الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Farés de Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Projet de Fin D'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Energie Renouvelable

Spécialité : Energie renouvelable

Thème

Analyse des défauts d'une installation photovoltaïque

Dirigé par,

Dr : HENINI Noureddine

Préparé et présenté par,

Mr : BOUDERBALA Abdellah

Mr : BENEDDINE Aboubaker

Année Universitaire 2017-2018

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بتحليل بعض العيوب الممكنة في مكونات حقول الطاقة الشمسية باستخدام المحاكاة (مطلب سيملينك). بحيث نقوم في هذه المحاكات باقتراح مجموعة من العيوب على حقل للطاقة الشمسية لمعرفة سلوك مكوناته في الحالة العادية وخلال حدوث العيوب. بهدف قياس مدى تأثيرها على الحقل بأكمله. وأخيرا نقوم بالتحاليل حول تلك العيوب لنلاحظ كيف تحدث انخفاضا ملحوظا في إنتاجية حقول الطاقة الشمسية

Résume

Dans ce mémoire, nous avons analysé quelques défauts possibles dans les composants d'n champ photovoltaïque à l'aide de logiciel MATLAB bloque Simulink. Dans cette simulation on a provoqué un ensemble des défauts sur ce champ énergétiques pour visualiser le dans une situation normal et en défaut, afin de mesurer le degré d'influence de ces défauts sur le champ. Enfin, avec tous les tests réalisés, on arrive à voir comment ces défaut marqué détérioration dans la productivité de champ photovoltaïque.

Abstract

On this aide memoir we have analysed some of the potential disadvantages of solar fields components using MATLAB (SIMULINK). In this simulation, we proposed a set of defects on the energy field components in the normal state and during the defect state. The effect of various defects on running the entire field. Finally, with all the analysis carried out on the solar fields, we get to know how the latter is making a remarkable retro gradation in the productivity of solar fields.

Table des matières

LISTE DES FIGURES……...I

LISTE DES TABLEAUX..……..……..……III

LISTE DES SYMBOLES…….IV

INTRODUCTION GENERALE……...…….1

Chapitre I. Le système photovoltaïque et ces défauts

I.1. Introduction……...4

I.2. L'effet photovoltaïque……...4

I.2.1. Principe général……..5

I.2.1.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque…….5

I.3. Contexte du Projet……6

I.3.1. Unités élémentaires du champ PV……..6

I.4. Problématique du projet……..10

I.4.1. Productivité d'un champ PV……10

I.4.2. Défauts d'un champ PV……...11

I.4.3. Défauts des cellules PV……11

I.4.4. Défauts des diodes PV……..12

I.4.5. Défauts des câbles PV……..12

I.5 l'influence des défauts électrique sur la production du champ PV…….12

I.5.2. Synthèse……16

I.6. Protection d'un générateur photovoltaïque…….16

I.6.1. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques……..16

I.6.2. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions ……..16

I.6.3. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions……...18

I.7. Indice de performance (facteur de qualité pour l'installation PV)……..21

I.7.1. Facteurs environnementaux ……22

I.7.2. Autres facteurs ……22

I.8. Conclusion……..22

Chapitre II. Modélisation d'un champ photovoltaïque en fonctionnements normal et défaillants

II.1.Introduction……24

II .2. Les modèles de la cellule PV……...24

II.2.1. Modèle à une diode……24

II.2.2. Modèle à deux diodes……26

II.2.3. Modèle empirique ……..26

II.2.4. Modèle de Bishop……...27

II.3. Modélisation du générateur PV en fonctionnement sain……...28

II.3.1. Configuration retenue ……28

II.6. Modélisation du générateur PV en défaut……29

II.6.1. Classification des défauts pour la modélisation……29

II.6.2Modélisation des différents défauts ……33

II.7. Conclusion……48

Chapitre III. Résulta de simulation

III.1 Introduction……...51

III.2. simulation d'influence du type de connexion sur la caractéristique I-V……..51

III.3 les résultats de simulation des différents défauts……..52

III.3.1 défaut de mismatch et d'ombrage……...53

III.3.2 défaut de diode bypass……55

III.3.3 défaut de module……57

III.3.4 défaut connectique……...58
III.3.5 défaut de diode anti-retour …….58

III.4. Conclusion ……...60

CONCLUSION GENERALE……...61

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES……..62

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la, la volonté, le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

En second lieu, nous tenons à le grand remerciement notre encadreur ***Dr. HENINI Noureddine*** *qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicace

Je dédie se modeste travail à mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pourvoir le jour-là et pour ces précieux conseils ainsi pour ces recommandations.

A mes très chers frères, ma chère sœur et ma très chère femme.

A toute ma famille, grande et petite.

À tous mes collègues Master 2017/2018, à mon collègue

A tous mes amis sans exception.

Que se mémoire soit l'expression de mon profond respect et mon grand amour.

Abdellah

Dédicace

Je dédie se modeste travail à mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pourvoir le jour-là et pour ces précieux conseils ainsi pour ces recommandations.

A mes très chers frères, mes chères sœurs.

A toute ma famille, grande et petite.

