



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
BEN FERHA ALI

Le : jeudi 19 juin 2025

Influence des défauts sur le comportement d'un générateur photovoltaïque: Etude et Simulation

Jury :

M.	MOUSSI Ammar	Pr	Université Mohamed Khider Biskra	Président
M.	Kiyyour Brahim	MCA	Université Mohamed Khider Biskra	Examineur
Mlle.	GUERGAZI Aicha	MCA	Université Mohamed Khider Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2024-2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Entrez votre filière
Entrez votre spécialité

Réf. : Entrez la référence du document

Influence des défauts sur le comportement d'un générateur photovoltaïque: Etude et Simulation

Le : jeudi 19 juin 2025

Présenté par : BEN FERHA Ali

Avis favorable de l'encadreur :

GUERGAZI Aicha

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Résumé

L'énergie solaire est une énergie propre et renouvelable qui dépend de l'éclairement solaire. Le concept de base de production de cette énergie consiste en la conversion de l'intensité de l'éclairement solaire en énergie électrique par l'intermédiaire de panneaux solaires photovoltaïques. Et comme c'est important d'avoir toujours un très bon rendement dans ces centrales, plusieurs facteurs et défauts sont pris en considération et surtout l'ombrage partiel qui est un problème courant dans les systèmes PV. Dans ce travail, nous avons modélisé et étudié l'effet de différentes configurations dans des conditions d'ombrage partiel. Nous nous intéressons à l'effet de l'ombrage partiel sur un système photovoltaïque et son impact sur les différentes caractéristiques de GPV. Notre intérêt s'est particulièrement consacré à l'étude et simulation sous l'environnement SIMULINK de l'effet de l'ombrage sur les générateurs photovoltaïques.

Mots clés : Energie solaire, photovoltaïque (PV), L'ombrage partiel, Matlab/Simulink

ملخص

الطاقة الشمسية هي طاقة نظيفة ومتجددة تعتمد على الإضاءة الشمسية. يتكون المفهوم الأساسي لإنتاج هذه الطاقة في تحويل شدة الإضاءة الشمسية إلى الطاقة الكهربائية من خلال الألواح الشمسية الكهروضوئية. ولأنه من المهم دائمًا أن يكون لديك عائد جيد جدًا في محطات الطاقة هذه ، يتم أخذ عدة عوامل وعيوب في الاعتبار وخاصة الظل الجزئي الذي يمثل مشكلة شائعة في أنظمة الكهروضوئية. في هذا العمل ، قمنا بنمذجة ودرسنا تأثير التكوينات المختلفة في ظل ظروف الظل الجزئية. نحن مهتمون بتأثير الظل الجزئي على نظام الكهروضوئي هو تأثيره على الخصائص المختلفة لـ GPV. تم تكريس اهتمامنا بشكل خاص للدراسة والمحاكاة في ظل بيئة Simulink لتأثير الظل على المولدات الكهروضوئية. الكلمات الرئيسية: الطاقة الشمسية ، الكهروضوئية (PV) ، الظل الجزئي ، MATLAB/SIMULINK

Abstract

Solar energy is a clean and renewable energy which depends on solar lighting. The basic concept of production of this energy consists in the conversion of the intensity of solar lighting into electrical energy through photovoltaic solar panels. And as it is important to always have a very good yield in these power plants, several factors and defects are taken into account and especially partial shade which is a common problem in PV systems. In this work, we have modeled and studied the effect of different configurations under partial shade conditions. We are interested in the effect of partial shade on a photovoltaic system is its impact on the different characteristics of GPV. Our interest was particularly devoted to study and simulation under the Simulink environment of the effect of shade on photovoltaic generators.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic (PV), partial shade, Matlab/Simulink

Remerciements

*Avant tout je remercie Allah pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail. Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Melle **A.Guergazi** qui a proposé et a dirigé ce travail. Elle m'accompagné pendant l'élaboration de ce mémoire. Elle m'a toujours conseillée pendant mes études.*

Mes remerciement aussi au département Génie électrique de l'université Biskra et à tous les enseignants qui m'enseignés durant les années du cursus.

Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'aidée de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Dédicace

*Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes au monde,
qui sont **mes parents**, pour tout leur amour, encouragement,
conseil, sacrifices, patience et confiance.*

Et Je tiens à dédier

*A ma **tendre mère** et mon très **cher père***

A ma fiancée : Halima

*A mes sœur: **Dorsaf ; Amira** et mon frère: **Samir***

Tout ceux qui m'aiment et que j'aime

TABLE DES MATIERES

Liste des Figures.....	
Liste des Tableaux.....	
I. INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	
I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. BREF HISTORIQUE	4
I.3. PRODUCTION ELECTRIQUE MONDIALE PAR LES MODULES PV.....	5
I.4. DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES EN ALGERIE.....	6
1.4.1. Un niveau de réalisation encore en deçà des objectifs.....	7
I.5. CARACTERISTIQUES DE LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
I.6. TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES.....	9
I.6.1. Silicium Monocristallin.....	9
I.6.2. Silicium Poly-cristallin.....	10
I.6.3. Silicium amorphe (a-Si).....	10
I.7. CYCLE ET CONSTITUTION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	11
I.7.1. Cycle photovoltaïque.....	11
I.7.2. Module PV	11
I.7.3. Panneau PV	11
I.7.4. Champ PV	11
I.8. CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	12
I.8.1. La courbe courant-tension	12
I.8.2. La tension en circuit ouvert (pour $I_{cc} = 0$)	12
I.8.3. Le courant de court-circuit I_{cc} (pour $V_{co} = 0$)	12
I.8.4. La puissance maximale, Le point de puissance maximale (PPM)	13
I.8.5. Facteur de forme (FF)	13
I.8.6. Rendement de la conversion (η)	13
I.9. PROTECTION DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	14
I.9.1. Diodes de by-pass.....	14
I.9.2. Diodes anti-retour.....	14
I.10. ASSOCIATION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES	15
I.10.1. Association en série.....	15
I.10.2. Association en parallèle.....	16

I.10.3. Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques.....	17
I.11. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE PV.....	18
I.11.1. Les avantages.....	18
I.11.2. Les Inconvénients	18
I.12. CONCLUSION	18

CHAPITRE II : MODELISATION DES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE

II.1. INTRODUCTION.....	19
II.2. MODELES MATHEMATIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	19
II.2.1. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	19
II.2.2. Simulation du générateur photovoltaïque.....	21
II.2.2.1. Choix et caractérisation du module photovoltaïque.....	21
II.2.2.2. Simulation du module PV.....	22
II.2.2.3. Caractéristique P-V et I-V de modules photovoltaïques.....	22
II.3. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT ET DE LA TEMPERATURE.....	23
II.3.1. Influence de la température.....	23
II.3.2. Influence de l'éclairement	24
II.3. INFLUENCE DE LA RESISTANCE SERIE ET LA RESISTANCE PARALLELE	25
II.3.1. Influence de la résistance série R_s	25
II.3.2. Influence de la résistance parallèle R_{sh}	26
II.4. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	27
II.5. PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	27
II.5.1. Associations des cellules en série	28
II.5.2. Association des cellules en parallèle.....	29
II.5.3. Association des cellules mixte (série-parallèle).....	30
II.6. CONCLUSION.....	31

CHAPITRE III : DEFAUTS LIES AUX SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

III.1. INTRODUCTION.....	32
III.2. DEFAUTS DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES	32
III.3. TERMINOLOGIE RELATIVE AUX DISFONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PV.....	32
III.3.1. Définition d'un défaut.....	32
III.3.2. Définition de Défaillance.....	32
III.3.3. Définition de Panne.....	33

III.3.4. Définition de Dégradation.....	33
III.3.5. Définition de Perturbation.....	33
III.3.6. Définition de l'Anomalie.....	33
III.3.7. Définition de Symptôme.....	33
III.3.8. Définition du diagnostic.....	33
III.4. CLASSIFICATIONS DES DEFAUTS DANS LES SYSTEMES.....	33
III.4.1. Défauts physiques.....	34
III.4.1.1. Décoloration.....	34
III.4.1.2. Délamination	35
III.4.1.3. Points chauds	36
III.4.1.4. Fissuration de la cellule photovoltaïque.....	36
III.4.1.5. Bris de verre.....	37
III.4.1.6. Détérioration du revêtement antireflet (ARC).....	37
III.4.1.7. Corrosion et oxydation.....	38
III.4.1.8. Traces escargot 'Snailtracks'.....	38
III.4.1.9. Défaut de la diode Bypass.....	39
III.4.2. Défaut électrique.....	39
III.4.2.1. Défaut du champ.....	39
III.4.2.2. Défaut de circuit ouvert.....	40
III.4.2.3. Défaut de court-circuit.....	40
III.4.2.4. Défaut de mise à la terre.....	41
III.4.2.5. Défaut de ligne à ligne.....	41
III.4.2.6. Défaut d'arc.....	42
III.4.3. Défaut du côté AC.....	42
III.4.4. Défaut du côté DC.....	43
III.4.4.1. Défaut de convertisseur.....	43
III.4.4.2. Défaut MPPT.....	43
III.4.4.3. Défaut de batterie.....	44
III.4.5. Défaut environnemental.....	44
III.4.5.1. Accumulation de poussière.....	44
III.4.5.2. Changement de température.....	45
III.4.5.3. Défaut de l'Ombrage.....	45
III.5. CONCLUSION.....	47

CHAPITRE VI : EFFET DE L'OMBRAGE PARTIEL SUR LES PERFORMANCES DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUE

VI.1. INTRODUCTION.....	48
VI.2. CAUSES DE L'OMBRAGE.....	48
VI.3. DESCRIPTION DE L'OMBRAGE	49
VI.3.1. L'ombrage complet.....	49
VI.3.2. L'ombrage partiel.....	49
VI.4. LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES.....	49
VI.4.1. Configuration Série (S)	49
VI.4.2. Configuration parallèle (P)	50
VI.4.3. Configuration série-parallèle (S-P)	50
VI.5. SIMULATION ET RESULTAT	51
VI.5.1. Simulation en présence d'ombrage partiel	51
VI.5.1.1. Simulation en série (S)	51
VI.5.1.2. Simulation en parallèle (P)	56
VI.5.1.3. Simulation en mixte (S-P)	59
VI.6. CONCLUSION.....	60
CONCLUSION GENERALE.....	61
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	62

Figure I.1 : Différentes énergies renouvelables	3
Figure I.2 : Capacité d'énergie renouvelable par technologie, 2019-2024, comparée à l'objectif mondial de triplement d'ici 2030.....	6
Figure I.3 : Programme ERS Algérien : allocation de l'objectif de 22 GW à atteindre de 2030.	7
Figure I.4 : Production nette d'électricité de l'Algérie par type de combustibles 2014-2024 gigawatt heures.....	7
Figure I.5 : L'effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule	8
Figure I.6 : Situation actuelle des technologies présentes sur le marché.....	9
Figure I.7 : Différent types des cellules solaire à base de silicium.....	10
Figure I.8 : Cycle photovoltaïque.....	11
Figure I.9 : Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV.....	13
Figure I.10 : Fonctionnement des diodes by-pass.....	14
Figure I.11 : Schéma d'un champ photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	15
Figure I.12 : Simulation de dix panneaux PV en série.....	16
Figure I.13 : Simulation de dix panneaux PV en parallèle.....	17
Figure I.14 : Simulation d'un groupement mixte de panneaux PV, avec $N_{ss}=2$ et $N_{pp}=5$	17
Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	20
Figure II.2 : Schéma bloc d'un module PV.....	22
Figure II.3 : Simulation de la caractéristique courant-tension du module PV.....	23
Figure II.4 : Simulation de la caractéristique puissance-tension du module PV.....	23
Figure II.5 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension du module PV pour différents température et un éclairement $E=1000W/m^2$	24
Figure II.6 : Résultats de simulation des caractéristiques puissance-Tension du module PV pour différents température et un éclairement $E=1000W/m^2$	24
Figure II.7 : Caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairagements.....	25
Figure II.8 : Caractéristique P-V d'une cellule PV sous différents éclairagements.....	25
Figure II.9 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V.....	26
Figure II.10 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V.....	26
Figure II.11 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V.....	26
Figure II.12 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P-V.....	27
Figure II.13 : Panneau PV.....	28
Figure II.14 : Schéma de 6 cellules PV en série sous Simulink.....	28
Figure II.15 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 6 cellules en série...	29
Figure II.16 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 6 cellules en série.....	29
Figure II.17 : Schéma de 6 cellules PV en parallèle sous Simulink.....	29

Figure II.18 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 6 cellules en parallèle.	30
Figure II.19 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 6 cellules en parallèle	30
Figure II.20 : Schéma de 6 cellules PV en mixte sous Simulink.....	30
Figure II.21 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 6 cellules en mixte.....	31
Figure II.22 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 6 cellules en mixte....	31
Figure III.1 : Défauts du système photovoltaïque.....	34
Figure III.2 : Décoloration sur la surface de la cellule.....	35
Figure III.3 : Délamination sur la surface de la cellule.....	36
Figure III.4 : Point chaud sur la surface de la cellule.....	36
Figure III.5 : Fissuration sur la surface de la cellule.....	37
Figure III.6 : Bris de verre sur la surface de la cellule.....	37
Figure III.7 : Détérioration du revêtement antireflet (ARC).....	38
Figure III.8 : Corrosion et oxydation de l'interconnexion des chaînes et de la boîte de jonction.....	38
Figure III.9 : Traces escargot 'Snailtracks'.....	39
Figure III.10 : Défaut de la diode Bypass.....	39
Figure III.11 : Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut de circuit ouvert.....	40
Figure III.12 : Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut de court-circuit.....	41
Figure III.13 : Schéma de principe d'un défaut ligne-terre dans le générateur photovoltaïque.....	41
Figure III.14 : Schéma de principe du système PV sous un défaut ligne-ligne.....	42
Figure III.15 : Défaut d'arc.....	42
Figure III.16 : Schéma typique du système solaire attaché à un contrôleur de charge solaire.....	43
Figure III.17 : Défaut de batterie.....	44
Figure III.18 : Accumulation de poussière sur les panneaux.....	45
Figure III.19 : Défaut de l'ombrage : (a) Ombrage partiel, (b) Ombrage total.....	46
Figure III.21 : Défaut de vent.....	47
Figure VI.1 : Causes d'ombrage	48
Figure VI.2 : Connexion Série	50
Figure VI.3 : Connexion Parallèle	50
Figure VI.4 : Connexion Série- parallèle	51
Figure VI.5 : Schéma bloc de six modules en série	52
Figure VI.6 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	52

Figure VI.7 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	53
Figure VI.8 : Schéma bloc de six modules en série (deux ombrées)	53
Figure VI.9 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (deux module ombrées)	54
Figure VI.10 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (deux module ombrées)	54
Figure VI.11 : Schéma bloc de six modules en série (Trois ombrées)	55
Figure VI.12 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois module ombrées)	55
Figure VI.13 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois module ombrées)	56
Figure VI.14 : Schéma bloc de six modules en parallèle	56
Figure VI.15 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	57
Figure VI.16 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	57
Figure VI.17 : Schéma bloc de six modules en parallèle (Trois ombrés)	58
Figure VI.18 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois ombrés)	58
Figure VI.19 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois ombrés)	58
Figure VI.20 : Schéma bloc de six modules en série- parallèle (Mixte)	59
Figure VI.21 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	59
Figure VI.22 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Paramètres de la cellule PV à 25°C et 1000 W/m²

22

I_{cc} , I_{sc} : Courant de court circuit.

V_{co} , V_{oc} : Tension de circuit ouvert.

I_{ppm} : Courant correspond à PP M.

V_{ppm} : Tension correspond à PPM.

P_{ppm} : Puissance correspond à PPM.

PPM : Le point de puissance maximale.

FF : Facteur de Forme.

η : Rendement de la conversion.

S : La surface de la cellule solaire.

E : Rayonnement solaire, éclairage.

N_p : Nombre des cellules en parallèle par module.

N_s : Nombre des cellules en série par module.

N_{pp} : Nombre des panneaux Pv en parallèle.

N_{ss} : Nombre des panneaux Pv en série.

I_{ph} : Courant photonique.

I_D : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance.

I : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

R_p , R_{sh} : Résistance de shunt (parallèle).

R_s : Résistance série .

V_t : Tension thermique à la température T.

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

K : Constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ J/K).

a : Facteur d'idéalité de la diode.

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin [$^{\circ}$ K].

I : Courant fourni par la cellule..

V : Tension aux bornes de la cellule.

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température.

V_t : Tension thermique.

Au cours des dernières années, le monde a connu une croissance importante de la demande en énergie dans tous les domaines de la vie, en particulier l'électricité qui provient malheureusement en grande partie des sources d'énergie fossiles, lesquelles ont un impact très nocif [1]. Dans notre monde actuel industrialisées, la principale énergie utiliser pour alimenter nous foyer et faire marcher et évoluer les différente industries c'est belle et bien l'énergie électrique. Cette dernière est produite généralement à partir des combustible de défirént natures, en parle ici des énergies fossiles, telle que le pétrole, le charbon, le gaz, et l'énergie nucléaire (uranium). Mais au rythme de la consommation actuelle des ressources énergétiques, les gisements d'énergies fossiles et nucléaires [1], vont d'une manière igue à la raréfaction à cause de l'exploitation agressive de ces derniers, et leurs stocks qui sont très limité, sans oublier les dégâts causé par l'exploitation de ces énergies, tel que le réchauffement climatique [2].

Vu la situation actuelle, une alternative énergétique nouvelle, renouvelable et propre s'avère incontournable. Le solaire photovoltaïque est vu aujourd'hui comme une alternative énergétique principale pour la production de l'électricité propre a de grande échelle, notamment des centrales photovoltaïques assure de plus en plus l'approvisionnement en électricité partout dans le monde [3].

Pendant le fonctionnement du système PV, les cellules peuvent subir des perturbations dues à l'exposition à des facteurs atmosphériques externes ou à diverses pannes internes, ce qui affecte la stabilité du système et réduit leur efficacité et leur rendement de production. La détection efficace et précise des défauts du système PV peut protéger le système contre les temps d'arrêt ou l'effondrement, tout en améliorant l'efficacité du système PV, en garantissant un fonctionnement sûr et en réduisant les coûts de production d'électricité [4]

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est basé sur un point de puissance optimale qu'elle peut fournir sous des conditions standard. Le changement des conditions météorologiques rendent le système n'est pas capable à assurer son point de fonctionnement optimal à cause des pertes générées par les conditions d'exploitation.

L'ombrage partiel est le phénomène le plus rencontré dans la pratique, il est causé par les masques solaires tels que les nuages, les poteaux électriques, immeubles, etc. Quand une partie des panneaux PV est ombragée, ses éléments produisent moins de courant par rapport à ceux non

ombragés. Les cellules ombragées sont polarisées en inverse par conséquent, elles sont forcées à consommer la différence du courant produit par les autres [2][3].

L'ombrage partiel induit une déformation de la caractéristique courant-tension et surtout sur de la caractéristique tension-puissance (P-V) et favorise l'apparition de plusieurs pics de puissance.

Le travail dans ce mémoire est organisé en quatre chapitres, comme suit :

Dans **le premier chapitre**, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. On commence par un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque. Ensuite, quelques statistiques sur la production mondiale d'énergie photovoltaïque et la fabrication des modules. Puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi leur principe de fonctionnement, et présentation des différents types des cellules photovoltaïques, et les différentes caractéristiques électriques d'une cellule, les avantages et les inconvénients.

Nous nous intéressons dans **le deuxième chapitre** à la conversion photovoltaïque; nous décrirons brièvement la structure et le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ainsi, nous étudierons l'influence des paramètres météorologiques (Température et Eclairement) sur le comportement électrique d'une cellule solaire dans un environnement MATLAB/SIMULINK.

Le troisième chapitre étudie l'effet des défauts sur un module PV

Le quatrième chapitre a été consacré à l'étude d'un ombrage partiel avec des cas seront traités et discutés théoriquement et en simulation.

On terminera notre mémoire par **une conclusion générale** qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation et **quelque perspective**.

I.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques et photovoltaïques.

Les sources d'énergie issues indirectement de l'énergie solaire sont notamment l'énergie hydraulique, dérivée de l'énergie cinétique de l'eau dont le cycle dépend de l'énergie thermique du Soleil; l'énergie éolienne, provenant de l'énergie cinétique du vent, lui-même lié à l'échauffement et à l'évaporation de l'eau générés par le soleil, la rotation de la terre et la force de Coriolis ; l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues, liées aux mouvements des océans et des cours d'eau ; le bois énergie et l'énergie de la biomasse ainsi que la géothermie de très basse température, provenant des couches superficielles du sol réchauffées par le Soleil.

L'énergie solaire est ainsi l'une des principales formes d'énergies renouvelables. On peut ajouter, à des échelles de temps plus longues, les combustibles fossiles, provenant de matières organiques créées par photosynthèse (charbon, pétrole, gaz naturel...) auxquelles s'ajoute l'énergie biochimique de la matière organique vivante.



Figure I.1 : Différentes énergies renouvelables [5].

La technologie solaire électrique ou photovoltaïque (PV) est l'une des ressources 'énergie renouvelable à croissance la plus novatrice pour produire de l'électricité dans le monde [6].

Les avantages les plus importants sont permanents, disponibles partout dans le monde, propres, gratuits, sans pollution et nécessitant peu de maintenance [6].

Les applications des systèmes photovoltaïques s'étendent des services énergétiques des régions éloignées jusqu'aux services publics de réseau.

Ces utilisations sont résumées par l'éclairage des villages, les systèmes solaires domestiques, l'éclairage des rues et des camps, les feux de circulation, les installations médicales dans les régions éloignées, les stations de télécommunication, la recharge des batteries, le pompage de l'eau et les systèmes de purification de l'eau [7].

L'utilisation de systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité a commencé dans les années 70 du 20ème siècle et connaît aujourd'hui une croissance rapide dans le monde entier malgré le coût élevé du capital [8].

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont constitués de semi-conducteurs qui peuvent convertir directement la radiation solaire en électricité. Ces modules peuvent constituer une source d'énergie sûre et reposable pour très longtemps. La plupart des modules sur le marché actuellement ont une garantie de plus de vingt ans [9], et ils fonctionneront bien au-delà de cette période. Des millions des produits photovoltaïques sont installés dans le monde entier, avec différents rendements allant d'une fraction de watt à plusieurs mégawatts. Pour de plusieurs applications, les systèmes d'énergie solaire sont non pas seulement plus rentables, mais sont aussi l'option la moins chère.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. On a commençant par un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque. Ensuite, quelques statistiques sur la production mondiale d'énergie photovoltaïque et la fabrication des modules. Puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi leur principe de fonctionnement, et présentation les différents types des cellules photovoltaïques, et les différents caractéristique électrique d'une cellule, les avantages et les inconvénients. Et à la fin en clôture par une conclusion.

