

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT: GENIE ELECTRIQUE  
N° : CE°12



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : ENERGIES RENOUVELABLES  
OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES EN  
ELECTROTECHNIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par:BOURAHLA Khadidja

**Intitulé**

**Etude comparative des différentes  
Méthodes de translation des caractéristiques  
I-V (G,T) aux STC**

**Soutenu devant le jury composé de :**

SAIGAA Djamel

Université de M'sila

Encadreur

DRIF Mahmoud

Université de M'sila

Examineur

BOUCHELAGHEM Ahmed

Université de M' sila

Examineur

**Année universitaire: 2019 / 2020**

## Remerciements

*Nous remercions en premier lieu Dieu qui nous a donné ce bien là et pour que nous vivions ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Monsieur D. SAIGAA qui a proposé et dirigé ce travail*

*Nous remercions Monsieur le président du jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Le travail que nous avons réalisé doit beaucoup à certaines personnes que nous tenons à les remercier sincèrement.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.*



<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	
<b>NOTATION</b> .....	
<b>Introduction générale</b> .....	1

## **CHAPITRE I**      **Généralités sur les photovoltaïques**

I.1.Introduction.....	3
I.2.Energie solaire .....	3
I.3.Rayonnement solaire .....	3
I.4.Différents types de rayonnement.....	4
I.4.1.Rayonnement direct.....	4
I.4.2.Rayonnement diffus.....	4
I.4.3.L'albédo.....	4
I.4.4.Rayonnement global .....	4
I.5.Avantage et inconvénients d'énergie solaire photovoltaïque.....	5
I.5.1.Avantages .....	5
I.5.2.Inconvénients .....	5
I.6.Conversion photovoltaïque.....	6
I.6.1.Matériau semi-conducteur.....	6
I.6.1.1.Formation de la jonction .....	6
I.6.1.2.Principe de la conversion photovoltaïque.....	8
I.7. cellule photovoltaïque.....	9
I.7.1.L'effet photovoltaïque .....	9
I.7.1.2.Technologie d'une cellule photovoltaïque.....	10
a) Silicium mono-cristalline.....	10
b) Silicium poly - cristalline (multi cristalline).....	10
c) Silicium amorphe.....	11
I.8.Comparatif des différentes technologies .....	12
I.8.1.Caractéristique courant tension et schéma équivalent.....	13

---

## SOMMAIRE

---

I.8.1.1.La caractéristique sous obscurité.....	14
I.8.1.2.La caractéristique sous éclairement.....	15
I.9.Module et système photovoltaïque.....	18
I.9.2.Association en série.....	19
I.9.3.Association en parallèle.....	20
I.10.Conclusion.....	20

## CHAPITRE II Les méthodes de translation aux conditions standard

II.1.Introduction.....	21
II.2.Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	21
II.2.1.Modèle à une diode.....	24
II.2.2.Modèle à deux diodes.....	25
II.3.Méthodes de translation.....	26
II.3.1.Méthode selon la norme ICE891.....	26
II.3.2.Méthode Anderson, NREL.....	27
II.3.3.Méthode Blaesser.....	27
II.4.Influence de l'Éclairement.....	28
II.5.Influence de la Température.....	29
II.6.Conclusion.....	30

## CHAPITRE III Les résultats de simulation

III.1.Introduction.....	31
III.2.Résultats de simulation des méthodes translation aux conditions STC.....	31
III.2.1.Résultat de simulation de la méthode de translation IEC891.....	31
III.2.2.Résultat de simulation de la méthode de translation A.J Anderson.....	35
III.2.3.Résultat de simulation de la méthode de translation Blaesser.....	39
III.3.Conclusion.....	44
<b>Conclusion générale</b> .....	45

Abstract – Résumé – ملخص

<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	47
----------------------------	----

---

## CHAPITRE I Généralités sur les photovoltaïques

Fig.I.1: Composants du rayonnement solaire.....	2
Fig.I.2: Génération d'un pair électron-trou.....	5
Fig.I.3: Jonction PN.....	6
Fig.I.4 : Jonction PN d'une cellule photovoltaïque .....	6
Fig.I.5 : Schéma d'une jonction PN .....	7
Fig.I.6 : Cellule en silicium monocristallin .....	8
Fig.I.7 : Cellule en silicium Poly-cristallin .....	9
Fig.I.8: Cellule en silicium amorphe .....	9
Fig.I.9 : Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité .....	12
Fig.I.11: Module photovoltaïque .....	15
Fig.I.12: Cellules ou modules photovoltaïques en série .....	17
Fig.I.13: Cellules photovoltaïques en parallèle ou modules .....	17

## CHAPITRE II Les méthodes de translation aux conditions standard

Fig.II.1: Module BP Solar .....	20
Fig.II.2: Schéma équivalent du modèle à une diode .....	24
Fig.II.3: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes .....	25
Fig.II.4: Caractéristique P-V et I-V du module PV selon l'éclairage.....	29
Fig.II.5:Caractéristique P-V et I-V du module PV selon la température .....	29

## CHAPITRE III Les résultats de simulation

Fig.III.1: Schéma du programme Matlab/Simulink de la méthode IEC891.....	32
Fig.III.2: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ , $T=46.6^\circ\text{C}$ ) et traduite aux conditions STC du module PV par la méthode de translation IEC891.....	32
Fig.III.3: Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation IEC891 à partir des données mesurées ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ et $T=46.6^\circ\text{C}$ ).....	33
Fig.III.4: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1076 \text{ w/m}^2$ , $T=48.2^\circ\text{C}$ ) et traduite aux conditions STC du module PV par la méthode de translation IEC8.....	33

---

Fig.III.5: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation IEC891 à partir des données mesurées ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46$ .....34

Fig.III.6: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=855 \text{ w/m}^2$ ,  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) et translatée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation IEC891 .....34

Fig.III.7: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation IEC891 à partir des données mesurées ( $G=855 \text{ w/m}^2$  et  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) .....35

Fig.III.8: Schéma du programme Matlab/Simulink de la méthode A.J Anderson .....36

Fig.III.9: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ ,  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) et translatée aux conditions STC du module PV par la méthode de translation Anderson .....36

Fig.III.10: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation Anderson à partir des données mesurées ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) .....37

Fig.III.11: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1076 \text{ w/m}^2$ ,  $T=48.2^\circ\text{C}$ ) et translatée aux conditions STC du module PV par la méthode de translation Anderson .....37

Fig.III.12: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation Anderson à partir des données mesurées ( $G=1076 \text{ w/m}^2$  et  $T=48.2^\circ\text{C}$ ).....38

Fig.III.13: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=855 \text{ w/m}^2$ ,  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) et translatée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Anderson .....38

Fig.III.14: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation Anderson à partir des données mesurées ( $G=855 \text{ w/m}^2$  et  $T=45.5^\circ\text{C}$ ).....39

Fig. III.15: Schéma du programme Matlab/Simulink de la méthode Blaesser.....40

Fig.III.16: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ ,  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) et translatée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Blaesser.....40

Fig.III.17: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation Blaesser à partir des données mesurées ( $G=1078\text{w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ).....41

Fig.III.18: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1076 \text{ w/m}^2$ ,  $T=48.2^\circ\text{C}$ ) et translatée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Blaesser.....41

Fig.III.19: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation Blaesser à partir des données mesurées ( $G=1076\text{w/m}^2$  et  $T=48.2^\circ\text{C}$ ).....42

Fig.III.20: Caractéristiques I-V mesurée ( $G=855 \text{ w/m}^2$ ,  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) et translatée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Blaesser.....42

Fig.III.21: Caractéristique P-V translatée aux conditions STC du module par la méthode de translation Blaesser à partir des données mesurées ( $G=855\text{w/m}^2$  et  $T=45.5^\circ\text{C}$ ).....43

---

## **CHAPITRE I            Généralités sur les photovoltaïques**

Tableau.I.1. : Énergie de gap des matériaux solaires.....	5
Tableau.I.2. : Comparatif des différentes technologies.....	11

## **CHAPITRE II            Les méthodes de translation aux conditions standard**

Tableau.II.1: Caractéristiques du module BP Solar 340.....	22
--	----

## **CHAPITRE III            Les résultats de simulation**

Tableau.III.1: Les valeurs des paramètres du module PV aux conditions standards obtenues par la méthode de translation IEC891.....	35
Tableau.III.2: Les valeurs des paramètres du module PV aux conditions standards obtenues par la méthode de translation Anderson .....	39
Tableau.III.3: Les valeurs des paramètres du module PV aux conditions standards obtenues par la méthode de translation Blaesser.....	43

---

## Notations



- STC** : condition standard  
**NREL** : National Renewable Energy Laboratory

## Symboles



- h** : Constante de Planck (=  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s).  
 **$\nu$**  : Fréquence (Hz),  
**c** : vitesse de la lumière (=  $3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>).  
 **$\lambda$**  : longueur d'onde (m).  
**q** : La charge de l'électron ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C).  
**V** : La tension aux bornes de la cellule (V).  
**K** : La constante de Boltzmann ( $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>).  
**T** : La température effective de la cellule.  
**P** : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup>.  
**S** : Surface de la cellule.  
 **$V_{mp}$**  : Tension au MPP.  
 **$I_{mp}$**  : Courant au MPP.  
 **$I_{cc}$**  : Courant de court-circuit.  
 **$V_{OC}$**  : Tension de circuit ouvert.  
**FF** : Facteur de forme.  
**N<sub>s</sub>** : Nombre de cellules en série.  
**N<sub>p</sub>** : Nombre de cellules en parallèle.  
 **$\mu_{co}$**  : Coefficient de sensibilité de la tension à la température.  
 **$\mu_{cc}$**  : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température.  
 **$P_1, P_2, P_3$**  : Paramètres constants.  
**I<sub>s</sub>** : Est le courant de saturation.  
**I<sub>rp</sub>** : Le courant dans la résistance parallèle  
**E<sub>g</sub>** : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.  
**I<sub>0</sub>** : Courant inverse de saturation de la diode.  
**I<sub>pv</sub>** : photo courant.

<b><math>A</math></b>	: facteur d'idéalité de la diode, $A \in [1, 5]$ .
<b><math>I_d</math></b>	: Courant de diode.
<b><math>I_{s1}</math></b>	: Courant de saturation inverse de la diode D1 (A).
<b><math>I_{s2}</math></b>	: Courant de saturation inverse de la diode D2 (A).
<b><math>A_1</math> et <math>A_2</math></b>	: Facteur de idéalité des diodes D1 et D2.
<b><math>I_1, V_1</math></b>	: Coordonnées d'un point de la courbe de référence.
<b><math>I_2, V_2</math></b>	: Coordonnées d'un point de la courbe corrigée.
<b><math>I_{SC}</math></b>	: Courant de court-circuit de la courbe de référence.
<b><math>E_1,</math></b>	: Eclairement et température dans les conditions de mesure.
<b><math>E_2, T_2</math></b>	: Eclairement et température dans les conditions désirées.
<b><math>\alpha_T, \beta_T</math></b>	: Coefficients de température du courant et de la tension.
<b><math>K</math></b>	: Facteur de correction de la courbe (0,00125 Ohm/°C).
<b><math>\eta</math></b>	: Le rendement de conversion.
<b><math>T</math></b>	: Température (° C),
<b><math>R_s</math></b>	: Résistance série du module ( $\Omega$ ).
<b><math>\alpha</math></b>	: Température réduite Coefficient d'ISC (C-1).
<b><math>\beta</math></b>	: Coefficient de température réduit de COV (C-1).
<b><math>P</math></b>	: Puissance (W).
<b><math>I</math></b>	: Courant (A).
<b><math>V</math></b>	: Tension (V).
<b>2</b>	: pour les conditions STC.
<b>m</b>	: mesuré.
<b>max</b>	: au point de puissance maximale.
<b>oc</b>	: Circuit ouvert.
<b>SC</b>	: Court-circuit.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

### Introduction générale

Sur une longue période, de nombreuses méthodes différentes de translation ont été proposées, de nouvelles équations ont été développées pour le but de la caractérisation et évaluer les performances des cellules, des modules et des réseaux photovoltaïques. Ces équations permettent la translation des valeurs de performance déterminées à des conditions de température et d'irradiance à toutes autres conditions de température et d'irradiance [1,2].

L'historique des équations de translation actuellement utilisées dans le monde remonte à 1967. Par le passé, les techniques de translation de la courbe I-V étaient basées sur l'irradiance et la correction de température des courbes I-V mesurées, avec des procédures de translation algébrique. Au fil du temps, de nombreux chercheurs ont publié plusieurs méthodes, qui aident à résoudre le problème de translation. Ces équations permettent la courbe courant-tension (I-V) pour un ensemble de conditions à prédire sur la base de I-V courbes mesurées dans un ensemble de conditions [3,4,5] contrôlées. Les normes ASTM E1 036 et CEI 891 sont basées sur ces équations qui ont également été largement utilisées pour près de 30 ans dans le domaine des mesures de performance, tous dimensionnement du système et toutes les données d'usine du fabricant PV analyse [2]. Il est difficile de créer les conditions de test standard (STC) conditions de mesure pour une utilisation pratique. Le STC généralement connu (intensité d'irradiation  $1000 \text{ W / m}^2$ , module température  $25 \text{ }^\circ \text{C}$ , masse d'air 1,5), qui est la plus technique utilisée pour le tri des appareils PV. Par conséquent, différentes méthodes sont utilisées pour convertir la sortie du module PV valeurs caractéristiques mesurées avec le traceur de courbe I-V selon STC conditions [1,6,7]. Souvent, une telle performance n'est connue que condition, et la nécessité d'extrapoler ces résultats à certains un autre ensemble de conditions est essentiel. Méthodes de traduction permettent généralement une flexibilité d'application significative. La plus méthode couramment utilisée pour traduire les performances PV de une condition à une autre était difficile à utiliser et s'est avérée produire de mauvais résultats à de faibles niveaux d'irradiance. Parce que le plus les conditions d'irradiance fréquentes sont soit très élevées ( $900 \text{ à } 1\ 000 \text{ W / m}^2$ ) ou très faible ( $200 \text{ à } 300 \text{ W / m}^2$ ), les équations de traduction doivent être valides sur une large gamme de conditions [2].

Dans ce travail, nous utilisons les données mesurées dans différentes conditions météorologiques de température et de rayonnement d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin. Nous utilisons les méthodes de translations IEC891, Anderson et Blaesser,

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

pour obtenir la courbe de courant-tension dans les conditions STC à partir des différents ensembles des données mesurée.

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

Dans le premier chapitre, nous décrivons des généralités sur les systèmes photovoltaïques et les types de l'énergie solaire, le pouvoir énergétique du soleil et son rayonnement.

Dans le second chapitre, nous présentons nous la modélisation d'un système photovoltaïque ainsi que les méthodes de translation de la caractéristique courant-tension I-V aux conditions méthodologiques standards STC de température et de rayonnement.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les résultats de simulation où nous présentons les valeurs des trois paramètres qui sont : la puissance maximale, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert obtenues par les différentes méthodes de translation aux conditions STC. Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

---

# CHAPITRE I

---

## I.1. Introduction

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables. Ces énergies (essentiellement fossiles) sont épuisables, par conséquent, des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (éolienne, solaire photovoltaïque et thermique, biomasse, géothermie, etc.).