À tous mes collègues Master 2017/2018, à mon collègue

A tous mes amis sans exception.

Que se mémoire soit l'expression de mon profond respect et mon grand amour.

Aboubaker

Dédicace

Je dédie se modeste travail a mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pouvoir le jour-là et pour ces Précieux conseil ainsi pour ces recommandations.

A mes très chers frères, ma chère sœur et ma très chère femme.

A toute ma famille, grande et petite.

A tous mes collègues Master 2017/2018, à mon collègue

A tous mes amis sans exception.

Que se mémoire soit l'expression de mon profond respect et mon grand amour.

Abdellah

Dédicace

Je dédie se modeste travail a mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pouvoir le jour-là et pour ces Précieux conseil ainsi pour ces recommandations.

A mes très chers frères, ma chère sœur et ma très chère femme.

A toute ma famille, grande et petite.

A tous mes collègues Master 2017/2018, à mon collègue

A tous mes amis sans exception.

Que se mémoire soit l'expression de mon profond respect et mon grand amour.

Aboubaker

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 : Les trois mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une energie électrique…….5
Figure I.2: (a) interconnexion de la cellule avec la languette ; (b) deux cellules en série ; (c) matrice de 36 cellules connectées en série……...6
Figure I. 3: Cellule PV. ……...7
Figure I.4: Schéma électrique de la diode……7
Figure I. 5: Groupe PV…….8
Figure I. 7: String PV……..9
Figure I. 8: Champ PV……...10
Figure I. 9: Défauts d'un champ PV……..11
Figure I.10 : Caractéristique I-V d'un champ PV en mode générateur……...15
Figure I. 11: Caractéristique I-V d'un champ PV……..15
Figure I.12 : ombrage des panneaux par un cheminé de la maison ……..18
Figure I.13 : ombrage des panneaux par un cheminé de la maison……19
Figure I.14 : système photovoltaïque en (A) fonctionnement normal, (B) présence d'un ombre : échauffement de la cellule, (C) protection par la mise en place diode de by-pass……...20
Figure I.15 : Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass……..21

Chapitre II :

Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode…….24
Figure II.2 : schéma equivalent d'une cellule PV modéle a deux diodes……..26
Figure II.3 : Circuit équivalant simple de la cellule PV…….26
Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle de Bishop……...28
Figure II.5 : Configuration retenu pour la modélisation……29
Figure II.6 : Caractéristique I-V d'une cellule "bonne"(en noir) et d'un autre "ombré"(en rouge) ……...35
Figure II.7 : Caractéristique d'un groupe de cellules protégé par la diode de bypass……...36
Figure II.8 : Caractéristique I-V d'un groupe « mauvais » et « bon » ……..37
Figure II.9 : Caractéristiques I-V d'un module "bonne" et d'un autre "ombré" …….37
Figure II.10 : Caractéristique I-V d'un string « mauvais » et « bon » ……..38
Figure II.11 : Caractéristique d'un champ PV protégé par la diode anti-retour……39
Figure II.12 : formation de la caractéristique I-V du champ PV selon l'exemple considéré….40

Figure II.13 : Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de bypass défaillante…41
Figure II.14 : Schéma bloc d'un module PV défaillant…….43
Figure II.15 : Caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de diode de module……45
Figure II.16 : Schéma bloc d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle……..47
Figure II.17 : Caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de diode de connectique…47
Figure II.18 : Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défaillante…….47

Chapitre III :

Figure III.1 : Caractéristiques I-V d'un module PV lors de l'ombrage……...51
Figure III.2 : Variation de la caractéristique I-V par la connexion de cellule Série et en parallèle…….52
Figure III.3 : Schéma de connexion de champ PV sur bloc Simulink…….52
FigureIII.4 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de l'ombrage…….53
FigureIII.5 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de mismatch type « Rs» ……..53
FigureIII.6 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de mismatch type « Rp » ……54
FigureIII.7 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de mismatch type « T » ……...54
FigureIII.8 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (court-circuitée) ….55
FigureIII.9 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (claquée) ……56
FigureIII.10 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (déconnectée) ….56
FigureIII.11 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (inversée) …….56
Figure III.12 : caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de module…….57
Figure III.13 : caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de connectique……..58
Figure III.14 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (court-circuitée) ..……58
Figure III.15 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (déconnectée)……59
Figure III.16 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (claquée)……59
Figure III .17 : caractéristique I-Vdun champ PV lors de défauts de diode anti-retour (inversée)…….59

liste des tableaux

TableauI.1 : Présentation électrique des quatre défauts du champ PV…….....12
TableauI.2 : Influence des quatre défauts du champ PV sur les éléments défectueux…..**....**13
Tableau II.1 : défauts intrinsèques du générateur PV……...30
Tableau II.2 : Défauts extrinsèques du générateur PV……..32
Tableau II.3 : Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule……....34
Tableau II.4 : Paramètre utilisé dans la simulation en cas de mismatch……...**41**

