

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Diagnostic des défauts d'un panneau solaire

Préparé par :

Madani Samiha et Habib Zohra

Soutenu publiquement le : / 07 / 2022, devant le jury composé de :

M.ABED Bellkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M.SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M.BEY Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BOUREGUIG Kada	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail.

*Nous remercions tout particulièrement notre promoteur, **Mr. BOUREGUIG KADA** d'avoir proposé et dirigé ce travail, pour son judicieux conseil et toute la patience dont il a fait preuve durant la réalisation de cette étude et surtout pour sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

À Monsieur ABED, nous lui adressent nos plus vifs remerciements pour avoir accepté de présider ce jury.

À Madame SLIMANI, nous lui adressent nos remerciements les plus sincères pour ses aides et pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

À Monsieur BEY, nous lui adressent nos remerciements les plus sincères pour ses aides et pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous remercions enfin, tous ceux qui contribuent de près ou de loin d'accomplir ce modeste travail.

Dédicaces

*Chaleureusement, nous dédions ce
modeste travail :*

À ma mère et mon père

À mes frères et sœurs.

À tous les membres de ma famille.

*À tous ceux qui sont proches de moi avec
lesquelles j'ai partagé les meilleurs
moments de ma vie.*

À tous mes collègues.

MADANI SAMIHA.

Dédicaces

*A ma chère mère qui représente pour moi
l'exemple des sacrifices du dévouement,
l'honnêteté et qui a fait de moi ce que je suis
devenue.*

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A mes filles.

A toutes mes nièces que j'aime beaucoup.

A tous mes collègues.

HABIB ZOHRA.

Sommaire

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Liste des abréviations.

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les panneaux photovoltaïques.

I.1. Introduction 3

I.2. Les énergies renouvelables 3

I.3. Situation énergétique en Algérie 5

 I.3.1. Potentiel solaire 6

 I.3.2. Potentiel éolien 6

I.4. Les énergies renouvelables en Algérie 7

 I.4.1. Potentiel solaire à la wilaya de Saïda 8

 I.4.2. Centrales solaires en Algérie 8

I.5. Énergie solaire photovoltaïque 9

 I.5.1. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 9

I.6. Générateur photovoltaïque (GPV) 10

I.7. Conversion photovoltaïque 10

I.8. La cellule photovoltaïque 11

 I.8.1. Historique 11

 I.8.2. Principe de fonctionnement 11

 I.8.3. Description 12

I.9. Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques 13

I.10. Caractéristiques d'une cellule solaire 15

I.11. Système de protection 15

I.12. Différents domaines d'application 16

I.13. Installation des panneaux solaires photovoltaïques 16

I.13.1. Les différents types d'installation d'un système PV	17
I.14. Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques	19
I.14.1. Avantages des panneaux photovoltaïques	19
I.14.2. Inconvénients des panneaux photovoltaïques	20
I.15. Conclusion	20

Chapitre II : Modélisation mathématique des cellules photovoltaïques.

II.1. Introduction.....	21
II.2. Les modèles électriques de la cellule PV	21
II.2.1. Modèle d'une cellule PV idéale.....	21
II.2.2. Modèle d'une cellule PV à une diode.....	23
II.2.3. Modèle d'une cellule PV à deux diodes	23
II.3. Paramètres pour la caractérisation de la cellule photovoltaïque.....	24
II.3.1. Caractéristiques $I = f(V)$, $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque :	24
II.3.2. Le courant de court-circuit.....	25
II.3.3. Puissance maximale	26
II.3.4. Courant fournie par la cellule photovoltaïque.....	27
II.3.5. La température de la cellule	28
II.3.6. Puissance crête d'une cellule PV	30
II.3.7. Tension de circuit-ouvert	31
II.3.8. Facteur de forme	31
II.4. Rendement de conversion.....	31
II.5. Le rendement quantique	32
II.6. Groupement des cellules ou des Modules photovoltaïques.....	32
II.6.1. Association en série en additionnant des cellules ou des modules identiques en série	33
II.6.2. Association en parallèle en additionnant des modules identiques en parallèle..	34
II.7. Conclusion	35

Chapitre III : Défauts liées aux panneaux photovoltaïques.

III.1. Introduction	36
III.2. Défauts des panneaux photovoltaïques	36
III.2.1. Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage	36
III.2.2. Les points chauds ou Hot-spots	37
III.2.3. Jaunissement et brunissement « la décoloration »	38
III.2.4. Bulle d'air	39
III.2.5. Fissures dans les cellules	39
III.2.6. Délaminage	40
III.2.7. Défaut de revêtement anti -reflet (ARC)	41
III.2.8. Module arraché au cassé	41
III.2.9. Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour	42
III.2.10. L'augmentation de la résistance série (R_s)	42
III.2.11. Diminution de la résistance parallèle (R_p)	43
III.2.12. Autres Défauts	43
III.3. Classification des défauts pour la modélisation	43
III.4. Le PID - Dégradation Potentielle Induite	45
III.6. Conclusion	45

Chapitre IV : diagnostique des défauts liés aux panneaux photovoltaïques.

IV.1. Introduction	46
IV.2. Terminologie relative au diagnostic	46
IV.3. Diagnostic	47
IV.3.1. Considération générale sur les systèmes de diagnostics	47
IV.3.2. Etapes du diagnostic	48
IV.3.3. Objectifs	48
IV.3.4. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV	49
IV.4. Détection et classification de défauts pour un GPV	51

IV.4.1. Simulation du GPV en fonctionnement sain	51
IV.4.2. Simulation du GPV en fonctionnement defaillant.....	53
IV.4.3. Choix des symptômes pour le diagnostic de défauts.....	59
IV.4.4. Génération des symptômes.....	60
IV.4.5. Réglage du seuil	60
IV.5. Réalisation d'un algorithme de diagnostic sur un panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	61
IV.5.1. Défauts considéré pour le diagnostic.....	61
IV.5.2. Tableau de signatures	64
IV.5.3. Réglage du seuil et tableau de binaire	65
IV.5.4. Algorithme de diagnostic	66
IV.6. Maintenance d'un panneaux solaire.....	67
IV.6.1. Maintenance de premier niveau de maintenance.....	68
IV.6.2. Maintenance de deuxième niveau des Panneaux photovoltaïques	72
IV.7. Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	76

Bibliographie.

Annexe.

Résumé.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie par région.	6
Tableau I.2 : Répartition de la puissance installée par ressource.....	7
Tableau I.3 : Différents types de cellules photovoltaïques.	15

Chapitre III

Tableau III.1 : Classification de défauts	44
Tableau III.2 : impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule.	44

Chapitre IV

Tableau IV.1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.	51
Tableau IV.2 : Les différents Les défauts choisis pour le diagnostic.	62
Tableau IV.3 : Les valeurs numériques de chacun des symptômes pour chaque défaut.	64
Tableau IV.4 : Les signatures de chacun des symptômes en binaire pour chaque défaut.	65
Tableau IV.5 : Visée des différents défauts sur les paramètres de la cellule.....	70

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Le panneau solaire photovoltaïque.....	4
Figure I.2 : Panneau solaire thermique.	4
Figure I.3 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Juillet	6
Figure I.4 : Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables	7
Figure I.5 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.....	9
Figure I.6 : Composants d'un GPV.....	10
Figure I.7 : Conversion de l'énergie solaire en électricité.	11
Figure I.8 : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I.9 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.	16
Figure I.10 : Système PV autonome.	17
Figure I.11 : Système PV raccordée au réseau.....	18
Figure I.12 : Schéma d'une installation photovoltaïque mobile.	18
Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'un système PV hybride.....	19

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	22
Figure II.2 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.	23
Figure II.3 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.....	24
Figure II.4 : Courbe $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	25
Figure II.5 : Courbe $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure II.6 : Points de la puissance maximale P_m et Pm. idial	27
Figure II.7 : Courbes $I=f(V)$ sous différentes températures.....	29
Figure II.8 : caractéristique $P=f(V)$ sous différentes températures.....	29
Figure II.9 : Courbes $I=f(V)$ sous différents niveaux d'éclairement.	30
Figure II.10 : Courbes $P=f(V)$ sous différents niveaux d'éclairement.	30
Figure II.11 : Cellules identiques en série.....	34
Figure II.12 : Cellules identiques en parallèle	35

Chapitre III

Figure III.1 : Défaut de point chaud.....	38
---	----

Figure III.2 : Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées.....	38
Figure III.3 : Défaut de bulles d'air.	39
Figure III.4 : fissures dans les cellules PV.....	40
Figure III.5 : défaut de délaminage.....	40
Figure III.6 : défaut de revêtement anti –reflet.	41
Figure III.7 : Module cassé	42
Figure III.8 : Défaut de la diode de by-pass.....	42
Figure III.9 : Défaut d'augmentation de la résistance R_s	43

Chapitre IV

Figure IV.1: Etapes du diagnostic industriel.....	48
Figure IV.2: Simulation d'un module sous Matlab.....	52
Figure IV.3: Caractéristique (I-V) d'un module PV en fonctionnement sain.....	52
Figure IV.4: Caractéristique (P-V) d'un module PV en fonctionnement sain.	53
Figure IV.5 : Caractéristique (I-V) lorsque l'effet de l'ombrage touche toutes les cellules.....	54
Figure IV.6 : Caractéristique (P-V) lorsque l'effet de l'ombrage touche toutes les cellules.....	54
Figure IV.7 : Caractéristique (I-V) lorsque l'effet de l'ombrage partiel(18cellule).	55
Figure IV.8 : Caractéristique (P-V) lorsque l'effet de l'ombrage partiel (18cellules).....	55
Figure IV.9 : Schématisation d'un module PV avec une diode By-pass (court-circuitée).....	56
Figure IV.10 : Caractéristique (I-V) d'un module lors d'une diode by-pass (Court-circuitée).	56
Figure IV.11 : Caractéristique (I-V) d'un module lors d'une diode by-pass (Court-circuitée).	57
Figure IV.12 : Schématisation d'un module PV avec une diode By-pass (Circuit ouvert).....	57
Figure IV.13 : Caractéristique (I-V) d'un module PV avec une diode by-pass déconnectée.....	58
Figure IV.14 : Caractéristique (P-V) d'un module PV avec une diode by-pass déconnectée.....	58
Figure IV.15 : Schématisation d'un module PV avec une diode By-pass Inversée.	58
Figure IV.16 : Caractéristique (I-V) d'un module PV avec une diode by-pass Inversée.....	59
Figure IV.17 : Caractéristique (P-V) d'un module PV avec une diode by-pass inversée.	59
Figure IV.18 : Différents symptômes de la caractéristique (I-V) d'un module PV défaillant.	60
Figure IV.19 : schéma bloc utilisé pour produire les signatures de défauts	61
Figure IV.20 : Caractéristiques (I-V) du module sans défaut et du module avec les 6 défauts considérés.	64
Figure IV.21 : Caractéristiques (P-V) du module sans défaut et du module avec les 6 défauts considérés.	65
Figure IV.22 : Algorithme de Diagnostic d'un panneau PV.	67

Figure IV.23 : vérification de la visserie bien fixé.	68
Figure IV.24 : Le nettoyage de panneau solaire.	69
Figure IV.25 : Changement d'un verre de panneau solaire.	70
Figure IV.26 : pince Ampère-métrique DC/AC (à effet Hall).....	73

Liste des abbreviations

SSB : Sahara Solar Breeda.

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque.

DC : convertisseur continu.

AC : convertisseur alternatif.

FF : facteur de forme.

EQE : Le rendement quantique.

η : Le rendement.

IPCE : Incident Photon to Current Efficiency.

STC : Standard Test Conditions.

NOCT : est la température normale de fonctionnement de la cellule (Normal Operating Cell Temperature).

$P_{m,ideal}$: La puissance maximale idéale.

P_m : La puissance maximale.

V_m : Tension au point de puissance maximale.

I_m : Le courant au point de puissance maximale.

V_s : la tension de seuil.

I_0 : Courant de saturation de la diode.

I_d : le courant de saturation inverse.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

I_{ph} : Le photo-courant.

V_{th} : Le potentiel thermique.

V_{out} : La tension aux bornes de la jonction.

I_{out} : Courant fournie par la cellule.

R_{sh} : Résistance shunt du générateur solaire.

R_s : La résistance série.

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV.

P_{in} : Puissance incidente.

P_{in} / A : Densité de puissance incidente.

A : Section de la cellule.
Ns : Nombre des cellules en série.
Np : Nombre des cellules en parallèle.
T : la température absolue.
Tref : Température de référence 298.15(K).
Tc : Température de la cellule.
Ta : Température ambiante.
 μ_{icc} : Coefficient de température de court-circuit de la cellule (A/K).
 ϕ_{ref} : flux lumineux de référence 1000 (W/m²).
 ϕ : Flux lumineux (W/m²).
n : facteur de qualité de la diode.
K : constante de Boltzmann. (1.380649×10^{-23} J/K).
q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.602×10^{-19} C).
E : l'énergie du photon.
h : étant la constante de Planck.
C : la vitesse de la lumière.
 λ : la longueur d'onde.
ARC : le revêtement anti -reflet.
IR : infrarouge.
LIT : verrouillage en thermographie
PID : Dégradation Potentielle Induite.
EVA : Ethylène Vinyl Acetate.
ALT: Accelerated Life Testing.
DH: chaleur humide.
HAST : Test de fatigue fortement accéléré.

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Au cours des dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance très remarquable, surtout dans les quelques dernières années grâce aux différents facteurs stimulants « réduction des coûts de production et politiques de soutien ». Ces facteurs stimulants rendent le retour sur investissement d'une installation photovoltaïque de plus en plus intéressant.

Comme tous les autres processus industriels, un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à l'indisponibilité totale du système. Toutes ses conséquences défavorables vont évidemment réduire la productivité de l'installation, et donc réduire le profit de l'installation, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal. Pour assurer le bon fonctionnement du système photovoltaïque, il est nécessaire de traiter ses différents défauts à travers des méthodes de diagnostics. Ce qui nécessite un diagnostic dont l'objectif principal est de fournir un outil qui permet de détecter les pannes et de maximiser ainsi la production énergétique du system photovoltaïque.

Durant les dernières années, le photovoltaïque est devenu rapidement l'un des techniques d'énergie les plus importantes, comme l'énergie éolienne, hydraulique et autres. La production photovoltaïque est devenue une technique de l'énergie et la demande sur cette forme énergétique ne cesse de croître qui à titre d'exemple en l'an 2011 la capacité des installations de production PV est de 27.7 GW dans le monde alors que la capacité totale en perspective était de 67GW à la fin de la même année par exemple. L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante. Avec environ 125 000 000 milliards de watts de puissance solaire arrivant à la terre à n'importe quel moment, l'énergie solaire serait de facto la future source d'énergie renouvelable.

L'Algérie est un pays de grande surface saharienne vu l'important gisement solaire dont elle dispose d'une part et sa situation géographique de l'autre part, est appelée à investir davantage dans ce secteur lucratif . Les chercheurs veulent en profiter de ce type de ressources, alors en peut dire que notre pays est l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire dans le monde.

Dans ce travail de projet de fin de cycle Master, nous nous intéressons seulement à la détection et la localisation des défauts au niveau du panneau photovoltaïque. Notre objectif a créé un outil de diagnostic de détecter et localiser les défauts conduisant à une baisse de rendements.

Pour détecter et localiser des défauts conduisant à une baisse de production ou destruction partielle ou totale de l'installation. Le modèle développé au cours de cette étude est simulé sous le

logiciel Matlab / Simulink pour plusieurs types de défauts. Le travail est organisé en quatre chapitres, comme suit :

- Nous aborderons dans le premier chapitre des généralités sur les panneaux photovoltaïques, l'énergie renouvelable en général et spécifiquement en Algérie et la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi le principe de fonctionnement du système PV.
- Le deuxième chapitre, nous intéressons plus particulièrement à la modélisation mathématique des panneaux photovoltaïques (PV) et nous présentons les modèles électriques de la cellule PV en rappelant leurs différentes associations en vue de l'obtention d'une puissance suffisante et nous aborderons la Caractéristiques le $I= f(V)$, $P= f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.
- Le troisième chapitre présenter les différents défauts qui peuvent survenir au niveau des panneaux photovoltaïques.
- Le quatrième chapitre est la présentation de quelques méthodes de détection des défauts dans les systèmes PV, via le développement d'un algorithme de diagnostic qui est capable de discriminer tous les défauts choisis pour le diagnostic sous Matlab/Simulink.
- À la fin, nous présenterons une conclusion générale et quelques perspectives envisageables.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

I.1. Introduction

L'augmentation du coût des énergies fossiles d'un côté et la limitation de ses ressources de l'autre côté a conduit à l'apparition d'autres formes d'énergies telle que l'énergie photovoltaïque comme une solution prometteuse avec des avantages comme l'abondance, l'absence de la pollution et plus au moins la disponibilité de l'irradiation solaire au cours de l'année en tout endroit de globe terrestre.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur l'énergie renouvelable en général et spécifiquement en Algérie. Dans cette première partie de notre étude, nous sommes concentrés plus précisément sur l'énergie solaire photovoltaïque.

La deuxième partie sera dédiée à la présentation des généralités sur cellules photovoltaïques Aussi, nous présentons les différentes technologies de la cellule photovoltaïque.

I.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps où rétablit plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle des temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimités à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ». Le faible impact environnemental de leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies RSE des entreprises en matière de développement durable [1].

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables :

1. L'énergie solaire

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité [1].



Figure I.1 : Le panneau solaire photovoltaïque.

- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement servi à produire de l'électricité [1].



Figure I.2 : Panneau solaire thermique.

2. L'énergie éolienne

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes flottantes [1].

3. L'énergie hydraulique

Cette énergie provient de la force de l'eau en mouvement, Plusieurs technologies permettant d'exploiter cette énergie, les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [2].

4. La biomasse

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques) [1].

On en distingue trois catégories principales :

- Le bois ;
- Le biogaz ;
- Les biocarburants.

5. La géothermie

Cette énergie Utilisant la chaleur du sous-sol, la géothermie peut permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée) [2].

I.3. Situation énergétique en Algérie

La production mondiale de l'électricité est en forte augmentation, notamment pour répondre aux besoins des pays émergents. Actuellement la majorité de l'électricité produite dans le monde provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires. Mais cette tendance évolue et d'autres sources d'énergie comme les énergies renouvelables vont progressivement remplacer les énergies fossiles qui sont épuisables et polluantes [3].

Le soleil brille beaucoup sur l'Algérie. Partant de cette réalité lumineuse, l'état algérien a élaboré un programme de développement des énergies renouvelables. Il sera notamment axé sur l'énergie solaire et éolienne. Le but principal de cette nouvelle politique est de préparer le pays à l'ère post pétrolière.

Le ministre de la Transition énergétique et des énergies renouvelables, la production, dès le début de 2022, de près de 1.000 Mw d'énergie solaire en vue de réduire la dépendance aux sources de l'énergie fossile, de préserver l'environnement et d'avancer.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kwh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kwh /m²/an au nord et 2263 kwh/m²/an au sud du pays [3].

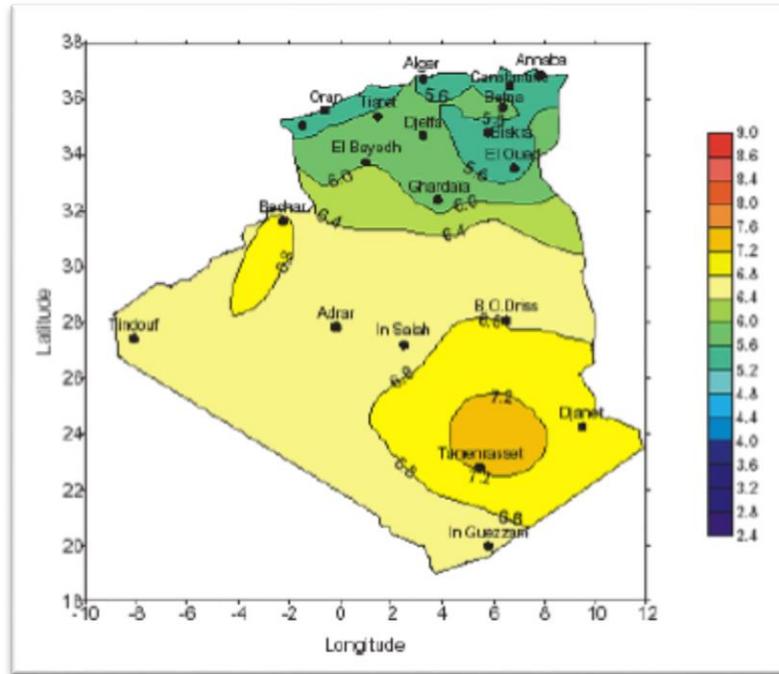


Figure I.3 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Juillet [1].

I.3.1. Potentiel solaire

Si on compare le potentiel solaire au gaz naturel en Algérie, le potentiel solaire Algérien est équivalent à un volume de 37000 milliards de mètres cubes, soit plus de huit fois les réserves du gaz naturel du pays, notant que le potentiel solaire est renouvelable contrairement au gaz naturel [4].

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie par région [5].

Régions	Côte	Haut-Plateaux	Sahara
Superficies (%)	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.3.2. Potentiel éolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et

qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée [6].

Tableau I.2 : Répartition de la puissance installée par ressource [5].

Ressource	Puissance installée (KW)
Solaire	2280 soit 97%
Eolien	73 soit 3%

I.4. Les énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

L'Algérie s'engage donc avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [6].

Ainsi, un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, il consiste à installer une capacité totale de 22000 MW, et le solaire photovoltaïque sera la principale source de production d'énergie propre car il représenterait 62% de la capacité totale projetée à 2030 [6].

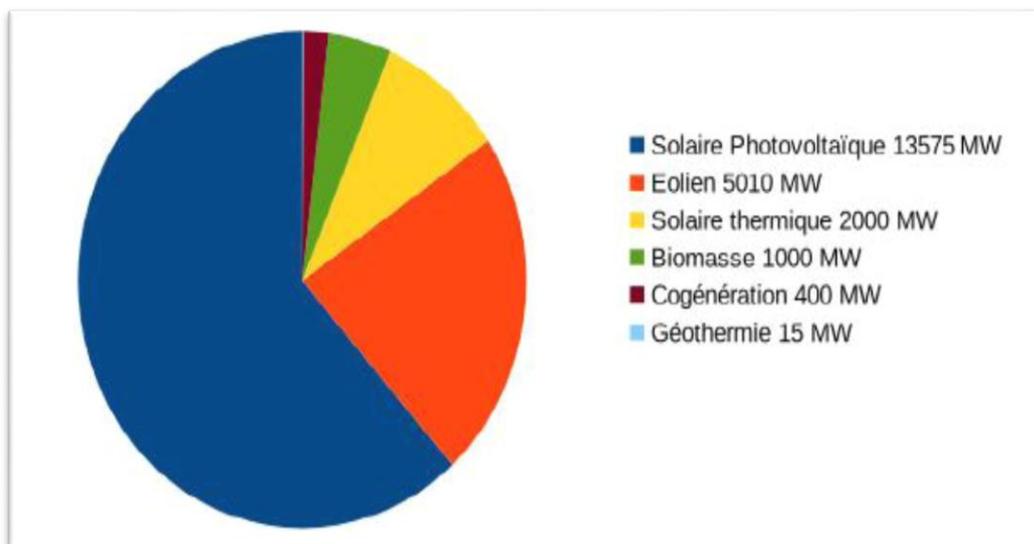


Figure I.4 : Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables [5].

La répartition de ce programme par filière technologique, se présente comme suit :

- Solaire Photovoltaïque : 13 575 MW ;
- Éolien : 5010 MW ;
- Solaire thermique : 2000 MW ;
- Biomasse : 1 000 MW ;
- Cogénération : 400 MW ;
- Géothermie : 15 MW.

Le projet "Sahara Solar Breeder (SSB)" inscrit dans le cadre d'une politique de développement durable, porte sur le développement des techniques du solaire. Le projet consiste en l'acheminement de l'énergie produite dans le Sud vers le Nord pour alimenter des stations de dessalement. Ce projet multilatéral associe un consortium d'universités Japonais, l'institut national de l'informatique, l'institut national de sciences des matériaux, l'université des sciences et de la technique d'Oran, l'université de Saïda et le centre de recherche sur l'énergie solaire d'Adrar.

Au niveau des deux universités de Saïda et d'Adrar, il sera question de faire implanter des plateformes technologiques dédiées à la production d'énergie solaire à partir de cellules photovoltaïques [5].