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu général sur l'essentiel des connaissances requises à la compréhension des systèmes photovoltaïques, et le potentiel énergétique solaire mondial et en particulier celui de l'Algérie .

## I.2. Energie solaire

Le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Ces radiations énergétiques sont pratiquement la seule source d'énergie qui influe sur l'atmosphère et le climat sur terre. Le rayonnement solaire est un phénomène électromagnétique qui est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  . L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement solaire d'une puissance moyenne de 1367 W/m<sup>2</sup>. Mais, l'atmosphère absorbe une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m<sup>2</sup>. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison [8]

## I.3. Rayonnement solair

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

Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques et il est approximativement décomposé comme suit [8]:

- 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  $\mu\text{m}$ ).

## I.4. Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes : directe, diffuse et réfléchie. La somme de toutes ces composantes donne le rayonnement global.

### I.4.1. Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

### I.4.2. Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi de multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

### I.4.3. L'albédo

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable, etc.) [9].

### I.4.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure (I-1).

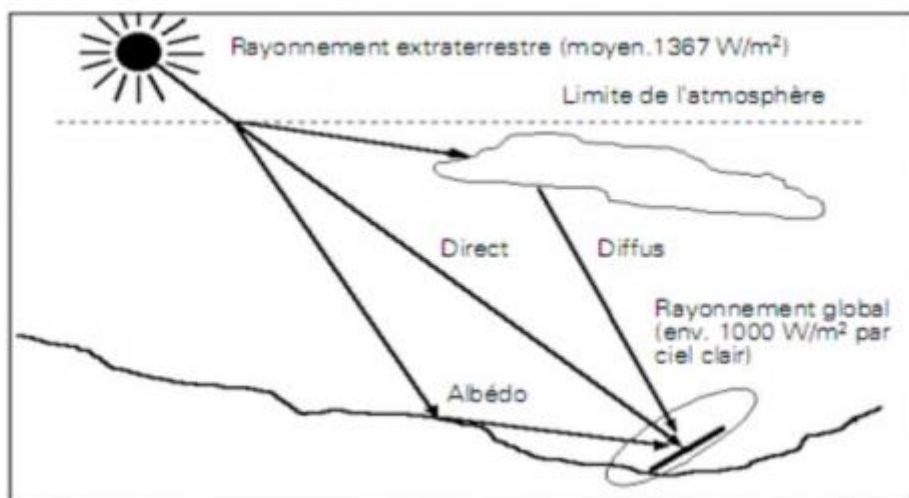


Figure (I-1) : Composants du rayonnement solaire [10]

## I.5. Avantage et inconvénients d'énergie solaire photovoltaïque

### I.5.1. Avantages [11]

Les avantages De l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque Particulièrement attractive pour les sites urbains dus à leur petite relative taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...).
- L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- Technologie encore émergente, son coût lui permet d'être souvent compétitif par rapport aux solutions classiques dans les sites éloignés du réseau électrique ne demandant pas de très grosse quantité d'électricité fournie, ou dans des sites urbains lorsqu'elle évite des coûts de raccordement au réseau électrique public .
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement.
- Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

### I.5.2. Inconvénients [11]

Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.

- S'ils faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- Pollution à la fabrication.

## I.6. Conversion photovoltaïque

### I. 6.1. Matériau semi-conducteur

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur Terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [12].

#### I.6.1.1. Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les matériaux semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres (Figure I-1). Cependant, chaque matériau possède son propre gap énergétique  $E_g$  (c'est l'écart entre le maximum de la bande de valence (EC) et le minimum de la bande de conduction (EV) comme le montre le Tableau I-1. Du point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photons d'énergies de longueur d'onde  $\lambda$  transportant une énergie (E) exprimée en électro-volt (eV) donnée par la relation suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

avec :

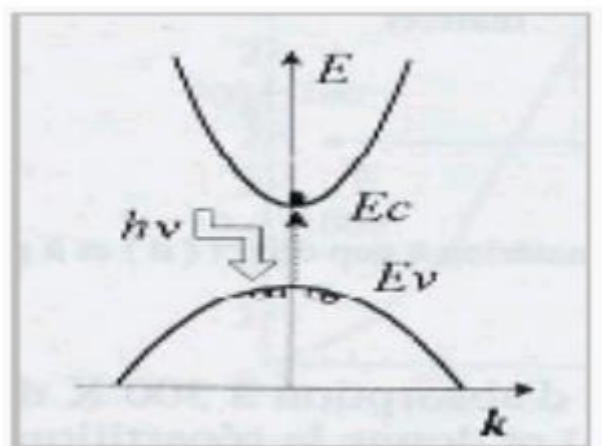
$h$  : constante de Planck (=  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s),

$\nu$  : fréquence (Hz),  $c$  : vitesse de la lumière (=  $3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>)

$\lambda$  : longueur d'onde (m).

Matériau semi-conducteur	Germanium (Ge)	Silicium (Si)	Arséniure de Gallium (GaAs)	Phosphure de Gallium (GaP)	Sulfure de Cadmium (CdS)	Tellurure de Cadmium (CdTe)
Eg (eV)	0.67	1,12	1.42	2.26	1.03	1.5

**Tableau (I-1).** Énergie de gap des matériaux solaires.



**Figure (I-2).** Génération d'une paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant. Il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre (Figure I-2). Cette opération est possible par l'assemblage de deux barreaux de silicium, un de type N dopé en électrons de concentration de l'ordre de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  et l'autre de type P dopé en trous (environ  $10^3 \text{cm}^{-3}$ ). La mise en contact des deux couches à dopages opposés dans un semi-conducteur en y ajoutant des contacts métalliques constitue un élément connu : la diode.

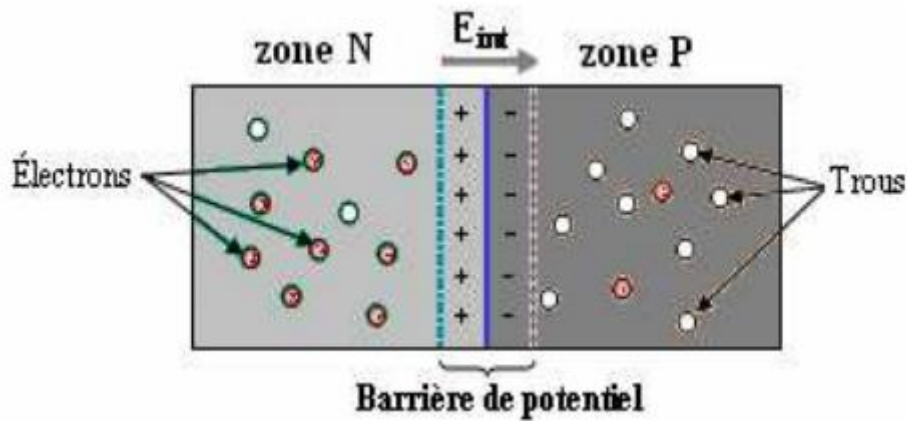


Figure (I-3). Jonction PN.

### I.6.1.2. Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique. Il permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de production et de transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur comme le silicium [13].

Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau. L'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes [14]. Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1,4eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1,12eV et un rendement maximum théorique d'environ 29% pour une simple jonction. Lorsqu'on illumine une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région (Figure I-4), et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction et s'il est connecté à une charge électrique extérieure, un courant est établi.

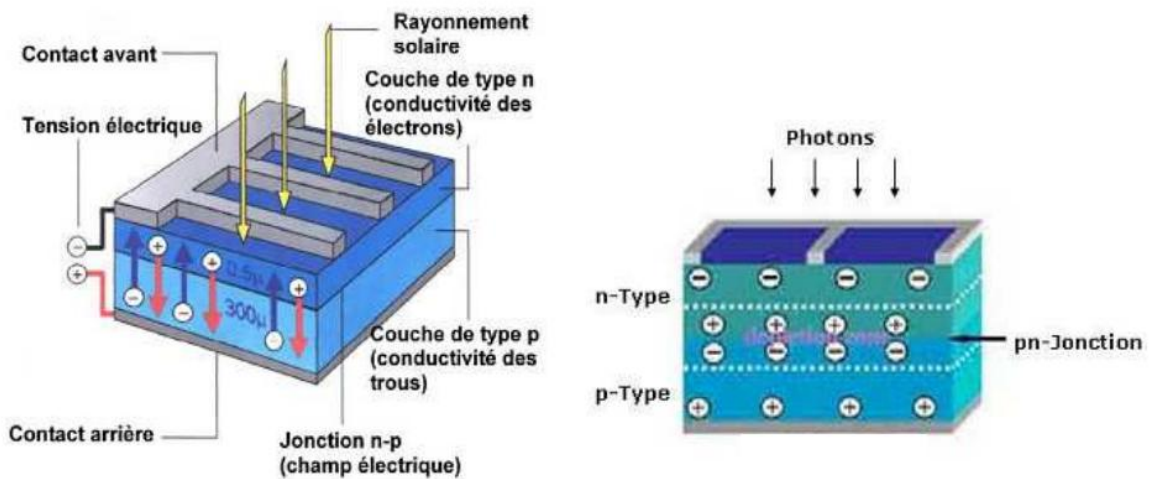


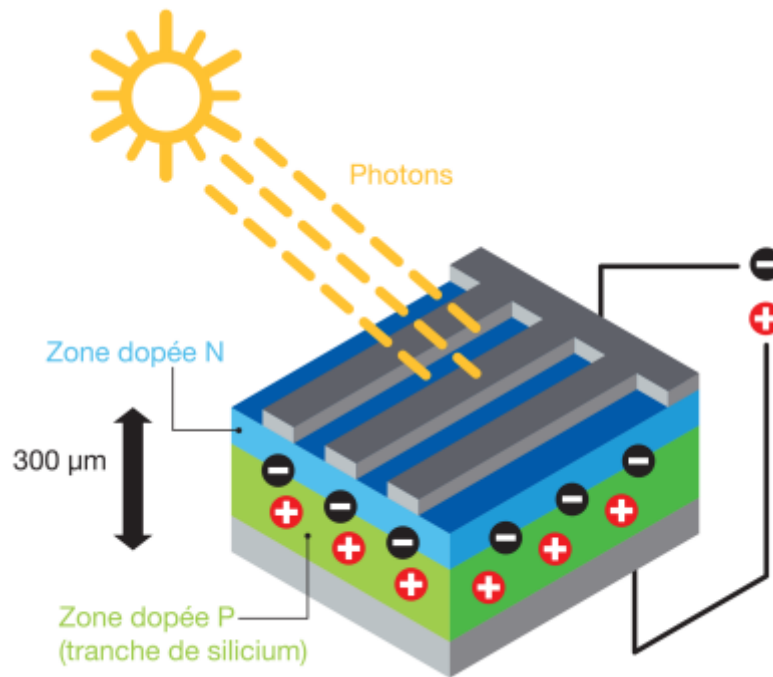
Figure (I-4). Jonction PN d'une cellule photovoltaïque [14].

## I.7. cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité (courant continu basse tension). Comme l'énergie lumineuse vient du soleil, on parle alors des cellules solaires [9].

### I.7.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique, qui convertit la lumière (photons) en électricité grâce à l'utilisation d'un matériau semi-conducteur. Ce dernier possède des propriétés électroniques particulières. Pour constituer une cellule photovoltaïque il faut, à partir de ce matériau, constituer d'une jonction avec une couche supérieure présentant un excès d'électrons (zone dopée n) et une couche inférieure comportant un déficit d'électrons (zone dopée p) ou inversement, figure 1.2. L'exposition du semi-conducteur au rayonnement solaire, va créer un excès de charges électriques dans les deux couches, et la mise en contact de deux matériaux de propriété électronique différente, va provoquer un champ électrique [15].



Figure(I-5): Schéma d'une jonction PN

### I.7.1.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque

#### a) Silicium mono-cristallin

Les cellules en silicium mono-cristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques, figure 1.5.

Pour les fabriquer, on fait fondre la silice du silicium. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium (métallurgique MG-Si) se solidifie en ne formant qu'un seul cristal (silicium solaire So-Si) de grande dimension (sous forme de barreau). On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces dernières sont en général d'un bleu uniforme, leur durée de vie est de 20 à 30 ans [16].

Son avantage :

- Bon rendement, de 12% à 18% ;
- Bon ratio  $Wc/m^2$  (environ 150  $Wc/m^2$ ) ce qui permet un gain de place si nécessaire ;
- Nombre de fabricants élevé.

Son inconvénient :

- Coût élevé ;
- Rendement faible sous un faible éclairement [16].



**Figure (I-6):** Cellule en silicium monocristallin [16].

**b) Silicium poly - cristallin (multi cristallin)**

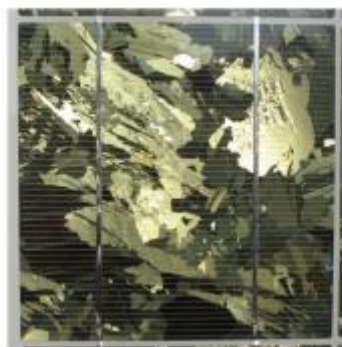
Ce dernier est issu de l'étape de refroidissement du silicium dans une lingotière, d'où la formation de plusieurs cristaux. Cette cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux, figure I.7.

Son avantage :

- Cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module ;
- Moins cher qu'une cellule monocristalline.

Son inconvénient :

- Un rendement moins bon qu'une cellule monocristalline : 11% à 15% ;
- Ratio  $Wc/m^2$  moins bon que pour le monocristallin (environ 100  $Wc/m^2$ ) ;
- Rendement faible sous un faible éclairement.



**Figure (I-7):** Cellule en silicium Poly-cristallin [16]

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie de 20 à 30 ans [16].

### c) *Silicium amorphe*

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre, pour former une cellule grise très foncée, figure. I.8 Comme les cellules qui se trouvent dans les calculatrices et les montres dites "solaires".

Son avantage :

- Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert) ;
- Un peu moins chère que les autres technologies ;
- Intégration sur supports souples ou rigides.

Son inconvénient :

- Rendement faible en plein soleil, de 6% à 8% ;
- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio  $Wc/m^2$  plus faible, environ 60  $Wc/m^2$ ) ;
- Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%) [16].



**Figure (1-8):** Cellule en silicium amorphe [16].

### d) *Couches minces*

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices ou photosensibles sur un support de verre, de plastique, d'acier...etc, Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (il est de l'ordre de 5 à 13 %). Plusieurs technologies existent [17] :

- Le Tellure de Cadmium (CdTe) ;
- Le Cuivre/Indium/Sélénium ou Cuivre/Indium/Gallium/Sélénium (CIS ou CIGS) Les cellules à double (tandem) ou à triple jonction (3a-si) ;
- Les cellules à base d'oxyde de Titane ;
- Les cellules en couches minces les plus répandues sont en silicium amorphe.