I.2. BREF HISTORIQUE

L'énergie solaire convertit le rayonnement solaire en électricité qui est basée sur l'effet PV. L'effet PV est un phénomène physique qui consiste à convertir l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique optique en énergie électrique. En général, le terme "effet PV" fait référence à la génération d'une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux différents en réponse à un rayonnement visible ou autre. Il a été découvert par **Alexandre Edmond Becquerel en 1839** lorsqu'il a constaté que certains matériaux produisent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. **En 1877**, le premier rapport sur l'effet PV a été publié par deux scientifiques de **Cambridge, Adams et Day** [10]. **En 1883, Charles Fritts** a construit une cellule solaire en sélénium avec un rendement inférieur à 1 %.

En 1954, Chapin et al. Ont annoncé la première fabrication d'un élément solaire avec une jonction p-n et un rendement de 6% [10].

À mesure que l'industrie des semi-conducteurs au silicium se développe, les coûts de production commencent à baisser, mais la recherche continue d'améliorer l'efficacité des cellules solaires.

En 1973 le premier choc pétrolier a suscité des solutions innovantes à notre dépendance au pétrole pour l'énergie, et les premières maisons à énergie solaire ont été construites à l'Université du Delaware. Dans **les décennies qui ont suivi**, le genre a prospéré sans sorties commerciales bâclées.

Malgré des augmentations constantes de la production et des coûts de production bien inférieurs, **les années 1980 et 1990** ont atténué les pressions sur l'approvisionnement énergétique et réduit la pression pour développer des sources d'énergie alternatives.

À **la fin du 20ème siècle**, la technologie photovoltaïque était encore très spécifique. Pompes à eau, lampes de jardin, timbres d'alimentation, balises océaniques, communications sans fil, électrification de clôture. En fait, cette technologie convient aux applications hors réseau. Certains diront que l'électrification à distance est la principale application de l'énergie solaire. S'il en était ainsi dans le passé, il n'en est plus ainsi aujourd'hui. En **2010, 99 %** de l'énergie solaire mondiale était connectée au réseau sous la forme de centrales

Aujourd'hui, un rendement de 20 % peut être atteint pour une cellule PV [11]. Pratiquement, tous les dispositifs PV sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs capables d'absorber une grande partie du spectre solaire [11].

I.3. PRODUCTION ELECTRIQUE MONDIALE PAR LES MODULES PV

La capacité totale installée d'énergie solaire thermique à concentration (ESC) a augmenté de 350 MW pour atteindre 7,2 GW en 2025 (figure I.2). La dynamique positive de 2023 s'est poursuivie, avec le lancement de plusieurs nouveaux projets en Chine, où le portefeuille d'ESC a continué de se développer et où les premiers projets du plan quinquennal actuel ont été raccordés au réseau. Les politiques chinoises favorables à l'ESC aident le pays à dynamiser le marché mondial de l'ESC. Concernant l'énergie marine, la capacité installée mondiale est restée relativement stable en 2024, avec une augmentation nette de 1,6 MW. La capacité installée a augmenté de 2,6 MW en Fédération de Russie et a diminué de 1 MW en République de Corée (avec la réduction ou le démantèlement d'une centrale existante). Les activités politiques et d'investissement ont augmenté par rapport aux années précédentes.

Malgré les progrès réalisés ces dernières années, fin 2024, le monde restait loin de son objectif collectif de capacité d'énergie renouvelable de 11 000 GW d'ici 2030.[12]

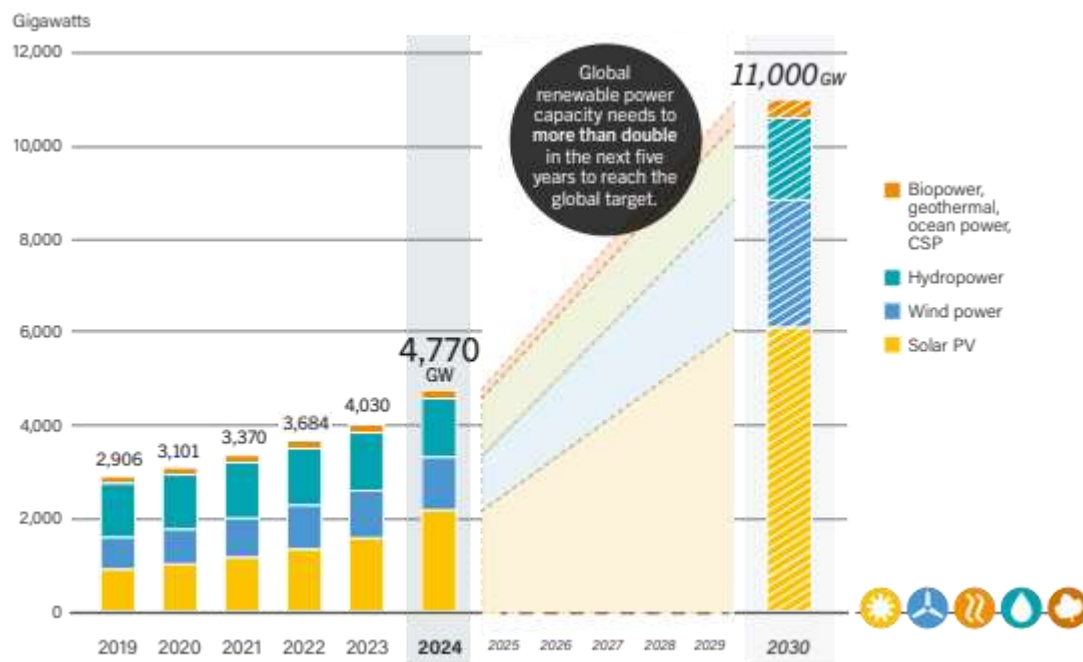


Figure I.2 : Capacité d'énergie renouvelable par technologie, 2019-2024, comparée à l'objectif mondial de triplement d'ici 2030[12].

I.4. DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES EN ALGERIE

Depuis plus d'une décennie, l'Algérie affiche une volonté politique constante de développer les énergies renouvelables. Dès 2011, un premier programme national avait été adopté, visant l'installation de 22 000 MW de capacités renouvelables à l'horizon 2030, dont 12 000 MW pour le marché intérieur et 10 000 MW destinés à l'export.

Ces objectifs ont été réitérés à travers le programme « Tafouk 1 » lancé en 2020, qui prévoit à lui seul l'ajout de 4000 MW de solaire photovoltaïque dans un premier temps. En 2023 puis en 2024, les autorités ont confirmé la poursuite de ces ambitions, évoquant désormais un volume total de 15 000 à 22 000 MW d'énergies renouvelables à installer d'ici 2030 à 2035. La stratégie repose principalement sur le solaire photovoltaïque, ressource abondante sur le territoire national, notamment dans les régions sahariennes.

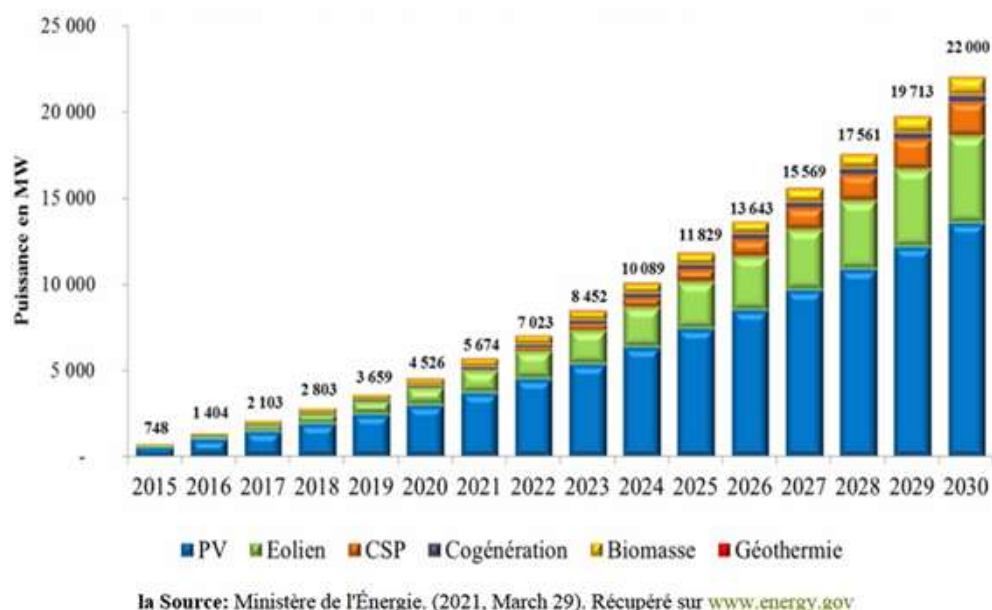


Figure I.3 : Le programme national pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.

Pour accompagner ce plan, l'Algérie a mis en place **en 2021** une structure dédiée, la Société algérienne des énergies renouvelables (SHAEMS), chargée de piloter les projets et d'attirer des partenaires techniques et financiers.

1.4.1. Un niveau de réalisation encore en deçà des objectifs

Malgré ce cadre stratégique, les réalisations concrètes restent, à ce jour, très en deçà des objectifs. Selon les données compilées par le ministère de la Transition énergétique, la capacité totale installée en énergies renouvelables atteignait environ 686 MW à la fin de l'année 2023.

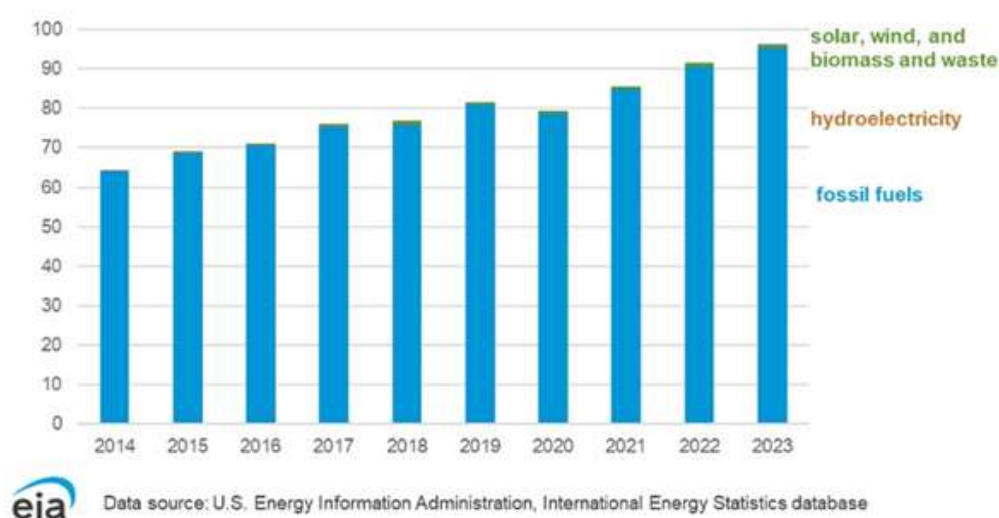


Figure I.4 : Production nette d'électricité de l'Algérie par type de combustibles 2014-2024 gigawatt heures

Alors qu'à ce jour, la part des énergies renouvelables dans le mix électrique national reste inférieure à 1%, selon les chiffres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande en électricité continue de croître. Le 23 juillet 2025, la Sonelgaz a annoncé avoir enregistré un nouveau record historique de consommation électrique, avec un pic dépassant 20 000 MW, un niveau jamais atteint auparavant.

Plusieurs projets ont pourtant été annoncés ces dernières années. En 2022, un premier appel d'offres pour la réalisation de centrales solaires totalisant 1000 MW a été lancé dans le cadre du programme Tafouk 1. En 2023 et 2024, de nouveaux appels d'offres ont été publiés, incluant des projets portés en partenariat avec des entreprises étrangères, notamment chinoises. Des accords-cadres ont également été signés pour la construction de centrales solaires de grande capacité dans les wilayas du Sud.

En cumulé, ces projets représentent environ 3000 MW en cours de développement. Toutefois, la plupart sont encore à l'étape de finalisation contractuelle, d'études techniques ou de travaux initiaux, et aucune centrale d'envergure n'est entrée en service dans le cadre de ce programme à ce jour.

I.5. CARACTERISTIQUES DE LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule solaire typique est constituée d'une jonction p-n formée dans un matériau semi-conducteur similaire à une diode. La Figure (I.5) montre un schéma de la structure de la section transversale d'une cellule solaire cristalline. Elle est constituée d'une épaisse plaquette de silicium ayant deux couches aux propriétés électriques différentes. Un champ électrique est établi à la jonction entre les couches de silicium négatives et positives. Si la lumière du soleil frappe la cellule solaire, les paires de trous d'électrons sont générées à la jonction où elles sont séparées par un champ électrique. Une tension électrique est générée au niveau des contacts externes, de sorte qu'un courant circule lorsqu'une charge est connectée [13].

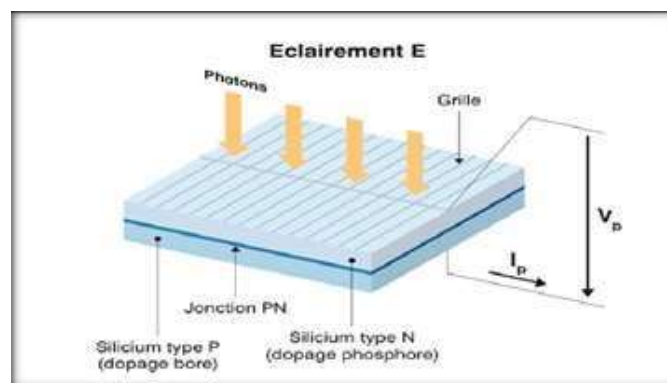


Figure I.5 : L'effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule

I.6. TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES

Trois générations de technologies existent actuellement, elles diffèrent par les matériaux utilisés et/ou par leur épaisseur : la première à base de silicium mono ou poly- cristallin qui couvre de l'ordre de 80% de la production mondiale ; la deuxième, celle des couches minces, comprend les cellules au Silicium Amorphe, Microcristallin, Micro morphe, Cuivre-Indium-Sélénium, Arséniure de Galium, Tellurure de Cadmium et les cellules à colorant (TiO_2). En outre, la troisième génération est en cours d'expérimentation comme les cellules organiques (polymères) et les cellules à nano-cristaux. La figure (I.6) représente les principaux types de technologies existantes sur le marché.

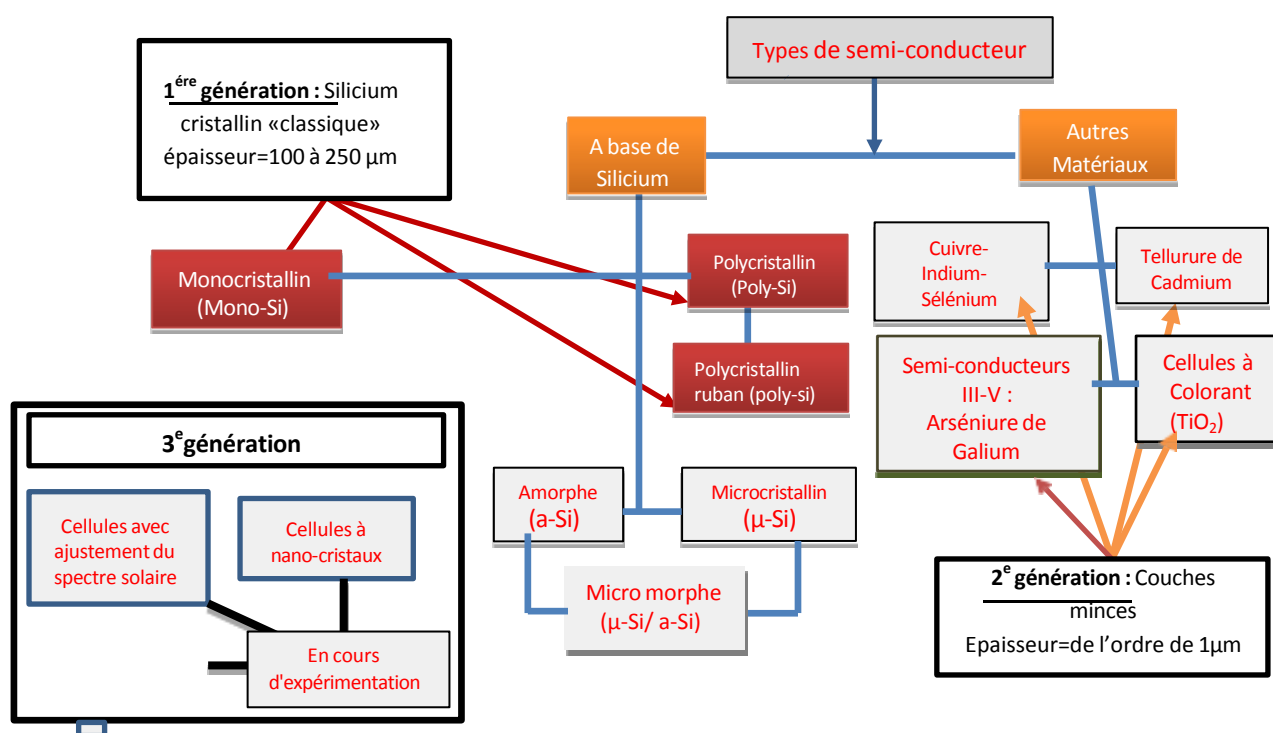


Figure I.6 : Situation actuelle des technologies présentes sur le marché

Dans ce qui suit les caractéristiques de chacune de ces trois technologies seront présentées.

I.6.1. Silicium Monocristallin

La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté ou noir [14]. Cette technologie présente les avantages suivants :

- le Silicium se dope facilement avec du bore et du phosphore,
- Le deuxième élément le plus fréquent ; O_2 (46%), Si (28%), Al (8%),
- Un rendement élevé (de 16 à 19% en industrie et de 26% en laboratoire),

La durée de vie et le vieillissement des cellules PV sont maîtrisés.

- Les inconvénients principaux de cette technologie sont :
 - Un coût de fabrication élevé,
 - Une performance qui diminue fortement lorsque la température de module augmente,
 - Une performance qui diminue fortement à faible éclairement,
 - Presque aucune flexibilité d'utilisation (surface rigide),

I.6.2. Silicium Poly-cristallin

Il est fabriqué à partir des résidus provenant de la fabrication du silicium monocristallin. Le procédé de cristallisation consiste en la refonte de ces résidus suivie d'une solidification unidirectionnelle sous forme de structure colonnaire multi-cristalline à gros grains.

La technologie multi cristalline nécessite deux à trois fois moins d'énergie que la technologie précédente. Son rendement est un peu moindre (14% en industrie et 20 % en laboratoire) mais son coût est plus avantageux [15].

I.6.3. Silicium amorphe (a-Si)

C'est un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin). D'un rendement moins bon que le cristallin, sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques. Le coût de la production est bien plus bas que celui des cellules cristallines. Les cellules amorphes peuvent fonctionner sous de très faibles éclaircissements. Elles sont très bon marché par rapport aux autres types de cellules couche minces [16]. Elles sont moins sensibles aux températures élevées. Elles présentent un rendement de conversion moyen de 11 % en industrie et de 17 % en laboratoire.[17].

La Figure (I.7) montre les motifs créés par les différents cristaux.

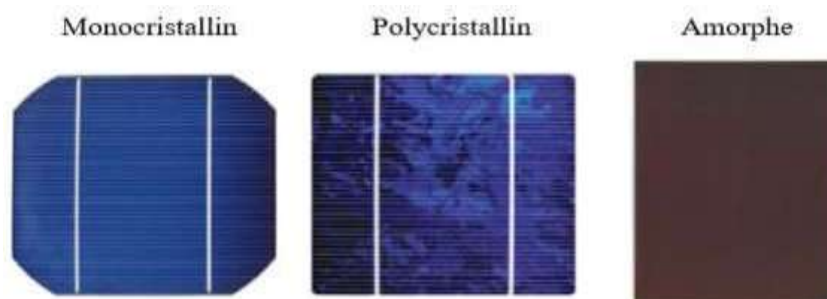


Figure 1.7: Différent types des cellules solaire à base de silicium

I.7. CYCLE ET CONSTITUTION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.

I.7.1. Cycle photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est composé **de cellule photovoltaïque** (PV) connecté on série ou parallèle et le ensemble de cellule donné **le module**, et plusieurs ensemble de ce dernier donne un **panneau** et le **champ** est composé d'un ensemble de panneau solaire Figure (I.8).

I.7.2. Module PV

Le module photovoltaïque est un circuit électrique souvent appelé photo-générateur ou panneau, constitué d'un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques. Cette association peut être une association série-parallèle ou série.

La dernière est la plus utilisée parce qu'elle permet d'avoir à la sortie du module des valeurs de tension plus pratique, en passant par exemple d'une tension unitaire de cellule de 0,6 V à une tension de sortie du module de 40V.

Derrière les panneaux photovoltaïques on trouve des boîtiers de connexion pour interconnecter les modules entre eux, dans ces boîtes se trouvent les diodes by-pass. Ces dernières jouent un rôle très important afin de protéger les modules contre certains défauts que nous allons traiter.

I.7.3. Panneau PV

Le string photovoltaïque, appelé également chaîne PV, désigne une association de plusieurs modules en série afin de générer une tension suffisante et adaptée à la tension de l'onduleur.

I.7.4. Champ PV

A l'identique de l'association en série des modules qui permet de monter en tension, nous faisons l'association en parallèle des strings afin de monter en courant et adapter sa valeur à la plage d'entrée de l'onduleur. Cette association des strings en parallèle est appelée champ photovoltaïque.



Figure I.8: Cycle photovoltaïque [12].

I.8. CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :

La cellule photovoltaïque a ses propres caractéristiques de fonctionnement est représentée par les courbes caractéristiques non linéaires $I(V)$ et $P(V)$. Elles présentent plusieurs paramètres importants.

En fonctionnement nominal, les cellules PV sont utilisées pour produire de l'énergie avec une tension de circuit ouvert (V_{co}) et de courant de court-circuit (I_{cc}) qui correspond au courant quand la cellule est court-circuitée, il est proportionnel à la surface de la cellule et dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule.

