9.2 Influence de l’association parallèle des cellules PV.....	35
II.9.3 influence de l’association série-parallèle sur GPV.....	36

II.10 Influence de paramètre électrique sur GPV .....	36
II.10.1 influence de la résistance série sur GPV .....	36
II.10.2 Influence de la résistance shunt sur GPV .....	37
II.11 Conclusion .....	38
<b>Chapitre III : Etude statique et dynamique d'un générateur photovoltaïque</b>	
III.1. Introduction .....	40
III.2. Etude statique .....	40
III.2.1 Modélisation de module photovoltaïque .....	40
III.2.2 Principe d'optimisation .....	42
III.2.3 L'algorithme de loup gris .....	43
III.2.4 Opérateurs .....	44
III.2.5 Les étapes générales de l'algorithme GWO .....	47
III.2.6 Résultat de simulation .....	48
III.2.7 Comparaison avec la littérature .....	52
III.3 Etude dynamique .....	52
III.4 Conclusion .....	57
Conclusion générale .....	59
Bibliographe .....	60

**DE:** Evolution différentielle

**PSO:** Optimisation des essaims de particules

**ABC:** Colonie d'abeilles

**ODM:** modèle d'une diode

**GaAs:** L'arséniure de gallium

**CdTe:** Tellurure de cadmium

**VOC:** Tension de circuit ouvert

**CIS :** Cuivre Indium Sélénium

**Gi :** Source de courant parfaite.

**Rsh:** Résistance shunt .

**Rse :** Résistance série

**D :** Diode matérialisant .

**Iobsc :** courant d'obscurité

**Is :** le courant de saturation de la diode (A).

**K :** la constante de Boltzmann est égale à  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K

**A :** le facteur d'idéalité de la diode.

**Tj :** la température de jonction (°C).

**q :** la charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

**FF :** Facteur de forme

**$\eta$ :** Le rendement

**GPV:** Générateur photovoltaïque

**Iph:** Courant photo généré ou photo courant

**Tref :** Température de référence (25 C°)

## Liste des symboles et Abréviation

---

**ICC** : courant de court-circuit

**Ki**: le coefficient de température (0.0017 /K)

**Eg**: L'énergie de gap du semi-conducteur

**Irs**: le courant de saturation inverse

**q** : La charge de l'électron, elle est égale à  $1.6 \times 10^{-16}$  C

**K** : Constante de Boltzmann, elle est égale à  $1.3805 \times 10^{-23}$  J/K

**A** : Facteur d'idéalité de la jonction, égale à 1.6

**Gref, Tjref** : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

**G, Tj** : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

**P1, P2, P3** : paramètres constants.

**NOCT**: température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

**I0** : le courant de saturation il est fortement dépendant de la température.

**Ns** : nombre de cellule en série dans un module.

**I01, I02** : les courants de saturation des diodes.

**G** : l'irradiation solaire sur un plan incliné (W/m<sup>2</sup>).

**N** : le nombre des modules constituant le module photovoltaïque.

**$\eta_r$** : le rendement de référence de module sous les conditions STC.

**$\gamma$** : Représente un coefficient de température.

**Tstc et Tc** : la température dans les conditions STC

**$\Delta Tc$**  : Représente la variation de la température.

**$\Delta I_{pv}$**  : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

**$\Delta V_{pv}$**  : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

**$\alpha_{sc}$**  : d'incrément de courant  $I_{sc}$  quand la température

## Liste des symboles et Abréviation

---

**$\beta_{oc}$**  : d'incrémentation de la tension Voc quand la température .

**GWO** :Grey Wolf Optimisation.

**VcoNs** : La somme des tensions en circuit ouvert de (Ns) cellules en série

**IccNs** :Courant de court-circuit de (Ns) cellules en série

**IccNp** : La somme des courants de court circuit de (Np) cellule en parallèle

**Icc** :Courant de court circuit

**Pmax** :Puissance maximale

**VcoNp** : Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

**Ns** : Nombre des cellules en série

**Np** : Nombre des cellules en parallèle

**Igl** : Le rayonnement global

**Idir** : Le rayonnement direct

**Idif** : Le rayonnement diffus

**$\rho$** : L'albédo du sol

**Ipv** : Le courant fourni par cellule lorsqu' elle fonctionne en générateur PV Photovoltaïque

**RMSE** : L'erreur quadratique moyenne.

## Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

**Figure I.1 :** L'énergie solaire.

**Figure I.2 :** la carte d'éclairement solaire de L'Algérie.

**Figure I.3 :** Analyse spectrale du rayonnement solaire.

**Figure I.4:** principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

**Figure I.5:** Principe de la conversion photovoltaïque.

**Figure I.6:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

**Figure I.7:** Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.

**Figure I.8:** Association de N modules solaires en série.

**Figure I.9:** Association des modules solaires en parallèle.

**Figure I.10:** Association mixte des modules solaires.

**Figure I.11:** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

## Chapitre II : Simulation d'un générateur photovoltaïque

**Figure II.1 :**Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

**Figure II.2 :** Circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.

**Figure II.3:** Cellule, module et panneau PV.

**Figure II.4:** Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

**Figure II.5:** Schéma électrique équivalent du module photovoltaïque à deux diodes.

**Figure II.6:** Caractéristique I(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

**Figure II.7:** Caractéristique P(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

**Figure II.8:** Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

**Figure II.9:** Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

**Figure II.10:** Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ( $G=200,400, 600, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$ ) et  $T_c=25^{\circ}\text{C}$ .

**Figure II.11:** Caractéristique puissance –tension d’un module photovoltaïque pour différent niveau d’irradiation ( $G=200,400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T_c=25$ .

**Figure II.12:** Caractéristique courant –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c=20, 30, 40, 50^\circ\text{C}$ ) et  $G = 1000\text{W/m}^2$ .

**Figure II.13:** Caractéristique puissance –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c=20, 30, 40, 50^\circ\text{C}$ ) et  $G = 1000\text{W/m}^2$ .

**Figure II.14:** Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série.

**Figure II.15:** Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

**Figure II.16:** Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série-parallèle ( $T=25^\circ\text{C}$ ), et ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

**Figure II.17:** Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série ( $T=25^\circ\text{C}$ ), et ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

**Figure II.18:** Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance shunt ( $T=25^\circ\text{C}$ ), et ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

### Chapitre III : Etude statique et dynamique d’un générateur photovoltaïque

**Figure III.1 :** Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

**Figure.III.2:** La procédure d’extraction des paramètres ODM.

**Figure III.3 :**Comportement de chasse des loups gris : (A) suivre, chasser et approcher la proie (B-D) poursuivre, encercler et harceler la proie. (E) situation stationnaire et attaque.

**Figure III.4:**Représentation 2D et 3D des vecteurs de position et leurs prochains emplacements possibles.

**Figure III.5:**mécanisme de positionnement de l’agent de recherche et de l’effet de ce qui le présent.

**Figure III.6:**Organigramme de l’algorithme de Grey Wolf.

**Figure III.7:** Courbe de I-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour ( $G=959\text{W/m}^2$ ,  $T=48.8^\circ\text{C}$ ).

**Figure III.8:** Courbe de P-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour ( $G=959\text{W/m}^2$ ,  $T=48.8^\circ\text{C}$ ).

**Figure III.9:** Vitesse de convergence de l'algorithme GWO pendant le processus d'extraction.

**Figure III.10:** Courbe IV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour différentes conditions météorologiques.

**Figure III.11:** Le schéma du système PV.

**Figure III.12:** Comparaison entre le courant  $I_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel clair.

**Figure III.13:** Comparaison entre la puissance  $P_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel clair.

**Figure III.14:** Comparaison entre le courant  $I_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel semi-nuageux.

**Figure III.15:** Comparaison entre la puissance  $P_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel semi-nuageux.

**Figure III.16:** Rendement horaire du réseau pour un jour de ciel clair.

**Figure III.17:** Rendement horaire du réseau pour un jour de ciel semi-nuageux.

**Tableau I.1 :** Comparatif des différentes technologies cellule.

**Tableau II.1:** Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards <CST>  
 $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ .

**Tableau II.2 :** Les Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque.

**Tableau III.1 :** Caractéristique électriques de module ISOFOTON 106/12.

**Tableau III.2 :** Valeurs supérieures et inférieures du module PV ISOFOTON 106/12.

**Tableau III.3 :** Les paramètres extraits de module PV ISOFOTON106/12.

**Tableau III.4 :** Etude comparative des algorithmes d'optimisation.

*Introduction Générale*

Depuis la nuit des temps, l'être humain à utiliser sans cesse de l'énergie sous différents formes dans tous ces activités journalières, tel que se déplacer, se réchauffer, s'éclairer, ou se nourrir. Dans notre monde actuel industrialisées, la principale énergie utiliser pour alimenter nous foyer et faire marcher et évoluer les différente industries c'est belle et bien l'énergie électrique. Cette dernière est produite généralement à partir des combustible de défèrent natures, en parle ici des énergies fossiles, telle que le pétrole, le charbon, le gaz, et l'énergie nucléaire (uranium).

Mais au rythme de la consommation actuelle des ressources énergétiques, les gisements d'énergies fossiles et nucléaires[1], vont d'une manière igue à la raréfaction à cause de l'exploitation agressive de ces derniers, et leurs stocks qui sont très limité, sans oublier les dégâts causé par l'exploitation de ces énergies, tel que le réchauffement climatique, on note que la production électrique représente 40% des émissions mondiale de CO<sub>2</sub> [2], la situation est d'autant plus alarmante que la demande énergétique va en grandissant[1]. Vu la situation actuelle, une alternative énergétique nouvelle, renouvelable et propre s'avère incontournable.

Le solaire photovoltaïque est vu aujourd'hui comme une alternative énergétique principale pour la production de l'électricité propre a de grande échelle. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette transformation, qui est réalisé par le biais d'une cellule photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule. Malgré cette prouesse technologique, les panneaux photovoltaïque subis de nombreuses contraintes météorologique, climatique ou électrique au niveau des centrales photovoltaïques qui diminue leur rendement.

La possibilité de prédire les performances d'un générateur photovoltaïque dans diverses conditions d'irradiance et de température est très importante pour le dimensionnement des générateurs photovoltaïques ainsi que pour la conception des stratégies de suivi et de régulation du point de puissance maximale [1]. À cette fin, plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à la modélisation et à l'extraction des paramètres des modules PV car c'est l'élément clé de la chaîne de production d'énergie, non seulement pour accroître leurs performances, mais également pour simuler leur

comportement et optimiser leurs différentes caractéristiques [3-6]. Les méthodes employées pour résoudre le problème de l'identification des paramètres PV peuvent être divisées en deux groupes, approches déterministes et heuristiques [7]. Les algorithmes méta-heuristiques sont des choix appropriés pour résoudre ce problème en raison de leur puissance de recherche globale et de leur avantage sans dérivés.

Ce travail présente l'application de la méthode de recherche de loup gris (Grey Wolf) pour identifier les paramètres des modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. La technique proposée est une méthode de recherche simple et directe qui ne nécessite aucun calcul de dérivée. Pour ces raisons, il est utilisé pour identifier les paramètres inconnus des modèles, à savoir le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série, la résistance shunt et le facteur d'idéalité qui régissent la relation courant-tension d'une cellule solaire. Les données de mesures réelles sont utilisées pour tester et vérifier la cohérence de l'estimation précise des paramètres inconnus des modèles à une seule diode. De plus, l'équation caractéristique avec les paramètres extraits a été testée par rapport à plusieurs caractéristiques IV statiques d'un module PV collecté dans différentes conditions de fonctionnement. Enfin, les paramètres extraits sont utilisés dans un modèle comportemental du point de puissance maximale d'un générateur PV et comparés aux données mesurées d'un système connecté au réseau PV situé au Centre de Développement des Energies Renouvelables situé à Alger (Algérie). Les résultats prouvent que le GWO est un outil très approprié pour estimer les paramètres électriques nécessaires à la modélisation du générateur photovoltaïque pour la prédiction à long terme.

Pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, qui résume notre étude, le présent travail est subdivisé en trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV), Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules et défini son rendement et le Facteur de forme.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, En suite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour simuler dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque dans les conditions standards. Nous avons étudié aussi l'influence

de la température, l'éclairement, la résistance série et la résistance parallèle sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi que l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Parce que la détermination des paramètres joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Le troisième chapitre présente une application de la méthode de loup gris ou Grey Wolf (GWO) pour identifier les paramètres de modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. Enfin, les paramètres extraits sont utilisés dans un modèle comportemental du point de puissance maximale d'un générateur PV et comparés aux données mesurées d'un système PV connecté au réseau situé au Centre de Développement des Energies Renouvelables situé à Alger (Algérie). Les résultats obtenus seront aussi présentés.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les systèmes*  
*photovoltaïques*

### **I.1.Introduction :**

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

### **I.2.Historique du photovoltaïque:**

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien

Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [8].

Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

L'hélio électricité est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. [9]

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. [9]

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. La production de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne

et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013. Concernant l'Algérie, le groupe algérien Condor Electronics, s'est lancé en juillet 2013 dans la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W et à des prix compétitifs. [9]

Dans le cadre de la concrétisation du programme national algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque a été lancé, faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux et dans la région du sud ouest; ainsi que dans la région du grand sud. Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à 2030 est de 12 000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. [9]

### I.3.Énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ [8400] fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{KWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. [10]



**Figure I.1** L'énergie solaire

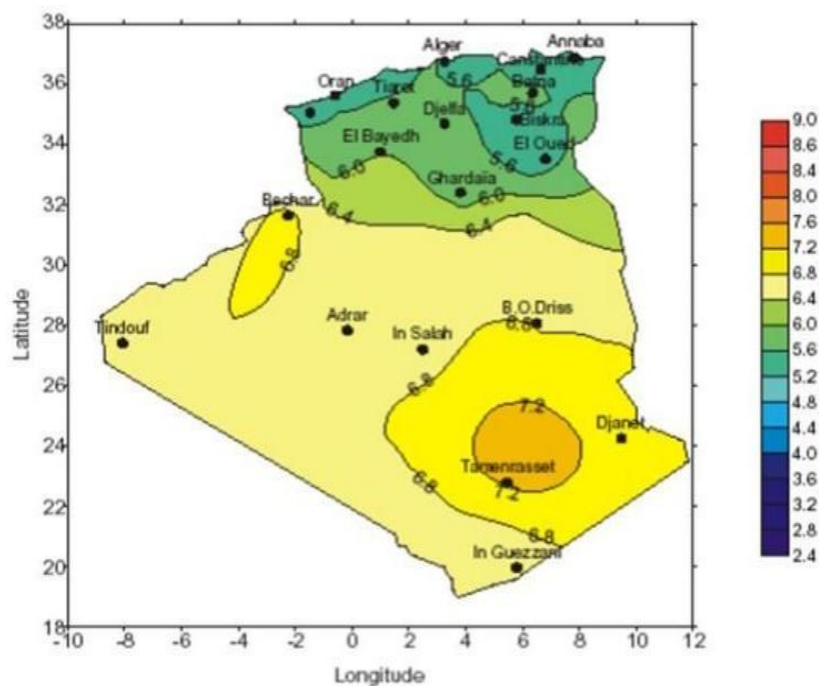
L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà

exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [10].

#### I.4.Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. La figure I.2 montre la carte de l'irradiation solaire en Algérie [11] .



