

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/2021

المرجع : ...../م/م / 2021

## Mémoire de Master

Présenté au

**Département** : Génie Électrique  
**Domaine** : Sciences et Technologies  
**Filière** : Electrotechnique  
**Spécialité** : Réseaux Electriques

Réalisé par :

**Hammoudi mohamed reda**

Et

**Larbi djamel eddine**

## Thème

**Modélisation et simulation sous Matlab/simulink les défauts d'un panneau photovoltaïque.**

Soutenu le: **30/10/2021**

Devant la commission composée de :

Mr : MOHAMMEDI AHMED	M.C.A	Univ. Bouira	Président
Mr : HOUASSINE HAMZA	M.C.A	Univ. Bouira	Rapporteur
Mme : OUADFEL GHANIA	D.O.C	Univ. Médéa	Co-rapporteur
Mr : BOUZIDA AHCENE	M.C.A	Univ. Bouira	Examinateur

Année Universitaire: 2020-2021

## **Dédicaces 1**

Je dédie ce travail a mon très cher père HAMMOUDI MAKHLOUF et ma chère maman ABDELLI ZAHIDA et sans oublier mes deux chères petites sœurs MANEL et MALEK et IKENE KENZA qui mon éclairé mon chemin et encourage toute au long de mes études.

HAMMOUDI MOHAMED REDA

## **Dédicaces 2**

Je dédie ce travail a mon cher père ABDELHAMID et ma chère maman BADJI HAFIDA et sans oublier ma chère petite sœur NOR ELHOUDA et mon grand père MOHAMED rebi yrahmou et mon chère frère KASRAOUI YUCEF qui mon éclairé mon chemin et encourage toute au long de mes études.

LARBI DJAMEL EDDINE

---

# Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Nos remerciements vont tout premièrement, pour le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce le bon DIEU ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à Dr. HOUASSINE HAMZA Directeur de ce mémoire, et Mme. OUADFELGHANIA pour leurs conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'ils nous ont accordé pour mener ce travail à terme.

On adresse également nous sincères remerciement pour nous parent pour leurs soutins leurs encouragement, leurs patience et leurs motivations durons noter cursus depuis le premier jour.

Nous remercions également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail :

Mr : MOHAMMEDI AHMED le Président.

Mr : HOUASSINE HAMZA le Rapporteur.

Mme : OUADFEL GHANIA Co-rapporteur.

Mr : BOUZIDA AHCENE l'Examineur.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et des Sciences appliquées et le département de génie électrique de l'université de bouira, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous voudrions associer nos remerciements à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

## Résumé

Comme tout système de production d'électricité, tel que le système photovoltaïque il peut être soumis ou affecte durant son fonctionnement a différents défauts et anomalies menant à réduire l'efficacité du rendement du système photovoltaïque (PV), il dépend essentiellement des conditions aux quelles il est soumis, tel que environnementales, opérationnelles (fabrication ou exploitation). Ces facteurs sont l'origine d'un important nombre de défauts qui engendre une dégradation du GPV. Dans ce travail, nous nous intéressons spécifiquement à la détection et la classification des défauts d'un générateur photovoltaïque (GPV) en utilisant le programme MATLAB pour modéliser les relations qui représente les défauts dans le système photovoltaïque en étude comparative entre régime sain et en défaut , (fonctionnement normal est fonctionnement défailent).

**Mots clés :** système photovoltaïque – défauts- anomalies - détection - classification

# Table des Matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des Matières .....	III
Liste des Figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VII
Listes des Acronymes et Symboles .....	VIII

## **Introduction Générale** **1**

### **Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

1.1 Introduction .....	2
1.2 Energie solaire .....	2
1.3 Rayonnement solaire .....	2
1.4. Le photovoltaïque.....	3
1.4.1. L'effet photovoltaïque.....	3
1.4.2. Cellule photovoltaïque .....	3
1.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	4
1.4.4. Caractéristique courant-tension .....	5
1.4.5. Les technologies des cellules photovoltaïques.....	6
1.4.5.1. Les cellules à base de silicium monocristallin .....	6
1.4.5.2. Les cellules à base de silicium poly cristallin .....	6
1.4.5.3. Les cellules à base de silicium amorphe .....	6
1.4.5.4. Les cellules à base organiques et plastiques.....	6
1.5. Modélisation d'un générateur photovoltaïque .....	6
1.5.1. Modèles d'une cellule solaire.....	6
1.5.2. Modèle à une diode (à une seule exponentielle) .....	7
1.5.3. Point de puissance maximale $P_m$ .....	8
1.5.4. Le facteur de qualité .....	9
1.5.5. Facteur de forme FF .....	9
1.5.6. Rendement énergétique $\eta$ .....	9
1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	9
1.6.1. Influence d'éclairement et de la température .....	9
1.6.1.1. Influence d'éclairement.....	9
1.6.1.2. Influence de la température .....	11
1.7. Association des cellules (module de photovoltaïques) .....	12
1.7.1. Module de photovoltaïques .....	12

1.7.1.1. String PV .....	12
1.7.1.2. Champ PV .....	12
1.7.2. Association série .....	12
1.7.3. Association en parallèle .....	13
1.7.4. Association en série- parallèle.....	14
1.8. Système de protection .....	15
1.8.1. Diode de by-pass .....	15
1.8.2. Diode anti-retour .....	15
1.9. Conclusion .....	16

## Chapitre 2 : Etude des défauts du système photovoltaïque

2.1. Introduction .....	17
2.2. Défauts de fonctionnement d'un générateur PV .....	17
2.3. Classification des défauts de générateur PV .....	18
2.4. Méthodes de diagnostic .....	19
2.4.1. Méthodes de diagnostic courantes industrialisées .....	20
2.4.1.1. Méthodes non-électriques .....	20
2.4.1.2. Méthodes électriques .....	20
2.4.2. Méthodes dans la littérature .....	20
2.4.2.1. Méthode de réflectométrie .....	20
2.4.2.2. Analyse du point de fonctionnement .....	21
2.4.2.3. Analyse de la caractéristique statistique .....	21
2.4.2.4. Synthèse .....	22
2.5. Modèle universel du GPV en présence de défauts .....	23
2.5.1. Sous-modèle de défaut d'ombrage partiel .....	23
2.5.2. Sous-modèle de défaut de salissure et poussière .....	23
2.5.3. Sous-modèle de défaut de Mismatch .....	23
2.5.3.1. Défaut de résistance série.....	24
2.5.3.2. Défaut de résistance parallèle.....	24
2.5.4. Défaut de diodes de by-pass.....	24
2.5.4.1. Cas d'un court-circuit.....	24
2.5.4.2. Cas d'impédance Z quelconque .....	25
2.5.4.3. Cas d'un circuit ouvert .....	25
2.5.4.4. Cas d'inversion de la polarité.....	25
2.5.5. Défaut de diode anti-retour .....	25
2.5.5.1. Cas d'un court-circuit.....	25
2.5.5.2. Cas d'impédance Z quelconque .....	26
2.5.5.3. Cas d'circuit ouvert .....	26
2.5.5.4. Cas d'inversée .....	26

2.5.6. Défaut de module .....	26
2.5.6.1. Cas de module court-circuité.....	26
2.5.6.2. Cas de module connecté en parallèle avec une impédance .....	26
2.5.6.3. Cas d'inversion de la polarité d'un module .....	27
2.5.6.4. Défaut de connectique .....	27
2.6. Conclusion .....	27

### **Chapitre3 : Résultats et interprétations**

3.1. Introduction .....	28
3.2. Configuration des éléments d'un champ .....	28
3.3. Modélisation des différents défauts .....	28
3.3.1. Défaut de mismatch et d'ombrage .....	28
3.3.1.1. Interprétation d'ombrage .....	29
3.3.1.2. Interprétation de résistance série .....	30
3.3.1.3. Interprétation de résistance parallèle .....	31
3.3.2. Défaut de diode by-pass .....	31
3.3.2.1. Interprétation de diode by-pass .....	33
3.3.3. Défaut de module .....	33
3.3.3.1. Interprétation de module .....	34
3.3.4. Défaut de connectique .....	35
3.3.4.1. Interprétation de connectique .....	36
3.3.5. Défaut de diode anti-retour .....	36
3.3.5.1. Interprétation de diode anti-retour.....	37
3.4. Conclusion .....	38

<b>Conclusion Générale</b>	<b>39</b>
----------------------------	-----------

<b>Références</b>	<b>40</b>
-------------------	-----------

<b>Annexe</b>	<b>43</b>
---------------	-----------

# Liste des Figures

## Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Fig. 1.1 : Réponse spectrale d'une cellule (PV).....	3
Fig. 1.2 : Collision entre un photon et un atome.....	3
Fig. 1.3 : Structure basique d'une cellule solaire.....	4
Fig. 1.4 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	5
Fig. 1.5 : La caractéristique I(V) d'une diode.....	5
Fig. 1.6 : Modèle d'une cellule photovoltaïque.....	7
Fig. 1.7 : Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique I-V pour une cellule.....	10
Fig. 1.8 : Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique P-V pour une cellule.....	10
Fig. 1.9 : Effet de la température sur la caractéristique I-V pour une cellule.....	11
Fig. 1.10 : Effet de la température sur la caractéristique P-V pour une cellule.....	11
Fig. 1.11 : Mise en série des cellules solaires en module PV.....	12
Fig. 1.12 : Caractéristique I-V lors d'une association en série des cellules PV.....	13
Fig. 1.13 : Caractéristique P-V lors d'une association en série des cellules PV.....	13
Fig. 1.14 : Caractéristique I-V lors d'une association en parallèle des cellules PV.....	14
Fig. 1.15 : Caractéristique P-V lors d'une association en parallèle des cellules PV.....	14
Fig. 1.16 : Association en série- parallèle PV.....	14
Fig. 1.17 : Module PV avec deux diodes de by-pass qui se chevauchent (overlapped).....	15
Fig. 1.18 : Protection avec une diode anti-retour.....	16

## Chapitre 2 : Etude des défauts du système photovoltaïque

Fig. 2.1 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant.....	21
---	----

## Chapitre 3 : Résultats et interprétations

Fig.3.1 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule ombrée (de 25% à 75%).....	29
Fig.3.2 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule ombrée (de 25% à 75%).....	29
Fig.3.3 : Caractéristique I-V avec différents résistance série $R_s$ .....	30
Fig.3.4 : Caractéristique P-V différents résistance série $R_s$ .....	30
Fig.3.5 : Caractéristique I-V différents résistance parallèle $R_p$ .....	31
Fig.3.6 : Caractéristique P-V différents résistance parallèle $R_p$ .....	31
Fig.3.7 : Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de by-pass défaillante.....	32



Fig.3.8 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule lors de défaut diode by-pass .....	32
Fig.3.9 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule lors de défaut diode by-pass.....	32
Fig.3.10 : Schéma bloc d'un module PV défaillant .....	33
Fig.3.11 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule avec la présence des défauts au niveau d'un module .....	34
Fig.3.12 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule avec la présence des défauts au niveau d'un module .....	34
Fig.3.13 : Schéma bloc d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle .....	35
Fig.3.14 : Caractéristique I-V lorsqu'il ya une mauvaise connexion entre 2 module.....	35
Fig.3.15 : Caractéristique P-V lorsqu'il ya une mauvaise connexion entre 2 module.....	36
Fig.3.16 : Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défaillante.....	36
Fig.3.17 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule avec diode anti-retour et présence de défaut.....	37
Fig.3.18 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule avec diode anti-retour et présence de défaut.....	37

## **Liste des Tableaux**

Tab.2.1. Différents défauts du GPV.....	18
Tab.2.2. Classification des défauts et les anomalies d'un GPV.....	19
Tab.2.3. Comparaison des différentes méthodes de DLD.....	22
Tab.3.1. Configuration pour la modalisation .....	28

# Listes des Acronymes et Symboles

## • Acronymes et Symboles

PV	Photovoltaïque
GPV	générateur photovoltaïque
Voc	Tension circuit ouvert (V)
Icc	Courant de court-circuit (A)
Iph	Photo courant (A)
Ipv	Courant de charge (A)
Id	Courant traversant la diode (A)
Ish	Courant traversant la résistance parallèle (A) $\Omega$
Ns	Nombre de cellules série
Np	Nombre de cellules parallèle
Isa	Courant de saturation de la diode (A)
n	Coefficient d'idéalité de la diode
q	Charge élémentaire
Rs	Résistances série ( $\Omega$ )
Rsh	Résistances shunt (parallèle) ( $\Omega$ )
T	Température de la cellule (C°)
K	Constant de boltzmann
Im	Courant de point de puissance maximale (A)
Vm	Tension de point maximale
Pm	Puissance maximale (W)
FF	Facteur forme
A	Facteur de qualité
$\eta$	Rendement énergétique
S	Surface (m <sup>2</sup> )
E	Flux incident
V	Tension (V)
I	Courant (A)
$h$	la constante de planck
C	la vitesse de la lumière
$\lambda$	longueur d'onde de la lumière
$\emptyset$	Flux lumineux
Vcos	la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série (V)
Iccs	courant de court-circuit de Ns cellules en série (A)
Iccp	la somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle (A)
Vcop	la tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle (V)

G	Ensoleillement (Eclairement) (W/m <sup>2</sup> )
Détec	Détection
T	Température (C°)
Loca	Localisation
IAC	Courant côté AC (A)
VAC	Tension côté AC (V)

# Introduction Générale

Le système photovoltaïque est une technologie remarquable qui transforme le rayonnement lumineux en électricité. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel. Cette filière s'est ensuite développée par la nécessité d'approvisionner en électricité solaire [1].

L'énergie solaire photovoltaïque semble être une nécessité pour l'avenir elle est une énergie naturelle inépuisable qui convertit le rayonnement solaire en électricité propre à de grande échelle du fait elle est capable pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant une année elle représente pour l'humain une source énergie qu'il peut l'utilise pour beaucoup de domaine telle que industriel ou commercial. Elle est d'une grande importance de raison pour ses avantages comme l'absence de la pollution et du bruit elle silencieuse et facile pour l'installe et ne prend pas du temps pour la construire [2].

Le marché photovoltaïque a connu une augmentation très importante notamment ces dernier années grâce à divers facteurs de stimulation tels que la réduction des coûts de production et des politiques d'accompagnement, ces facteurs de stimulation ont rendu le retour sur investissement des installations photovoltaïque plus intéressant.

Cependant, les installations photovoltaïque peuvent mal fonctionner et se dégrader pendant le fonctionnement. Cela nécessite un diagnostic, et son objectif principal est de fournir un outil capable de détecter les défauts afin de maximiser la production d'énergie du système photovoltaïque.

Pour arriver aux objectifs de l'étude, nous avons structuré le mémoire (selon le plan suivant) en trois chapitres ;

**Chapitre 1:** concerne la partie théorique et le principe de fonctionnement d'une cellule, d'un module et d'un générateur photovoltaïque.

**Chapitre 2:** cette partie s'intéresse à la modélisation et classifications des défauts qui peuvent se présenter au niveau d'un générateur photovoltaïque et les méthodes différentes de diagnostic les plus courantes.

**Chapitre 3:** dans cette partie on s'intéresse à la simulation du comportement d'un GPV en fonctionnement sain (sans défauts) et en présence de défauts on interprète les résultats obtenue pour chaque défaut.

A la fin, nous terminons par une brève conclusion générale de notre travail et quelques perspectives.