I.4.1. Potentiel solaire à la wilaya de Saïda

La wilaya de Saïda a bénéficié de la réalisation d'une nouvelle station d'électricité utilisant l'énergie solaire dans la commune d'Ain Skhouna (Saïda), considérée comme un important projet qui permettra la production de 30 mégawatts d'énergies renouvelables, réalisée dans un délai de onze mois par une entreprise allemande spécialisée dans l'installation des plaques photovoltaïques sur une superficie de plus de 40 hectares. La wilaya de Saïda, ville des hauts plateaux, jouit d'un potentiel soleil important et des températures considérables [7].

I.4.2. Centrales solaires en Algérie

- La centrale solaire photovoltaïque d'Ain El Melh (M'sila) avec une puissance de production de 20 MW ;
- La station d'énergie solaire photovoltaïque d'Oued El Keberit / Souk-Ahras avec une puissance de production de 15 MW ;
- La centrale photovoltaïque de la Nouvelle ville de Boughezoul théoriquement avec une capacité de production de 1 MW ;
- La mini-centrale solaire d'une puissance de production de 1.1 MW à la wilaya de Ghardaïa ;

- La centrale électrique dans la région de Sedret-Leghzal (Ouest de Naama) d'une capacité de production de 20 MW.

I.5. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité, On utilise pour cela une cellule photovoltaïque. Le soleil est à l'origine de toutes les formes d'énergies présentes sur terre (à l'exception de l'énergie nucléaire).

Le rayonnement solaire apporte à la terre de la chaleur et de la lumière. Cette énergie peut être captée de trois façons : en utilisant directement la chaleur (chauffage solaire direct, capteurs thermiques), en transformant la lumière en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en transformant la chaleur en électricité (centrales électriques solaires) [8].

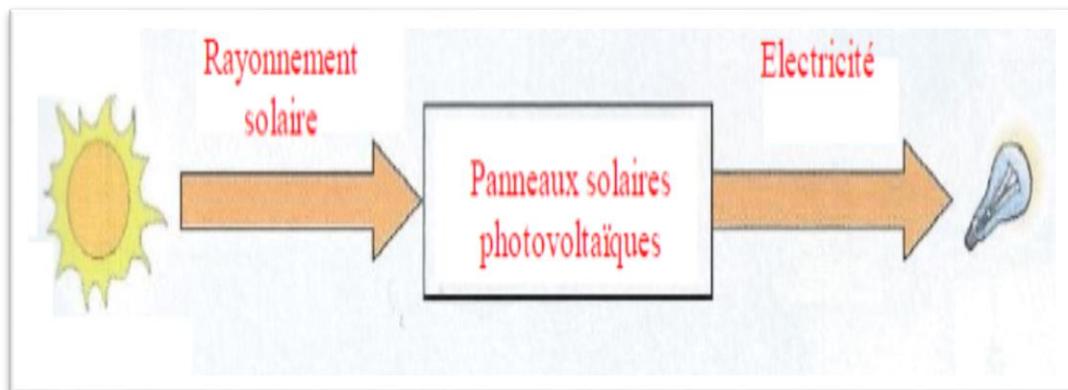


Figure I.5 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque [9].

I.5.1. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont [10] :

I.5.1.1. Avantages

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

- Entretien minimal ;
- Aucun bruit.

I.5.1.2. Inconvénients

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

I.6. Générateur photovoltaïque (GPV)

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel représenté sur la figure (I.6). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [11].

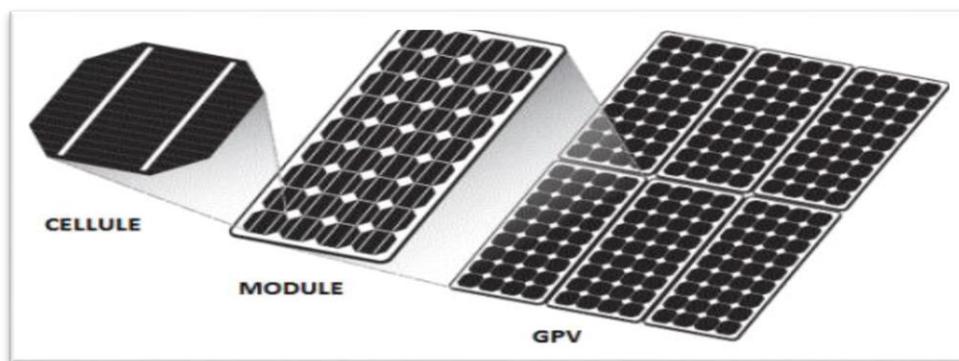


Figure I.6 : Composants d'un GPV.

I.7. Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est l'opération que subit certain matériau quand ils sont soumis au rayonnement solaire pour produire de l'électricité.

Dans la conversion photovoltaïque trois phénomènes physiques sont mis en jeu :

- L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- La collecte des charges.

Le matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [12].

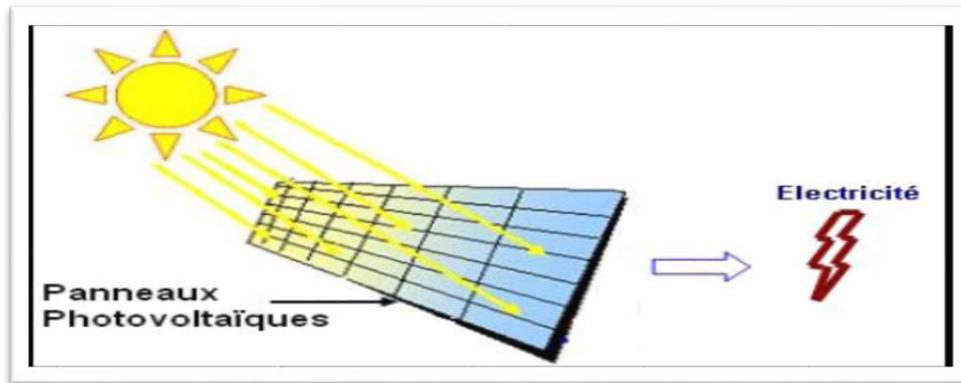


Figure I.7 : Conversion de l'énergie solaire en électricité [1].

I.8. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium, tellurure de cadmium, etc.

Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, pris en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

I.8.1. Historique

Découvert en 1839 par le physicien A. Becquerel, l'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 60 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales. L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité par les cellules PV [8].

I.8.2. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique, quand il expose à la lumière (photons), il génère une tension électrique (volt) d'où vient l'effet photovoltaïque.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homo jonction P-N) ou entre deux matériaux différents (hétérostructures), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est le suivant : les « grains » de lumière qu'on appelle photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal.

Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant.

La production d'électricité est proportionnelle à la surface des modules photovoltaïques exposés au soleil et à l'intensité lumineuse. Dépendante des conditions météorologiques, la production est donc aléatoire. L'énergie peut être utilisée en direct ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure [13].

I.8.3. Description

Un panneau photovoltaïque est constitué d'une série de cellules photovoltaïques, formées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, l'un ou l'autre dopée positivement (P) et l'autre négativement (N). C'est une jonction PN. Lorsqu'un électron est arraché, il se forme à la place un « trou », se comportant comme une charge positive.

L'électron et le trou s'échappent de part et d'autre de cette jonction PN (les électrons vers N et les trous vers P), créant une différence de potentiel (ce que l'on mesure en volts). Une cellule photovoltaïque produit donc ainsi du courant électrique continu.

Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre. Il existe différents types de cellules et de procédés de fabrication. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium [14]. Le schéma ci-dessous montre l'illustration d'une cellule photovoltaïque.

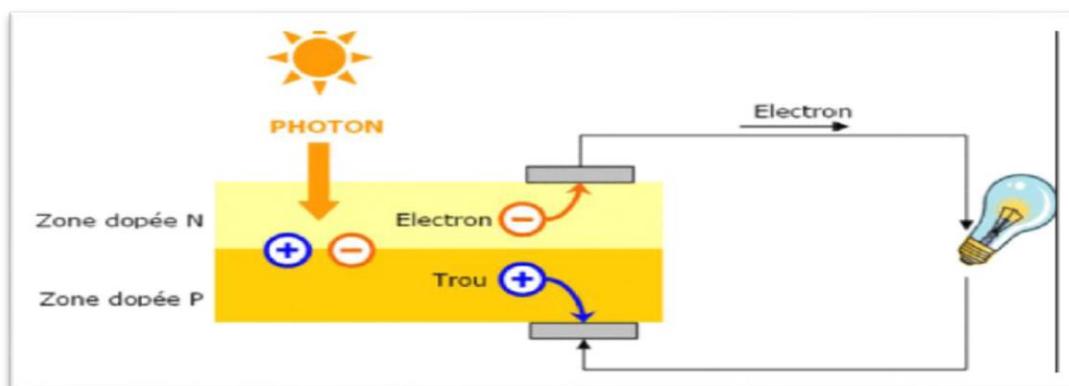


Figure I.8 : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque [15].

I.9. Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de développement. Les principales techniques industrialisées en quantité à ce jour sont le silicium mono ou polycristallin (plus de 80% de la production mondiale).

Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium polycristallin mais de rendement plus élevé. Le silicium est aussi utilisé dans la technique dite amorphe, lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui sera projeté sur une feuille de verre.

✓ Cellules monocristallines

Chaque cellule est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule présente le plus haut pouvoir de conversion.

Caractéristiques [9] :

- Très bon rendement : 14 à 20 % ;
- Durée de vie : importante (30 ans) ;
- Coût de fabrication : élevé ;
- Puissance : 100 à 150 W ;
- Rendement faible sous un faible éclairement ;
- Perte de rendement avec l'élévation de la température ;
- Fabrication : élaborée à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ;
- Couleur bleue uniforme.

Part de marché : 43 %.

✓ Cellules polycristallines

Les cristaux de silicium qui les composent sont bien visibles. Leur rendement est légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur cout moindre.

Caractéristiques [9] :

- Bon rendement : 11 à 15 % ;
- Durée de vie : importante (30 ans) ;
- Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins ;
- Puissance : 100 W ;
- Rendement faible sous un faible éclairement ;
- Perte de rendement avec l'élévation de la température ;

- Fabrication : élaborée à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux ;
- Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Part de marché : 47 %.

✓ **Cellules amorphes**

Ce type de cellule ne possède pas de structure cristalline. Leur cout de fabrication et leur rendement sont légèrement inférieurs par rapport aux autres types cités précédemment. Elles sont généralement utilisées dans des appareils portables (calculatrices, ...). Les techniques de production les plus récentes permettent de fabriquer des cellules à couches minces de grande surface, qui peuvent par exemple être utilisées dans les éléments de façade.

Caractéristiques [9] :

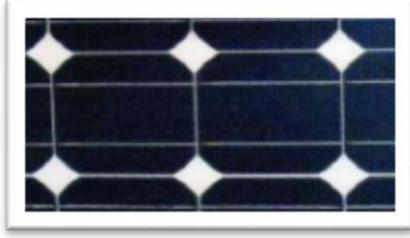
- Rendement faible : 5 à 9 % ;
- Durée de vie : assez importante (20 ans) ;
- Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ;
- Puissance : 50 W ;
- Fonctionnement correct avec un éclairage faible ;
- Peu sensible aux températures élevées ;
- Utilisables en panneaux souples ;
- Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium ;
- Rendement faible en plein soleil ;
- Performances diminuant avec le temps ;
- Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Part de marché : 10 %.

✓ **Cellules en couche mince**

La technique « couche mince » désigne un type de cellule (ou module) obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre).

Tableau I.3 : Différents types de cellules photovoltaïques.

Type de la cellule	Texture
Cellule en silicium Monocristallin	
Cellule en silicium Poly cristallin	
Cellule en silicium Amorphe	

I.10. Caractéristiques d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie solaire en énergie électrique. C'est une des applications les plus connues des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium.

Une cellule photovoltaïque suit une loi $I=f(V)$ bien particulière que l'on nomme caractéristique. Les valeurs I_{CC} (courant de court-circuit) et V_{CO} (Tension de circuit ouvert) sont des valeurs caractéristiques propres à chaque cellule. Il faut savoir que ces valeurs et l'allure de la caractéristique dépend de nombreux autres facteurs comme le type de semi-conducteur, d'éclairement, la température de la cellule.

Une cellule photovoltaïque ne délivre une puissance que si elle branche sur une charge. Il suffit alors de calculer le point de fonctionnement pour déterminer la valeur du courant et de la tension délivrée par la cellule. Il existe une valeur particulière de la charge qui maximise la puissance. Ce point de fonctionnement se nomme le MPP (Maximum Power Point) [16].

$$P_{MPP} = V_{MP} \times I_{MP} \quad \text{I.1}$$

I.11. Système de protection

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association

des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques :

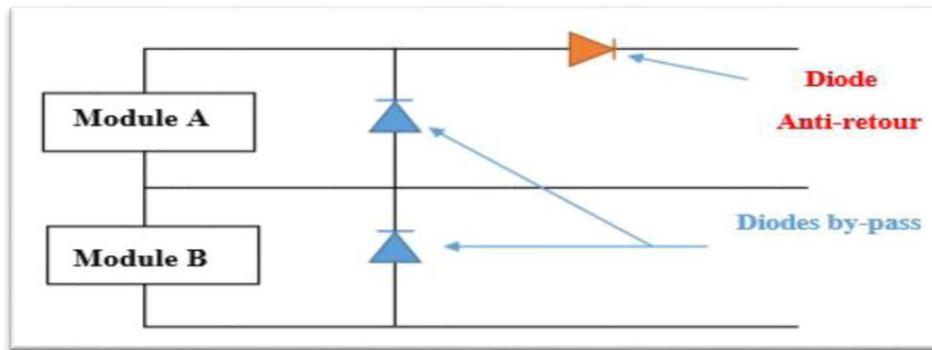


Figure 1.9 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [1].
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante [1].

I.12. Différents domaines d'application

- Domaine spatial ;
- Habitation isolée ;
- Industrie isolée ;
- Centrale de puissance ;
- Résidence urbaine ;
- Biens de consommation.

I.13. Installation des panneaux solaires photovoltaïques

Les installations photovoltaïques sont constituées d'alignements de panneaux montés sur des châssis en bois ou en métal.

I.13.1. Les différents types d'installation d'un système PV

I.13.1.1. Installations autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Comme l'indique la figure (I.10) représentant un exemple du système PV autonome, la présence d'éléments de stockage est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité [17].

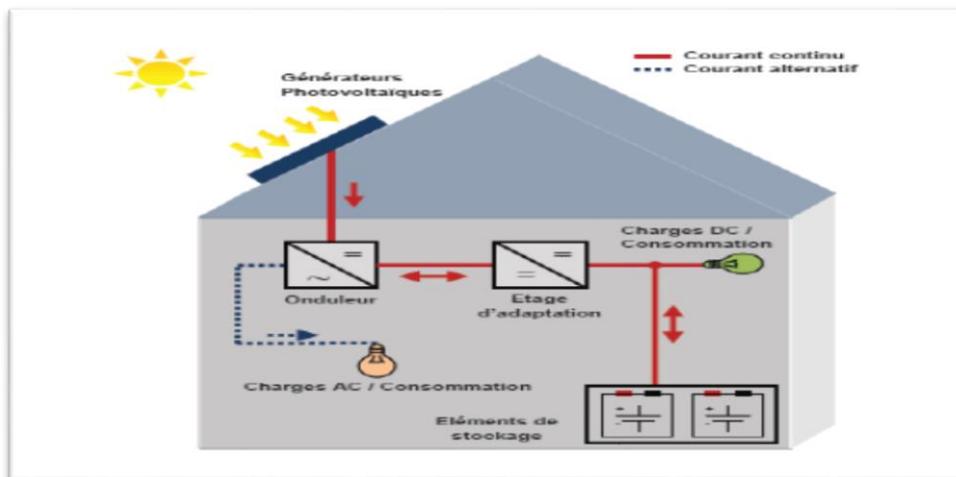


Figure I.10 : Système PV autonome [18].

I.13.1.2. Système raccordée au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur continu/alternatif (DC/AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injectée dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [17]. La figure (I.11) représente un système PV connecté au réseau.

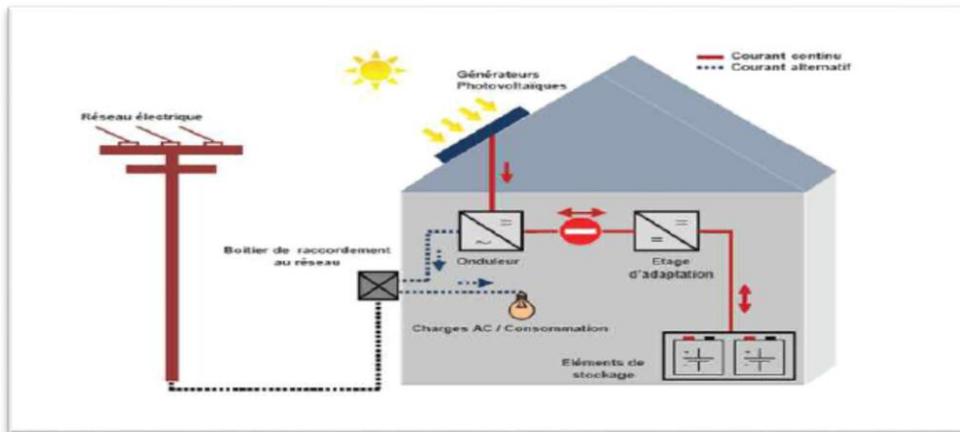


Figure I.11 : Système PV raccordée au réseau [18].

I.13.1.3. Les installations fixes

Les installations fixes se font actuellement plutôt sur les toits des logements ou des bâtiments, soit en intégration de toiture, soit en surimposition. Dans certains cas, on pose des panneaux verticaux en façade d'immeuble, cette inclinaison n'est pas optimale pour la production d'électricité, par exemple la position fixe optimale étant une inclinaison de 30° par rapport à l'horizontale, mais comme ces panneaux remplacent le revêtement de façade, l'économie réalisée sur le revêtement compense une production plus faible [19].

I.13.1.4. Les installations mobiles ou orientables

Les installations mobiles, appelées suiveurs ou « trackers », sont équipées d'une motorisation leur permettant de suivre la course du soleil pour optimiser leur exposition et donc leur rendement. Elles nécessitent un investissement et un entretien plus importants pour une productivité supérieure. Les suiveurs permettent d'augmenter, à puissance équivalente, la production d'électricité notamment dans les régions où la proportion de rayonnement direct est la plus importante [19].

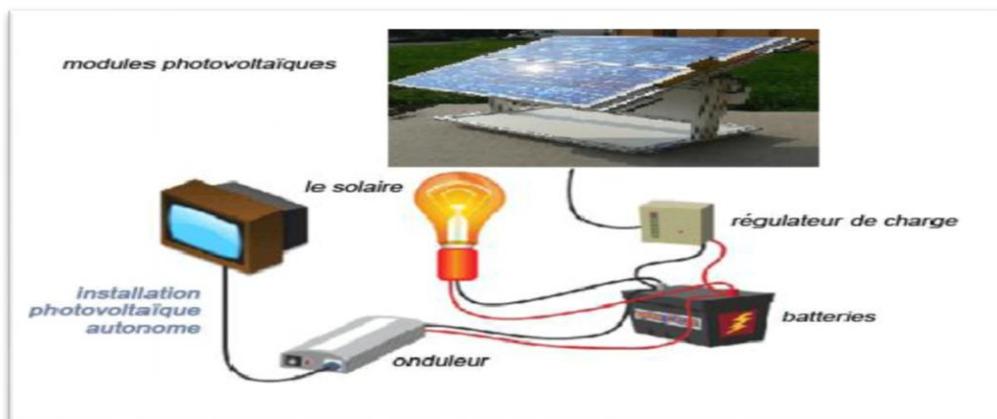


Figure I.12 : Schéma d'une installation photovoltaïque mobile.

I.13.1.5. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes PV-AC où les panneaux solaires sont combinés avec d'autres sources d'énergie, comme par exemple une éolienne ou un groupe électrogène. Dans le cas d'un système hybride avec éolienne, l'énergie produite par celle-ci qui possède son propre contrôleur vient compléter la charge des batteries.

Sa production étant plus aléatoire que celle des panneaux solaires, elle complète efficacement un générateur photovoltaïque pour des applications particulièrement gourmandes en électricité, qui ne nécessitent pas de fonctionner de façon régulière, mais au gré du vent.

À son démarrage, il deviendra la source principale d'alimentation de la maison tout en complétant la charge des batteries au travers du convertisseur-chargeur. Lorsque le groupe s'arrêtera, le système basculera automatiquement sur les batteries.

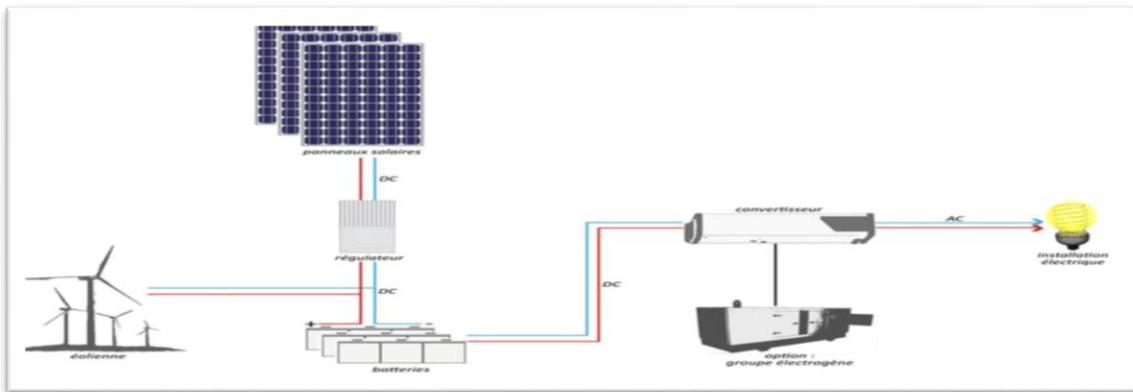


Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'un système PV hybride.

I.14. Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont devenus indispensables et s'utilisent à divers usages, le fait que ces derniers ont beaucoup d'avantages, cela n'empêche pas qu'ils ont des inconvénients [16].

I.14.1. Avantages des panneaux photovoltaïques

La technique photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt ;

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- Enfin, la technique photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.14.2. Inconvénients des panneaux photovoltaïques

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28% ;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru ;
- La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associées soient judicieusement choisis.

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur les énergies renouvelables en générale. Nos études centrées sur l'énergie photovoltaïque, c'est l'énergie la plus intéressante elle est disponible avec un immense potentiel.

Malgré les conditions météorologiques qui influent sur le rendement des panneaux solaires photovoltaïques et le vieillissement de ces derniers, cette énergie est considérée comme une option stratégique et environnementale.

L'Algérie qui dispose d'un immense rayonnement solaire est qualifié d'être parmi les leaders dans le domaine de l'énergie solaire bien sûr avec tous les moyens humains et matériels et une vraie politique qui incarne cette tendance vers les énergies renouvelables.

CHAPITRE II

MODELISATION MATHÉMATIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

II.1. Introduction

La modélisation mathématique des phénomènes physiques d'origine photovoltaïque est essentielle, permet de caractériser le comportement d'une cellule photovoltaïque, d'établir une relation directe entre les différents composants de la cellule et de mettre un rapport entre l'énergie produite par le module PV.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes modèles des cellules solaires, suivi d'une étude détaillée du modèle standard d'une diode. La détermination de ces paramètres est essentielle pour le développement et la performance d'analyse d'un tel équipement, également les modèles de la puissance générée par un module photovoltaïque.

En ce qui concerne la modélisation des cellules PV, l'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches. La première nécessite d'effectuer des mesures sur les cellules PV une fois installé. La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs.

II.2. Les modèles électriques de la cellule PV

La partie modélisation du système photovoltaïque est réalisée dans le but de générer des indicateurs de défauts (symptômes) pour notre système de diagnostic. L'objectif du système de diagnostic était de détecter et localiser des défauts des cellules PV.

II.2.1. Modèle d'une cellule PV idéale

Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, etc.). L'expérience montre qu'une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s .

Ce modèle décrit le comportement de la cellule PV par le circuit équivalent montré dans la figure (II.1). L'avantage majeur de ce modèle le nombre limité des paramètres qui peuvent être facilement trouvés dans les datasheets des constructeurs [13].

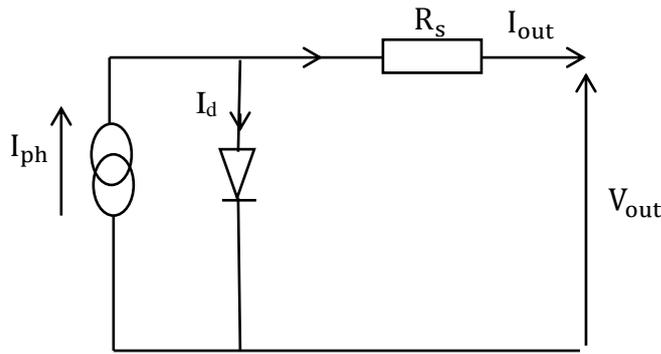


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{II.1}$$

Avec :

- I_{ph} : Le photo-courant ;
- R_s : La résistance série ;
- I_d : le courant de saturation inverse ;
- V_{out} : La tension aux bornes de la jonction.

Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_{th}}\right) - 1 \right] \tag{II.2}$$

Avec :

- I_{sat} : Le courant de saturation en Ampère (A) ;
- V_{th} : Le potentiel thermique en Volt (V). Il est donné par :

$$V_{th} = \frac{A * K * T}{q} \tag{II.3}$$

- K : la constante de Boltzmann (1.380649×10^{-23} J/K) ;
- A : le facteur d'idéalité de diode ;
- T : la température absolue en Kelvin (K) ;
- q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.602×10^{-19} C).

Sous éclairement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad \text{II.4}$$

II.2.2. Modèle d'une cellule PV à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque représentée sur la figure (II.2). C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} et une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN.

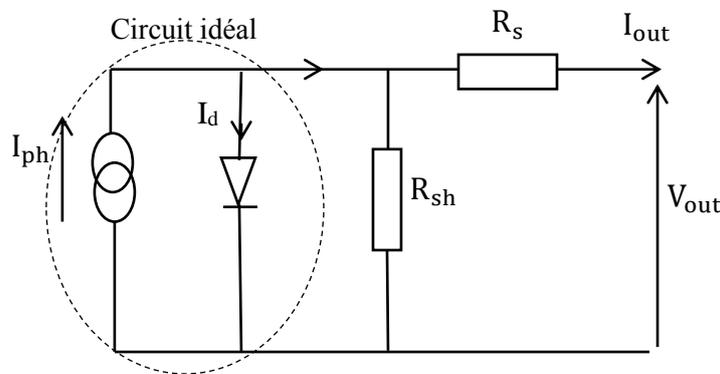


Figure II.2 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

- R_{sh} : La résistance parallèle.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{II.5}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}}\right) \quad \text{II.6}$$

II.2.3. Modèle d'une cellule PV à deux diodes

Nous avons, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction P-N. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau [20]. Le schéma de la cellule photovoltaïque représenté sur de la figure (II.3). Cette dernière représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{sat1} et I_{sat2} et de facteurs de diode $d1$ et $d2$, une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. La résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact

semi-conducteur métal. La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction.

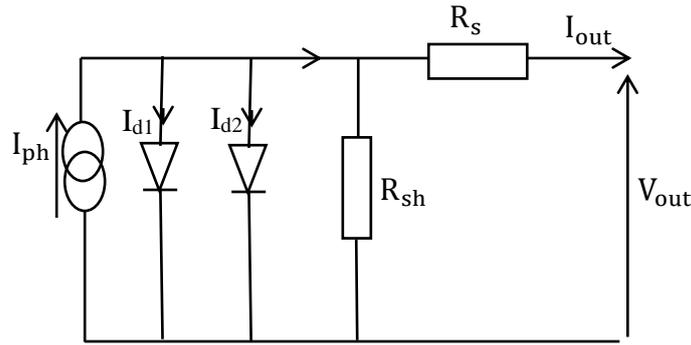


Figure II.3 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \tag{II.7}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{sat2} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_{th}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right) \tag{II.8}$$

- n : le facteur non d'idéalité de diode.

II.3. Paramètres pour la caractérisation de la cellule photovoltaïque

Le modèle de circuit équivalent qui a été initialement développé pour comprendre le caractéristique courant-tension (I-V) des cellules PV. Ce modèle utilise plusieurs éléments de base d'un circuit électrique qui représentent chacun des processus différents dans le fonctionnement d'une cellule PV.

Pour tenir compte des limitations de la cellule PV et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} .

La figure (II.2), montre un schéma du circuit équivalent, qui se compose d'une source de courant, d'une diode, et d'une résistance R_{sh} connectée en série avec une résistance R_s .

II.3.1. Caractéristiques $I = f(V)$, $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (II.4), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclaircissement et température ambiante).

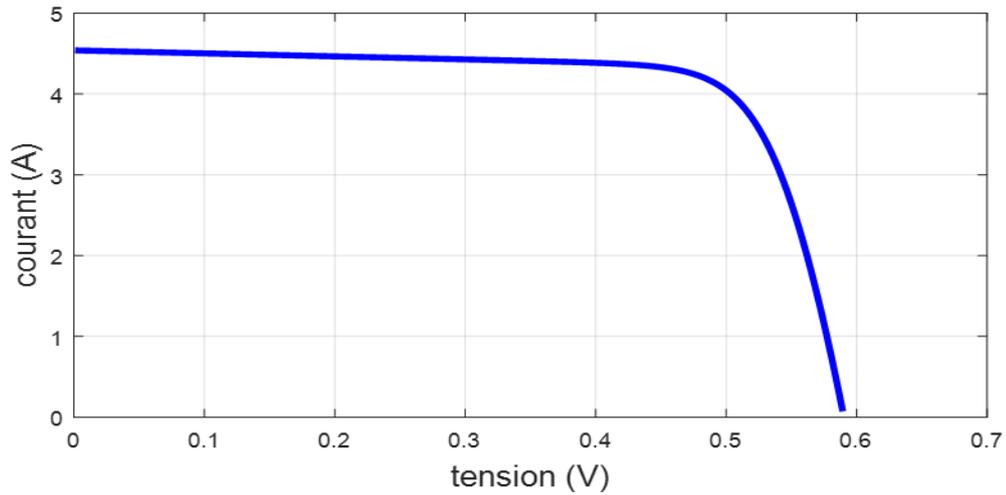


Figure II.4 : Courbe $I=f(V)$ d’une cellule photovoltaïque.

La figure (II.4) montre bien qu’une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension).

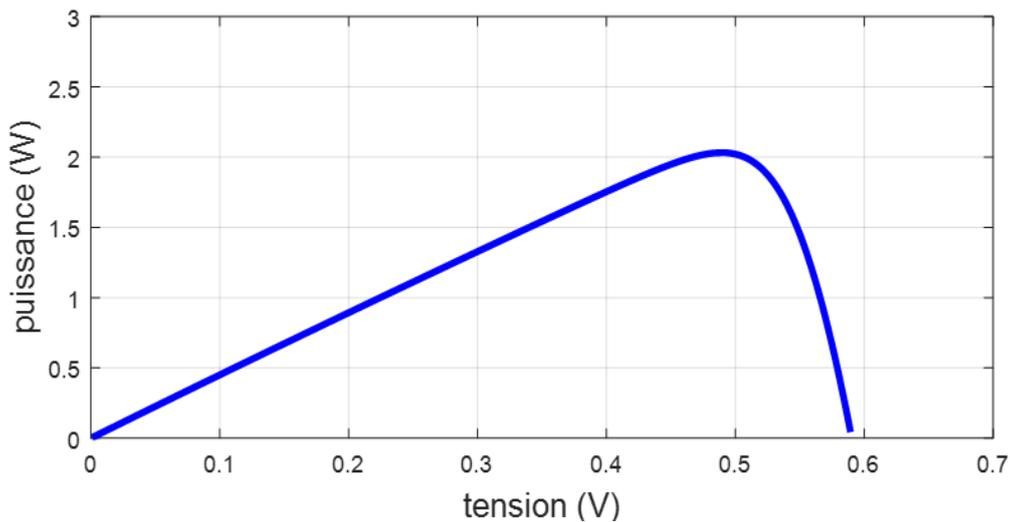


Figure II.5 : Courbe $P=f(V)$ d’une cellule photovoltaïque.

II.3.2. Le courant de court-circuit

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croit avec l’intensité d’illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d’onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. Le modèle électrique réel d’une cellule solaire se compose d’une diode, de deux résistances et d’un générateur de courant. La relation entre la tension V (Volts) et le courant I (Ampères) est donné par l’équation suivant d’après la Figure (II.2).

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q \times V - q \times R_s \times I}{n \times K \times T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s \times I}{R_{sh}}\right) \quad \text{II.9}$$

Avec :

- I : Courant de court-circuit ;
- I_{ph} : Photo courant générer par le générateur solaire sous éclairement ;
- I_{sat} : Courant de saturation ;
- q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.602 \times 10^{-19} C$);
- R_s : Résistance série du générateur solaire ;
- n : facteur de qualité de la diode ;
- K : constante de Boltzmann ($1.380649 \times 10^{-23} J/K$) ;
- T : température absolue en (Kelvin) de la cellule) ;
- V : tenson imposée à la diode ;
- R_{sh} : Résistance shunt du générateur solaire.

Photo courant générer par le générateur solaire sous éclairement I_{ph} :

$$I_{ph} = (I + (T - 298.15)) \frac{G}{G_{ref}} \quad \text{II.10}$$

Avec :

$$G = 1000 \text{ W/m}^2.$$

II.3.3. Puissance maximale

Pour une cellule idéale, la puissance maximale idéale $P_{m.idial}$ aux bornes de la cellule photovoltaïque correspond donc à la tension du circuit ouvert multipliée par le courant de court-circuit.

$$P_{m.idial} = V_{co} \times I \quad \text{II.11}$$

- $P_{m.idial}$: La puissance maximale idéale.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus arrondie et la tension au point de puissance maximale V_m est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_m est inférieur pour cette même tension au courant de court-circuit I_{cc} . L'expression de la puissance en ce point est :

$$P_m = V_m \times I_m \quad \text{II.12}$$

Avec :

- P_m : La puissance maximale(W) ;
- V_m : Tension au point de puissance maximale(V) ;
- I_m : Le courant fourni(A).

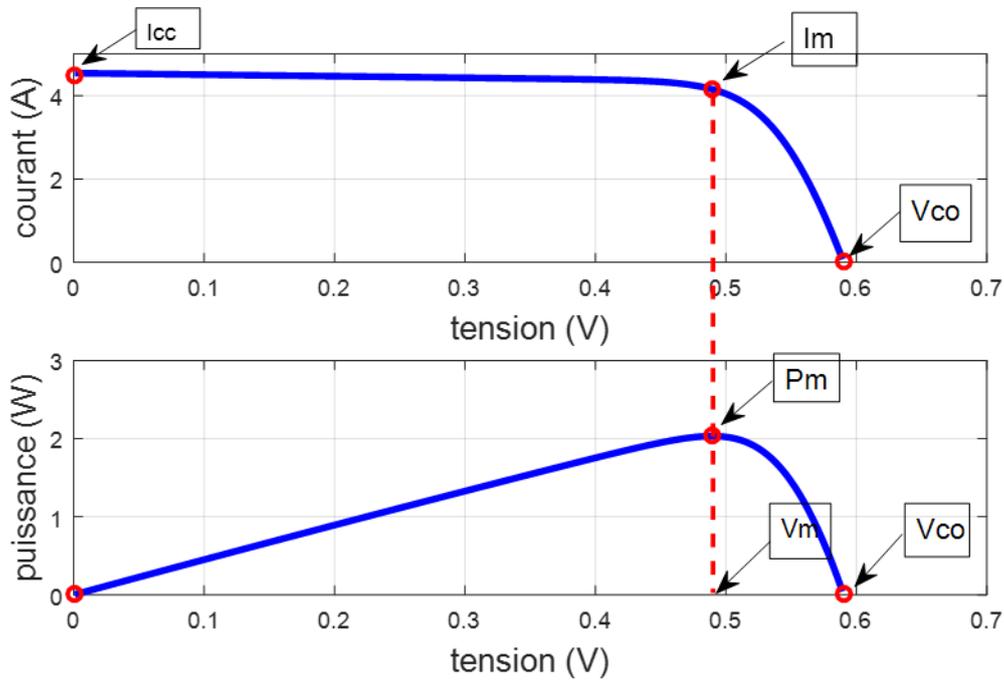


Figure II.6 : Points de la puissance maximale P_m et $P_{m.idial}$.

II.3.4. Courant fournie par la cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque figure (II.2) peuvent être schématisées ci-dessous : pour une cellule idéale l’équation de courant, est :

$$I_{out}(V_{out}) = I_{ph}(\varphi) - I_d(V) \tag{II.13}$$

Avec :

- I_{out} : Courant fournie par la cellule (A) ;
- V_{out} : Tension aux bornes de la jonction (V) ;
- I_{ph} : Courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux (φ).

$$I_{ph}(\varphi) = \frac{I_{cc} * \varphi}{\varphi_{ref}(\mu_{I_{cc}}((T_c - T_{ref}) + 1))} \tag{II.14}$$

Avec :

- I_{cc} : Courant de court-circuit mesuré aux conditions STC(A) ;
- φ_{ref} : Flux lumineux de référence 1000 (W/m²) ;
- T_{ref} : Température de référence 298.15(K) ;

- T_c : Température de la cellule (K) ;
- μ_{ICC} : coefficient de température de court-circuit de la cellule (A/K).

Et :

$$I_d(V) = I_s + \left(\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right) \quad \text{II.15}$$

Avec :

- I_s : Courant de saturation de la diode (μA) ;
- A : Facteur de qualité de la diode ;
- q : Charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C) ;
- K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

II.3.5. La température de la cellule

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_c = T_a + \frac{\varphi(N_{oct} - 20)}{800} \quad \text{II.16}$$

Avec :

- φ : Flux lumineux (W/m^2) ;
 - N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule donnée par le constructeur (K) ;
 - T_a : Température ambiante (K).
- ✓ **Influence de la température sur la caractéristique (I-V) et (P-V)**

La température T et l'irradiation E ont un impact direct sur les performances d'une cellule photovoltaïque comme illustre la figure (II.9) Quand la température des cellules augmente la tension de circuit ouvert diminue sensiblement tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement. Alors on peut remarquer que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé, au contraire d'un environnement chaud [13].

La température du GPV dépend non seulement de la température ambiante mais aussi des effets de l'irradiation de la cellule. Puisque seule une petite fraction de l'insolation qui touche le module est convertie en électricité, la plupart de l'énergie incidente est absorbée et convertie en chaleur [24].

Pour aider les concepteurs de systèmes à tenir compte des variations de performances de la cellule avec la température, les fabricants fournissent souvent un indicateur appelé NOCT (la température normale de fonctionnement de la cellule).

Quand la température des cellules augmente la tension de circuit ouvert diminue sensiblement tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement [25]. Alors on peut remarquer que les cellules PV ont de meilleures performances dans un environnement froid avec ciel dégagé, au contraire d'un environnement chaud.

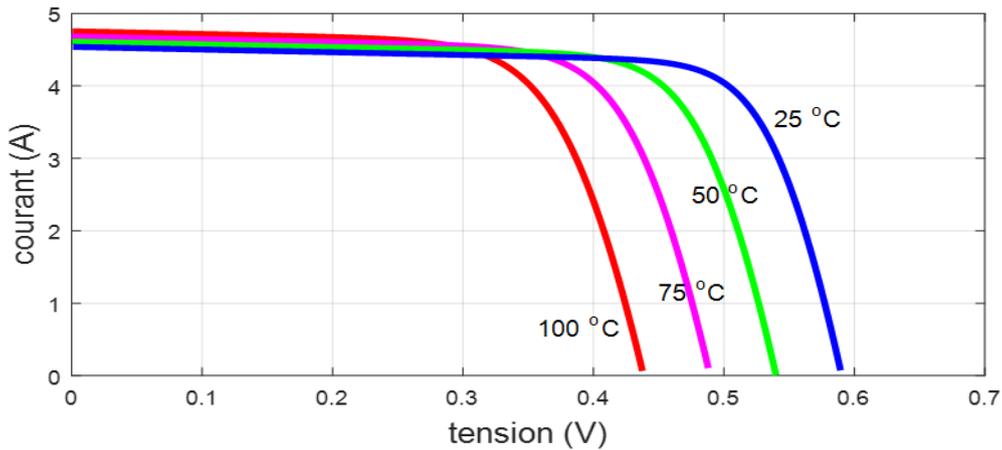


Figure II.7 : Courbes I=f(V) sous différentes températures.

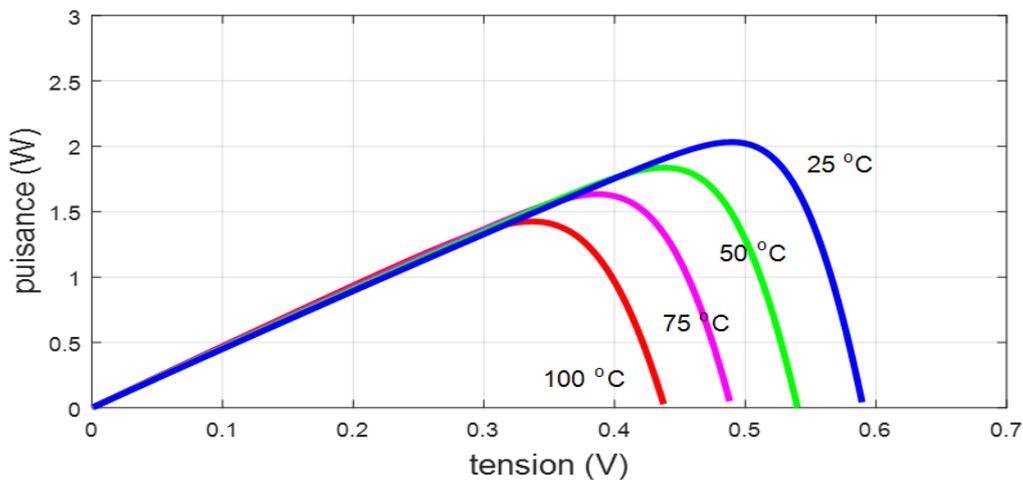


Figure II.8 : caractéristique P= f(V) sous différentes températures.

✓ **Influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) et (P-V)**

Le niveau d'éclairement correspond à l'intensité de la lumière incidente perpendiculairement à la surface de la cellule photovoltaïque. C'est la puissance, mesurée en W/m² (watts par mètre carré). Nous utiliserons G pour représenter le niveau d'éclairage de la batterie (ou module).

Le courant électrique délivré par la cellule dépend en grande partie du niveau de luminosité. Nous avons découvert que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement. Quant à la tension, ce niveau de contraste est peu sensible.

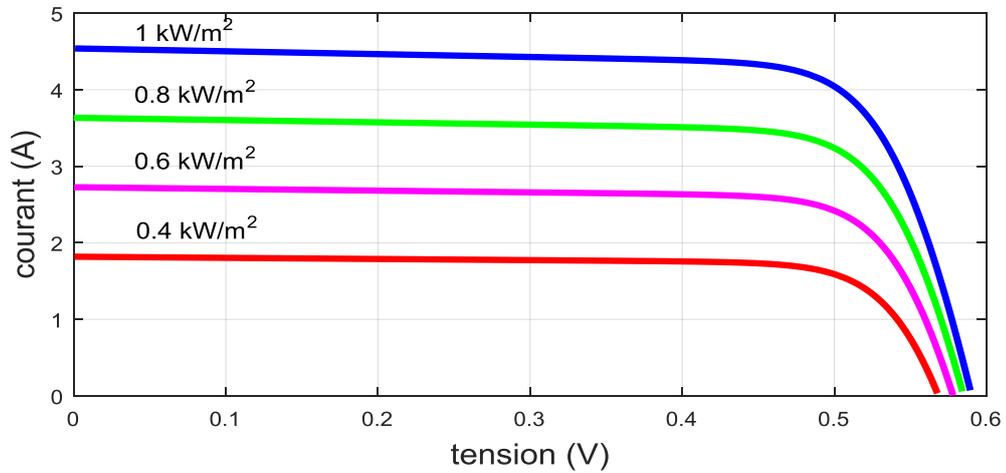


Figure II.9 : Courbes $I=f(V)$ sous différents niveaux d'éclairement.

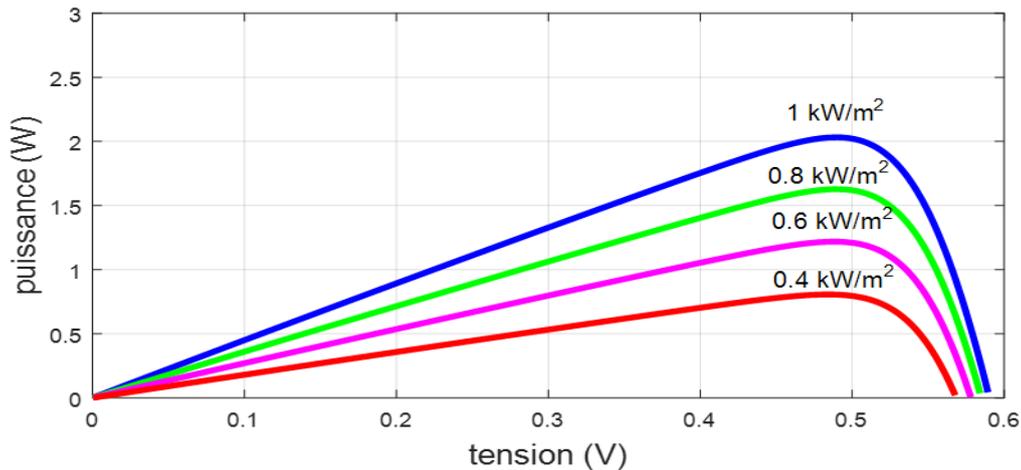


Figure II.10 : Courbes $P=f(V)$ sous différents niveaux d'éclairement.

II.3.6. Puissance crête d'une cellule PV

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit de la partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension donc la puissance maximale est générée par la cellule.

La puissance crête d'une photopile, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak), c'est la puissance mesurée dans les conditions de test standard "STC", tel que l'éclairement $G=1000\text{W/m}^2$, la température $T= 25^\circ\text{C}$, avec une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5 [26].

II.3.7. Tension de circuit-ouvert

Tension de circuit-ouvert V_{co} est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [26] :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} + \left(\ln \frac{I}{I_s} + 1 \right) \quad \text{II.17}$$

II.3.8. Facteur de forme

On appelle facteur de forme (FF) l'efficacité de la cellule solaire, c'est le facteur de remplissage (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite (P_m) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit (I_{cc}, V_{co})[27]. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad \text{II.18}$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70% [26].

II.4. Rendement de conversion

Le rendement η des cellules PV, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance électrique maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [26] :

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad \text{II.19}$$

- P_{in} : Puissance incidente (W) ;
- P_{in} : Densité de puissance incidente (W/m^2).

Si l'on désire avoir une cellule PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à d'une cellule PV de meilleur rendement.

II.5. Le rendement quantique

Le rendement quantique (EQE) est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency) [30]. Le rendement quantique externe est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{hc}{e\lambda} \quad \text{II.20}$$

- $\varphi(\lambda)$: est le flux lumineux incident ;
- e : la charge de l'électron ;
- E : l'énergie du photon.

Avec :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{II.21}$$

- h : étant la constante de Planck ;
- c : la vitesse de la lumière ;
- λ : la longueur d'onde.

Le rapport $\frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)}$ est appelé « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée $SR(\lambda)$. Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{E(\lambda)}{e} = SR(\lambda) \frac{hc}{e\lambda} \quad \text{II.22}$$

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency) [30]. En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient :

$$IPCE(\lambda) = 1.24 \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad \text{II.23}$$

II.6. Groupement des cellules ou des Modules photovoltaïques

La cellule solaire de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système photovoltaïque. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées contre les agents extérieurs. Plusieurs

modules forment un strings PV et plusieurs string PV forment un champ ou générateur PV1, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie), des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur, etc.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées [31]. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitée. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_v = N_s V_{pv} N_p I_{pv} \quad \text{II.24}$$

Avec :

- P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV ;
- V_{pv} : La tension à la sortie du GPV ;
- I_{pv} : Le courant de sortie du GPV.

II.6.1. Association en série en additionnant des cellules ou des modules identiques en série

Ce système d'association est généralement le plus fréquemment utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible [27].

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble [29]. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant $N_s = 36$ cellules en série ($V_{co(N_s)} = 0.6V * 36 = 21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V.

Association en série en additionnant (N_s) des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement au nombre des cellules /modules en série.

$$V_{co(N_s)} = N_s \times V_{co} \quad \text{II.25}$$

$$I_{(N_s)} = I \quad \text{II.26}$$

Avec :

- $V_{oc(N_s)}$: La somme des tensions en circuit-ouvert des cellules en série ;
- $I_{(N_s)}$: Courant de court-circuit des cellules en série ;
- N_s : Nombre des cellules en série.