**Figure. I.2** la carte d'éclairement solaire de L'Algérie [11] .

## I.5. Le rayonnement solaire :

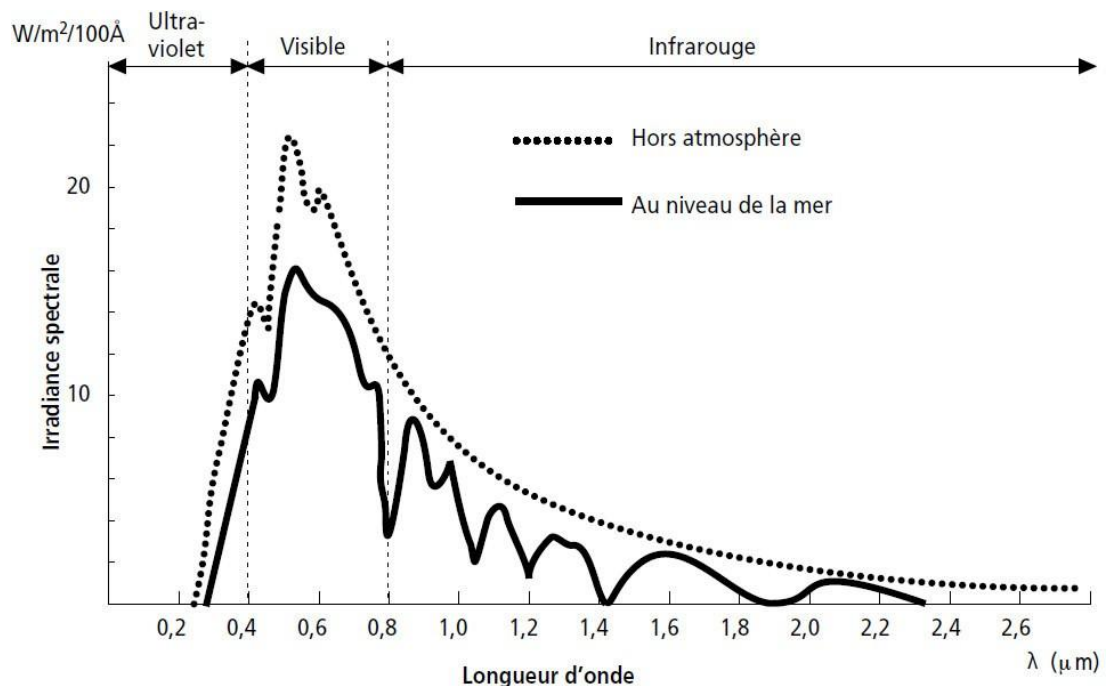
Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0,2\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $3\mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de  $5800\text{K}$ , il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22$  à  $10\mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

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

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à  $1370\text{ W/m}^2$  cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne

dépassant pas les  $1000\text{ W/m}^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu.[12]



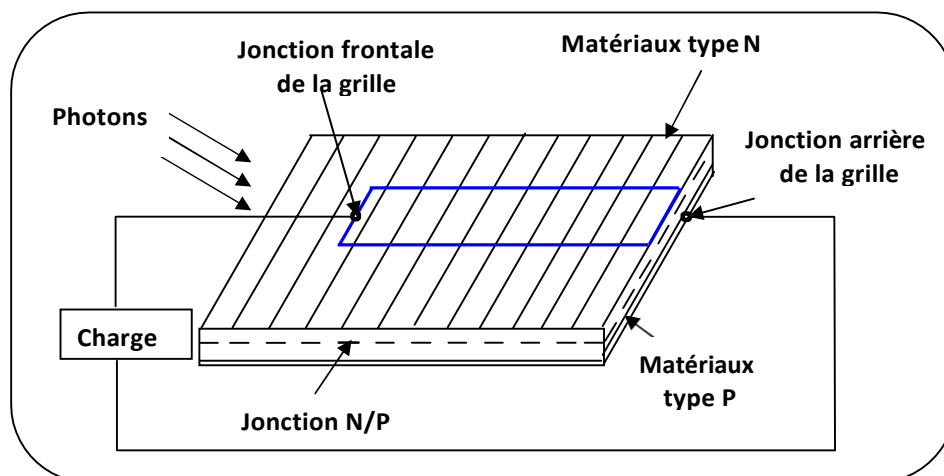
**Figure I.3 :** Analyse spectrale du rayonnement solaire.

Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements :

- **a- Le rayonnement direct** : Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.
- **b- Le rayonnement diffus** : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- **c- Le rayonnement réfléchi (albédo)** : Radiation solaire incidente réfléchi par une surface.
- **d- Le rayonnement global** : est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi

### I.6.La conversion de la lumière en électricité:

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.



**Figure I.4** : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque[13].

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit  $I_{SC}$  et dépend fortement du niveau d'éclairement.

## **I.7. La cellule photovoltaïque :**

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 . Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants .

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

### **I.8.1 Technologie des cellules solaires :**

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur

- durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium(CdTe),Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs) ,cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (d'après Total énergie<sup>1</sup> revue du 9 Juillet 2006)[14]

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	théorique	en labo.	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmuim CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

**Tableau I.1 :** Comparatif des déférentes technologies cellule.

### I.8.2 Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées [9]

« lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers . Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques. [9]

### I.8.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. [9]

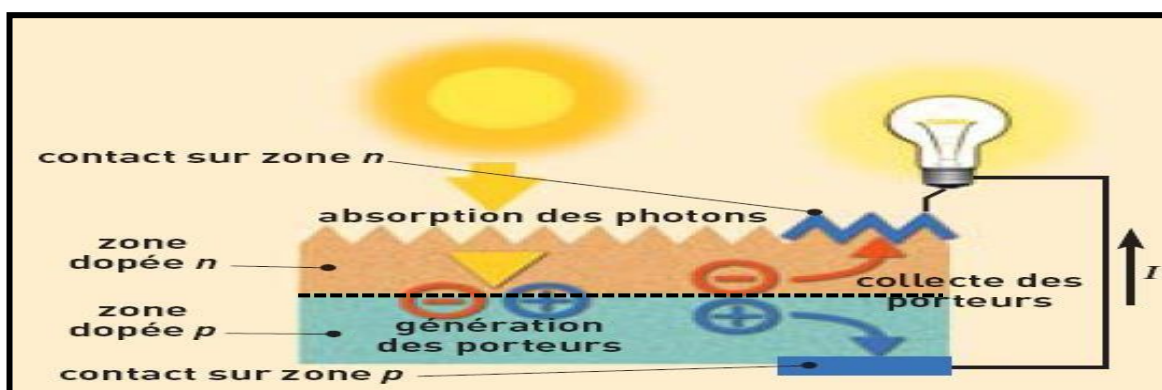
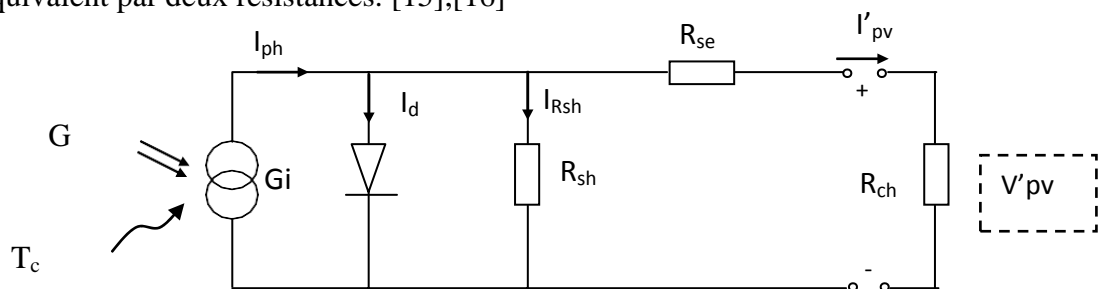


Figure I.5 : Principe de la conversion photovoltaïque.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule (voir figure I.5).

### I.9.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances. [15],[16]



**Figure I.6** : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

$G_i$  : Source de courant parfaite.

$R_{sh}$ : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

$R_{se}$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

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

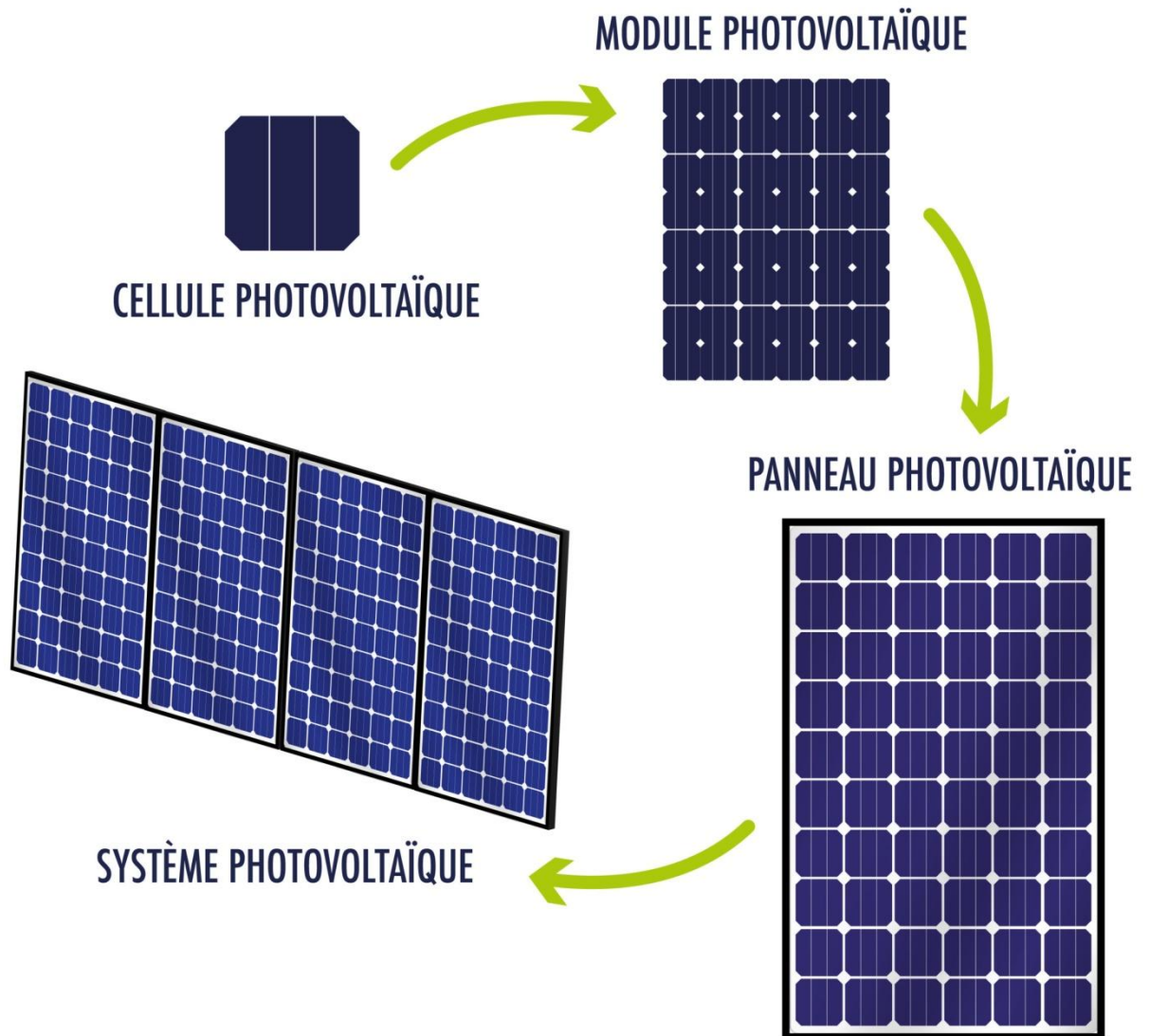
$R_{ch}$  : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

### I.10. Générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque est un système complet assurant le production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques.

L'énergie est stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant

Le type d'application.[17]



**Figure I.7** Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques

### I.10.1 Association des cellules :

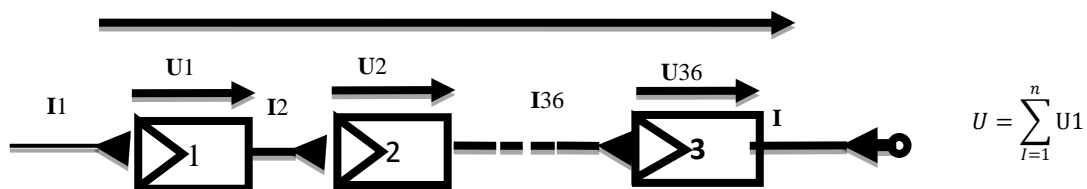
Les cellules produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins de 1 V. Ces cellules sont disposées en série et en parallèle pour former un module ou un panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque .[18]

#### a-Association série :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.[19]



**Figure I.8 :** Association de N modules solaires en série.

#### b-Association en parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.[20]

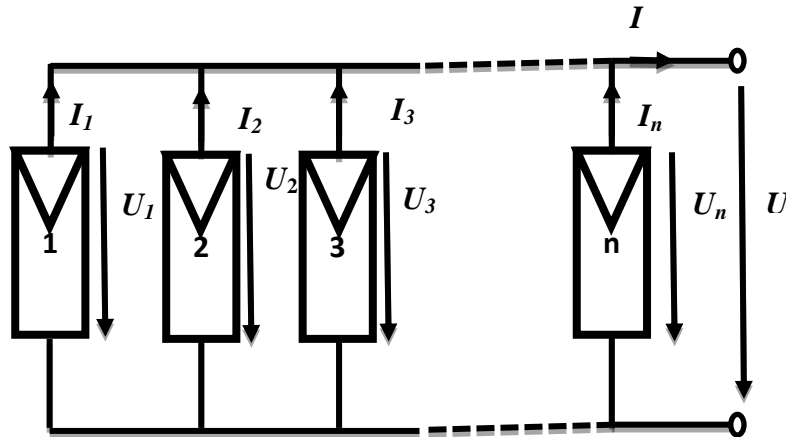


Figure I.9 Association des modules solaires en parallèle.

### c-Association série-parallèle :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle .[21]

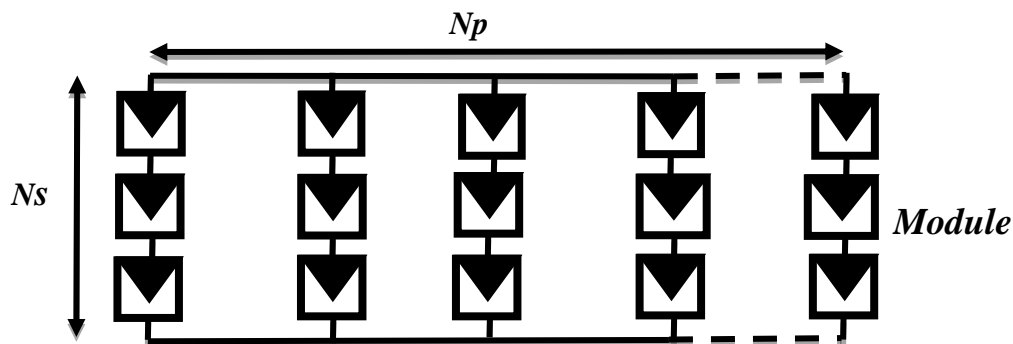
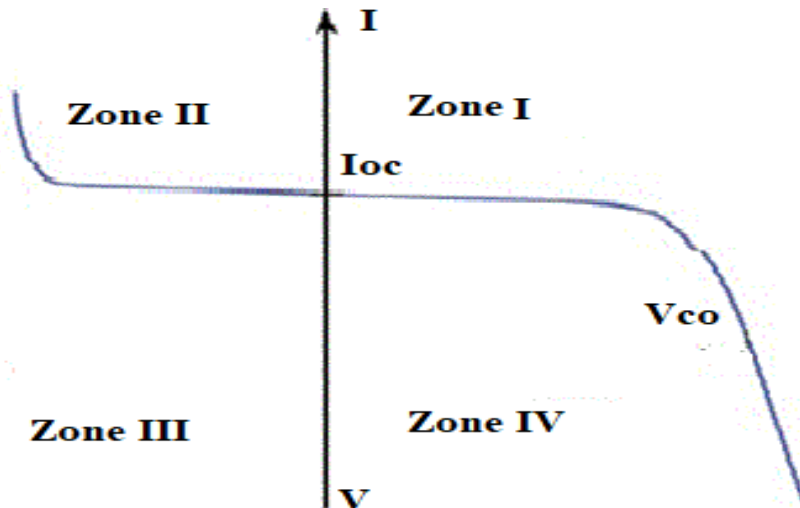


Figure I.10 Association mixte des modules solaires.

### I.11.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire (Figure I.10) la caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants.[22]

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.



**Figure I.11 :** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque[22]

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc} \quad (\text{I.1})$$

➤ **I<sub>obsc</sub>** : courant d'obscurité

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (I.1) peut être écrite sous la forme suivant:

$$I(V) = I_{cc} - I_s \left( e^{\frac{q \times v}{A \times k \times T_j}} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

- **I<sub>s</sub>** : le courant de saturation de la diode (A).
- **K** : la constante de Boltzmann est égale à  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K
- **A** : le facteur d'idéalité de la diode.
- **T<sub>j</sub>** : la température de jonction (°C).
- **q** : la charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

### I.11.1 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  $I_{cc} \times V_{oc}$ . 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. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I.3) \quad [23]$$

### I.11.2 Le rendement $\eta$ :

Le rendement  $\eta$ , 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,  $P_m$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (I.4)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en 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. [23]

## I.12 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont :

### Avantages :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Génère l'énergie requise
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

### Inconvénients :

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

### **I.13 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV), Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules et défini son rendement et le Facteur de forme.