# Chapitre 1:

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### 1.1. Introduction :

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 le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) 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 pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [3].

### 1.2. Energie solaire :

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ) [4]. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à  $1360\text{W/m}^2$ . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à  $1000\text{W/m}^2$  à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$G = \frac{hc}{\lambda} = hv \quad (1.1)$$

$h$  : la constante de Planck ( $6.626 \cdot 10^{-34}$ ).

$C$  : la vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8$ ).

$\lambda$  : longueur d'onde de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [5].

### 1.3. Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150.10^6\text{ Km}$ , la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180.10^6\text{ GW}$ , c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de

0.22 à 10  $\mu\text{m}$  [6], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4\mu\text{m}$ ).
- 47 % dans la bande visibles ( $0.4$  à  $0.8\mu\text{m}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $> 0.8\mu\text{m}$ ).

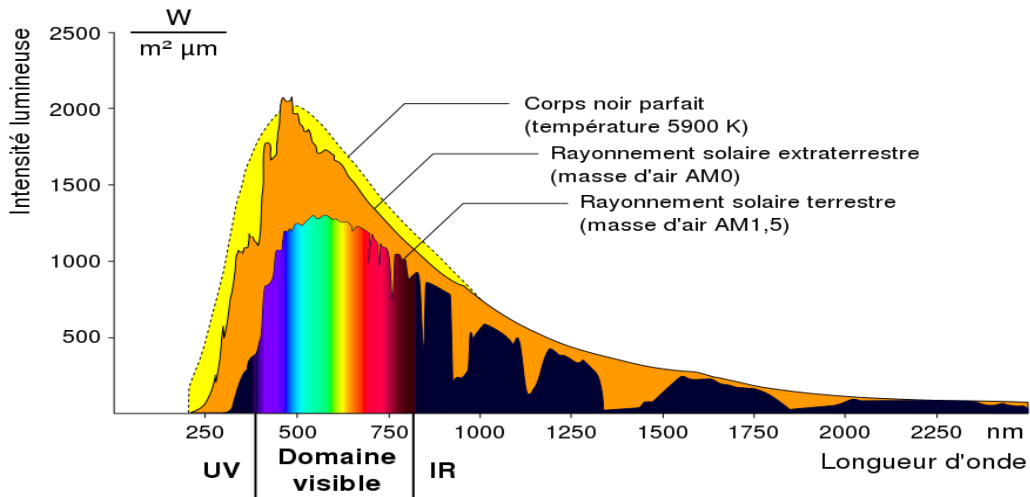


Figure 1.1 : Réponse spectrale d'une cellule (PV).

### 1.4. Le photovoltaïque :

#### 1.4.1. L'effet photovoltaïque :

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière "attaquent" les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arrachés. Dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue et faible [7].

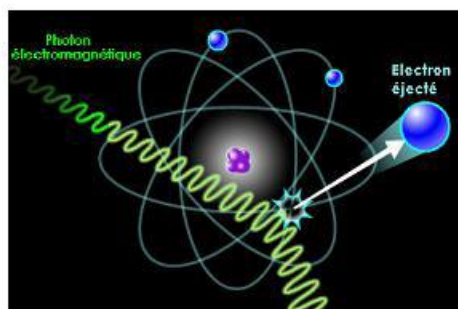


Figure 1.2 : Collision entre un photon et un atome [29].

#### 1.4.2. Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque (PV) fonctionne selon le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » établissant une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée

à la lumière. La tension générée peut alors varier entre 0,3V et 0,7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

Si une cellule (sous éclairement) n'est pas connectée à un circuit extérieur elle présente une tension nommée tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) fortement dépendante de la température. D'autre part, le courant maximal PV est atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit noté  $I_{CC}$  dépendant fortement du niveau d'éclairement noté  $G$  [8].

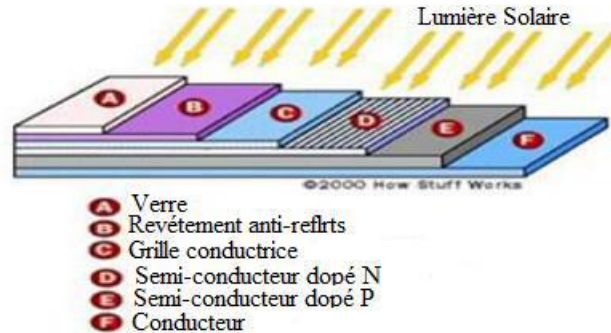


Figure 1.3 : Structure basique d'une cellule solaire [30].

### 1.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

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 des 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 [9].

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 devient chargée négativement. 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 PN est donc 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 cèdent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. 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 et un courant électrique continu circule [9].

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure (1.4) [9]. Les photons incidents créent des porteurs dans les régions N, P et la zone de charge d'espace.

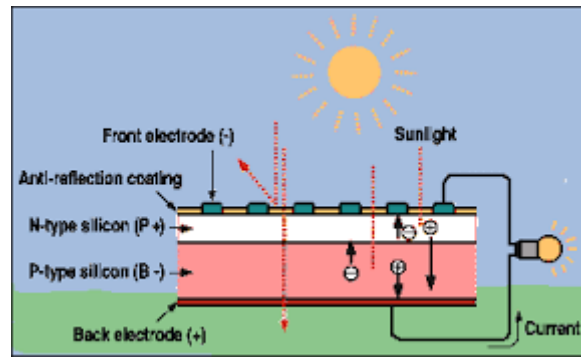


Figure 1.4 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P et N, les photo-porteurs minoritaires diffusent [9].

Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Les porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant  $I_{ph}$  qui contribue au courant inverse de la diode [9].

#### 1.4.4. Caractéristique courant-tension :

Dans l'obscurité, la cellule photovoltaïque se comporte comme une jonction PN (diode). Dans ces conditions, on retrouve pour une cellule la caractéristique courant - tension d'une jonction PN.

Soumis à un rayonnement lumineux, la cellule produit un courant photoélectrique. Ce courant déplace la caractéristique «diode» de la cellule solaire vers le bas, dans la direction négative; l'amplitude du déplacement est égale au courant photoélectrique [10].

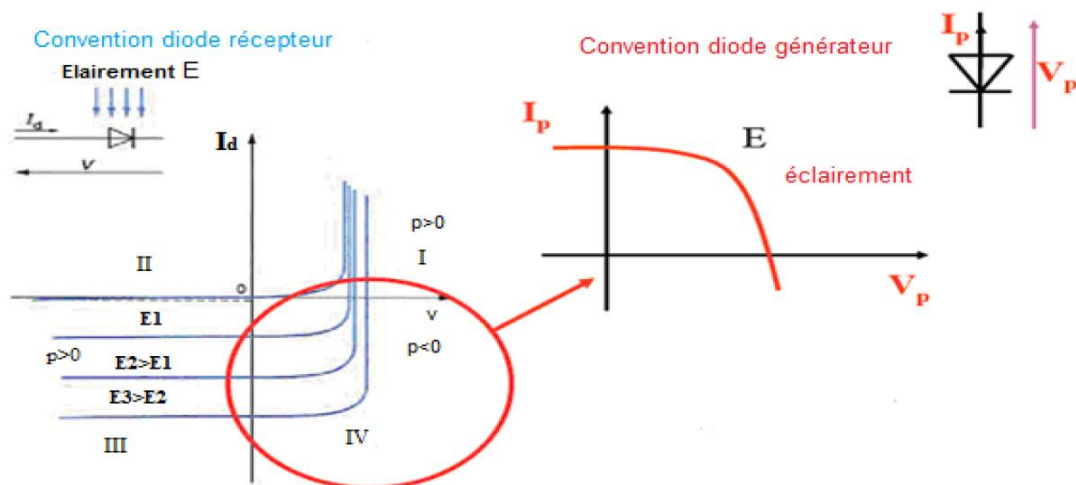


Figure 1.5 : La caractéristique  $I(V)$  d'une diode [31].



Donc, quand la cellule est éclairée, elle produit un courant d'autant plus élevé que l'éclairement est intense. Ce courant est proportionnel à l'éclairement. On retrouve donc la même caractéristique de la diode, mais décalée vers le bas d'un courant  $I_{ph}$  (photo-courant) correspondant à l'intensité de l'éclairement.

### **1.4.5. Les technologies des cellules photovoltaïques :**

#### **1.4.5.1. Les cellules à base de silicium monocristallin :**

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres. C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12 % et 16 %. L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et énergivore. Il est utilisé en extérieur pour les fortes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications...) [11].

#### **1.4.5.2. Les cellules à base de silicium poly cristallin :**

Les cellules de silicium poly cristallin sont découpées dans des barres de silicium reconstitué. Les atomes ne sont pas tous cristallisés. Le rendement est moins bon, entre 11 % et 14 %. L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix, puisque leur fabrication, produisant peu de déchets, nécessite de 2 à 3 fois moins d'énergie et est plus rapide. Elles ont les mêmes applications que les cellules en silicium monocristallin [11].

#### **1.4.5.3. Les cellules à base de silicium amorphe :**

Ce silicium est nettement moins puissant que les deux précédents, car les atomes sont disposés de manière désordonnée du fait que les cellules sont fabriquées par projection de silicium sur un autre matériau, comme du verre ou du plastique. Ce silicium en couche très mince répond néanmoins à de nombreux besoins liés à l'éclairage (extérieur ou intérieur). Son rendement est de 5 % à 7 %. Il est utilisé pour l'électronique, dans les calculettes par exemple [11].

#### **1.4.5.4. Les cellules à base organiques et plastiques :**

Ils sont composés d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0.95% de rendement de conversion, ces cellules comprennent deux voies des cellules « humide » et la voie des cellules polymère organique dite aussi cellules « plastiques ». Le progrès de ces technologies sont très rapide, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples [12].

### **1.5. Modélisation d'un générateur photovoltaïque :**

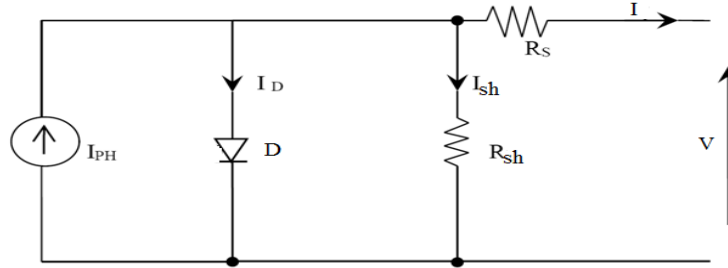
#### **1.5.1. Modèles d'une cellule solaire :**

Le modèle électrique d'une cellule solaire consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série  $R_s$ , la première diode  $D_1$  décrit les

propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde D2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge [13].

**1.5.2. Modèle à une diode (à une seule exponentielle) :**

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant [13]:



**Figure 1.6 : Modèle d'une cellule photovoltaïque [31].**

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt) [13].

Le courant délivré sur une charge par une cellule solaire éclairée s'écrit [14] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{1.2}$$

$I_{PV}$  : Courant de la charge

$I_{ph}$  : Courant photo généré.

$I_D$  : Le courant traversant la diode.

$I_{sh}$  : Le courant traversant la résistance parallèle.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sa} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \tag{1.3}$$

$I_{sa}$  : Courant de saturation de la diode.

$n$  : Coefficient d'idéalité de la diode.

$q$ : Charge élémentaire.

$R_S$ : Résistances série.

$R_{sh}$  : Résistances shunt (parallèle).

$$I_{sh} = \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \tag{1.4}$$

$$I_D = I_{sa} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{nKT} \right) - 1 \right] \tag{1.5}$$

$I_{sa}$ : Courant de saturation de la diode.

$n$  = Coefficient d'idéalité de la diode.

$q$  : Charge élémentaire.

$K$  : Constante de Boltzmann.

$T$  : La température de la cellule.

Pour simplifier ce modèle, on peut poser que [15] :

$$V_{th} = \frac{q}{nKT} \quad (1.6)$$

$V_{th}$ : La tension thermique.

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{sa} \left[ \exp\left(\frac{(V_{PV} + R_S I_{PV})}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

En pratique la résistance shunt (parallèle) est très grande, à partir de ça le terme [15].

$$\frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \rightarrow 0 \quad (1.8)$$

Aussi  $I_{ph}$  le courant photo générer représente le courant de court circuit  $I_{cc}$  du module photovoltaïque. La tension thermique  $V_{th}$  et le courant de saturation  $I_{sa}$  s'identifient par [15]:

$$V_{th} = \frac{V_m + R_S I_m - V_{co}}{\log\left(I - \frac{I_m}{I_{cc}}\right)} \quad (1.9)$$

$$I_{sa} = (I_{cc} - I_m) \exp\left[-\frac{(V_m + R_S I_m)}{V_{th}}\right] \quad (1.10)$$

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

$V_{co}$ : Tension de circuit ouvert.

$I_m$ : Courant de point de Puissance maximale.

$V_m$  : Tension de point de Puissance maximale.

### 1.5.3. Point de puissance maximale $P_m$ :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale, correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{max}$  multipliée par le courant de court-circuit [16].

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (1.11)$$

Le produit  $(V_{max} \times I_{max})$  donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit  $(V_{co}, I_{sc})$  [16].

**1.5.4. Le facteur de qualité :**

A est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace (compris entre 1 et 2) [16].

**1.5.5. Facteur de forme FF :**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) [16] :

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} I_{sc}} \quad (1.12)$$

**1.5.6. Rendement énergétique  $\eta$  :**

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente [16] :

$$\eta = V \frac{V_m \times I_m}{P_{incident}} = \frac{P_{max}}{E.S} \quad (1.13)$$

Où

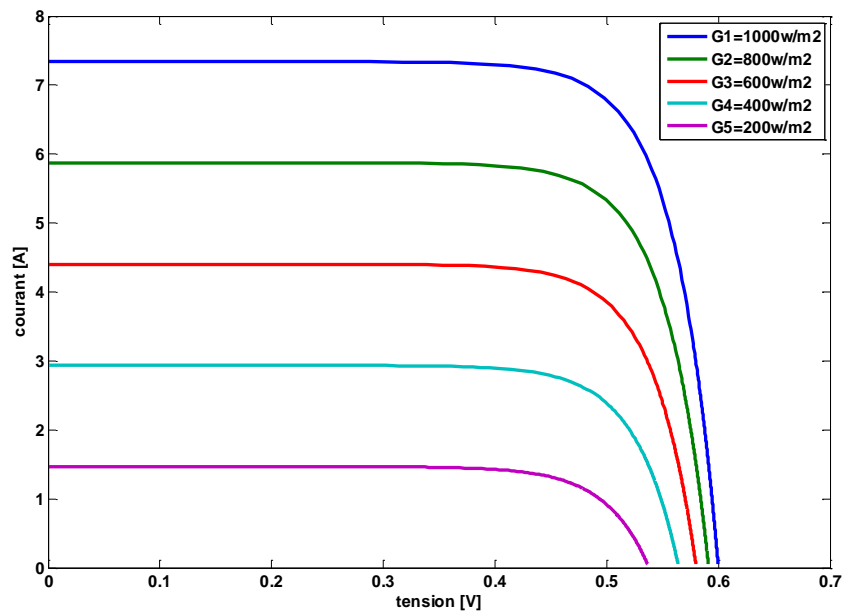
S : Surface de cellule solaire.

E : Flux incident.