## I.8. Comparatif des différentes technologies [18]

Tableau (I-2) : Comparatif des différentes technologies [18]

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium monocristallin</b>	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Très performant</li> <li>*Stabilité de production d'W</li> <li>* Méthode de production coûteuse et laborieuse.</li> </ul>	Aérospatiale, modules pour toits, façades...
<b>Silicium polycristallin</b>	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Adapté à la production à grande échelle.</li> <li>* Stabilité de production d'W.</li> <li>Plus de 50% du marché mondial.</li> </ul>	Modules pour toits, façades, générateurs ...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> <li>* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.</li> <li>* Fonctionnement si faible luminosité.</li> <li>* Fonctionnement par temps couvert.</li> <li>* Fonctionnement si ombrage partiel</li> <li>* La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.</li> </ul>	Appareils électroniques (montres, calculatrices ...), intégration dans le bâtiment

### I.8.1. Caractéristique courant tension et schéma équivalent

La partie principale d'une cellule photovoltaïque est une jonction **PN**. C'est l'éclairement de cette jonction qui va générer des porteurs de charges et permettre de récupérer une puissance électrique. On distingue deux régimes de fonctionnement qui dépendent de la polarisation de la diode : la polarisation directe qui correspond au régime

passant (si le potentiel appliqué est supérieur à celui de la barrière de potentiel  $V_0$ ) et la polarisation inverse qui correspond au régime bloqué (figure I.9) : courbe sous obscurité).

En régime passant, la barrière du potentiel est levée, les porteurs majoritaires peuvent traverser la jonction sans être bloqués, un courant apparaît. En régime bloqué, seuls les porteurs minoritaires peuvent créer un courant dans la diode car ils n'ont pas de barrière de potentiel qui les retiennent. Ce courant est le courant  $I_S$  ou courant de saturation.

### I.8.1.1. La caractéristique sous obscurité

Le courant dans une telle structure de type jonction P-N est appelé courant d'obscurité et il a la forme suivante :

$$I_{ops} = I_s \left[ \exp \left( qv \frac{qv}{n.k.T} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Avec :

q : La charge de l'électron ( $q = 1.6.10^{-19}$  C),

V : La tension aux bornes de la cellule (V),

K : La constante de Boltzmann ( $K = 1.38.10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>),

T : La température effective de la cellule

(K). Ce courant d'obscurité correspond au courant de diode ( $I_D$ ), le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors :

Ce courant d'obscurité correspond au courant de diode ( $I_D$ ), le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors :

$$I(v) = I_{ph} - I_{ops}(v) \quad (I.4)$$

$$I(v) = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{qv}{n.k.T} \right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

Ainsi, dans une cellule solaire deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode tandis que sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la figure (I.9)

### I.8.1.2. La caractéristique sous éclaircement

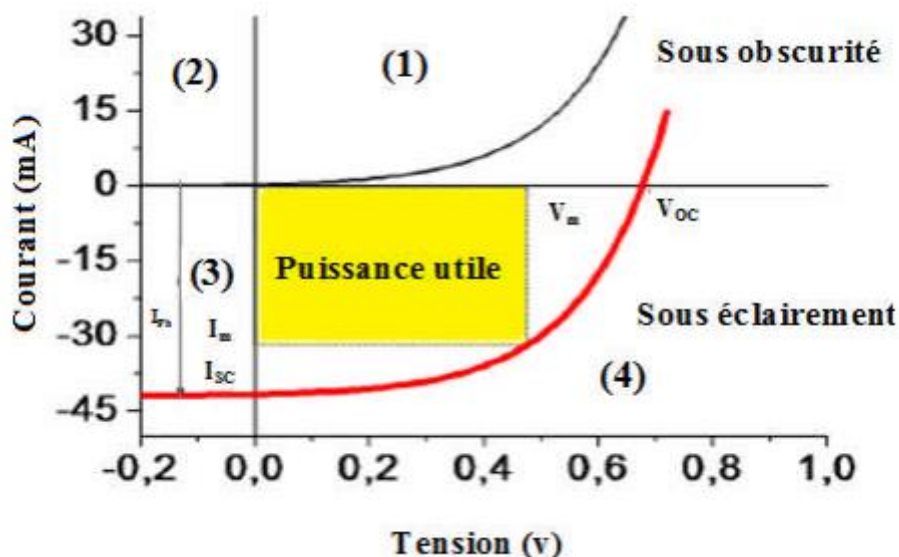
Les photons incidents vont générer des paires électron/trou dont le comportement va différer selon la zone d'absorption :

- Dans la zone de charge d'espace (ZCE) engendrée par la jonction **P-N**, les paires électron/trou créées sont dissociées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés puis injectés dans la zone **N** (émetteur) et les trous dans la zone **P** (base).

Un courant (photo courant) de génération est créé ;

- Dans les zones de base et d'émetteur, les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et électron dans la base) vont diffuser vers la ZCE. S'ils atteignent cette dernière avant de se recombiner, ils seront injectés dans la zone **N** pour les électrons et dans la zone **P** pour les trous et deviendront majoritaires. Un photo courant de diffusion est créé.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photo courant de porteurs minoritaires résultant  $I_{Ph}$ . Il est proportionnel essentiellement à l'intensité lumineuse.

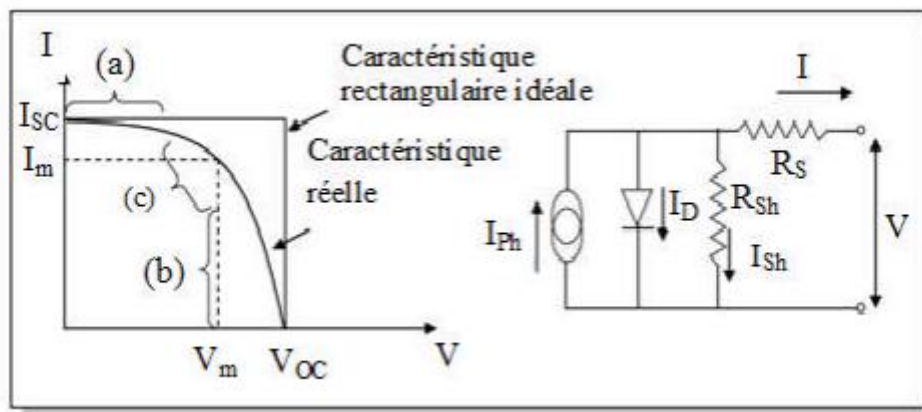


**Figure (I-9) :** Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircement et sous obscurité

Nous allons maintenant nous intéresser uniquement au quadrant (4) pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère I-V donné par la figure (I.10) où le courant de saturation inverse est compté positivement. ISC représente le courant de court-circuit et VOC la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque [19].

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) [20].

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure (I.10). Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.



**Figure (I-10) :** Caractéristique et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant ISC proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension VOC,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement [21].

➤ **Courant de court-circuit,  $I_{sc}$**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

➤ **Tension à circuit ouvert,  $V_{OC}$**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.6)$$

➤ **Facteur de forme,  $FF$**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_m$ ) pour un point de fonctionnement  $P_m (I_m, V_m)$  de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{SC}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{OC}$ ). Le nom "facteur de forme" (full factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante

$$FF = \frac{P_m}{P_{in} \times V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (I.7)$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré (Figure I.11).

$$P_m = V_m \times I_m \quad (I.8)$$

➤ **Rendement de conversion  $\eta$**

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \quad (I.9)$$

P : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup>;

La densité de puissance incidente égale à P<sub>m</sub>/P<sub>in</sub> ;

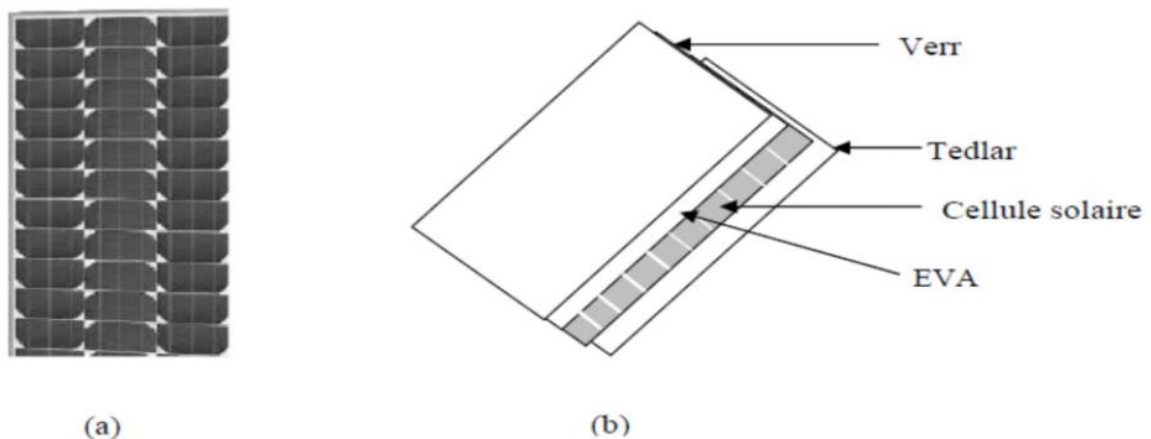
S : Surface de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert

## I.9. Module et système photovoltaïque

### I.9.1. Définition

Un module photovoltaïque (figure (I-11-a)) est composée de plusieurs cellules solaires, les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Vinyl- Acétate) et protégée sur la surface avant d'un verre (figure (I-11-b)), trempée à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière du polyéthylène [22].



**Figure (I-11) :** Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de

jonction contenant deux diodes antiparallèles (figure (I-12)). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [23].

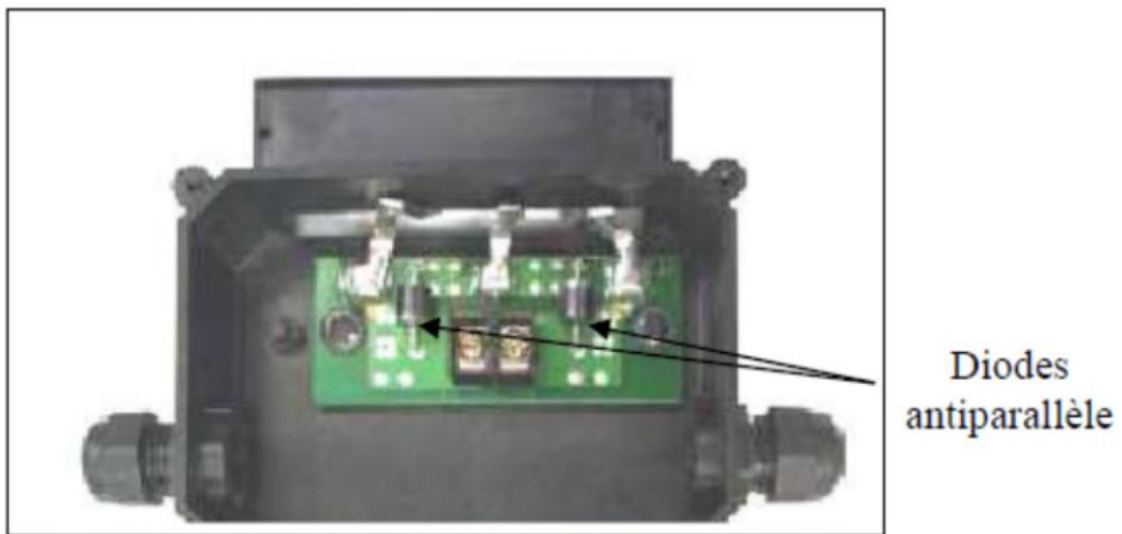


Figure (I-12) : Boîte de jonction [23].

### I.9.2. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure(I.13) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [10].

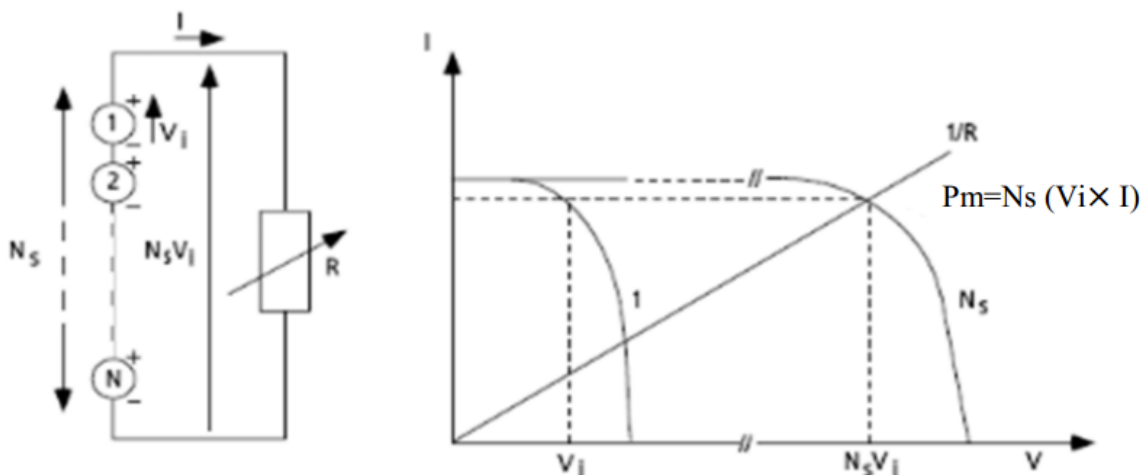
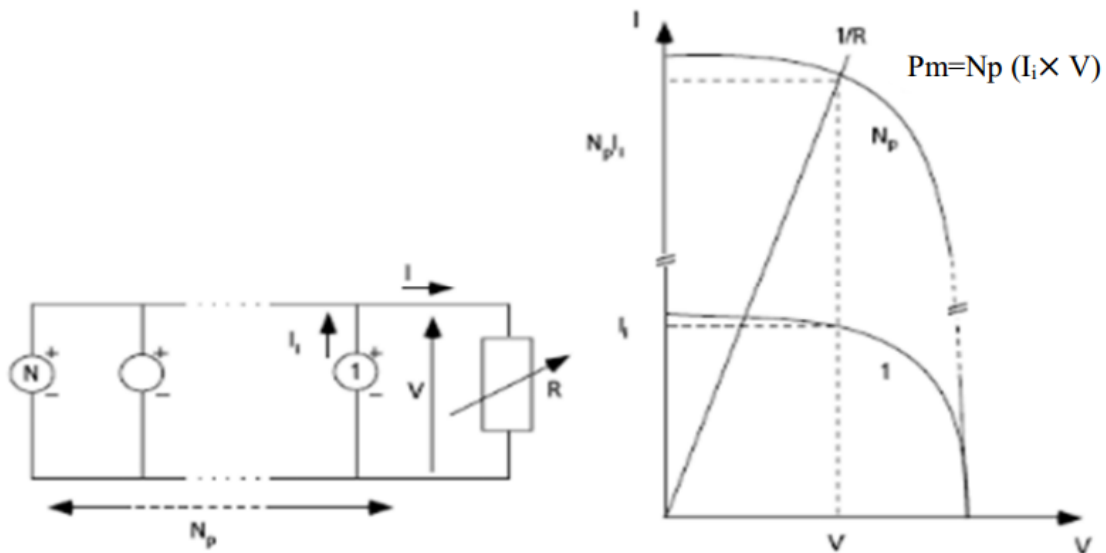


Figure (I-13): Cellules ou modules photovoltaïques en série.

### I.9.3. Association en parallèle

En additionnant les 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. La figure (I-14) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [10].



**Figure (I-14):** Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.

### I.10 .Conclusion

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 effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

---

# CHAPITRE II

---

## II.1. Introduction

La modélisation mathématique des cellules solaire est indispensable pour toute opération d'étude du fonctionnement, d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque.

Vu que les fabricants des modules PV fournissent généralement les données relatives aux conditions standards. On est amené assez souvent à utiliser des méthodes de translation de la caractéristique I-V afin de palier au manque de données.