Le travail que nous avons présenté nous a permis de constater que nous pouvons améliorer le rendement du système, en choisissant d'une manière optimale le nombre des cellules et l'angle d'inclinaison mensuel. Dans ce contexte, nous allons présenter dans le chapitre suivant la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que du générateur photovoltaïque, en étudiant aussi l'influence de la température, l'éclairement sur le rendement.

*Chapitre II*  
*Simulation d'un générateur*  
*photovoltaïque*

## II.1 Introduction :

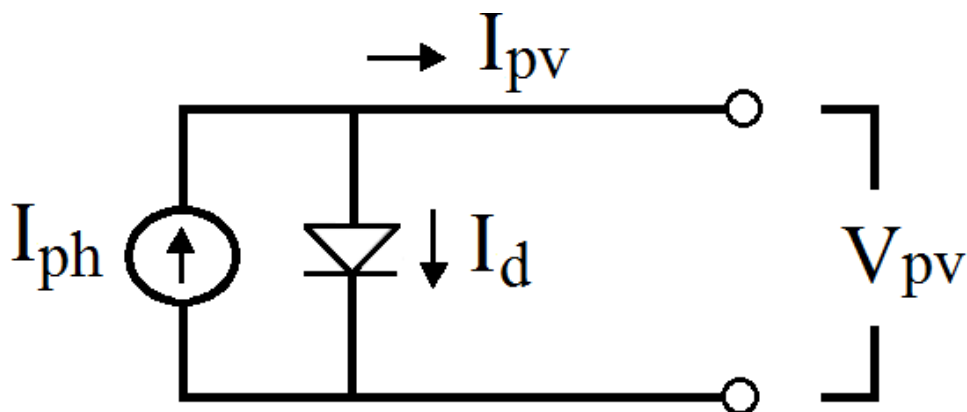
Pour modéliser des cellules photovoltaïques, il faut passer nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents modèles électriques et mathématiques caractérisent les cellules ainsi que les générateurs photovoltaïques. Nous allons étudier la modélisation du générateur photovoltaïque ISOFOTON 106/12 ; nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite, et on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV.

## II.2 Différents modèles électriques d'une cellule PV:

### II. 2.1 Cellule photovoltaïque idéale :

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode (figure.II.1). [24]



**Figure.II.1 :** Modèle de cellule photovoltaïque idéal.[24].

Ce générateur peut se comporter comme une source de courant shuntée à une diode dont l'équation est donnée par la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

Où :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q.V_{pv}}{A.k.T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$I_{ph}$  : Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement, et peut se mettre sous la forme suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \times \frac{E}{1000} \quad (\text{II.3})$$

Où :

$I_{ph}$  est calculé dans les conditions nominales (25° C et 1000 w/m<sup>2</sup>)

$T_{ref}$  : Température de référence (25 C°)

$I_{CC}$  : courant de court-circuit

$K_i$ : est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017 /K)

$I_s$ : est le courant de saturation de la diode est donné comme suit:

$$I_s = I_{rs} \times \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \times \left\{ \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right\} \right] \quad (\text{II.4})$$

Où :

$E_g$ : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé ( $E_g = 1.1$  eV) pour le silicium polycristallin à 25 C°)

$I_{rs}$ : le courant de saturation inverse, il est donné par l'équation suivante:[25]

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\left[ \exp \left( \frac{q \cdot V_{oc}}{K \cdot A \cdot T} \right) - 1 \right]} \quad (\text{II.5})$$

$q$  : La charge de l'électron, elle est égale à  $1.6 \times 10^{-16}$  C

$K$  : Constante de Boltzmann, elle est égale à  $1.3805 \times 10^{-23}$  J/K

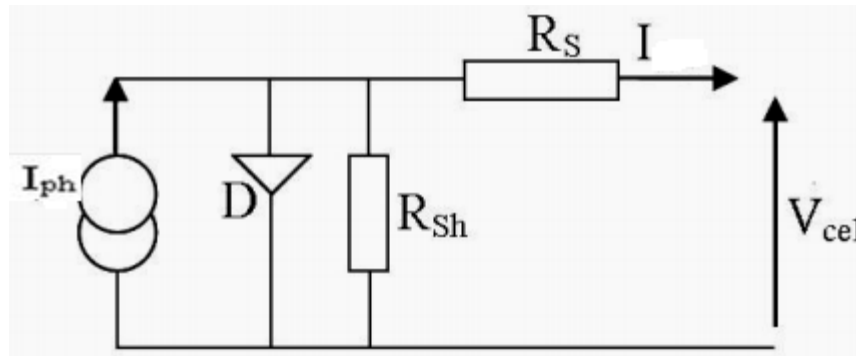
$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction, égale à 1.6

La tension de circuit ouvert est donnée par l'équation suivante:[24]

$$V_{oc} = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

## II.2.2 Cellule photovoltaïque réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II.2), c'est une version simplifiée du modèle à une seule diode présenté par Gow et Manning [26]



**Figure II.2 :** Circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.

Ce modèle considère la cellule PV comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [27].

Cinq paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique  $I(V)$  qui sont: le courant photonique  $I_L$ , la résistance série  $R_s$ , la résistance shunt  $R_{sh}$  et deux caractéristiques de la diode  $I_0$  et  $n$ .

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et elles ne sont non plus incluses dans les données des fabricants.

Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations  $I(V)$  pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants).

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

D'où l'équation du courant qui est donnée par l'expression suivant :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.9})$$

Avec:

**$I_{ph}$ :** Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement comme montré dans l'équation qui suit :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T - T_{ref})] \times \frac{E}{1000} \quad (\text{II.10})$$

$I_{ph}$ : est en [A], calculé dans les conditions nominales (25° et 1000w/m<sup>2</sup>)

$K_i$ : est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017 A/K)

$T_{ref}$ : Température de référence, égale à 25 C°

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

$I_s$ : est le courant de saturation exprimé :

$$I_s = I_{rs} \times \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \times \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{II.11})$$

$E_g$ : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé ( $E_g \approx 1.1\text{eV}$ ) pour le silicium poly cristallin à 25 C°)

$I_{rs}$ : le courant de saturation inverse, il est donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp(q \cdot V_{oc} / K \cdot A \cdot T) - 1} \quad (\text{II.12})$$

$q$ : La charge de l'électron, elle est égale à  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C

$K$ : Constante de Boltzmann, elle est égale à  $1.3805 \cdot 10^{-23}$  j/k

$A$ : Facteur d'idéalité, égale à 1.6

Si on veut calculer la tension de court-circuit on résout l'équation:

$$V_{oc} = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (\text{II.13})$$

Ainsi l'équation globale modélisant la cellule photovoltaïque est la suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (\text{II.14})$$

Où

$I_{pv}$ : est le courant fourni par cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur

$T$ : est la température effective des cellules en Kelvin (K)

$V_{cell}$ : est la tension aux bornes de cette même cellule

$R_{sh}$  : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

$R_s$  : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

### II.3 Modèle électrique de module photovoltaïque :

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par et le nombre de paramètres pris en compte [28]. On peut dire que dans une centrale solaire photovoltaïque, Le champ photovoltaïque consiste de regroupement de plusieurs panneaux solaires (modules). Donc, le panneau solaire est composé de plusieurs cellules PV connectées en série, parallèles ou série parallèles pour former le module photovoltaïque. La figure.II.3 donne des photos réelles d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque [29].

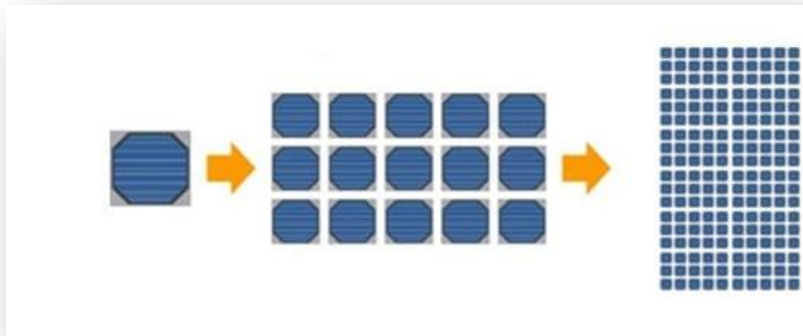
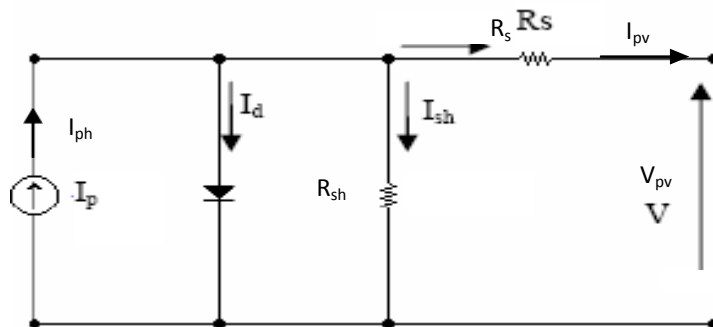


Figure.II.3 :Cellule, module et panneau PV.

#### II.3.1 Modèle à une diode :

Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Figure.II.4) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt  $R_{sh}$  est une conséquence de l'état de la longueur de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contact et de connexion, une diode en parallèle qui modélise jonction PN.



**Figure.II.4** : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

$$I_{ph} = P_1 \cdot G [1 + P_2(G - G_{ref}) + P_3(T_j - T_{jref})]$$

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right) - 1 \right]$$

$$I_{rsh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$

La température du module peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T + G \left( \frac{N_{OCT} - 20}{800} \right)$$

Avec :

$G_{ref}, T_{jref}$  : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

$G, T_j$  : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

$P_1, P_2, P_3$  : paramètres constants.

$N_{OCT}$ : température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

$K$  : Constant de Boltzmann.

$I_0$  : le courant de saturation il est fortement dépendant de la température

L'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

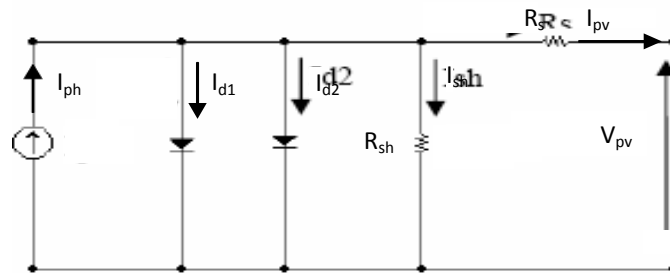
$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad \text{(II.16)}$$

$N_s$  : nombre de cellule en série dans un module.

$N_p$  : nombre de cellule en parallèle dans un module.

### II.3.2 Modèle à deux diodes :

Le module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (Figure II.5) Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau.



**Figure II.5 :** Schéma électrique équivalent du module photovoltaïque à deux diodes.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{rsh} \quad (\text{II.17})$$

$I_{ph}$  et  $I_{sh}$  garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant traversant les diodes est donné par les équations suivantes :

$$I_{d1} = I_{01} \left[ \exp \frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A.n.s.K.T_j} - 1 \right]$$

$$I_{d2} = I_{02} \left[ \exp \frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A.n.s.K.T_j} - 1 \right]$$

Où :  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  : les courants de saturation des diodes

### II.4 Modèles en puissance du module photovoltaïque :

Des modèles simplifiés de la puissance maximale produite par le module photovoltaïque, qui a un rapport avec la température du module et l'irradiation solaire absorbé par le module photovoltaïque.

#### ➤ Modèle 1 :

Ce modèle, nommé modèle de Benchmark [30] donne le maximum de puissance produite par le module photovoltaïque pour un certain ensoleillement et de température, avec quatre paramètres positifs constants A, B, C et D à déterminer expérimentalement.

$$P_{pv,max} = (A.G + B)T_j + C.G + D \quad (\text{II.18})$$

### ➤ Modèle 2 :

La puissance produite du panneau photovoltaïque peut être calculé à partir de l'équation suivante [31]:

$$P_{pv} = \eta . A . N . G \quad (\text{II.19})$$

Avec :

A : la surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

G : l'irradiation solaire sur un plan incliné (W/m<sup>2</sup>).

N : le nombre des modules constituant le module photovoltaïque.

$\eta$ : le rendement instantané.

$\eta_r$ : le rendement de référence de module sous les conditions STC.

$\gamma$ : Représente un coefficient de température, d'incrément de rendement quand la température de la surface augmente de un degré Celsius.

### II.5 Modèle explicite du module photovoltaïque :

C'est un modèle à cinq paramètres ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpv}$ ,  $R_s$ ) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques [16].

L'expression du courant du module photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{sc} \{1 - K_1 [\exp^{K_2 V_{mpv}} - 1]\} \quad (\text{II. 20})$$

Où les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  et  $m$  sont donnés par:

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}}$$

$$K_3 = \ln \left[ \frac{I_{sc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right]$$

$$K_4 = \ln \left[ \frac{1+K_1}{K_1} \right]$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]}$$

Il est à noter que l'équation (II.20) donnant le courant photovoltaïque est applicable

que pour un niveau d'insolation  $G$  et de température particuliers ( $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{stc}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), relatif aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, le courant  $I_{pv}$  et la tension  $V_{pv}$  changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.21})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left( \frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left( \frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc, stc} \quad (\text{II.22})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$G_{stc}$  et  $G$  : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement (STC) et dans des conditions quelconques.

$T_{stc}$  et  $T_c$  : Représentent respectivement, la température dans les conditions STC et dans des conditions quelconques.

$\Delta T_c$  : Représente la variation de la température.

$\Delta I_{pv}$  : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

$\Delta V_{pv}$  : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

$\alpha_{sc}$  : Représente un coefficient de température, d'incrément de courant  $I_{sc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ ) (sous les conditions STC).

$\beta_{oc}$  : Représente un coefficient de température, d'incrément de tension  $V_{oc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $\text{V}/^\circ\text{C}$ ) (sous les conditions STC).

## II.6 Simulation d'une cellule photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

Eclairement standard	<b>G=1000/m<sup>2</sup></b>
<b>Température standard</b>	<b>T=25°C</b>
<b>Facteur d'idéalité A</b>	<b>A=1.3</b>
<b>Energie de la bande interdite</b>	<b>Eg= 1.2eV</b>
<b>Courant de court-circuit I<sub>cc</sub></b>	<b>4. 096 A</b>
<b>Tension a circuit ouvert Voc</b>	<b>0.47V</b>

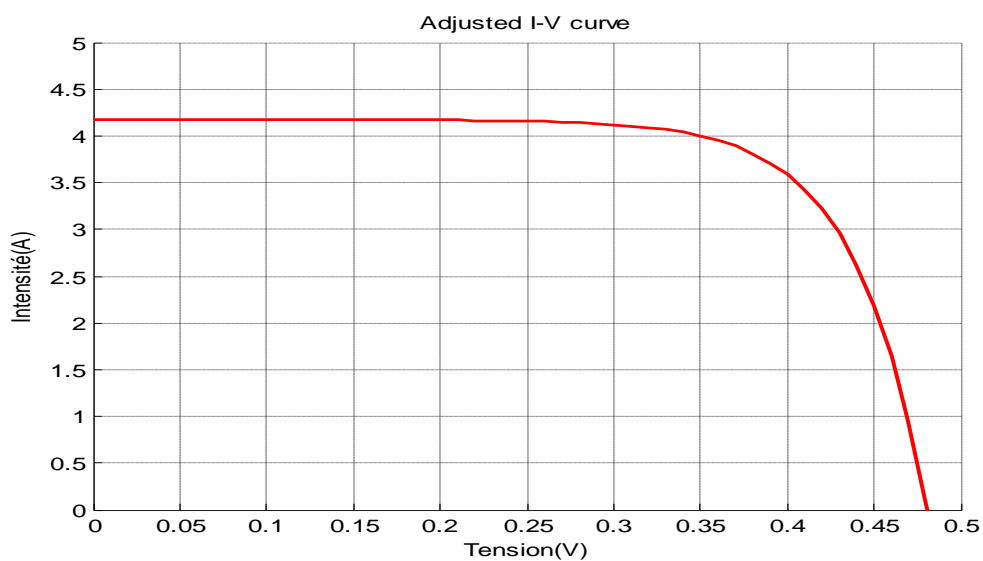
**Tableau.II.1** :Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards <CST>

T=25°C, G=1000W /m<sup>2</sup>.