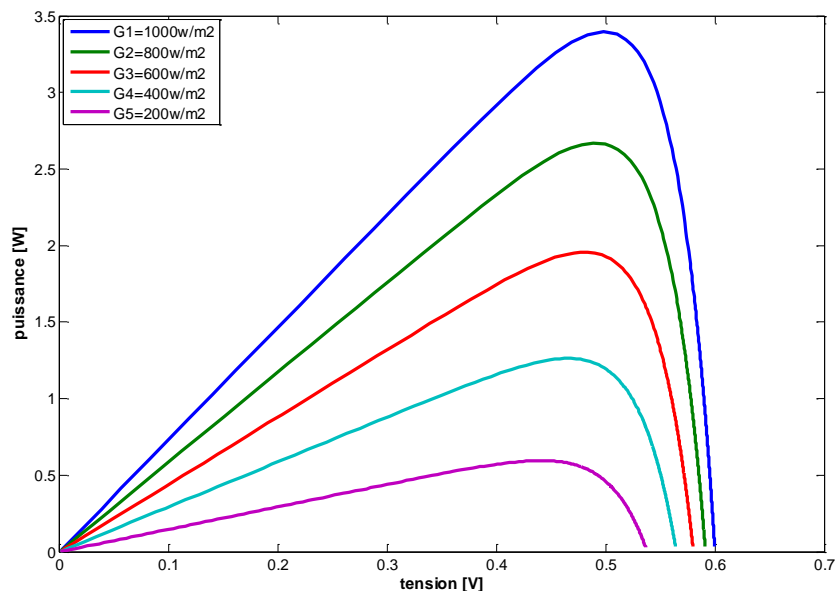
**1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :****1.6.1. Influence d'éclairement et de la température :****1.6.1.1. Influence d'éclairement :**

De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue. Pour une installation photovoltaïque, la variation de 50 % de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur PV de l'ordre de 50 %; en plus le générateur PV ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

Pour différents niveaux d'éclairement figure (1.7) et (1.8), on remarque que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque l'irradiation baisse [17].



**Figure 1.7 : Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique I-V pour une cellule.**



**Figure 1.8 : Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique P-V pour une cellule.**

Nous avons vu que le courant produit par la photopile ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel au flux lumineux ( $\phi$ ). Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour  $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ;
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension L'augmentation du flux lumineux se traduit en somme par le déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants.

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert, étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [17].

### 1.6.1.2. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ  $0,025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$  alors que la tension décroît de  $2,2 \text{ mV}/\text{°C}/\text{cellule}$ . Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ  $0,4\%/\text{°C}$ . Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque [17].

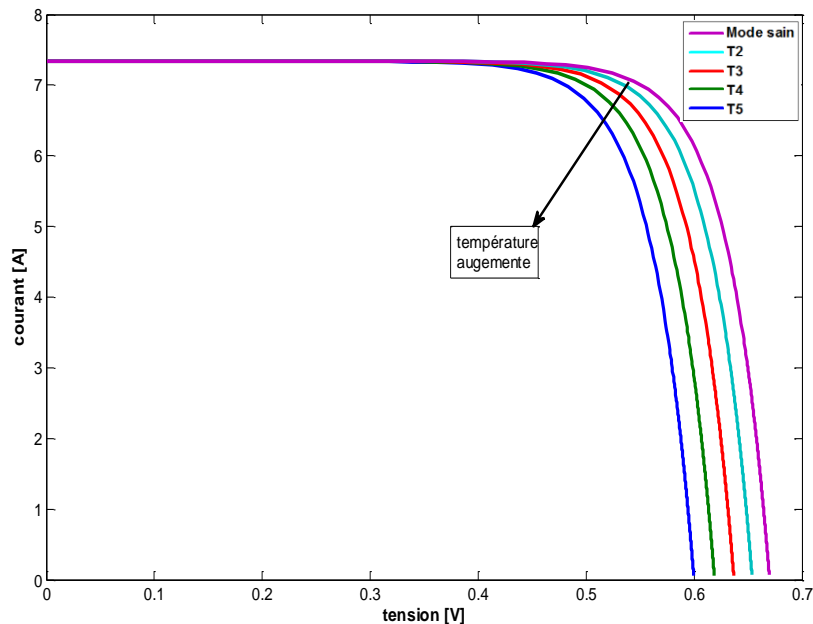


Figure 1.9 : Effet de la température sur la caractéristique I-V pour une cellule.

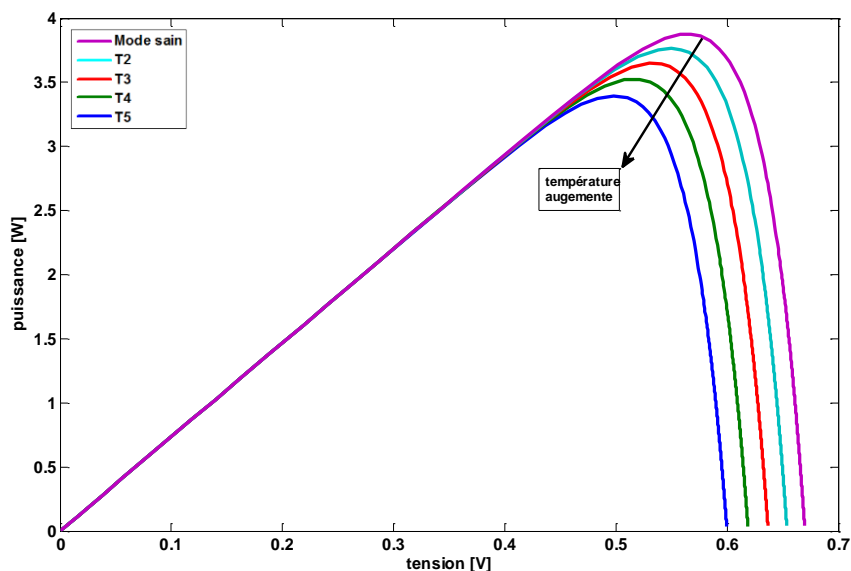


Figure 1.10 : Effet de la température sur la caractéristique P-V pour une cellule.

On remarque l'importance des variations de la tension et le courant gagne un petit peu d'intensité lorsque la température augmente; ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière, le gap baissant lorsque la température augmente. L'accroissement du courant peut être négligé au point de puissance maximale et le comportement global de la cellule [17].

### 1.7. Association des cellules (module de photovoltaïques) :

#### 1.7.1. Module de photovoltaïques :

Généralement les cellules solaires dans les modules commercialisés sont connectées en série a fin de d'augmenter la puissance .Mais le courant reste le même et la tension elle est multipliée par le nombre de cellules met en série. Les modules classiques photovoltaïques contiennent 36 ou bien 72 cellules comme le montre la figure (1.11). [18].

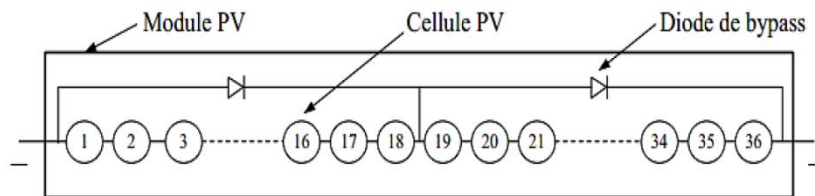


Figure 1.11 : Mise en série des cellules solaires en module PV [28].

#### 1.7.1.1. String PV :

Un string est connu sous le nom d'une chaîne PV, il est composé de (module, câble, connecteur) ces modules sont connectés en série en raison de générer la tension de sortie [19].

#### 1.7.1.2. Champ PV :

C'est un regroupement des modules en série et en parallèle pour le but de obtenir une puissance de quelques centaines de kilowatts, il existe plusieurs architectures d'interconnecter les modules: connexion série parallèle simple, connexion Total Cross Tied, connexion Bridge Linked [19].

### 1.7.2. Association série :

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure (1.12 et 1.13). L'équation (1.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules [20].

$$V_{cos} = N_s * V_{co} \quad \text{avec} \quad I_{ccs} = I_{cc} \quad (1.14)$$

- **V<sub>cos</sub>**: la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.
- **I<sub>ccs</sub>**: courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

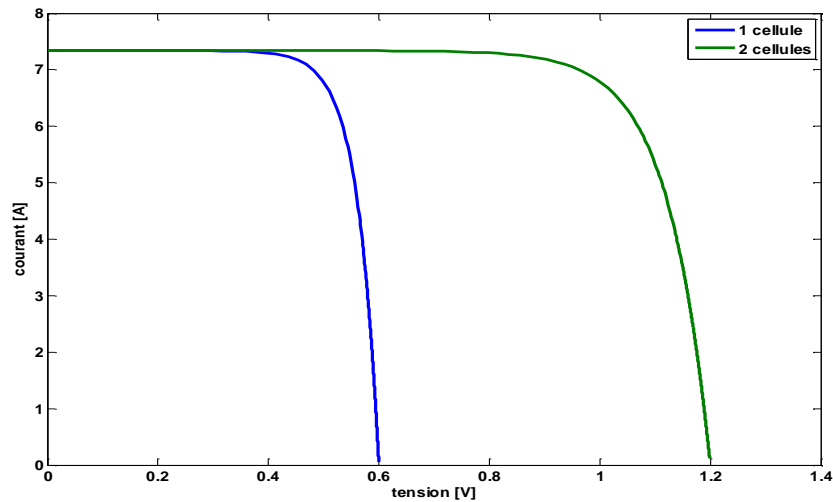


Figure 1.12 : Caractéristique I-V lors d'une association en série des cellules PV.

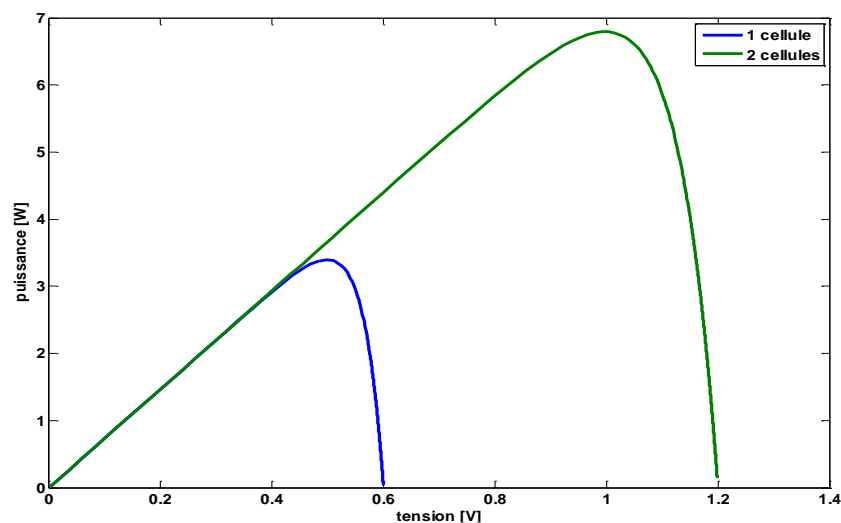


Figure 1.13 : Caractéristique P-V lors d'une association en série des cellules PV.

### 1.7.3. Association en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de ( $N_p$ ) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, figure (1.14 et 1.15). L'équation (1.14) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules [20].

$$I_{ccp} = N_p * I_{cc} \quad \text{avec} \quad V_{co} = V_{cop} \quad (1.15)$$

- **I<sub>ccp</sub>**: la somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.
- **V<sub>cop</sub>**: la tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.



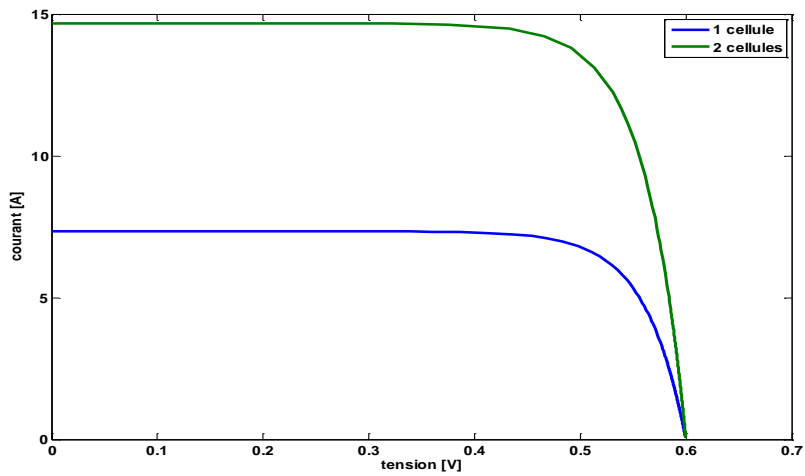


Figure 1.14 : Caractéristique I-V lors d'une association en parallèle des cellules PV.

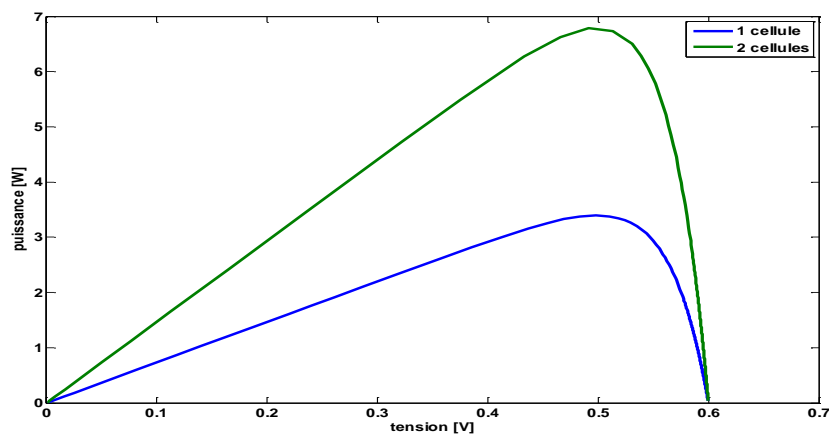


Figure 1.15 : Caractéristique P-V lors d'une association en parallèle des cellules PV.

#### 1.7.4. Association en série- parallèle :

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Et une association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau [21].

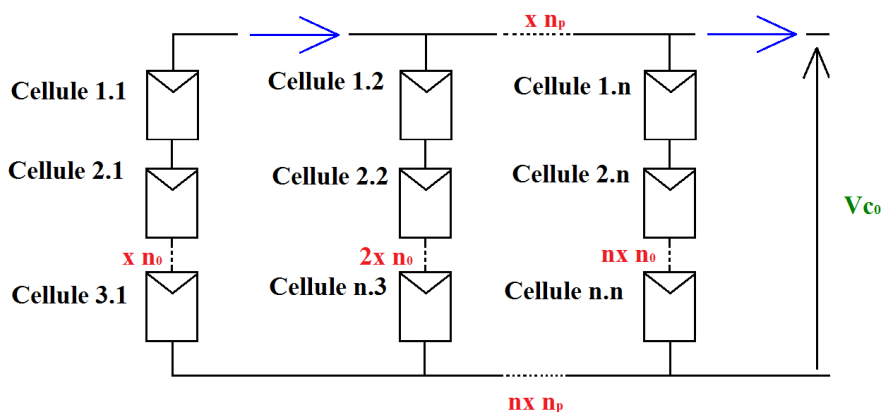


Figure 1.16 : Association en série- parallèle PV.

### 1.8. Système de protection :

Comme tous système électrique il comporte une protection, l'installation photovoltaïque contient aussi une protection afin d'augmenter sa fiabilité et sa continuité de service et sa durée de vie pour éviter toutes les pannes au cours du fonctionnement. Il existe deux types de protection utilisés dans un système PV.