Dans ce chapitre on décrit et on valide trois méthodes de translation (selon la norme IEC 891 et la méthode Anderson et Blaeser) de la courbe I-V donnée à certaines conditions déterminées d'éclairement et de température à d'autres conditions distinctes désirées, puis une comparaison entre ces trois méthodes sera effectuée.

## II.2. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

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

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

On présentera deux modèles du GPV à savoir [24] :

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

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Schrockley. Nous avons étudié un module BP Solar 340, présenté sur la figure II-1.



**Figure (II-1):** Module BP Solar.

Le tableau II-1 donne les caractéristiques du module BP Solar 340 sous les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>, masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25 °C).

Grandeurs	Valeur
Puissance nominale	40 W
Tension au MPP ( $V_{mp}$ )	16,50 V
Courant au MPP ( $I_{mp}$ )	16,50 V
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	2.42 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ )	2.60 A
Coefficient du rendement de la température	20.00 V
Facteur de forme (FF)	0.0049 %
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	0.771
Nombre de cellules en parallèle ( $N_p$ )	36
Coefficient de sensibilité de la tension à la température $\mu_{co}$	2
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température $\mu_{cc}$	-0.09 V/K
	+0.0065 A/K

**Tableau (II-1):** Caractéristiques du module BP Solar 340.

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{CC(cellule)} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (II.1)$$

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

$N_p$ : Nombre de cellules en parallèle.

- La tension du circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) de chaque cellule est :

$$V_{OC(cellule)} = \frac{V_{oc}}{N_s} \quad (II.2)$$

$V_{oc}$  : La tension du circuit ouvert.

$N_s$ : Nombre de cellules en série.

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(cellule)} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (II.3)$$

$I_{mp}$ : Courant au MPP.

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(cellule)} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (II.4)$$

$V_{mp}$ : Tension au MPP.

- La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{max(cellule)} = V_{mp(cellule)} \cdot I_{mp(cellule)} \quad (II.5)$$

$V_{mp(cellule)}$ : Tension au MPP de chaque cellule .

$I_{mp(cellule)}$ : Courant au MPP de chaque cellule.

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{S(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{S(module)} \quad (II.6)$$

$R_{S(module)}$ : La résistance série de chaque module.

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sh(module)} \quad (II.7)$$

$R_{sh(module)}$ : La résistance shunt de chaque module.

II.2.1. Modèle à une diode [25]

Pour tenir compte des chutes de tension dans la zone P et N, on doit ajouter, au modèle idéaliste, une résistance série  $R_s$  et pour le courant de fuite, une résistance parallèle  $R_p$ , comme illustrer sur le schéma suivant :

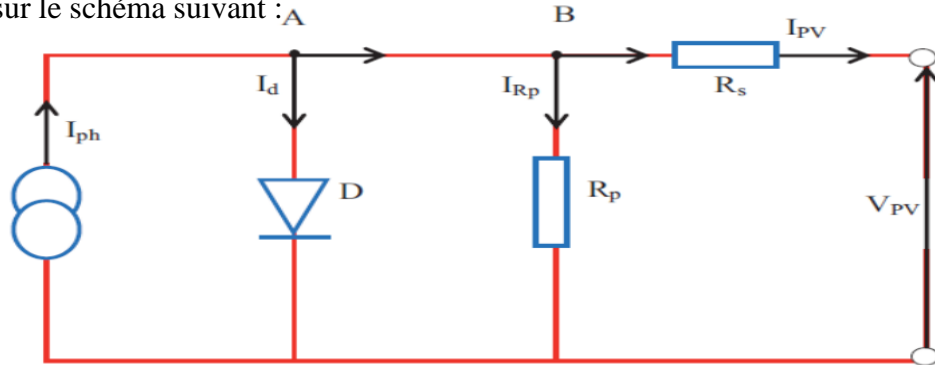


Figure (II-2). Schéma équivalent du modèle à une diode.

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

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d - I_{RP} \tag{II.8}$$

Avec :

$$I_{Ph} = P_1 E [1 + P_2 (E - E_{STC}) + P_3 (T - T_{STC})] \tag{II.9}$$

$P_1, P_2, P_3$  : Paramètres constants.

Le courant de la diode est donnée par :

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{A N_s k T}} - 1 \right) \tag{II.10}$$

Avec :

$I_s$  est le courant de saturation il est fortement dépendant de la température ; il est donné par :

$$I_s = P_4 \cdot T^3 e^{\frac{-E_g}{k T}} \tag{II.11}$$

Le courant dans la résistance parallèle est calculé par :

$$I_{rp} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \tag{II.12}$$

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

$q$  : la charge d'électron  $1,6 \cdot 10^{-19}C$ .

$E_g$  : énergie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

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

$I_{pv}$  : photo courant.

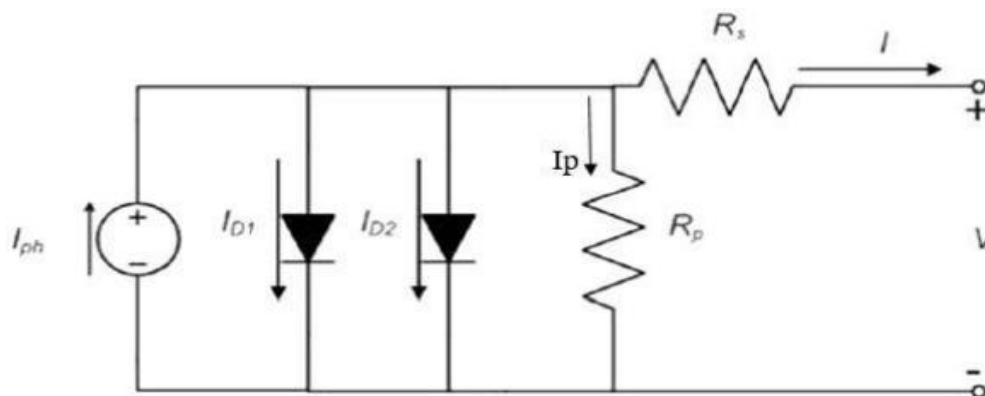
$A$  : facteur d'idéalité de la diode,  $A \in [1, 5]$ .

Le modèle à une diode est le modèle choisi pour le reste de nos simulations, vu qu'il est le plus utilisé. En raison de sa simplicité, il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).

### II.2.2. Modèle à deux diodes

Ce modèle a en plus une deuxième diode attachée en parallèle à la source de courant. Cette diode est utilisée pour améliorer la précision des caractéristiques de la cellule PV.

Ce modèle est schématisé dans la figure (II-3) suivante:



**Figure (II-3):** Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes.

L'équation caractéristique de ce modèle est la suivante :

$$I_{ph} = I_{d1} - I_{d2} - I_p \tag{II.13}$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp \left( q \frac{V + R_s I}{K.T.A_1} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( q \frac{V + R_s I}{K.T.A_2} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{II.14}$$

Où:

$I_d$  : Courant de diode.

$I_{s1}$  : Courant de saturation inverse de la diode D1 (A).

$I_{s2}$  : Courant de saturation inverse de la diode D2 (A).

$A_1$  et  $A_2$  : Facteur de idéalité des diodes D1 et D2.

Dans le modèle à deux diodes on distingue les trois modèles. Pour plus de détail voir [26].

### II.3. Méthodes de translation

Méthodes de traduction d'un besoin de développement meilleure méthode pour prédire les performances du photovoltaïque appareils de tout type de technologie sur une large gamme de conditions de température et d'irradiance d'intérêt. Celles-ci les méthodes sont décrites brièvement ici [27,28].

#### II.3.1. Méthode selon la norme ICE891

La présente norme est appliquée aux caractéristiques I-V mesurées de dispositifs photovoltaïque au silicium cristallin seulement [29,30]. Avec cette méthode, la caractéristique courant-tension peut être corrigée par rapport aux valeurs de température et d'éclairement choisies.

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left( \frac{E_2}{E_1} \right) + \alpha_T (T_2 - T_1) \quad (\text{II.15})$$

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - kI_2(T_2 - T_1) + \beta_T(T_2 - T_1) \quad (\text{II.16})$$

$I_1, V_1$  : Coordonnées d'un point de la courbe de référence ;

$I_2, V_2$  : Coordonnées d'un point de la courbe corrigée ;

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit de la courbe de référence ;

$E_1, T_1$  : Eclairement et température dans les conditions de mesure ;

$E_2, T_2$  : Eclairement et température dans les conditions désirées ;

$\alpha_T, \beta_T$  : Coefficients de température du courant et de la tension ;

$K$  : Facteur de correction de la courbe (0,00125 Ohm/°C);

#### II.3.2. Méthode Anderson, NREL

Andersan et al. [27] ont développé, au laboratoire NREL (National Renewable Energy Laboratory) aux Etats Unis, des équations pour la translation des principaux points et paramètres électriques de la caractéristique I-V que sont le courant de court-circuit,  $I_{sc}$ , la tension de circuit ouvert,  $V_{oc}$ , la puissance maximale,  $P_{max}$ , le courant et la tension au point

de puissance maximale,  $I_{max}$  et  $V_{max}$ , le facteur de forme, FF, et le rendement de conversion  $\eta$ . Ces équations sont:

$$I_{SC_{TSC}} = \frac{I_{SC}}{1 + \alpha_{I_{SC}} \times (T_C - T_{C_{STC}}) \times \left(\frac{G_{STC}}{G}\right)} \quad (\text{II.17})$$

$$V_{OC_{STC}} = \frac{V_{OC}}{1 + \beta_{V_{OC}} (T_C - T_{C_{STC}})} \quad (\text{II.18})$$

$$V_{max_{STC}} = \frac{v_{max}}{1 + \beta_{V_{OC}} (T_C - T_{C_{STC}})} = V_{max} \left(\frac{V_{OC_{STC}}}{V_{OC}}\right) \quad (\text{II.19})$$

$$I_{max_{STC}} = \frac{I_{max} \left(\frac{G_{STC}}{G}\right)}{1 + \alpha_{I_{SC}} (T_C - T_{C_{STC}})} = I_{max} \left(\frac{I_{SC_{STC}}}{I_{SC}}\right) \quad (\text{II.20})$$

$$P_{max_2} = P_{max_1} \times \frac{E_2}{E_1} \times \frac{1}{[1 + \gamma \times (T_2 - T_1)]} \quad (\text{II.21})$$

$$FF_{STC} = \frac{P_{max_{STC}}}{I_{SC_{STC}} V_{OC_{STC}}} \quad (\text{II.22})$$

$$\eta_{STC} = \frac{P_{max_{STC}}}{G_{STC} \cdot S} \quad (\text{II.23})$$

Où,  $\alpha_{I_{SC}}$ ,  $\beta_{V_{OC}}$  et  $\gamma P_{max}$  sont, respectivement, les coefficients de température du courant de court-circuit, de la tension de circuit ouvert et de la puissance maximale.

### I.3.3. Méthode Blaesser

La méthode de Blaesser s'attarde sur l'effet de la température sur tension en circuit ouvert qui consiste en un décalage par rapport à la référence valeur. Les équations de base sont [1-7] [31] :

$$I_{SC_2} = I_{SC_1} \times [1 + \alpha \times (T_1 - T_2)] \times \left[\frac{E_2}{E_1}\right] \quad (\text{II.24})$$

$$V_{OC_2} = V_{OC_1} \times (1 + D_V) \quad (\text{II.25})$$

$$D_V = \delta \ln \left[\frac{E_2}{E_1}\right] + \beta \times (T_2 - T_1) \quad (\text{II.26})$$

$$V_2 = V_1 + D_V + R_S \times (I_1 - I_2) \quad (\text{II.27})$$

$$D_V = V_{OC_2} - V_{OC_1} \quad (\text{II.28})$$

$$I_2 = I_1 \times \left(\frac{I_{SC_2}}{I_{SC_1}}\right) \quad (\text{II.29})$$

$$P_{max_2} = FF_2 \times V_{OC_2} \times I_{SC_2} \quad (\text{II.30})$$

$$FF_2 = FF_1 \times \left( \frac{V_{mp_2}}{V_{mp_1}} \right) \quad (\text{II.31})$$

Où la nomenclature des équations est décrite comme:

E: Irradiance (W / m<sup>2</sup>),

T: température (° C),

FF: facteur de remplissage (%),

Rs: résistance série du module (Ω),

α: température réduite Coefficient d'ISC (C-1),

β: Coefficient de température réduit de COV (C-1),

P: Puissance (W),

I: Courant (A),

V: Tension (V). et où indices: 2: pour les conditions STC,

m: mesuré, max: au point de puissance maximale,

oc: circuit ouvert, SC: court-circuit.

#### II.4. Influence de l'Éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m<sup>2</sup> et 1000 w/m<sup>2</sup> avec un pas de 200, la caractéristique ( $I_{pv} = (V_{pv})$ ) est donnée par les figures (II-4). 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 [32].

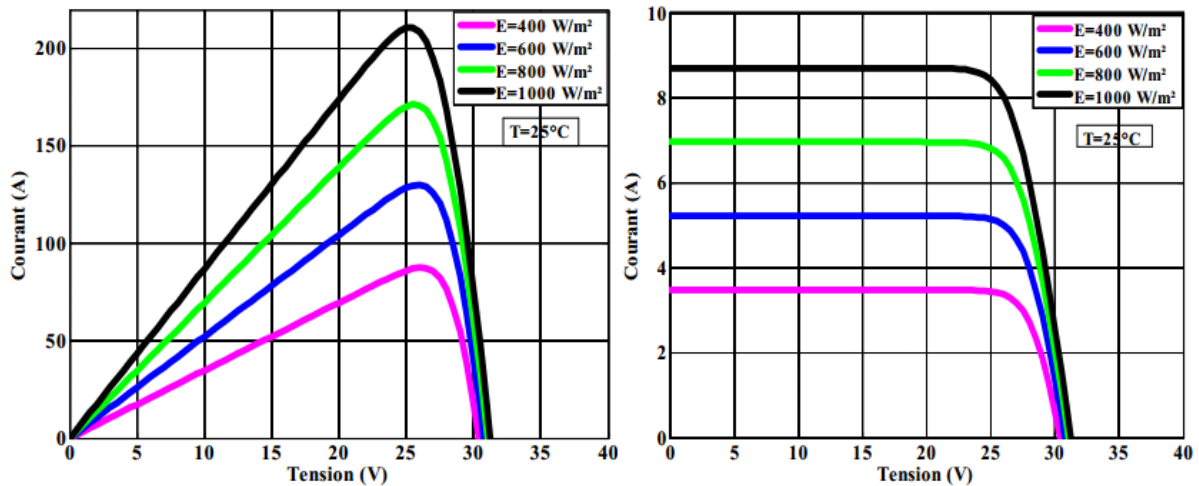


Figure (II.4): Caractéristique P-V et I-V du module PV selon l'éclairement.

### II.5. Influence de la Température

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 50°C, la caractéristique ( $I_{pv} = (V_{pv})$ ) est donnée par les figures (II-5). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte [33].