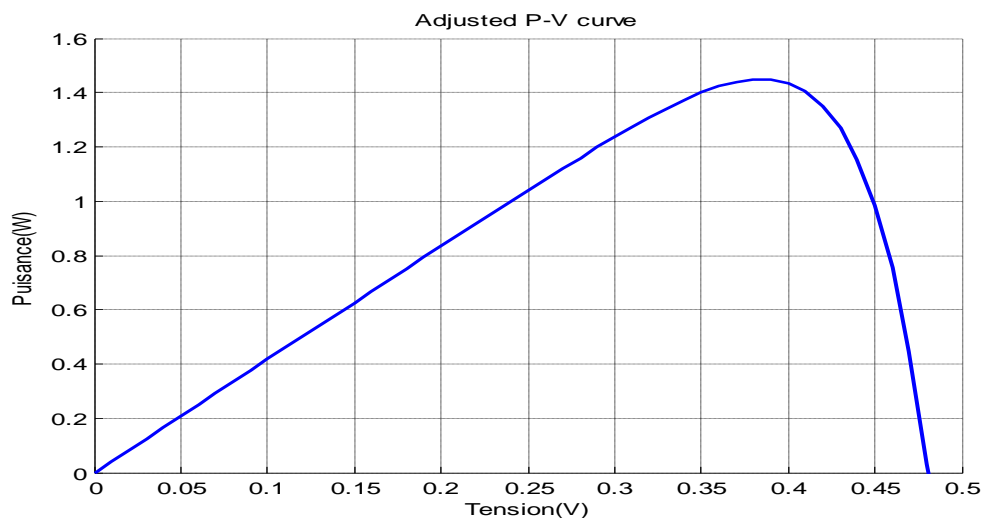
### II.6.1. Caractéristiques I(V) et P(V) :

Les résultats obtenus de la simulation d'une caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $E=1000\text{ W/m}^2$ ) sont représentés dans les figures (II.6) et (II.7) :

Le courant de court circuit est égal à 4.2 A et la tension de circuit ouvert est 0.475 V. On observe que la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.



**Figure II.6 :** Caractéristique I(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{ W/m}^2$ ).



**Figure II.7 :** Caractéristique P(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{ W/m}^2$ ).

## II.7.Caractéristique de module photovoltaïque :

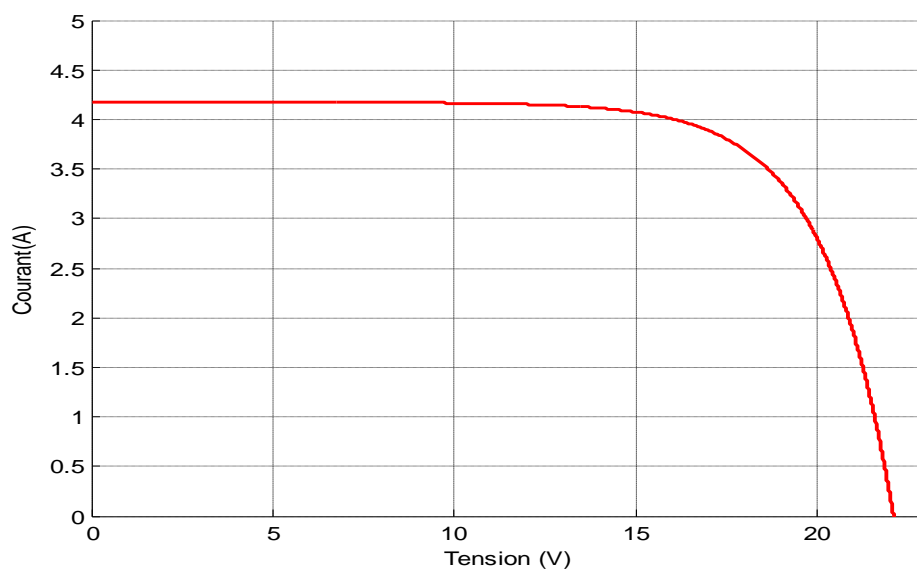
La caractéristique électrique  $P(V)$  de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série et du nombre de branches de cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement. .

Les caractéristiques électriques de générateur sont données :

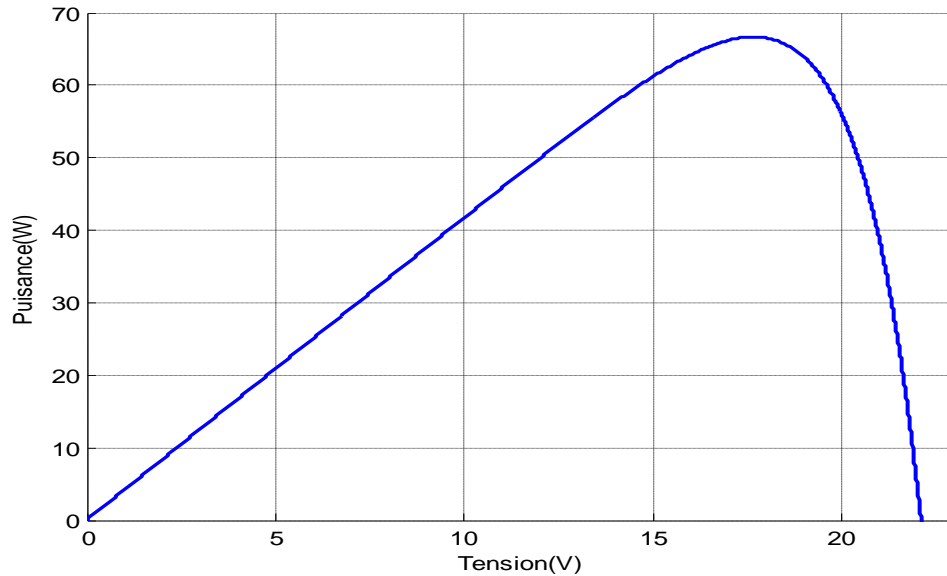
Eclairement standard	$G=[400, 600, 8000, 1000]$
Température	$T=[20, 30, 40, 50]$
Facteur d'idéalité A	$A=1.2$
Energie de la bande interdite	$E_g=1.12\text{eV}$
Courant de court-circuit $I_{cc}$	$I_{ph}=4.0963\text{e-}06$
Résistances en série	$R_s=[0.0041, 0.2, 0.5, 0.9]$
Résistance en parallèles	$R_{sh}=[0.6265, 1, 4, 100]$

**Tableau.II.2** : Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque.

Les figures (II.8) et (II.9) représente la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un générateur photovoltaïque (GPV) dans les conditions standards de fonctionnement.



**Figure.II.8** : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour  $G=1000$   $\text{W/m}^2$  et  $T=25$  °C.



**Figure.II.9:** Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

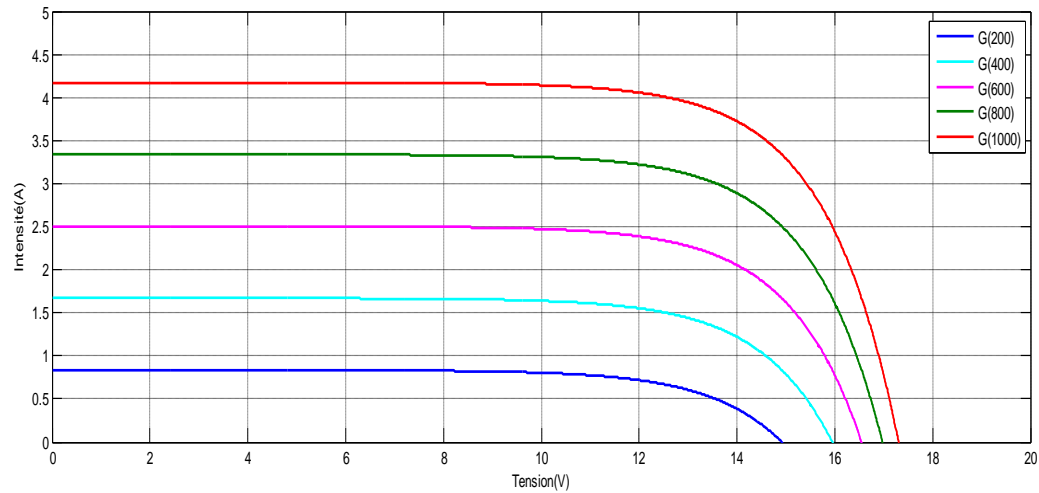
## II.8 Influence de paramètres climatiques sur un générateur photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation.

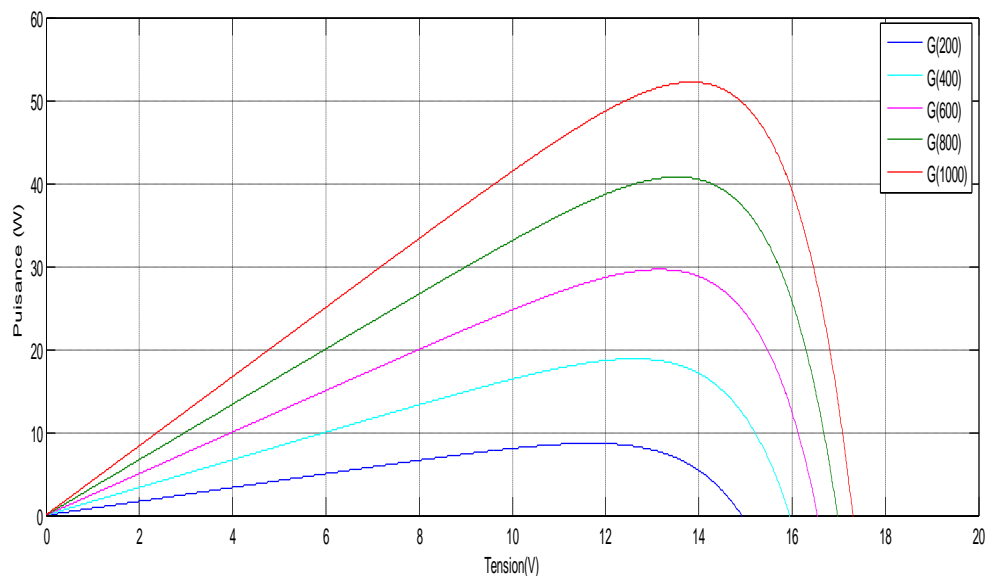
### II.8.1 Influence de l'éclairement sur le générateur :

En faisant varier l'éclairement entre  $400\text{ w/m}^2$  et  $100\text{ w/m}^2$  avec un pas de 200, la caractéristique ( $I=f(V)$ ) est donnée par les figures (II.10) On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement



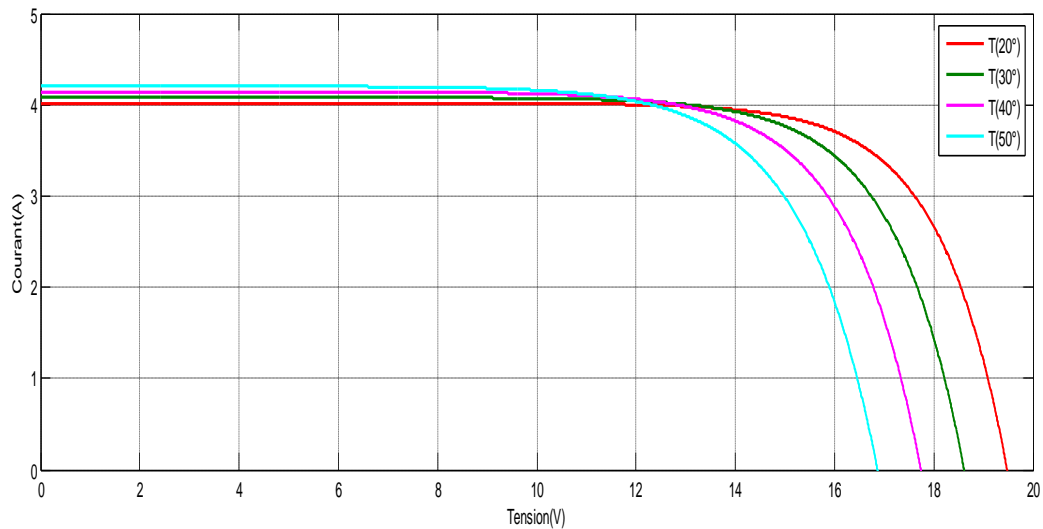
**Figure.II.10** : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ( $G=200,400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T_c=25 \text{ °C}$ .



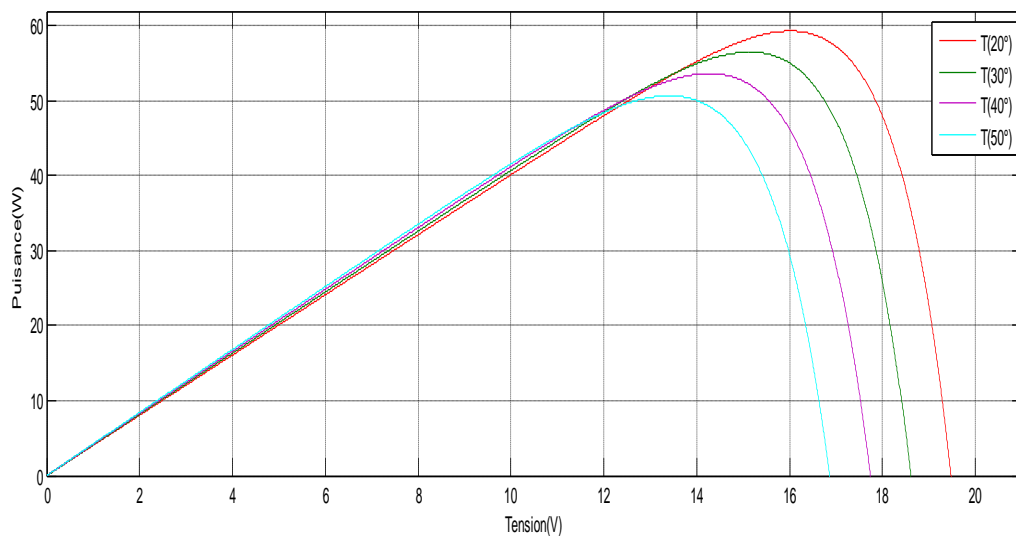
**Figure.II.11** : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ( $G=200,400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T_c=25$ .

Les caractéristiques des figures (II.10 et II.11) montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit  $I_{sc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (à vide) varie très peu.

## II.8.2 Influence de température sur le générateur :



**Figure.II.12 :** Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c=20, 30, 40, 50^\circ\text{C}$ ) et  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ .



**Figure.II.13:** Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c=20, 30, 40, 50^\circ\text{C}$ ) et  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ .

Suivant les figures (II.12 et II.13), on constate que lorsque la température croît à irradiation constante la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  décroît fortement et le courant de court circuit  $I_{sc}$  augmente légèrement.

## II.9 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV :

La cellule tout de seule ne produit qu'une très faible puissance avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un générateur. Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et /ou parallèle

des cellules.

### II.9.1 Influence de l'association série des cellules PV :

La figure (II.14) représente la caractéristique (I-V) d'une association de cellule en série :

La tension de circuit ouvert augmente quand le nombre de cellule en série augmente, la valeur de courant de court-circuit n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en série alors que la puissance augmente.

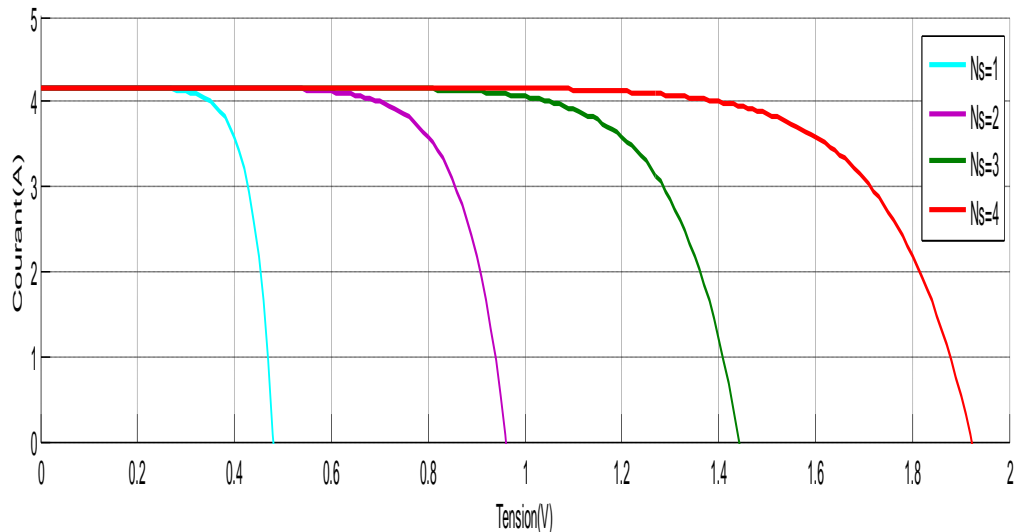


Figure.II.14 : Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série.