#### 1.8.1. Diode de by-pass :

La diode de by-pass ou bien diode de dérivation est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour les protéger contre leur fonctionnement dans le régime inverse en particulier les cellules les plus faibles. Généralement pour chaque diode by-pass 18 cellules. Mais pour une meilleure protection il vaut mieux connecter chaque cellule avec une diode individuellement. Il existe d'autres architectures mais ils ne sont pas largement appliqués à cause de la difficulté de fabrication [22].

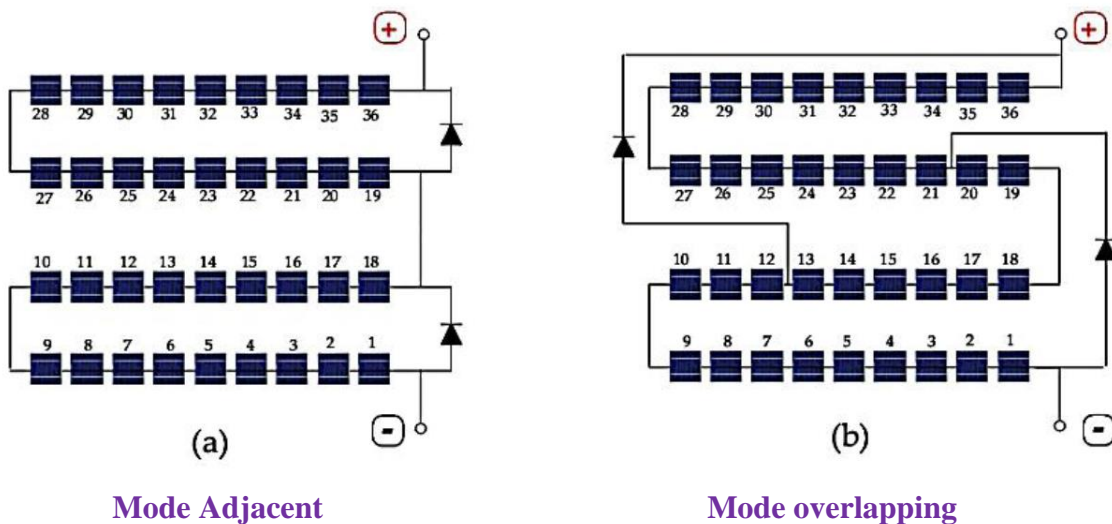


Figure 1. 17 : Module PV avec deux diodes de by-pass qui se chevauchent (overlapped) [32].

#### 1.8.2. Diode anti-retour :

La diode anti-retour empêchant un courant négatif (courants inverses) de circuler dans un générateur photovoltaïque ce courant est causé lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle qui forment un champ qui conduit à une baisse de production, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur.

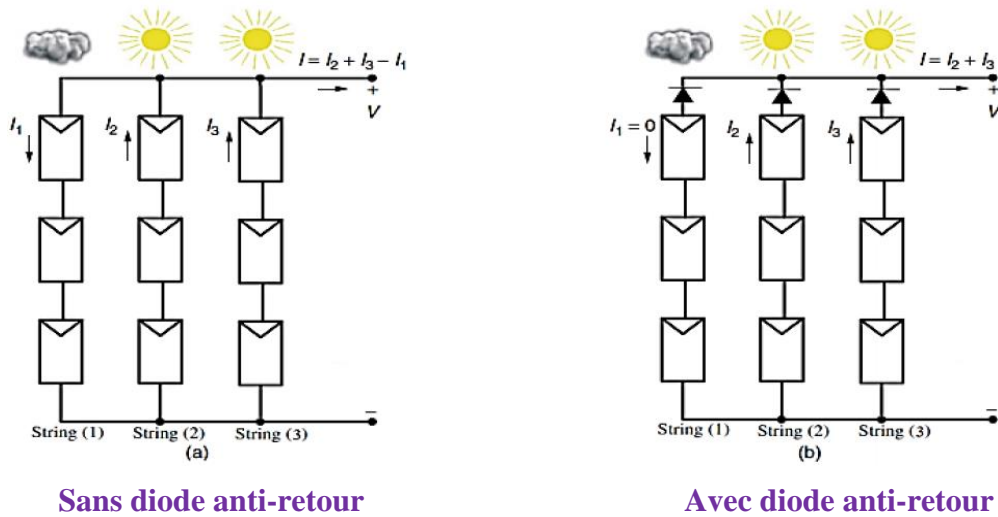


Figure 1. 18 : Protection avec une diode anti-retour [32].

1.9. Conclusion :

Ce chapitre s'est consacré à la description des différents composants du générateur photovoltaïque. Ses caractéristiques sont en forme d'équations qui nous aident à obtenir les courbes de I-V et P-V. À la fin, il présente les composants utilisés pour sa protection.

# Etude des défauts du système photovoltaïque

### 2.1. Introduction :

Dans cette partie, pendant le fonctionnement d'un système photovoltaïque, un défaut peut survenir. Nous allons présenter les principaux défauts du système photovoltaïque et nous présenterons le modèle mathématique qui décrit le comportement d'un générateur PV en fonctionnement sain et en présence d'un défaut ainsi que les différentes méthodes utilisées dans le diagnostic pour la détection et/ou localisation des défauts au niveau d'un générateur PV.

### 2.2. Défauts de fonctionnement d'un générateur PV :

Quelques définitions des notions pour mieux comprendre :

- **Défaut :**

On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.

- **Symptôme :**

C'est le changement de la quantité observée du comportement normal.

- **Détection :**

Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.

- **Localisation :**

Elle consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

Le tableau (2.1) présente les principaux défauts et anomalies classés suivant l'emplacement de leur apparition au niveau d'un générateur PV [23].

<b>Composant</b>	<b>Défaut et anomalie</b>
<b>Générateur PV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuilles d'arbre, sable, pollution, déjections, neige etc.</li> <li>• Echauffement des cellules, détérioration des cellules, fissure.</li> <li>• Dégradation des interconnexions, Pénétration de l'humidité.</li> <li>• Corrosion des liaisons entre les cellules.</li> <li>• Modules de performances différentes.</li> <li>• Module arraché ou cassé.</li> <li>• Modules court-circuités, modules inversés.</li> </ul>
<b>Boite de jonction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture du circuit électrique.</li> <li>• Court-circuit du circuit électrique.</li> <li>• Destruction de la liaison.</li> <li>• Corrosion des connexions.</li> </ul>
<b>Câblage et connecteur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuit ouvert.</li> <li>• Court-circuit.</li> <li>• Mauvais câblage (module inversé).</li> <li>• Corrosion des contacts.</li> <li>• Rupture du circuit électrique.</li> </ul>
<b>Protection (diode by-pass et diode anti-retour)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruction des diodes.</li> <li>• Absence ou non fonctionnement de diodes.</li> <li>• Inversion de la polarité des diodes au montage.</li> </ul>

**Tableau 2.1 : Différents défauts du GPV [33].**

### **2.3. Classification des défauts de générateur PV :**

Plusieurs classifications de défauts sont citées dans la littérature. Dans notre travail, nous choisissons de classer les défauts selon le niveau d'occurrence et le stade auquel ils surviennent, et s'ils peuvent modifier le comportement des composants (unités, groupes d'unités, modules, chaînes, champs) à ce stade. Le tableau (2.2) décrit cette classification [23].

<b>Composant du champ</b>	<b>Cellule</b>	<b>Groupes de cellules</b>	<b>Module</b>	<b>String</b>
<b>Nature des défauts</b>	-Module arraché ou cassé -Pylônes, cheminée, sable, neige etc. -Echauffement des cellules -Dégradation des interconnexions -Fissure -Corrosion des liaisons entre cellules, -Modules de performances différentes, -Détérioration des cellules, -Pénétration de l'humidité	-Destruction des diodes -Absence de diodes, -Inversion de la polarité des diodes -Diode mal connectée -Diode court-circuitée	-Modules court-circuités, -Modules shuntés - Inversion de polarité du module	-Rupture du circuit électrique -Destruction de la liaison -Corrosion des connexions -Corrosion des contacts
<b>Dénomination des défauts</b>	-Défaut de mismatch et d'ombrage	-Défaut de diode by-pass	-Défaut de module	-Défaut de connexion

**Tableau 2.2 : Classification des défauts et les anomalies d'un GPV [33].**

#### **2.4. Méthodes de diagnostic :**

Plusieurs méthodes de diagnostic ont été rapportées dans la littérature et industrialisées à savoir [23]:

➤ **Méthodes de diagnostic courantes industrialisées :**

- Méthodes non-électriques.
- Méthodes électriques.

➤ **Méthodes dans la littérature :**

- Méthode de réflectométrie.
- Analyse du point de fonctionnement.
- Analyse de la caractéristique statistique.
- Synthèse.

### 2.4.1. Méthodes de diagnostic courantes industrialisées :

On peut distinguer deux types de méthodes de diagnostic de courantes industrialisées : les méthodes basées sur l'analyse de courant et de tension (nous les appelons méthodes électriques) et les méthodes basées sur l'analyse de grandeurs autres que I et V (nous les appelons méthodes non électriques).

#### 2.4.1.1. Méthodes non-électriques :

Il existe plusieurs méthodes non électriques (destructives ou non destructives) pour diagnostiquer les défauts au niveau des cellules PV. Le principal défaut pouvant survenir à ce niveau est la fissuration de la cellule. On peut citer les méthodes suivantes : test de flexion mécanique, imagerie de photoluminescence et électroluminescence, test thermographie [24,25].

#### 2.4.1.2. Méthodes électriques :

À l'heure actuelle, le système de surveillance du système photovoltaïque est principalement intégré dans l'onduleur. Dans ce cas, les données mesurées d'un système à un autre système sont généralement les mêmes. Les grandeurs mesurées les plus courantes sont :

- Le courant débité par le champ PV.
- La tension aux bornes du champ PV.
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du champ PV.

La température ambiante du site et l'ensoleillement supplémentaire peuvent également être ajoutés à la mesure électrique. Ces données nécessitent des capteurs spécifiques (sonde de température et cellule de référence). Si ces quantités sont nécessaires, elles doivent être traitées à l'aide d'un automate spécifique. Cet automate se connecte à l'onduleur et centralise toutes les données afin de les enregistrer et/ou de les envoyer à un serveur distant [24].

### 2.4.2. Méthodes dans la littérature :

Diverses méthodes de diagnostic ont été proposées pour identifier les défauts dans les systèmes photovoltaïques.

#### 2.4.2.1. Méthode de réflectométrie :

La méthode de réflectométrie est une méthode électrique permettant de mesurer les propriétés électriques des lignes électriques et d'identifier les points de défaillance. La réflectométrie est souvent utilisée pour déterminer l'état électrique des câbles et des lignes. Fournit des informations sur la détection, l'emplacement et la localisation et la caractérisation de défauts [23 26].

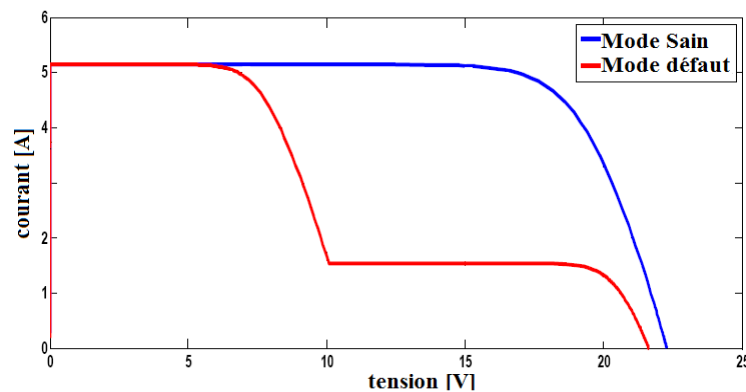
### 2.4.2.2. Analyse du point de fonctionnement :

La comparaison de la puissance maximale mesurée par cette simulation peut fournir des informations supplémentaires sur le fonctionnement du générateur PV. Une considération majeure est d'identifier le type de défaut présent sur une installation PV et plus spécifiquement sur le générateur PV [27]. Ces défauts sont regroupés en 4 familles :

- Modules défaillant dans un string.
- Fausse alarme.
- String défectueux.
- Ombrage, vieillissement, erreur MPPT.

### 2.4.2.3. Analyse de la caractéristique statistique :

Nous avons vu auparavant qu'un champ photovoltaïque peut être exposé par sa caractéristique statique courant/tension (I-V). Le changement d'une caractéristique peut espérer quand qu'il y a une modification de l'état du champ PV provoqué par une modification de la condition de fonctionnement (ensoleillement et température) ou par une arrivée d'un ou des défauts comme dans le champ. La figure (2.1) montre l'allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant (ombrage sur des cellules) comparée avec celle en fonctionnement normal.



**Figure 2.1 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant [33].**

Les défauts d'un générateur photovoltaïque peuvent être détectés et déterminés à l'aide des informations que nous déterminent de la courbe caractéristique I-V (en défaut). Ces analyses ont été retrouvées dans plusieurs études bibliographiques :

- La détection de défaut d'ombrage dans un champ ou bien dans un string ce détermine à partir de la dérive du courant/tension ( $dI/dV$ ) en suivant tout le long de la caractéristique.



- Exploration des paramètres (résistance série, température de fonctionnement au STC – conditions de test standard, point de puissance maximale au STC) permet de détecter le défaut dans un module ou dans un string (augmentation de la résistance série entre cellules ou entre modules, vieillissement).

**2.4.2.4. Synthèse :**

Le tableau (2.3) résume les différentes méthodes de diagnostic d'un champ photovoltaïque (industriels et autres) et leurs performances.

<b>Méthodes</b>	<b>Défauts</b>	<b>Mesures</b>	<b>Capacité de DLD</b>	<b>Online/ offline</b>	<b>Finesse de diagnostic</b>
<b>Méthodes non-électriques</b>	-Fissure de la cellule	-Image	-Loca.	-Offline	-Cellule
<b>Imagerie infra rouge</b>	-Courant de fuite - Augmentation de la résistance de la connectique - Echauffement anormal des cellules, des modules - Dysfonctionnement de la diode (bypass et anti-retour)	-Image	-Loca.	-Online + intervenant	-Cellule -Module -String -Champ
<b>Méthode de réflectométrie</b>	- Circuit ouvert - Court-circuit - Augmentation de l'impédance de la connectique	-Signal réfléchi	-Loca.	-Offline	-String
<b>Analyse de la puissance et de l'énergie</b>	- Familles de défauts non discriminables	IAC, VAC, G, T	-Détec. -Loca.	-Online	-Champ
<b>Analyse du point de fonctionnement</b>	- Modules défectueux - Strings défectueux - Défauts non discriminables entre (ombrage, vieillissement, erreur de MPPT) - Fausses alarmes	IAC, VAC, G, T	-Détec. -Loca.	-Online	-Champ

**Tableau 2.3 : Comparaison des différentes méthodes de DLD.**

Certaines méthodes non électriques permettent de déterminer avec précision les défauts cellulaires. D'autre part, il est important de savoir que ces méthodes sont typiquement utilisées en phase de développement cellulaire ou dans un ou plusieurs tests d'efficacité pour mieux identifier les unités de travail défectueuses.