Liste des symboles

V_{PV}	= La tension du champ PV.
IPV	= Le courant du champ PV.
V String	= La tension du string PV.
V_{PV}	= La tension du champ PV.
I_{PV}	= Le courant du champ PV.
V String	= La tension du string PV.
I_{String}	= Le courant du string PV.
$I_{String\ inverse}$	= Le courant inverse du string PV.
$I_{String\ cellules}$	= Le courant des cellules du string PV.
V String cellules	= La tension des cellules du string PV.
N Cellules	= Nombre des cellules dans chaque groupe.
$N_{Groupes}$	= Nombre des cellules dans chaque groupe.
$N_{Modules}$	= Nombre des modules dans chaque string.
N_{String}	= Nombre des strings dans chaque champ.
PG	= la puissance du champ PV.
V_{Groupe}	= La tension du groupe PV.
I_{Groupe}	= Le courant du groupe PV.
$V_{Cellule\ sain}$	= La tension d'une cellule PV saine.
$I_{Cellule\ sain}$	= Le courant d'une cellule PV saine.
$I_{Bypass\ Diode}$	= Le courant d'une cellule PV saine.
$N_{Cellules}$	= Nombre des cellules dans chaque groupe.
$I_{Groupe\ court\text{-}circuit}$	= Le courant de court-circuit du groupe PV.
$V_{Groupe\ court\text{-}circuit}$	= La tension de circuit-ouvert du groupe PV.
$I_{String\ cellules}$	= Le courant des cellules du string PV.
V / I	= Tension /Courant.
A	= Facteur de qualité de la diode.
Φ et Φ_{ref}	= Irradiance effective et de référence
T et T_{ref}	= Température effective et température de référence.
Eg	= Energie de Gap de la cellule.
V_t	=Tension thermique de la diode.
I_C	= courant fourni par la cellule PV.
I_M	= courant du module PV.

I_{St} = courant du string.

I_G = courant du générateur PV.

V_C = tension aux bornes de la cellule PV.

V_M = tension aux bornes du module PV.

V_{St} = tension aux bornes du string.

V_G = tension aux bornes du générateur PV.

N_{CS} = nombre de cellule en série dans un module.

N_{MS} = nombre de module en série dans un string.

N_{Stp} = nombre de string en parallèle dans un générateur PV.

C = Conception.

I = Installation.

E = Exploitation.

Introduction générale

L'augmentation du coût des énergies fossiles d'un côté et la limitation de ses ressources de l'autre côté a conduit à l'apparition d'autres formes d'énergie telle que l'énergie photovoltaïque comme une solution prometteuse parmi les autres. L'absence de la pollution et plus au moins la disponibilité de l'irradiation solaire au cours de l'année dans les quatre coins du globe terrestre encourage son développement [1].

Durant les dernières années, le photovoltaïque est devenu rapidement l'une des Technologies d'énergie les plus importantes, comme l'énergie éolienne, hydraulique et autres. La production photovoltaïque est devenue une technologie mature de l'énergie [2] et la demande sur cette forme énergétique ne cesse de croitre qui à titre d'exemple en l'an 2011 la capacité des installations de production PV est de 27.7 GW dans le monde alors que la capacité totale en perspective était de 67GW à la fin de la même année.

Cependant les installations photovoltaïques (comme le cas de tous les systèmes électriques et électroniques), tombent en panne et se dégradent pendant la durée de fonctionnement. Ce qui nécessite un diagnostic dont l'objectif principal est de fournir un outil qui permet de détecter les pannes et de maximiser ainsi la production énergétique du system photovoltaïque. Et pour ce faire on a élaboré à travers ce manuscrit un document pouvant couvrir l'essentiel pour une initiation au monde du diagnostic des systèmes photovoltaïques.

Ce mémoire est organisé autour trois chapitres qu'on décrit comme suit:

Dans le premier chapitre on a fait une description détaillée des systèmes photovoltaïques. Il s'agit d'abord de relater l'effet photovoltaïque et plus précisément le phénomène physique exploité pour générer une énergie électrique tout en passant par la fabrication des cellules et module photovoltaïques, et les composants principaux qui le constituent. Toute fois les défauts d'une installation photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, on a abordé la modélisation du système photovoltaïque coté DC, et pour ce faire ont exposé les différentes types de modèles utilisées dans la littérature. Le choix du modèle de la cellule PV, du module PV, et la modélisation du générateur PV sain et en défaut est abordé.

Dans le troisième chapitre, on a simulé les défauts par logiciel matlab et comparé les caractéristiques I-V dans le cas de module, string et champ PV.

Chapitre I

Le Système Photovoltaïque et ces Défauts

I.1. Introduction

Le soleil est une source d'énergie renouvelable, inépuisable et gratuite. Pour cela, chaque personne peut produire son énergie électrique et la consommée en toute confiance. Cette énergie photovoltaïque signifie l'énergie solaire capturée par des panneaux solaires. Elle est convertie en électricité par l'effet photovoltaïque découverte par Becquerel en 1839. L'énergie PV est produite par des cellules PV installées sur des panneaux solaires. Ces cellules produisent un courant continu à partir de photons de la lumière du soleil. Les panneaux sont raccordés à des onduleurs convertissent le courant continu en courant alternatif. L'électricité produite est consommée directement par le propriétaire de l'installation PV, et la production excédentaire est injectée directement dans le réseau de distribution.