La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant Figure (I.8) [18].

I.8.1. La courbe courant-tension

La caractéristique $I-V$ est la caractéristique essentielle de la cellule solaire qui répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température. Il y a trois points importants dans cette courbe Figure (I.9) [18] :

- Le point A où la tension est égale à zéro et le courant est maximum (courant de court-circuit I_{cc}).
- Le point B c'est le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale.
- Le point C où le courant est égal à zéro et la tension est maximale (tension de circuit ouvert, V_{co}). (courant de court-circuit I_{cc}).

I.8.2. La tension en circuit ouvert (pour $I_{cc} = 0$)

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement). [19]

I.8.3. Le courant de court-circuit I_{cc} (pour $V_{co} = 0$)

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{CC} . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande. [19]

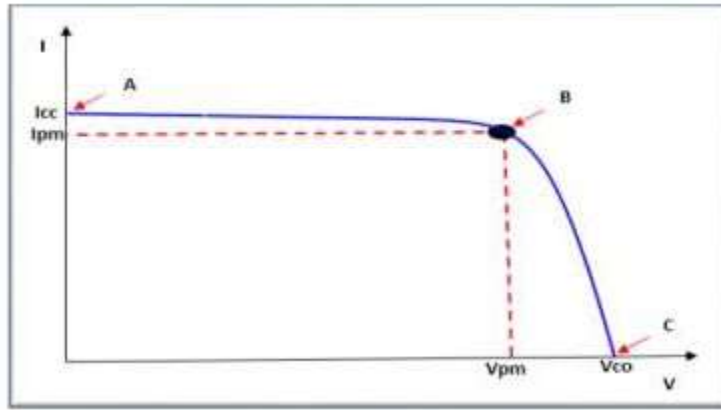


Figure I.9 : Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV.

I.8.4. La puissance maximale, Le point de puissance maximale (PPM)

La cellule solaire fournit des puissances différentes selon le point de fonctionnement dans lequel elle est utilisée. Le point où la puissance maximale est prévue, est appelé le point de puissance maximale (PPM). Comme la puissance d'un point de fonctionnement correspond toujours à la surface $V \times I$, cette zone doit être au maximum dans le cas de PPM.

Où les valeurs du courant et de la tension associée au PPM sont appelés I_{PPM} et V_{PPM} [19].

$$P_{PPM} = V_{PPM} * I_{PPM} \quad (I.1)$$

I.8.5. Facteur de forme (FF)

Le FF est défini comme le rapport entre la puissance maximale de la cellule solaire et le produit de V_{co} et I_{cc} , de sorte que :

$$FF = \frac{\text{Puissance maximale délivrée sur la charge}}{V_{co} * I_{cc}}$$

$$FF = \frac{V_{PPM} * I_{PPM}}{V_{co} * I_{cc}} = \frac{P_{PPM}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (I.2)$$

Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et il diminue avec la température [19], son expression est donnée par :

I.8.6. Rendement de la conversion (η)

C'est la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Le rendement d'une cellule solaire est déterminé par la proportion de la puissance reçue qui est convertie en électricité et est défini comme suit [19] :

$$\eta = \frac{P_{PPM}}{P_{opt}} = \frac{P_{PPM}}{E*S} = \frac{V_{max}*I_{max}}{E*S} \quad (I.3)$$

Où,

S : La surface de la cellule solaire.

E : Rayonnement solaire.

I.9. PROTECTION DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Lorsque l'on conçoit une installation photovoltaïque, il est important d'assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durabilité en prévenant les pannes destructrices dues à l'association des cellules et à leur fonctionnement. Pour se protéger contre ces risques, deux types de protection sont utilisés dans les installations photovoltaïques : la diode de by-pass et la diode anti-retour, comme le montre les Figures (I.10) et (I.11).

I.9.1. Diodes de by-pass

Comme le montre la Figure (I.10), la cellule ombrée cesse de produire de l'énergie électrique et se comporte davantage comme une résistance semi-conductrice. Donc elle génère moins de courant que les deux autres cellules, ce qui diminue fortement la production d'énergie de la chaîne. Par conséquent la puissance générée par les cellules « ensoleillées » sera dissipée par la cellule « ombrée » qui peut, avec le temps, provoquer une surchauffe (points chauds) et éventuellement la destruction de la mauvaise cellule [20].

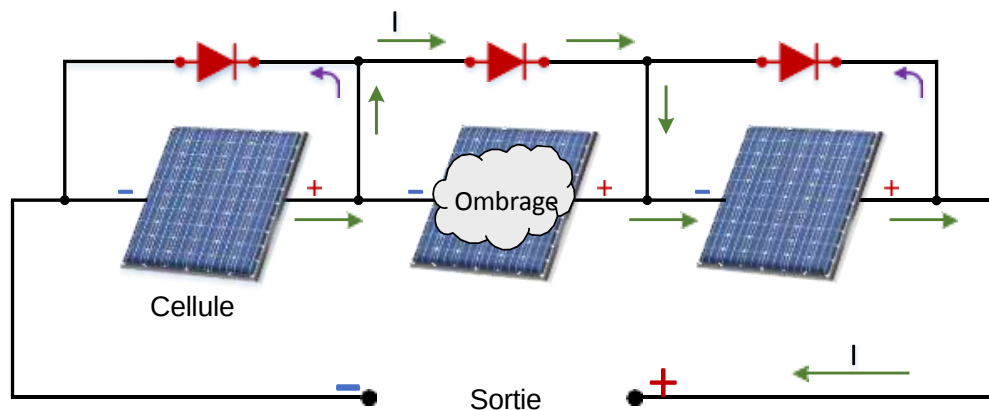


Figure I.10 : Fonctionnement des diodes by-pass.

Les diodes de by-pass sont connectées à l'extérieur et en antiparallèle avec chaque cellule PV pour fournir un chemin électrique alternatif pour courant généré. Car il ne peut pas traverser la cellule lorsqu'il est ombragé.

Cela permet de préserver les performances de la chaîne en limitant la tension de polarisation inverse générée à travers n'importe quelle cellule partiellement ombrée et donc de réduire la puissance électrique qui peut être dissipée par la cellule [20].

I.9.2. Diodes anti-retour

Lorsque le soleil brille, la tension produite par les panneaux est supérieure à celle de la batterie, donc la charge a lieu. Cependant, dans la nuit, lorsqu'aucune tension n'est produite par les panneaux, la tension de la batterie ferait circuler un courant dans la direction opposée à travers les panneaux, déchargeant la batterie. Les diodes anti-retour seront nécessaires dans tel système pour charger une batterie [21]. Les diodes d'anti-retour sont généralement incluses dans la construction des panneaux solaires Figure (I.11).

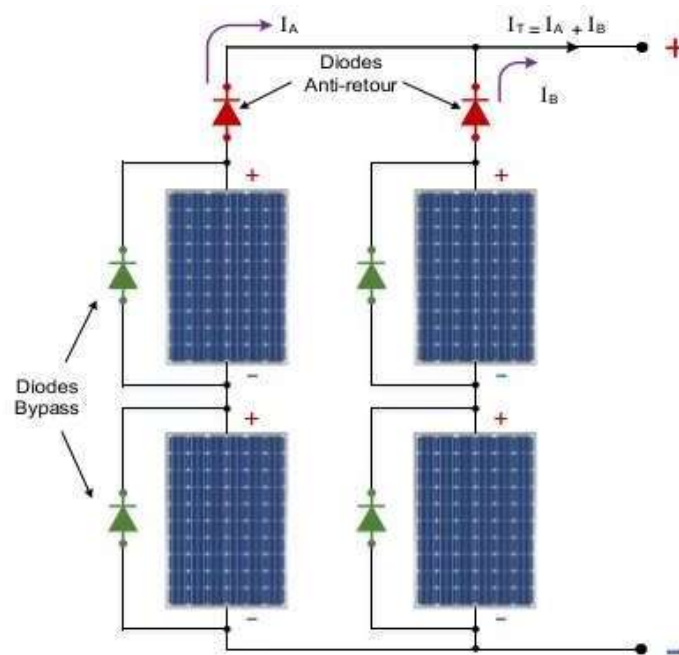


Figure I.11 : Schéma d'un champ photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti-retour.

I.10. ASSOCIATION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

I.10.1. Association en série

L'association des panneaux solaires photovoltaïques en série permet d'atteindre une tension désirée. Le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement selon le nombre de cellules mises en série.

La figure (I.12) illustre la simulation de la caractéristique I-V d'un générateur PV composé de dix panneaux photovoltaïques en série ($N_{ss}=10$), du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin, dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 , 25°C).

L'équation (I.4) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$\sum V_{co} = N_{ss} * V_{co} \quad (\text{I.4})$$

Et I_{sc} reste le même.

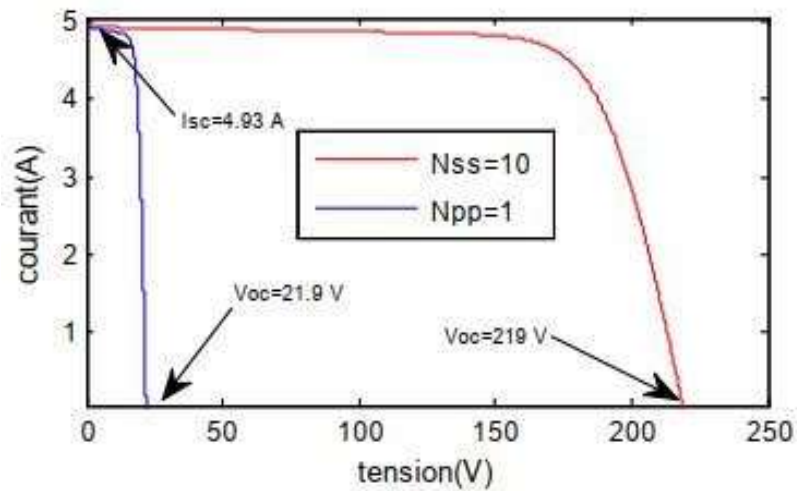


Figure I.12 : Simulation de dix panneaux PV en série.

La simulation montre que les tensions sont additionnées et le courant est quasiment le même, à savoir $V_{co}=21.9*10=219\text{V}$ et $I_{sc}= 4.93 \text{ A}$.

I.10.2. Association en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de modules photovoltaïque permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé et la tension reste la même. La caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure I.13, illustre la simulation de la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque composé de dix panneaux en parallèle. L'équation I.22, résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle ($N_{pp}=10$) :

$$\sum I_{sc} = N_{pp} * V_{sc} \quad (\text{I.5})$$

Et la tension V_{co} reste la même.

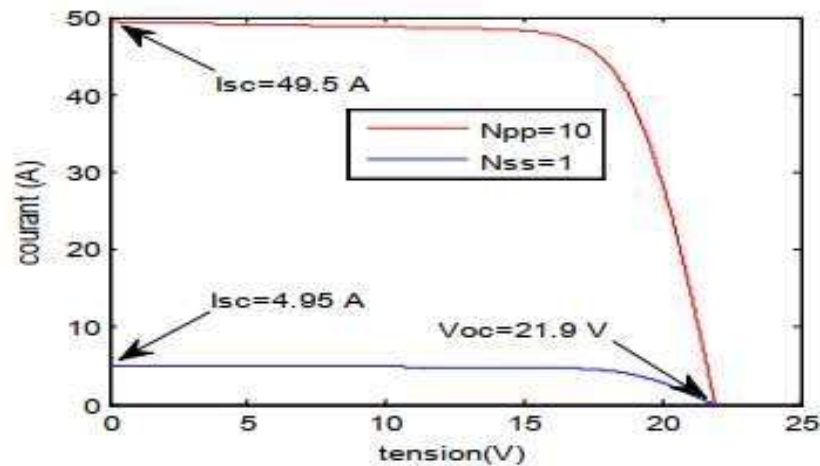


Figure I.13 : Simulation de dix panneaux PV en parallèle.

De la même manière, cette simulation illustre bien l'équation I.22, les courants s'ajoutent et la tension reste la même, d'où $I_{sc}=4.93 \times 10=39.8\text{ A}$ et $V_{co}=21.9\text{ V}$.

I.10.3. Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques :

Afin d'obtenir des puissances désirées par exemple de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en rangées de panneaux série et parallèle pour former un générateur photovoltaïque. La constitution d'un générateur photovoltaïque de puissance élevée se limite par le poids et la manipulation des modules à utiliser. Pour cela, on réunit systématiquement plusieurs modules photovoltaïques et on les câble entre eux avant de les relier au reste du système [11].

Les équations (I.4) et (I.5), résument ce cas de groupement :

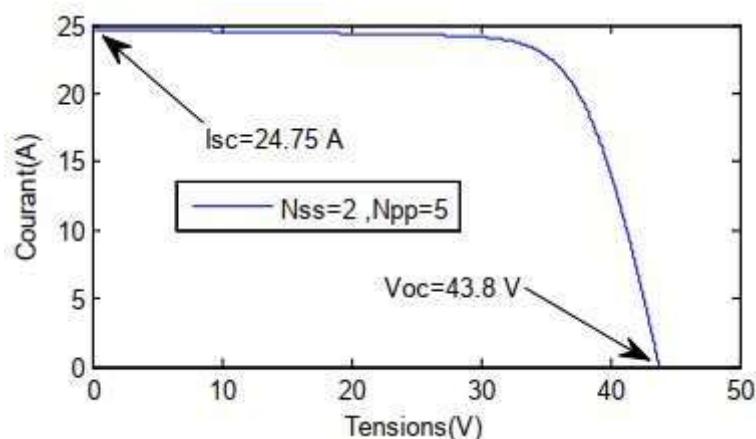


Figure I.14 : Simulation d'un groupement mixte de panneaux PV, avec $N_{ss}=2$ et $N_{pp}=5$

Les équations (I.4) et (I.5) sont bien vérifiées par la simulation, il est montré que :

$$V_{oc}=21.9*2=43.8 \text{ V et } I_{sc}=4.85*5= 24.75 \text{ A}$$

I.11. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE PV :

I.11.1. Les avantage

- Source d'énergie gratuite
- Énergie propre
- Ne cause pas d'impacts environnementaux / respectueux de l'environnement
- Potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre
- Sans bruit
- Système fiable
- La haute disponibilité
- La génération peut être rapprochée du consommateur

I.11.2. Les Inconvénients :

- Coût initial élevé
- Forte dépendance au développement de la technologie
- Influence des conditions géographiques
- Puissance de sortie fortement affectée par les facteurs environnementaux

I.12. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre nous avons exposé des généralités sur les systèmes de production de l'énergie électrique qui se repose sur l'effet photovoltaïque, dans ce cadre des statistiques sur la production mondiale en été présenté au premier lieu. Puis le principe de la conversion, types des cellules, les caractéristiques du module PV, les différentes protections du système photovoltaïque en été bien détaillé.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation et l'étude du système photovoltaïque.

II.1. INTRODUCTION :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. [22]

L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conversion photovoltaïque; dans un premier temps, nous décrirons brièvement la structure et le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ainsi, nous étudierons l'influence des paramètres météorologiques (Température et Eclairement) sur le comportement électrique d'une cellule solaire dans un environnement MATLAB/SIMULINK.

Puis, nous reporterons les différents modèles de la cellule PV proposés et choisir le modèle adéquat à l'application étudiée qui sera utilisé en simulation afin de reproduire la caractéristique statique du générateur PV lors de ses différents fonctionnements.

II.2. MODELES MATHEMATIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE

Le circuit équivalent le plus simple d'une cellule solaire est une source de courant connectée en parallèle avec une diode. La sortie de la source actuelle est directement proportionnelle à la lumière tombant sur la cellule. Pendant l'obscurité, la cellule solaire n'est pas active et fonctionne comme une diode. Il ne produit ni courant ni tension.

Cependant, si la lumière tombe sur la cellule solaire, elle génère un courant de diode. La diode D détermine les caractéristiques I-V de la cellule. Une résistance en série, représente la résistance à l'intérieur de chaque cellule, tandis que la résistance au shunt R_s , est négligé car il a une grande valeur de résistance. Le circuit équivalent le plus simple d'une cellule solaire est une source de courant connectée en parallèle avec une diode comme il montre la figure (II.1) [23]

II.2.1. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Les modélisations mathématiques proposées pour représenter les cellules photovoltaïques sont nombreuses. Leur objectif est de déterminer les caractéristiques I-V et P-V, ce qui permet d'analyser et d'évaluer les performances des cellules photovoltaïques. Tous les modèles offrent les avantages importants suivants :

- Compréhension aisée de phénomènes complexes.
- Vulgarisation des propriétés des systèmes.
- Facilité d'utilisation grâce au circuit électrique équivalent.

L'un des modèles de cellules solaires les plus utilisés est le modèle à une diode également connu sous le nom de modèle à quatre paramètres. Ce modèle comprend une combinaison d'une source de courant I_{ph} , une diode, et une résistance de shunt R_{sh} et une résistance série R_s modélisant les pertes de puissance [24].

Le circuit équivalent pour ce modèle est donné à la figure (II.1) illustre le schéma équivalent d'une cellule solaire.

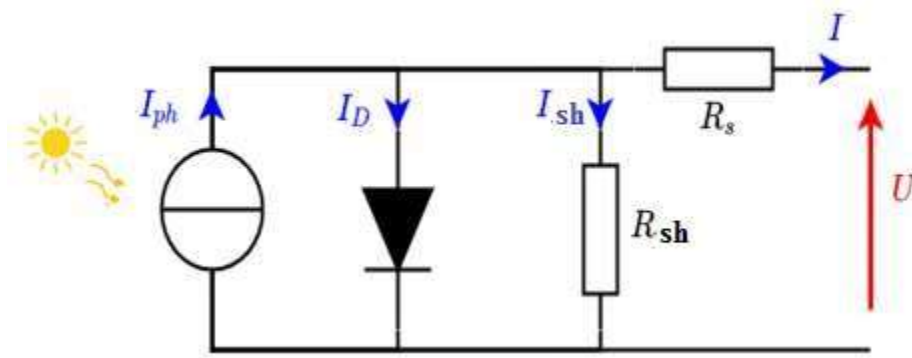


Figure II.1: Schéma équivalent d'une cellule solaire

Le courant de sortie de la cellule PV est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit équivalent représentée sur la figure précédente :

$$I_{ph} = I_D + I_{sh} + I \quad (II.1)$$

Tel-que

I_{ph} : Courant photonique.

I_D : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance.

I : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) \right] \quad (II.2)$$

Le courant qui passe dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (II.3)$$

De l'équation (II.1), nous obtenons l'expression du courant I :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (II.4)$$

Remplaçant l'équation (II.4) dans les équations (II.2) et (II.3), l'équation caractéristique devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (I.5)$$

$V_t = \frac{N_s K T}{q}$: Tension thermique à la température T .

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

K : Constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ J/K)

a : Facteur d'idéalité de la diode

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin [$^{\circ}$ K]

N_s : Nombre de cellule en série par module :

I : Courant fourni par la cellule,

V : Tension aux bornes de la cellule,

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température,

V_t : Tension thermique,

II.2.2. Simulation du générateur photovoltaïque

II.2.2.1. Choix et caractérisation du module photovoltaïque

Pour faire la modélisation et la simulation de notre système PV, et ensuite le diagnostic de certains défauts considérés comme fréquents et important à détecter et à localiser dans la suite de cette mémoire, le module PV a tombé sur le module photovoltaïque **Suntech - STP190S-24/Ad+** qui comporte **72 cellules** solaires de **silicium poly cristallin** de **35 mm** connectées en série a été sélectionner. Le module PV **Suntech - STP190S-24/Ad+** peut produire une puissance maximale de **190 watts** à **36.6 volts**.

Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m^2 [25].

Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **Suntech-STP190S-24/Ad+** en conditions de test standards sont représentées sur le tableau (II.1).

Les paramètres de la cellule PV sont donnés par le tableau suivant

Grandeurs	Valeur
Eclairement standard, E	1000 W/m ²
Température standard, T	25° C
Puissance crête maximale, P _m	190 W
Tension optimale, V _{mp}	36.6 V
Courant optimale, I _{opt}	5.20 A
Tension de circuit ouvert, V _{co}	45.2 A
Courant de court-circuit, I _{cc}	5.62 A
Résistance série (R _s)	0.624870 Ω
Résistance shunt (R _p)	242.5 Ω



Tableau II.1 : Paramètres de la cellule PV à 25°C et 1000 W/m²

II.2.2.2. Simulation du module PV

Premièrement on a simulé le comportement électrique module photovoltaïque **Suntech-STP190S-24/Ad+**, ce module fournit une puissance maximum **190W**. Cela nous a permet de déterminer les caractéristiques (I-V) et (P-V) du module PV.

II.2.2.3. Caractéristique P-V et I-V de modules photovoltaïques

Les Caractéristiques I(V) et P(V) sous les conditions standard (T=25°C, E=1000 W/m²) Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'un Caractéristiques courant –tension I(V) et puissance-tension P(V) de la cellule photovoltaïque sont représentés dans les figures (II.3) et (II.4).