### **2.5. Modèle universel du GPV en présence de défauts :**

Pour simuler chaque défaut au niveau d'un GPV, nous avons développé un modèle général basé sur un modèle exponentiel unique avec des paramètres ou des coefficients spécifiques qui caractérisent le défaut. Ce modèle est exprimé par la relation:

$$I = \alpha_{sh} \alpha_{Tr} I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + I(R_s - R_{sm})}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I(R_s + R_{sm})}{(R_{sh} - R_{shm})} \quad (2.1)$$

$R_{sm}$  et  $R_{shm}$  : sont deux résistances qui peuvent s'ajouter aux résistances série et résistance parallèle lors de la présence du défaut de mismatch.

$\alpha_{Tr}$ : est un paramètre adimensionnel indiquant la présence de salissure et poussière sur le plan du générateur photovoltaïque.

$\alpha_{sh}$ : est un paramètre adimensionnel indiquant la présence d'ombrage.

#### **2.5.1. Sous-modèle de défaut d'ombrage partiel :**

Dans ce cas, l'équation (2.1) on ajoute le paramètre  $\alpha_{sh}$  qui nous indique le pourcentage ou le degré d'ombrage ( $\alpha_{sh} = 0$ , ombrage totales,  $\alpha_{sh} = 1$ , pas d'ombrage) et n'affecte que la sortie de l'image. Les autres paramètres n'ont aucun effet ( $\alpha_{Tr} = 1$ ,  $R_{sm} = 0$ ,  $R_{shm} = 0$ ). Ce sous-type est fourni par la relation suivante :

$$I = \alpha_{sh} I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

#### **2.5.2. Sous-modèle de défaut de salissure et poussière :**

L'effet de la saleté et de la poussière est définie par la couche barrière GPV et dépend de l'épaisseur de cette couche barrière, et le coefficient de transfert  $\alpha_{Tr}$  varie de 0 (couche la plus épaisse) à 0,9 (couche la plus légère). Les autres paramètres n'ont aucun effet ( $\alpha_{sh} = 1$ ,  $R_{sm} = 0$ ,  $R_{shm} = 0$ ). Le modèle suivant est exprimé par la relation suivante :

$$I = \alpha_{Tr} I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

#### **2.5.3. Sous-modèle de défaut de Mismatch :**

Un défaut de mismatch est un défaut dû à l'accumulation de cellules présentant les caractéristiques I-V non identique. Chaque fois que nous modifions l'un des paramètres de

l'équation 2.1, une propriété différente de leur caractéristique est créée. Considérons les défaillances (mismatch de résistance en série, mismatch de résistance parallèle, mismatch de température).

### 2.5.3.1. Défaut de résistance série :

Ce sous-modèle étudie le comportement spécifique de I–V en augmentant le paramètre de résistance série. Cette augmentation de résistance peut être convertie en une résistance  $R_{sm}$ . Les autres paramètres ne pas d'effet ( $\alpha_{sh} = 1$ ,  $\alpha_{Tr} = 1$ ,  $R_{shm} = 0$ ). Cela peut oxyder les contacts ou les connexions métalliques. Le modèle suivant peut être représenté par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+I(R_s-R_{sm})}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+I(R_s+R_{sm})}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

### 2.5.3.1. Défaut de résistance parallèle :

Dans ce cas, la résistance parallèle peut être réduite, rendant le générateur PV moins efficace cette diminution peut se traduire par la résistance  $R_{shm}$  les autres paramètres sont considérés comme sans effet ( $\alpha_{sh} = 1$ ,  $\alpha_{Tr} = 1$ ,  $R_{sm} = 0$ ).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{(R_{sh}-R_{shm})} \quad (2.5)$$

### 2.5.4. Défaut de diodes de by-pass :

En bonne état, la diode by-pass est conductrice si la somme des tensions dans les cellules protégées par la diode by-pass est négative ou sinon bloquée. A l'état infructueux, ce rôle protecteur n'est plus garanti. Selon le tableau (2.2), les défaillances électriques associées à cette diode sont des courts-circuits de diode, des coupures de diode et des diodes inversées. En plus de ces pannes électriques, cette diode peut casser pendant le trajet et agir comme une impédance de valeur quelconque.

#### 2.5.4. 1. Cas de court-circuit :

La tension du groupe des cellules est annulée. Le courant du groupe des cellules est égal à la somme du courant qui traverse les cellules et aussi du courant circulant dans le court-circuit. Le courant qui traverse les cellules est de même valeur de courant maximum donné par les cellules et le chemin de court-circuit transporte un excès de courant [28].

$$V_{groupe} = 0$$

$$I_{groupe} = I_{by-pass} + I_{cellule}$$

### 2.5.4.2. Cas d'impédance Z quelconque :

La tension du groupe est la somme de la tension de toutes les cellules dans le groupe. Le courant du groupe est égal à la somme du courant circulant dans le string de cellules et de celui circulant dans l'impédance [28].

$$V_{groupeJ} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i}$$

$$I_{groupe} = I_{cellule} + V_{groupeJ} / Z$$

### 2.5.4.3. Cas de circuit ouvert:

La tension de groupe est égale à la somme des tensions de cellules de groupe. Courant du groupe est égal au courant circulant dans la chaîne cellulaire [28].

$$V_{groupeJ} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i}$$

$$I_{groupe} = I_{cellule}$$

### 2.5.4.4. Cas d'inversion de la polarité :

Contrairement à son fonctionnement normal, quand la somme de la tension des cellules est positive la diode qui protège les cellules est conductrice, dans le cas contraire elle est bloquée [28].

$$V_{groupeJ} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \quad \text{Si } \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} < 0$$

$$V_{groupeJ} = 0 \quad \text{Si } \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} > 0$$

$$I_{groupe} = I_{cellule} + I_{by-pass}$$

### 2.5.5. Défaut de diode anti-retour :

Comme pour les diodes de by-pass, il y a quatre défauts possibles, pour les diodes anti-retour : court-circuit, impédance, circuit ouvert et diode inversée. Le champ photovoltaïque avec la diode anti-retour est remplacée, par un élément pouvant représenter à chaque fois un des états défectueux de la diode [28].

#### 2.5.5.1. Cas de court-circuit :

Le courant du string en question pourrait circuler dans les deux sens possibles. La direction de ce courant dépend de la différence entre la tension de champ et la tension que le string peut générer. Dans un sens direct, le string fournit sa puissance produite à la charge. Par contre, dans le sens inverse, au lieu de fournir du courant à la charge, le string absorbe le courant produit par les autres strings [28].

$$V_{champ} = V_{imposee}$$

$$I'_{string,Z} = \text{Interpolation}(V_{champ}, I_{string,Z}, V_{string,Z})$$

$$I_{champ} = \sum_{Z=1}^{N_{string}} I'_{string,Z}$$

**2.5.5.2. Cas d'impédance Z quelconque :**

Le même phénomène que celui du cas précédent apparaît. La seule différence repose sur la valeur de la chute en tension due à l'impédance de la diode défaillante [28].

$$V_{champ} = V_{imposee}$$

$$I'_{string,Z} = Interpolation(V_{champ}, I_{string,Z}, V_{string,Z} - Z \times I_{string,Z})$$

$$I_{champ} = \sum_{Z=1}^{N_{string}} I'_{string,Z}$$

**2.5.5.3. Cas de circuit ouvert :**

Dans ce cas, la totalité du courant produit par le string est perdu [28].

$$V_{champ} = V_{imposee}$$

$$I'_{string,Z} = Interpolation(V_{champ}, I_{string,Z}, V_{string,Z})$$

$$I_{champ} = \sum_{Z=1}^{N_{string}} I'_{string,Z} \text{ avec } I'_{string,Z}=0 \text{ si la diode est déconnectée}$$

**2.5.5.4. Cas inversée :**

Dans ce cas, la diode anti-retour empêche le courant produit par le string qu'elle protège de circuler. Au contraire, si la tension du string est inférieure à celle des autres strings, elle permet au courant provenant des autres strings de circuler dans le string qu'elle protège [28].

$$V_{champ} = V_{imposee}$$

$$I'_{string,Z} = Interpolation(V_{champ}, I_{string,Z}, V_{string,Z})$$

$$I_{champ} = \sum_{Z=1}^{N_{string}} I'_{string,Z} \text{ avec } I'_{string,Z} = 0 \text{ si } V_{string,Z} > V_{champ}$$

**2.5.6. Défaut de module :**

**2.5.6.1. Cas d'un module court-circuité :**

La tension du module s'annule. Le courant du module est égal à la somme du courant circulant dans les groupes de cellules et de celui circulant dans le chemin du court-circuit. Le courant dans le string est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuité porte le courant en excès [28].

$$I_{modul} = I_{shunt} + I_{groupe}$$

$$V_{module.K} = 0$$

**2.5.6.2. Cas d'un module connecté en parallèle avec une impédance :**

La tension du module est égale à la somme de la tension de tous les groupes dans le module. Le courant du module est égal à la somme du courant circulant dans les groupes de cellules et de celui circulant dans l'impédance [28].

$$V_{module,k} = \sum_{j=1}^{N_{groupe}} V_{groupe,j}$$

$$I_{modul} = I_{groupe} + V_{module,k}/Z$$

**2.5.6.3. Cas d'inversion de la polarité d'un module :**

Si un module dans le string PV est inversé, il sera traversé par un courant contraire à celui du string. Dans cette situation, les cellules dans le module inversé sont forcées de fonctionner dans le quadrant IV de la figure (1.5) et se comportent comme un récepteur avec une tension positive et un courant négatif [28].

$$I_{modul} = -I_{groupe}$$

$$V_{module,k} = \sum_{j=1}^{N_{groupe}} V_{groupe,j}$$

Les défauts de module n'interviennent que dans l'étape de détermination de la caractéristique du module. La démarche de calcul des autres composants du champ PV sera présentée dans reste inchangée.

**2.5.6.4. Défaut de connectique :**

Le défaut de connectique est lié au problème de l'augmentation de la résistance de connectique entre deux modules PV. En fonctionnement normal, cette résistance de connectique est quasi nulle. La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux (corrosion de la connectique, vis mal serrée etc...). Dans le cas extrême, une résistance infinie peut être utilisée pour représenter un module qui est déconnecté du string PV [28].

Le défaut de connectique n'intervient que dans l'étape de détermination de la caractéristique du string .Les relations entre courant et tension du string PV sont montrées dans l'équation :

$$I_{string,z} = I_{modul}$$

$$V_{string,z} = \sum_{j=1}^{N_{groupe}} V_{module,k} - R \times I_{string,z}$$

**2.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents défauts et défaillance qui peuvent affecte le système photovoltaïque durent le fonctionnement avec leur différentes méthodes de détection et de diagnostic pour les localise dans le prochain chapitre, nous allons programmer les défauts et nous allons voir leurs influence sur le générateur photovoltaïque.

# Chapitre 3:

## Résultats et interprétation

### 3.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons modéliser et simulé un groupe de simulations sur matlab simulink puis nous discutons les résultats de notre propre simulation sur les défauts que nous avons fait (ombrage, mismatch...) et cela de faire la comparaison des graphes du fonctionnement sain et des défauts pour voir la déférence entre eux.

### 3.2. Configuration des éléments d'un champ :

Le tableau (3.1) montre la configuration des éléments d'un champ il simplifie comme ce forme un champ par plusieurs éléments :

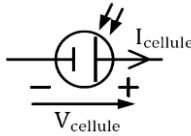
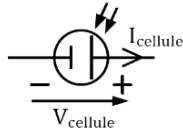
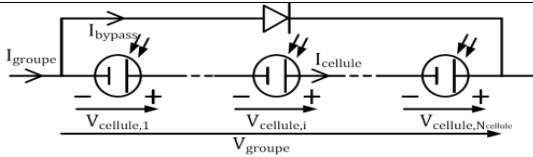
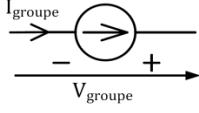
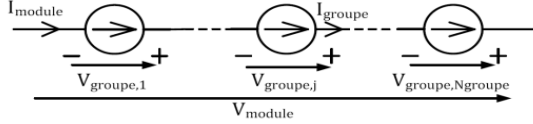
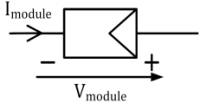
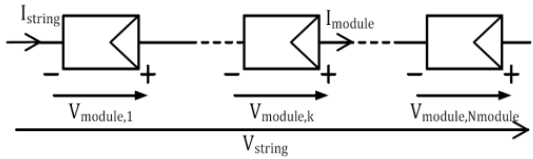

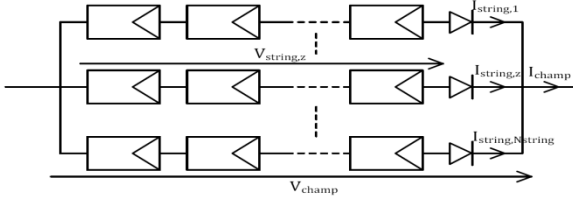
Composant d'un champ	Constitution	Symbole
Cellule		
Groupe de cellules		
Module		
String		
Champ		

Tableau 3.1 : Configuration pour la modalisation [33].

### 3.3. Modélisation des différents défauts :

Nous modélises les plusieurs défauts qui peuvent survenir dans un champ photovoltaïque :

#### 3.3.1. Défaut de mismatch et d'ombrage :

Le défaut de mismatch est le défaut causé par le groupement de cellules possédant une caractéristique I-V non identique. Tout changement dans l'un des paramètres de l'équation (2.1)

conduira à la dissemblance de leur caractéristique. Le défaut d'ombrage est un cas particulier du défaut de mismatch car sa présence conduit à une réduction de l'ensoleillement reçu par des cellules. Le changement de ces paramètres provient de deux facteurs principaux qui sont : la tolérance (fabrication), condition fonctionnement différents.

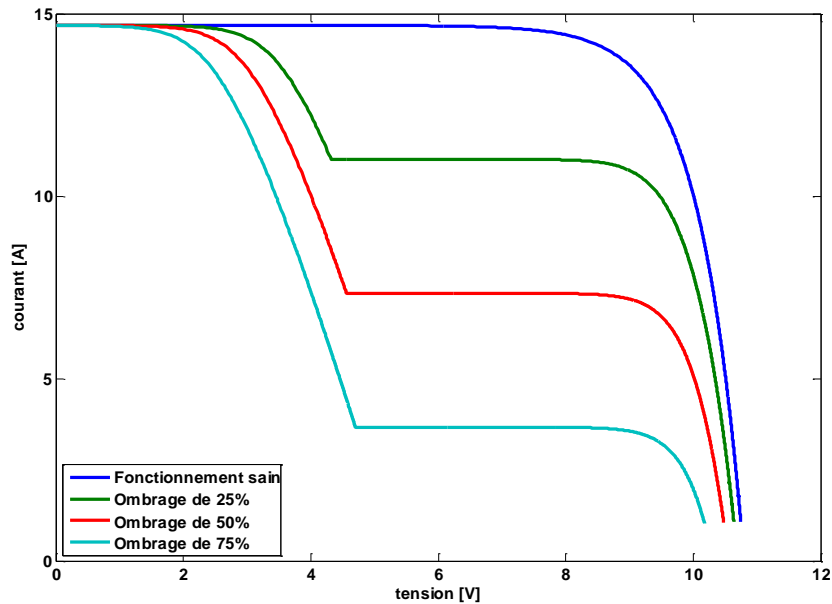


Figure 3.1 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule ombrée (de 25% à 75%).