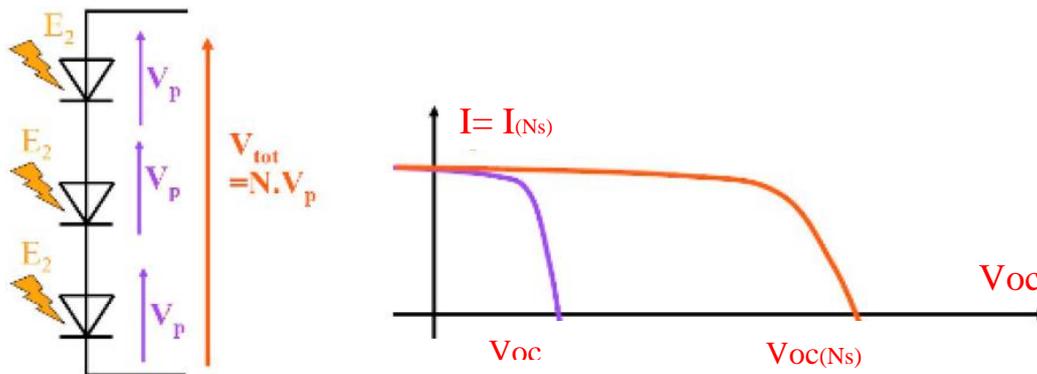


Figure II.11 : Cellules identiques en série [24].

II.6.2. Association en parallèle En additionnant des modules identiques en parallèle :

Association en parallèle en additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, mais l'intensité du courant augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche,

$$I_{(N_p)} = N_p \times I \tag{II.27}$$

$$V_{co(N_p)} = V_{oc} \tag{II.28}$$

Avec :

- $I_{(N_p)}$: La sommes des courants en court-circuit en parallèle ;
- $V_{co(N_p)}$: La tension à circuit-ouvert des cellules en parallèle ;
- N_s : Le nombre des cellules en parallèle.

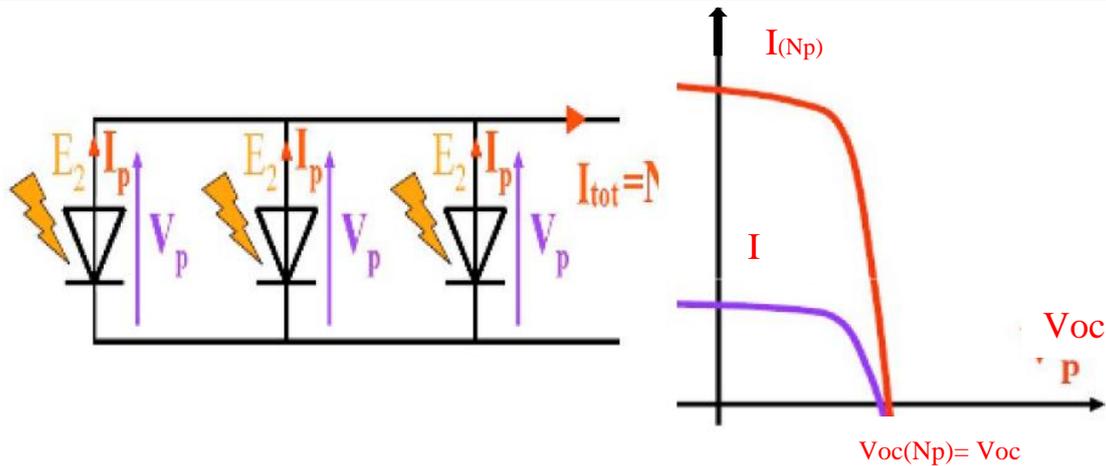


Figure II.12 : Cellules identiques en parallèle [24].

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grandes surfaces et de meilleur rendement, soit associé en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires [21]. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (N_s, N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la cellule solaire photovoltaïque à une diode, qui est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque.

L'objectif de ce chapitre est orienté vers les caractéristiques (I-V) des cellules et la conversion photovoltaïque leurs paramètres les plus usuels. L'assemblage des modules photovoltaïques nous permet de réaliser le module photovoltaïque adéquat pour une alimentation voulue. L'ensoleillement et la température sont des facteurs influents sur le rendement d'un générateur photovoltaïque. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Certains parmi eux constitueront les jalons de notre étude sur le diagnostic des défauts fréquents chez les panneaux solaires et seront traités ultérieurement.

CHAPITRE III

DEFAUTS LIES AUX

PANNEAUX

PHOTOVOLTAÏQUES

III.1. Introduction

Dans une station solaire photovoltaïque, des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques sont installées et placées selon les exigences du site, et pour avoir de l'énergie électrique utilisable, plusieurs dispositifs rentrent en vigueur (convertisseurs, câblages, système de protection ...) afin de réaliser un système complet qui permet de produire le maximum d'électricité et d'assurer une bonne distribution et stockage de cette dernière. Et comme toutes installations industrielles existantes une station solaire photovoltaïque comporte plusieurs défauts et anomalies affectant négativement la rentabilité de la station, ils sont liés aux défauts des différents composants de la station et aux perturbations liées aux conditions naturelles, parfois ces perturbations et défauts peuvent causer le dysfonctionnement total de la station.

Dans ce chapitre nous présentons des défauts rencontrés dans les panneaux photovoltaïques et leur classification selon leur impact sur les paramètres de panneau PV.

III.2. Défauts des panneaux photovoltaïques

Dans cette partie nous décrivons les différents défauts rencontrés d'un système « P.V ». Ces défauts peuvent apparaître suite à un défaut de fabrication ou bien en raison des conditions climatiques et vieillissement qui affectent la puissance de sortie du module PV. Notre objectif est de présenter les principaux défauts ou des dégradations associées à un système PV.

Dans un système photovoltaïque On peut rencontrer quatre types de pertes de catégories différentes[32].

- **Défauts prolongés avec rendement nul** : défaillance des composants, système déconnecté (longue durée).
- **Défauts brefs avec rendement nul** : déconnexion temporaire de l'onduleur, système déconnecté (courte durée).
- **Défauts du l'effet d'ombrage** : ombrage.
- **Défauts avec rendement non nul et pas d'ombrage** : erreur de MPPT, autres défauts.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principaux défauts associés à un système photovoltaïque.

III.2.1. Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage

Le défaut Mismatch est le défaut causé par l'association des cellules photovoltaïques qui ne sont pas homogènes ou mal assorties (ces cellules photovoltaïques possèdent une caractéristique non identique), ce déséquilibre dégrade le point de puissance maximum, et conduit à une baisse de

production du module PV. On doit donc veiller à ce que les paramètres de l'équation soient identiques pour l'ensemble des cellules, car le changement dans l'un des paramètres de l'équation conduira à la dissemblance de caractéristique des cellules [33]. Il existe deux types de défauts de mismatch : mismatch statique et mismatch dynamique.

- Le défaut de mismatch statique est lié à la tolérance de fabrication et au vieillissement des cellules PV.
- Le défaut de mismatch dynamique est causé par le changement de niveau d'irradiance et appelé l'ombrage partiel.

Le défaut du l'effet d'ombrage est un cas particulier du défaut Mismatch car sa présence conduit à une diminution de l'ensoleillement reçu par les cellules PV. Le défaut Mismatch peut être dû à une légère variance des caractéristiques des cellules PV à la fabrication mais aussi aux différentes conditions de fonctionnement causées par les différents défauts. Le tableau(III.2) suivant représente l'impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule [33].

III.2.2. Les points chauds ou Hot-spots

Le phénomène des points chauds est un problème relativement fréquent dans les générateurs photovoltaïques actuels. Il comporte à la fois un risque pour la durée de vie du module photovoltaïque et une diminution de son efficacité opérationnelle lorsque des cellules PV sont associées en série, le courant circulant dans l'ensemble est limité par le courant généré par la cellule la moins performante ou la moins éclairée. Ainsi, une cellule qui ne recevrait pas la même quantité de lumière que le reste de l'ensemble, produirait un courant plus faible c'est ce qu'on appelle l'ombrage partiel. Si l'une d'elles était partiellement ombragée le courant ne pouvait plus circuler. La cellule accumulait alors le courant produit en amont et se comportait comme un récepteur. Elle dissipait une puissance sous forme de chaleur pouvant dépasser les 100°C ce qui pouvait la faire griller si le point chaud est causé par un shunt (court-circuit d'une cellule) ou une erreur dans l'interconnexion entre les cellules générant également un shunt.

Le point chaud est directement lié à une erreur de fabrication de la cellule ou du module PV. En outre, si une cellule génère un courant plus faible que le reste des cellules (appelée mésappariement).

Un point chaud apparaît sous la forme d'une cellule entière fonctionnant à une température plus élevée que le reste des cellules. La figure (III.1.a) elle peut être considérée aussi comme une erreur de fabrication du module photovoltaïque. Le hot spot Figure (III.1.b) pourrait causer des dommages à la cellule ou l'encapsulant dans un court laps de temps de fonctionnement [34].

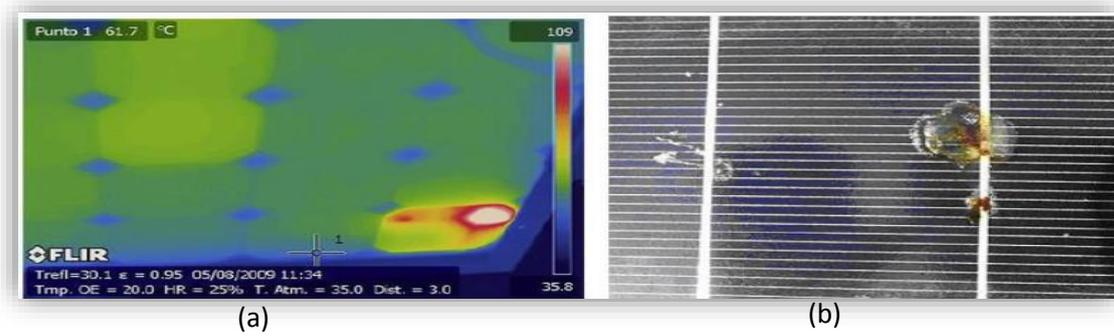


Figure III.1 : Défaut de point chaud.

III.2.3. Jaunissement et brunissement « la décoloration »

La décoloration du module photovoltaïque se traduit par un changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation qui est généralement en Ethylène Vinyl Acétate (EVA) ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant. Elle provoque une modification de la transmittance de l'encapsulant des cellules et par conséquent la puissance générée par le module est diminuée [35].

La décoloration peut apparaître dans des zones différentes et non adjacentes d'un même module. Ceci peut être dû d'une part, à des polymères encapsulant d'origine ou de caractéristiques différentes et d'autre part à l'EVA qui n'est pas déployée dans les mêmes zones du module de la même manière [35]. Oreski et Wallner avancent que les causes principales de la décoloration de l'EVA sont les rayons ultraviolets combinés à l'eau sous des températures d'exposition supérieures à 50°C et provoquant ainsi un changement de la structure chimique du polymère [36]. Ces dernières années, la plupart des publications sur la dégradation des modules PV en silicium cristallin ont principalement porté sur la décoloration de l'EVA [35].



Figure III.2 : Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées.

III.2.4. Bulle d'air

Ces bulles dus à une réaction chimique où des gaz sont libérés et le mal adhérence entre les couches de panneau PV. La formation d'une bulle rend la dissipation de la chaleur des cellules plus difficiles, et par conséquent réduit le refroidissement ce qui minimise la durée de vie des PV. Parfois, une bulle peut être seulement détectée en utilisant des techniques de RI ou IR Infrarouge ? car elle n'est pas visible par l'inspection visuelle seule. Il peut arriver que le détachement de la cellule du verre soit à l'origine des bulles. Les bulles situées sur la face avant du module peuvent produire une réduction de l'éclairement arrivant sur le module. Elles provoquent la réflexion d'une partie de la lumière qui atteint le module [37].

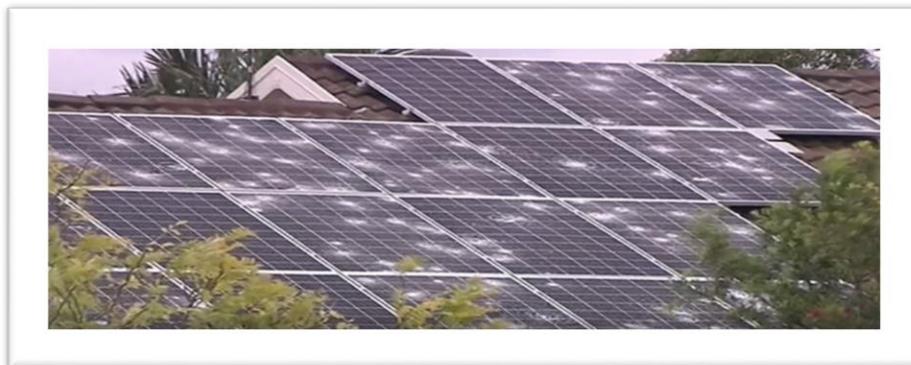


Figure III.3 : Défaut de bulles d'air.

III.2.5. Fissures dans les cellules

Les fissures constituent un facteur important de dégradation des modules PV. À cause de réduire le cout de fabrication des panneaux PV pour économiser le silicium l'épaisseur et la surface du silicium de cellules sont modifiées (de 300 μm à moins de 200 μm) donc cette modification rendait les cellules plus fragiles et sensibles aux fractures au cours de leur manipulation et au cours du stockage [37].

Cependant, le risque de choc électrique et de pénétration de l'humidité devient plus élevé. Les casses, les bris de verre et les fissures sont généralement suivies des autres types de dégradation tels que la corrosion, la décoloration, la délamination [38].

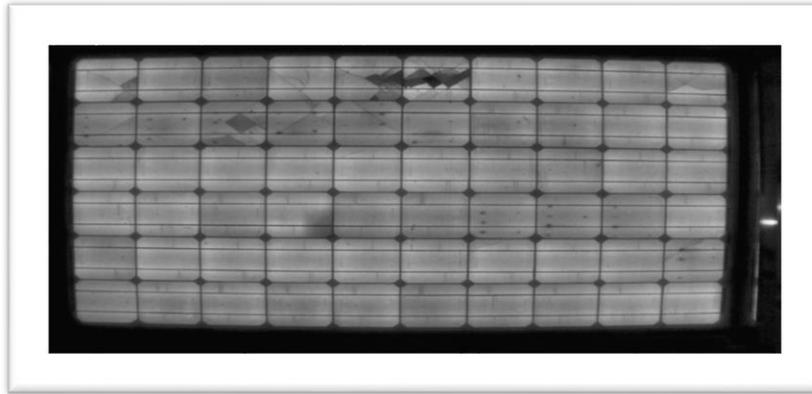


Figure III.4 : fissures dans les cellules PV.

III.2.6. Délaminage

Le délaminage est la conséquence de la perte d'adhérence entre les différentes couches du module PV et le détachement subséquent de ces couches. Il peut apparaître entre encapsulant et cellules polymères ou entre les cellules et la vitre avant. Le délaminage est un problème majeur, car il peut conduire à deux effets : une diminution de la lumière, où la réflexion augmente, ainsi que la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure de module [8].

Le délaminage est plus grave s'il se produit dans les extrémités du module car, outre les pertes de puissance, il entraîne des risques électriques sur le module et l'installation. La figure (III.5) présente un exemple de la façon dont un décollement extrême peut détruire un module PV.



Figure III.5 : défaut de délaminage.

Jansen et Delahoy ont montré que la pénétration du sel et de l'humidité dans le module photovoltaïque constitue un facteur favorisant la délamination [39]. D'autre part, ils avancent que la liaison interfaciale peut être attaquée chimiquement par l'acide fluorhydrique formé par le fluor et l'oxyde d'étain contenus dans le module.

III.2.7. Défaut de revêtement anti -reflet (ARC)

En dehors des stratégies telles que la texturation des surfaces cellulaires, les performances des cellules qui forment un module PV peut être amélioré par l'ajout d'un revêtement anti-réfléchissant de manière à maximiser la lumière qui atteint la zone active de la cellule. Pendant l'exposition du module PV au soleil, le revêtement anti -reflet (ARC) reçoit un rayonnement qui pourrait induire un changement de la coloration ARC figure (III.6). Les propriétés anti-réfléchissantes peuvent subir des modifications, dans ce cas. La lumière qui atteint les cellules peut être plus faibles que prévues [37].



Figure III.6 : défaut de revêtement anti –reflet.

III.2.8. Module arraché au cassé

La raison principale est les facteurs externes qui peuvent endommager une cellule solaire et en faire des panneaux solaires cassés [40].

Domages au module interne sont un problème lorsqu'il n'y a pas d'impact externe, comme une tempête qu'ont endommagée les panneaux solaires. Ce problème peut être causé par une production défectueuse ou une mauvaise sélection d'un ou de tous les composants [40].

Endommagement du module dû à des facteurs externes ce type de dommage se produit dans la plupart des cas pour des raisons météorologiques. La tempête, la grêle, la foudre et les surtensions ou la pression de la neige peuvent endommager un module solaire, mais également le feu, une chaleur excessive ou une morsure d'animal peuvent également causer des dommages.

L'avantage de ces dommages est que vous pouvez souvent les réparer. Mais avec les dégâts externes décide déjà la force des dégâts Pièces volantes, branches cassées, grêlons de la taille de balles de tennis et bâtiments effondrés. Les tempêtes causent souvent d'énormes dégâts aux panneaux solaires. La conséquence : Bris de verre, micro fissures et rupture de cellule, Cadre de module rayé. [40].



Figure III.7 : Module cassé [41].

III.2.9. Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour

La diode de by-pass est une des solutions pour protéger les cellules de l'ombrage partiel elle évite la polarisation inverse, le hot spot et destruction du module. Cette diode se place, en général, en parallèle avec une branche de dix-huit cellules. On peut constater plusieurs défauts de cette dernière, ces défauts sont en général des défauts de fabrication ces défauts peuvent être apparus suite à la rupture de la connexion de la diode. Donc dans un panneau photovoltaïque on peut trouver une diode déconnectée, une diode équivalente à une impédance quelconque, une diode court-circuitée et une diode inversée. De la même manière que pour la diode de by-pass, la diode anti-retour est exposée aux mêmes types de défauts envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et diode inversée [37].

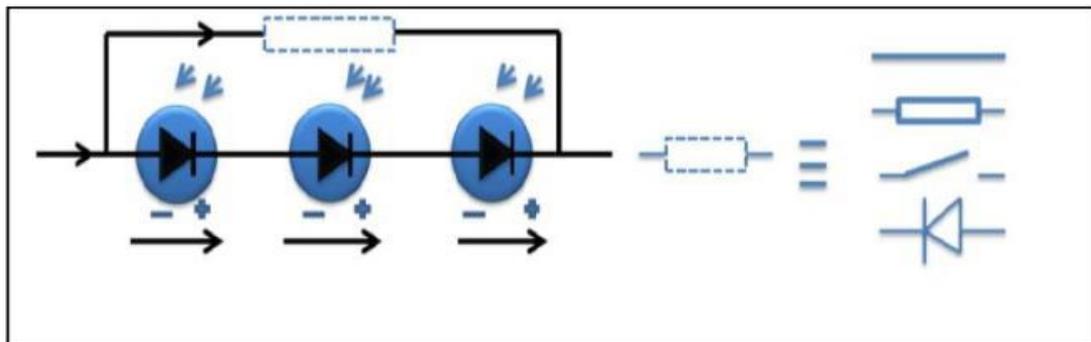


Figure III.8 : Défaut de la diode de by-pass [37].

III.2.10. L'augmentation de la résistance série R

La résistance en série est l'un des plus importants facteurs influençant les performances des cellules solaires. Généralement l'augmentation de la résistance série est causée généralement par la corrosion de la connectique entre deux modules PV, une vis de connexion mal serrée, la corrosion de point de soudure entre cellules..., etc. En fonctionnement normal, cette résistance de connectique est

quasi nulle. La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux. Au fur et à mesure que la résistance série augmente, le facteur de forme diminue. Cela conduit à une diminution de l'efficacité des cellules.

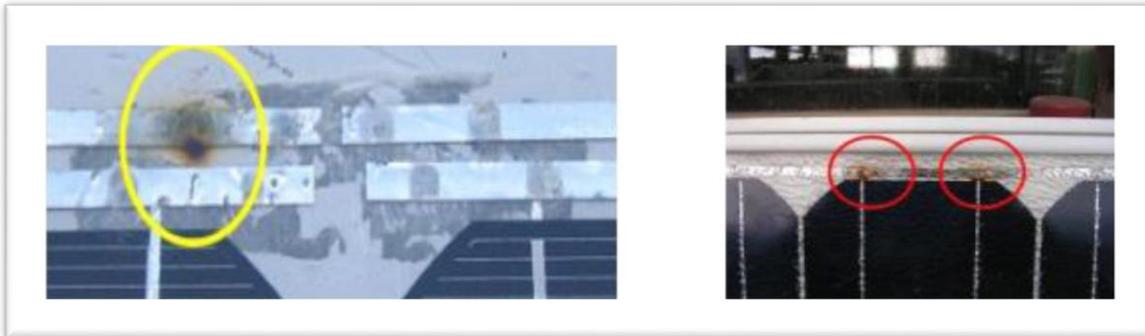


Figure III.9 : Défaut d'augmentation de la résistance R_s [37].

III.2.11. Diminution de la résistance parallèle R_p

Les pertes d'énergie importantes causées par la présence d'une résistance shunt R_p sont généralement dues à d'une mauvaise conception des cellules solaires, elle caractérise un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière « bornes opposées d'une photopile ». Elle est généralement très supérieure à la résistance série R_s .

Une résistance série trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile, en outre une photopile dont la résistance shunt trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement [34].

III.2.12. Autres Défauts

Dans un string PV, on peut rencontrer plusieurs défauts tels que :

- Défaut de connexion du module : module court-circuité, module connecté en parallèle avec une impédance et inversion de la polarité du module, ou module arraché.
- Défauts dans la boîte de jonction PV : rupture du circuit électrique, court-circuit du circuit électrique, destruction de la liaison, corrosion des connexions. Les insectes, la poussière et/ou l'humidité à l'intérieur des boîtes.

III.3. Classification des défauts pour la modélisation

Les défauts présentés dans le tableau (III.1) ont été classés suivant l'emplacement de leur apparition dans une installation PV (panneau, connexion, câblage, système de protection). Par contre, selon la démarche de modélisation retenue, on cherche à classer les défauts selon l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape (cellule, groupe de cellules, modules).

Tableau III.1 : Classification de défauts [38].

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination de défauts
Cellules	Module arraché ou cassé Pylônes, cheminée, sable, neige etc. Echauffement des cellules Dégradation des interconnexions Fissure	Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage
Groupes de cellules	Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode de by-pass
Module	Modules court-circuités Modules shuntés	Défaut de module

Nous présentons ci-dessous l'impact des défauts sur les différents paramètres.

Tableau III.2 : impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule [38].

NATURE DES DÉFAUTS	PARAMÈTRES AFFECTÉS
Module arraché ou cassé Ombrage : Feuille d'arbre, déjections, Sable, pollution, neige etc.	Variation de photo courant (I_{ph})
Echauffement des cellules	Variation de la température (T)
Dégradation des interconnexions Fissure Corrosion des liaisons entre cellules	Variation de la résistance série (R_s)
Modules de performances différentes Détérioration des cellules Pénétration de l'humidité	Variation de tous les paramètres des cellules

III.4. Le PID - Dégradation Potentielle Induite

Cette « nouvelle maladie » du module photovoltaïque, mise en évidence en 2010, commence à toucher de plus en plus de modules photovoltaïques. Le premier symptôme de ce phénomène est une dégradation rapide et inexplicable de la puissance. Cette diminution du rendement des modules, pouvant atteindre plus de 20% en quelques mois, n'est ni due à un vieillissement classique des modules, ni à une mauvaise installation du module.

Ce phénomène connu sous le nom de dégradation Potentielle Induite (PID) se caractérise par la dégradation progressive des performances des modules photovoltaïques, à base de silicium cristallin, dus à la présence d'un courant électrique induit au cœur même du module [39].

Hacke a montré que le PID était plus fréquent dans les climats humides que dans les milieux chauds et secs [40].

Les différents travaux ont montré que les principaux facteurs favorisant le PID sont la tension du système dans lequel le module est utilisé, l'humidité et la température de fonctionnement.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents défauts affectant les panneaux PV. On a montré que ces défauts peuvent être divisés en général aux défauts de fabrication, et aux défauts dus aux conditions climatiques et aux conditions d'exploitation. On a aussi constaté que la plupart des défauts dits électriques, sont dus aux conditions climatiques telles que l'augmentation de la résistance série.

Et nous avons décrit les différents défauts rencontrés suivant la hiérarchie des étapes de la modélisation proposée (cellule, groupe, string et champ) et les conséquences possibles que les défauts.