Cependant, un champ PV peut être soumis durant leur fonctionnement à différents défauts conduisant à une diminution de leurs performances, et voire même à l'indisponibilité totale de leur service.

Pour atteindre cet objectif, nous présentons dans ce chapitre une description détaillée du champ PV à étudier, avec ses défauts pouvant provoquer une dégradation remarquable dans sa productivité. Une recherche bibliographique est faite afin de sélectionner le meilleur outil utilisé pour la modélisation des champs PV, et aussi la meilleure méthode appliquée pour la surveillance des défauts des champs PV.

I.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque dont le terme souvent abrégé par les lettres P et V est un phénomène physique propres à certains matériaux communément appelés les semi-conducteurs (souvent le silicium). Il est composé à partir de 3 étapes qui se résument en l'absorption de lumière par le matériau de la cellule P.V. Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques et finalement la collecte de charge.

La puissance du champ photovoltaïque est directement proportionnelle aux nombres de cellules employées dans une installation. Seulement, une exposition au rayonnement homogène de l'ensemble de la surface est exigée pour une meilleure rentabilité. Pailleurs, l'obtention de puissance maximale peut être assurée par observation des 3 critères : l'orientation, l'inclinaison et la température.

I.2.1. Principe général

La formation d'une jonction réalisée par le dopage du silicium représente le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau.

Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone p et les trous vers la zone n (alignement du niveau de Fermi), afin de tendre vers un équilibre thermodynamique. Le dipôle, créé aux bords de la jonction, entraine la formation d'un champ électrique qui s'oppose à l'équilibre à tout déplacement de charges. La polarisation de la jonction en direct permet alors de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et donc l'intensité de champ électrique permettant le passage de porteurs de charges. A l'opposé, une polarisation inverse augmentera la hauteur de la barrière.

La relation courant-tension pour une diode idéale à l'obscurité est donnée par :

$$I = I_0[\exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1] \qquad \text{(I-1)}$$

Avec :

I_0 : courant de saturation de la diode

n : facteur d'idéalité de la diode

k : constante de Boltzmann

q : charge électrique (en coulomb)

I.2.1.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation basée sur les trois mécanismes suivants (figure I-1)



Figure I.1:lestrois mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une énergie électrique [6].

I.2.1.2. La matrice de cellule

Dans un module, les cellules sont arrangées en série. Après que les cellules oient finies, des ribbons de cuivre avec de l'étain sont soudés à un barre bus sur la face avant (figure I-2).

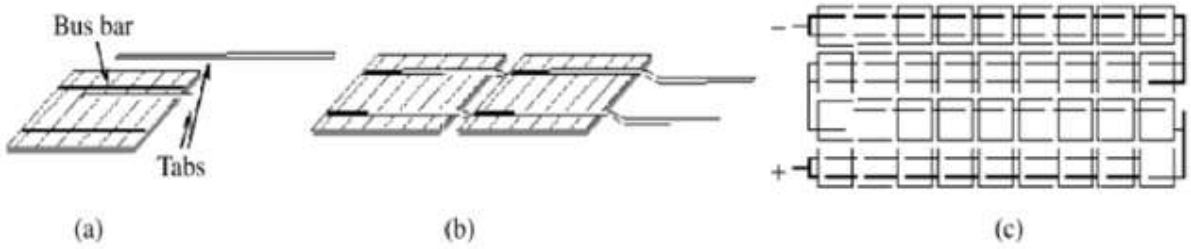


Figure I.2:(a) interconnexion de la cellule avec la languette ; (b) deux cellules en série ; (c) matrice de 36 cellules connectées en série [40].

La configuration courante de module PV utilise 36 cellules connectées en série, qui produirais environ 15 V à la puissance maximale, sous les conditions normales de fonctionnement, et qui charge une batterie de 12 V [40].

I.3. Contexte du prjet

I.3.1. Unités élémentaires du champ PV

1.1.1 I.3.1.1. Cellule PV

La figure suivante présente une cellule solaire, aussi appelée cellule PV. Il s'agit d'un semi-conducteur permettant de convertir la lumière du soleil directement en électricité, par le phénomène de l'effet photovoltaïque. Plusieurs types de cellules PV sont disponibles actuellement dans le marché [5] :

- Le silicium multi-cristallin offre un rendement variant entre 11 à 15%, avec un coût de fabrication moyenne.
- Le silicium monocristallin propose un rendement variant entre 13 à 19%, avec un coût de fabrication coûteux.
- Le silicium amorphe fournit un faible rendement 6%, et un coût de fabrication plus bas par rapport à celui des cristallines.