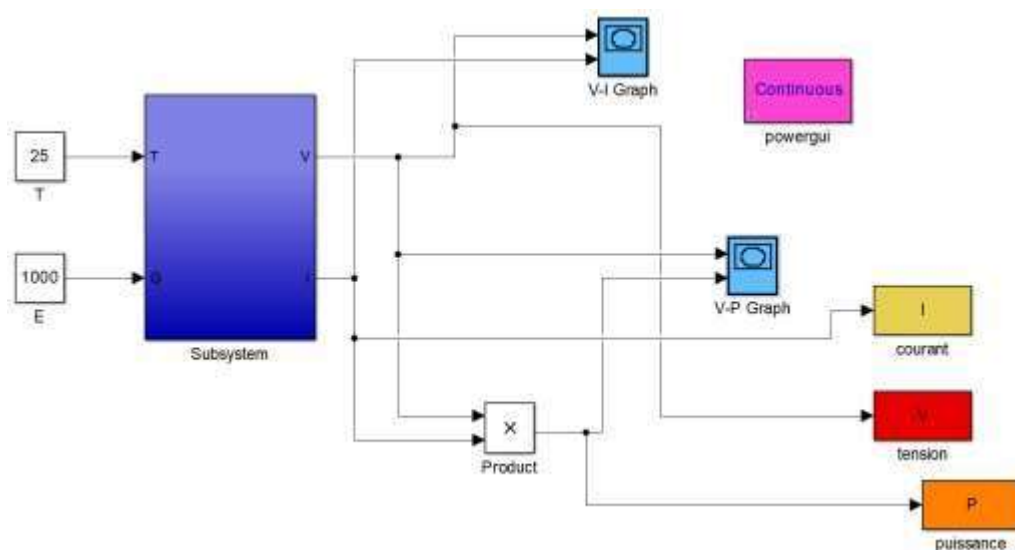


Figure II.2 : Schéma bloc d'un module PV

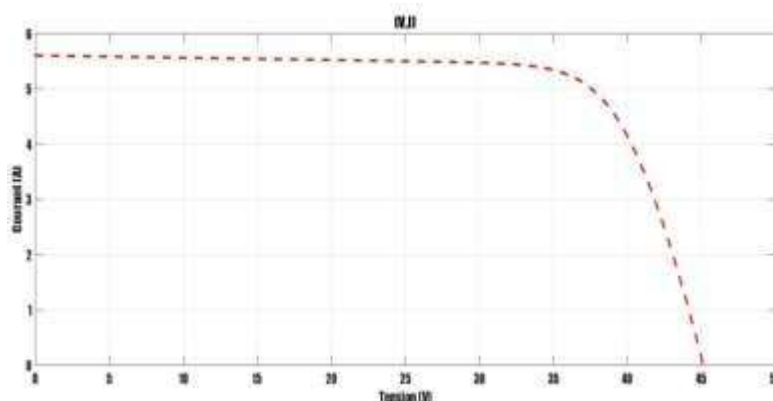


Figure II.3 : Simulation de la caractéristique courant-tension du module PV

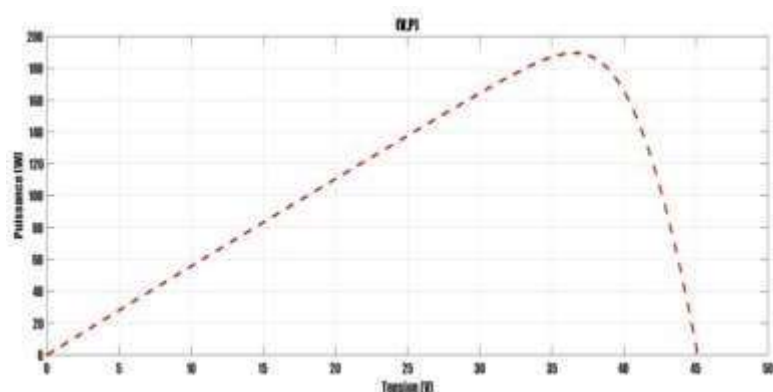


Figure II.4 : Simulation de la caractéristique puissance-tension du module PV

La figure (II.3) et la figure (II.4) présente :

- La variation du courant du module en fonction de la tension à une température et un éclairement fixe, On note que le courant reste pratiquement constant jusqu'à $V=36.6$ V puis il diminue exponentiellement jusqu'à son annulation.
- L'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe, on note que la courbe de puissance présente un point crête environs $P=190$ W. la courbe ne cesse pas d'augmenter jusque ce point puis elle chute vers une puissance nulle.

II.3. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT ET DE LA TEMPERATURE:

II.3.1. Influence de la température:

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température [8]. Dont on voit une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température [26]. La figure (II.5) et (II.6) illustre respectivement les

caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de 1000W/m^2 et différentes températures.

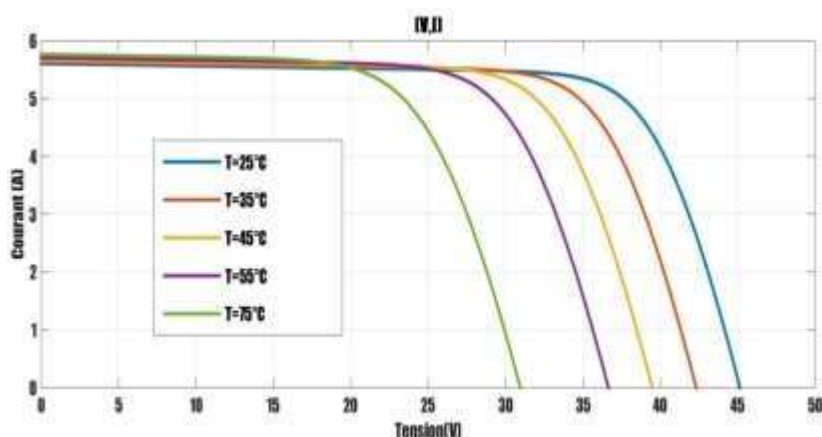


Figure II.5 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension du module PV pour différents température et un éclairements $E=1000\text{W/m}^2$

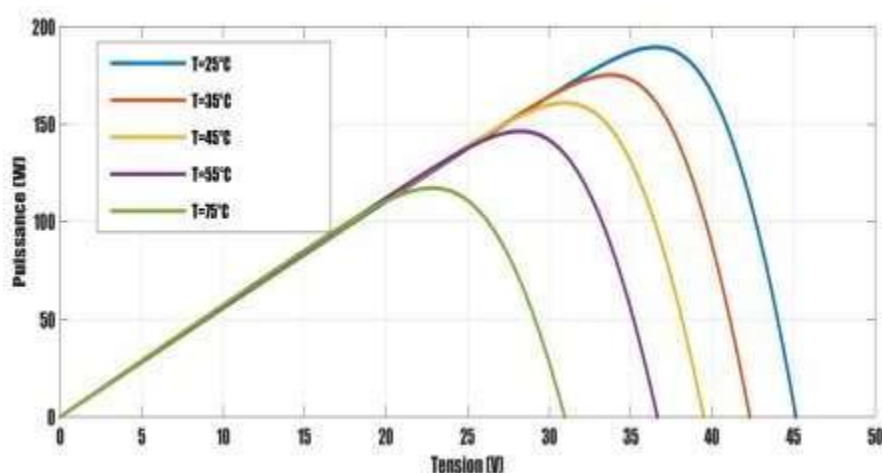


Figure II.6 : Résultats de simulation des caractéristiques puissance-Tension du module PV pour différents température et un éclairements $E=1000\text{W/m}^2$

On fixe l'éclairement ($E = 1000\text{ W/m}^2$) et on fait varier la température de 0°C à 75°C . On constate d'après la figure (II.4) et la figure (II.5) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui augmente légèrement avec la température du module PV.

II.3.2. Influence de l'éclairement :

On fixe la température ambiante ($T = 25^\circ\text{C}$) et on fait varier l'éclairement entre 400 W/m^2 et 1000 W/m^2 avec un pas de 200 W/m^2 , les courbes de variation du courant par rapport la tension pour chaque éclairement sont montré dans la figure (II.7). D'après la figure on constate que le changement de l'éclairement n'a pas un grand impacte sure la tension du circuit ouvert

(pratiquement 5V pour notre plage de variation de l'éclairement). Par contre le courant varie de 1A pour un éclairement 200 W/m^2 à 5.62 A pour un éclairement 1000 W/m^2 .

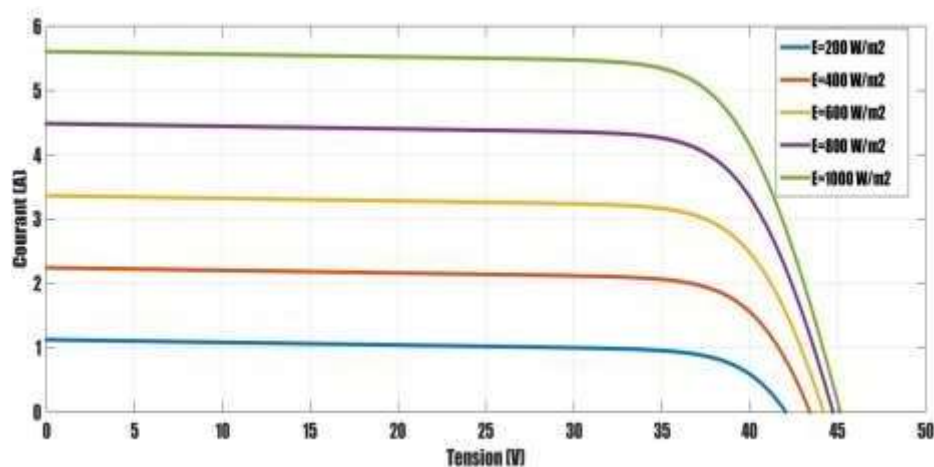


Figure II.7 : Caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairements

La figure (II.8) illustre les courbes de la variation de puissance par rapport à la tension pour chaque éclairement. On remarque que l'éclairement a un effet proportionnel sur la puissance ; dans notre cas le point crête de la puissance augmente de W pour un éclairement 200 W/m^2 à 190W pour un éclairement 1000 W/m^2 . La tension du court-circuit est pratiquement inchangée vis-à-vis le changement de l'éclairement.

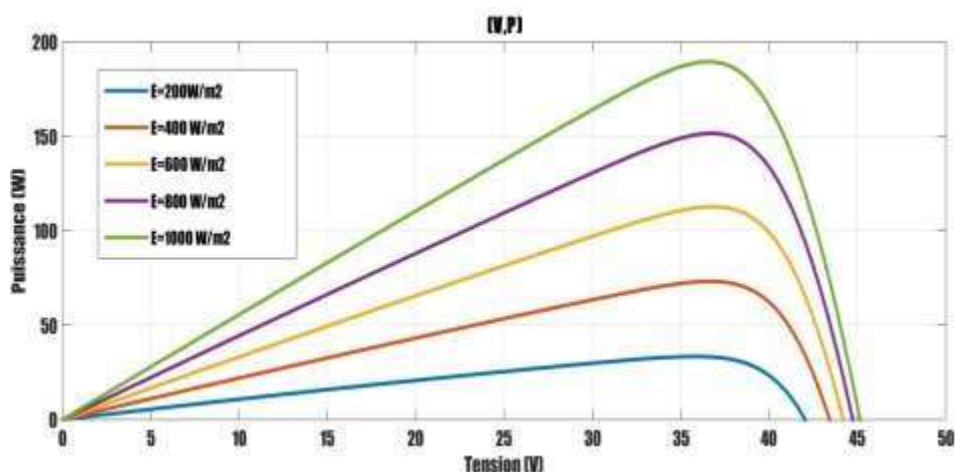


Figure II.8 : Caractéristique P-V d'une cellule PV sous différents éclairements

II.3. INFLUENCE DE LA RESISTANCE SERIE ET LA RESISTANCE PARALLELE :

II.3.1. Influence de la résistance série R_s :

La résistance série est une résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. Les courbes $I(V)$, $P(V)$ sont respectivement illustrées dans la figure (II.9) et la figure (II.10)

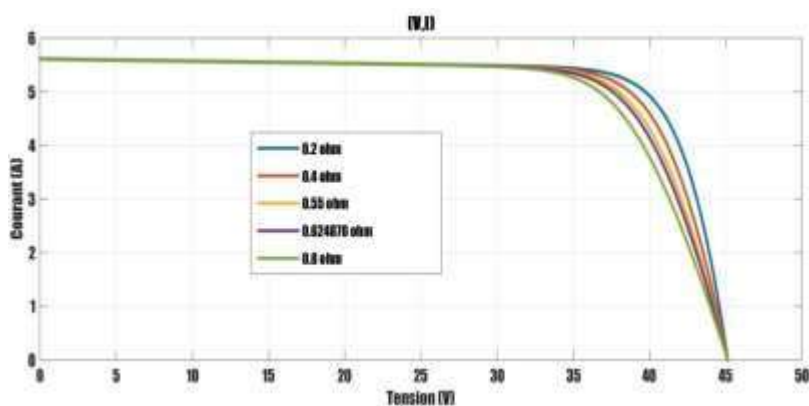


Figure II.9 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V

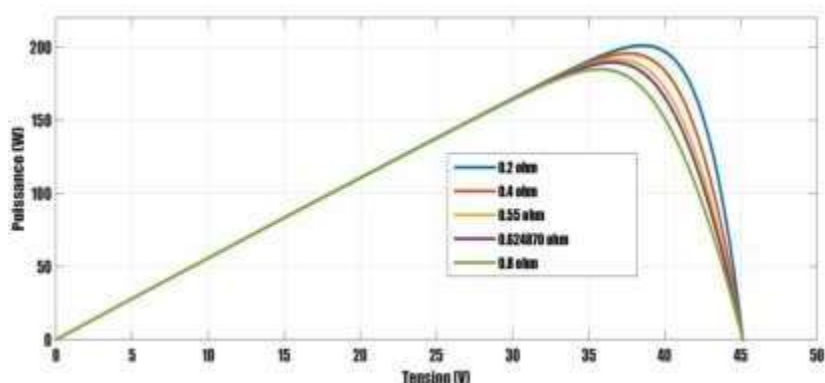


Figure II.10: Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant dégradées que la résistance série est grande. Ceci entraîne un rendement plus faible de la cellule. Par contre, on peut bien remarquer que cette résistance n'a pas d'influence sur la tension de circuit ouvert.

II.3.2. INFLUENCE DE LA RESISTANCE PARALLELE R_{sh} :

La résistance shunt (parallèle) est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant (courant de fuite entre des cellules, courant de fuite entre la cellule et le bord du module etc.). En général, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

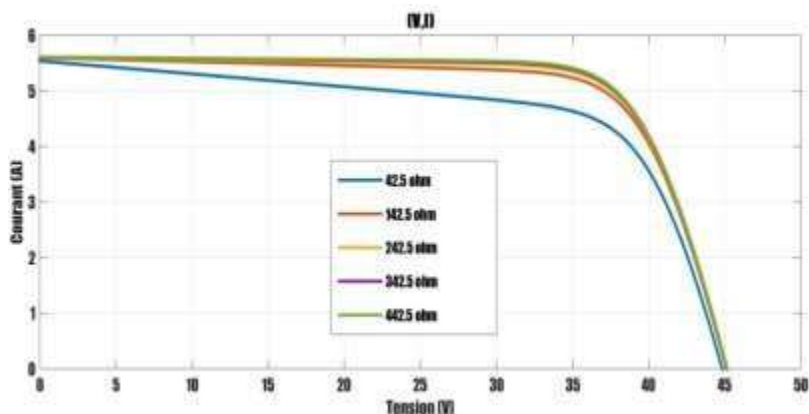


Figure II.11 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V

Pour de grandes valeurs de R_{sh} , on ne voit pas de modification notable dans la zone de tension. Dans le cas de réduction importante de la résistance parallèle, on remarque qu'il y a une chute en tension de circuit ouvert et en courant de court-circuit

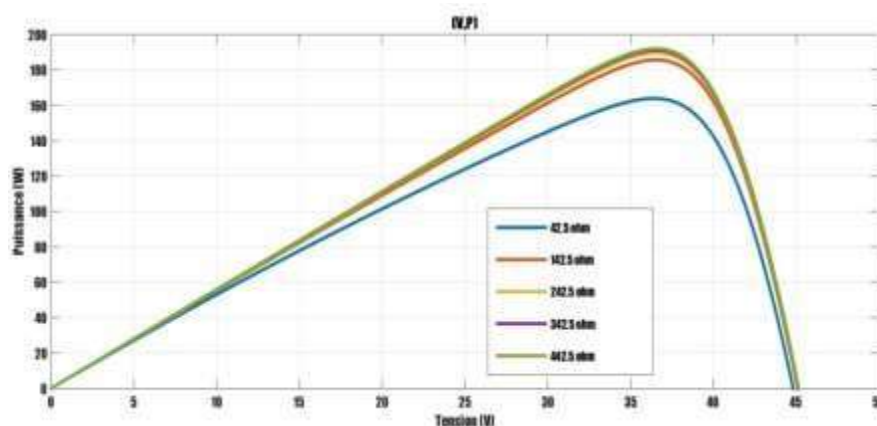


Figure II.12 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P-V

II.4. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques et industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière de soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et en parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

- a- Raccordement en série : même que celui des cellules.
- b- Raccordement en parallèle : même que celui des cellules.
- c- Raccordement mixte : c'est le branchement qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte.

II.5. PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE :

Un panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise.



Figure II.13: Panneau PV

II.5.1. Associations des cellules en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série figure (II.14)

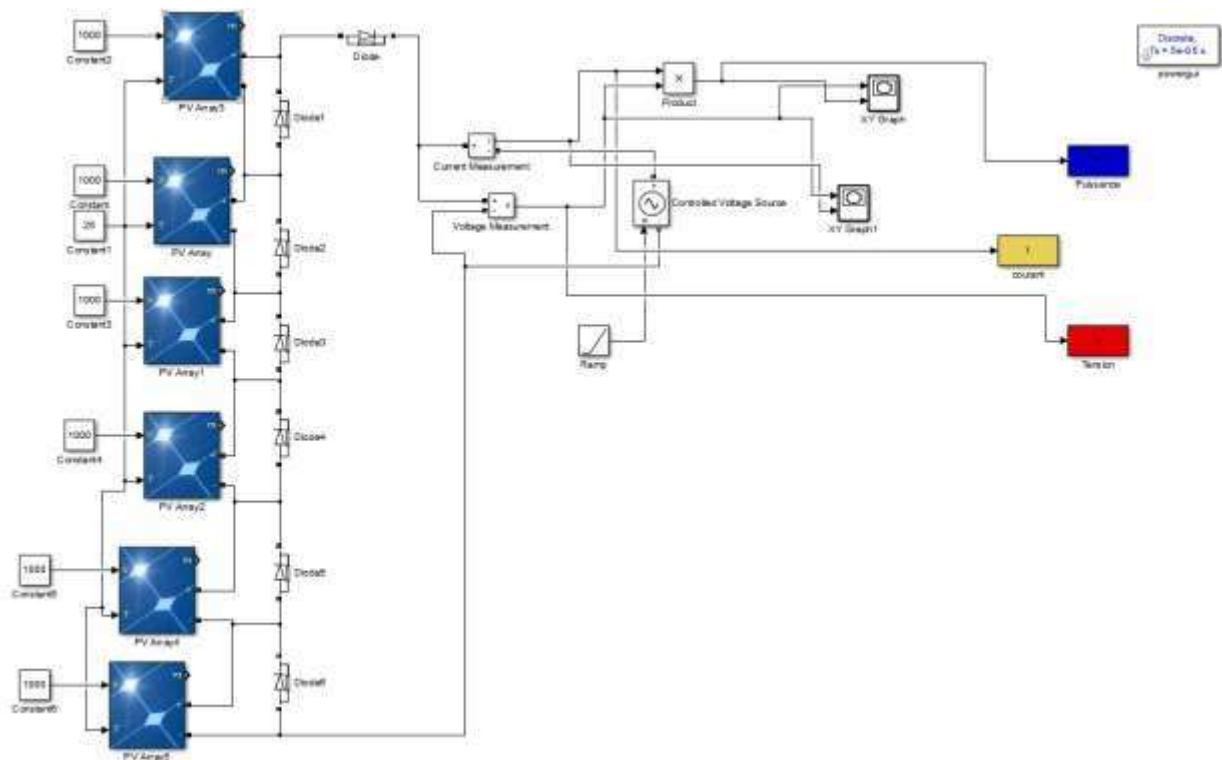


Figure II.14: Schéma de 6 cellules PV en série sous Simulink

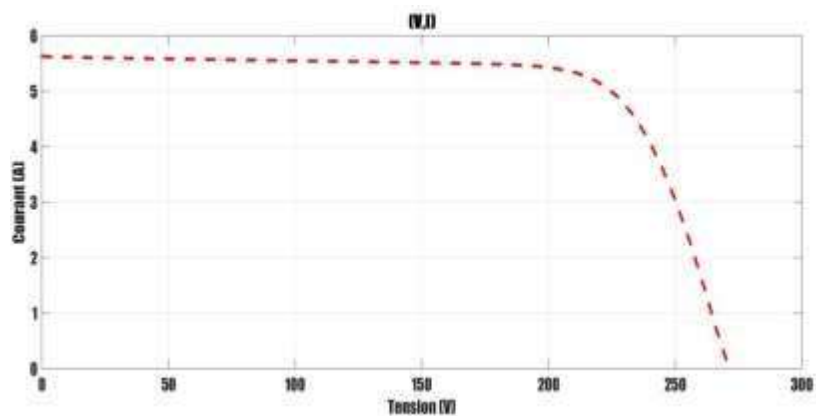


Figure II.15 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 6 cellules en série

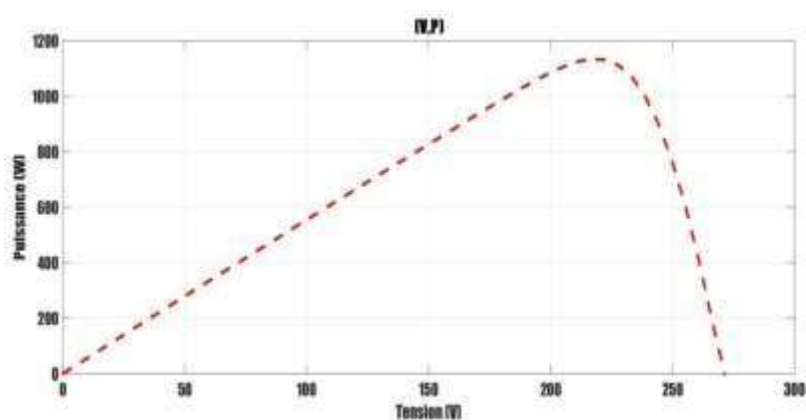


Figure II.16 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 6 cellules en série

Dans un groupement de n cellules en série (dans notre exemple on 6 cellules), la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même.