Ces défauts ont été restructurés et classifiés en cinq catégories pour la modélisation :

- Défauts de mismatch et l'effet d'ombrage ;
- Défauts de la diode de bypass ;
- Défauts de module ;
- Défauts de connectique ;
- Défauts de la diode anti-retour.

Nous concluons que les panneaux photovoltaïques ont des avantages et des inconvénients.

CHAPITRE IV

DIAGNOSTIC DES

DEFAUTS D'UN

PANNEAU SOLAIRE

IV.1. Introduction

Le soleil est la 1ère source d'énergie dans la terre et il y a plusieurs utilisations de cette énergie dans le monde et la plus connue méthode est les systèmes photovoltaïques. Nous avons besoin que ces systèmes soient fiables et efficaces par rapport aux autres systèmes, mais comme plusieurs systèmes électronique, chimique ... les systèmes PV peut être la cible par des problèmes qui peuvent provoquer le dysfonctionnement de ces derniers, donc il y a plusieurs études et propositions des travaux pour éviter ces problèmes ou bien ces défauts.

Dans ce chapitre, dans une première partie, une brève introduction au diagnostic et à ses objectifs sera discutée.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à donner un aperçu sur les différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques.

IV.2. Terminologie relative au diagnostic

Nous avons constaté que la terminologie relative au domaine du diagnostic des défauts n'obéit pas encore à un formalisme unifié, ce qui rend parfois difficile l'appréhension des contributions. Les principales définitions sont :

- 1. Défaut :** le concept de défaut est fondamental dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des procédés industriels. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en l'absence de défaut. N'importe quel état indésirable d'un composant ou d'un système. Un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance [41].
- 2. Défaillance :** une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées [41].
- 3. Panne :** une panne est l'incapacité d'un appareil à effectuer une fonction requise. Lors de l'apparition d'une défaillance, caractérisée par l'arrêt du dispositif pour remplir sa fonction. Par conséquent, une défaillance est toujours le résultat d'un mauvais fonctionnement [42].
- 4. Dégradation :** est un processus de diminution progressive des performances d'une entité fonctionnelle d'un dispositif. Une dégradation est l'état d'un ensemble qui présente :
 - Perte de performances d'une des fonctions assurées par l'ensemble.
 - Sous-ensemble lui-même dégradé, voire défaillant (sans conséquence fonctionnelle sur l'ensemble).
- 5. Perturbation :** est toute entrée non contrôlée, issue de l'environnement extérieur, influençant de façon négative sur un système physique [42].

6. **Anomalie** : caractérise un comportement du système physique, non conforme à une référence [42].
7. **Symptôme** : représente un signe distinctif permettant de détecter un dysfonctionnement du système surveillé [42].

IV.3. Diagnostic

Le diagnostic est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique. Il a pour objet de trouver la cause d'une défaillance.

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Cette définition très courte et concise résume les deux tâches essentielles en diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

IV.3.1. Considération générale sur les systèmes de diagnostics

Il existe plusieurs critères permettant d'évaluer les performances d'un système de diagnostic. De manière générale, on relève :

1. **Rapidité** : le système de surveillance doit réagir rapidement dans les situations de dysfonctionnement, un système de diagnostic rapide permet d'éviter des dégâts matériels et humains [43].
2. **Isolabilité** : c'est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une alarme engendre bien souvent de nouvelles alarmes et il devient dès lors difficile de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la structure des résidus et à la procédure de détection elle-même [42].
3. **Robustesse** : elle détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations) [42].
4. **Sensibilité** : elle caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport de l'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut [42].

IV.3.2. Etapes du diagnostic

Le terme diagnostic correspond à la caractérisation du défaut, pour effectuer ce dernier il faut passer par un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent [44].

1. **Prise de mesures** : la mesure que l'on fait sur le système est la seule information pour connaître l'évolution du système. Elle se fait à l'aide d'un capteur approprié et nécessite souvent d'une étape de filtrage.
2. **Détection de défauts** : souvent, il s'agit d'un test statistique traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller. La procédure de détection vise à déterminer précocement et sans erreur l'apparition d'une défaillance. Cette étape nécessite un bon modèle de fonctionnement du système.
3. **Localisation de défauts** : c'est souvent une tâche liée aux caractéristiques du système. Il s'agit d'un test qui traite l'information sur l'origine de la provenance du défaut.
4. **Identification de défauts** : il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps. Et détermine les causes qui ont engendré la défaillance constatée.
5. **Décision** : c'est une décision sur le type d'action à prendre pour rétablir de système.
6. **Correction** : c'est l'action d'arrêter le système et de procéder à une maintenance corrective.
7. **Adaptation** : c'est l'action de reconfiguration et d'adaptation de la consigne à injecter dans le système.

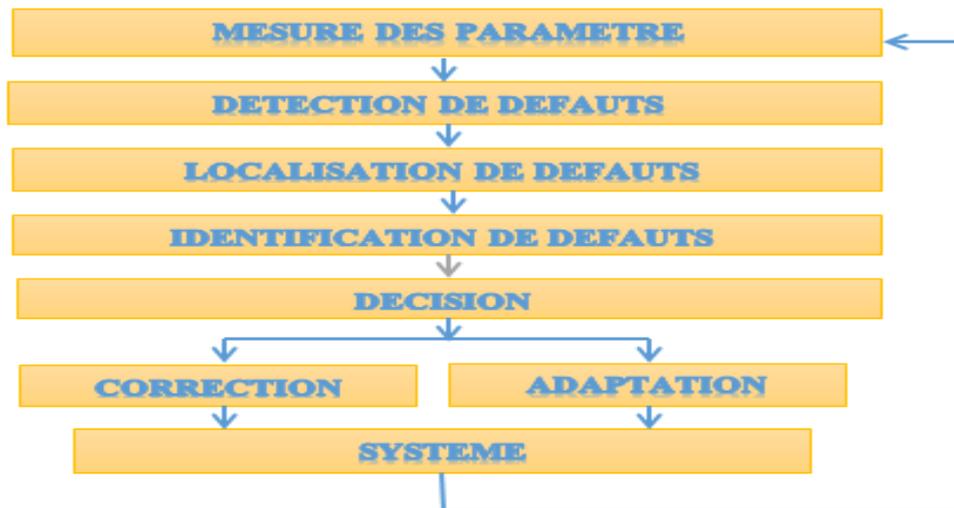


Figure IV.1: Etapes du diagnostic industriel.

IV.3.3. Objectifs

- ✓ Réduction des arrêts imprévus
- ✓ Réduction des pertes de production
- ✓ Eviter les graves dommages

- ✓ Planification optimale des opérations de maintenance et limitation des coûts de réparation.

IV.3.4. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV

Les conditions climatiques (les effets d'ombrage, l'encrassement des modules), conditions d'exploitation (vieillesse des modules PV) et des défauts de fabrication sont la cause principale aux anomalies apparues dans les différents étages du système photovoltaïque.

Si nous voulons maximiser la production d'énergie pendant toute la vie du système photovoltaïque, nous devons être capables de reconnaître l'instant d'apparition d'un défaut ou une réduction de la puissance de sortie. Nous devons également savoir ce qui a causé la perte de la production dès que possible, et de trouver une solution rapide. Car le temps d'arrêt du système provoque en effet un dommage économique et une diminution de la production d'électricité. On peut distinguer deux catégories de méthodes de diagnostic courantes industrialisées : des méthodes reposant sur l'analyse du courant et de la tension (que nous appellerons méthodes électriques) et des méthodes reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V (que nous appellerons méthodes non – électriques).

IV.3.4.1. Méthodes non –électriques

Il existe plusieurs méthodes non électriques pour diagnostiquer le défaut au niveau de cellule P V. Le défaut principal qui peut avoir lieu à ce niveau est la fissure de la cellule.

On peut citer comme méthodes : les essais par Inspection visuelle, Technique de Vibrations ultrasoniques résonante, et la méthode de thermographie infrarouge, et méthode par verrouillage en thermographie.

IV.3.4.1.1. Inspection visuelle

L'inspection visuelle est la première étape dans la détection des défauts. Cette étape est décisive pour définir les types de test à appliquer sur le module PV afin d'évaluer son état. Dans le but de réaliser une bonne analyse des données résultantes [45].

Cette méthode permet de détecter certains défauts tels que le Jaunissement, les décollements, les bulles, les fissures dans la cellule, l'inadaptation et les cellules brûlées.

Cette méthode est généralement la première étape pour déterminer si un module PV doit être soumis à d'autres tests.

IV.3.4.1.2. Méthode de thermographie infrarouge (IR)

La thermographie IR est devenue un des outils de diagnostic incontournables de la maintenance prédictive. En effet, la plupart des défauts se traduisent par un échauffement ou un

refroidissement anormal. Seule la Thermographie Infrarouge vous permet d'observer rapidement une scène thermique et de mettre en évidence, sans contact, des différences de températures à la surface de tout type d'objet. Ainsi, en détectant ces anomalies, souvent invisibles à l'oeil nu, la thermographie permet des actions correctives avant l'apparition de pannes ou problèmes coûteux [44].

Cette technique peut détecter et localiser plusieurs défauts : points chauds, le mis match, l'ombrage et les défauts de diode de by-pass [44].

La thermographie infrarouge est une technique qui permet de mesurer à distance et sans contact la température d'une scène observée.

IV.3.4.1.3. Méthode par verrouillage en thermographie (LIT)

Il s'agit d'une variante de la méthode IR mentionnée précédemment. Cette méthode est utile dans la recherche de perte de puissance. Dans cette technique, un courant électrique est injecté dans la cellule solaire. Le courant n'est pas un courant continu, mais plutôt un courant pulsé. Si la cellule à un défaut de court-circuit la température augmente chaque fois que ce dernier se manifeste.

Ce test peut être effectué dans des conditions sombres ou sous éclairage. Dans le cas de l'éclairage, les cellules sont généralement sous les conditions de circuit ouvert (Voc) [44].

IV.3.4.1.4. Inspection par ultrasons

C'est méthode est non destructive. Elle consiste à capter des ondes ultrasoniques, qui portent à plus de 20 kHz, afin de les analyser et les interpréter. Grâce à cette technique, le module PV subit un balayage afin de détecter des fissures des cellules qui peuvent se produire durant le processus de fabrication ou lors de l'exploitation de module PV [44].

Ce détecteur est basé sur un transducteur piézoélectrique situé dans la périphérie de la cellule.

IV.3.4.2. Méthodes électriques

Les données d'entrée pour ces méthodes sont les paramètres électriques (courant, tension et puissance). Les alertes de défaillance du système (principalement les défauts d'isolement).

Les différentes méthodes sont proposées dans la littérature pour la détection et la localisation des défauts dans un système PV. Nous résumons dans cette partie les différentes méthodes proposées.

IV.3.4.2.1. Analyse de la puissance et de l'énergie produite

De nombreuses études dans la littérature reposent sur l'analyse de la puissance et de l'énergie produite par le champ PV pour faire la détection et la localisation de défauts qui y sont apparus.

L'analyse des pertes de puissance dans le PV système revient à déterminer les pertes de puissance qui sont calculées en comparant les données mesurées aux résultats simulés. Ont proposé une méthode de détection, de supervision et de défaut sur la base des analyses de pertes de puissance ont utilisé les ratios de tension et de courant dans l'algorithme de détection de pannes et ce en mesurant les pertes capturées dans un système PV [44].

IV.3.4.2.2. Analyse du point de fonctionnement

Cette méthode repose sur l'analyse et la comparaison du point de puissance maximale actuel de l'installation PV et celui attendu. Cette méthode offre la possibilité de détecter automatiquement la présence d'un défaut sans interrompre le système [42].

IV.3.4.2.3. Analyse de la caractéristique statique

Le recueil de grandeurs mesurées (courant et tension) à différents points du champ photovoltaïque permet de détecter et de localiser précisément l'emplacement du défaut à l'aide des capteurs placés dans le champ PV. Plusieurs études sont menées dans ce cadre par différents auteurs [42].

IV.4. Détection et classification de défauts pour un GPV

Pour étudier l'effet des défauts sur les caractéristiques (I-V) ou (P-V) du générateur Photovoltaïque, nous allons réaliser des simulations dans l'environnement Matlab dans deux cas des figures : fonctionnement sain et défaillant.

Nous avons fait la simulation sous Matlab/Simulink du panneau PV Suntech de puissance **$P_{max}=73.49 \text{ W}$** , dans les mêmes conditions (**$T=25^\circ\text{C}$** , **$G=1000 \text{ W/m}^2$**). Ce module PV est en silicium polycristallin et constitué de 36 cellules PV avec deux diodes by-pass, les caractéristiques électriques de ce module PV sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Paramètre	N_c	Nombre diode by-pass	P_{max} (W)	V_{co} (V)	I_{cc} (A)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	Facteur de qualité a	Courant de saturation de la diode I_0
Valeur	36	2	73.49	21.25	4.5	0	Inf	1.5	1e-6

IV.4.1. Simulation du GPV en fonctionnement sain

Le module PV sur lequel nous allons mener les simulations est l'association en série de deux groupes composés de dix-huit (18) cellules chacun.

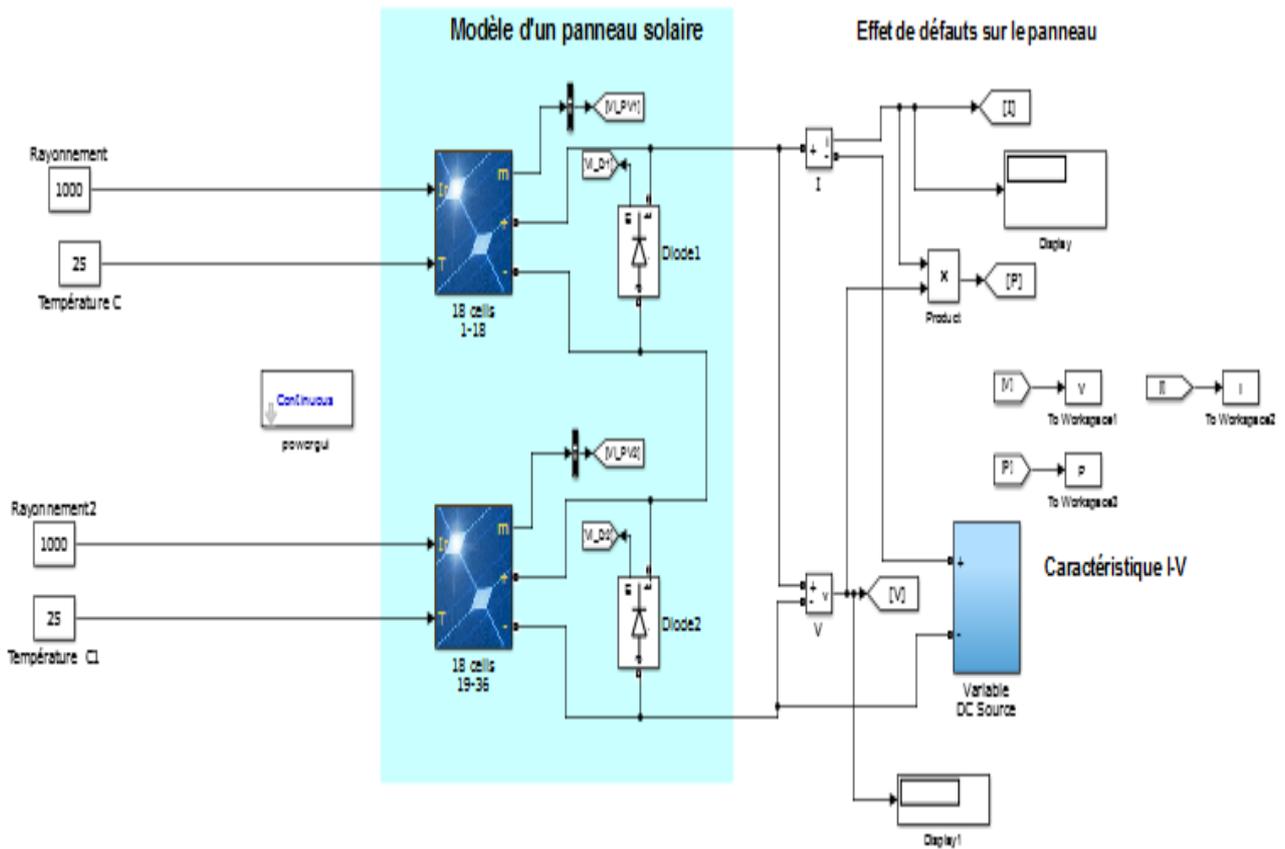


Figure IV.2: Simulation d'un module sous Matlab.

Le résultat de simulation la caractéristique (I-V) et (P-V) en l'absence des défauts est donnée par la figure (IV.3) et la figure (IV.4) suivante :

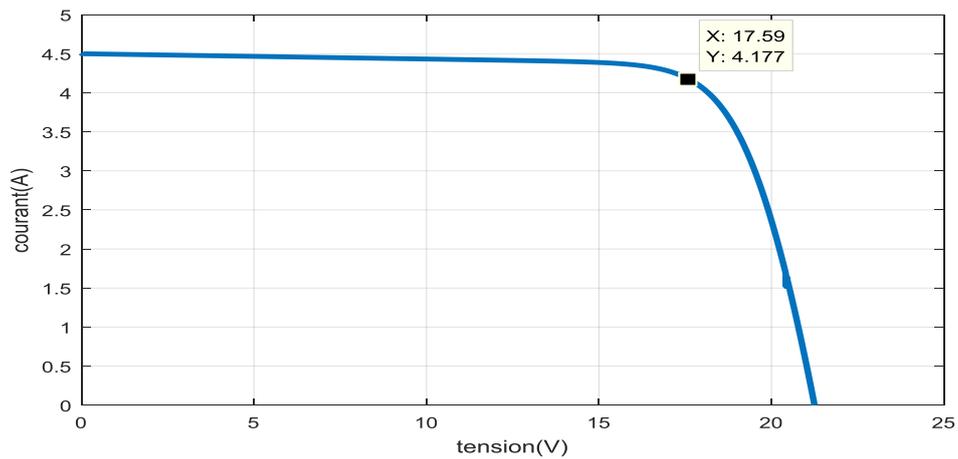


Figure IV.3: Caractéristique (I-V) d'un module PV en fonctionnement sain.

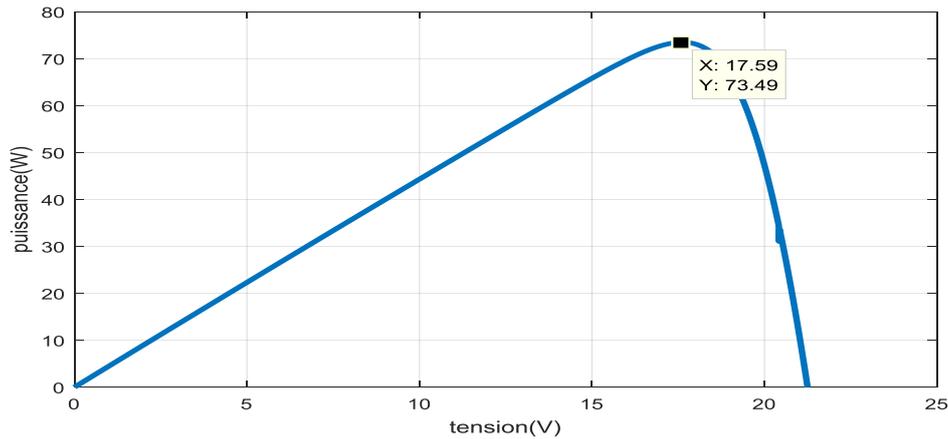


Figure IV.4: Caractéristique (P-V) d'un module PV en fonctionnement sain.

A partir de La caractéristique (I-V) et (P-V), nous pouvons tirer les points particuliers suivants :

- Le courant de court-circuit $I_{cc}=4.5A$.
- La tension de circuit ouvert $V_{co}=21.25V$.
- Le point de puissance maximale $P_{max}=73.49W$.

IV.4.2. Simulation du GPV en fonctionnement défaillant

IV.4.2.1. Résultats de simulation des différents défauts

- **L'effet de l'ombrage**

L'ombrage photovoltaïque peut se produire en raison de : Arbres, bâtiments, sable, poussière, feuilles, nuages. Il y a deux types de l'ombrage : L'ombrage total touche toutes les cellules et l'ombrage partiel ne touchant que certaines cellules.

Les résultats de simulation relatives au défaut de l'effet d'ombrage sont donnés dans les figures suivantes :

- ✓ **Symptômes observés pour l'effet de l'ombrage totale**

On remarque :

- Une réduction de point de puissance maximale PPM.
- Réduction le courant de court-circuit I_{cc} en fonction de différents pourcentages d'ombrage.
- La tension de circuit ouvert V_{co} diminue en fonction de différents pourcentages d'ombrage.

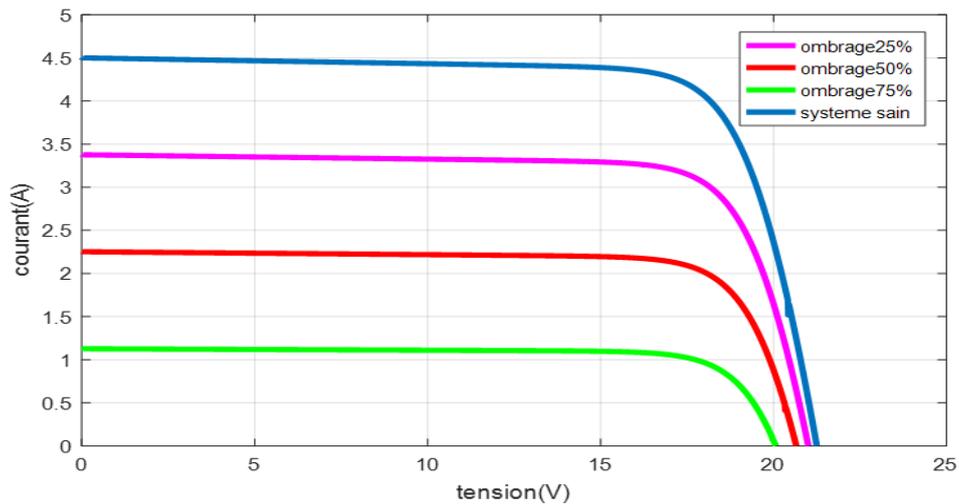


Figure IV.5 : Caractéristique (I-V) lorsque l'effet de l'ombrage touche toutes les cellules.

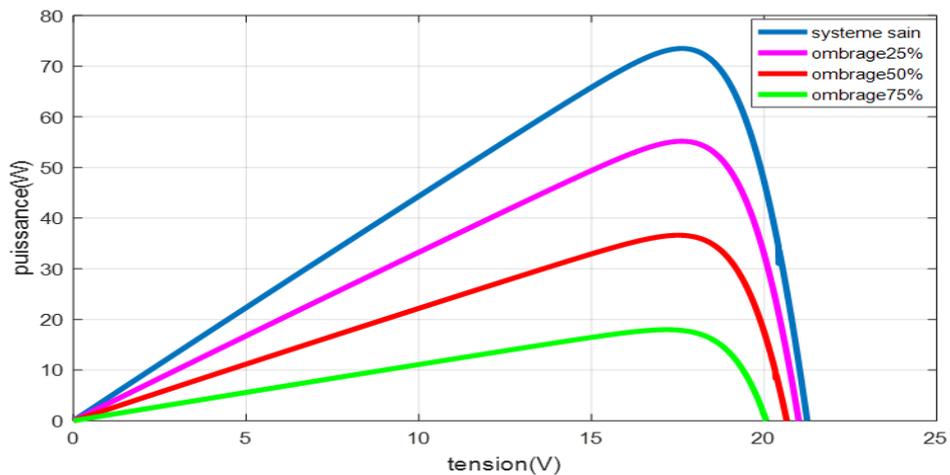


Figure IV.6 : Caractéristique (P-V) lorsque l'effet de l'ombrage touche toutes les cellules.

✓ **Symptômes observés pour l'effet de l'ombrage partiel (18 cellules)**

On remarque :

- Une réduction de point de puissance maximale PPM.
- Le courant de court-circuit I_{cc} ne change pas.
- La tension de circuit ouvert V_{co} diminue pour un nombre important de cellules ombrées.