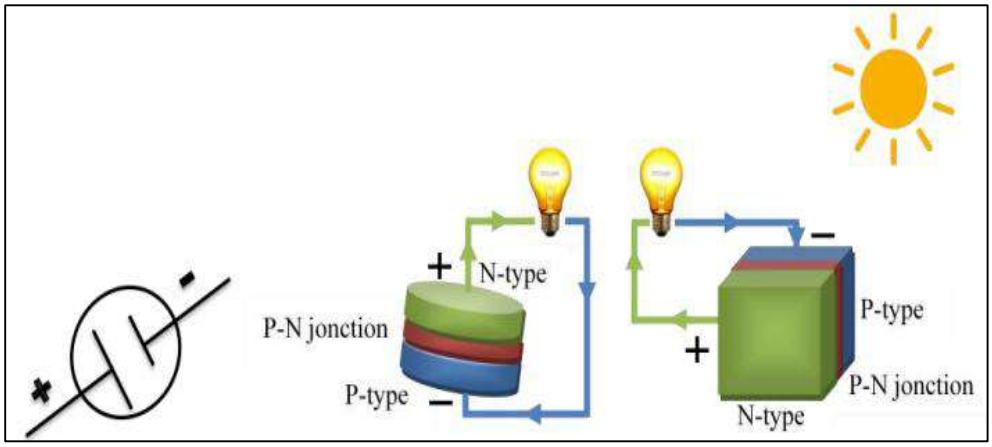


Figure I.3: Cellule PV [4].

I.3.1.2 Diodes By-pass et Anti-retour

Il existe deux types de diodes pouvant avoir un rôle très important dans le fonctionnement d'un champ PV, diodes by-pass et anti-retour. Les deux sont fabriquées à partir d'un matériau semi-conducteur généralement en silicium, avec deux terminaux connectés [6]. Leur fonction dans sa forme la plus simple est de permettre à l'électricité de passer dans un sens mais pas dans l'autre, comme présenté sur la figure I.4

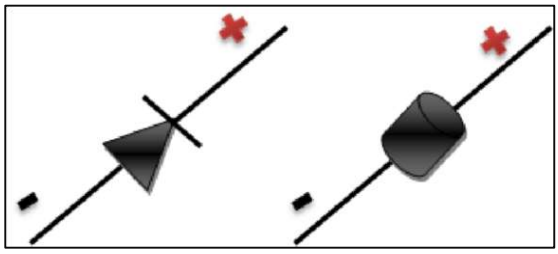


Figure I.4: Schéma électrique de la diode [6].

1) La diode by-pass est placée dans un champ PV en antiparallèle avec chaque groupe de cellules PV. Electriquement, cette diode est bloquée lorsque la tension de cellules PV qu'elle regroupe est positive. Par contre, elle est passante dans les autres situations. Pratiquement, cette diode est bloquée dans le fonctionnement normal de ses cellules, et elle est passante dans le cas contraire (fonctionnement anormal). Cette diode a pour deux objectifs, le premier est de protéger les cellules PV les plus faibles qu'elle regroupe contre la

polarisation inversée, le deuxième est d'éviter la forte résistance du passage du courant de groupes PV défectueux par les groupes PV non défectueux.

2) La diode anti-retour est placée dans un champ PV à la fin de chacun de leurs strings PV. Elle autorise le passage du courant sortant du string PV vers la sortie du champ PV. Aussi, elle bloque le passage du courant entrant de la sortie du champ PV (batteries) vers le string PV. En général, cette diode est installée dans deux situations :

- La première lorsque les strings du champ PV disposent de tensions différentes à cause de l'existence d'anomalies. Car, l'absence de cette diode permet aux strings de plus petites tensions de consommer les courants fournis par les strings de plus grandes tensions. Cette situation résulte de l'absence carrément de courants produits par les strings PV ayant les tensions les plus faibles, sinon ces derniers deviennent en circuit-ouvert.
- La deuxième situation réside dans l'absence de la puissance produite par le champ PV, à cause de l'absence par exemple d'ensoleillement comme pendant la nuit. L'existence de batteries peut provoquer un courant inversé pouvant les décharger, et le champ PV devient en mode récepteur

I.3.1.3. Groupe PV

La figure I-5 représente le groupe PV. Il est constitué d'un ensemble de cellules PV en série ayant pour objectif d'augmenter leur tension. Ces cellules PV sont rassemblées en antiparallèle avec une seule diode by-pass [7-8].

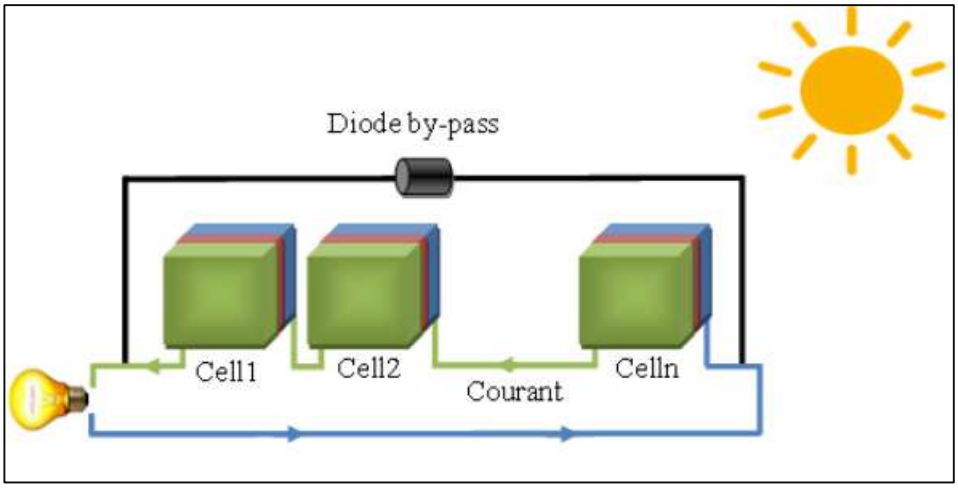


Figure I.5: Groupe PV [4].