### II.9.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV :

Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de La tension de circuit ouvert n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente (Figure II.15).

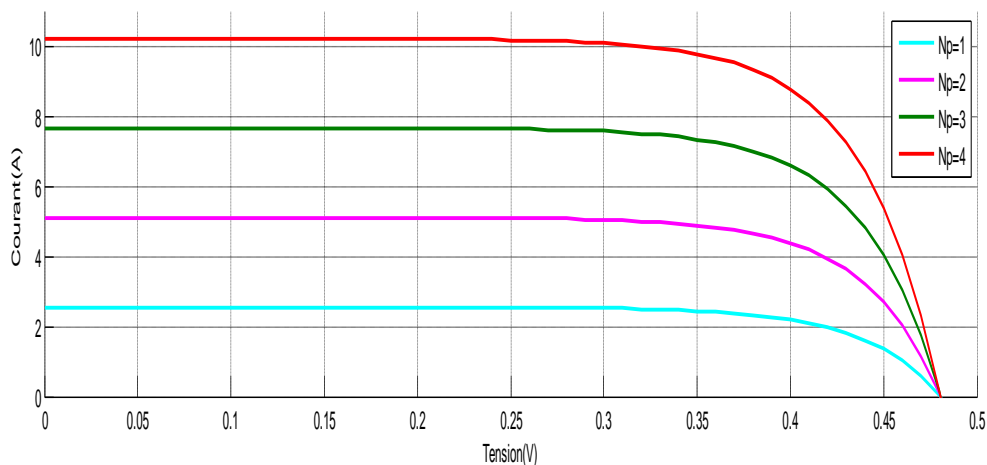
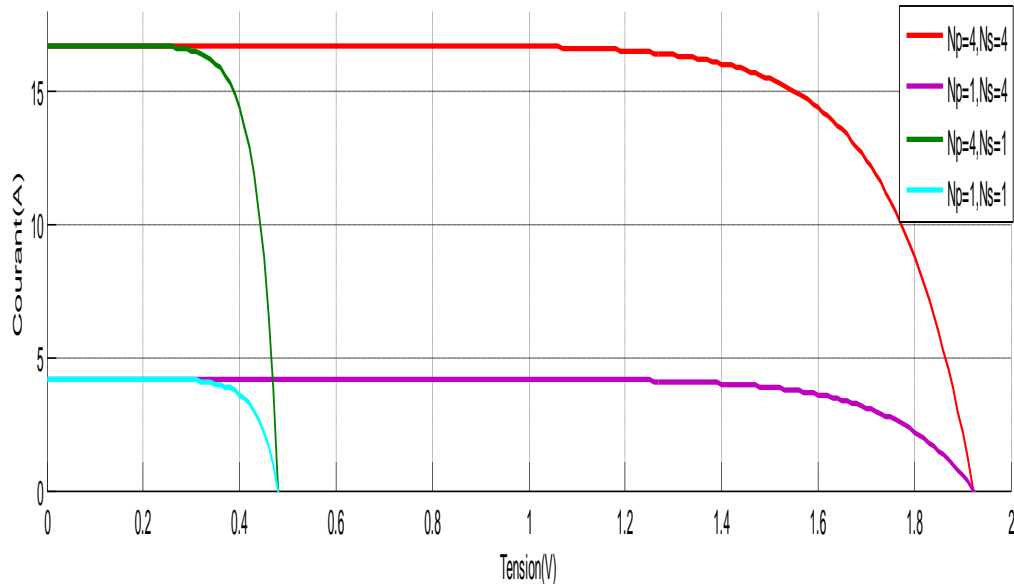


Figure (II.15) : Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

### II.9.3 influence de l'association série-parallèle sur un générateur photovoltaïque :

La figure (II.16) représente la caractéristique (I-V) d'une association de cellule en série-parallèle :

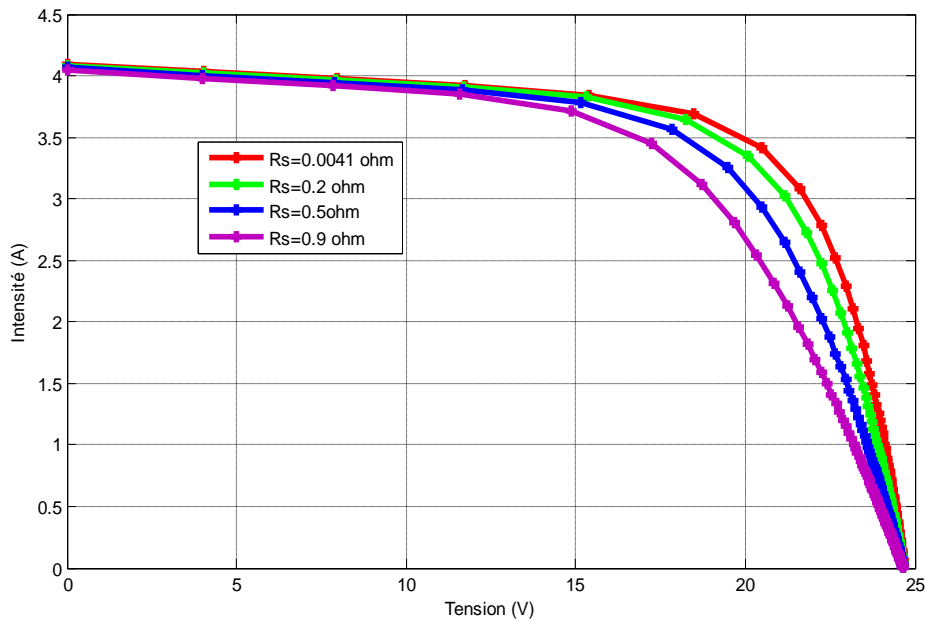


**Figure (II.16) :** Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série-parallèle ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), et ( $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

## II.10 Influence de paramètre électrique sur un générateur photovoltaïque

### II.10.1 influence de la résistance série sur un générateur photovoltaïque

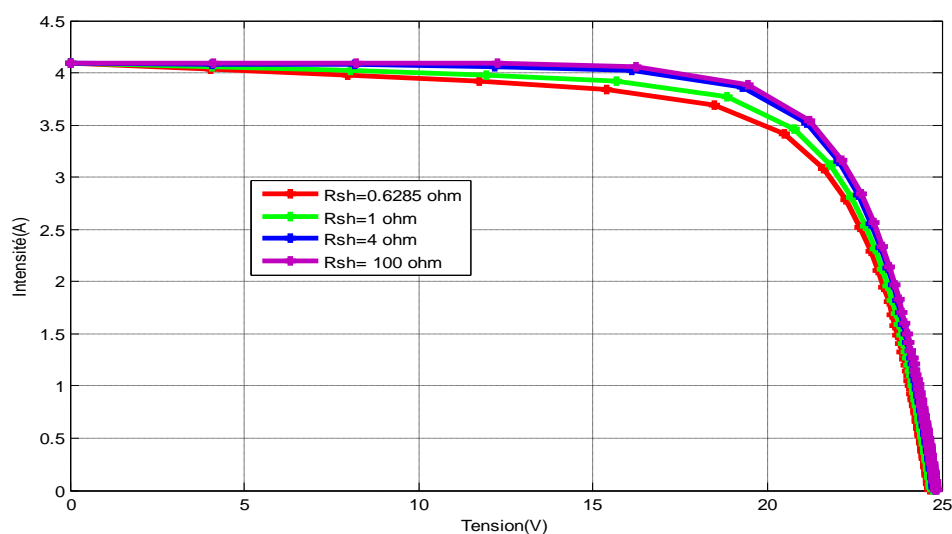
La figure (II.17) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V, cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I=f(V)$  dans la zone où le panneau fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum. la valeur de  $R_s$  influe négativement sur la puissance. Quand la résistance série augmente la puissance diminue. Par conséquent la puissance maximale de la générateur PV subit une diminution.



**Figure II.17 :** Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), et ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

### II.10.2 Influence de la résistance shunt sur le générateur photovoltaïque

Lorsque la résistance shunt diminue, la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit sont diminués. Lorsque la résistance shunt est très petite son influence est très remarquable, comme le montre la figure (II.18).



**Figure II.18 :** Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance shunt ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), et ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

## II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque , Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque ( composé de 36 cellules connectées en série ) dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$  ,  $T=25^\circ\text{C}$ ). Nous avons étudié aussi l'influence des paramètres climatiques et électriques sur un générateur photovoltaïque ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite. La présentation de la technique d'optimisation proposée, ainsi que l'étude statique et dynamique du modèle à 5 paramètres sera l'objet du chapitre suivant.

*Chapitre III*  
*Etude statique et dynamique*  
*d'un générateur*  
*photovoltaïque*

### III.1 Introduction :

La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la relation non linéaire du courant en fonction de la tension (IV) courbe. La détermination des paramètres joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Ce chapitre présente une application de la méthode de loup gris ou Grey Wolf (GWO) pour identifier les paramètres de modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. Enfin, les paramètres extraits sont utilisés dans un modèle comportemental du point de puissance maximale d'un générateur PV et comparés aux données mesurées d'un système PV connecté au réseau situé au Centre de Développement des Energies Renouvelables situé à Alger (Algérie). Les résultats prouvent que GWO est un outil très approprié pour estimer les paramètres électriques nécessaires à la modélisation du générateur photovoltaïque pour la prédiction à long terme.

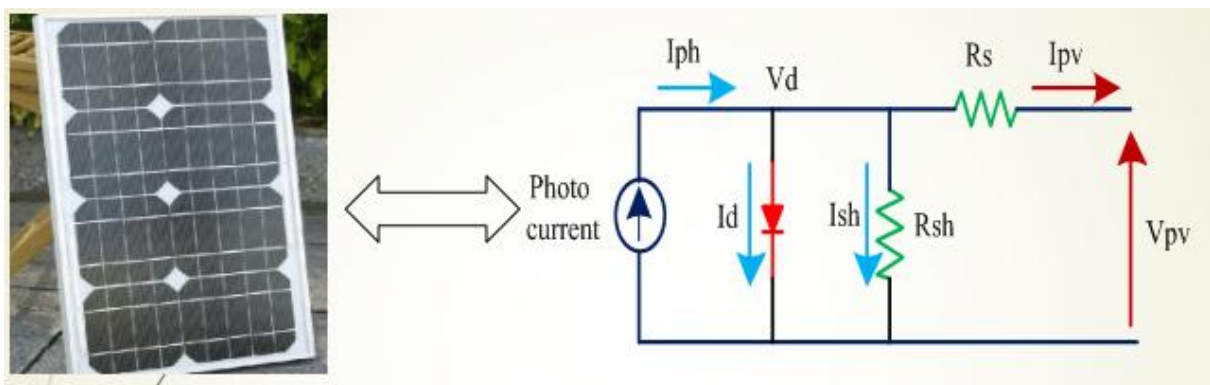
### III.2. Etude statique :

Cette section présente une application de la méthode Grey Wolf (GWO). pour identifier les paramètres de modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. La technique proposée est utilisée pour identifier les paramètres inconnus du modèle d'un seul diode, à savoir le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série, la résistance shunt, et le facteur d'idéalité qui régissent la relation de courant-tension de la cellule solaire.

#### III.2.1 Modélisation de module photovoltaïque :

Comme le montre la figure.III.1, le modèle à une seule diode est simple, facile à résoudre et convient aux applications de génie électrique.

Le comportement du module photovoltaïque est généralement décrit par sa caractéristique courant-tension, dans laquelle leur forme dépend de la valeur des cinq paramètres et de la dépendance à la lumière solaire et à la température du module.



**Figure.III.1 :** Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrées sont :

- $E_s$ : Ensoleillement incident ( $w/m^2$ )
- $T_j$  : température de jonction de la cellule ( $^{\circ}C$ )

Les deux variables de sortie sont :

- $I_{pv}$  : courant fourni par la cellule (A)
- $V_{pv}$  : tension aux bornes de la cellule (V)

On a:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (III.1)$$

Où

$I_{pv}$  : est le courant fourni par cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

$T$  : est la température effective des cellules en Kelvin (K),

$V_{cell}$  : est la tension aux bornes de cette même cellule

$R_{sh}$  : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

$R_s$  : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

$K$ : Le constant de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ),

$q$  : La charge électrique ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

$n$  : Le facteur d'idéalité

Les cinq paramètres de l'équation caractéristique sont généralement donnés par les fabricants de modules dans des conditions de fonctionnement nominales. Cependant, l'expérience a montré que les valeurs réelles obtenues dans des conditions de travail réelles diffèrent des valeurs nominales. Par conséquent, la nécessité de faire correspondre le modèle de module PV donné par (III.1) avec des données expérimentales, à des fins de prédiction, passe inévitablement par la recherche des valeurs correctes des cinq paramètres.

### III.2.2 Principe d'optimisation :

Le processus d'extraction des paramètres peut être transformé en un problème d'optimisation qui peut être résolu par la méthode de GWO proposée dans ce travail. Dans ce dernier, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est choisie comme un paramètre pour quantifier la différence entre les résultats du modèle basés sur les équations (III.1) et les données mesurés. Le RMSE est évalué pour chaque paire de valeurs expérimentales (I, V) en tant que la différence entre le courant réel mesuré et le courant calculé basé sur l'utilisation de l'algorithme de Loup gris, comme suit :

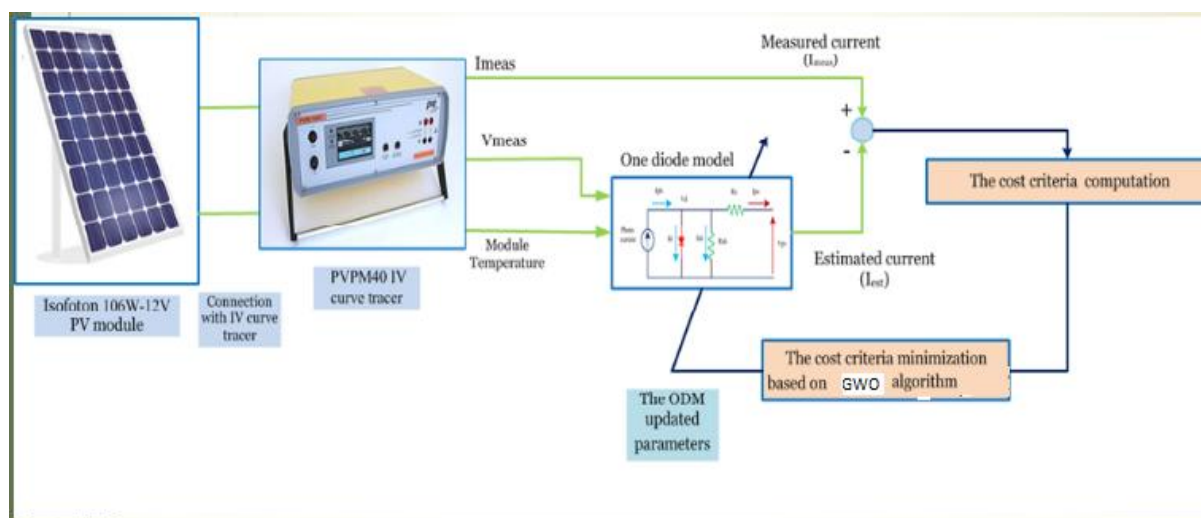
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N (f(V, I, x))^2)} \quad (III.2)$$

$$f(V, I, x) = I - \left( I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (III.3)$$

$x$  représente le vecteur des paramètres optimaux du courant calculé.

Où  $x = [I_{ph}, I_0, R_{sh}, R_s, n]$ , et  $N$  est le nombre de points de données

La figure III.2 présente la procédure d'extraction des paramètres. Tout d'abord, le module ISFOTON 106/12 est relié avec le traceur PVPM 40 IV pour nous donne le courant mesuré pour chaque tension correspondante. A partir de cette dernière et la température du module, on calcule le courant qui sera comparé avec le courant mesuré pour déterminer notre fonction objective. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfis, on fait appel à l'algorithme de GWO pour nous donne les nouveaux paramètres qui seront injecté dans le circuit électrique proposé. Le même travail sera répété jusqu'à la fin de la procédure.