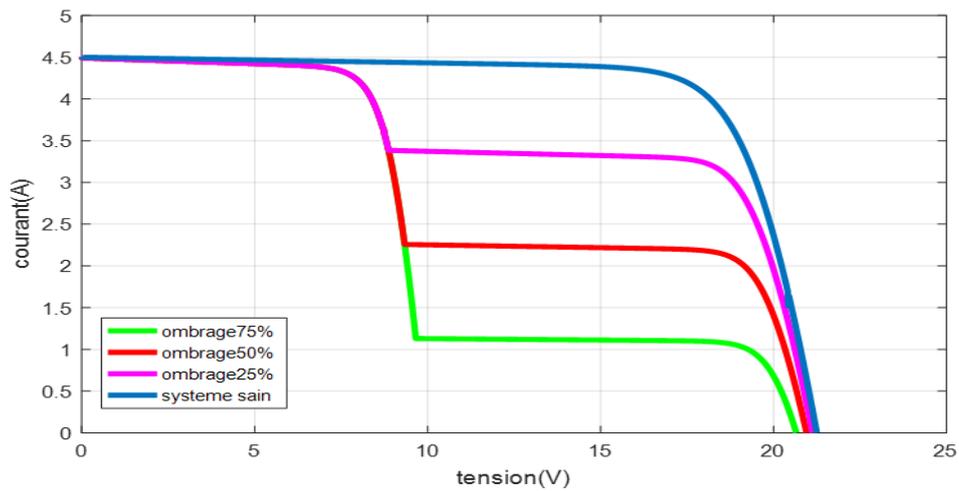


Figure IV.7 : Caractéristique (I-V) lorsque l'effet de l'ombrage partiel(18cellule).

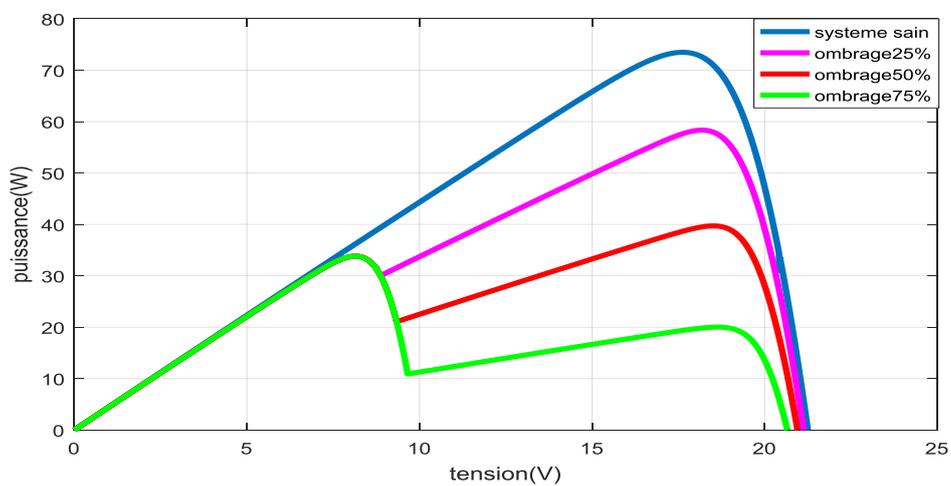


Figure IV.8 : Caractéristique (P-V) lorsque l'effet de l'ombrage partiel (18cellules).

- **Défaut de diode By-pass cas (court-circuit)**

À l'instar de tout composant électronique, la diode by-pass est sujette à des dommages c-à-d elle peut être elle-même défaut.

Dans le cas de court-circuit, la diode se comporte comme une liaison électrique.

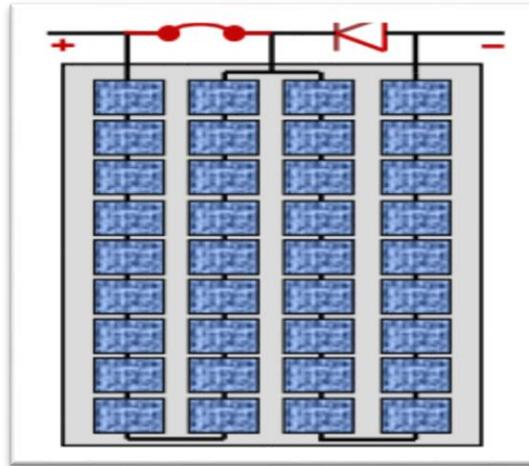


Figure IV.9 : Schématisation d'un module PV avec une diode By-pass (court-circuitée).

Les résultats de simulation lorsque la diode by-pass est court-circuitée sont données dans les figures suivantes :

✓ **Symptômes observés pour cas (court-circuit)**

La tension du groupe de cellules s’annule. Dans ce cas, un demi de la tension produite est perdu dans le module car il y a 2 diodes de by-pass dans un module, On peut remarquer que :

- Une réduction de point de puissance maximale PPM.
- Le courant de court-circuit I_{cc} ne change pas.
- La tension de circuit ouvert V_{co} est diminuée en fonction du nombre de diodes court-circuitées.

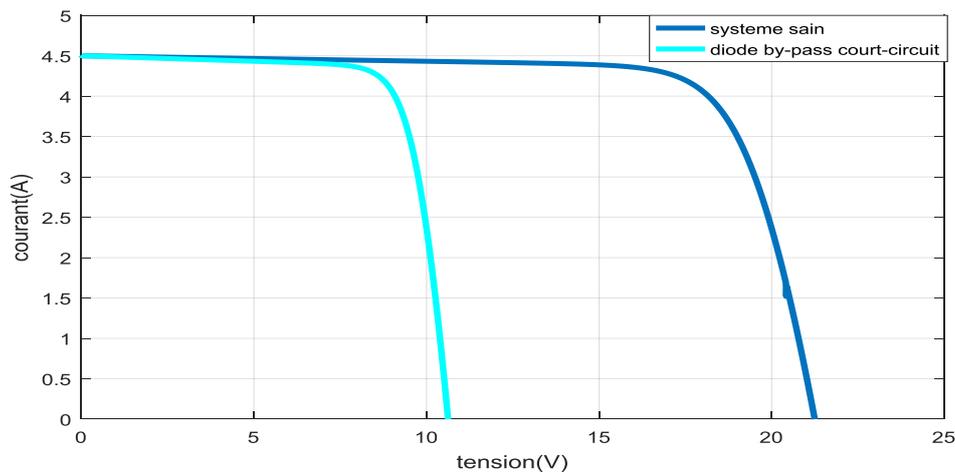


Figure IV.10 : Caractéristique (I-V) d'un module lors d'une diode by-pass (Court-circuitée).

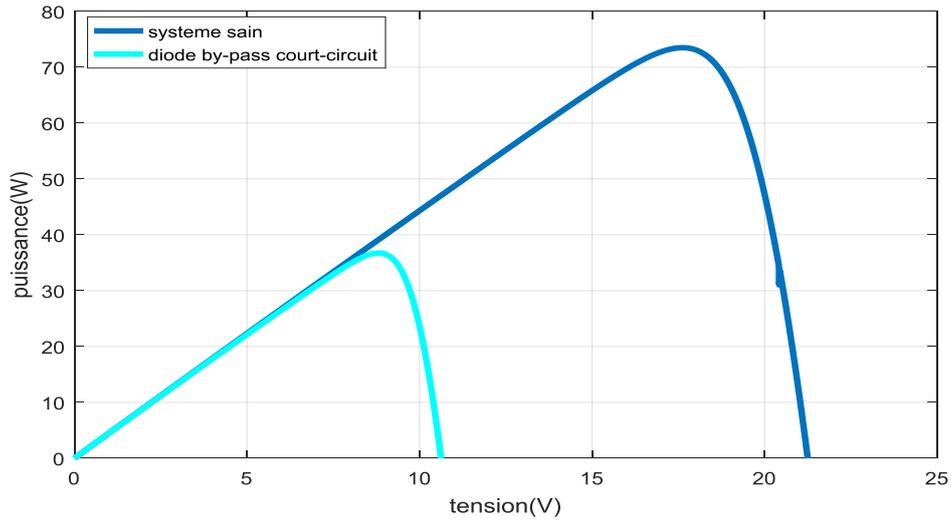


Figure IV.11 : Caractéristique (I-V) d'un module lors d'une diode by-pass (Court-circuitée).

- **Défaut de diode By-pass déconnectée Cas (circuit ouvert)**

Le défaut en circuit ouvert est une déconnexion inattendue à l'intérieur du conducteur du module PV qui influence la résistance totale du générateur pendant le défaut.

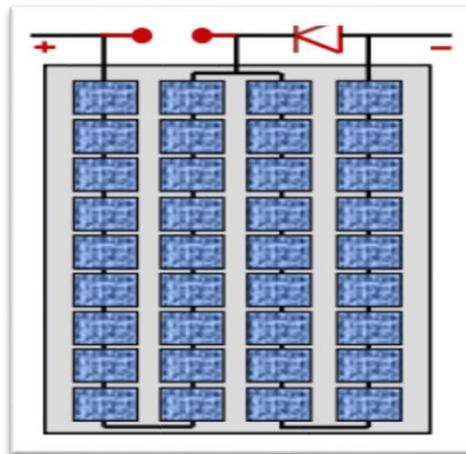


Figure IV.12 : Schématisation d'un module PV avec une diode By-pass (Circuit ouvert).

Les résultats de simulation lorsque la diode by-pass est circuit ouvert sont données dans les figures suivant :

- ✓ **Symptômes observés pour cas (Circuit ouvert)**

Nous ne constatons aucune modification de la caractéristique par rapport au fonctionnement sain. Ce résultat est obtenu bien sur lorsque aucun autre défaut n'est présent.

Avec un ombrage, la perte en courant augmente en fonction de la croissance de l'amplitude de l'ombrage car il n'y a plus de protection assurée par la diode de by-pass. On peut remarquer que :

- Pmax et Icc diminuent fortement en fonction du nombre de cellules ombrées.

- La tension de circuit ouvert V_{co} est diminuée.

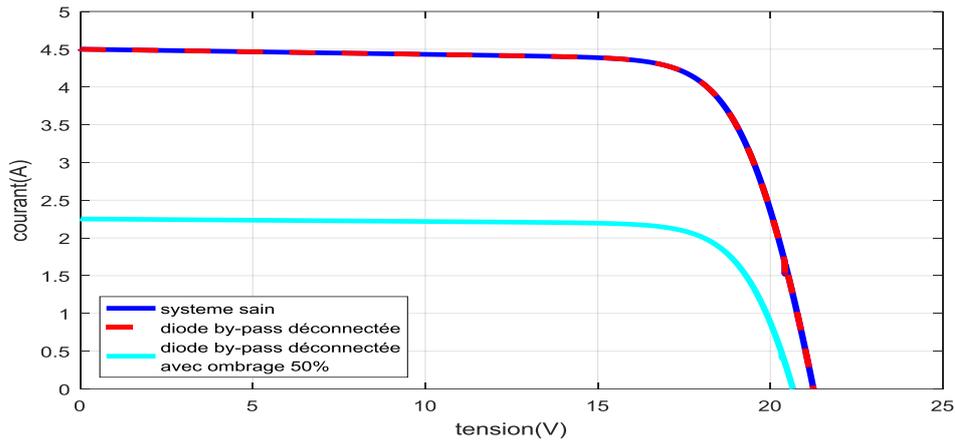


Figure IV.13 : Caractéristique (I-V) d'un module PV avec une diode by-pass déconnectée.

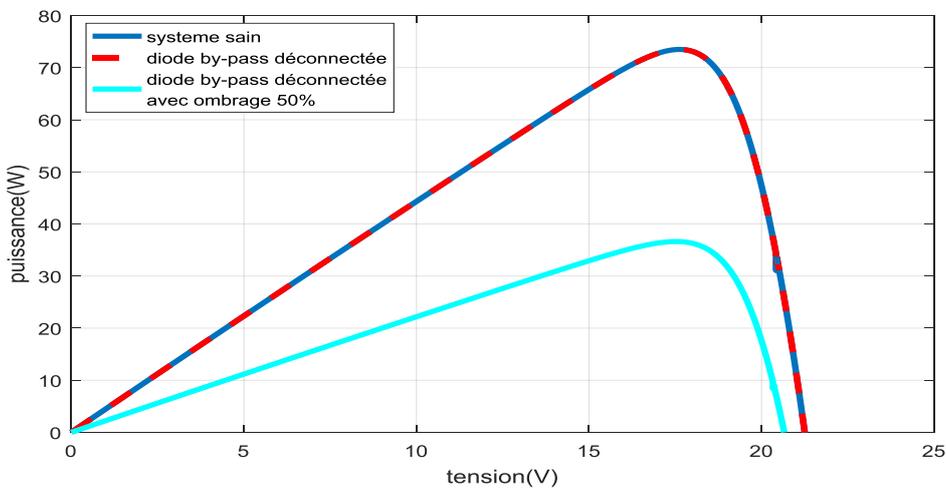


Figure IV.14 : Caractéristique (P-V) d'un module PV avec une diode by-pass déconnectée.

- **Défaut de diode By-pass cas inversée**

Dans ce cas, la diode By-pass est bloquée quand la tension du groupe de cellules qu'elle protège est négative et passante dans le cas inverse (contrairement à son fonctionnement normal).

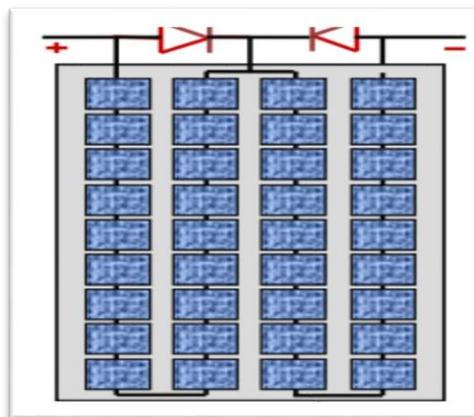


Figure IV.15 : Schématisation d'un module PV avec une diode By-pass Inversée.

Les résultats de simulation relatives à la diode by-pass inversée sont donnés dans les figures suivantes :

✓ **Symptômes observés pour cas (inversée)**

On remarque :

- Une réduction de point de puissance maximale PPM.
- Le courant de court-circuit I_{cc} diminue fortement en fonction du nombre de cellules ombrées.
- La tension de circuit ouvert V_{co} diminue en fonction du nombre de diodes inversées.

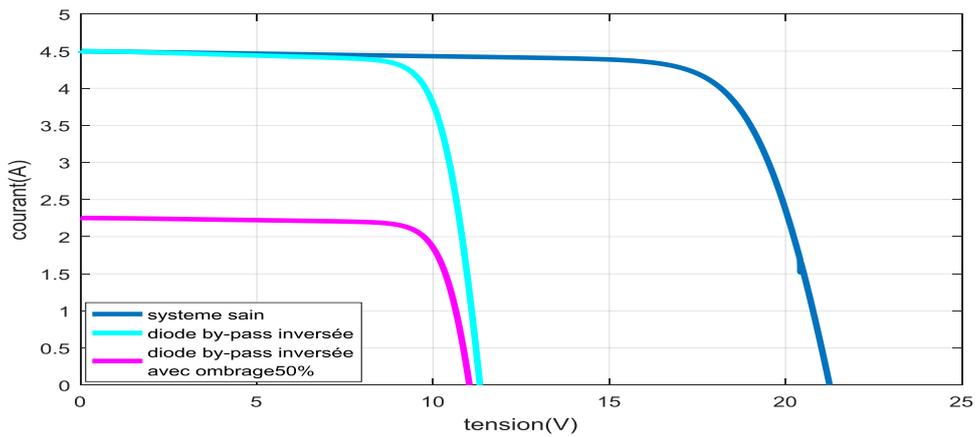


Figure IV.16 : Caractéristique (I-V) d'un module PV avec une diode by-pass Inversée.

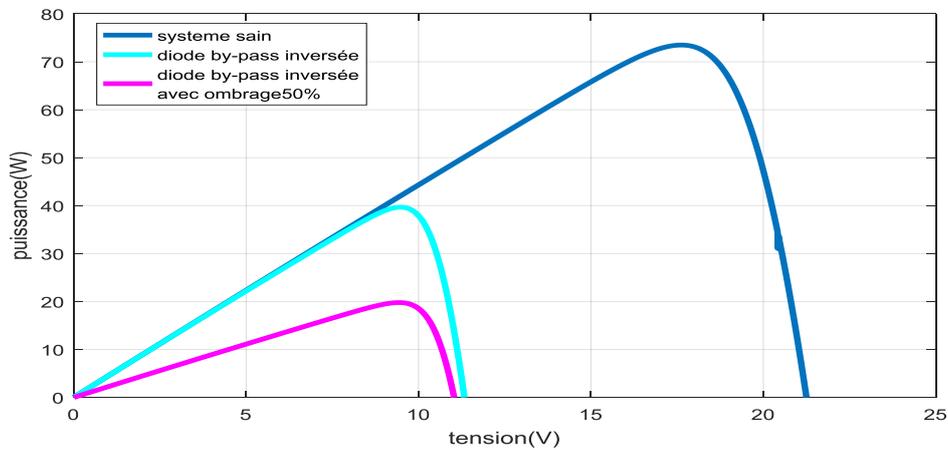


Figure IV.17 : Caractéristique (P-V) d'un module PV avec une diode by-pass inversée.

IV.4.3. Choix des symptômes pour le diagnostic de défauts

Une simulation exhaustive des différents défauts nous a permis d'obtenir différentes courbes telles qu'ont présentées dans la figure (IV.18). De la figure on peut tirer trois symptômes qu'on juge suffisants pour discriminer les défauts considérés.

Le choix des symptômes et la toute première étape qu'on fait pour réussir un algorithme de diagnostic.

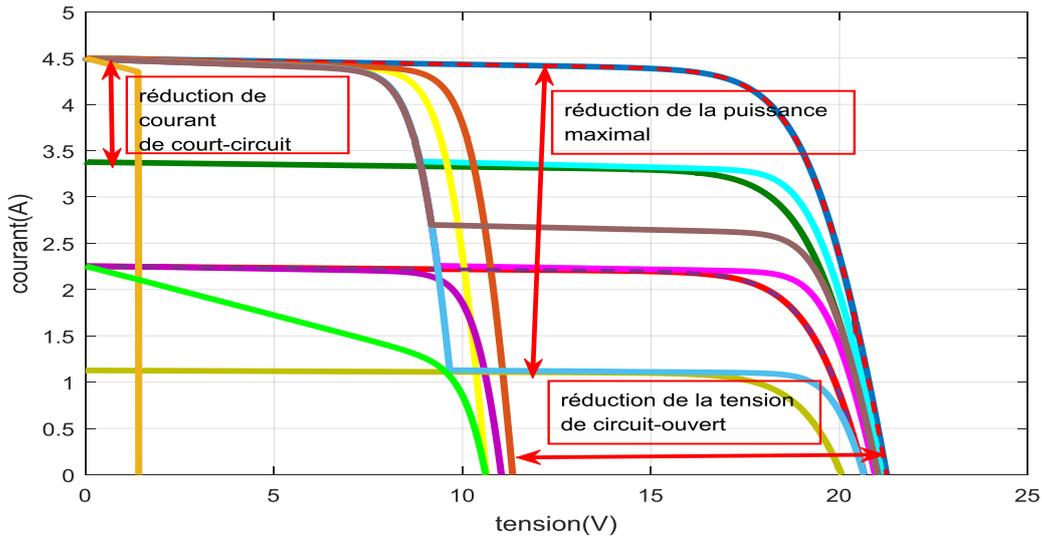


Figure IV.18 : Différents symptômes de la caractéristique (I-V) d'un module PV défaillant.

- Le symptôme S1 : présente la réduction de la puissance produite par le module PV.
- Le symptôme S2 : présente la réduction de la tension de circuit ouvert du module PV.
- Le symptôme S3 : présente la réduction du courant de court-circuit du module PV.

IV.4.4. Génération des symptômes

La méthode de détection de défauts que nous avons utilisée se base principalement sur les quatre caractéristiques pour détecter la présence du défaut. Il s'agit de : I_{cc} , V_{co} , P_{max} .

La méthode de calcul de chaque symptôme. Ces symptômes ont été calculés à partir de la comparaison de la caractéristique d'un système PV en fonctionnement normal avec celle en fonctionnement défaillant.

L'expression est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta P_{max} = P_{max(sain)} - P_{max(défaut)} \tag{IV.1}$$

$$\Delta I_{cc} = I_{cc(sain)} - I_{cc(défaut)} \tag{IV.2}$$

$$\Delta V_{co} = V_{co(sain)} - V_{co(défaut)} \tag{IV.3}$$

IV.4.5. Réglage du seuil

Dans cette partie, nous présentons d'abord la méthode de détermination du seuil pour chaque symptôme pour éviter les fausses alarmes.

- Tableau de binaire

L'état binaire des symptômes représente la présence ou l'absence de ce symptôme pour obtenir le tableau de signature pour faciliter la détection du défaut.

- État « 0 » correspond au cas « pas de changement il n'y a aucun défaut ».
- État « 1 » correspond au cas « changement il y a un défaut ».

IV.5. Réalisation d'un algorithme de diagnostic sur un panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink

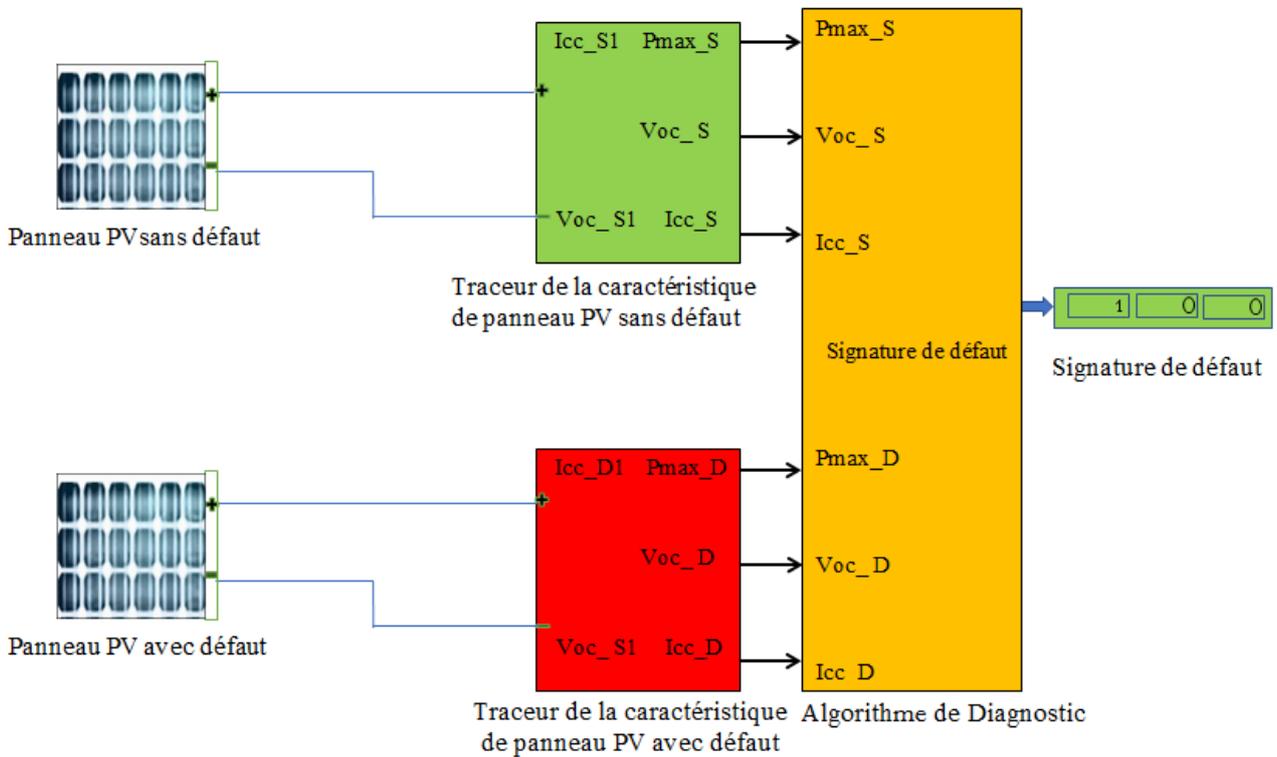


Figure IV.19 : schéma bloc utilisé pour produire les signatures de défauts.

IV.5.1. Défauts considéré pour le diagnostic

Les défauts choisis pour le diagnostic sont discutés dans le tableau (IV.1). De plus, le modèle MATLAB Simulink est construit pour extraire les différentes caractéristiques de ces défauts à partir des courbes (I-V) et (P-V) comme indiqué dans la section suivante :

Tableau IV.2 : Les différents Les défauts choisis pour le diagnostic.