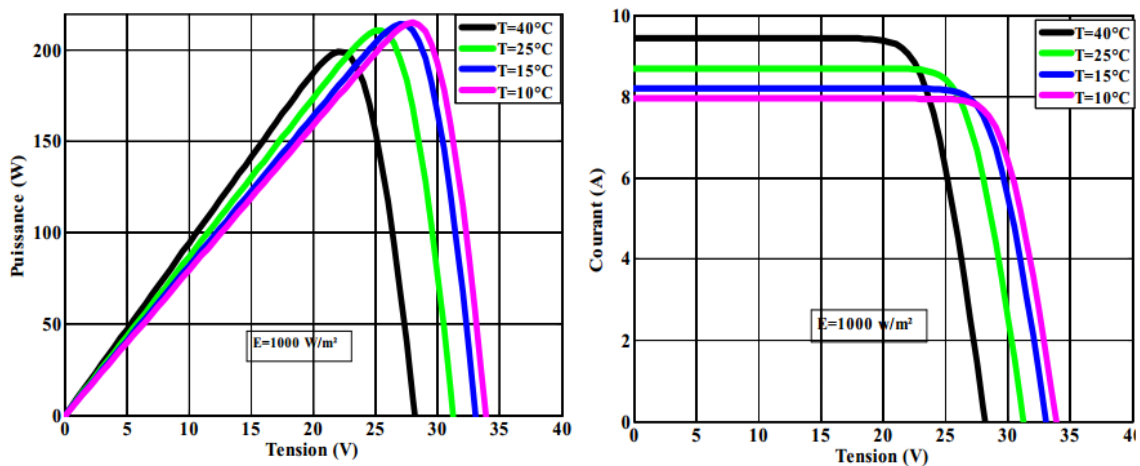


Figure (II.5): Caractéristique P-V et I-V du module PV selon la température.

**II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des méthodes pour l'extraction des paramètres de ces modèles à partir d'une courbe I-V sous éclairage et présenté des méthodes les plus utilisées dans la caractérisation des modules PV. Ensuite, nous avons présenté des méthodes pour la translation de la courbe I-V et des paramètres des modèles vers d'autres conditions d'éclairage et de température.

Nous avons aussi donné un aperçu sur la méthode utilisée. Nous avons également décrit les méthodes appliquées pour l'extraction des paramètres photovoltaïques des cellules solaire qui nous ont semblé les plus importantes et les plus utilisées.

---

# CHAPITRE III

---

### III.1. Introduction

La caractéristique courant-tension en polarisation directe (ou courbe I-V en éclaircissement) est l'élément clé de l'analyse des performances d'un dispositif photovoltaïque (cellule solaire, module ou champ de modules) par le fait celle-ci comprend tous les paramètres électriques inhérents au fonctionnement de tel dispositif PV ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$ ,  $P_{mp}$ , FF et Rendement). En théorie, la mesure de caractéristique I-V pourra se faire par le biais d'une résistance variable allant de 0 à  $\infty$  permettant ainsi le balayage de cette courbe I-V du point de court-circuit (0,  $I_{sc}$ ) au point de circuit-ouvert ( $V_{oc}$ , 0).

Le présent chapitre se veut une présentation de l'étude de trois techniques usuelles de translation aux conditions standards d'un module photovoltaïque. L'étude de simulation est réalisée grâce au logiciel de simulation dynamique Matlab/Simulink.

### III.2. Résultats de simulation des méthodes translation aux conditions STC

Dans cette section nous présenterons les résultats de simulation des méthodes de translation aux conditions STC pour un module PV monocristallin qui a les paramètres suivants : ( $P_{max}=180$  w et  $V_{max}=24$  V).

#### III.2.1. Résultat de simulation de la méthode de translation IEC891

Le schéma bloc de simulation du programme Matlab/Simulink que nous avons réalisé pour la méthode selon la norme IEC 891 est représenté par la figure (III-1).

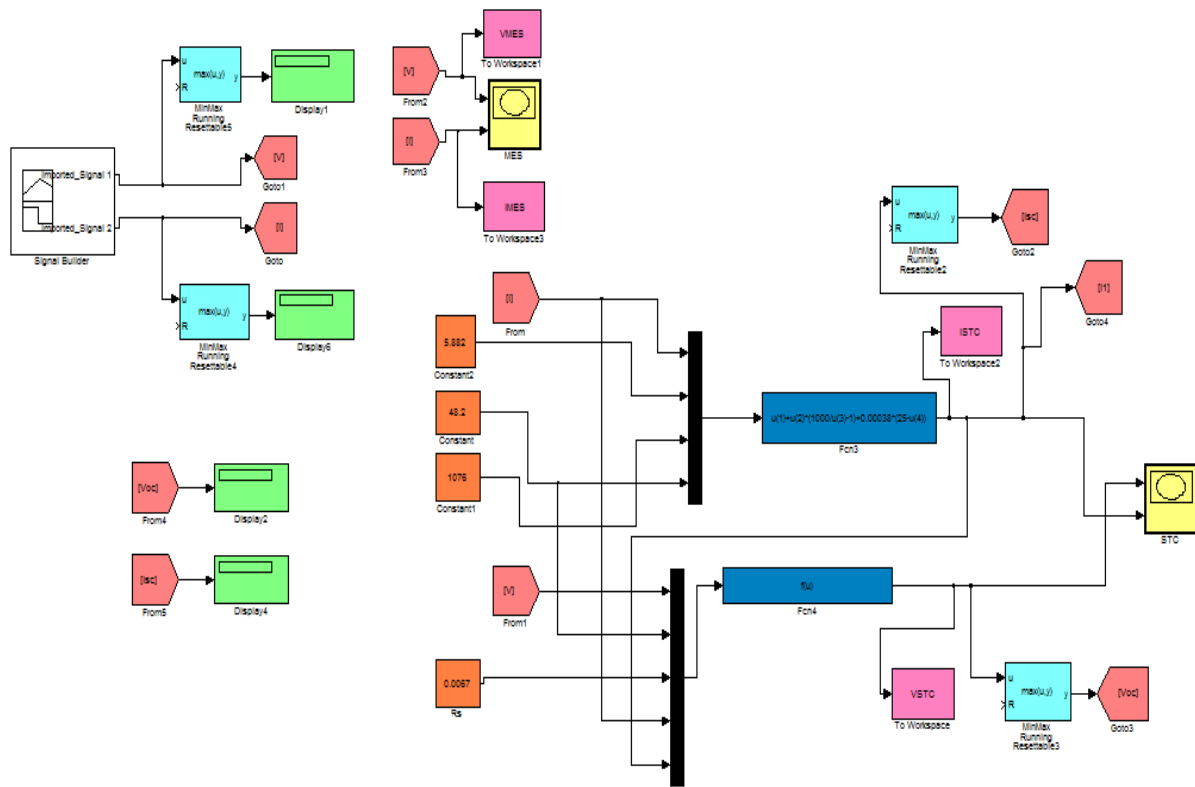


Figure (III-1): Schéma du programme Matlab/Simulink de la méthode IEC891.

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode IEC891 à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.2 et III.3).

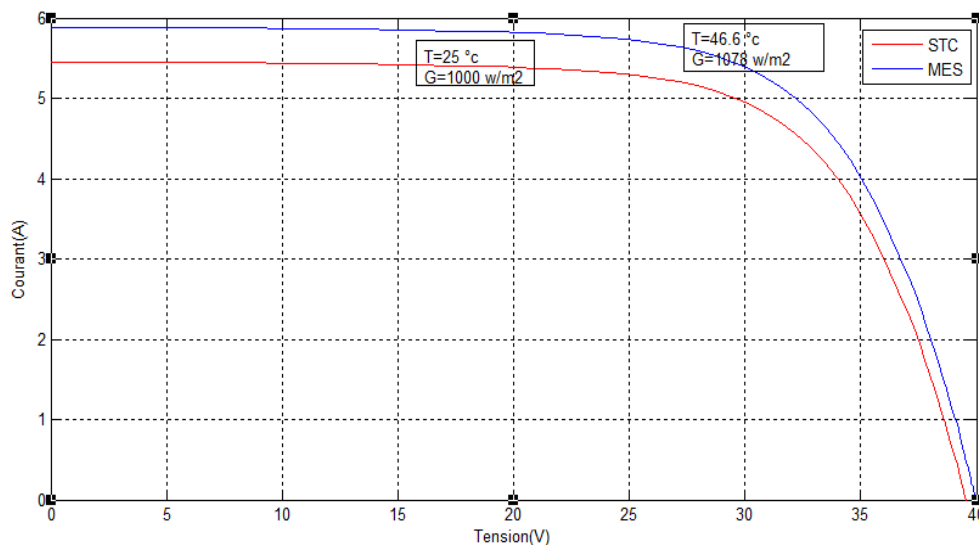
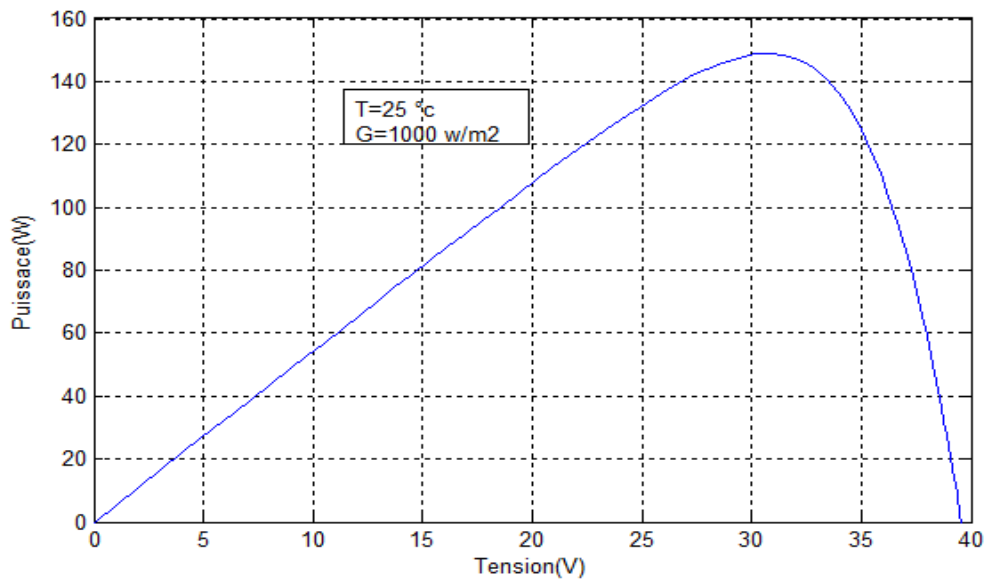
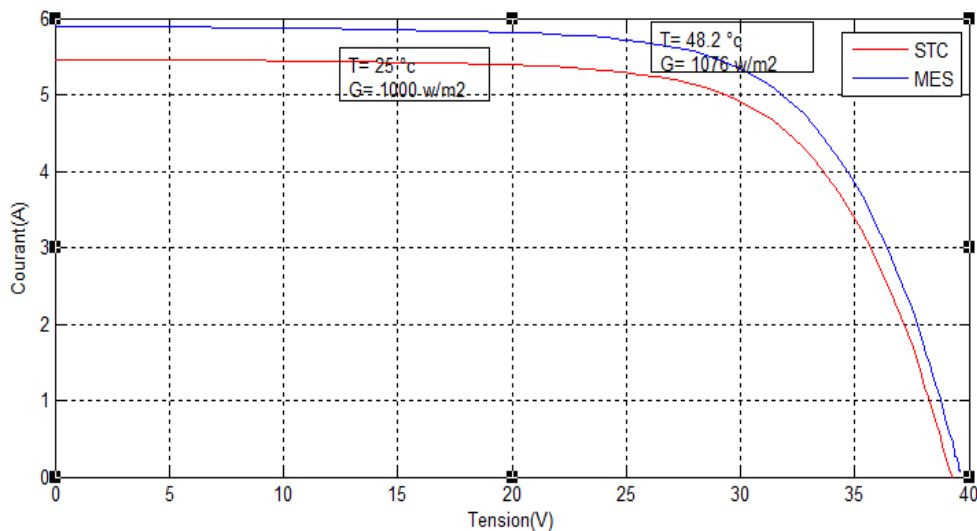


Figure (III-2): Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ ,  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) et translâtée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation IEC891.

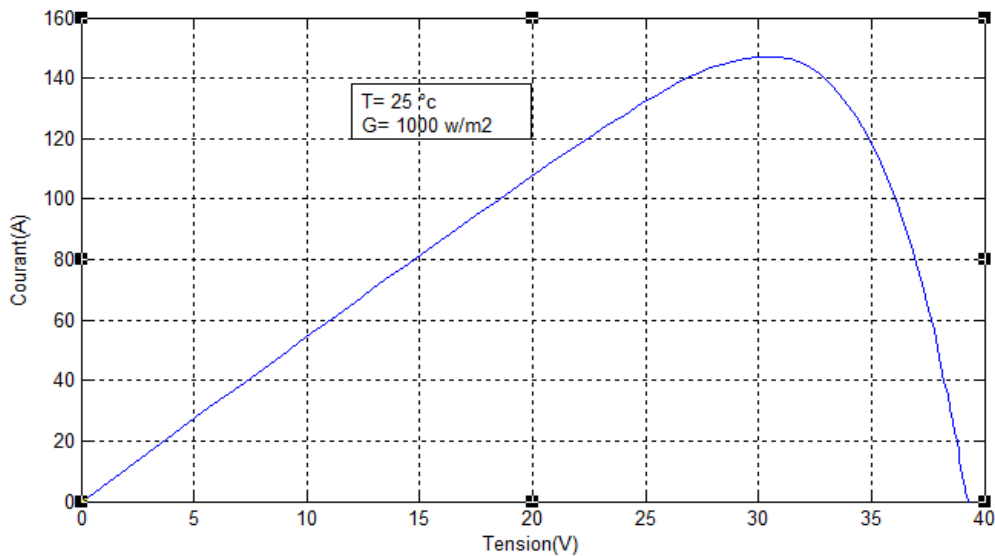


**Figure (III-3):**Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation IEC891 à partir des données mesurées ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ).

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode IEC891 à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=1076 \text{ w/m}^2$  et  $T= 48.2^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.4 et III.5).

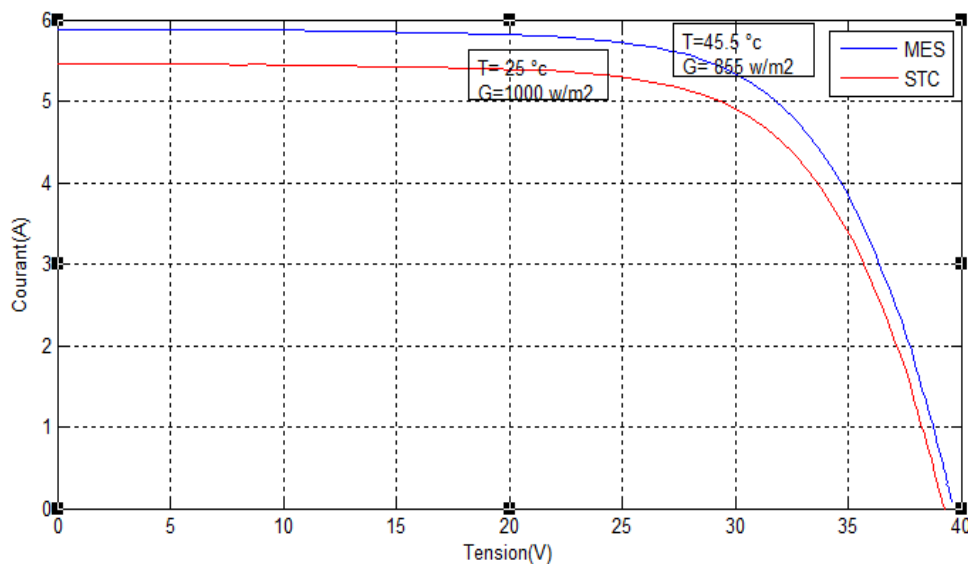


**Figure (III-4):** Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1076 \text{ w/m}^2$ ,  $T=48.2^\circ\text{C}$ ) et traduite aux conditions STC du module PV par la méthode de translation IEC891.