II.5.2. Association des cellules en parallèle :

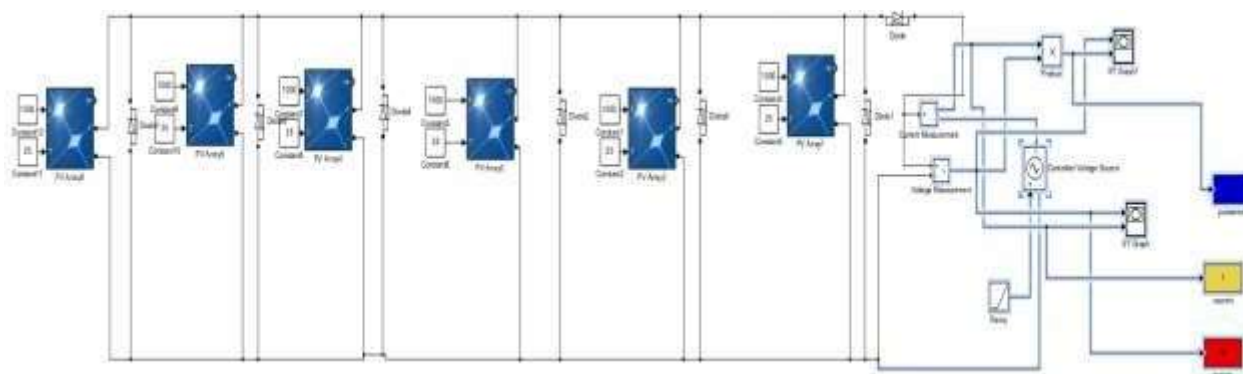


Figure II.17 : Schéma de 6 cellules PV en parallèle sous Simulink

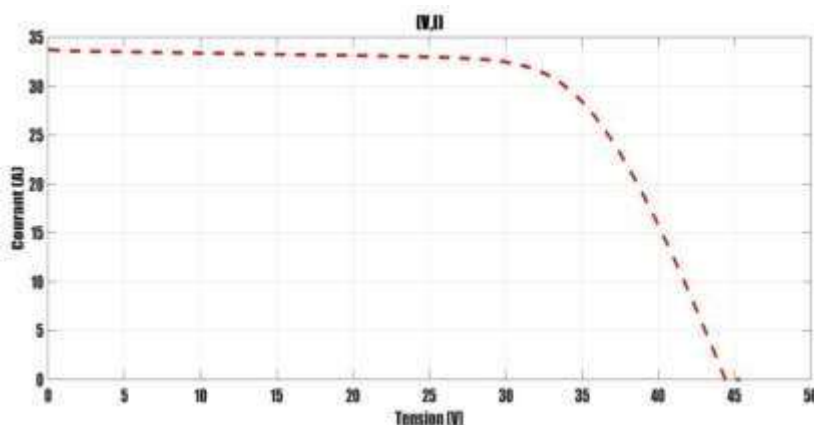


Figure II.18 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 6 cellules en parallèle

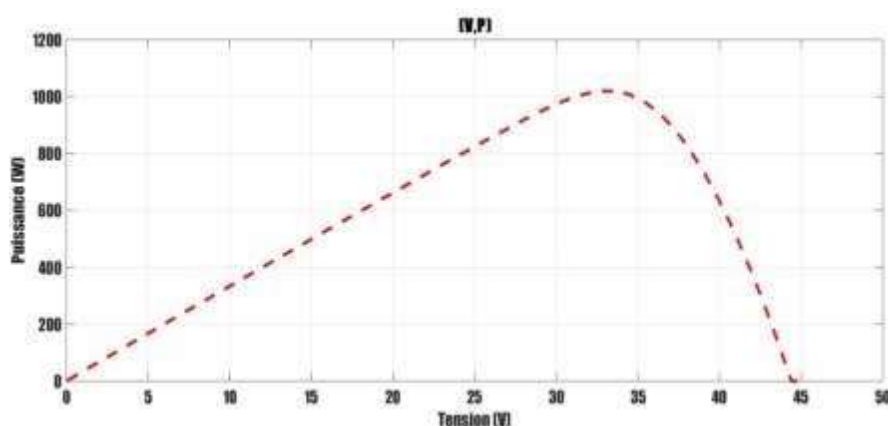


Figure II.19 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 6 cellules en parallèle

Dans le cas d'un groupement de n cellules en parallèle (dans notre exemple on 6 cellules), les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants.

II.5.3. Association des cellules mixte (série-parallèle) :

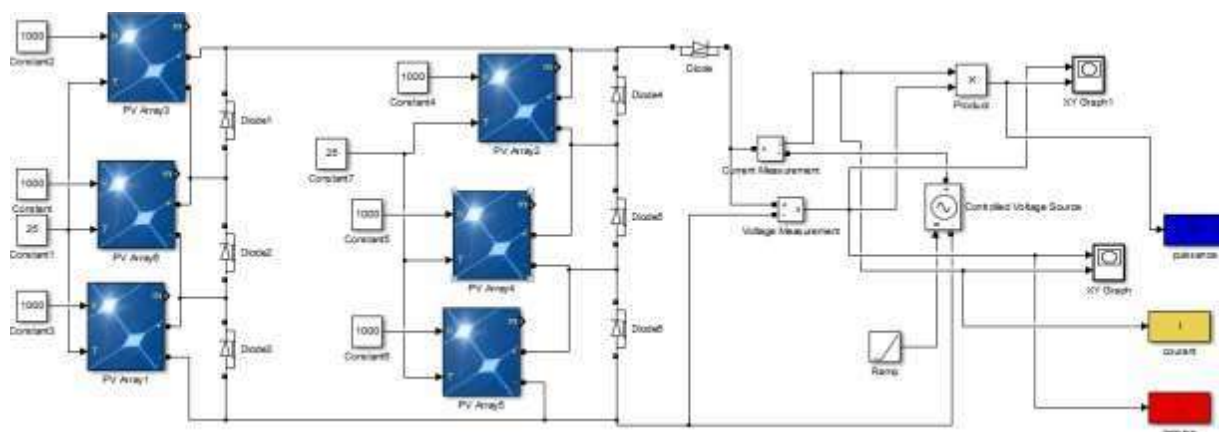


Figure II.20 : Schéma de 6 cellules PV en mixte sous Simulink

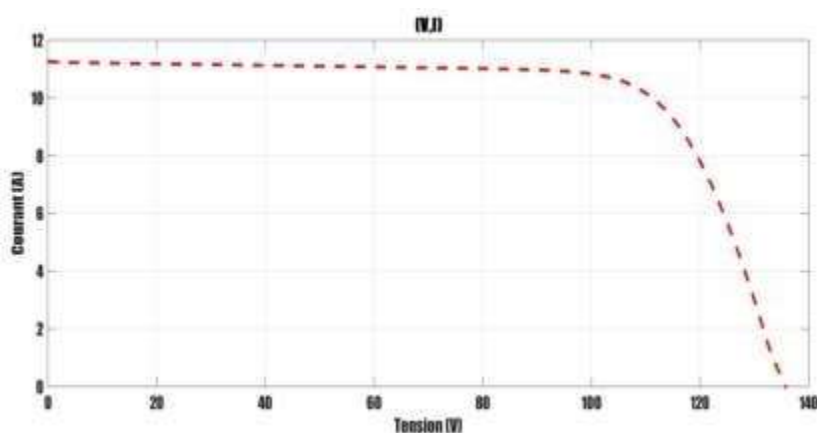


Figure II.21 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 6 cellules en mixte

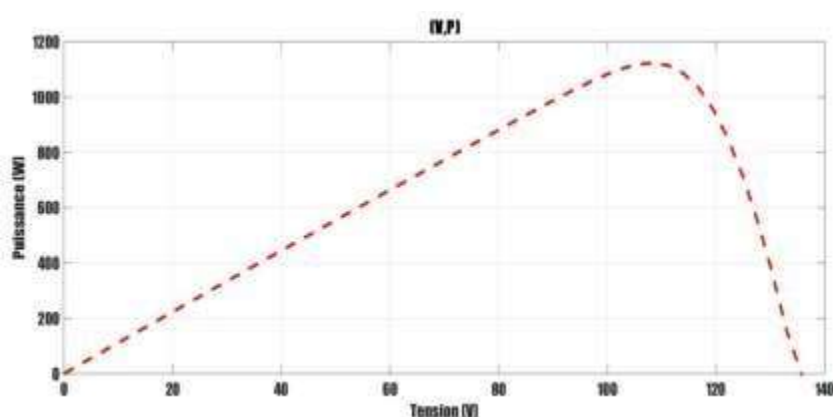


Figure II.22 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 6 cellules en mixte

L'association mixte des cellules photovoltaïques est une technique qui permet de combiner les avantages des connexions en série et en parallèle pour obtenir un module avec des caractéristiques électriques adaptées à une application spécifique. En série, pour augmenter la tension, et en parallèle, pour augmenter le courant.

II.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre la modélisation d'un générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une seule diode. Ensuite nous avons considérés les différents paramètres du circuit équivalent qui permet de tracer la caractéristique I-V et P-V. Nous avons remarqué que les performances d'un GPV sont fortement influencées par des conditions météorologiques tel que l'éclairement et la température ainsi par des paramètres internes tel que la résistance série et parallèle.

III.1. INTRODUCTION

La question la plus préoccupante pour les chercheurs était les défauts des installations photovoltaïques, car ils réduisent exponentiellement la quantité de puissance produite par les générateurs photovoltaïques. En raison de la complexité des problèmes, de nombreuses solutions ont été proposées dans la littérature, mais elles restent insuffisantes. [27].

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 le troisième chapitre, on traitera une collection de ces défauts.

III.2. DÉFAUTS DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Dans cette partie nous décrirons les différents défauts rencontrés d'un système PV. 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.

III.3. TERMINOLOGIE RELATIVE AUX DISFONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PV

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 :

III.3.1. Définition d'un 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. [28]

III.3.2. Définition de Défaillance :

Une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées [28].

III.3.3. Définition de 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 [28].

III.3.4. Définition de Dégradation :

Est un processus de diminution progressive des performances d'une entité fonctionnelle d'un dispositif.

III.3.5. Définition de Perturbation

Est toute entrée non contrôlée, issue de l'environnement extérieur, influençant de façon négative sur un système physique.

III.3.6. Définition de l'Anomalie

Caractérise un comportement du système physique, non conforme à une référence.

III.3.7. Définition de Symptôme

Représente un signe distinctif permettant de détecter un dysfonctionnement du système surveillé.

III.3.8. Définition du diagnostic :

Le diagnostic était à l'origine utilisé dans le domaine médical. Ce terme signifie le raisonnement conduisant à l'identification de la cause (origine) d'une défaillance, d'un problème ou d'une maladie sur la base de caractéristiques ou de symptômes constatés par des observations, des contrôles ou des tests (il s'agit donc d'acquérir des connaissances par des signes observables), comme dans son sens médical, le diagnostic des systèmes industriels est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique [27]

III.4. CLASSIFICATIONS DES DEFAUTS DANS LES SYSTEMES

La classification des types de défauts les plus influents dans le système photovoltaïque est très importante, et l'identification de ces défauts est nécessaire, car les défauts ont des effets sur la performance requise et la durée de vie du système photovoltaïque.

Il existe plusieurs catégories différentes pour classer les défauts dans le domaine photovoltaïque. Les auteurs de [29] classent les défauts en fonction de leur durée; qu'il soit temporaire ou permanent, un problème temporaire peut être résolu manuellement ou automatiquement pour une période prédéfinie, par exemple un défaut d'ombrage.

Il existe d'autres classifications présentées par les auteurs dans [30] où ces défauts sont classés en trois types : physiques, environnementaux et électriques. Premièrement, les défauts physiques peuvent être internes ou externes et comprennent généralement les dommages, les fissures et la détérioration des modules photovoltaïques. En outre, la défaillance des systèmes photovoltaïques peut être causée par l'effet du vieillissement, qui est également un phénomène physique. Deuxièmement : les défauts environnementaux comprennent l'accumulation de saletés et de poussières, l'ombrage temporaire, etc.

Les défauts environnementaux permanents comprennent l'ombrage permanent dû à une mauvaise sélection de l'emplacement des panneaux. Les défauts de points chauds dans les modules PV peuvent être causés par un ombrage permanent ou temporaire. Troisièmement, les défauts de circuit ouvert, de ligne à ligne et de mise à la terre sont des exemples de défauts électriques qui peuvent affecter les modules PV, les réseaux ou les systèmes entiers. Le fait de couper des fils dans une ou plusieurs branches d'un circuit PV entraîne des défauts de circuit ouvert.

La figure (III.1) présente la classification des types de défaut des systèmes PV les plus courants.

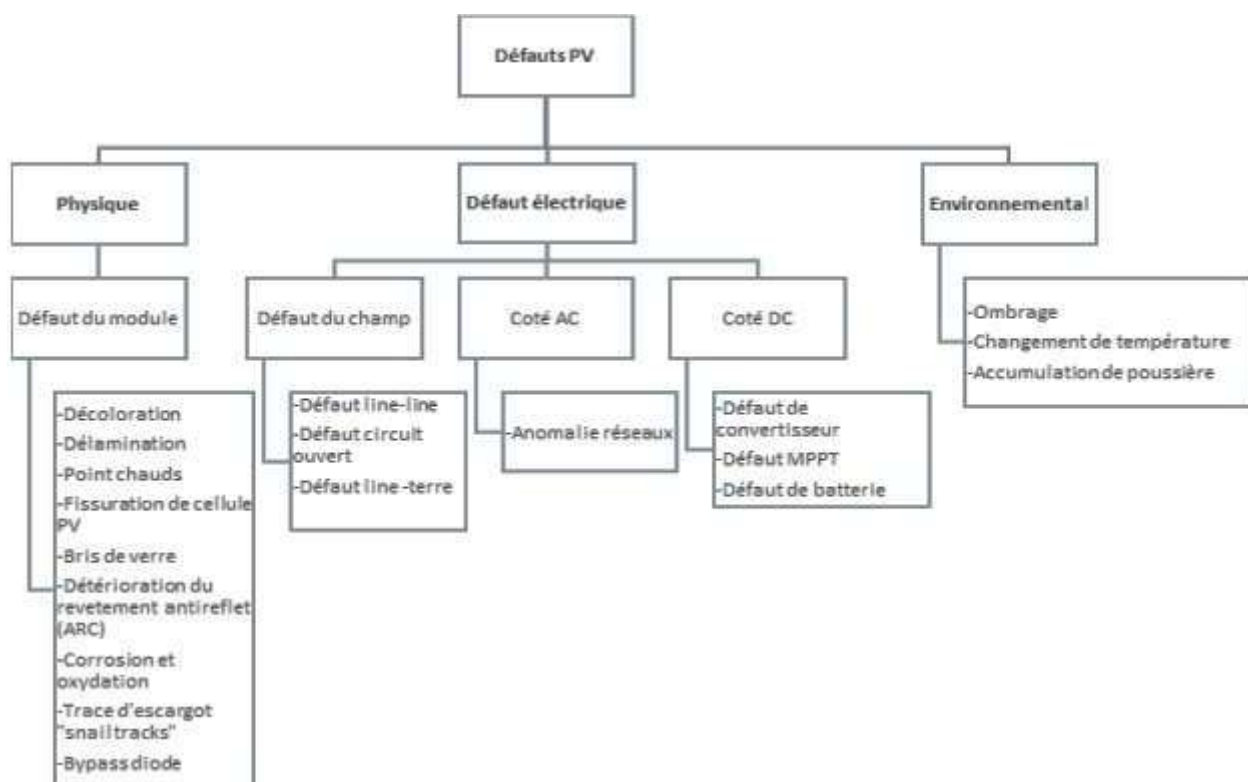


Figure III.1: Défauts du système photovoltaïque

III.4.1. Défauts physiques

III.4.1.1. Décoloration

La décoloration, causée par des facteurs externes tels qu'une exposition prolongée aux rayons ultraviolets et à des températures élevées supérieures à 50°C, plus fréquentes dans les zones chaudes et sèches, est l'un des défauts les plus courants des panneaux photovoltaïques. D'autre part, la décoloration peut être divisée en deux types principaux : la décoloration du maillage (doigt) et aussi le jaunissement et le brunissement de l'EVA (Ethyl-Vinyl-Acétate)

Le jaunissement et le brunissement de l'EVA sont deux phénomènes qui peuvent se produire dans le temps, affectant la couleur et l'apparence du matériau. Ces changements sont souvent liés à l'exposition aux rayons UV, à la chaleur, ou à des réactions chimiques avec des substances présentes dans l'environnement.

Ce déséquilibre se produit dans le secteur photovoltaïque, ce qui entraîne une perte de puissance de sortie en raison d'une diminution du flux lumineux. L'énergie lumineuse est intense lorsqu'elle atteint la surface de la cellule solaire [31]. La Figure (III.2) illustre un exemple de ce défaut.



Figure III.2 : Décoloration sur la surface de la cellule

III.4.1.2. Délamination

L'un des principaux modes de dégradation est la délamination, qui comprend la perte d'adhérence entre les différentes couches (verre/encapsulant), (encapsulant/cellule) et la mauvaise adhérence des couches photovoltaïques sensibles et matérielles, ce défaut existe-t-il dans les modules photovoltaïques. En raison de la réflexion accrue de la lumière solaire atteignant la surface du module, les court-circuits générés par le module sont réduits [32]. La détérioration est plus répandue dans les régions chaudes et humides. Un exemple de ces défauts est illustré à la Figure (III.3).



Figure III.3 : Délamination sur la surface de la cellule

III.4.1.3. Points chauds

Lorsque les cellules solaires photovoltaïques des modules produisent moins de courant que les chaînes de module elles provoquent des points chauds. Ce défaut, qui affecte les performances de la cellule solaire, peut être causé par divers facteurs tels qu'un ombrage partiel de la cellule, des dommages ou un déséquilibre électrique. Les facteurs incluent la déformation de la jonction p-n, le shunt local, les impuretés et la résistance des plaquettes [33]. La figure (III.4) illustre la façon dont les points chauds peuvent endommager une cellule.

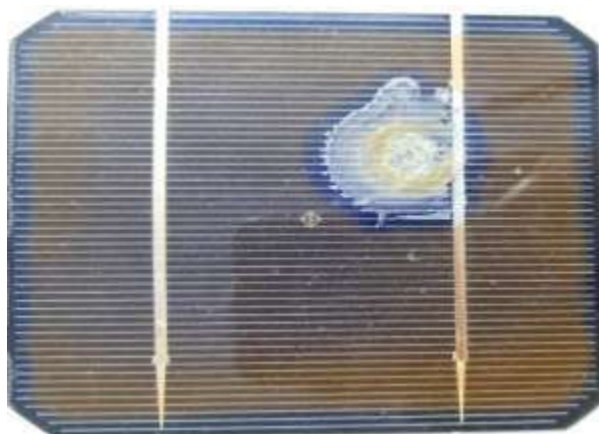


Figure III.4 : Point chaud sur la surface de la cellule

III.4.1.4. Fissuration de la cellule photovoltaïque

Lors d'une exposition à l'extérieur, des contraintes mécaniques ou thermiques peuvent former des fissures cellulaires visibles. Les microfissures peuvent également être causées par les mêmes contraintes créées lors du processus de fabrication [34]. Figure (III.5) présente une photographie de ces défauts.



Figure III.5: Fissuration sur la surface de la cellule

III.4.1.5. Bris de verre

Le bris de verre est généralement causé par des facteurs externes tels qu'un mauvais emballage lors du transport, de l'installation, de la maintenance, de la manipulation, du vent, du stress thermique et des jets de pierres [35].

Un exemple de ce défaut est présenté dans la figure (III.6).



Figure III.6: Bris de verre sur la surface de la cellule

III.4.1.6. Détérioration du revêtement antireflet (ARC)

La détérioration du revêtement antireflet (ARC) peut être causée par divers facteurs, notamment des méthodes de nettoyage inappropriées, une exposition à des températures extrêmes, une chute sur une surface rugueuse et le contact avec certains produits chimiques. Il est important de comprendre les mécanismes de détérioration pour éviter de compromettre la qualité de l'ARC et sa durabilité [35]. Ce défaut est présenté à la figure (III.7).



Figure III.7 : Détérioration du revêtement antireflet (ARC)

III.4.1.7. Corrosion et oxydation

La combinaison de pénétration d'humidité, l'absorption accrue d'encapsulant et la tension du système peuvent causer la corrosion et l'oxydation des contacts métalliques tels que les doigts, les barres omnibus, les jeux de barres, les connexions de ruban et de chaîne, les connexions soudées et les bornes de sortie. Ce défaut entraîne une augmentation de la résistance série, une diminution du facteur de remplissage et une diminution de la puissance de sortie [36]. La figure (III.8) montre un exemple de corrosion du jeu de barres et de la connexion des cellules.

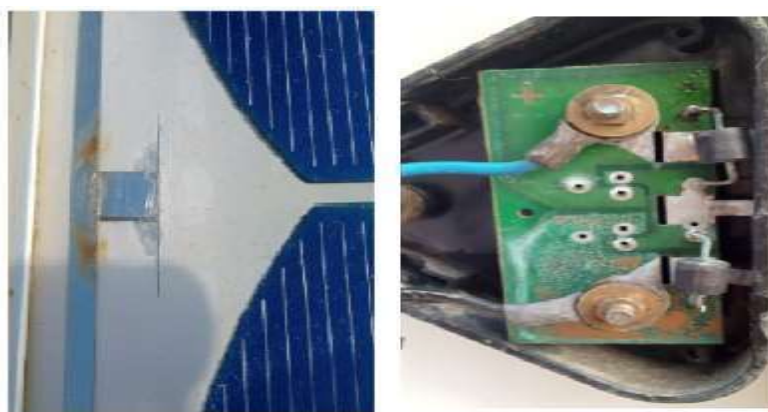


Figure III.8: Corrosion et oxydation de l'interconnexion des chaînes et de la boîte de jonction

III.4.1.8. Traces escargot 'Snailtracks'

Ce défaut est une microfissuration ou une décoloration des lignes d'argent de la grille le long des bords de la cellule. Divers fabricants de modules ont observé des traces d'escargots Figure (III.9) après l'installation des panneaux solaires sur le terrain pendant des mois ou des années [37].



Figure III.9: Traces escargot 'Snailtracks'

III.4.1.9. Défaut de la diode Bypass

La surchauffe est une cause majeure de panne de diode de dérivation à cause de déclenchement de la tension directe, des fuites de chaleur inverses, des changements d'ombre à ombre et même des transitoires de courant élevés dus à la foudre à proximité [38]. Une diode bypass compense les pertes de puissance et la réduction de performances qui résulte du phénomène de l'ombrage de module PV. Elle évite la polarisation inverse, le hot spot et destruction du module. Voir la figure (III.10).



Figure III.10 : Défaut de la diode Bypass.

III.4.2. Défaut électrique

III.4.2.1. Défaut du champ

Un générateur photovoltaïque a généralement plusieurs chaînes photovoltaïques parallèles, et chaque chaîne contient plusieurs modules connectés en série. Chaque module, chaîne et assemblage complet, qu'il soit normal ou défectueux, a ses propres caractéristiques I-V et un point de puissance maximale (MPP) unique.