Type de défaut	Symbole
Système sain (état sans défaut)	D1
Effet d'ombrage total touche toutes les cellules à 50% sans défaillance de la diode de by-pass.	D2
Effet d'ombrage total touche toutes les cellules à 50% avec défaillance de la diode de by-pass(court-circuitée).	D3
Diode by-pass inversé.	D4
Effet d'ombrage partiel (18 cellules) à 50% sans défaillance de la diode de by-pass.	D5
Diode de by-pass déconnectée.	D6
Effet d'ombrage partiel (18 cellules) à 50% avec défaillance de la diode de by-pass(court-circuitée).	D7

- **Défaut du a l'effet de l'ombrage total touche toutes les cellules sans défaillance de la diode de by-pass « D2 »**

36 cellules sont supposées ombragée totale avec un rayonnement solaire $G = 500 \text{W/m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$. Les caractéristiques de(I-V) et (P-V) sont illustrées sur la figure (IV.20) et (IV.21), pour l'analyse des cas normaux et des cas de défaut en cas de situation d'ombrage total, diminution le courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{co} diminue pour un nombre de cellules ombrées et une réduction de point de puissance maximale PPM.

- **Défaut du a l'effet de l'ombrage total touche toutes les cellules avec défaillance de la diode de by-pass « D3 »**

Dans cette partie, il est supposé que les 18 cellule ont un problème de court-circuit pendant le cas d'un ombrage total (36 cellules) avec un rayonnement solaire $G = 500\text{W/m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$. Les caractéristiques de (I-V) et (P-V) sont illustrées sur la figure (IV.20) et (IV.21), pour l'analyse des cas normaux et des cas de défaut en cas de situation d'ombrage total, Diminution le courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{co} diminuée en fonction du nombre de diodes court-circuitées est une réduction de point de puissance maximale PPM.

- **Diode by-pass inverse « D4 »**

Dans cette partie, il est supposé que les deux diodes By-pass inversée avec un rayonnement solaire $G = 1000\text{W/m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$. Les caractéristiques de (I-V) et (P-V) sont illustrées sur la figure (IV.20) et (IV.21), pour l'analyse des cas normaux et des cas de défaut en cas de situation d'ombrage total, le courant de court-circuit I_{cc} reste constant et la tension en circuit ouvert V_{co} diminue en fonction du nombre de diodes inversées et une réduction de point de puissance maximale PPM.

- **Défaut du a l'effet de l'ombrage partiel (18 cellules) sans défaillance de la diode de by-pass « D5 »**

Le défaut d'ombrage partiel est un cas particulier d'un défaut de mismatch dynamique est causé par le changement de niveau d'irradiance. Les 18 cellules sont supposées ombrager avec un rayonnement solaire $G = 500\text{W/m}^2$ et les 18 cellules est-on $G = 1000\text{W/m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$. Les caractéristiques de (I-V) et (P-V) sont illustrées sur la figure (IV.20) et (IV.21), pour l'analyse des cas normaux et des cas de défaut en cas de situation d'ombrage partiel, le courant de court-circuit I_{cc} reste constant, mais la tension en circuit ouvert V_{co} diminue pour un nombre de cellules ombrées et une réduction de point de puissance maximale PPM.

- **Diode de by-pass déconnectée « D6 »**

Dans cette partie, nous supposons à un problème de déconnexion dans un module, tandis que les diodes de bypass sont connectées en parallèle avec les modules il n'y a plus de protection assurée par la diode By-pass. Les caractéristiques (I-V) et (P-V) de ce cas sont illustrées à la figure (IV.20) et (IV.21). Dans ce cas lorsque le module est totalement éclairé (sans ombrage), aucune perte de tension ou de courant n'est apparue dans le module.

- Défaut du a l'effet de l'ombrage partiel (18 cellules) avec défaillance de la diode de by-pass « D7 »

Dans cette partie, il est supposé que les 18 cellules ont un problème du court-circuit pendant le cas d'un ombrage partiel. La densité de rayonnement solaire reçue est supposée être $G = 1000 \text{ W/m}^2$ (on est 18 cellules 1) et $G = 500 \text{ W/m}^2$ (on est 18 cellules 2) à 25°C . Les caractéristiques (I-V) et (P-V) de ce cas sont illustrées à la figure (IV.20) et (IV.21). Dans ce cas, le courant de court-circuit I_{cc} reste constant et la puissance maximale P_{max} diminuent considérablement en raison de la chute de tension perdue sur les cellules ombragées correctement, mais la tension en circuit ouvert V_{co} diminuée en fonction du nombre de diodes court-circuitées.

IV.5.2. Tableau de signatures

Tableau IV.3 : Les valeurs numériques de chacun des symptômes pour chaque défaut.

Défauts	S1(W)	S2(V)	S3(I)
D2	37.080	0.620	2.246
D3	55.200	10.940	2.246
D4	67.643	19.847	0.000
D5	33.840	0.320	0.000
D6	0.000	0.000	0.000
D7	36.750	10.630	0.000

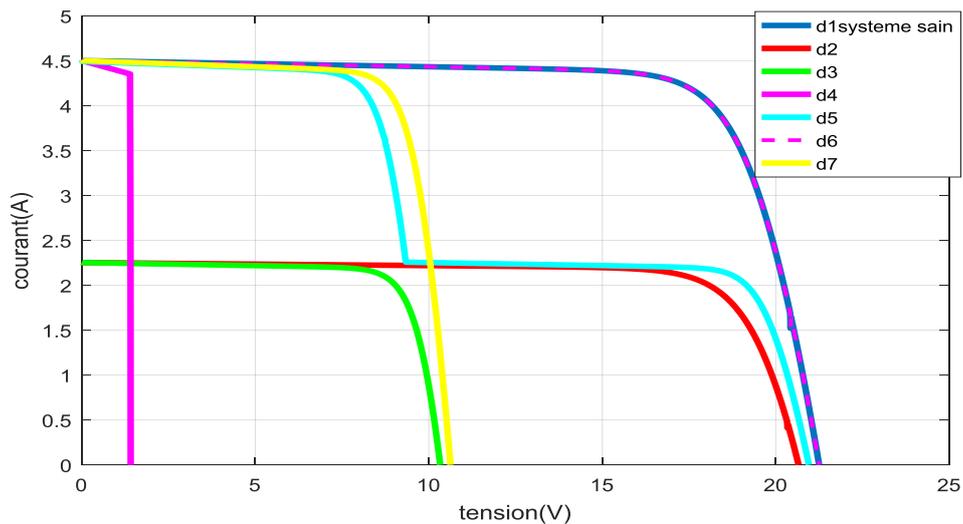


Figure IV.20 : Caractéristiques (I-V) du module sans défaut et du module avec les 6 défauts considérés.

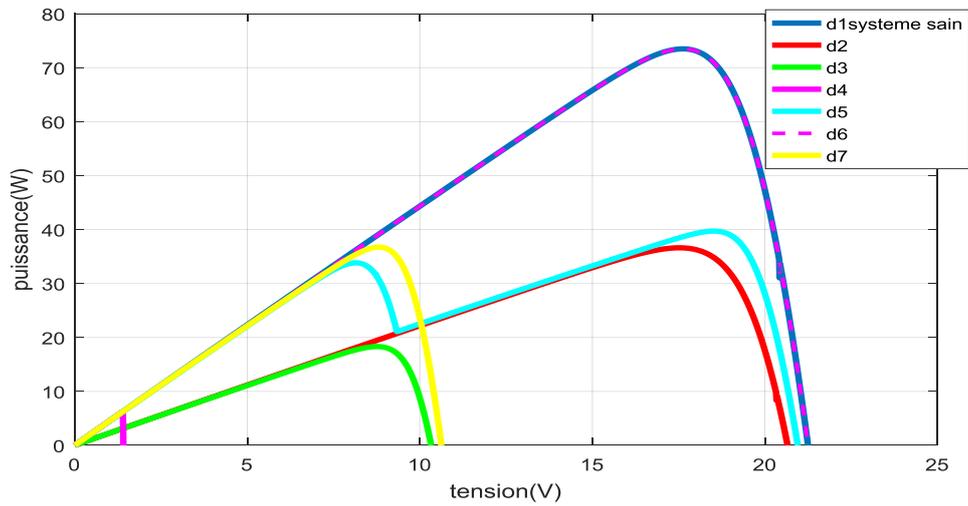


Figure IV.21 : Caractéristiques (P-V) du module sans défaut et du module avec les 6 défauts considérés.

IV.5.3. Réglage du seuil et tableau de binaire

Les valeurs de ses différents seuils se notent comme suit [13] :

- Le seuil pour la puissance maximale est 2.5 watts.
- Le seuil pour la tension du circuit-ouvert est 0.66 volts.
- Le seuil pour le courant de court-circuit est 0.19 ampères.

La détection des défauts est considérée efficace lors de dépassements de ces seuils choisis (appelés les seuils de détection), les trois symptômes comme tels :

- $\Delta P_{max} > 2.5 \text{ W}$.
- $\Delta V_{oc} > 0.66 \text{ V}$.
- $\Delta I_{cc} > 0.19 \text{ A}$.

Tableau IV.4 : Les signatures de chacun des symptômes en binaire pour chaque défaut.

Défauts	S1(W)	S2(V)	S3(I)
D2	1	0	1
D3	1	1	1
D4	1	1	0
D5	1	0	0
D6	0	0	0
D7	1	1	0

On remarque que :

- Le vecteur 1 (en orange) : $S1 = 1, S2 = 0, S3 = 1$. Donc la signature est **(1, 0, 1)**.

Un seul défaut qui dispose de cette signature.

- Le vecteur 2 (en noir) : $S1 = 1, S2 = 1, S3 = 1$. Donc la signature est **(1, 1, 1)**.

Un seul défaut qui dispose de cette signature.

- Le vecteur 3 (en rouge) : $S1 = 1, S2 = 1, S3 = 0$. Donc la signature est **(1, 1, 0)**.

Deux défauts sont rassemblés dans ce vecteur pour se partager cette même signature.

- Le vecteur 4 (en Vert) : $S1 = 1, S2 = 0, S3 = 0$. Donc la signature est **(1, 0, 0)**.

Un seul défaut qui dispose de cette signature.

- Le vecteur 5 (en bleu) : $S1 = 0, S2 = 0, S3 = 0$. Donc la signature est **(0, 0, 0)**.

Pour mettre en exergue il n'y a pas de défaut.

IV.5.4. Algorithme de diagnostic

Les étapes exécutives de cet algorithme peuvent s'inscrire comme telles :

1. Calcule V_{co} , I_{cc} , P_{max} et lire G , T .
2. Calcule des paramètres I_{cc} (sain), V_{co} (sain) et P_{max} (sain) et de I_{cc} (défaut), V_{co} (défaut) et P_{max} (défaut) pour évaluation des symptômes $S1$, $S2$, et $S3$.
3. Le vecteur $(S1, S2, S3)$ se dirige vers la prise de décision et sera comparé aux trois seuils (Le seuil de puissance, le seuil de la tension du circuit-ouvert et le seuil de courant de court-circuit) et pour faire la décision il y a une erreur ou non et d'obtenir le tableau de binaire.

Ainsi, l'algorithme de diagnostic de défaut pour notre panneau PV peut se récapituler selon la figure suivante :

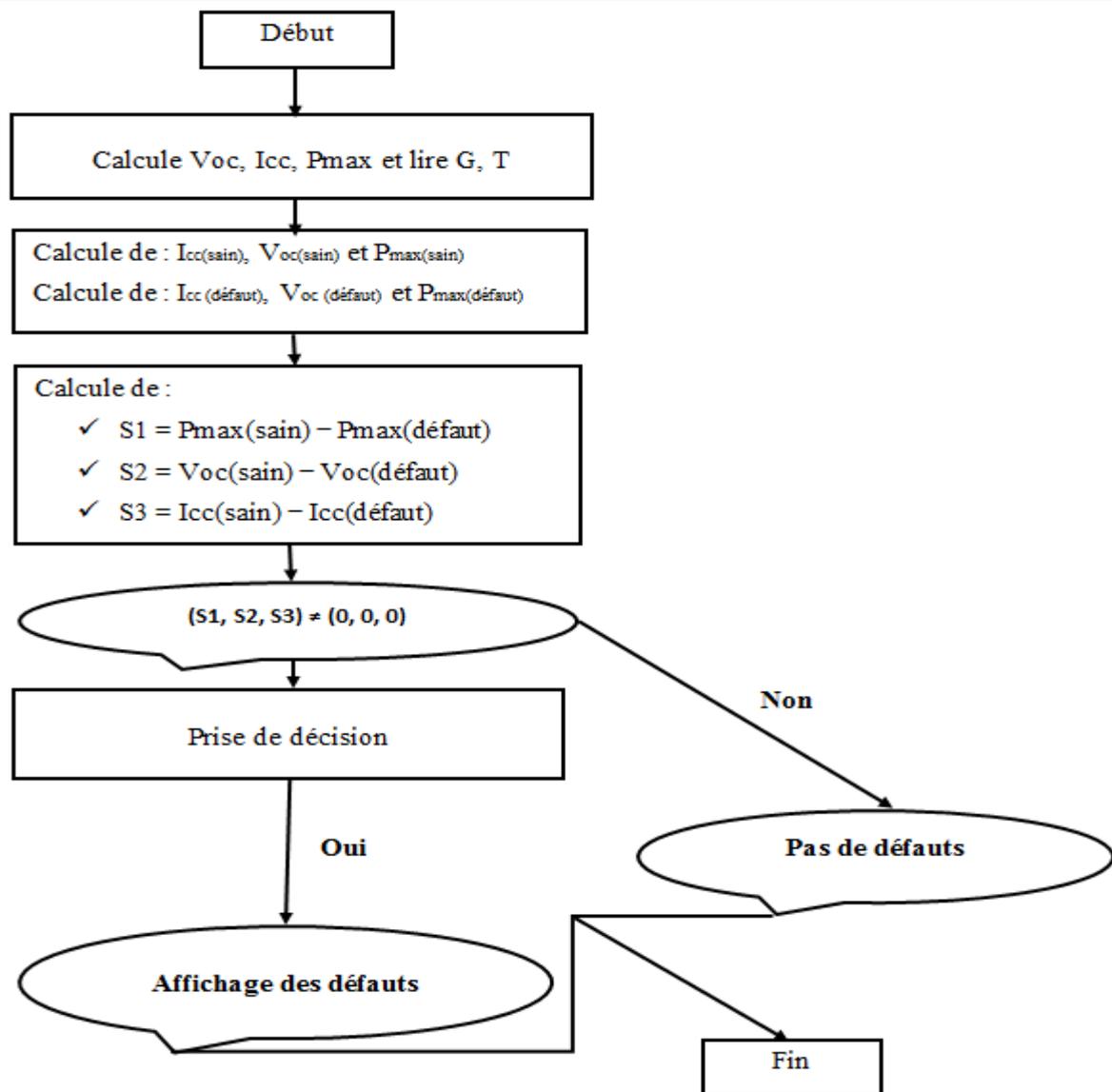


Figure IV.22 : Algorithme de Diagnostic d'un panneau PV.

IV.6. Maintenance d'un panneau solaire :

Le grand souci du service maintenance est de savoir qu'elle est priorité pour traiter les défaillances, l'importance et la gravité en matière d'effet (coût) est différente d'une à l'autre.

Les systèmes solaires nécessitent un entretien et une maintenance minime mais indispensable. Si la technique photovoltaïque est réputée fiable et sans entretien lourd, des opérations de maintenance légère sont tout de même à diriger pour prévenir d'éventuelles anomalies et s'assurer que les organes de sécurité sont en état de fonctionnement. Ces opérations valent surtout pour des installations qui ne sont pas basées sur des kits : elles ne concernent donc pas spécifiquement les particuliers (installations de faible puissance). Il y a deux niveaux de maintenance [46].

IV.6.1. Maintenance de premier niveau

Le premier concerne le petit entretien. Il doit être effectué régulièrement par l'utilisateur. Il s'agit de nettoyer les modules, vérifier l'absence d'ombres portées sur les modules, si besoin élaguer, vérifier le niveau d'électrolyte et éventuellement rajouter de l'eau distillée ou remplacer un tube fluorescent. Le technicien doit s'assurer que ces tâches sont à la portée de l'utilisateur et qu'elles sont effectuées correctement et régulièrement [46].

Accès :

1) Vérification visuelle

- Vérifier que les verres de protection n'ont pas été cassés.
- Vérifiez d'éventuelles décolorations de cellules.
- Vérifiez d'éventuelle corrosion des connexions entre cellules.
- Inspection visuelle des câbles (non-détérioration par des rongeurs) et des connexions.
- Inspection visuelle des structures porteuses : non déformation.
- Vérification de l'absence de nids d'oiseaux, d'insectes ou de rongeurs sous les panneaux.
- Vérifiez l'absence d'ombre portée sur les modules (arbre, bâtiment...).
- Vérifiez si la ou les boîtes de jonction sont bien étanches.
- Dans le cas où le support du module est relié à terre vérifiez sa continuité depuis le module jusqu'au piquet de terre.
- Si les champs sont en toiture, utiliser une échelle et marcher sur le toit en répartissant les poids.
- Vérifiez si le panneau est toujours bien fixé (vérification de la visserie antivol cas de corrosion ou d'infraction, resserrer si possible et les enduire si nécessaire de dégrippant), orienté et incliné correctement [51].



Figure IV.23 : vérification de la visserie bien fixé [51].

2) Nettoyage de panneau solaire

Pour nettoyer un panneau solaire il faut suivre les étapes suivantes :

- Elles sont sécurisées.
- Vérifiez que les connexions électriques n'ont pas d'anomalies.
- Vérifiez qu'il n'y a pas d'anomalies sur les cadres de supports des panneaux.
- Nettoyez la surface des panneaux solaires avec une éponge et de l'eau claire.
- Fixer un nettoyage au minimum deux fois par an.
- Faire le nettoyage le soir ou tôt le matin quand les panneaux ne sont pas exposés à un fort ensoleillement.
- Utilisez de l'eau tiède afin de ne pas créer de choc thermique avec le panneau.
- Le nettoyage des panneaux solaires ne nécessite « aucun produit chimique ».
- Si les panneaux sont installés sur le toit, il faut :
 - ✓ Une échelle pour y accéder.
 - ✓ On utilisera un chiffon doux et propre : mais pas d'eau.
- On essuiera doucement la surface des panneaux en partant du haut vers le bas.
- On s'assurera qu'il n'y a plus de trace de poussière.
- On évitera de marcher sur les panneaux ou de s'y appuyer.



Figure IV.24 : Le nettoyage de panneau solaire.

3) Changement d'un verre de panneau solaire

Elles sont sécurisées [47].

- Élimine les connexions électriques.
- Laisser le panneau solaire refroidi, le panneau sera très chaud après une exposition au soleil.
- Les modules photovoltaïques étant situés juste en dessous.

- Prend le risque d’abîmer une cellule photovoltaïque et ses semi-conducteurs
- En retirant lui-même le verre brisé
- Les particuliers souhaitant malgré tout démonter leur panneau eux-mêmes préféreront le démonter avec son cadre.
- Une fois l’ancienne vitre retirée, il s’agit de choisir un verre de remplacement. Plusieurs options sont possibles :
 - ✓ Le verre feuilleté
 - ✓ Le verre trempé ou verre Sécurité
 - ✓ Un verre simple auquel s’ajoute un film antieffraction
- Remplacer la vitre
- Puisqu’il faudra remonter le panneau une fois le verre remplacé.



Figure IV.25 : Changement d’un verre de panneau solaire [47].

4) Contrôle des performances électriques

Différents défauts sur les paramètres de la cellule :

Tableau IV.5 : Visée des différents défauts sur les paramètres de la cellule [46].

Problèmes	Causes	Solutions
Courant de sortie faible	Trop de poussière	Nettoyez, ou Modifiez l’implantation du panneau si le nettoyage en est impossible
	De l’ombre (Feuilles d'arbre, déjections, sable, pollution,	Supprimez la cause de l’ombre

	neige etc). Sur tout ou partie du module.	
	Mauvaise aération du panneau	Nettoyez l'arrière du panneau et modifiez l'installation si nécessaire
	Module mal orienté ou incliné	Modifiez l'orientation ou l'inclinaison
Courant de sortie très faible	Une (ou plusieurs) cellule est masquée par une feuille, une fiente d'oiseau	Nettoyez et/ou coupez les branches les plus proches
Aucun courant de sortie	Les connexions, au niveau de la boîte de jonction, sont desserrées ou corrodées	Nettoyez et resserrez. Percez un petit trou (1 mm) en bas de la boîte de jonction pour que l'eau de condensation puisse s'évacuer
	Diodes by-pass claquées passantes (court-circuit)	Changez les diodes by-pass ou enlevez-les simplement faute de diodes de rechange (cas des systèmes 12 ou 24 V)
	Connexion coupée au niveau de la sortie du module ou entre cellules	Si possible, grattez l'arrière du module et ressoudez les connexions. Refaire l'étanchéité avec du silicone
La tension de circuit ouvert est basse (inférieure à 12 V même à midi)	Une diode by-pass est grillée passante (dû vraisemblablement à la foudre).	Changez la diode by-pass ou enlevez-la simplement faute de diode de rechange disponible
Plaque de verre cassée	Vandalisme ; Module frappé par la foudre ;	Le module peut fonctionner encore quelques années, jusqu'à ce que

	Ou défaut de fabrication.	l'humidité corrode les contacts entre cellules. Changez le module, si les valeurs I_{cc} et V_{co} sont incorrectes Vérifiez si le support module ne provoque pas de contraintes mécaniques sur le module Contactez le fournisseur si la période de garantie n'est pas dépassée
--	---------------------------	--

IV.6.2. Maintenance de deuxième niveau des Panneaux photovoltaïques

Le deuxième niveau concerne la maintenance plus poussée, qui doit être effectuée par un technicien qualifié et équipé d'outils appropriés. Il s'agit de vérifier en détail les principaux composants du système, selon des procédures telles que décrites dans ce module. Cette maintenance doit être effectuée tous les 6 mois dans la plupart des cas.

- Vérification des structures et des fixations.
- Contrôle du serrage de toutes les connexions.
- Vérification des courants de sortie.

1) Testez tous les composants électriques et électroniques du système

- Testez les panneaux solaires connectés en série avant de les brancher au système ;
- Testez le V_{oc} de chaque panneau solaire à l'aide d'un multimètre numérique. Les valeurs doivent correspondre à la somme de la tension à vide du panneau solaire ;
- Vérifiez le courant de court-circuit de chaque circuit en série. Il peut être mesuré directement par un multimètre numérique connecté aux deux bornes du circuit ou du module en série [48].

1- Contrôler que le panneau d'élever bien une tension en Volt (V)

Pour ce faire :

- Couper le sectionneur ou disjoncteur côté panneau. S'il n'y a pas de dispositif sectionnement, couvrir le panneau pour masquer les cellules puis débrancher les câbles aux bornes du régulateur.
- S'assurer que la surface avec les cellules est bien exposée au rayonnement solaire.
- À l'aide d'un testeur appelé aussi voltmètre ou multimètre, mesurer la tension au bout des câbles du panneau.

- Cette tension varie en fonction de l'ensoleillement. Elle est appelée "tension à vide" (V_{oc}). Sa valeur maximale est indiquée en général sur l'étiquette au dos du panneau ou sur la fiche technique. Cette valeur est quasiment impossible à atteindre car elle est mesurée en laboratoire, cependant en plein soleil la tension doit s'en approcher.

2- Contrôler que le panneau produit bien du courant en Ampère (A)

Cette étape nécessite de l'appareillage plus spécifique :

- Un testeur ou multimètre qui permet de mesurer un courant continu avec un calibre suffisant (10A), voici comment faire :
 - ✓ Couper le sectionneur ou disjoncteur côté panneau. S'il n'y a pas de dispositif de sectionnement, couvrir le panneau pour masquer les cellules puis débrancher les câbles aux bornes du régulateur.
 - ✓ S'assurer que la surface avec les cellules est bien exposée au rayonnement solaire.
 - ✓ À l'aide d'un testeur appelé aussi ampèremètre ou multimètre, mesurer le courant au bout des câbles du panneau.
- Pour pouvoir mesurer un courant le testeur doit être placé en série avec le système, il faut donc, en général, modifier le branchement sur le multimètre.
- Le courant de court-circuit (I_{cc}) est indiqué sur l'étiquette au dos du panneau ou sur la fiche technique.



Figure IV.26 : pince Ampère-métrique DC/AC (à effet Hall).

2) Les essais de vieillissement accéléré

Les essais de vieillissement accéléré (ALT : Accelerated Life Testing) se composent d'une variété de techniques d'essais pour accélérer les processus de vieillissement et atteindre plus rapidement la fin de vie des produits. Ils sont utilisés pour obtenir plus rapidement des informations concernant la vie du produit. Les systèmes testés sont employés plus fréquemment que d'habitude ou sont soumis à des niveaux de sollicitations plus élevés (par exemple l'augmentation de la température, de la tension électrique, de l'humidité, etc.) pour obtenir la loi de fiabilité ou autres caractéristiques de fiabilité (taux de défaillance, temps de défaillance, etc.) des produits (systèmes ou composants) [49].