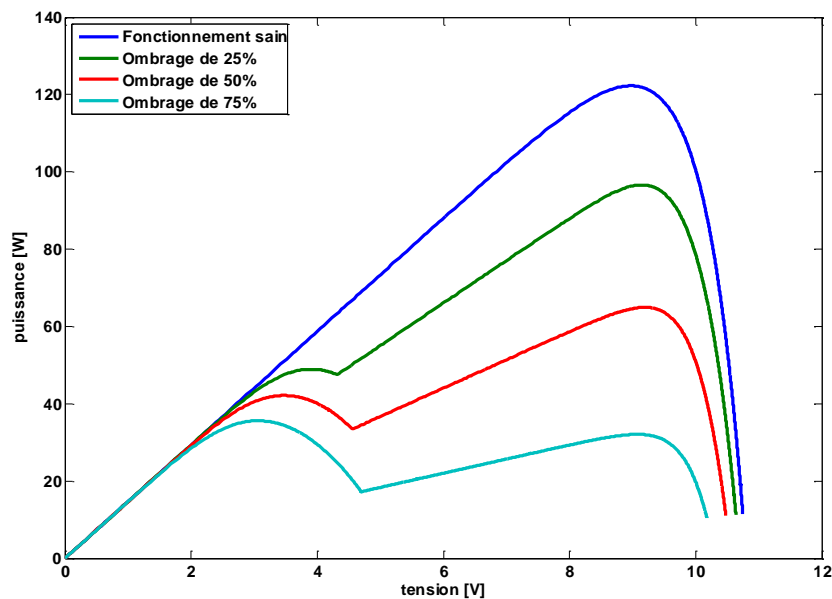


Figure 3.2 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule ombrée (de 25% à 75%).

### 3.3.1.1. Interprétation d'ombrage :

La partie 1 [de 0 à 4 V] correspond à la caractéristique I-V en fonctionnement normal, donc pour une tension  $V_1$  et une diode by-pass  $D_1$  qui est bloquée.

La partie 2 [de 4 à 10.8V] correspond à la caractéristique I-V sous ombrage, donc pour une tension  $V_2$  et une diode by-pass  $D_2$  qui devient passante; Ainsi, les tensions  $V_1$ ,  $V_2$  sont ajoutées afin d'obtenir la caractéristique I-V complète du module. La tension  $V_1$  correspond à 18 cellules en



série en fonctionnement normal. La tension  $V_2$  correspond à la tension des cellules en défaut. Si la tension  $V_2$  devient négative, la tension est considérée comme nulle aux bornes des cellules car la diode devient passante. Par conséquent, lorsque les deux tensions sont ajoutées, un point d'inflexion apparaît caractérisant le nombre de cellule en fonctionnement normal et en fonctionnement sous ombrage. Cela fait apparaître la présence de deux points de puissance maximale (figure 3.2).

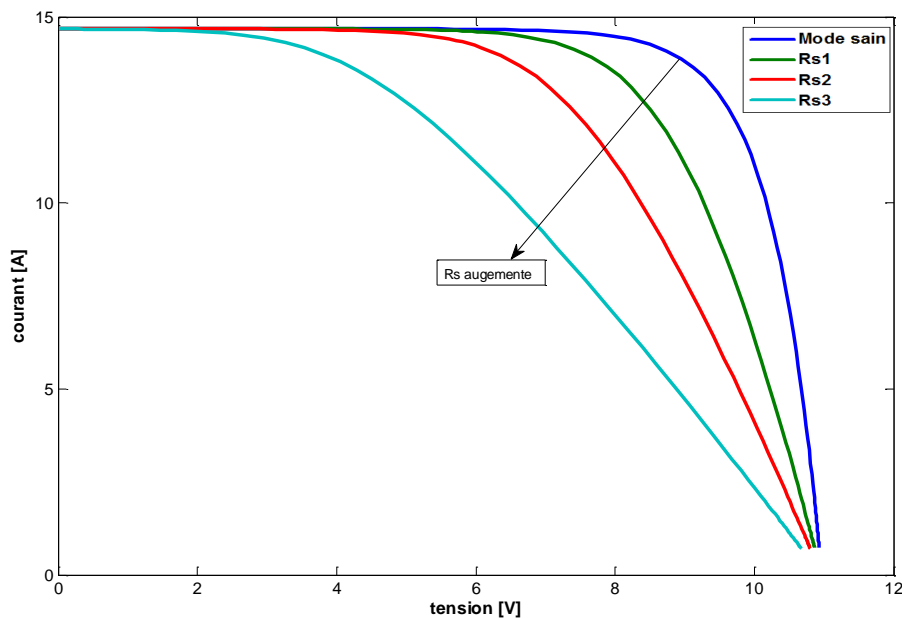


Figure 3.3 : Caractéristique I-V pour différentes résistances série  $R_s$ .

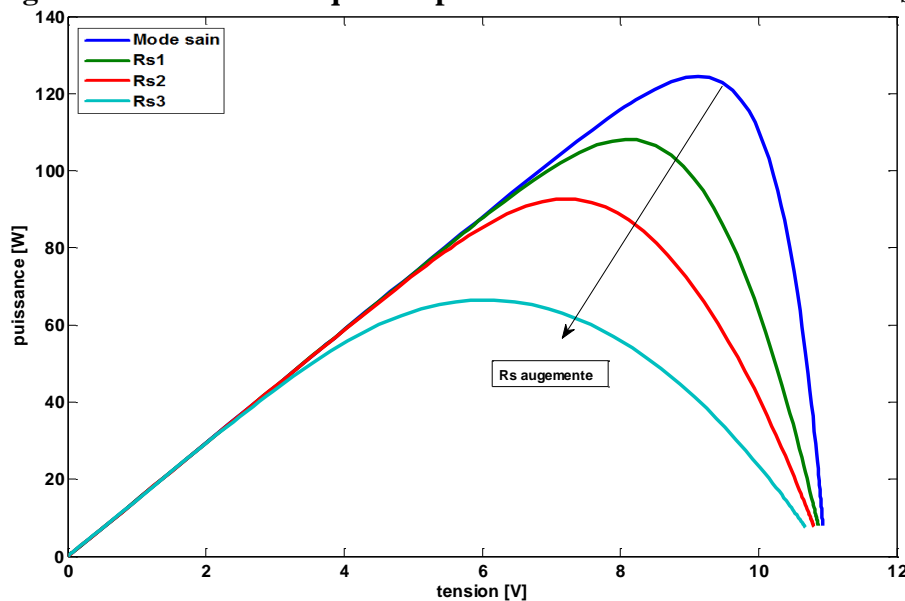


Figure 3.4 : Caractéristique P-V pour différentes résistances série  $R_s$ .

### 3.3.1.2. Interprétation de résistance série :

On remarque plus la résistance série augmente, plus le facteur de forme diminue. Ceci entraîne un rendement plus faible de la cellule. Par contre, on peut bien remarquer que cette résistance n'a pas d'influence sur la tension de circuit ouvert.

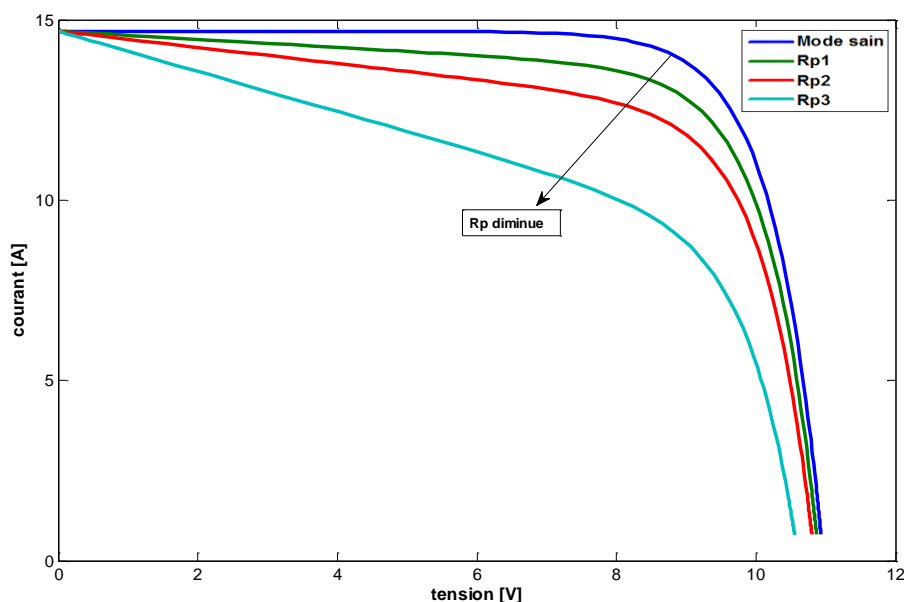


Figure 3.5 : Caractéristique I-V pour différentes résistance parallèle  $R_p$ .

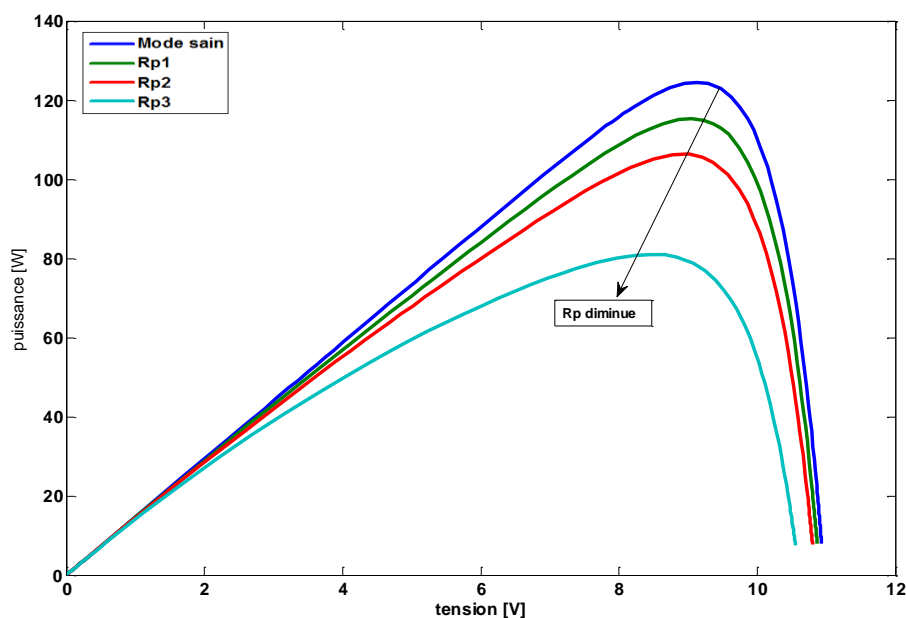


Figure 3.6 : Caractéristique P-V pour différentes résistance parallèle  $R_p$ .

### 3.3.1.3. Interprétation de résistance parallèle :

On remarque dans ce cas que pour une tension donnée, le courant diminue avec la variation de la résistance parallèle. Si la résistance parallèle est suffisamment petite, elle peut absorber quasiment la totalité du courant produit par la cellule.

Dans le cas de réduction importante de la résistance parallèle, on remarque qu'il y a une chute de tension de circuit ouvert et même le courant de court-circuit.

### 3.3.2. Défaut de diode by-pass :

Dans son bon état, la diode de by-pass est passante quand la somme des la tension des cellules qu'elle protège est négative et elle est bloquée dans le cas contraire. Dans son état défailant, ce rôle de protection n'est plus assuré. Les défauts électriques associés à cette diode sont : diode court-

circuitée, déconnectée et inversée. En plus de ces défauts électriques, cette diode pourrait être éventuellement claquée en cours de fonctionnement et se comporter comme une impédance d'une valeur quelconque. La figure (3.7) montre un schéma d'un groupe de cellules (groupe jème) dans lequel la diode de by-pass est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, prendre un des états défectueux de la diode : court-circuit, circuit ouvert, impédance et diode inversée.

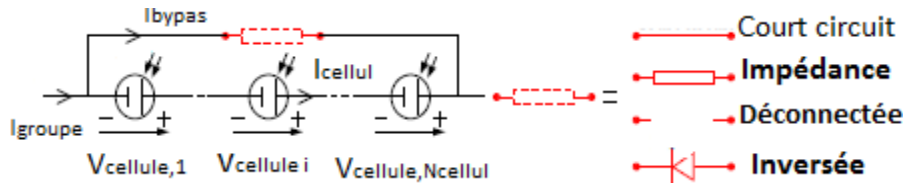


Figure 3.7 : Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de by-pass défectueuse [33].

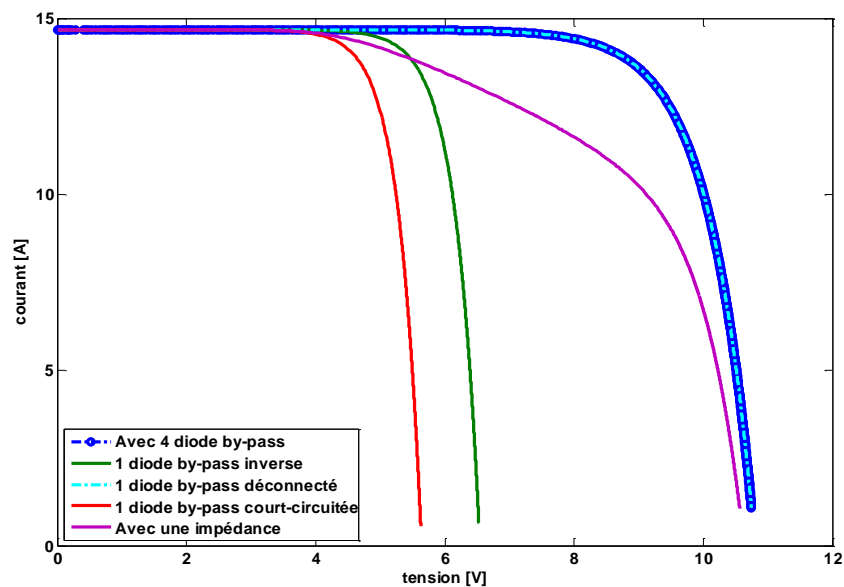


Figure 3.8 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule lors de défaut de diode by-pass.

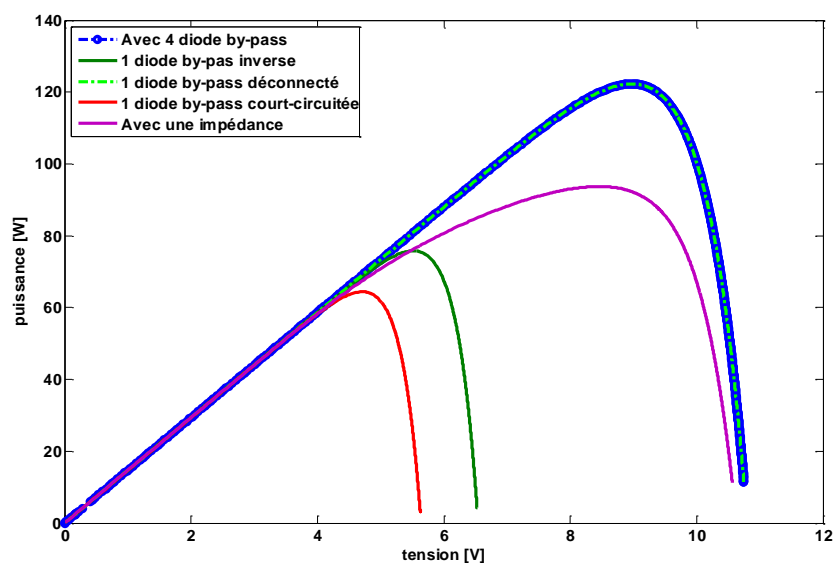


Figure 3.9 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule lors de défaut de diode by-pass.