Lorsque des modules PV sont connectés ensemble, leur courbe I-V globale est déterminée par leurs interactions. En conséquence, les modules photovoltaïques fonctionnent ensemble comme une chaîne, seulement aussi solide que son maillon le plus faible [37][38]

III.4.2.2. Défaut de circuit ouvert

Un défaut de circuit ouvert est une déconnexion accidentelle d'un conducteur porteur de courant. Où, la tension à la sortie de chaque cellule est la même, en supposant que toutes les cellules du panneau solaire ont les mêmes spécifications techniques et qu'elles sont toutes soumises aux mêmes conditions de rayonnement solaire et de température. Ainsi, les caractéristiques ont été comparées à un générateur sans aucune déconnexion dans des conditions normales [39], ce qui signifie qu'en cas de défaut en circuit ouvert, on observe une diminution du courant de court-circuit, ce qui a un effet direct sur la puissance maximale, tandis que la valeur de la tension ouverte reste presque la même [40].

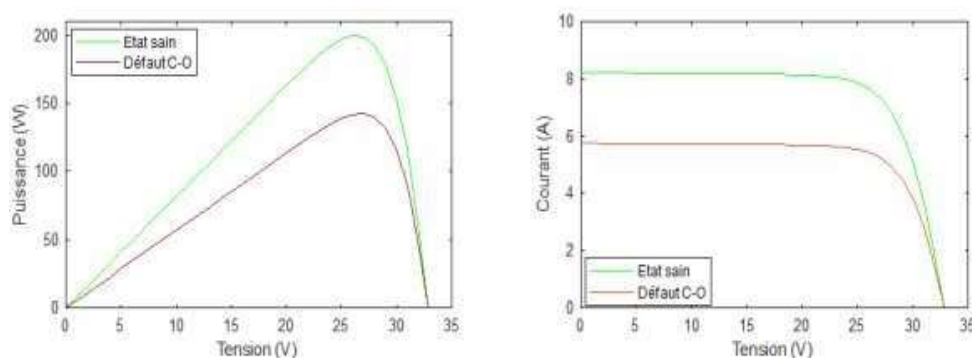


Figure III.11: Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut de circuit ouvert

III.4.2.3. Défaut de court-circuit

Le défaut de court-circuit est l'un des défauts les plus courants dans les systèmes photovoltaïques, il peut être classé parmi les défauts les plus dangereux qui peuvent se produire dans les systèmes photovoltaïques [41]. Par conséquent, ce défaut entraîne une diminution de l'efficacité du panneau photovoltaïque. Les auteurs de la référence [41] ont fourni une explication à la défaillance du court-circuit. La Figure (III.12) montre les caractéristiques P-V et I-V du panneau sain et lors d'un défaut de courant de court-circuit, où l'on observe une diminution de la tension en circuit ouvert, tandis que le courant de court-circuit conserve la même valeur.

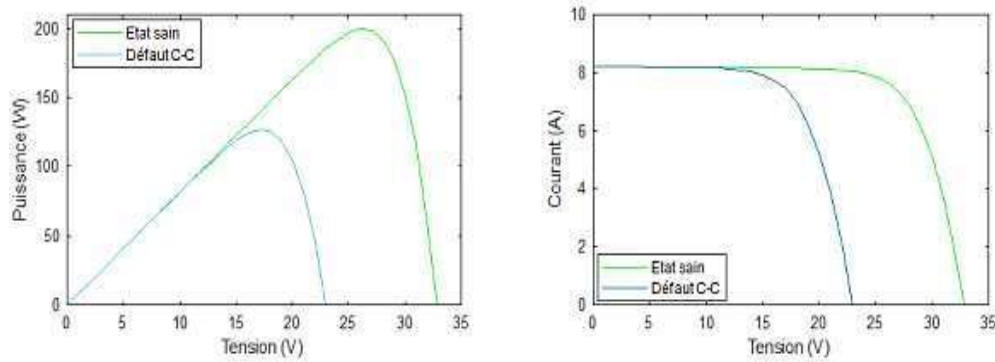


Figure III.12: Caractéristiques P-V et I-V du panneau photovoltaïque en bon état et avec le défaut de court-circuit

III.4.2.4. Défaut de mise à la terre

Les défauts de terre sont considérés comme les défauts les plus courants dans les systèmes PV. Le défaut fait référence au court-circuit électrique accidentel entre un conducteur électrique et la terre [42]. Ce défaut est principalement causé par un défaut d'isolation des câbles. Les défauts de mise à la terre peuvent présenter de graves risques pour la sécurité en raison des arcs de courant continu générés au point de défaillance, des chocs électriques dus aux connexions de mise à la terre sous tension et du risque d'incendie [42].

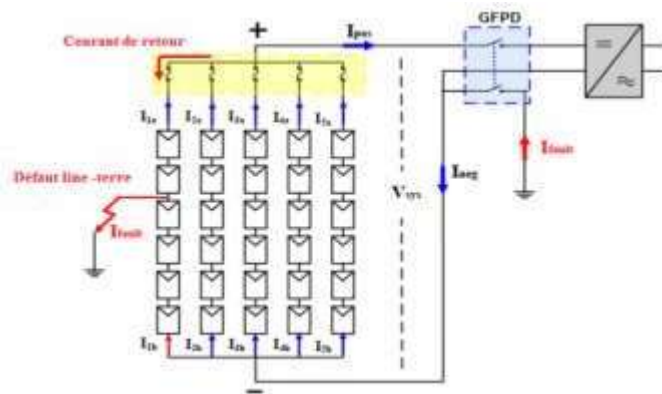


Figure III.13: Schéma de principe d'un défaut ligne-terre dans le générateur photovoltaïque

III.4.2.5. Défaut de ligne à ligne

Un défaut ligne à ligne désigne un défaut de court-circuit entre les conducteurs du PV système. Les défauts de ligne à ligne peuvent être causés par un défaut d'isolation des câbles et dommages mécaniques [42].

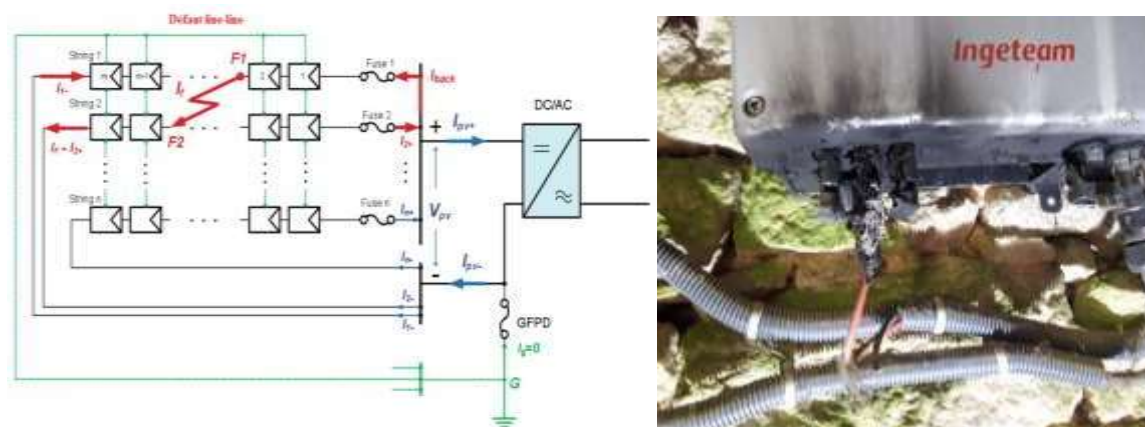


Figure III.14: Schéma de principe du système PV sous un défaut ligne-ligne

III.4.2.6. Défaut d'arc

Le passage involontaire d'un courant dans l'air ou dans un autre diélectrique est connu sous le nom de défaut d'arc. Les défauts d'arc peuvent se produire entre une discontinuité dans un conducteur électrique et entre des conducteurs ayant des potentiels différents [42]. Arcs électriques dans un système photovoltaïque pourrait entraîner de graves dangers.



Figure III.15: Défaut d'arc [43]

III.4.3. Défaut du côté AC

Le risque qu'un événement se produise sur le réseau est lié à de nombreux paramètres aléatoires. Ainsi, les court-circuits peuvent avoir plusieurs causes [44] :

1. **Cause électrique** : C'est un changement par exemple de l'isolation des équipements du réseau. Ces isolants se dégradent avec le temps, provoquant une défaillance de l'isolation et par conséquent des court-circuits.
2. **Atmosphère** : Les lignes aériennes sont sensibles aux perturbations externes telles que la foudre, les orages ou le gel.

3. **Cause mécanique** : Par exemple, chute de corps sur des conducteurs ou des conducteurs dégradés mécaniquement par l'agression extérieure d'engins de terrassement.
4. **Cause humaine** : Il s'agit d'opération erronée, comme l'ouverture d'un sectionneur sous charge.

III.4.4. Défaut du côté DC

III.4.4.1. Défaut de convertisseur

La température interne de l'interrupteur de puissance (diodes, des MOSFET, des IGBT et des GTO) peut augmenter en raison d'un problème thermique causé par une surcharge due à une surtension qui entraîne une avalanche, ce qui peut être causé par leur commande.

III.4.4.2. Défaut MPPT

Dans un système solaire typique, l'énergie des panneaux solaires est envoyée à la batterie via un contrôleur de charge solaire. Cependant, cela ne fonctionne pas toujours. Si l'énergie solaire n'atteint pas la batterie, Il peut s'agir d'un problème de câblage. Ce qui pourrait indiquer un problème avec le contrôleur de charge solaire Figure (III.16) [45]. En peut:

- **Faible tension de la batterie** : quand la tension de la batterie chute, le contrôleur s'éteint. Pour résoudre ces problèmes, on utilise un chargeur CA qui maintient la batterie complètement chargée.
- **Sortie de la charge est en surintensité** : le contrôleur de charge arrête la charge lorsqu'une surintensité se produit à la sortie de la charge. La solution est de réduire la charge.
- **Court-circuit dû à la charge** : si la charge provoque un court-circuit, le contrôleur arrête la charge. La solution consiste à corriger l'erreur de court-circuit de charge.
- **Le courant produit par le panneau solaire est dépassé au courant nominal** : quand le courant de sortie du panneau solaire est supérieur au courant nominal, le contrôleur de charge s'éteint.

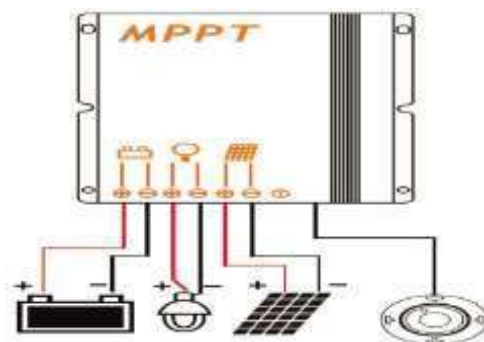


Figure III.16: Schéma typique du système solaire attaché à un contrôleur de charge solaire

III.4.4.3. Défaut de batterie

Un défaut de batterie sur une installation photovoltaïque (PV) peut avoir plusieurs causes, mais les symptômes les plus courants incluent une perte de charge, des problèmes de tension ou un renflement du boîtier de la batterie. Ces symptômes peuvent indiquer une batterie qui ne tient plus sa charge, qui se décharge rapidement, ou qui est endommagée physiquement.

Causes potentielles d'un défaut de batterie sur un système PV :

- Vieillesse de la batterie : Les batteries ont une durée de vie limitée, et avec le temps, leur capacité à stocker de l'énergie diminue.
- Surcharge ou décharge excessive : Un régulateur de charge défectueux ou une utilisation incorrecte peut entraîner une surcharge ou une décharge profonde de la batterie, l'endommageant au fil du temps.
- Problèmes internes : Une cellule défectueuse à l'intérieur de la batterie peut provoquer une perte de charge ou une tension irrégulière.
- Problèmes de connexion : Des connexions desserrées ou endommagées peuvent empêcher la batterie de se charger correctement.
- Problèmes de régulation : Un régulateur de charge défectueux peut empêcher la batterie de se charger complètement ou de se décharger de manière appropriée.
- Problèmes de production : Une production solaire insuffisante peut entraîner une décharge excessive de la batterie.

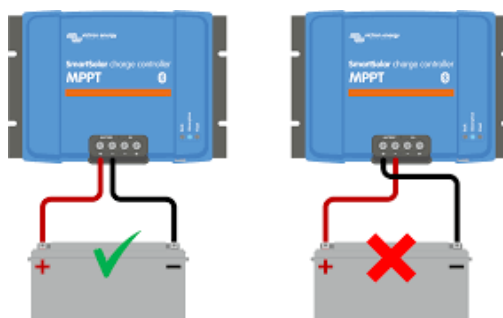


Figure III.17: Défaut de batterie [46]

III.4.5. Défaut environnemental

III.4.5.1. Accumulation de poussière

Le dépôt de poussière sur les panneaux solaires est un obstacle au bon fonctionnement de ces derniers, surtout si la quantité de poussière est élevée, car le pourcentage de rayonnement solaire qui le traverse diminue et sa température augmente, Cela a un impact négatif sur les caractéristiques électriques des panneaux solaires et leur faible rendement. Il est essentiel de

nettoyer périodiquement les panneaux photovoltaïques pour leur entretien et leur performance. Figure (III.18) [47].



Figure III.18: Accumulation de poussière sur les panneaux

III.4.5.2. Changement de température

L'encapsulation de cellules solaires dans un module photovoltaïque modifie le flux de chaleur entrant et sortant du module, ce qui constitue un effet secondaire indésirable, augmentant ainsi légèrement la température de fonctionnement du module PV. Ces augmentations de température affectent le fonctionnement du module PV en réduisant sa tension, diminuant ainsi la puissance de sortie. De plus, les augmentations de température sont impliquées dans plusieurs modes de défaillance ou de dégradation des modules PV, car des températures élevées augmentent les contraintes associées à la dilatation thermique et augmentent également les taux de dégradation d'un facteur d'environ deux pour chaque augmentation de température de 10°C.

III.4.5.3. Défaut de l'Ombrage

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbres et feuillages...) fasse de l'ombre aux panneaux solaires. Un ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques [48].

On peut distinguer deux types d'ombrages :

- L'ombrage partiel : c'est un ombrage qui laisse passer en partie les rayons du soleil.
- L'ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche cassée, saleté de toute nature, etc.) [48].



(a)



(b)

Figure III.19: Défaut de l'ombrage : (a) Ombrage partiel, (b) Ombrage total

Il existe d'autre défaut comme **l'humidité** qui est un facteur de stress déterminant dans les mécanismes de corrosion et de délamination, ainsi la présence d'eau dans les boîtes de jonctions des modules PV classiques peut entraîner des courts-circuits.[49]

Le rayonnement solaire est lui-même un facteur de dégradation et plus particulièrement les rayonnements UV qui peuvent détériorer les polymères encapsulant des cellules.[49]

Le vent : Un module PV n'est jamais posé à plat sur le sol : il offre une prise au vent. Les petites vibrations du système induites par des rafales de vent ont leur importance sur le long terme.[49]

La neige : mis à part le fait que la neige bloque le rayonnement solaire et rend la production énergétique d'un module nulle, elle induit une charge mécanique statique, qui peut entraîner des lésions physiques au sein du module ou de son support. A sa fonte, elle rejoint le facteur de stress humidité et les effets associés [49].

Vibrations et chocs : le rôle de l'homme sur la fiabilité d'un module est prépondérant. Son action peut prendre plusieurs formes. Des vibrations dues au transport et au manque de rigueur lors de l'installation des systèmes peuvent être la cause de défaillances précoces ou de dégradations accélérées sur le long terme.



(a)



(b)

Figure III.20: (a) Défaut d'humidité, (b) défaut de neige



Figure III.21: Défaut de vent

III.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, un certain nombre de points ont été identifiés. Tout d'abord, un rappel a été fait sur la terminologie du diagnostic de défauts. Ensuite, on présente la plupart des défauts et anomalies qui peuvent survenir dans les systèmes PV. Il a été démontré que ces problèmes peuvent être classés en général en problèmes physiques, en problèmes électriques et en problèmes climatiques.

Le phénomène d'ombrage partiel et son effet sur le panneau PV ont été envisagés comme le dernier chapitre

VI.1. INTRODUCTION

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque (PV) peut être considérablement réduite par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance). Mais aussi par rapport aux conditions météorologiques. En effet, de nombreux facteurs, tels que l'ombrage, ou la température, peuvent agir considérablement sur la production électrique d'un panneau photovoltaïque (PV).

L'ombrage partiel est un problème fréquemment rencontré dans un système PV (photovoltaïque) qui peut réduire considérablement le rendement des champs photovoltaïques. [26][34]. Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour l'étude et l'analyse de l'effet de l'ombrage sur les performances des différentes configurations d'un champ PV afin, de réduire les pertes et trouver la meilleure configuration qui fournit les meilleures performances.

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulation sous Matlab/Simulink, de l'effet d'ombrage partiel sur la production énergétique d'un panneau photovoltaïque qui contient six modules de 190W chacun. Ces modules sont connectés selon différentes configurations à savoir ; la configuration série (S), parallèle (P) et série-parallèle (SP).

VI.2. CAUSES DE L'OMBRAGE

Plusieurs facteurs peuvent causer l'ombrage partiel, tel que les arbres, les nuages, la neige, le sable, la poussière, les poteaux électriques et les bâtiments.



Figure VI.1 : Causes d'ombrage

VI.3. DESCRIPTION DE L'OMBRAGE

Les modules photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage. Les modules photovoltaïques ne peuvent être enfermés, principalement à cause des connections électriques entre les cellules et entre les modules. On distingue deux types d'ombrage: l'ombrage total et l'ombrage partiel.

VI.3.1. L'ombrage complet

Empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une partie de cellule photovoltaïque (Exemples : une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une couverture).

VI.3.2. L'ombrage partiel

Dans ce cas la répartition de l'éclairement incitant n'est pas homogène sur toute la surface de la cellule ou le module photovoltaïque, les cellules reçoivent différents éclaircissements inférieurs à 1000 W/m².

VI.4. LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Plusieurs configurations des panneaux PV ont été proposées dans la littérature [34-36], ces modules sont connectés selon différentes configurations à savoir ; la configuration série (S), parallèle (P), série-parallèle (SP), Pont-lié (Bridge-Linked (BL)), en nid d'abeilles (Honey comb « HC ») et Total-Cross-Tied (TCT). Dans ce qui suit, les configurations qui sont couramment utilisées dans les applications PV sont présentées.

VI.4.1. Configuration série (S)

Tous les modules PV sont connectés en série comme indiqué sur la figure (VI.2), bien qu'une configuration en série puisse augmenter la tension de sortie, si les modules subissent un ombrage partiel ou des dysfonctionnements, la production de tension globale baisse substantiellement

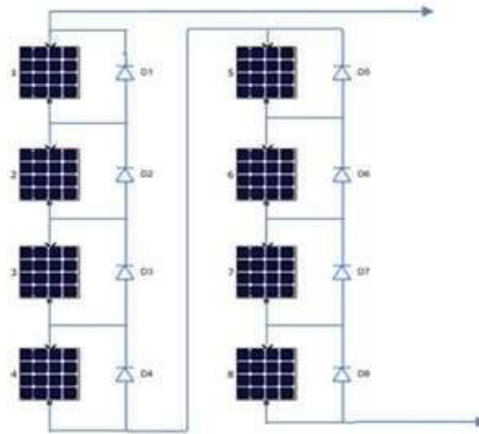


Figure VI.2 : Connexion Série

VI.4.2. Configuration parallèle (P):

Tous les modules PV sont connectés en parallèle comme représenté sur la figure (VI.3), bien qu'une configuration parallèle puisse augmenter le courant de sortie du module, si des modules subissent un ombrage partiel ou des dysfonctionnements, la production du courant global diminue.

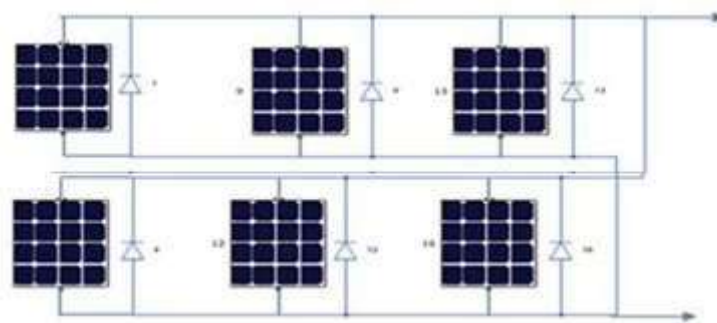


Figure VI.3 : Connexion Parallèle

VI.4.3. Configuration série-parallèle (S-P)

Tous les modules PV sont d'abord connectés en série puis en parallèle figure (VI.4), ce type de configuration peut augmenter la tension et le courant de sortie du champ PV et son schéma de connexion est simple et facile à construire, cependant quand une branche d'une configuration série-parallèle subit un ombrage partiel ou des dysfonctionnements, le courant et la tension de sortie globale diminuent substantiellement.

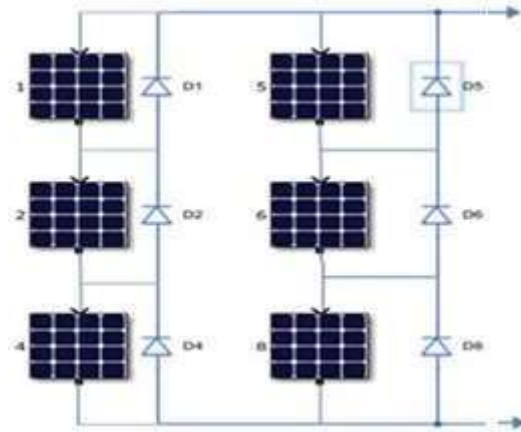


Figure VI.4 : Connexion Série- parallèle

VI.5. SIMULATION ET RESULTAT

Dans le but de pouvoir visualiser les caractéristiques (I-V) et (P-V) sous l'effet de l'ombrage il faudra faire la schématisation électrique de ce phénomène en modélisant le GPV. Pour cela l'environnement Matlab/simulink est convenable à faire cette simulation. Nous examinons plusieurs cas possible de connexions des modules PV.

VI.5.1. Simulation en présence d'ombrage partiel

Afin d'évaluer l'influence des configurations des modules PV dans le cas d'ombrage sur le rendement des installations photovoltaïques, nous avons considéré dans notre étude entre deux à trois cas. Ces cas sont détaillés dans ce qui suit.