I.3.1.4. Module PV

La figure I-6 montre la description d'un module PV. Il englobe un ensemble de groupes PV en série. En général, un module PV contient un nombre variant de 36, 40, 54, 60, 72 et même 92 cellules en série. Le nombre de cellules PV est en fonction de la puissance demandée [6].

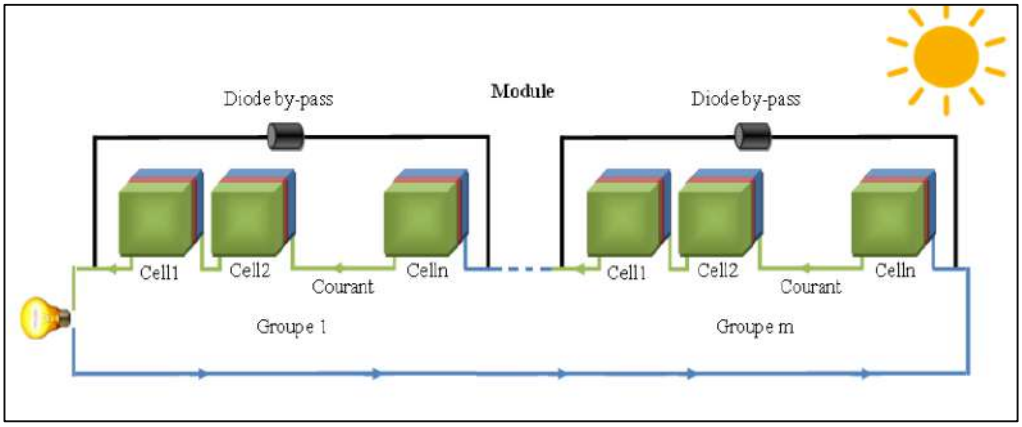


Figure I.6: Module PV [4].

I.3.1.5. String PV

La figure I-7 présente le string PV. Il regroupe un ensemble de modules PV en série. Il se termine par une diode dite anti-retour, qui a pour objectif de bloquer le courant inversé circulant dans tout le string PV, et pouvant changer leur fonctionnement.

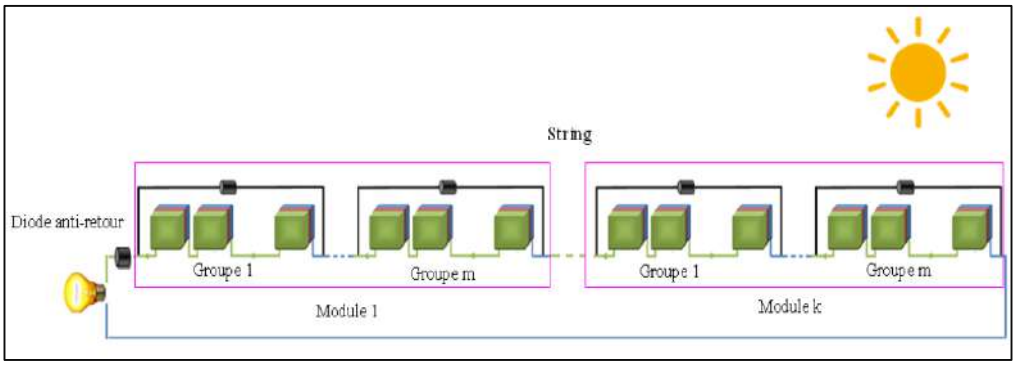


Figure I. 7: String PV [4].

I.3.1.6.Champ PV

La figure I-8 présente le champ PV. Il englobe tous les composants précédents. Ce champ PV est constitué de plusieurs strings PV en parallèle, ayant pour objectif d'augmenter le courant, et par conséquent d'augmenter la puissance du champ PV [7-8].