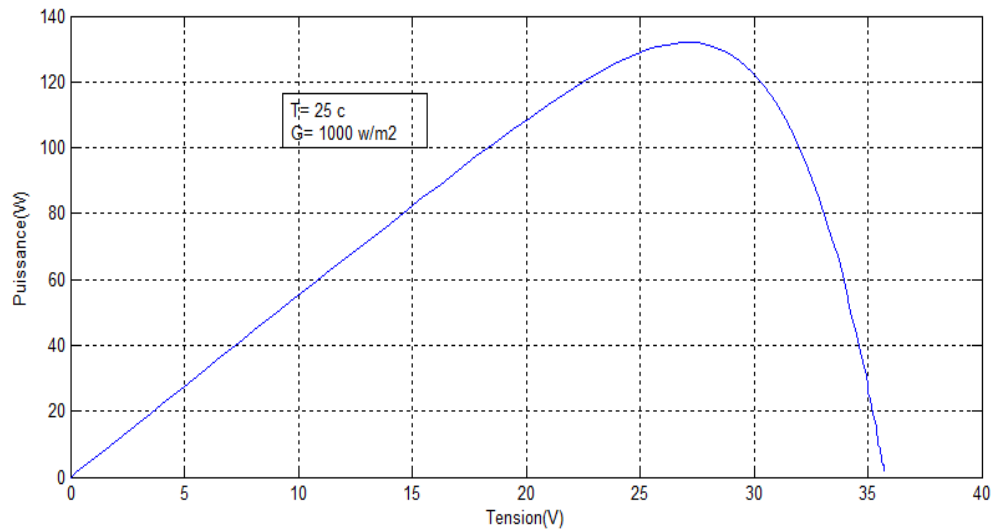


**Figure (III-5):** Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation IEC891 à partir des données mesurées ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ).

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode IEC891 à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=855 \text{ w/m}^2$  et  $T= 45.5^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.6 et III.7).



**Figure (III-6):** Caractéristiques I-V mesurée ( $G=855 \text{ w/m}^2$ ,  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) et traduite aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation IEC891.



**Figure (III-7):** Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation IEC891 à partir des données mesurées ( $G=855 \text{ w/m}^2$  et  $T=45.5^\circ\text{C}$ ).

Les valeurs de la puissance maximale, la tension du circuit-ouvert et le courant de court-circuit obtenus par la méthode de translation à partir des données mesurées aux différentes conditions météorologiques de rayonnement et de température sont résumées dans le tableau(III.1).

Module monocristalline	$G=1078 \text{ w/m}^2$ $T=46.6.2 \text{ }^\circ\text{c}$	$G=1076 \text{ w/m}^2$ $T=48.8 \text{ }^\circ\text{c}$	$G=855 \text{ w/m}^2$ $T=45.5 \text{ }^\circ\text{c}$
$P_{\text{max}}(\text{STC})$	146	147	130
$V_{\text{OC,STC}}$	40.02	39.57	39.57
$I_{\text{SC,STC}}$	5.462	5.458	5.458

**Tableau (III-1):** Les valeurs des paramètres du module PV aux conditions standards obtenues par la méthode de translation IEC891.

### III.2.2. Résultat de simulation de la méthode de translation A.J Anderson

Le schéma bloc de simulation du programme Matlab/Simulink que nous avons réalisé pour la méthode Anderson est représenté par la figure (III-1).

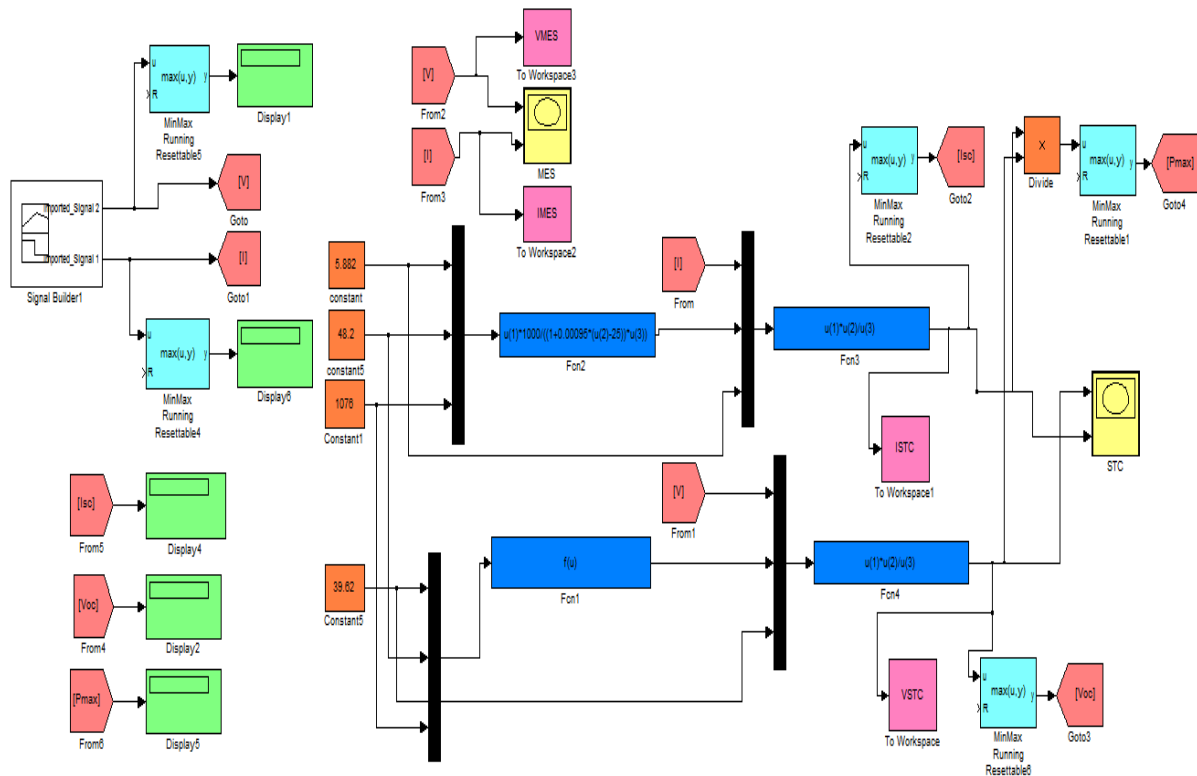


Figure (III-8): Schéma du programme Matlab/Simulink de la méthode A.J Anderson.

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode Anderson à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.9 et III.10).

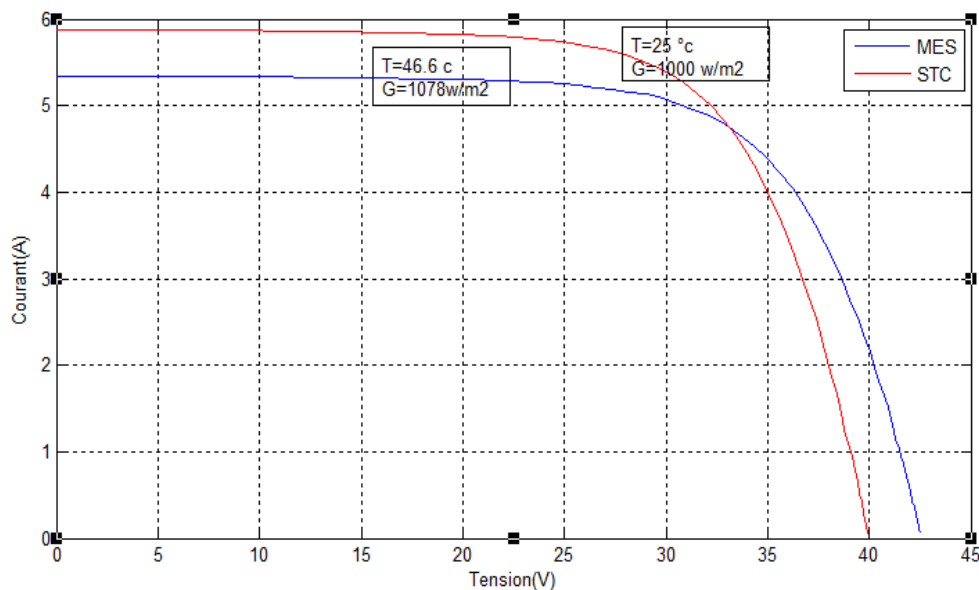
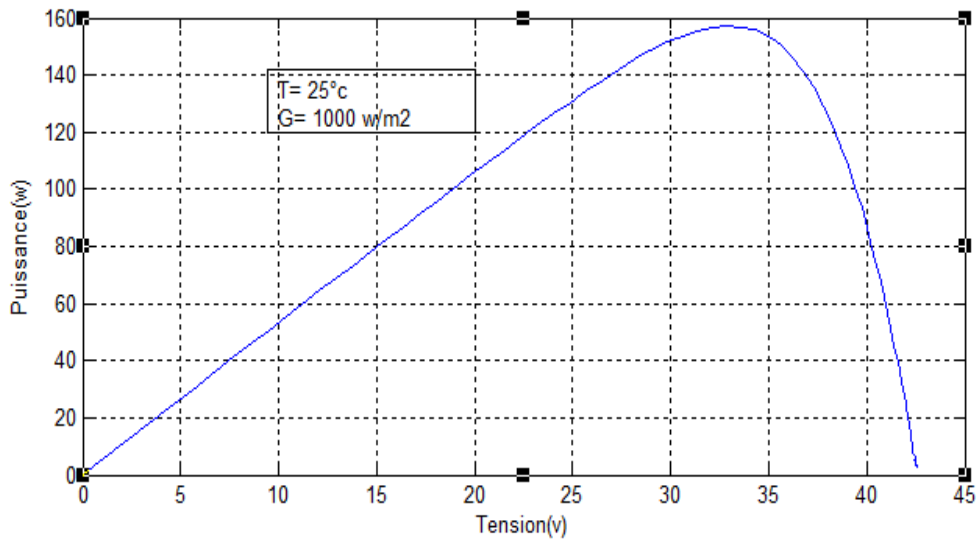
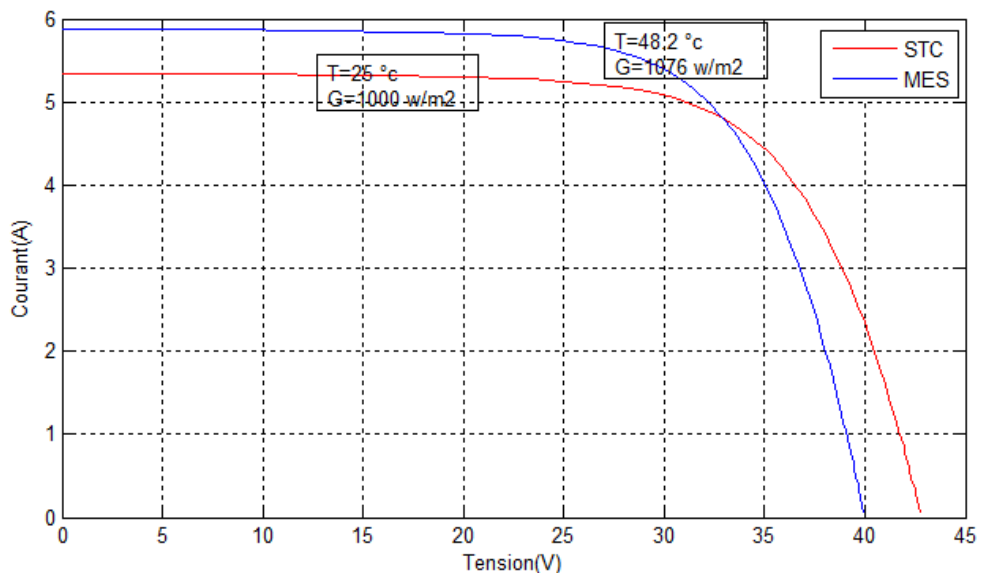


Figure (III-9): Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ ,  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) et traduite aux conditions STC du module PV par la méthode de translation Anderson.

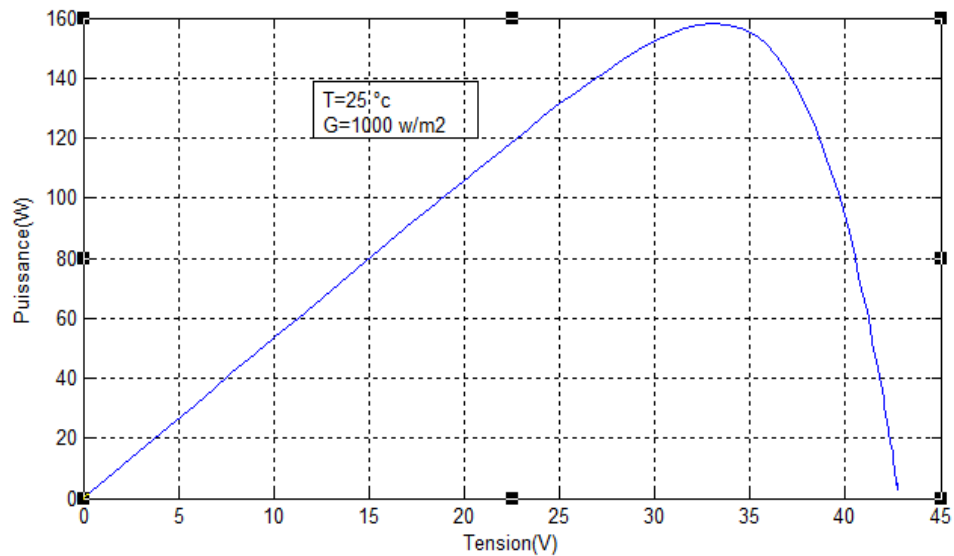


**Figure (III-10):** Caractéristique P-V translée aux conditions STC du module par la méthode de translation Anderson à partir des données mesurées ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T=46.6^\circ\text{C}$ ).

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode Anderson à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=1076 \text{ w/m}^2$  et  $T= 48.2^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.11 et III.12).