VI.5.1.1. Simulation en série

A. Premier cas (S1)

Dans le premier cas, le premier module dans le coin supérieur gauche du générateur PV a été ombré à 10 % (100W/m^2). L'éclairement des autres modules est considéré fixe et égale à 1000W/m^2 . La figure (VI.5) illustre ce cas.

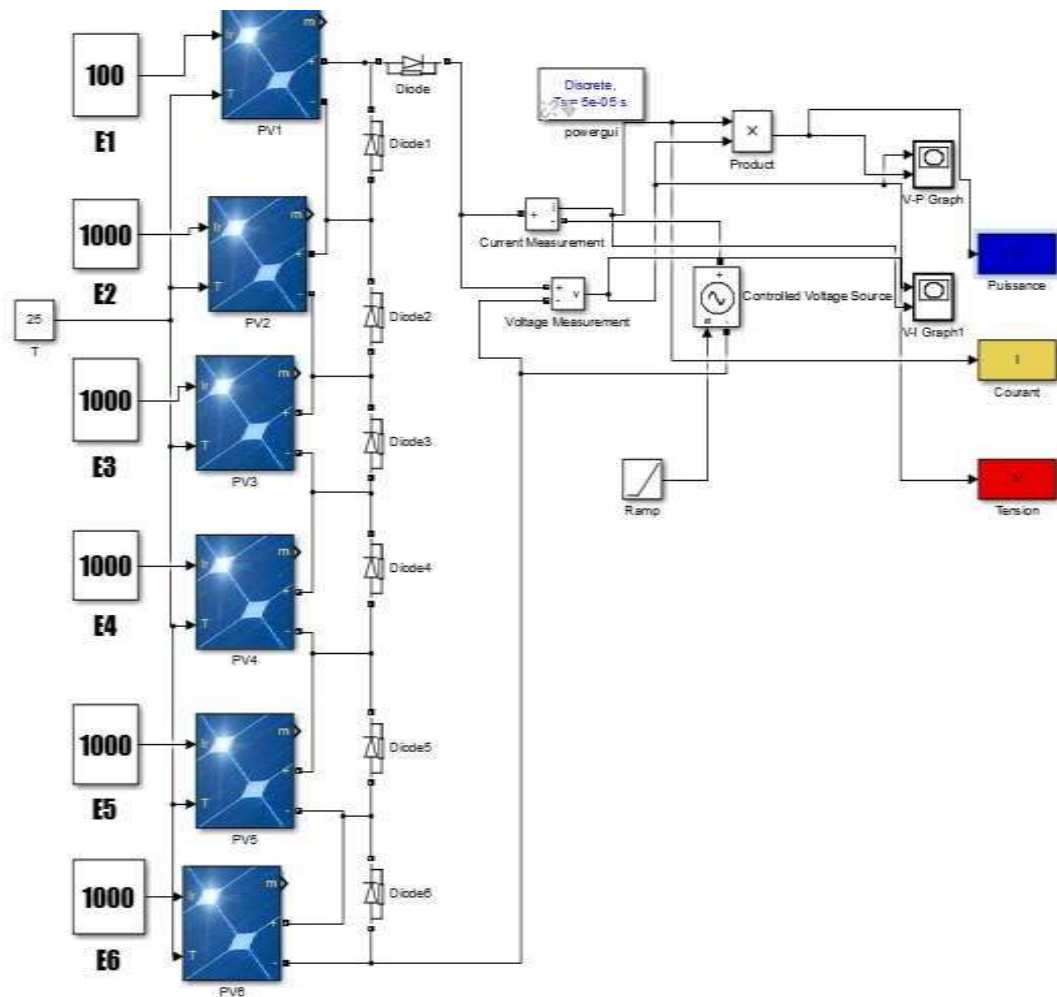


Figure VI.5 : Schéma bloc de six modules en série

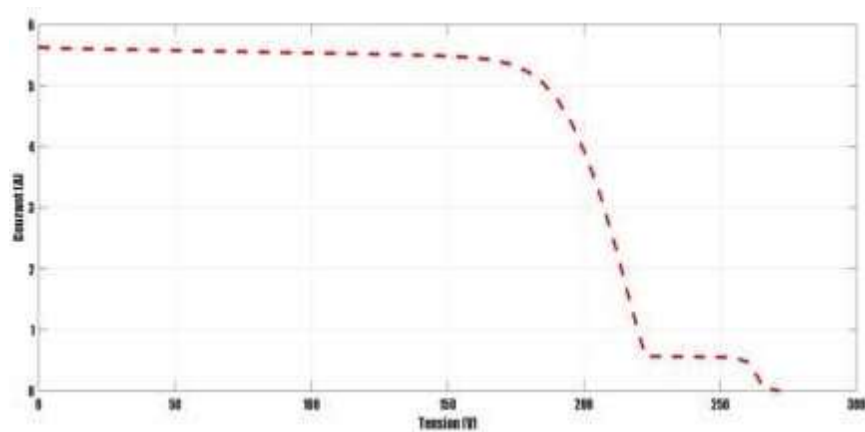


Figure VI.6 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

Dans cette figure (VI.6) on remarque l'apparence de deux point de maximum de puissance respectivement aux éclairements $E=1000 \text{ W/m}^2$ et 100 W/m^2 , cela est dû à l'effet de l'ombrage.

Les mêmes remarques sont valables pour la caractéristique ci-dessous

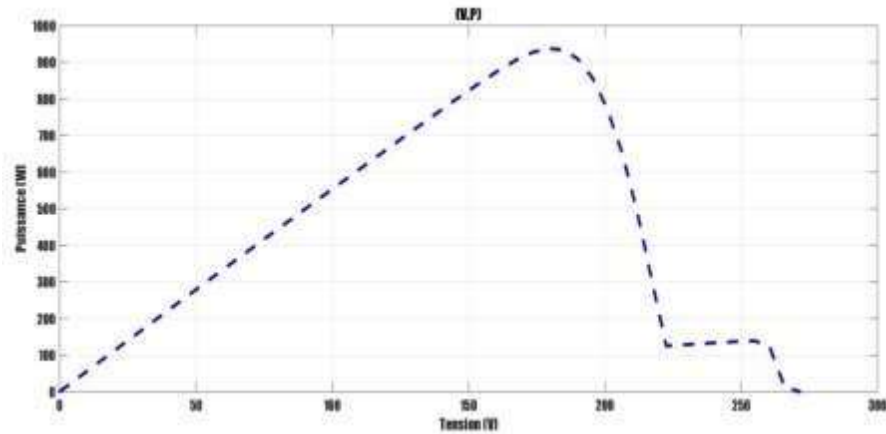


Figure VI.7 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

B. Deuxième cas (S2)

Le deuxième cas (S2), deux modules étaient ombrés de même pourcentage me valeur 100 W/m^2 . Figure (VI.8).

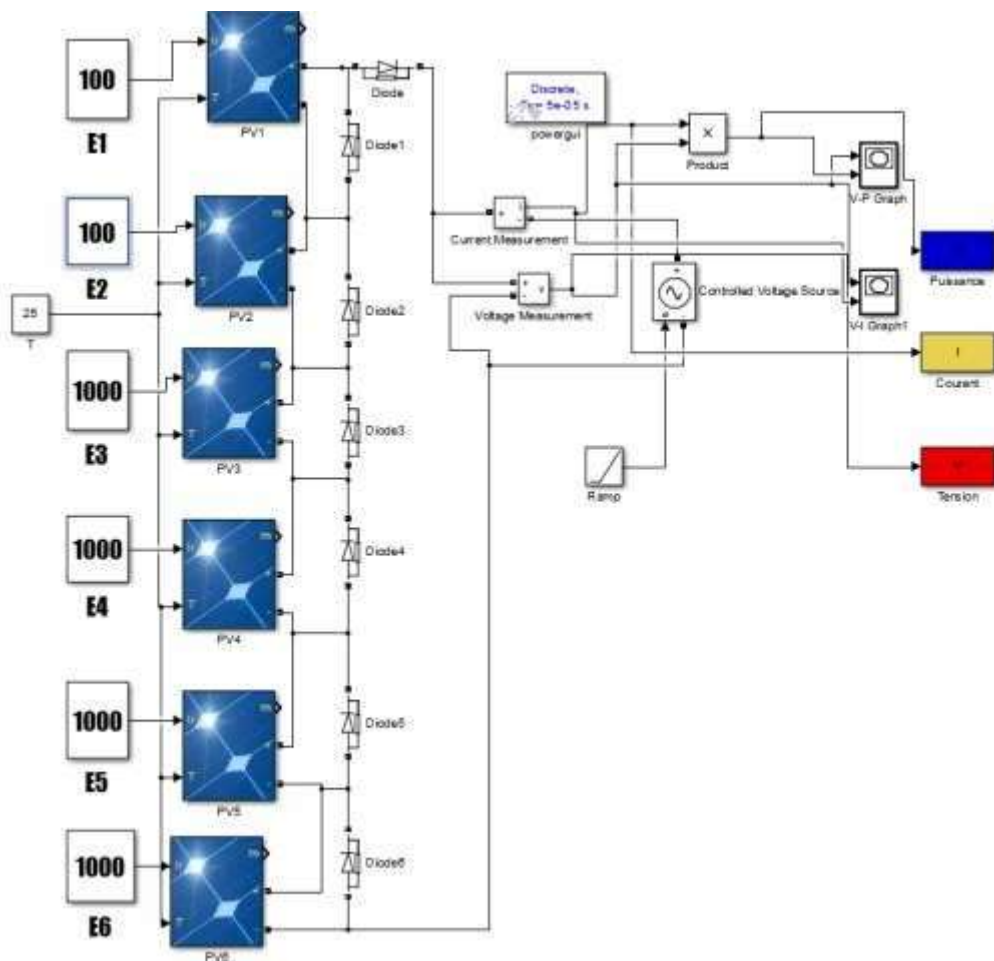


Figure VI.8 : Schéma bloc de six modules en série (deux ombrés)

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure (VI.9) et (VI.10).

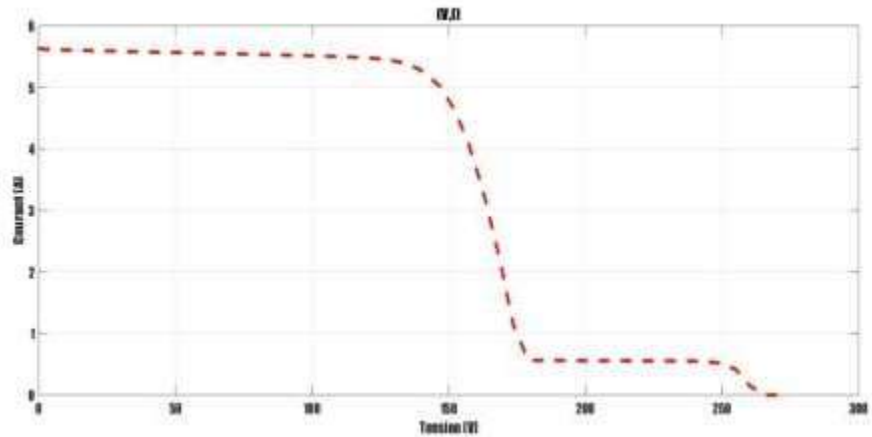


Figure VI.9 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (deux module ombrées)

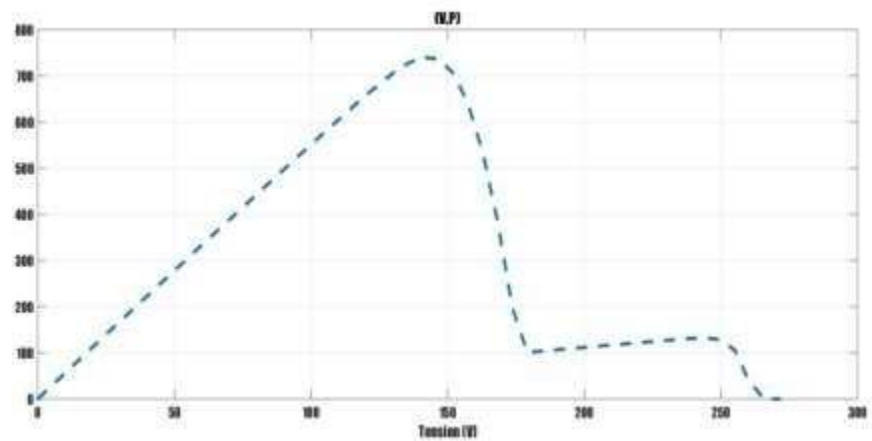


Figure VI.10 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (deux module ombrées)

On remarque diminution de puissance dans le deuxième cas.

C. Troisième cas (S3)

Dans le troisième cas on a trois module photovoltaïque sont soumis à des conditions météorologiques différents (100, 200, et 500) W/m^2 , les restes en 1000 W/m^2 et à une température constante $T=25^\circ$. Les résultats obtenus de simulation sont représentés par les figures suivantes :

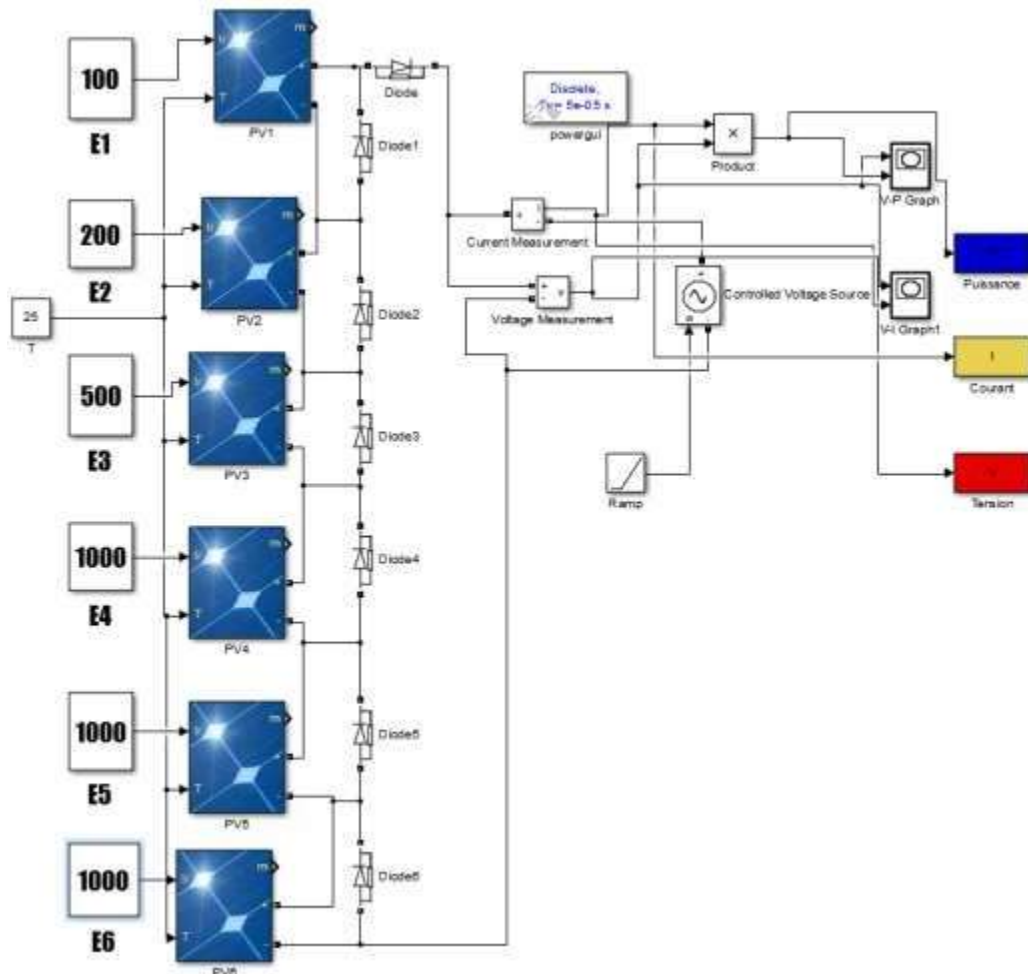


Figure VI.11 : Schéma bloc de six modules en série (Trois ombrés)

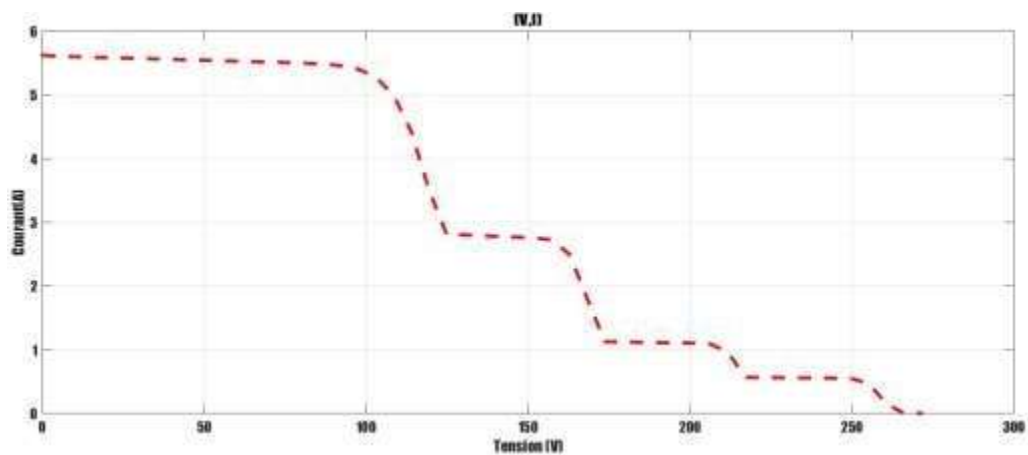


Figure VI.12 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois module ombrés)

Dans cette figure on remarque l'apparence de trois points maximum de puissance aux éclairements $E=100\text{w/m}^2$, $E=200\text{w/m}^2$ et $E=500\text{w/m}^2$, les restes modules sont fixés en 1000w/m^2

exactement comme les figures précédentes sauf que l'ombrage affecte deux GPV en même temps avec différentes éclaircissement.

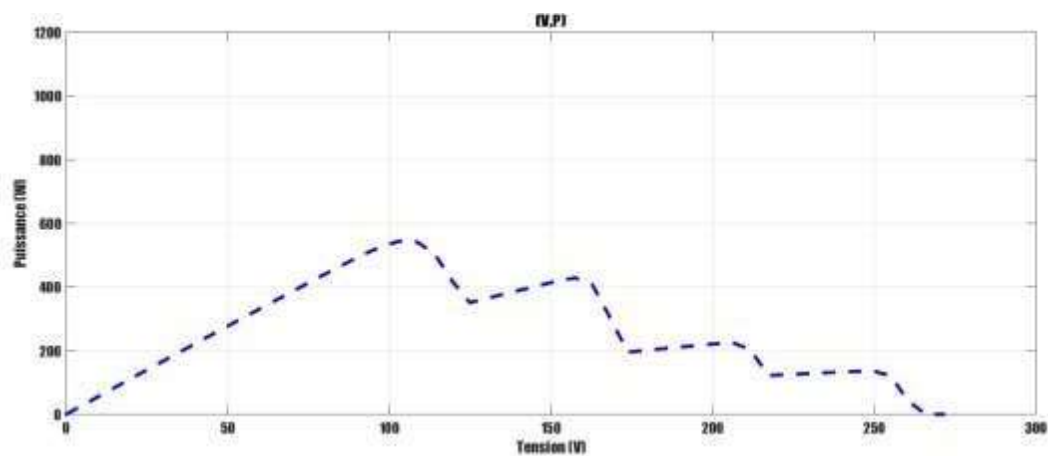


Figure VI.13 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois module ombrés)

VI.5.1.2. Simulation en parallèle (P)

On représente l'assemblage de six générateurs PV en parallèle

A. Premier cas

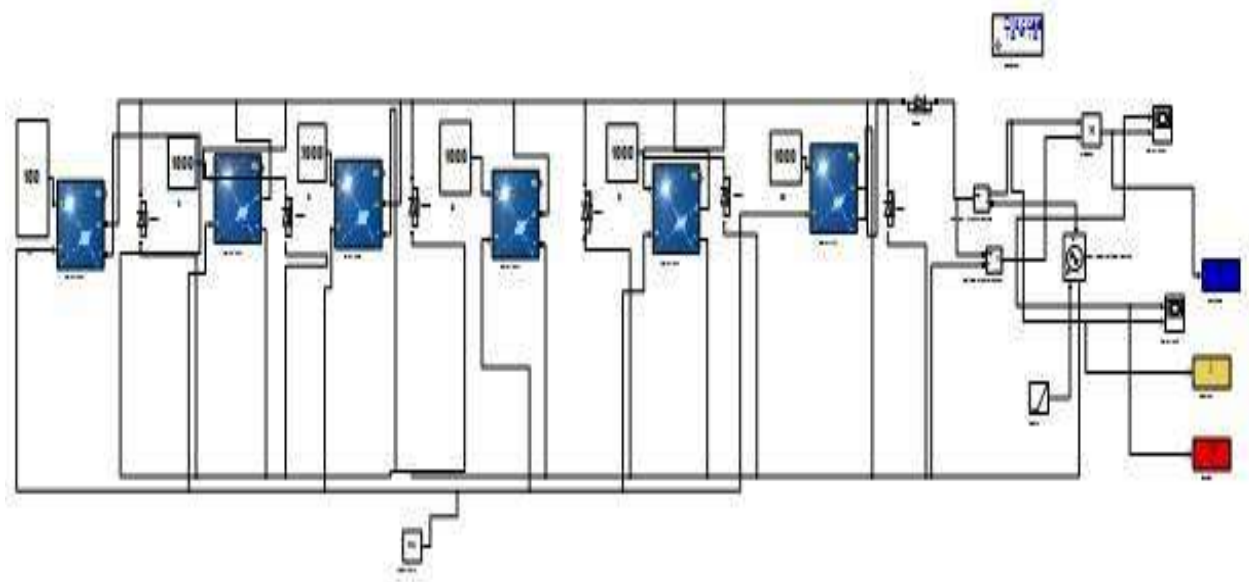


Figure VI.14 : Schéma bloc de six modules en parallèle

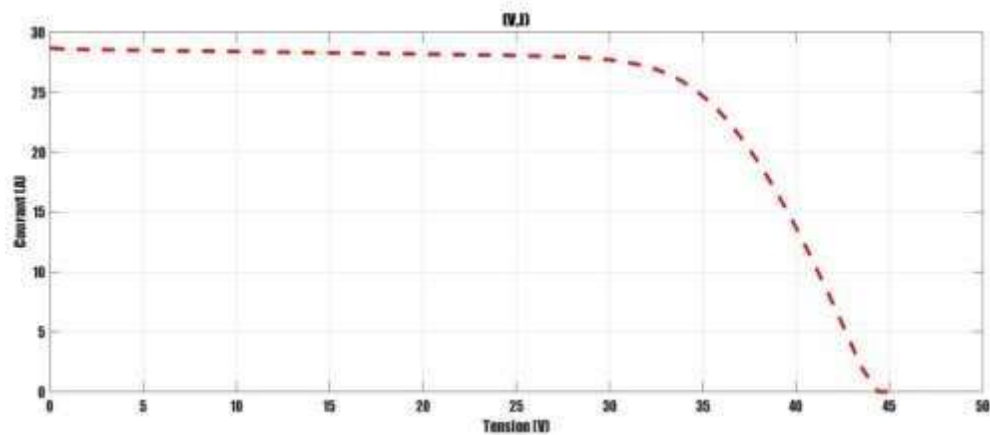


Figure VI.15 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

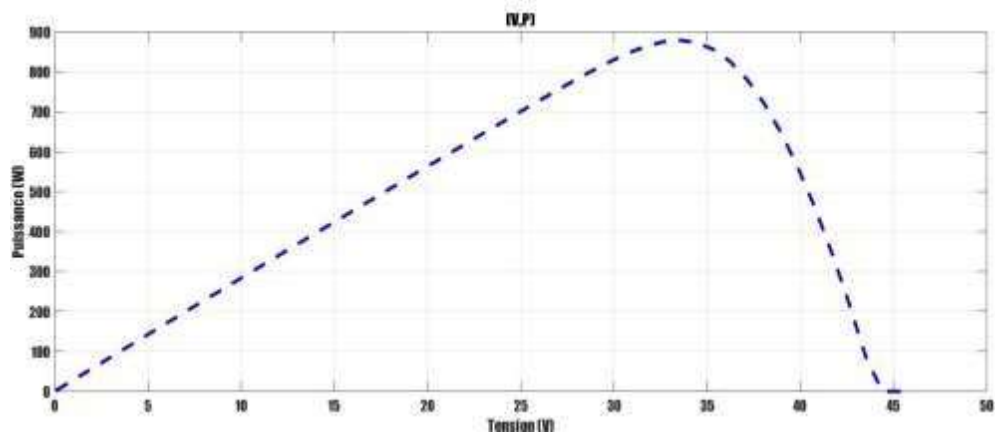


Figure VI.16 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

Le modèle MATLAB/Simulink de topologie de générateur photovoltaïque parallèle est illustré sur Figure (VI.14). Dans cette topologie, tous les modules PV sont connectés en parallèle. Dans ce cas, la tension du générateur est identique à la tension du module et le courant est équivalent à la somme des courants des modules Figure (VI.15).