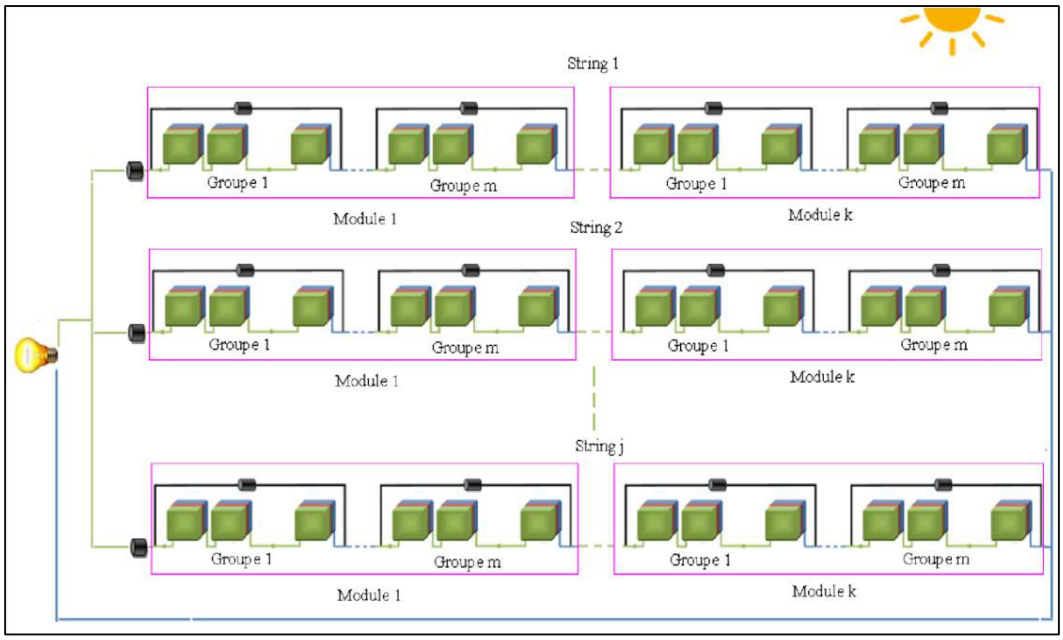


Figure I. 8: Champ PV [4].

I.4.Problématique du projet

I.4.1. Productivité d'un champ PV

La productivité d'un champ PV dépend en grande partie de deux facteurs, le rendement et la disponibilité [9-10].

- Le rendement d'un champ PV dépend généralement des conditions météorologiques, tels que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Ces facteurs peuvent varier l'intensité de la lumière frappant les panneaux solaires tout au long de la journée, ainsi que de jour en jour. Par conséquent, la production effective d'un champ PV est variable.
- La disponibilité d'un champ PV présente son aptitude à produire l'énergie électrique dans un intervalle de temps donné. Les systèmes de production en général et les champs PV particulièrement soumis au cours de leur fonctionnement à différents défauts pouvant rendre le système indisponible. Alors, l'existence de défauts présente l'un des facteurs pouvant affecter la disponibilité du champ PV. Ces défauts peuvent réduire sa productivité en augmentant les coûts de maintenance.

La problématique principale de ce projet de recherche est liée à la productivité du champ PV. Elle a pour objectif de l'améliorer par l'augmentation du taux de disponibilité, sachant que ce taux augmente par la limitation de l'influence des défauts affectant ce

champ PV. Pour répondre à cette interrogation, nous proposons de trouver une solution optimale à l'existence de ces défauts dans le fonctionnement du champ PV.

I.4.2. Défauts d'un champ PV

- Les principaux défauts connus dans le domaine diagnostic des champs PV sont présentés sur la figure :

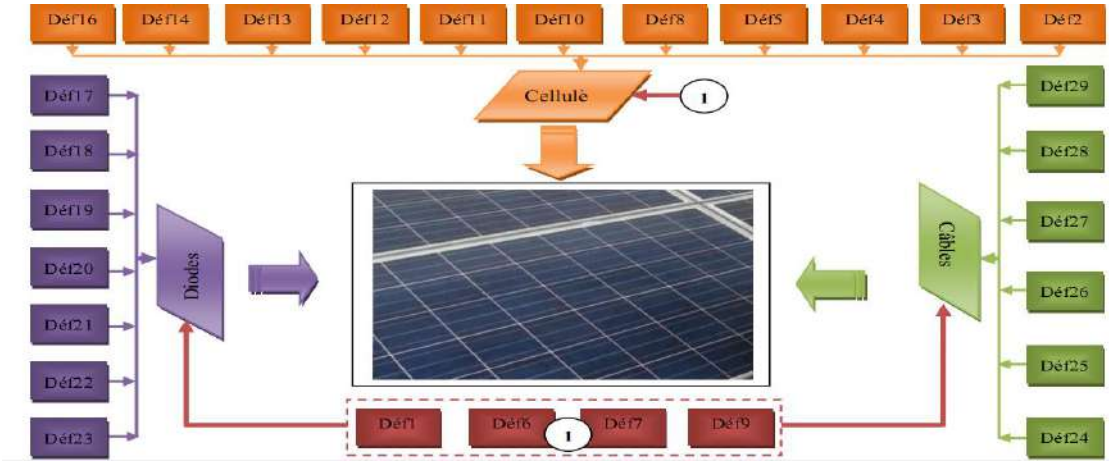


Figure I.9 : défauts d'un champ PV [4].