**Figure.III.2:** La procédure d'extraction des paramètres ODM.

### III.2.3 L'algorithme de loup gris (Grey Wolf Optimisation)

L'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimisation GWO) est une technique intelligente de l'essaim développée par Mirjalili et al, 2014, qui imite la hiérarchie de leadership des loups qui sont bien connus pour leur chasse de groupe. Cet algorithme imite le leadership social comportement de chasse des loups gris dans la nature. Dans cet algorithme la population est divisée en quatre groupes : alpha ( $\alpha$ ), bêta ( $\beta$ ), delta ( $\delta$ ) et oméga ( $\omega$ ). Les trois premiers plus forts loups sont considérés comme  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$  qui guident les autres loups ( $\omega$ ) vers des zones prometteuses de l'espace de recherche. Les loups gris sont considérés comme des prédateurs, ce qui signifie qu'ils sont au sommet de la chaîne alimentaire. Les loups gris préfèrent généralement vivre dans un groupe. La taille du groupe est de 5-12 en moyenne. D'un intérêt particulier est qu'ils avoir une hiérarchie sociale dominante très stricte [32].

- Le premier niveau appelés alphas( $\alpha$ ). Les loups alpha sont les leaders de la meute et ils sont un mâle et femelle. Ils sont principalement responsables de prendre des décisions sur la chasse, le lieu de sommeil, le temps de se réveiller, et ainsi de suite. Les décisions de l'alpha sont dictées au groupe. Cependant, une sorte de comportement démocratique a également été observé, dans lequel un alpha suit les autres loups dans le groupe. Dans les rassemblements, l'ensemble du paquet reconnaît l'alpha par tenant leurs queues vers le bas. Le loup alpha est aussi appelé le loup dominant puisque ses ordres devraient être suivis par le paquet. Les loups alpha sont seulement autorisés à s'accoupler dans le pack. Fait intéressant, l'alpha n'est pas nécessairement le membre le plus fort de la meute mais le meilleur en termes de gestion du pack. Cela montre que l'organisation et la discipline d'un pack est beaucoup plus important que sa force.
- Le deuxième niveau s'appelle bêta ( $\beta$ ). Les bêtas sont des loups subordonnés qui aident l'alpha dans la prise de décision ou d'autres activités de pack. Le loup bêta peut être mâle ou femelle, et il / elle est probablement le meilleur candidat pour être l'alpha en cas l'un des loups alpha décède ou devient très vieux. Le loup bêta devrait respecter l'alpha, mais commande l'autre niveau inférieur des loups aussi. Il joue le rôle de conseiller de l'alpha et de la discipline pour le pack. La version bêta renforce les commandes de l'alpha tout au long du pack et donne des commentaires à l'alpha.
- Le troisième niveau s'elle Delta ( $\delta$ ). Le loup n'est pas un alpha, bêta ou oméga, ils sont s'appelé subordonnés (ou delta dans certaines références). Les loups Delta doivent soumettre aux alphas et aux bêtas, mais ils dominent l'oméga(le niveau le plus pas). Scouts, sentinelles, les anciens, les chasseurs et les gardiens appartiennent à cette catégorie. Scouts sont responsables de regarder les limites du territoire et avertir le pack en cas de danger. Les sentinelles protègent et garantissent la sécurité du pack. Les anciens sont les loups expérimentés qui utilisé pour être alpha ou bêta. Les chasseurs aident les alphas et les betas quand chasse la proie et fournir de la nourriture pour le pack.

- Le quatrième niveau (plus bas) s'appelle oméga( $\omega$ ). L'oméga joue le rôle de bouc émissaire. Les loups oméga doivent toujours se soumettre à tous les autres loups dominants. Ce sont les derniers loups autorisés à manger. Il peut sembler que l'oméga n'est pas un individu important dans le paquet, mais il a été observé que l'ensemble du pack rencontre des problèmes en cas de perte de l'oméga. Cela est dû au dégagement de la violence et de la frustration de tous les loups par l'oméga. Cela aide à satisfaire l'ensemble du paquet et à maintenir la structure de dominance.

En plus de la hiérarchie sociale des loups, la chasse de groupe est aussi l'un des comportements sociaux intéressants des loups gris [33]. Les principales phases de la chasse au loup gris sont les suivantes :

- 1) Suivre, chasser et approcher la proie.
- 2) Poursuivre, encercler et harceler la proie jusqu'à ce qu'elle arrête de bouger.
- 3) Attaque vers la proie.

Ces deux comportements sociaux de la meute de loups gris (hiérarchie sociale et chasse technique) sont modélisés dans l'algorithme GWO voir figure.III.3 :



**Figure.III.3 :** Comportement de chasse des loups gris : (A) suivre, chasser et approcher la proie (B-D) poursuivre, encercler et harceler la proie. (E) situation stationnaire et attaque [32].

### III.2.4 Opérateurs :

Dans cette section, la modélisation mathématique de la hiérarchie sociale des loups gris et leur technique de chasse (poursuite, encerclement et attaque de proies) dans l'algorithme GWO sont détaillées.

- **Hiérarchie sociale :**

Afin de modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des loups lors de la conception de GWO, nous considérons la solution la plus apte comme l'alpha ( $\alpha$ ). Par conséquent, les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions sont respectivement considérées comme beta

( $\beta$ ) et delta ( $\delta$ ). Le reste des solutions candidates sont supposés être des omégas ( $\omega$ ). Dans l'algorithme GWO, la chasse (optimisation) est guidée par  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$ , et les ( $\omega$ ) les suivent.

➤ **Encercler les proies :**

La méthode d'optimisation GWO modélise le comportement des loups, et assimile la recherche du minimum d'une fonction cout à la stratégie de chasse d'une meute de loups. La traque de la proie correspond à l'exploration ou recherche globale, l'attaque à l'exploitation ou recherche locale comme mentionné ci-dessus, les loups gris entourent les proies pendant la chasse.

Afin de modéliser mathématiquement le comportement d'encerclement les équations sont proposées [32] :

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{Xp} - \vec{X}(t)| \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{Xp}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (\text{III.5})$$

Où t indique l'itération en cours,  $\vec{A}$  et  $\vec{C}$  sont des vecteurs de coefficients,  $\vec{Xp}$  est le vecteur de position de la proie,  $\vec{X}$  est le vecteur de position d'un loup gris.

Les vecteurs  $\vec{A}$  et  $\vec{C}$  sont calculés comme suit:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \cdot \vec{X}_p \quad (\text{III.7})$$

$\vec{a}$  est diminué linéairement de 2 à 0, et  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  sont des vecteurs aléatoires dans [ 0.1 ] .

Pour avoir les effets des équations (III.9) et (III.10), un vecteur de position bidimensionnel et certains des voisins possibles sont illustrés sur la figure III.4

Comme on peut le voir sur cette figure, un loup gris dans la position de (X, Y) peut mettre à jour sa position en fonction de la position de la proie (X\*, Y\*). Différents endroits autour du meilleur agent peuvent être atteints par rapport la position actuelle en ajustant la valeur des vecteurs  $\vec{A}$  et  $\vec{C}$ . Par exemple ( X\* - X, Y\* - Y ) peut être atteint en réglant,  $\vec{A}=(1,0)$  et  $\vec{C}=(1,1)$ . Les positions possibles mise à jour d'un loup gris dans l'espace 3D sont représentées sur la figure III.4 Notez que les vecteur aléatoires  $\vec{r}_1$  et  $\vec{r}_2$  permettent aux loups d'atteindre n'importe quelle position entre les points illustrés sur la figure III.4 . Ainsi, un loup gris peut mettre à jour sa position dans l'espace autour de la proie en utilisant des équations aléatoires (III.9) et (III.10).

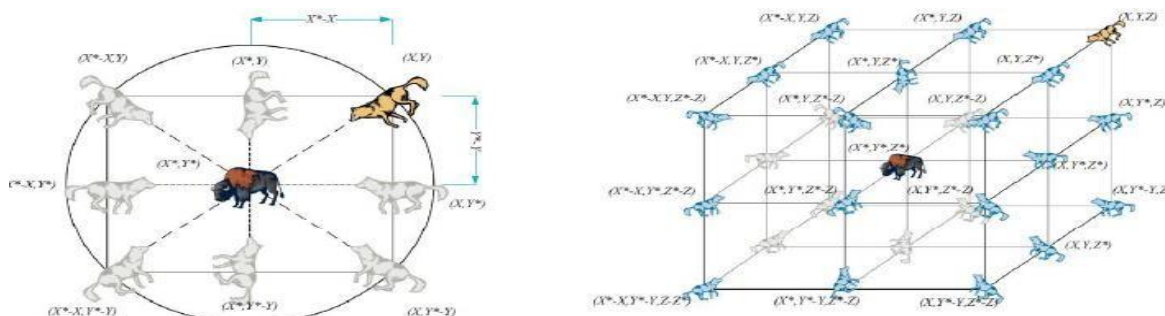
Les trois premières meilleures solutions sont sauvegardées et l'autre agent est obligé de mettre à jour ses positions n fonction de position des meilleurs agents de recherche, comme indiqué dans les équations suivantes :

$$\begin{cases} \vec{D}\alpha = |\vec{C} 1. \vec{X} \alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}\beta = |\vec{C} 2. \vec{X} \beta - \vec{X}| \\ \vec{D}\delta = |\vec{C} 3. \vec{X} \delta - \vec{X}| \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{cases} \vec{X}1 = \vec{X} \alpha - \vec{A} 1. \vec{D}\alpha \\ \vec{X}2 = \vec{X} \beta - \vec{A} 2. \vec{D}\beta \\ \vec{X}3 = \vec{X} \delta - \vec{A} 3. \vec{D}\beta \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}1 + \vec{X}2 + \vec{X}3}{3} \quad (\text{III.10})$$

- $\vec{X} \alpha (t)$  Représente la position de l'alpha.
- $\vec{X} \beta (t)$  Indique le La position de la bêta.
- $\vec{X} \delta (t)$  Est la position de delta.
- C1, C2, C3 Sont des vecteurs aléatoires et X indique la position de la solution actuelle.



**Figure.III.4 :** Représentation 2D et 3D des vecteurs de position et leurs prochains emplacements possibles [33].

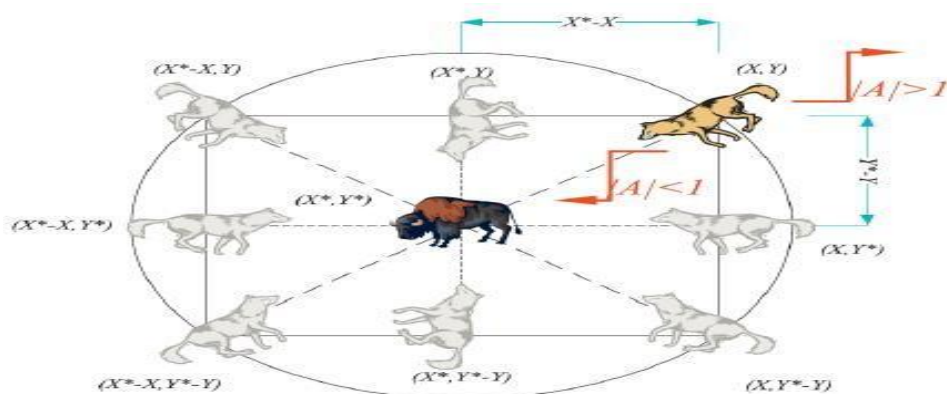
#### ➤ Attaquer la proie :

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris finissent le processus de chasse en attaquant la proie quand elle arrête de bouger. Afin de modéliser le processus d'attaque, le paramètre  $\vec{\alpha}$  dans [32], décroît régulièrement de 2 à 0 entre  $t=1$  et  $t=T$  :  $\vec{\alpha} = 2(1 - \frac{t}{T})$ . L'opération de chasse est généralement guidée par l'alpha. La beta et le delta pourraient participer à la chasse de temps en temps. Dans le modèle mathématique du comportement de chasse des loups gris, nous avons supposé que l'alpha, la beta et le delta avaient une meilleure connaissance de l'emplacement potentiel des proies.

Durant la chasse, la phase 'exploration court jusqu'à ce que la condition  $|\vec{A}| \geq 1$  soit respectée : les loups sont forcés à s'éloigner les uns des autres. En suite commence la phase d'exploitation, dès que d'autres termes  $|\vec{A}| < 1$  les loups sont forcés d'attaquer la proie. Par conséquent, un paramètre clé pour équilibrer les phases d'exploration et d'exploitation est le paramètre  $a$ . la recherche globale s'arrête à  $a=1$ . commence alors la recherche locale, jusqu'à  $a=0$ .

➤ **La recherche de la proie (exploration) :**

Les loups gris recherchent souvent la proie selon les positions de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ . ils divergent les uns des autres pour explorer la position de la proie et convergent ensuite pour attaquer la proie. Afin de modéliser mathématiquement la divergence des loups gris,  $|\vec{A}|$  peut être utilisé.  $|\vec{A}|$  est un vecteur aléatoire qui est supérieure à 1 ou inférieure à -1 pour forcer l'agent de recherche à diverger de la proie, ce qui accentue la recherche globale dans l'GWO. La figure III.5 montre que lorsque  $|\vec{A}| < 1$ , le loup gris est forcé de s'éloigner de la proie (optimal local) pour rechercher de meilleures solutions dans l'espace de décision.



**Figure.III.5 :** mécanisme de positionnement de l'agent de recherche et de l'effet de ce qui le présente [32].

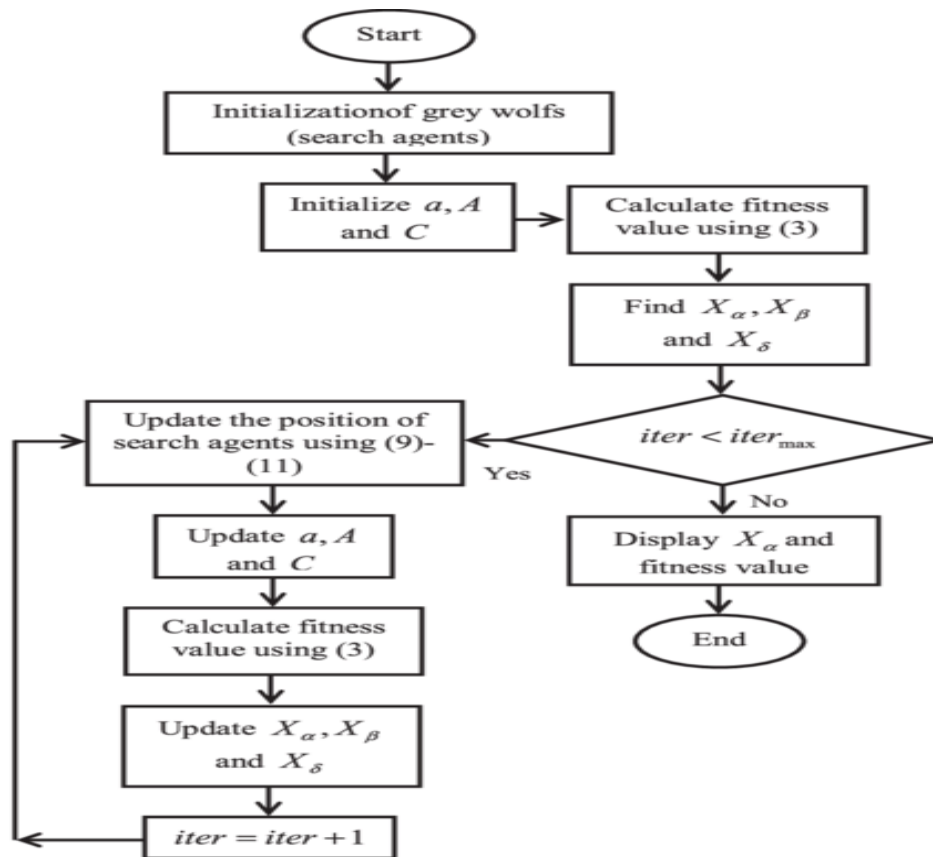
### III.2.5 Les étapes générales de l'algorithme GWO :

- Initialiser une population de loups au hasard sur la base des limites supérieure et inférieure des variables.
- Calculer la valeur de la fonction objective correspondante pour chaque Loup.
- Choisir les trois premiers meilleurs loups et sauvegarde-les sous  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$ .
- Actualiser la position du reste de la population (loups) en utilisant les équations précédente.
- Mise à jour des paramètres  $a$ ,  $A$  et  $C$ .
- Passez à la 2<sup>ème</sup> étape si le critère final n'est pas satisfait.
- Renvoie la position de  $\alpha$  comme optimum optimal approximé.

L'organigramme de la figure III.6 résume l'ensemble des étapes citées auparavant.

**Mirjalili et al.** A montré que l'algorithme GWO est capable de fournir des résultats très compétitifs par rapport à d'autres méta-heuristiques bien connues. D'une part, l'exploration de cet algorithme est très élevée et nécessite d'éviter les optima locaux.