3.3.2.1. Interprétation de diode by-pass:

- **Cas d'une diode inverse :**

En remarque que une partie de la tension est perdue la tension diminue par rapport le fonctionnement sain d'après les connaissances on a que tension du groupe est égale à la somme de la tension des cellules du groupe. Le courant du groupe est égal au courant circulant dans le groupe cellules.

L'inversement de la diode affecte la puissance délivrée par le panneau qui est influencé par la réduction de la tension  $V_{oc}$  causée par l'effet de la diode by-pass inversée.

- **Cas d'une diode court-circuitée :**

La même remarque est trouve il ya une partie de tension qui est perdu puisque la tension du groupe des cellules s'annule. Le courant circulant dans les cellules est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuitant porte le courant en excès.

- **Cas de diode déconnecté :**

Ya pas de problème ou de perte de tension ou de puissance puisque la tension du groupe est égale à la somme de la tension des cellules du groupe. Le courant du groupe est égal au courant circulant dans le string de cellules mais à condition, l'expérience se réalise sans ombrage.

- **Cas d'une impédance :**

Dans la tension on n'a pas de perte elle reste tel que la tension du groupe est égale à la somme de la tension de toutes les cellules dans le groupe mais dans le courant on remarque une diminution puisque dans se cas le courant est égal a la somme du groupe circulant dans le string plus celui qui traverse l'impédance. Elle se manifeste comme l'effet de mismatch résistance en parallèle et ce phénomène se produit lors du claquage de la jonction PN de la diode.

3.3.3. Défaut de module :

Le défaut de module se réfère à tous les défauts électriques associés à la connexion d'un module dans un string PV. Selon le tableau (2.2), ces défauts électriques sont : module court-circuité, module connecté en parallèle avec une impédance et inversion de la polarité du module. La figure (3.10) montre le schéma d'un module avec l'élément qui représente, à chaque fois, un des états défailants de la connexion du module.

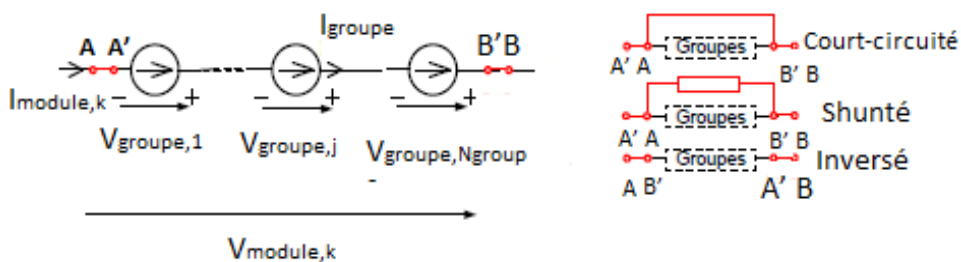


Figure 3.10 : Schéma bloc d'un module PV défailant [33].

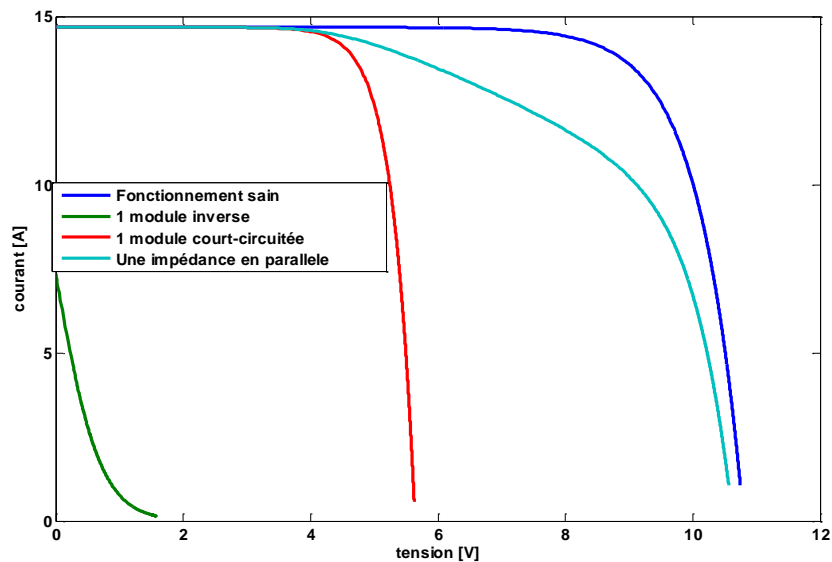


Figure 3.11 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule avec présence de défaut au niveau d'un module.

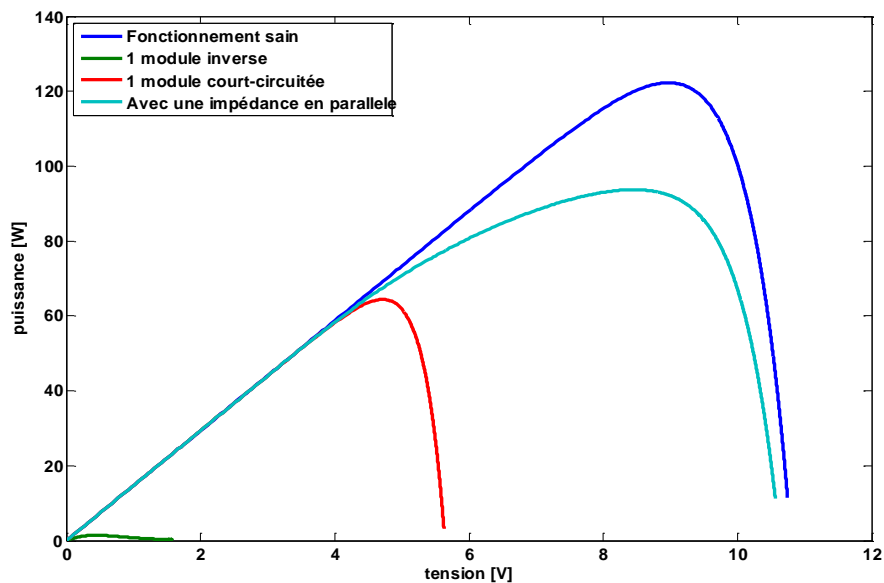


Figure 3.12 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule avec présence de défaut au niveau d'un module.

### 3.3.3.1. Interprétation de module :

- **Cas de module court-circuité :**

Une partie de la tension est perdue elle diminue par rapport le fonctionnement sain puisque le courant va prendre le chemin le plus facile du fait la tension de ce module est nul. Ce que no donne le courant dans le string est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuité porte le courant en excès.

- **Cas de module inverse :**

Dans le cas ou un module dans un string est inversé, il sera traversé par un courant oppose à celui du string. Dans cette situation, les cellules dans le module inversé sont forcées de

fonctionner dans le quadrant IV de la figure (1.5) et se comportent comme un récepteur avec une tension positive et un courant négatif.

- **Cas d'une impédance placé en parallèle avec un module :**

Le courant dans ce cas il diminue du fait que le courant du module est égal à la somme du courant circulant dans les groupes de cellules et de celui circulant dans l'impédance. Cette situation elle est de même que l'effet de mismatch résistance en parallèle.

### 3.3.4. Défaut de connectique :

Le défaut de connectique est lié au problème de l'augmentation de la résistance de connectique entre deux modules PV. En fonctionnement normal, cette résistance de connectique est quasi nulle. La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux (corrosion de la connectique, vis mal serrée etc). Dans le cas extrême, une résistance infinie peut être utilisée pour représenter un module qui est déconnecté du string PV. La figure 3.13 est un schéma d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle.

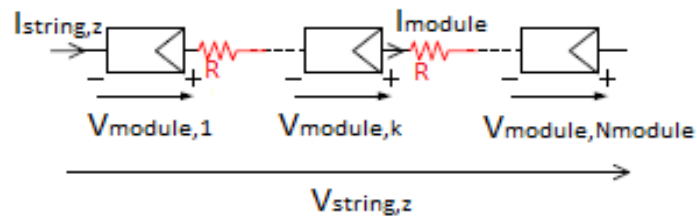


Figure 3.13 : Schéma bloc d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle[33].

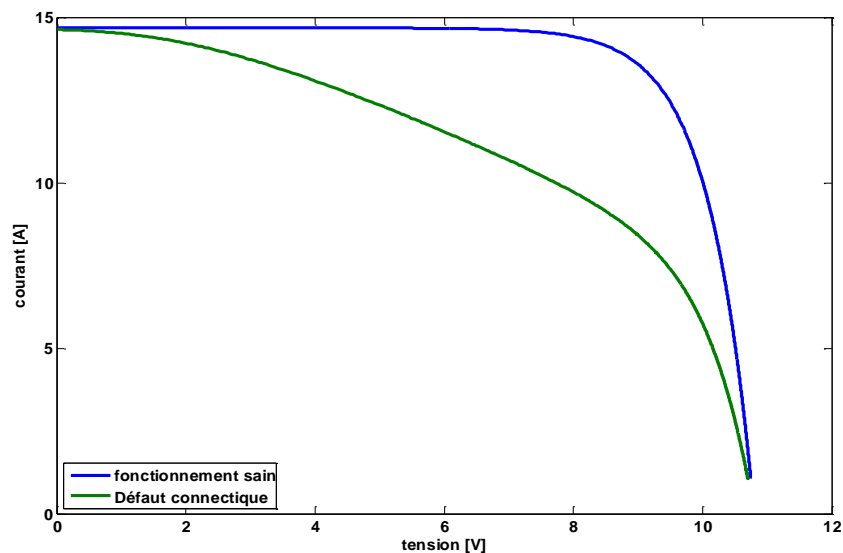


Figure 3.14 : Caractéristique I-V lorsqu'il ya une mauvaise connexion entre 2 module.

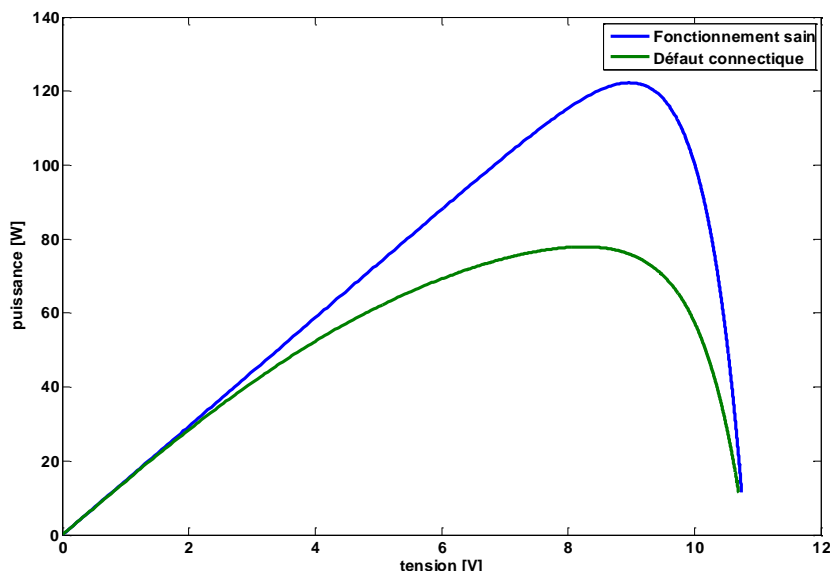


Figure 3.15 : Caractéristique P-V lorsqu'il ya une mauvaise connexion entre 2 module.

### 3.3.4.1. Interprétation de connectique :

Le courant diminue dus à la résistance connecté entre les 2 modules la résistance ce manifeste comme une mal connexion elle est de même de défaut mismatch en résistance en série l'explication est donne déjà dans le paragraphe précédant (3.3.4).

### 3.3.5. Défaut de diode anti-retour :

De la même manière que pour la diode de by-pass, 4 types de défauts peuvent être envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et inversée. La figure 3.16 montre un schéma d'un champ PV dans lequel la diode anti-retour est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, représenter un des états défailants de la diode.

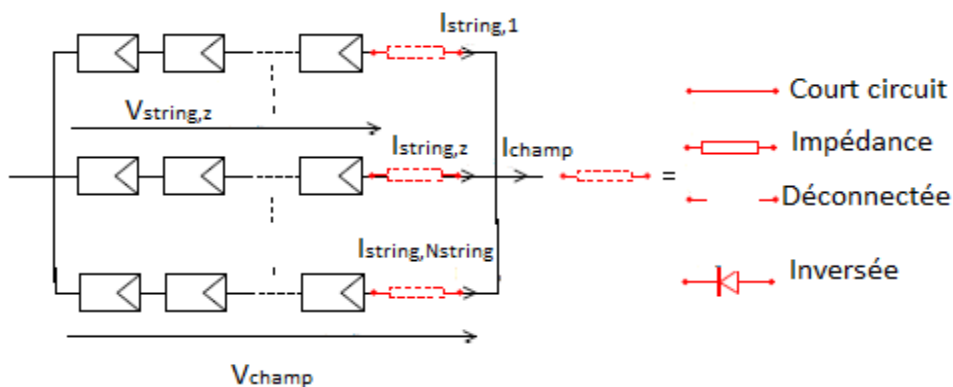


Figure 3.16 : Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défailante [33].

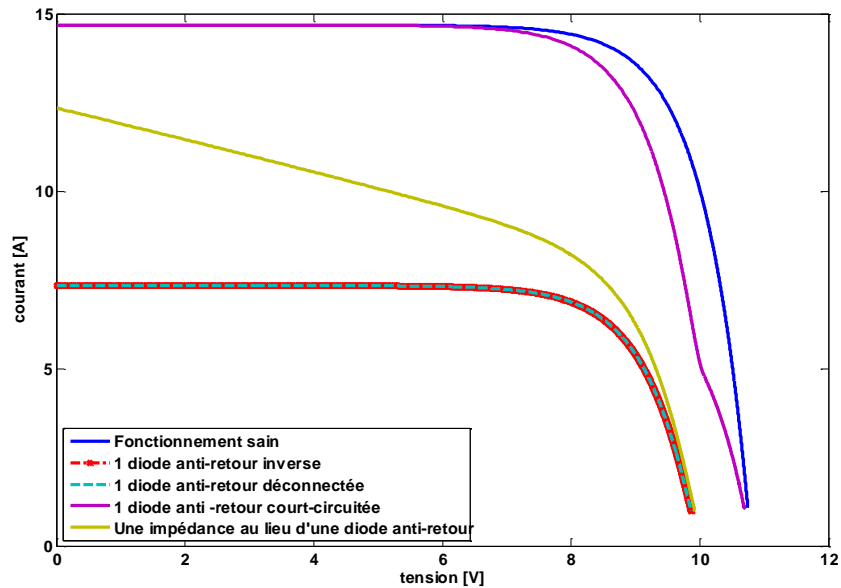


Figure 3.17 : Caractéristique I-V d'un groupe de cellule avec diode anti-retour et présence de défaut.