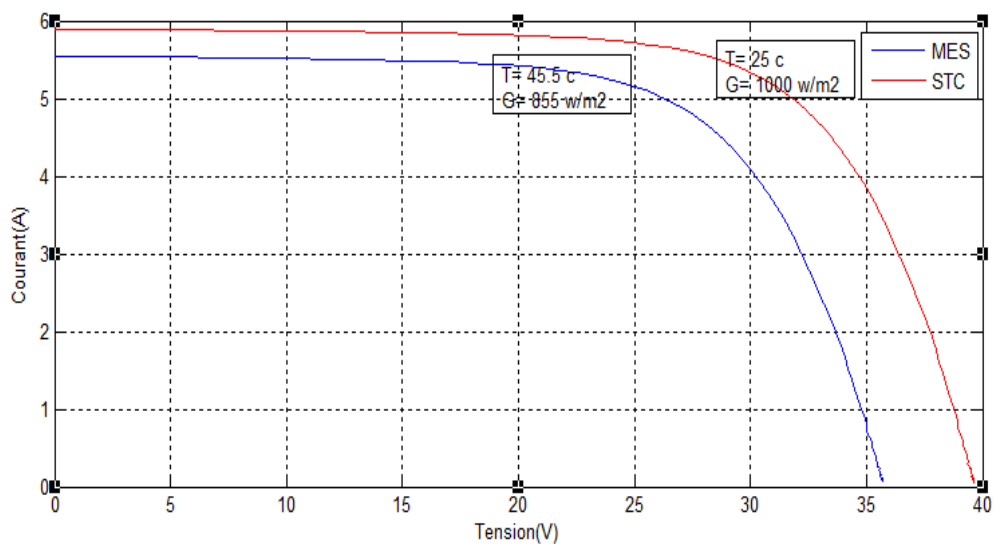


**Figure (III-11):** Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1076 \text{ w/m}^2$ ,  $T=48.2^\circ\text{C}$ ) et translée aux conditions STC du module PV par la méthode de translation Anderson.

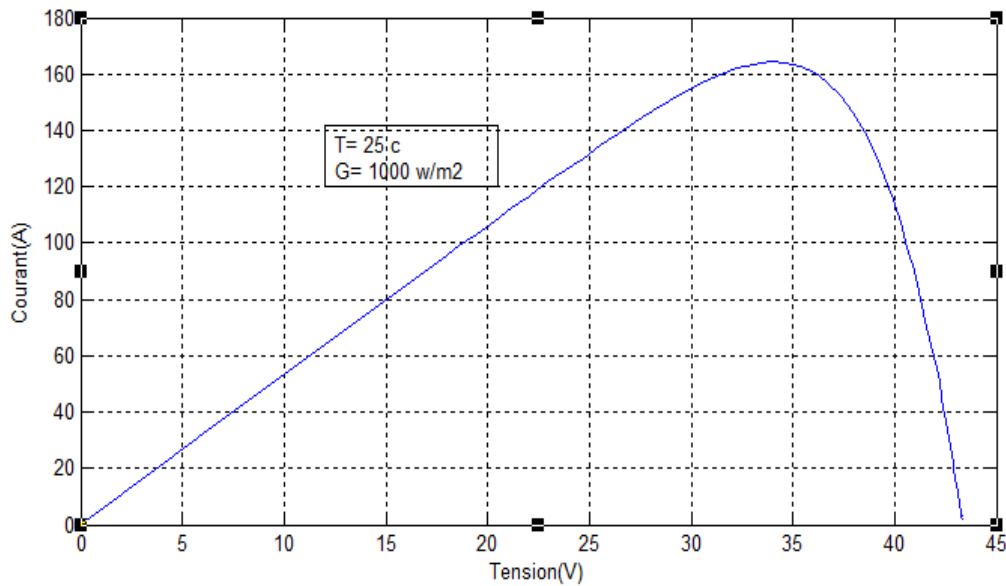


**Figure (III-12):** Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation Anderson à partir des données mesurées ( $G=1076 \text{ w/m}^2$  et  $T=48.2^\circ\text{C}$ ).

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode Anderson à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=855 \text{ w/m}^2$  et  $T= 45.5^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.13 et III.14).



**Figure (III-13):** Caractéristiques I-V mesurée ( $G=855 \text{ w/m}^2$ ,  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) et traduite aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Anderson.



**Figure (III-14):** Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation Anderson à partir des données mesurées ( $G=855 \text{ w/m}^2$  et  $T=45.5^\circ\text{C}$ ).

Les valeurs de la puissance maximale, la tension du circuit-ouvert et le courant de court-circuit obtenus par la méthode de translation à partir des données mesurées aux différentes conditions météorologiques de rayonnement et de température sont résumées dans le tableau(III.2).

Module monocristalline	$G=1078 \text{ w/m}^2$ $T=48.2 \text{ }^\circ\text{C}$	$G=1076 \text{ w/m}^2$ $T=46.6 \text{ }^\circ\text{C}$	$G=855 \text{ w/m}^2$ $T=45.5 \text{ }^\circ\text{C}$
$P_{\text{max, STC}}$	157.3	156.3	164.3
$V_{\text{OC, STC}}$	42.54	42.44	43.34
$I_{\text{SC, STC}}$	5.346	5.349	5.368

**Tableau (III-2):** Les valeurs des paramètres du module PV aux conditions standards obtenues par la méthode de translation Anderson.

### III.2.3. Résultat de simulation de la méthode de translation Blaesser

Le schéma bloc de simulation du programme Matlab/Simulink que nous avons réalisé pour la méthode Blaesser est représenté par la figure (III-15).

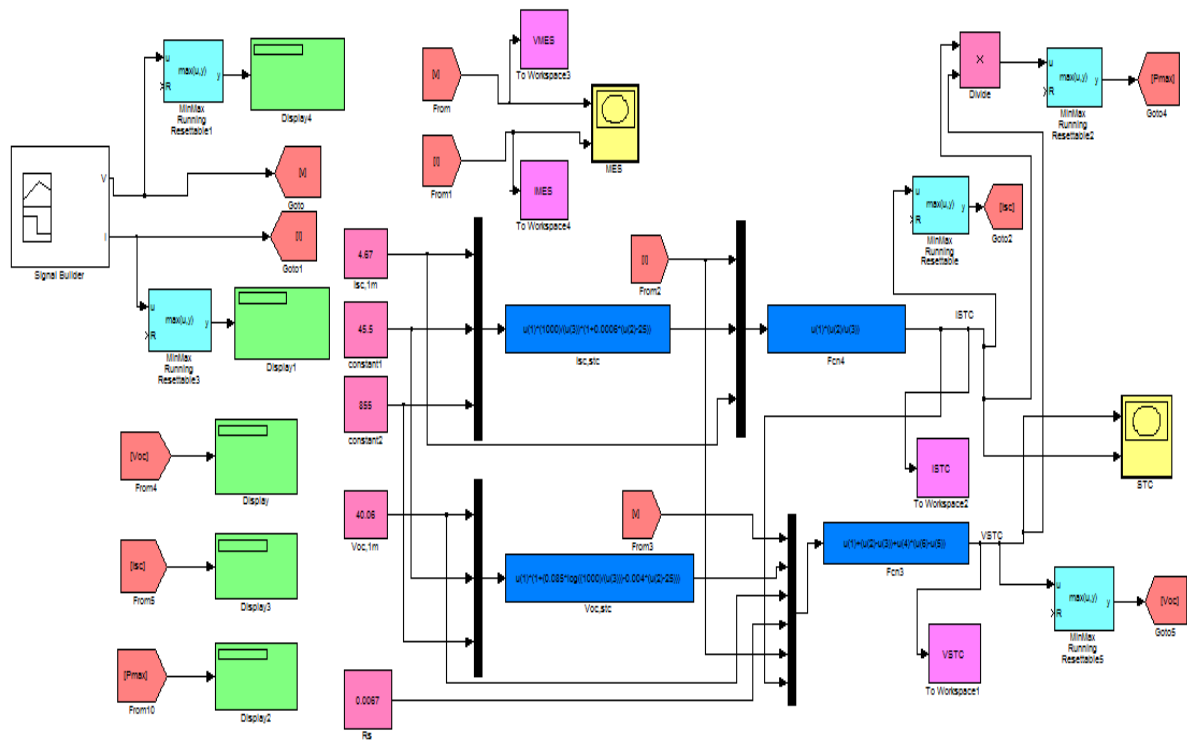


Figure (III-15): Schéma du programme Matlab/Simulink de la méthode Blaesser.

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode Anderson à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=1078 \text{ w/m}^2$  et  $T= 46.6^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.16 et III.17).

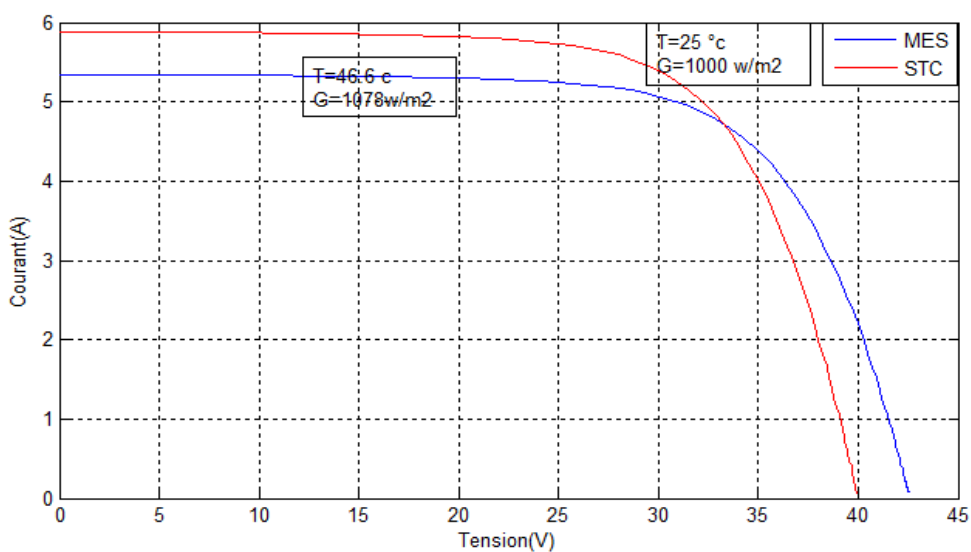
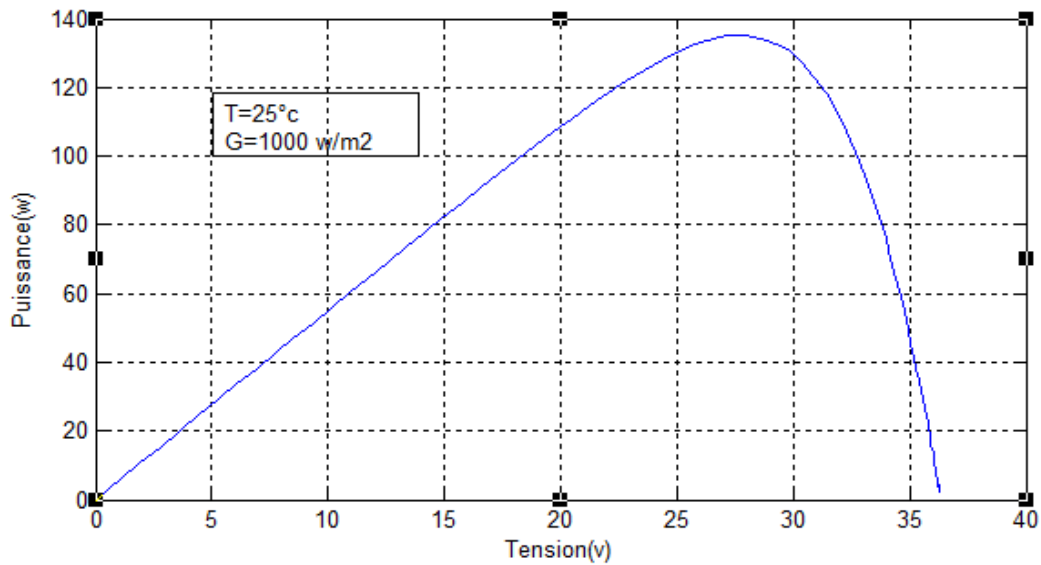
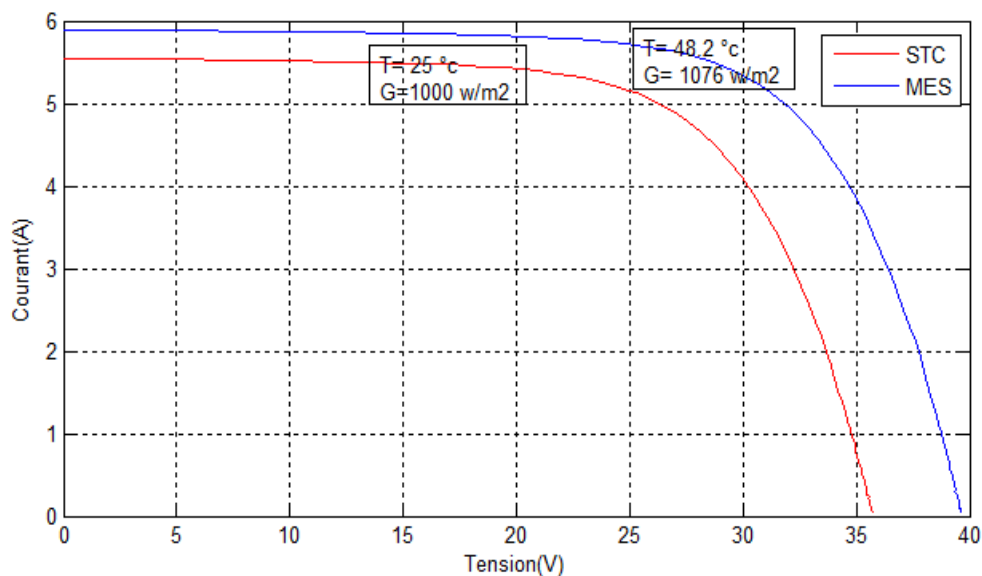


Figure (III-16): Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1078 \text{ w/m}^2$ ,  $T=46.6^\circ\text{C}$ ) et traduite aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Blaesser.

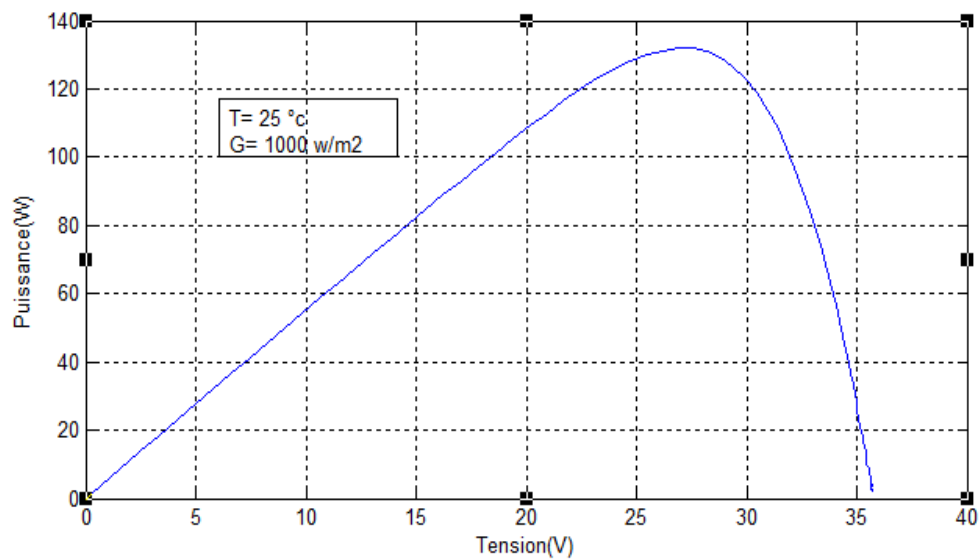


**Figure (III-17):** Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation Blaesser à partir des données mesurées ( $G=1078w/m^2$  et  $T=46.6^{\circ}C$ ).