De plus, l'équilibre entre exploration et exploitation est très simple et efficace pour résoudre des problèmes difficiles selon les résultats dans des problèmes réels. [32]



**Figure.III.6 :** Organigramme de l'algorithme de Grey Wolf.

### III.2.6 Résultat de la simulation :

L'algorithme de Grey Wolf a été codé dans l'environnement Matlab pour extraire les paramètres du module PV à l'aide de données I-V réelles. Afin de vérifier l'efficacité de l'extraction des paramètres obtenus par l'application de cet algorithme, les données de mesure collectées du module ISOFOTON 106/12 ont été utilisées, où ses caractéristiques électriques sont résumées dans le tableau III.1. Le tableau III.2 résume les valeurs supérieures et inférieures des bandes des paramètres du module PV. Dans le tableau III.3, les paramètres extraits à l'aide de l'algorithme GW sont représentés pour le modèle à diode. Une comparaison entre les caractéristiques mesurées (IV), (PV) et celles estimées à l'aide des paramètres extraits des modèles PV donnés par (III.3) sont présentées dans les Figure.III.7, Figure.III.8 respectivement. Le test de validation utilisant différentes conditions météorologiques est présenté par la Figure.III.10. Enfin, lors du processus d'extraction, le taux de convergence de l'algorithme GW est illustré par la Figure.III.9.

CARACTERISTIQUE ELECTRIQUES	ISOFOTON 106/12
$P_{mp}(W)$	<b>106</b>
$V_{oc}(V)$	<b>21.6</b>
$I_{sc}(A)$	<b>6.54</b>
$V_{mp}(V)$	<b>17.4</b>
$I_{mp}(A)$	<b>6.10</b>
$\alpha I_{sc} (\%/^{\circ}C)$	<b>0.060</b>
$\beta V_{oc} (\%/^{\circ}C)$	<b>-0.36</b>

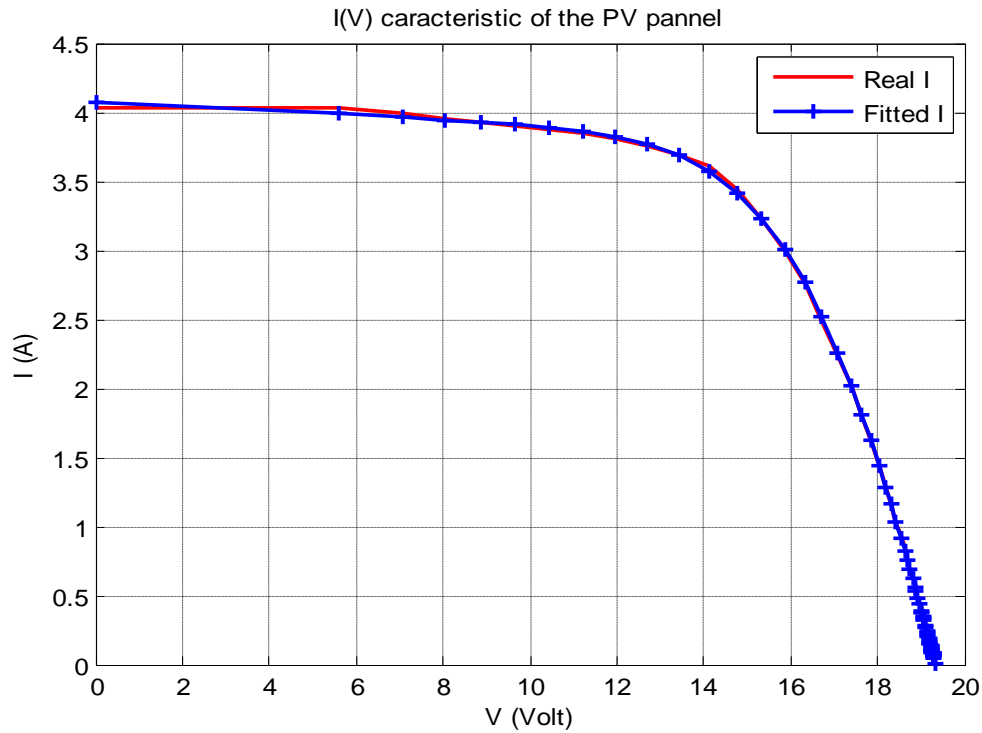
**Tableau.III.1** : Caractéristique électriques du module ISOFOTON 106/12.

LES PARAMETRES	ISOFOTON 106/12
$I_o (A)$	[ $10^{-7}$ _ $10^{-4}$ ]
$I_{ph} (A)$	[ <b>0</b> _ <b>10</b> ]
$R_s (\Omega)$	[ <b>0</b> _ <b>1</b> ]
$R_{sh} (\Omega)$	[ <b>0</b> _ <b>100</b> ]
<b>N</b>	[ <b>0</b> _ <b>75</b> ]

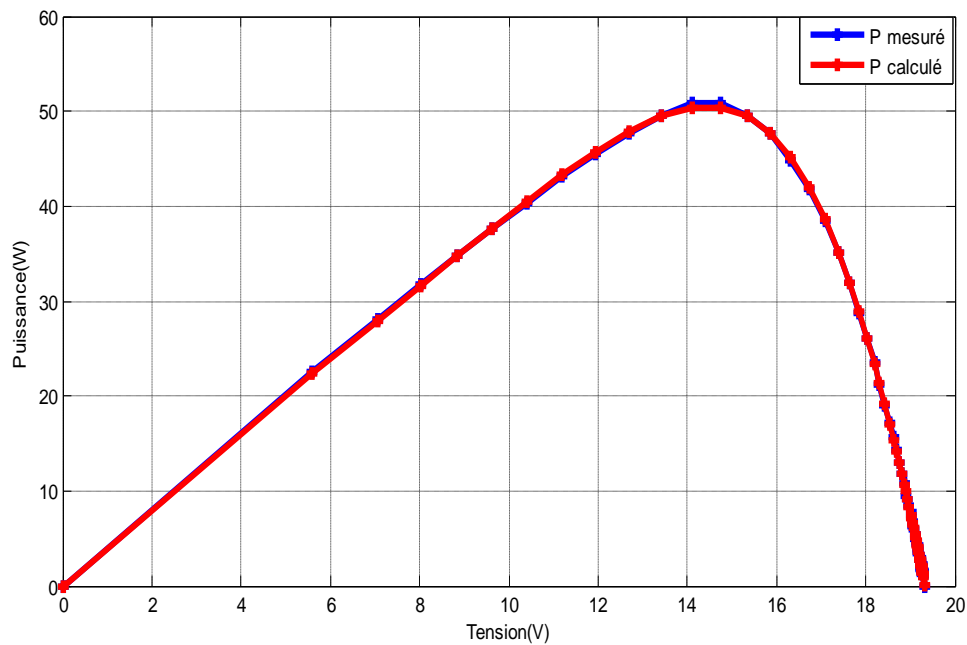
**Tableau.III.2** : Valeurs supérieures et inférieures du module PV ISOFOTON 106/12.

<b>Isate</b>	3.7015 e-006
<b>Iphe</b>	4.1077
<b>Rse</b>	0.4444
<b>Ne</b>	53.3227
<b>Rpe</b>	61.6834
<b>Fitness</b>	<b>0.0133</b>

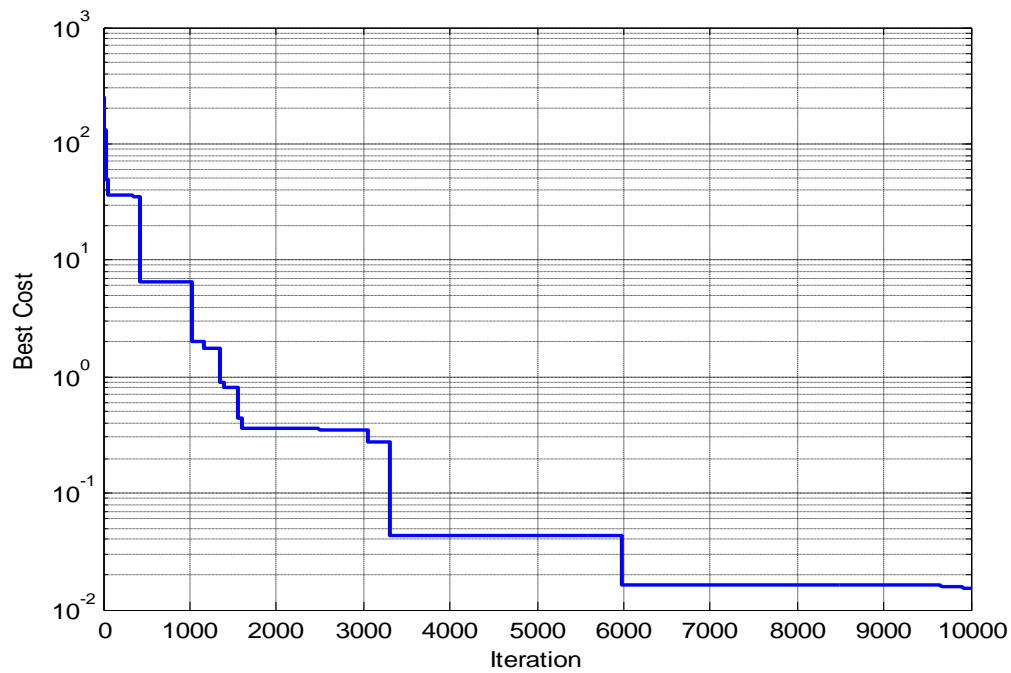
**Tableau.III.3** : Les paramètres extraits de module PV ISOFOTON106/12.



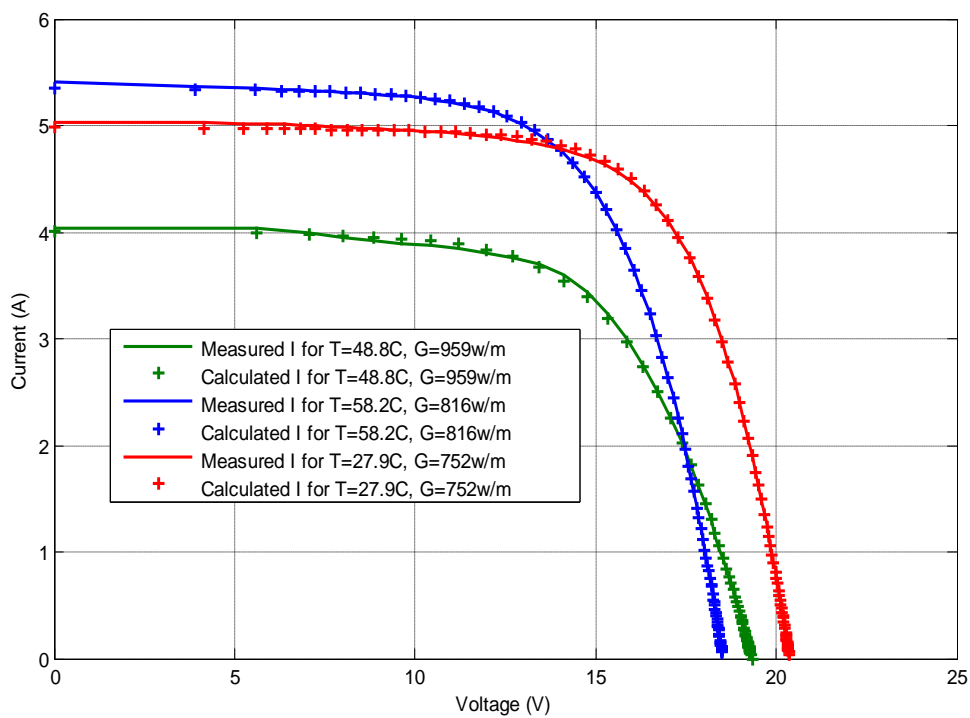
**Figure.III.7** : Courbe de I-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour  $(G=959W/m^2, T=48.8^{\circ}C)$ .



**Figure.III.8** : Courbe de P-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour  $(G=959W/m^2, T=48.8^{\circ}C)$ .



**Figure.III.9:** Vitesse de convergence de l'algorithme GWO pendant le processus d'extraction.



**Figure.III.10:** Courbe IV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour différentes conditions météorologiques.

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques théoriques ( $I_V$ ) et ( $P_V$ ) sont très proches des caractéristiques expérimentales mesurées ( $I_V$ ) et ( $P_V$ ) respectivement. Les résultats prouvent l'efficacité de la technique proposée pour extraire avec une bonne précision les paramètres du modèle de circuit équivalent.

### III.2.7. Comparaison avec la littérature :

Une étude comparative avec trois autres algorithmes d'optimisation trouvés dans la littérature [50, 51, 52] a été faite pour vérifier les performances de l'algorithme proposé. Les algorithmes sont les suivants: évolution différentielle (DE), optimisation des essaims de particules (PSO) et colonie d'abeilles (ABC). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (III.4). Les valeurs de Fitness (en tant que critère d'évaluation), permettent de conclure la bonne qualité des paramètres identifiés en utilisant l'algorithme GWO par rapport à ceux obtenus par DE, PSO et ABC.

	GWO	DE	PSO	ABC
Isate	3.7015 e-006	6.71	6.73	6.73
Iphe	4.1077	1.62e -005	1e-005	1.38 e -005
Rse	0.4444	0.12	0.13	0.12
ne	53.3227	62.53	60.24	61.76
Rpe	61.6834	120	95.50	103
<b>Fitness</b>	<b>0.0133</b>	<b>0.018</b>	<b>0.018</b>	<b>0.015</b>

**Tableau.III.4 :** Etude comparative entre les algorithmes d'optimisation.

### III.3. Etude dynamique :

Une autre étude pour vérifier l'exactitude des paramètres extraits à l'aide de l'algorithme de GW est considérée où une expérience a été réalisée sur une évolution dynamique du point de puissance maximale dans un système réel photovoltaïque connecté au réseau. Le système PV est situé sur le toit du bâtiment administratif du "Centre De Développement des Energies Renouvelables (CDER)" à Alger, Algérie, comme le montre la Fig.III.11. Il se compose de trois sous-réseaux de 30 modules PV chacun. La sortie de chaque sous-réseau est connectée à un onduleur PV monophasé de 2,5 kW de type Fronius IG30.

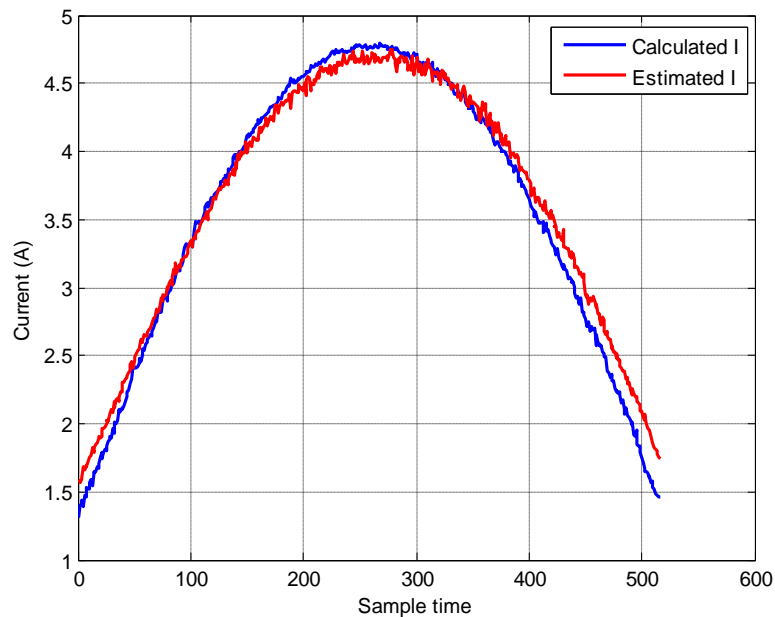


**Figure.III.11:** Le schéma du système PV.

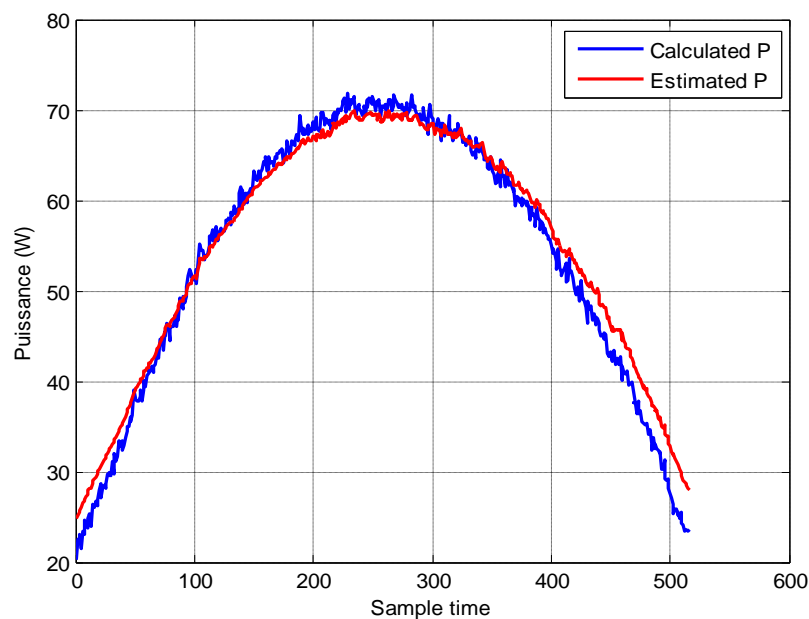
A cet effet, le modèle adapté basé sur l'évolution quotidienne du MPP a été tracé par rapport aux profils MPP réels obtenus pour deux ciels algériens typiques : un ciel clair et un ciel nuageux. Le véritable système PV est formé de deux chaînes parallèles ; chaque chaîne est composée de quinze modules PV ISOFOTON 106/12 connectés en série. Les données ont été enregistrées avec une période d'échantillonnage de 1 minute. Les Figure.III.(12 et 13) rapportent l'évolution temporelle du courant et de la puissance extraits en utilisant le modèle adapté par GW et les modèles mesurés respectivement pour un profil de ciel clair. Tandis que, l'évolution temporelle des mêmes quantités pour un profil de jour semi-nuageux est montrée respectivement sur les Figure.III(14 et 15). A partir des résultats de simulation et pour les deux tests (ciel clair et jour semi-nuageux), on observe un bon accord entre les valeurs mesurées et estimées du courant et de la puissance du point de puissance maximum, ce qui prouve l'efficacité du processus d'identification et la puissance de l'approche proposée. L'efficacité de l'approche proposée est plus clairement mise en évidence dans le graphique à barres de la figure.III.16 et de la figure.III.17, dans lequel il est indiqué le rendement horaire prévu et mesuré ( $Y_a$ ) du ciel clair et du jour semi-nuageux respectivement.. Le rendement horaire du générateur ( $Y_a$ ) est défini comme la puissance horaire du générateur photovoltaïque divisée par la puissance nominale du générateur photovoltaïque installé, il est donné par :

$$Y_a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t \cdot P_i / n}{\text{puissance nominale}} \quad (\text{III.11})$$