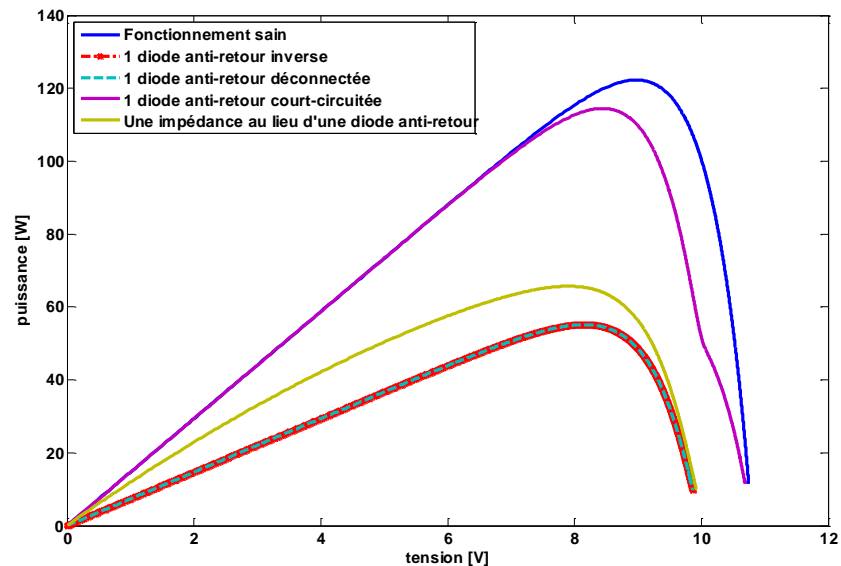


Figure 3.18 : Caractéristique P-V d'un groupe de cellule avec diode anti-retour et présence de défaut.

### 3.3.5.1. Interprétation de diode anti-retour :

- Cas d'une diode inverse :

Dans ce cas, le courant diminue puisque la diode anti-retour empêche le courant produit par le string qu'elle protège de circuler. Au contraire, si la tension du string est inférieure à celle des autres strings, elle permet au courant provenant des autres strings de circuler dans le string qu'elle protège



- **Cas d'une diode déconnecté :**

Ce le cas d'inverse le même comportement mais cette fois le courant ce bloque puisque c'est circuit ouvert le courant de ce string ne peut pas s'ajoute au autres courants des strings ce qui nous donne courant plus faible.

- **Cas d'une impédance à la place d'une diode :**

Le courant diminue à cause de résistance qui le fait diminuée alors la somme des courants des strings et celui du courant qui passe depuis cette résistance, et même la tension chute et son amplitude est proportionnelle à la valeur de la résistance crée.

- **Cas d'une diode court-circuitée :**

Quand ton court-circuite la diode anti-retour, dans la pratique la tension des cellules n'est pas identique ce qu'il va crée une différence entre les tensions des strings .si cette tension est équilibrée, le court-circuit n'affecte pas le comportement du champ.

### **3.4. Conclusion :**

Ce chapitre contient les résultats de simulations que nous avons faites sur les différents défauts et les défaillances et on ajoute une interprétation pour chaque défaut étude dans ce travail.

## Conclusion Générale

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons principalement à la modélisation et l'étude des défauts au niveau du générateur PV par l'analyse de la caractéristique courant-tension (I-V) et caractéristique puissance-tension (P-V) l'identification des symptômes provoquant de mauvaises performances.

Dans le premier temps, nous avons fait un rappelle sur des généralités sur les générateurs photovoltaïques, et principe de conversion de la lumière en électricité et une petite description des différents éléments constituant un générateur photovoltaïque.

Dans un second temps, nous avons présenté les différents défauts affectant un système photovoltaïques que se soit les défauts dus aux conditions climatiques ou aux défauts de construction et d'utilisations, plus nous avons montré les différentes méthodes de diagnostic des défauts.

L'effet de ces défauts sur les caractéristiques tensions courant et la puissance ont été élaboré dans la dernière partie de ce travail. Nous avons constaté que :

- Il est important de détecter le défaut et de le localiser pour réduire les dégâts qui l'engendre.

En perspective, nous souhaitons de :

- Réaliser un banc d'essai qui va nous permettre d'introduire les défauts étudiés pour valider les résultats trouvés.
- Allez au de la du champ et appliqué d'autre défauts sur la chaine de conversion d'énergie et voir leur influence sur le générateur PV.
- Développer un algorithme de détection et de localisation des défauts on se référant aux résultats trouvés.

## Références bibliographiques

- [1] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/commentfonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaique/definition-principe-fonctionnement-photovoltaique/>
- [2] Trahi Fatiha, «Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels Application pour le dimensionnement d'une installation pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA», Mémoire de Magister en électronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.
- [3] M. Angel Cid Pastor «Conception et réalisations de modules photovoltaïques électroniques » thèse présentée en vue de l'obtention de grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France 29 septembre 2006.
- [4] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. «Le pompage photovoltaïque», Université d'Ottawa, 1998. livre Jan 1998 ; 281 pages Aut. Thomas Djiako & Jimmy Royer & Eric Schiller & Bocar Sada Sy Ed. EAA - Ouagadougou IFDD - Québec 2iE - Ouagadougou ; Isbn: 2-89481-006-7.
- [5] Sofiane Abada «étude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », l'Université Laval, l'obtention du grade de Maître es Sciences (M. Se) 2011.
- [6] Boukhers Djamil « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine 2007.
- [7] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [8] F. Lasnier, T.G. Ang, «Photovoltaic Engineering Handbook», IOP Publishing Ltd. 1980, ISBN 0-85274-311-4.
- [9] Mechai Fazia «Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX<sub>2</sub> (M = W, Mo; X = S, Se) » mémoire de magister, Université mouloud mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [10] Cours de 3eme année LER Système Photovoltaïque, Université de Laghouat, 2012/2013.
- [11] [https://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1\\_519507/articletechnologie175-photovoltaique?details=true](https://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1_519507/articletechnologie175-photovoltaique?details=true) consulté le 05.05.2021.
- [12] Kamelia Hellali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative », mémoire de magister, Université Tizi-Ouzou, 2012.

- 
- [13] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.
- [14] Olivier Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [15] Tiar Mourad, «Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride », Mémoire de Magister En Electrotechnique Option : Electricité industrielle, Université de Biskra, 2011.
- [16] Narimen Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, université Constantine 1, 2015.
- [17] Aboub Hania,« Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV», mémoire de magister, Université, El-Oued 2014.
- [18] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, «Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system», *Solar Energy Materials & Solar Cells* 67 (2001), Page(s): 389-395.
- [19] N. D. Kaushika and N. K. Gautam, «Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays, » *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 127-134, 2003.
- [20] M. Petibon Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques» Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III 2009.
- [21] Salaheddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres et caractéristiques des cellules solaire », mémoire de magister, université Farhat Abbas- Setif, 2011.
- [22] H. E. Suryanto, S. R. Wenham and M. A. Green, «Shadow tolerance of modules incorporating integral bypass diode solar cells, » *Solar Cells*, vol. 19, pp. 109-122, 1986.
- [23] T. Takashima, J. Yamaguchi, K. Otani, T. Oozeki, K. Kato, et al., «Experimental studies of fault location in PV module strings, » *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, pp. 1079-1082, 2009.
- [24] G. B. Alers, «Photovoltaic Failure Analysis:Techniques for Microelectronics and Solar, » in *PV Module Reliability Workshop*, Colorado, USA, 2011.
- [25] W. Dallas and et al., «Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers, Measurement »*Science and Technology*, vol. 18, p. 852, 2007.
- [26] L. Schirone and F. P. Califano, «Fault finding in a 1 MW photovoltaic plant by reflectometry, » in *Photovoltaic Energy Conversion, 1994.*, Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1994, pp. 846-849.

- [27] A. Chouder and S. Silvestre, «Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis, » *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 1929-1937, 2010.
- [28] Long Bun, «Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV», thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
- [29] Boucler Hacene Omar «Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque», mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen 2011.
- [30] H. Fatiha et R. Aicha «Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque » mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla juin 2014.
- [31] D.L Salim et G Sofiane «Implémentation d'une commande MPPT sur un PIC 16F876 appliquée à un générateur photovoltaïque GPV», Université Amar TELIDJI Laghouat Juin 2013.
- [32] Chebabhi Ardjouna « Etude d'identification et localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque» mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila juin 2016.
- [33] B. Abdelilah et S. Elghaouti et K. Hamza« étude des défauts et méthodes de diagnostic des panneaux photovoltaïque mémoire master, Université Hassan 2 Casablanca Maroc 2017.

## Annexe

```

Iscn = 14.68;           %Nominal short-circuit voltage [A]
Vocn = 10.75;          %Nominal array open-circuit voltage [V]
Imp = 14.5;            %Array current @ maximum power point [A]
Vmp = 8.938;           %Array voltage @ maximum power point [V]
Pmax_e = Vmp*Imp;      %Array maximum output peak power [W]
Kv = -0.123;           %Voltage/temperature coefficient [V/K]
Ki = 3.18e-3;          %Current/temperature coefficient [A/K]
Ns = 18;               %Number of series cells

%% Array with Nss x Npp modules
Nss = 18;
Npp = 2;

%% Constants
k = 1.3806503e-23;     %Boltzmann [J/K]
q = 1.60217646e-19;   %Electron charge [C]
a = 1.3;               %Diode constant

%% Nominal values
Gn = 1000;              % Nominal irradiance [W/m^2] @ 25oC
Tn = 25 + 273.15;     % Nominal operating temperature [K]

%% Adjusting algorithm
% The model is adjusted at the nominal condition
T = Tn;
G = Gn;

% You may change these values as you wish

T = 25 + 273.15;      %Temperature [K]
G = 1000;              %Irradiance [W/m^2]

%% PROGRAM STARTS HERE

% Constants
k = 1.3806503e-23;     %Boltzmann [J/K]
q = 1.60217646e-19;   %Electron charge [C]

% Thermal voltages
Vtn = k * Tn / q;      %Thermal junction voltage (nominal)
Vt = k * T / q;        %Thermal junction voltage (actual temperature)
Ion = Iscn / (exp (Vocn/a/Ns/Vtn)-1); % Nominal diode saturation current

Io = Ion;

% Reference values of Rs and Rp
Rs_max = (Vocn - Vmp) / Imp;
Rp_min = Vmp / (Iscn-Imp) - Rs_max;

```

---

```

% Initial guesses of Rp and Rs
Rp = Rp_min;
Rs = 0;

tol = 0.001; % Power mismatch Tolerance

P=[0];

error = Inf; %dummy value

Xsh=input('Xsh');
Xtr=input('Xtr');
Rshm=input('Rshm');
Rhm =input('Rhm');
% Method of calculating Io

% Chose 1 to use the original method with (T/Tn)^3
% Chose 2 to use the alternative method with KV and KI

method = 1; % You do not need to change this

% This is the alternative Io equation suggested in my paper.

if method == 2,

dT = T - Tn;
Isc_ = ( Iscn + Ki*dT );
Voc_ = ( Vocn + Kv*dT );

Io = Isc_/(exp(Voc_/a/Ns/Vt)-1); %% OLD %%

Ipv_ = (Rs+Rp)/Rp * Isc_;

Io = (Ipv_ - Voc_/Rp)/(exp(Voc_/Vt/a/Ns)-1)
end

% Temperature and irradiation effect on the current
dT = T-Tn;
Ipvn = ((Rs+Rhm)+(Rp-Rshm)/(Rp-Rshm)) * Iscn; % Nominal light-
generated current
Ipv = (Ipvn + Ki*dT) *G/Gn; % Actual light-generated current
Isc = (Iscn + Ki*dT) *G/Gn; % Actual short-circuit current

% Solving the I-V equation for several (V,I) pairs
clear V
clear I

nv = 100;

V = 0:(Vocn+Kv*dT)/nv:(Vocn+Kv*dT); % Voltage vector
I = zeros(1,size(V,2)); % Current vector

for j = 1 : size(V,2) %Calculates for all voltage values

```

---

```

% Solves  $g = I - f(I,V) = 0$  with Newton-Raphson

g(j) = (Xtr*Xsh*Ipv)-Io*(exp((V(j)+I(j)*(Rs+Rhm))/Vt/Ns/a)-1) -
(V(j)+I(j)*(Rs+Rhm))/(Rp-Rshm)-I(j);

while (abs(g(j)) > 0.001)

g(j) = (Xtr*Xsh*Ipv)-Io*(exp((V(j)+I(j)*(Rs+Rhm))/Vt/Ns/a)-1) -
(V(j)+I(j)*(Rs+Rhm))/(Rp-Rshm)-I(j);
glin(j) = -Io*Rs/Vt/Ns/a*exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a) - (Rs+Rhm)/Rp-1;
I_(j) = I(j) - g(j)/glin(j);
I(j) = I_(j);

end

end

% PROGRAM ENDS HERE

%% PLOTTING

% I-V curve
figure(1)
grid on
hold on
title('Adjusted I-V curve');
xlabel('V [V]');
ylabel('I [A]');
xlim([0 max(V)]);
ylim([0 max(I)]);
plot(V,I, 'LineWidth',2, 'Color','k')

% P-V curve
figure(2)
grid on
hold on
title('Adjusted P-V curve');
xlabel('V [V]');
ylabel('P [W]');
xlim([0 max(V)*1.1]);
ylim([0 max(V.*I)*1.1]);
plot(V,V.*I, 'LineWidth',2, 'Color','k')

```



## ملخص

مثل أي نظام لإنتاج الكهرباء ، كالنظام الكهروضوئي يمكن أن يتعرض أو يتأثر أثناء تشغيله لأعطال مختلفة وشذوذ مما يؤدي إلى تقليل كفاءة ناتج النظام الكهروضوئي (PV) يعتمد بشكل أساسي على الظروف التي يتم تحتها التشغيل ، مثل العوامل البيئية والتشغيلية (التصنيعية والتشغيلية). هذه العوامل هي مصدر عدد كبير من أعطاب و أعطال التي تؤدي إلى تدهور النظام الكهروضوئي. في هذا العمل ، نحن مهتمون بشكل خاص بكشف وتصنيف الأعطال في المولد.

**الكلمات المفتاحية:** كالنظام الكهروضوئي – اعطاب – اعطال – تصنيف - كشف.

## Résumé

Comme tout système de production d'électricité, tel que le système photovoltaïque il peut être soumis ou affecte durent son fonctionnement a différents défauts et anomalies menant à réduire l'efficacité du rendement du système photovoltaïque (PV), il dépend essentiellement des conditions aux quelles il est soumis, tel que environnementales, opérationnelles (fabrication ou exploitation). Ces facteurs sont l'origine d'un important nombre de défauts qui engendre une dégradation du GPV. Dans ce travail, nous nous intéressons spécifiquement à la détection et la classification des défauts d'un générateur photovoltaïque (GPV) en utilisant le programme MATLAB pour modéliser les relations qui représente les défauts dans le système photovoltaïque en étude comparative entre régime sain et en défaut , (fonctionnement normal est fonctionnement défailent).

**Mots clés :** système photovoltaïque – défauts- anomalies - détection – classification.

## Abstract

In any electricity production system, such as the photovoltaic system it can be subjected or affect during its operation to various faults and anomalies leading to reduce the efficiency of the output of the photovoltaic (PV) system, it depend essentially on the conditions under which it is subject such as environmental, operational (manufacturing or operation). These factors are the origin of a large number of faults which lead to degradation of the (GPV). In this work, we are specifically interested in the detection and classification of faults in a photovoltaic generator (GPV) using the MATLAB program to model the relationships that represent faults in the photovoltaic system in a comparative study between healthy and faulty regime ,(normal operation is faulty operation).

**Keywords:** photovoltaic system- faulty – anomalies – detection -classification.