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode Blaesser à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=1076 w/m^2$  et  $T= 48.2^{\circ}C$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.18 et III.19).

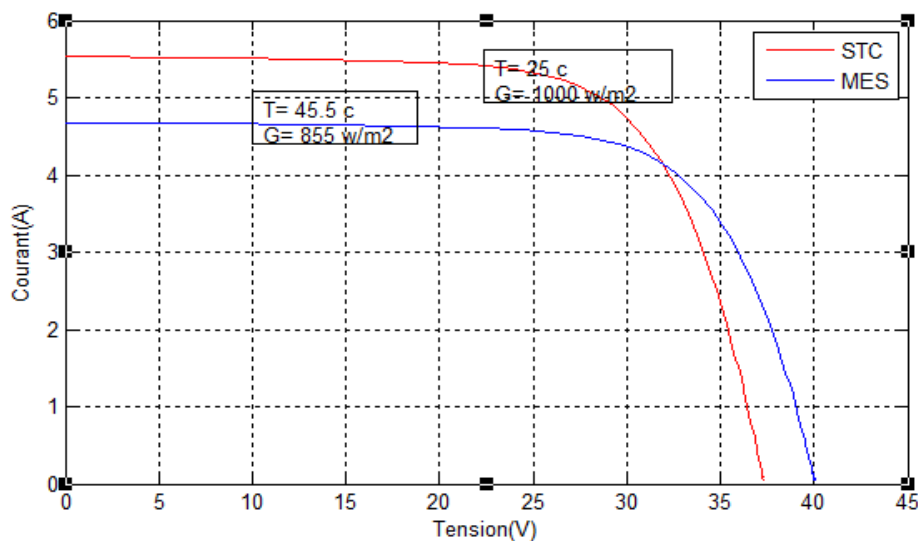


**Figure (III-18):** Caractéristiques I-V mesurée ( $G=1076 w/m^2$ ,  $T=48.2^{\circ}C$ ) et traduite aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Blaesser.

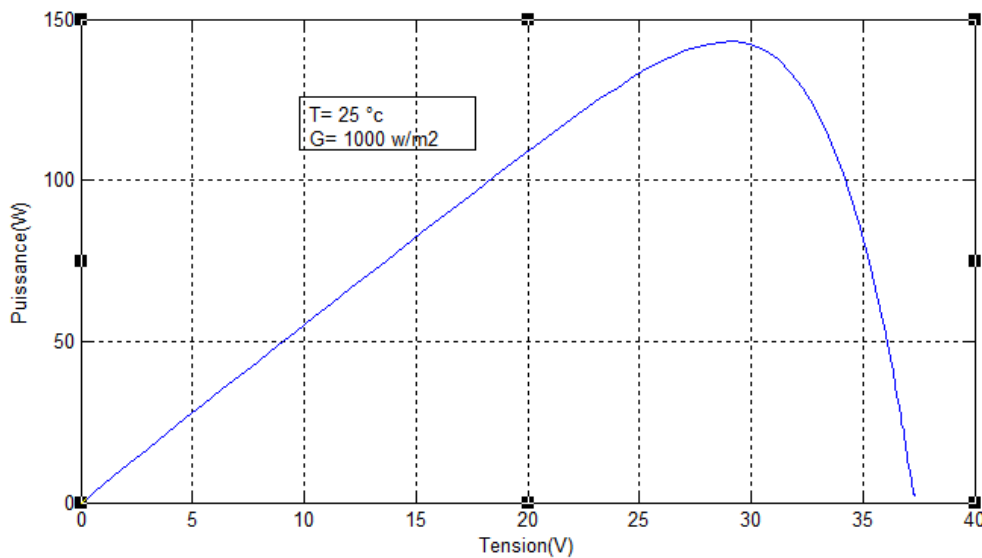


**Figure (III-19):** Caractéristique P-V translâtée aux conditions STC du module par la méthode de translation Blaesser à partir des données mesurées ( $G=1076\text{w/m}^2$  et  $T=48.2^\circ\text{C}$ ).

Les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par la translation aux conditions standard par la méthode Blaesser à partir des données mesurées dans les conditions météorologiques de rayonnement et de température ( $G=855\text{ w/m}^2$  et  $T= 45.5^\circ\text{C}$ ) pour le module PV monocristallin sont représentés respectivement par les figures (III.20 et III.21).



**Figure (III-20):** Caractéristiques I-V mesurée ( $G=855\text{ w/m}^2$ ,  $T=45.5^\circ\text{C}$ ) et translâtée aux Conditions STC du module PV par la méthode de translation Blaesser.



**Figure (III-21):** Caractéristique P-V traduite aux conditions STC du module par la méthode de translation Blaesser à partir des données mesurées ( $G=855\text{w/m}^2$  et  $T=45.5^\circ\text{C}$ ).

Les valeurs de la puissance maximale, la tension du circuit-ouvert et le courant de court-circuit obtenus par la méthode de translation à partir des données mesurées aux différentes conditions météorologiques de rayonnement et de température sont résumées dans le tableau(III.3).

Module monocristalline	$G=1078\text{ w/m}^2$ $T=48.2\text{ }^\circ\text{c}$	$G=1076\text{ w/m}^2$ $T=46.6\text{ }^\circ\text{c}$	$G=855\text{ w/m}^2$ $T=45.5\text{ }^\circ\text{c}$
$P_{\text{max, STC}}$	134.4	156.3	143.1
$V_{\text{OC, STC}}$	36.24	42.44	37.31
$I_{\text{SC, STC}}$	5.527	5.349	5.539

**Tableau (III-3):** Les valeurs des paramètres du module PV aux conditions standards obtenues par la méthode de translation Blaesser.

### **III.3. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude de simulation pour trois méthodes de translation aux conditions standards d'un module monocristallin de paramètres ( $P_{max}=180$ , et  $V=24V$ ). Nous avons également présenté les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par translation aux conditions STC à partir des données mesurées dans différentes conditions météorologiques de rayonnement et de température. Enfin, nous avons présenté les valeurs des trois paramètres qui sont : la puissance maximale, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert obtenues par les différentes méthodes de translation aux conditions.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

### Conclusion générale

Dans cette étude, trois méthodes de conversion aux conditions STC de la caractéristique I-V des modules photovoltaïques sont présentées et analysées. Les performances de ces méthodes ont été testées sur les données mesurées d'un module PV monocristallin (180W, 24V). Le module PV a été exposé dans un environnement réel. Les données d'irradiance et de température ainsi que le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert du module sont utilisés dans la validation expérimentale des méthodes de translation CEI981, Anderson et Blaesser. Les résultats ont démontré que la méthode Combinaison a une bonne précision de la conversion STC du module PV performances dans différentes conditions météorologiques. La méthode combinée utilise les données de l'irradiance et paramètres de température et de performances en conditions STC du module PV pour prédire la puissance de sortie maximale. Par conséquent, il est essentiel de disposer de données météorologiques avant de concevoir des systèmes d'alimentation photovoltaïque.

Dans ce mémoire nous avons présenté une étude de trois différentes méthodes pour la translation de caractéristique I-V aux conditions standards à partir de la caractéristique I-V mesuré.

- En première partie, on a abordé quelques généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques, la nécessité de faire l'assemblage des modules photovoltaïques soit en série ou (en) et parallèle, ainsi nous avons brièvement présenté les différentes techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïques, ainsi nous avons brièvement présenté différents types de rayonnement.
- En deuxième partie, nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque ainsi que trois différentes méthodes de translation de la caractéristique I-V aux conditions standards à partir des données mesurées dans différentes conditions météorologiques de température et de rayonnement.
- Dans la troisième partie, nous avons réalisé une étude de simulation pour trois méthodes de translation aux conditions standards d'un module monocristallin de paramètres ( $P_{max}=180$ , et  $V=24V$ ). Nous avons également présenté les courbes des caractéristiques I-V et P-V obtenues par translation aux conditions STC à partir des données mesurées dans différentes conditions météorologiques de rayonnement et de température. Enfin, nous avons présenté les valeurs des trois paramètres qui sont : la puissance maximale, le

courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert obtenues par les différentes méthodes de translation aux conditions.

---

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] **M. Kusco, V. Saly, M. Perny**, “Comparison of Translation Techniques by PV Module Diagnostics at Outdoor Conditions,” *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, Vol.61, No.2 (2013).
- [2] **A. J. Anderson**, “Photovoltaic Translation Equations A New Approach,” NREL/TP-411-20279, NREL, January 1996
- [3] **G. Blaesser, W. Zaaiman** , “On-Site Power Measurements On Large PV Arrays,” 10TH European Photovoltaic Solar Energy Conference, Portugal April 8-12, 1991.
- [4] **B. Marion**, “Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL,” NCPV Program Review Meeting, Colorado, April 16-19, 2000.
- [5] **B. Duck, C. Fell, B. Marion, K. Emery**, “Comparing Standard Translation Methods for Predicting Photovoltaic Energy Production,” 39th IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS
- [6] **R.Siddiqui, R. Kumar, G.K.Jha and U.Bajpai**, “Performance Analysis of Polycrystalline Silicon PV Modules on the basis of Indoor and Outdoor Conditions,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol.4, No.1 (Feb 2014).CONFERENCE, Florida, JUNE 16-21, 2013.
- [7] **K. Agroui, A. Hadj Arab, M. Pellegrino, F. Giovanni3 and I. Hadj Mahammad**, “Indoor and outdoor photovoltaic modules Performances based on thin films solar cells,” *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14, N°3, (2011), pp 469 - 480
- [8] **C. Serir**, « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2012.
- [9] **A. Zerga** «Optimisation du rendement d’une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n-p» Mémoire de Magister, Tlemcen-1998.
- [10] **A. Labouret, M. Villoz**, «Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel)», édition DUNOD, Paris (France), août 2003.
- [11] [www.greenpeace.ca](http://www.greenpeace.ca)
- [12] [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm, csnumber =16629](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm, csnumber =16629).
- [13] **F. Héroguel**, les cellules photovoltaïques, Epreuve de projet Ecole Normale Supérieure. Lyon, Juillet 2007.

## Bibliographie

---

- [14] **C. Lerouge, et al**, Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis, Sciences Physiques, 2006.
- [15] **J.P.Joly**. "Focus Technique Photovoltaïque Un Nouvel Éclairage". L'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) Paris, mars 2011.
- [16] **A.Bisker et M.Chiri**. "Commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode Connecté au réseau". Mémoire de Master école nationale polytechnique, 2012.
- [17] **O.Ernst et N.Young**. "Étude de développement de l'énergie Solaire". Rhône-Alpes, décembre 2010.
- [18] **H. BENNACER** modélisation d'un système photovoltaïque, Mémoire de Magister, Université D Liabes Sidi bel Abbès, 2009.
- [19] **H. HACHEMI**, "Contribution des nc-Si confinés à l'intérieur des couches antireflets dans l'amélioration de la réponse spectrale des cellules solaires conventionnelles", Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [20] <http://lyc-mgenevoix-ingre.tice.ac-orleans-tours.fr>
- [21] **H. CHENOUI**, "Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion". Mémoire de Magister", Université de Batna, 2005.
- [22] **T. Fogelman**, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie (AFME).
- [23] **C. Bernard, Chauvine, D. Lebrun, J.F Murez, P. Stassi** « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006.
- [24] **O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed** « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models » 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.
- [25] **L. Bun, Etude**, Détection et localisation de Défauts pour un système photovoltaïque, thèse Doctorat, Université de Grenoble, Décembre 2011.
- [26] **H. Kamelia**, Modalisation d'une cellule photovoltaïque Etude comparative, Mémoire de Magister En Electrotechnique, université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, 2012.

- [27] **A. J. Anderson**, “Photovoltaic Translation Equations A New Approach,” NREL/TP-411-20279, NREL, January 1996
- [28] **B. Duck, C. Fell, B. Marion, K. Emery**, “Comparing Standard Translation Methods for Predicting Photovoltaic Energy Production,” 39th IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, Florida, JUNE 16-21, 2013
- [29] **A. RICAUD**. Photopiles solaires de la physique de la conversion PV aux filières, matériaux et procédés. Presses polytechniques et universitaires romandes Ch-1015 Lausanne, 1997.
- [30] **F. CHENLO, F. FABERO and M.C. ALONSON**, A comparative study between indoor and outdoor measurements. Informe final de proyecto: Testing, Norms, Reliability and Harmonisation. Joule II- contract N. JOU2-CT92-0178. 1995.
- [31] **I. Drouiche, S. Harrouni**, «Comparative study between two STC translation methods from different conditions», Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2016.
- [32] **M. SLAMA Fateh**, «Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de Magister Université de Setif (2011).
- [33] **S. LEMBAREK Nadir, K. Soheyb**, Caractérisation et Modélisation Electrique d’un Module Photovoltaïque en Silicium, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, 2019.

### ملخص:

تُستخدم طرق الانسحاب STC في العديد من التطبيقات ، مثل التنبؤ بإنتاجية الطاقة ، وتوصيف الوحدات الكهروضوئية ، وترجمة منحني الجهد الحالي ( IV ) من أي ظروف درجة الحرارة والاشعاع ، الى اي ظروف اخرى من درجة الحرارة والاشعاع.

في هذه المدكرة ، تم دراسة مقارنة الاختلاف بين طرق الانسحاب المعتادة لتوصيف الوحدات الكهروضوئية . يتم اجراء الدراسة ونتائج المحاكاة باستخدام برنامج محاكاة ديناميكي Matlab / Simulink. لتقييم أداء طرق ال IEC891 و Anderson و Blaesser لترجمة STC من نطاقات إشعاع ودرجات حرارة مختلفة.

### الكلمات المفتاحية:

وحدة PV ، Méthodes de translation STC ، طريقة اندرسون ، طريقة بليسر، IEC891، حرارة ، اشعاع ، خصائص.

### Résumé:

Les méthodes de translation STC sont utilisées dans de nombreuses applications, telles que la prévision de la productivité énergétique, la caractérisation des modules PV et la traduction de la courbe de tension de courant (IV) de toutes les conditions de température et de rayonnement, à toutes autres conditions de température et de rayonnement.

Dans cette mémoire, une comparaison de la différence entre les méthodes de retrait habituelles pour la caractérisation des modules PV est étudiée. Les résultats de l'étude et de la simulation sont réalisés à l'aide d'un programme de simulation dynamique Matlab / Simulink. évaluer les performances des méthodes IEC891, Anderson et Blaesser de traduction des STC à partir de différentes plages de rayonnement et températures.

### Mots clés:

module PV; Méthodes de traduction STC; Méthode Blaesser; Méthode Anderson; IEC891; irradiance; temperature; performances; caractérisation.

### Abstract:

The STC translation methods are used in many applications, such as prediction of energy yield, characterization of PV modules, and translation of current-voltage (I-V) curve from any conditions of temperature and irradiance, to any other conditions of temperature and irradiance.

In this memory, a comparison of the difference between the usual withdrawal methods for characterizing PV modules is studied. The study and simulation results are performed using a Matlab / Simulink dynamic simulation program. To evaluate the performance of IEC891, Anderson and Blaesser methods of translating STCs from different radiation ranges and temperatures.

**Key words:**

PV module; STC translation methods; Blaesser method; Anderson method; IEC891; irradiance Temperature; performance; characterizing.