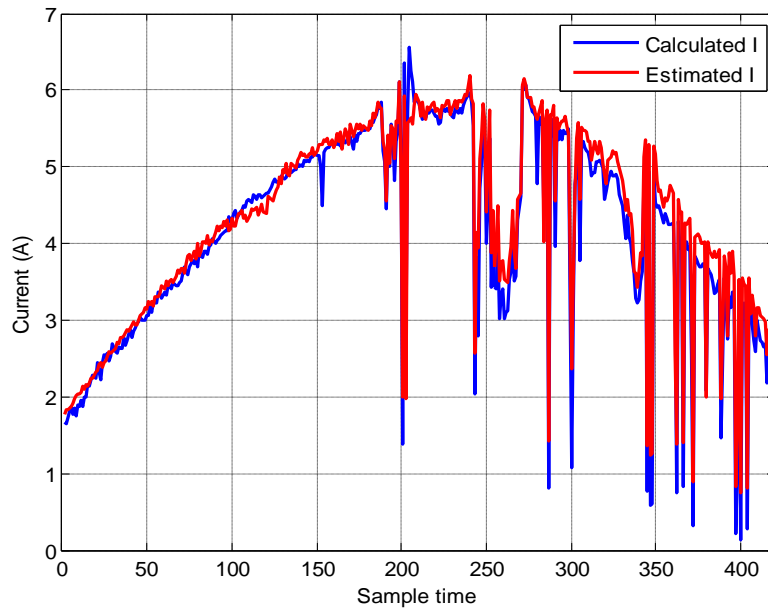
où  $n$  est le nombre d'échantillons et la puissance nominale est la puissance de crête du générateur photovoltaïque installé.



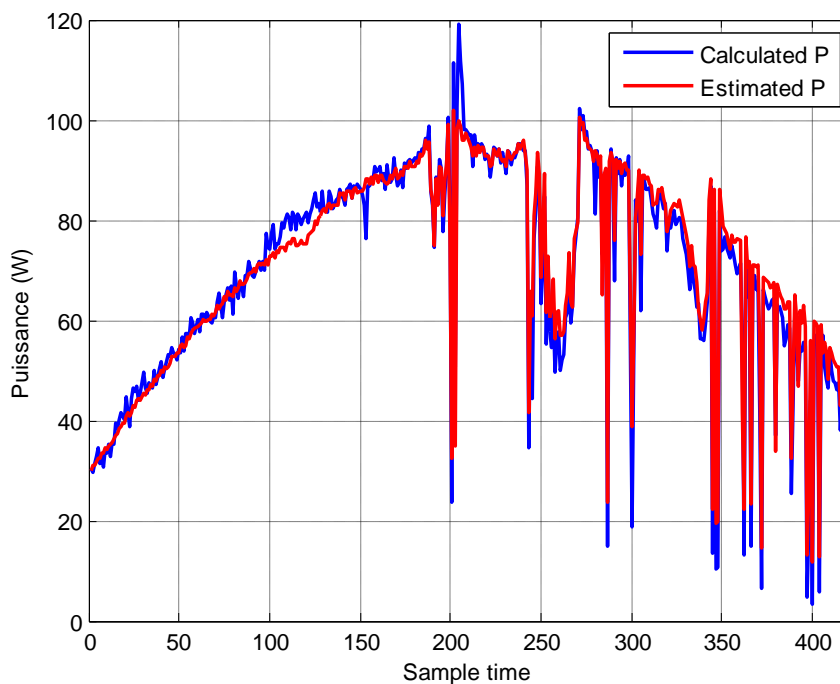
**Figure.III.12** : Comparaison entre le courant  $I_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel clair.



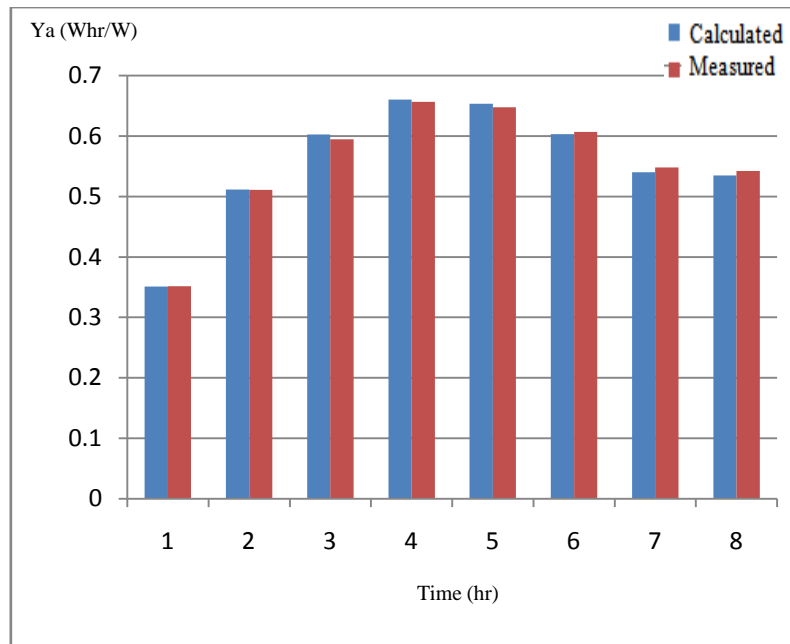
**Figure.III.13** : Comparaison entre la puissance  $P_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel clair.



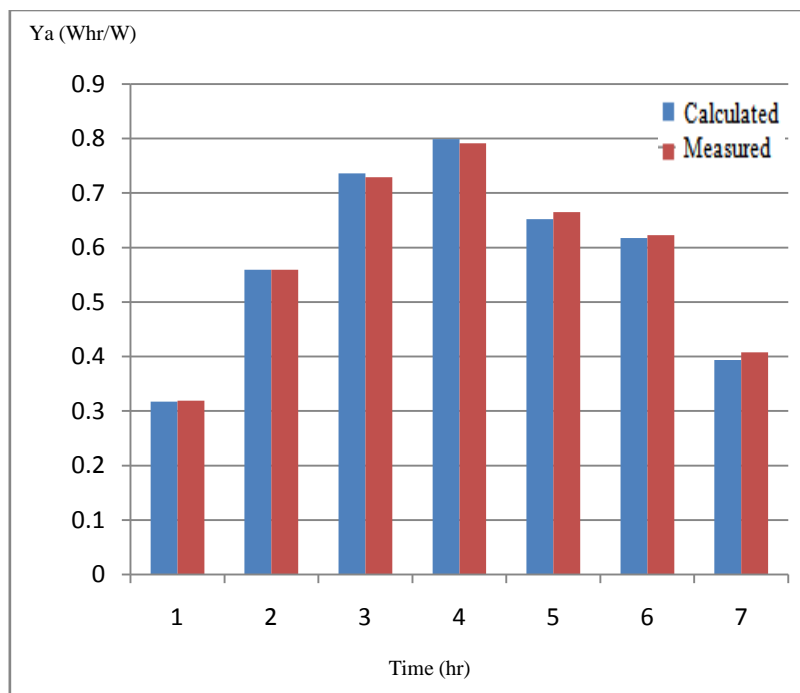
**Figure.III.14 :** Comparaison entre le courant  $I_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel semi-nuageux.



**Figure.III.15 :** Comparaison entre la puissance  $P_{MPP}$  mesuré et estimé pour un jour de ciel semi-nuageux.



**Figure.III.16 :** Rendement horaire du réseau pour un jour de ciel clair.



**Figure.III.17 :** Rendement horaire du réseau pour un jour de ciel semi-nuageux.

### **III.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a utilisé une méthode pour extraire les paramètres de la caractéristique  $I_V$  d'une cellule photovoltaïque. Cette méthode est basée sur l'algorithme de Grey Wolf implémentée sous l'environnement MATLAB. Le modèle choisi est celui d'une diode (ODM). L'application de l'algorithme Grey Wolf pour extraire les cinq paramètres électriques d'un module PV. L'algorithme proposé a été appliqué au module ISOFOTON 106/12. Une analyse complémentaire utilisant un test expérimental basé sur la comparaison du modèle adapté à l'évolution du MPP par rapport au MPP avec des profils météorologiques réels du ciel algérien typique pour deux conditions. L'erreur relative associée aux résultats de simulation obtenus montre que les résultats de simulation sont en bon accord avec les données expérimentales en conditions réelles de fonctionnement et justifient son utilisation pour des investigations plus approfondies telles que la prédiction énergétique des modules photovoltaïques.

# *Conclusion générale*

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.[35].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale. La détermination des paramètres de cette équation caractéristique joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires et le générateur photovoltaïque pour la prédiction à long terme. Après la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique de la cellule ainsi que le générateur photovoltaïque sous l'influence des paramètres climatiques et électriques, ce travail présente l'application de la méthode de recherche de loup gris (Grey Wolf) pour identifier les paramètres des modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. La technique proposée est une méthode de recherche simple et directe qui ne nécessite aucun calcul de dérivée. Pour ces raisons, il est utilisé pour identifier les paramètres inconnus des modèles, à savoir le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série, la résistance shunt et le facteur d'idéalité qui régissent la relation courant-tension d'une cellule solaire. Les données de mesures réelles sont utilisées pour tester et vérifier la cohérence de l'estimation précise des paramètres inconnus des modèles à une seule diode. De plus, l'équation caractéristique avec les paramètres extraits a été testée par rapport à plusieurs caractéristiques IV statiques d'un module PV collecté dans différentes conditions de fonctionnement. Enfin, les paramètres extraits sont utilisés dans un modèle comportemental du point de puissance maximale d'un générateur PV et comparés aux données mesurées d'un système connecté au réseau PV situé au Centre de Développement des Energies Renouvelables situé à Alger (Algérie). Les résultats prouvent que le GWO est un outil très approprié pour estimer les paramètres électriques nécessaires à la modélisation du générateur photovoltaïque et justifient son utilisation pour des recherches plus approfondies telles que l'énergie prédiction des modules photovoltaïques.

La perspective principale de notre travail est de trouver et appliquer un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant de détecter et localiser des défauts conduisant à une baisse de production.

- [1]: **Akassewa Tchapo Singo**, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », thèse doctorat, Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [2]: **Soltane Belakehal**, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine.
- [3]: **L. Han, N. Koide, Y. Chiba and T. Mitate**, "Modeling of an Equivalent Circuit for Dye Sensitized Solar Cells", Applied Physics Letters, Vol. 84, N°13, 2433.
- [4]: **W. Xiao, MGJ Lind, W.G. Dunford and A. Capel**, "Real-time Identification of Optimal Operating Points in Photovoltaic Power Systems". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N°4, pp. 1017 – 1026, 2006.
- [5]: **D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez**, "PV Panel Model Based on Datasheet Values", IEEE International Symposium on Electronics, ISIE 2007, Vigo, Spain, June 4-7, 2007.
- [6]: **M. Ye, X. Wang and Y. Xu**, "Parameter Extraction of Solar Cells Using Particle Swarm Optimization", Journal of Applied Physics, Vol. 105, N°9, 094502, 2009.
- [7]:**A. Askarzadeh and A. Rezazadeh**, "Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach," Solar Energy, vol. 90, pp. 123-133, 2013.
- [8]:**K.Touafek**, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [9]:**Dr. BELAID LALOUNI Sofia** " Energie Solaire Photovoltaïque",Cours,Université A.MIRA de BEJAIA.
- [10]:**M.N.Mchalikh et CH.Hmada**''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque.
- [11]:**Cabal Cédric**, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[12]:Le pompage photovoltaïque par **Jimmy Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadasy**, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.

[13]:**B.Azoui** «Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application », Thesis of doctorat of science, University of Batna 2002.

[14]:www.total-energie.fr

[15]:**K.Nishioka, N.Sakitani, K.Kurobe, Y.Yamamoto. Y.Ishikawa ,Y.Uraoka, T.Fuyuki**, Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells using modified equivalent circuit model, Journal Appliqué de physique, vol. 42, pp: 7175-7179,2003.

[16]:**Lalouni Sofia**, Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-eolienne) de production d'énergie électrique, Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.

[17]:www.climamaison.com

[18]:**Narimen Debili**, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, université Constantine 1, 2015.

[19]:**CH. Maher** "Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque" Mémoire Master Université Sfax 2008.

[20]:**K.Sobaihi** " étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction " Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.

[21]:**M.Belhadj** "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome "Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.

[22]:**Dang Minh Trung**, Elaboration de cellules solaires photovoltaïques a base de polymères conjugués, études des systèmes reticulables, Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 2009.

[23]:**Aziz TOULAIT,Rachid aili** 'modélisation et simulation sous matlab/simlunk d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT' Mémoire de fin d'étude de MASTER, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[24]:**K.Ayache**, « Modélisation et Simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique » Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.

- [25]:**F.M Gonzalez-Longatt**,« Model of photovoltaic module in matlab™», 2do congresobero americano de estudiantes de ingeieria eléctrica, electronica y compitacion, ii ciblec2005].
- [26]:**J.A. Gow, C.D.Manning**,« Development of photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies », IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no.2,pp. 193-200, Marche 1999.
- [27]:**A. Saadi**, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [28]:**O.Gergaud**, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur,Thèse de doctorat de l'école normale supérieur de cachant, France, 2002.
- [29]:**A. Blorfan**, ' contribution à l'étude de l'association d'une source photovoltaïque et d'un filtre actif', thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de HauteAlasace.
- [30]:**Jones.C.P Underwood**, A modeling method for building-integrated PV systems, Solar Energy Vol: 70 N°4, pp:349-359, 2002.
- [31]:**Markvard.T**, Solar Electricity, Second edition, Willey, USA.
- [32]:**Mirjalili, S, Saremi, S, Mirjalili, S, M, Colho, L, S** . Multi-objective Grey Wolf optimizar: A nouvel algorithm for multi-criterion optimization. Expert Systems With Applications 47 :160-119. 2016.
- [33]:**Storn, R, Price, K. Differential** evolution- a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, Journal of Global Optimization, 11, 341-359. 1996.
- [34]:**B. Jean-Luc**, "Réseau de Neurones Artificiels pour la classification des fontes Arabeset la distinction entre la langue Arabe et les langues Latines", Thèse de Doctorat, Université de Fribourg, Suisse, Juin 2003.