La sortie simulée caractéristiques de la topologie de panneaux photovoltaïques parallèles pour Puissance-Tension Figure (VI.16) nous avons examiné qu'il y'a une augmentation de puissance.

A. Deuxième cas

Dans le deuxième cas on a trois module photovoltaïque sont soumis à des conditions météorologiques différents (100, 200, et 500) W/m^2 , les restes en 1000 W/m^2 et à une température constante $T=25^\circ$. Les résultats obtenus de simulation sont représentés par les figures suivantes :

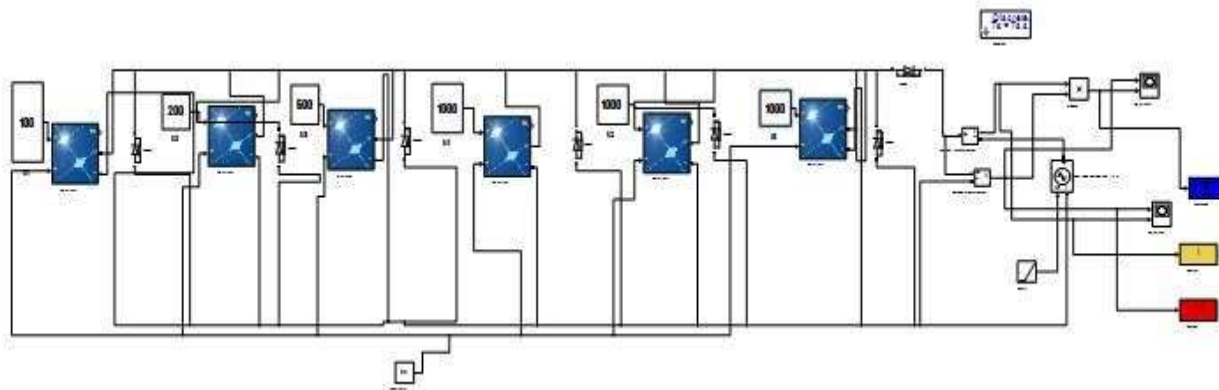


Figure VI.17 : Schéma bloc de six modules en parallèle (Trois ombrés)

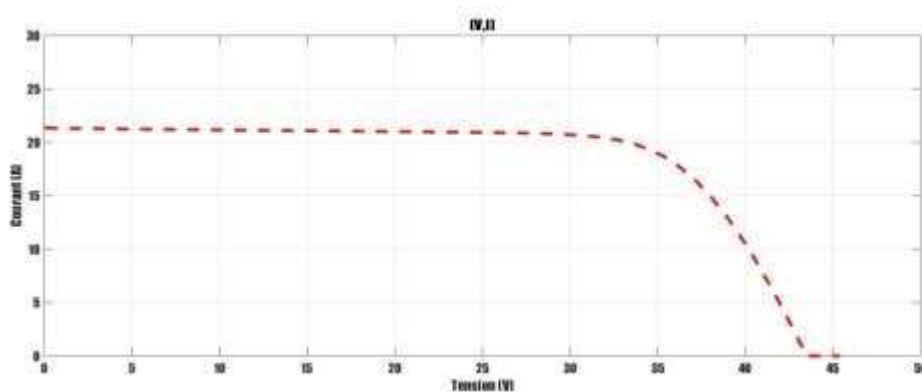


Figure VI.18 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois ombrés)

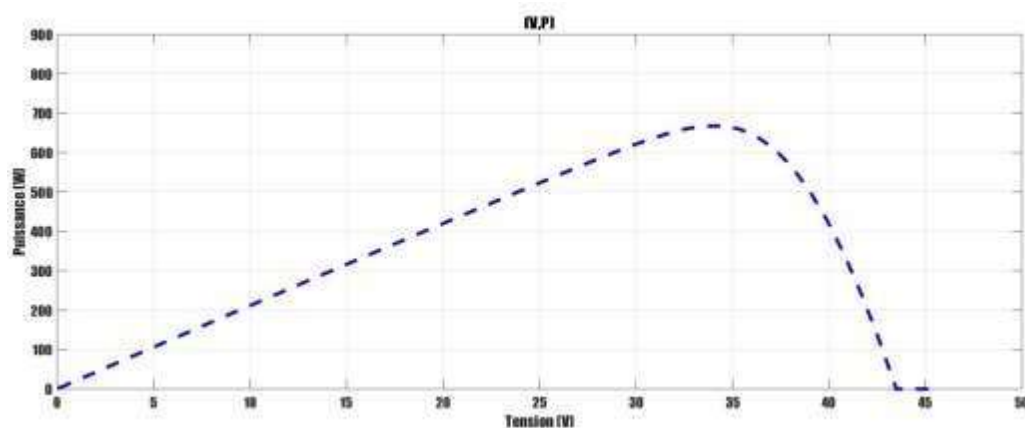


Figure VI.19 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage (Trois ombrés)

Les résultats de simulation présentés dans la figure (VI.19) montrent qu'il y a une faible puissance par rapport aux autres configurations des cas (S1 et S2), cela est dû principalement au nombre important des modules ombragés.

VI.5.1.3. Simulation en mixte (S-P)

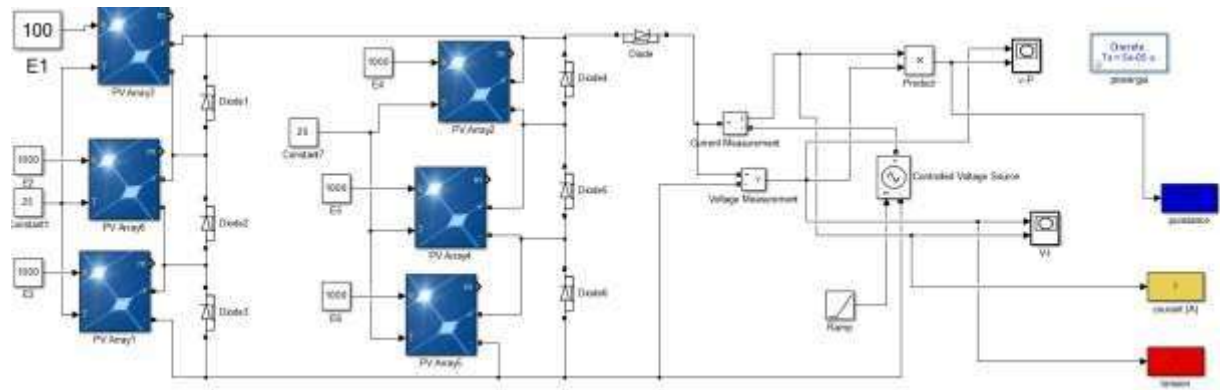


Figure VI.20 : Schéma bloc de six modules en série- parallèle (Mixte)

Dans la topologie série-parallèle, tous les modules sont connectés en série pour former des chaînes afin de générer une tension de sortie souhaitée puis ces chaînes sont connectées en parallèle pour générer le courant de sortie désiré.

Cette topologie est généralement la plus couramment utilisée parce qu'elle est facile à concevoir, économique et qu'il n'y a pas de connexions redondantes. Le modèle construit sous MATLAB/Simulink est illustré sur la Figure (VI.20)

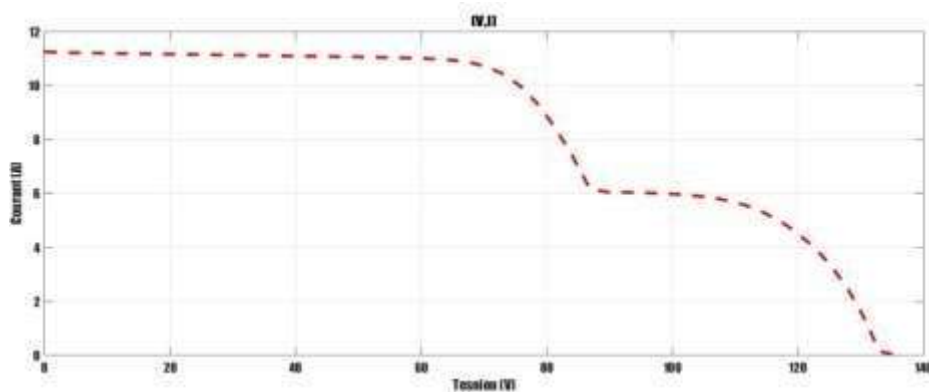


Figure VI.21 : Caractéristiques I-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

Dans cette figure on remarque l'apparence de deux point de maximum de puissance respectivement aux éclaircements $E=1000\text{w/m}^2$ et 100w/m^2 , c'est du à l'ombrage de la branches de GPV en série. Les mêmes remarques sont valables pour la caractéristique ci-dessous.

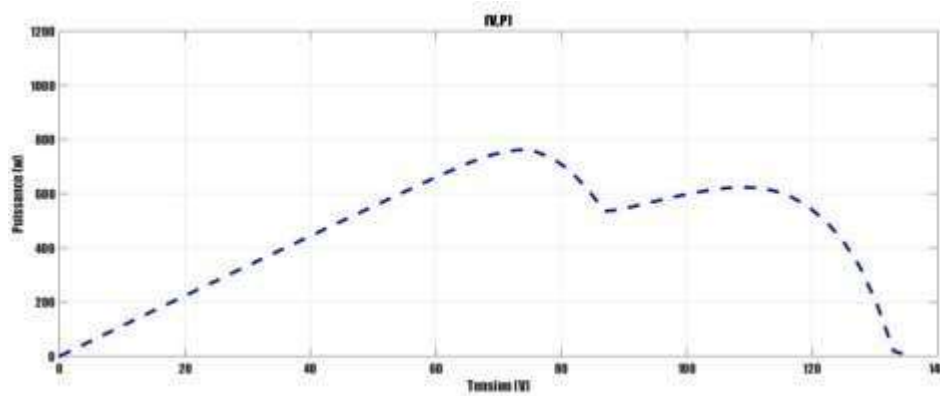


Figure VI.22 : Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

VI.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié et modélisé l'effet de l'ombrage partiel sur les configurations des champs photovoltaïques, il s'agit de la configuration série (S), parallèle (P), série-parallèle (SP). La simulation des caractéristiques (I-V) et (P-V) pour la mise en série de six GPV en série, de deux branche de trois GPV en série/parallèle sous les conditions d'ombrage a été effectuée sous l'environnement Matlab//Simulink. Il est à noter que l'effet de l'ombrage sur les panneaux reliés en parallèle. Cette remarque est bien claire en exploitant les figures (VI.12) et la figure (VI.13).

Il est à noter que le taux d'augmentation d'ombrage déplacée le point de puissance maximum à des tensions correspondantes plus faibles. Nous déduisons de cette étude que l'ombrage affecte directement le rendement d'un système PV. Le taux de perte de puissance. Il a été démontré aussi que l'arrangement des modules dans le cas d'ombrage joue un rôle très important dans l'amélioration des rendements des installations PV.

Ce travail représente une initiation à une recherche sur les panneaux photovoltaïques et en particulier sur les différents défauts dans ce système.

Dans notre mémoire, nous nous sommes principalement concentrés à comprendre, de gérer les effets de l'ombrage sur les performances des systèmes photovoltaïques (PV) et la simulation des panneaux photovoltaïques en présence d'ombrage. L'ombrage, qu'il soit dû à des obstacles naturels tels que les arbres ou les bâtiments environnants, ou à des conditions météorologiques changeantes comme les nuages, peut avoir un impact significatif sur la production d'énergie solaire.

En conclusion et en comparant la caractéristique I-V et P-V d'un champ PV en fonctionnement sain et celle en fonctionnement défaillant pour les différents défauts considérés dans la base de connaissance, Nos résultats ont démontré que même une petite quantité d'ombrage peut entraîner une diminution notable de l'efficacité du système PV et l'emplacement approprié des modules ombragés dans le champ joue un rôle très important pour l'amélioration du rendement des installations PV.

Mes futurs travaux de recherche seront une continuité du présent sujet sur :

- Simulation d'autre configuration de l'ombrage partiel.
- Intégré MPPT dans le cas d'ombrage partiel.
- Déterminer les méthodes de diagnostic des défauts
- Construire un banc d'essai au niveau de notre laboratoire. Ce banc d'essai sera constitué de plusieurs capteurs afin d'effectuer les acquisitions des paramètres nécessaires au diagnostic tel que : irradiation, température, courant, tension et puissance. Une validation expérimentale des résultats de simulation sera effectuée une fois le banc d'essai est construit.

- [1]. SINGO, Akassewa Tchapo. Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride. Nancy-I, s.n., 2010. Thèse doctorat.
- [2]. Belakehal, Soltane. Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents. 2010. thèse doctorat, université de Constantine.
- [3]. Madani Samiha et Habib Zohra, Diagnostic des défauts d'un panneau solaire, Université Ibn Khaldoun de Tiaret 2022, projet de fin de cycle master
- [4] Belhait Zineddine et kenouni Aymen, L'énergie photovoltaïque, Université Badji Mokhtar - Annaba- mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de: Licence 2021.
- [5] <https://www.alphare-fasis.fr/actualites/les-types-denergies-renouvelables-a-connaître.html>
- [6] K. Mertens, Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice. 2018: John Wiley & Sons.
- [7] S. El-Hefnawi. Photovoltaics applications and research in Egypt and marketability of PV in developing countries. ISESCO Science and Technology Vision. Vol 1, pp. 23-29, 2005;
- [9] W. Omran. Performance analysis of grid-connected photovoltaic systems. Doctoral Thesis, University of Waterloo -Canada-, 2010.
- [10] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, S. Mekhilef. An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation. IEEE transactions on Power Electronics. Vol 27, pp. 3627-3638, 2012;
- [11] Enerray S.p.A. L'Algérie commence son avenir dans les énergies renouvelables avec un appel d'offres pour l'énergie solaire photovoltaïque de 150 MW. 18 Décembre 2018; Available from: <https://www.enerray.com/fr/blog/algerie-energies-renouvelables-projet-solaire-150-mw/>.
- [12] Renewables 2025 Global Status Report Renewables Global Status Report. 2025 Juin 25, Available from: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.
- [13] S. Rustemli, F. J. Dincer. Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in Matlab/Simulink. Elektronika ir Elektrotechnika. Vol 109, pp. 35-40, 2011; [12] C. J. Chen, Physics of solar energy. 1 ed. 2011: John Wiley & Sons.
- [14] D. D. Smith et al, "Generation III high efficiency lower cost technology: Transition to full scale manufacturing", Proc. 38th IEEE PVSC, Austin, TX, June 2012. pp.3-8.
- [15] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables", version 45, Prog Photovoltaic. 23, 2015, pp.1-9.
- [16] P. Verlinden et al, "Strategy, development, and mass production of high-efficiency crystalline Si PV modules", Conf. on PV Energy Conversion, Kyoto, Japan, 2014.
- [17] A. Meflah, "Etude des performances de modules photovoltaïques au Silicium (monocristallin, à couches minces et à hétérojonction) et caractérisation du carbure de silicium microcristallin hydrogéné", thèse de doctorat, université abou-bekr belkaid - tlemcen. 2017.

- [18] T. Boutaba. Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien. Thèse de Doctorat, Université abbès laghrour -khenchela-, 2018.
- [19] K. Mertens, Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice. 2018: John Wiley & Sons.
- [20] K. Kato,H. Koizumi, A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer. in 2015 IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS). 2015. IEEE.
- [21] S. Saravanan, R. S. Kumar, A. Prakash, T. Chinnadurai, R. Tiwari, N. Prabakaran, et al., "Photovoltaic array reconfiguration to extract maximum power under partially shaded conditions", in Distributed Energy Resources in Microgrids. 2019, Elsevier. p. 215-241.
- [22] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe à un accumulateur, PhD Thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [23] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/ombrage.html>
- [24] D. Sera. Real-time modelling, diagnostics and optimised MPPT for residential PV systems. Doctoral Thesis, Institute of energy technology-Alborg university, Denmark, 2009.
- [25] www.accu-plus-noord.nl/pdf/KC130GHT-2.pdf.
- [26] R. Khenfer. Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas -Setif-, 2018.
- [27] M. Belhadj. Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister, Université Tahri Mohamed -Béchar-, 2008.
- [28] Madani Samiha et Habib Zohra, « Diagnostic des défauts d'un panneau solaire » projet de fin de cycle master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret 2022.
- [29] XP Yokwana, Thapelo Mosetlhe, and Adedayo Ademola Yusuff. A novel scheme for fault detection in pvmodules based on frequency response analysis. In 2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica, pages 1–5. IEEE, 2021.
- [30] Barun Basnet, Hyunjun Chun, and Junho Bang. An intelligent fault detection model for fault detection in photovoltaic systems. Journal of Sensors, 2020 :1–11, 2020.
- [31] M. A. Munoz, M. C. Alonso-García, N. Vela, and F. Chenlo, "Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions," Sol. Energy, vol. 85, no. 9, pp. 2264– 2274, 2011.
- [32] N. C. Park, J. S. Jeong, B. J. Kang, and D. H. Kim, "The effect of encapsulant discoloration and delamination on the electrical characteristics of photovoltaic module," in Microelectronics Reliability, 2013, vol. 53, no. 9–11, pp. 1818–1822.

- [33] S. Djordjevic, D. Parlevliet, and P. Jennings, “Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia,” *Renew. Energy*, vol. 67, pp. 215–221, 2014.
- [34] V. Sharma and S. S. Chandel, “A novel study for determining early life degradation of multi-crystalline-silicon photovoltaic modules observed in western Himalayan Indian climatic conditions,” *Sol. Energy*, vol. 134, pp. 32–44, 2016.
- [35] A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, C. M. F. Kébé, P. A. Ndiaye, and V. Sambou, “Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review,” *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 140–151, 2013.
- [36] D.E. Carlson et al., “Corrosion effects in thin-film photovoltaic modules,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 11, no. 6, pp. 377–386, 2003.
- [37] J. Fan et al., “Study on snail trail formation in PV module through modeling and accelerated aging tests,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 164, pp. 80–86, 2017.
- [38] J.A. Tsanakas, L. Ha, and C. Buerhop, “Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 695–709, 2016.
- [40] M Sabbagh pur Arani, Maryam A Hejazi, et al. The comprehensive study of electrical faults in pv arrays. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016, 2016.
- [39] Nuri Gokmen, Engin Karatepe, Berk Celik, and Santiago Silvestre. Simple diagnostic approach for determining of faulted pv modules in string based pv arrays. *Solar Energy*, 86(11):3364–3377, 2012.
- [41] Siwar Fadhel, Mohamed Trabelsi, Imen Bahri, Demba Diallo, and Mohamed Faouzi Mimouni. Faults effects analysis in a photovoltaic array based on current-voltage and power-voltage characteristics. In 2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pages 223–228. IEEE, 2016.
- [42] D. W. Peter. Fault Detection and Performance Visualisation for a Grid-Connected Photovoltaic Power Plant Using Sensor Data. Master of Engineering Thesis, Stellenbosch University, 2019.
- [43] <http://fr.zjbeny-south-america.com/news/solar-fires-dc-arc-faults-39988190.html>
- [45] N. Aouchiche, M.S. Cheikh, A. Aït Malek, Poursuite du point de puissance maximale d’un système photovoltaïque par les méthodes de l’incrémentation de conductance et la perturbation & observation, *Journal of Renewable Energies*, 2013, 16.3: 485–498.
- [46] https://www.victronenergy.com/media/pg/Manual_BlueSolar_100-30_100-50_/fr/trouble_shooting.html

- [44] PHAM, Cong Duc. , Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, France, 2005.
- [47] <https://action-france-energie.fr/panneaux-solaires/poussiere-pollution-panneaux-solaires/>
- [48] <https://zmscable.es/fr/produccion-energia-fotovoltaica-invierno/>
- [49] Adel Mellit, Giuseppe Marco Tina, and Soteris A Kalogirou. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems : A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91 :1–17, 2018.