1- Essai de chaleur humide (DH : Damp Heat)

Le test de chaleur humide (DH) dans les chambres environnementales est un test de vieillissement bien connu pour les composants électroniques. Il est utilisé depuis les années 1970 sur les modules solaires et fait partie de la procédure de certification des modules. Le test DH est basé sur les théories d'Arrhenius (température) et de Peck (température et humidité). Le DH fait partie du test CEI 61215. Un problème avec le test DH est que la température provoque une perte d'adhérence pour certains matériaux d'enrobage qui n'apparaîtrait pas à des températures ambiantes normales. Cela ne correspond bien sûr pas à un vieillissement normal et doit être pris en compte lors du test des modules [50].

2- Test de fatigue fortement accéléré (HAST : highly Accelerated Stress Test)

Étant donné que les 1000 heures de tests DH représentent une très longue période de temps pour les tests industriels, le test de stress hautement accéléré (HAST) a été développé. Il augmente la température et l'humidité afin de raccourcir le temps de vieillissement et maintenant il commence également à être de plus en plus utilisé dans d'autres industries. De nombreuses entreprises dans d'autres domaines électroniques ont même abandonné les anciens tests THB ou DH au profit du HAST [50].

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier le comportement d'un module photovoltaïque (composé en série de deux groupes chacun composé de 18 cellules) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement et le point de puissance maximale PPM de module PV.

Nous avons modélisé certains défauts au niveau du module PV via le programme de simulation (Matlab/Simulink) et obtenu des résultats qui nous permettent de distinguer les différents défauts. De plus, nous avons réalisé une étude de simulation de six défauts) à partir des courbes (I-V) et (P-V).

Dans la deuxième partie, il s'agit de la construction d'un algorithme qui se révèle capable de discriminer presque la totalité des défauts choisis pour le diagnostic. Cette opération a été réussie sous Matlab/Simulink.

Enfin dans la troisième partie, nous avons parlé sur les deux niveaux de la maintenance qu'on peut réaliser pour permettant d'assurer un fonctionnement le plus fiable et le plus durable des systèmes. La fréquence et le nombre de pannes sont alors réduits.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Dans le cadre du travail de projet de fin de cycle Master, on s'est principalement intéressé au diagnostic des défauts au niveau d'un module photovoltaïque par analyse de la caractéristique (I-V). L'objectif est de créer un modèle mathématique qui peut discriminer la totalité des défauts considérés. D'abord, pour un diagnostic dans le domaine photovoltaïque, une brève étude bibliographique sur les différentes approches théoriques des différentes méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts qui peuvent avoir lieu au niveau d'un module PV.

Nous avons présenté le principe de fonctionnement d'un module photovoltaïque, les modèles électriques équivalents (modèle idéal, modèle à une diode et modèle à deux diodes), ainsi que les différents modèles mathématiques existants. Nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque. Nous avons utilisé le logiciel MATLAB/Simulink pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV on a abordé l'association des cellules en série, en parallèle

La deuxième étape consiste à établir une base de données sur le comportement sain et comportement défaillant d'un module PV. On a procédé à la simulation du module PV, dans l'environnement Matlab/Simulink pour un fonctionnement sain et défaillant. Les résultats obtenus pour le fonctionnement sain du module PV vis-à-vis des variations d'éclairement et de température ont montré que le comportement de toutes les cellules est identique.

En comparant les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un module PV en fonctionnement sain et celle en fonctionnement défaillant pour les différents défauts considérés, trois symptômes ont été retenus : diminution de la puissance maximale, diminution de la tension de circuit ouvert, diminution du courant de court-circuit.

On a établi une étude comparative entre les différents défauts appliqués sur le panneau photovoltaïque dans la pratique et les défauts réalisés dans la simulation. Nous avons trouvé une bonne concordance entre les résultats obtenus.

Finalement pour fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance il faut obtenir la bonne politique de maintenance avec ces deux niveaux.

Comme perspectives nous proposons:

- D'améliorer la capacité de diagnostic pour le plus grand nombre des défauts possibles.
- D'appliquer l'algorithme de diagnostic proposé pour faire la détection et la localisation de défauts pour un panneau PV.

- D'appliquer des défauts multiples.

Bibliographique

- [1] [http://www. Energies-renouvelables .org](http://www.Energies-renouvelables.org)
- [2] Intelligent énergie Europe. [Énergie bits.com](http://Energie.bits.com)
- [3] Guide des Energies Renouvelables, Ministère de l'énergie et des Mines, Edition 2007.
- [4] ASAL, « L'Atlas Solaire de l'Algérie par l'Agence Spatiale Algérienne », Energie nouvelle et renouvelable.
- [5] <http://www.energy.gov.dz>
- [6] Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017. Ministère de l'Energie 2016.
- [7] <http://fr.tutiempo.net/climat/ws-605360.html>
- [8] Dossier thermique –Courier ES n°03, « effet photovoltaïque et fonctionnement des installation solaires isolées », Janvier 2000.
- [9] Jean Caillaud, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Lycée des métiers de l'énergie de la métallurgie et de la vente.
- [10] Lalouni, « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie », Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2005.
- [11] Corinne ALONSO, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de L'énergie », Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université.PAULSA BATIER – TOULOUSE III.
- [12] <http://staff.univ-batna2.dz>
- [13] Belaout Abdesslam « Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension », Mémoire de Magister, Université – Setif-1, 2014.
- [14] Akassewa Tchapo Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » thèse doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français.
- [15] Dr. Ing. Dhaker ABBES, « Cours Energie Renouvelables », Master, Version 2013-2014.
- [16] <https://www.edumedia-sciences.com>
- [17] Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine,10/06/2010.
- [18] Reynaud Jean-François, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », thèse doctorat, Université de Toulouse, 2011.

- [19] Pierre-Franck Chevet, directeur général de l'Énergie et du Climat « Installations photovoltaïques au sol », Guide de l'étude d'impact.
- [20] Thomas Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies » Thèse de Doctorat, Université Paris Sud - Paris /2015/ Page modèle à deux diodes 56.
- [21] ATEK Mourad, « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif,2013.
- [22] Saad M, Abdelaziz G, « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc /2020/page 3.
- [23] Iberraken F/ Maouche Ch, « Analyse des Modes de Défaillance des Systèmes Photovoltaïques installés dans le sud Algérien », Université Abderrahmane Mira Bejaia ,2012.
- [24] Djeriou Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif ,2011.
- [25] MECHOU CH et CHETTAH H, « Analyse énergétique et exégétique d'un Panneau photovoltaïque », Thèse de Master, Université Akli Mohand Oulhadj –BOUIRA,2019/2018.
- [26] Bouzaghrou Sedik, Berrian Djaber, « Développement des modèles mathématiques d'un générateur photovoltaïque défectueux », Université Houari Boumediene,2015/2014.
- [27] Aziz Toulait, Rachid Aili, « Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou,2014.
- [28] Mohammed Telidjane « Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic », Thèse de Doctorat, Université de Jean Monnet Saint-Etienne,2017.
- [29] Ould Mahmoud Yahya, A. Ould Mohamed, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal/2008
- [30] HELALI KAMELIA « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque », Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, l'UMMTO « Tizi-Ouzou » ,2012.
- [31] Abderrahmane Jarrou, « Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts des systèmes à énergie renouvelable », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine Français,2020.
- [32] <http://www.espec.com>
- [33] Seif Eddine NAFFOUTI, « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque », thèse pour obtenir le diplôme national d'ingénieur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 02/07/2012.

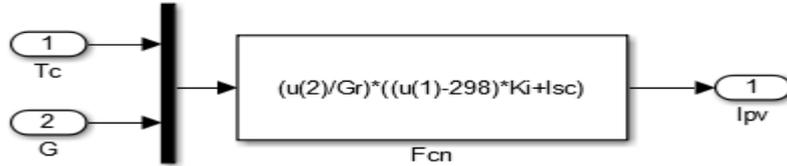
- [34] Marir-Benabbas M, « Etude du problème de « HOT SPOT » dans un module solaire photovoltaïque », Thèse de magistère, université de Constantine, 1984.
- [35] Ababacar Ndiaye, « Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques- Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance », thèse doctorat, université de Cheikh Anta Diop de Dakar, 2013.
- [36] Oreski G., Wallner G.M, « Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions », Solar Energy, 2009.
- [37] Khenfer Raid, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro énergétique », thèse doctorat, université de Ferhat Abbes Setif ,2015.
- [38] Quintana M.A., King D.L., McMahan T.J., Osterwald C.R, « Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules », Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1436-1439, 2002.
- [39] <https://www.hovall.com>
- [40] <https://hovall.com>
- [41] M. Benkaci, « Surveillance des systèmes mécatronique d'automobile par des méthodes d'apprentissage », Université de Toulouse, 2011.
- [42] Aicha DJALAB, « Diagnosis of faults in a renewable energy system based on artificial intelligence techniques : Application on a photovoltaïque system », Thèse de Doctorat, Université of Djelfa, 2020.
- [43] H. Hacene, « Identification et surveillance de processus dynamiques complexes par logique floue. Application à un échangeur de chaleur », Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, 2007.
- [44] N. Aouchiche, « Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art », Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°2 (2018) 247 – 265.
- [45] Internationale Norme International Standard, 2005.
- [46] Jean-Paul Louineau , MANUEL DU FORMATEUR , Alliance Soleil Sarl , version Janvier 2006.
- [47] <https://izi-by-edf.fr/blog/panneaux-solaires-remplacement-verre-casse>
- [48] Manuel de formation pour l'Installation et la Maintenance de petits systèmes photovoltaïques Manuel-panneau-solaire, 2006.
- [49] W. Meeker et L. Escobar, « Statistical methods for reliability data », Wiley, New-York, 1998.
- [50] Wohlgemut, J. H, « *Long Term Reliability of PV Modules*, Maryland: BP Solar International », 2005.

[51] <https://fr.depositphotos.com/stock-photos/panneau-solaire-cass%C3%A9.html>

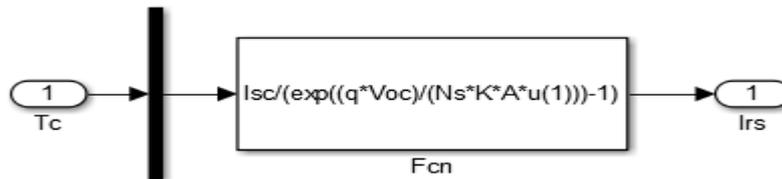
Annexe

Schéma de simulation sous Matlab/Simulink

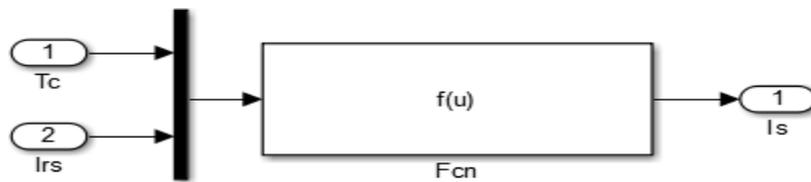
- Pour mesure le courant I_{pv}



- Pour mesure le courant I_{rs}

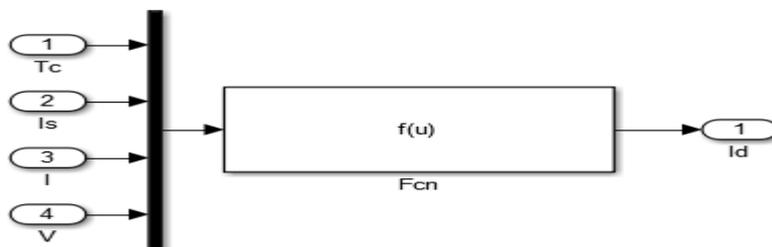


- Pour mesure le courant I_s



$$F(u) = u(2) * ((u(1) / (Tref)) ^ 3) * exp(((q * Eg) / (A * K)) * ((1 / u(1)) - (1 / Tref)))$$

- Pour mesure le courant I_d



$$F(u) = (exp(((q * (u(4) + u(3) * Rs)) / (K * u(1) * Ns * A))) - 1) * u(2) * Np$$

- Pour mesure le courant I_{sh}

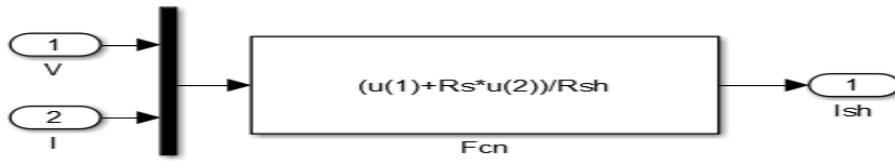


Schéma de simulation d'un panneau solaire

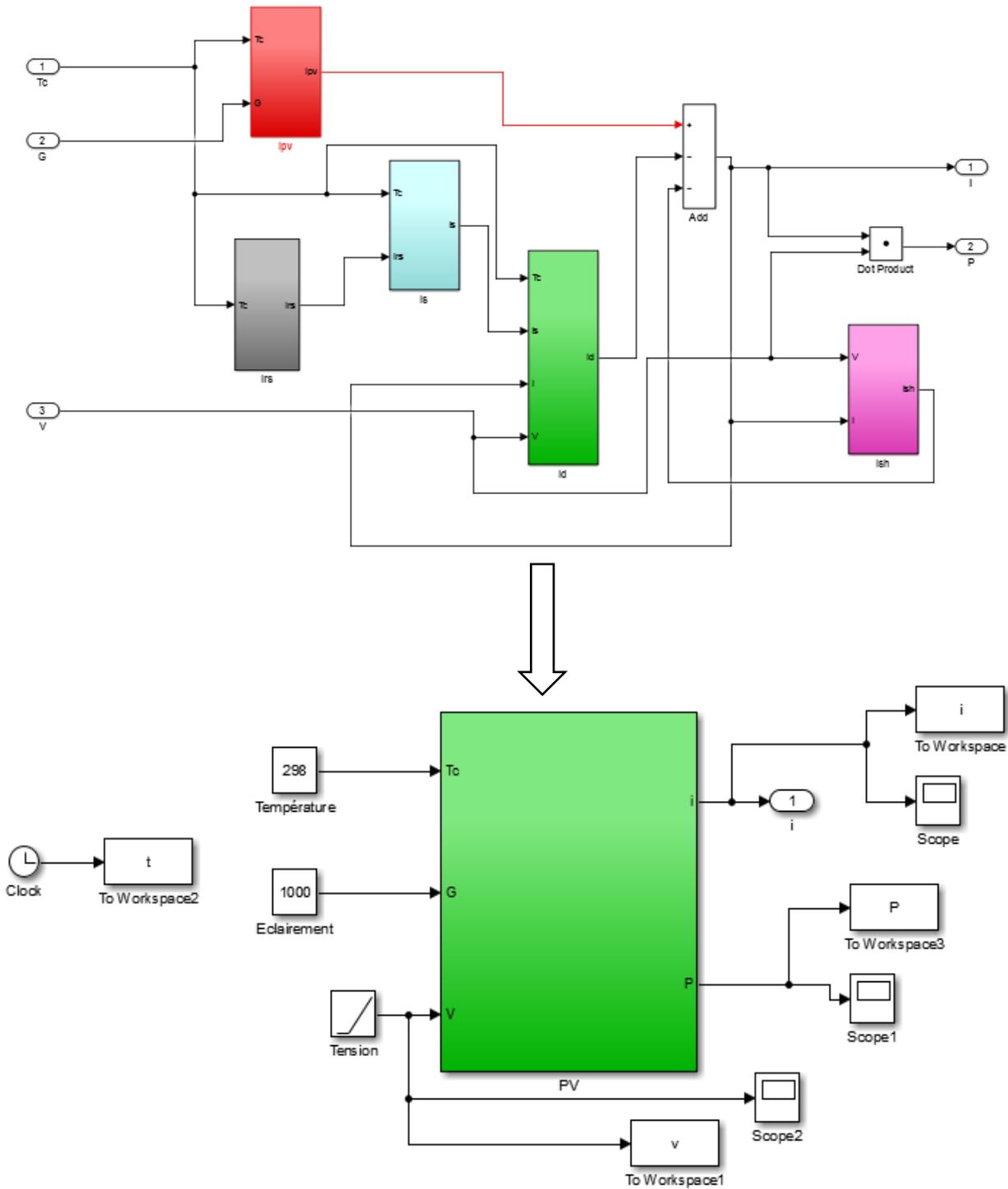


Schéma bloc pour tracer les caractéristiques de l'influence de la température

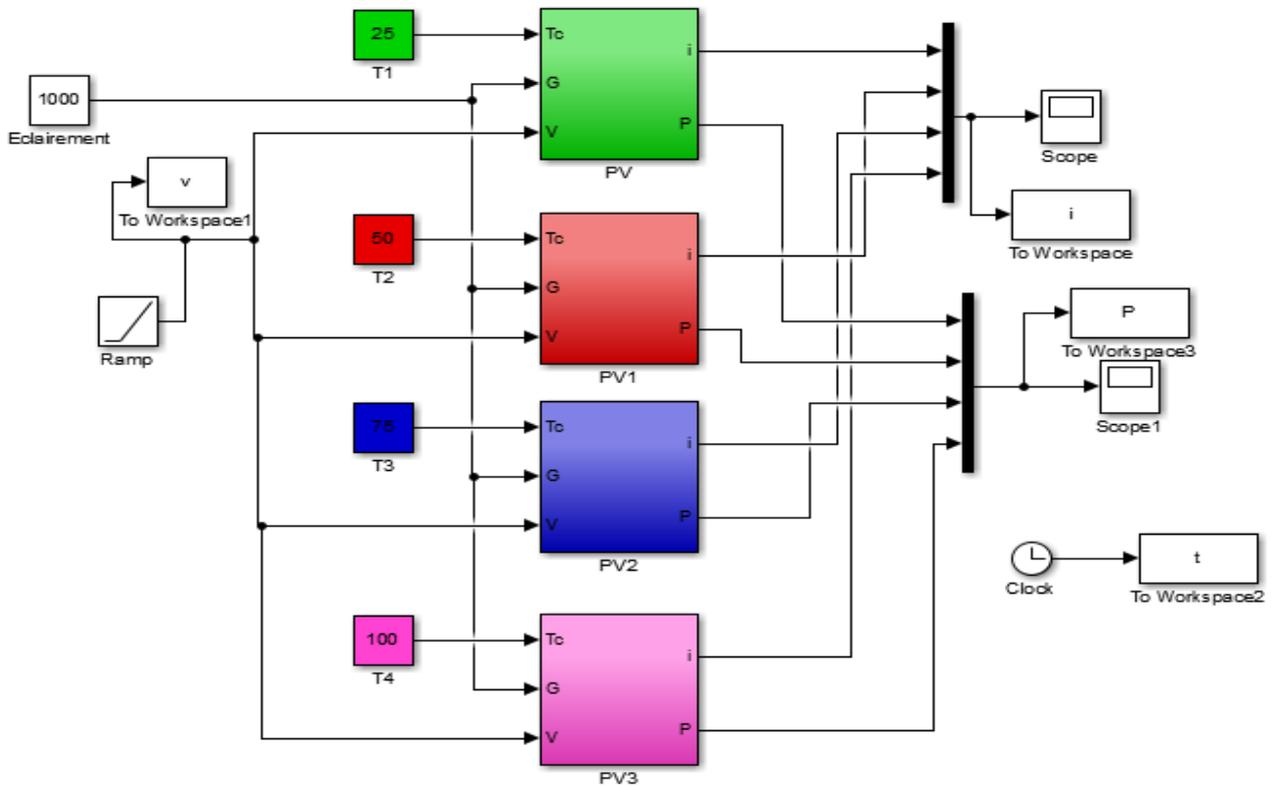
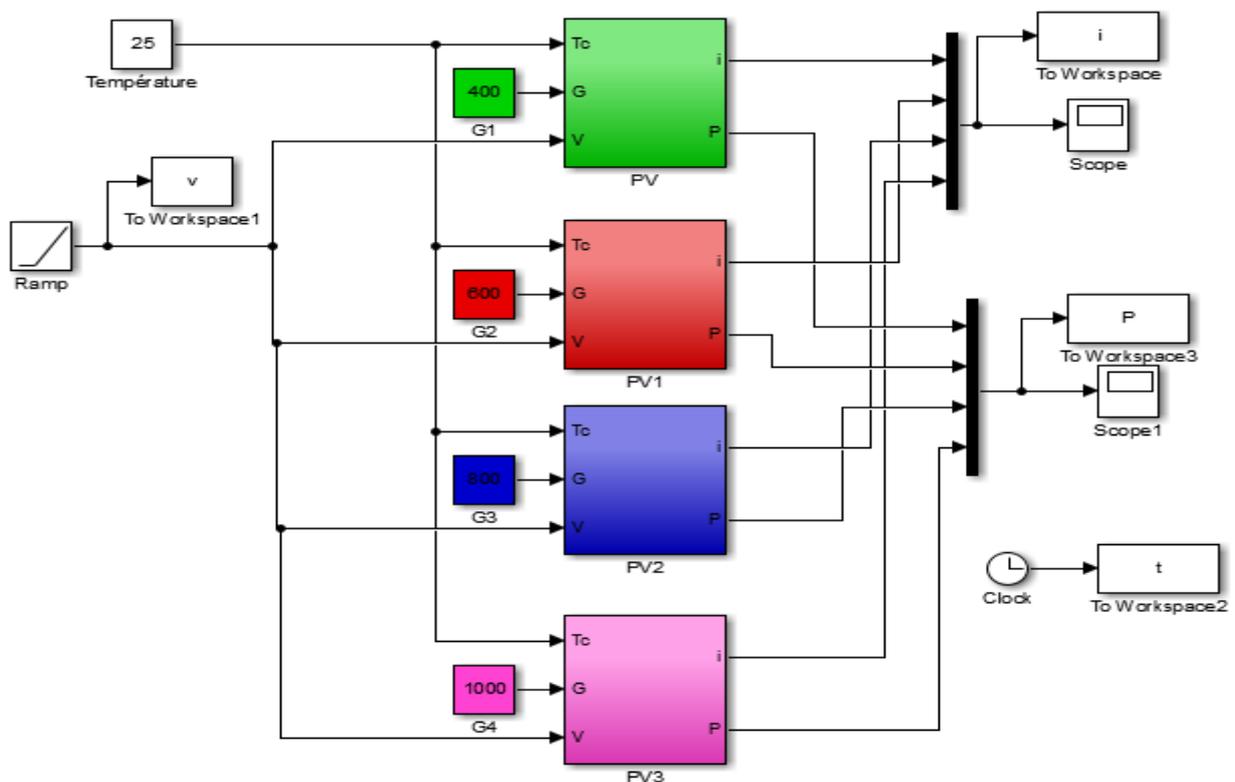


Schéma bloc pour tracer les caractéristiques de l'influence de l'éclairement



Résumé

Le panneau solaire ou la cellule solaire est l'un des éléments les plus importants du système solaire qui convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques, mais tout défaut de cette cellule peut causer une diminution du rendement.

L'objectif de ce mémoire est d'établir une méthode de diagnostic des défauts qui peut se réaliser dans une structure réelle. Ces défauts sont diagnostiqués et localisés en mettant en œuvre un algorithme basé sur les valeurs mesurées du panneau solaire, nous avons appliqué cet algorithme sur un panneau PV sous Matlab/Simulink.

Mots clés : Diagnostic, panneau photovoltaïque, les défauts, les symptômes et Matlab/Simulink.

ملخص

تعتبر الألواح الشمسية أو الخلايا الشمسية من أهم عناصر النظام الشمسي التي تحول جزء من الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية أو كهربائية، وذلك بفضل المجمعات الشمسية الحرارية أو الكهروضوئية، ولكن أي خلل في هذه الخلية يمكن أن يتسبب في انخفاض المردودية.

الهدف من هذه المذكرة هو إنشاء طريقة لتشخيص العيوب التي يمكن إجراؤها في هيكل حقيقي، ويتم تشخيص هذه العيوب وتحديد موقعها من خلال تنفيذ خوارزمية تعتمد على القيم المقاسة للوحة الشمسية، وقد طبقنا هذه الخوارزمية على اللوحة الشمسية في برنامج Matlab/ Simulink.

الكلمات المفتاحية : تشخيص، لوحة الضوئية، العيوب، الأعراض و Matlab/Simulink .

Abstract

The Solar panel or Solar cell is one of the most important elements of the solar system that converts part of the solar radiation into thermal or electrical energy, thanks to thermal or photovoltaic solar collectors, but any defect in this cell can cause a decrease in yield.

The objective of this memory is to establish a method of diagnosis of the defects which can be carried out in a real structure, These defects are diagnosed and localized by implementing an algorithm based on the measured values of the solar panel, we applied this algorithm to a PV panel under Matlab/Simulink.

Keywords: Diagnosis, photovoltaic panel, faults, symptoms and Matlab/Simulink.