Déf1 : Inversion de polarité
Déf2 : Oxydation, formation de sable
Déf3 : Point chaud
Déf4 : Dégradation de l'encapsulant
Déf5 : Fissure
Déf6 : Impédance
Déf7 : Court-circuité
Déf8 : Rayure
Déf9 : Circuit ouvert
Déf10 : Détérioration
Déf11 : Echauffement
Déf12 : Pénétration de l'humidité
Déf13 : Arraché ou cassé
Déf14 : Déformation
Déf15 : Ombrage
Déf16 : Obscurcissement
Déf17 : Mal connectée
Déf18 : Mal adaptée
Déf19 : Mal montée
Déf20 : Défectueuse
Déf21 : Destruction
Déf22 : Vieillissement
Déf23 : Absence ou no fonctionnement de diodes
Déf24 : Ramollissement
Déf25 : Rupture du circuit électrique
Déf26:Dégradationdesinterconnexions
Déf27 : Corrosion des liaisons entre les cellules
Déf28 : Surchauffe
Déf29 : Mauvais câblage

I.4.3. Défauts des cellules PV

Une cellule PV peut-être soumise au cours de son fonctionnement à différents défauts pouvant changer carrément sa caractérisation. Parmi ces défauts l'inversion de polarité, l'oxydation, la formation de sable, le point chaud, la dégradation de l'encapsulant, la fissure, l'impédance, le court-circuit, la rayure, le circuit-ouvert, la détérioration, l'échauffement, la pénétration de l'humidité, la cellule PV arrachée ou cassée, la déformation, l'obscurcissement…

I.4.4. Défauts des diodes PV

Les diodes constituants un champ PV de type by-pass et anti-retour peuvent être soumis à différents défauts comme : inversion de la polarité, mal connectée, mal adaptée, mal montée, défectueuse, diode impédance, court-circuit, destruction, circuit-ouvert, vieillissement, absence ou non fonctionnement de la diode

I.4.5. Défauts des câbles PV

Les câbles d'un champ PV créant un champ électrique peuvent être soumis au cours de leur fonctionnement à plusieurs types de défauts comme : ramollissement, rupture du circuit électrique, dégradation des interconnexions, corrosion des liaisons entre les cellules PV, surchauffe, impédance, court-circuit, mauvais câblage, circuit-ouvert…

I.4.6. Synthèse

La figure I-9 montre qu'il existe quatre défauts communs entre les trois unités élémentaires constituants un champ PV. Ces défauts sont successivement court-circuit, circuit-ouvert, impédance et inversion de polarité. La modélisation et la présentation électrique de ces types de défauts montrent leur influence sur le fonctionnement du champ PV.

I.5 L'influence des défauts électriques sur la production du champ PV

Le tableau I-1 présente l'influence des quatre défauts sur la productivité du champ PV.

Tableau I.1 : Présentation électrique des quatre défauts du champ PV.

Défauts		Influence électrique	
Déf7	Court-circuit	I→ max, V→0.	PG↓ diminue
Déf9	Circuit-ouvert	I→0, V→ max.	PG↓ diminue
Déf6	Impédance	Z↑ augmente.	PG↓ diminue
Déf1	Inversion de polarité	V↓ diminue	PG↓ diminue

Avec PG : la puissance du champ PV.

Le tableau I-2 présente l'influence des quatre défauts sur la caractérisation des éléments défectueux et leurs regroupements

Tableau I.2 : Influence des quatre défauts du champ PV sur les éléments défectueux [6].

	Déf7	• I Cellule = I Cellule Court-Circuit ; V Cellule = 0.
	Déf9	• I Cellule = 0 ; I Groupe = I Bypass ; V Cellule = V Cellule Circuit-Ouvert.
	Déf6	• $V_{Cellule} < 0$ (aussi pour connexions entre cellules PV). • V Groupe > 0 si ∑V Cellules saines > ∑V Cellules défectueuses. • V Groupe < 0 si ∑V Cellules saines < ∑V Cellules défectueuses • V Groupe = 0 si ∑V Cellules saines = ∑V Cellules défectueuses.
		• $V_{Groupe} = 0$ si □ Cellules PV sont défectueuses. • Si $V_{Groupe} \leq 0$ Alors $I_{Bypass} \neq 0$ (Diode By-pass passante).
	Déf1	• V Groupe > 0 si N Cellules saine > N Cellules défectueuses. • V Groupe < 0 si N Cellules saines < N Cellules défectueuses. • V Groupe = 0 si N Cellules saines = N Cellules _défectueuses. • Si V Groupe ≤ 0 Alors I Bypass ≠ 0.
	Déf7	• I Group = I Groupe Court-Circuit; V Groupe = 0.
	Déf9	• Influence n'est pas remarquable (tant que les cellules PV du groupe PV sont saines).
	Déf6	• $I_{Bypass} \neq 0$ (Diode By-Pass Passante). • Si I Groupe > I Groupe Court-Circuit Alors le groupe PV est en mode récepteur.
	Déf1	• I Group diminue • V Groupe = 0
	Déf7	• Si la tension de string PV est maximale avec $I_{Cellules_String} \neq 0$ Alors le string PV est en mode générateur. • Si la tension de string PV est minimale ($I_{String\ inverse} \neq 0$) alors : - Si $I_{Cellules\ String} = 0$ Alors le String PV devient en mode récepteur. - Si $I_{Cellules\ String} \neq 0$ Alors le String PV devient en mode circuit-ouvert.
	Déf9	• $I_{String} = 0$ et le string PV est en mode circuit-ouvert (aussi pour connexions entre groupes PV en circuit-ouvert)
	Déf6	• V_{String} diminue tant que le string PV est en mode générateur. • Si V_{String} est maximale Alors le string PV reste en mode générateur. • Si V String est minimale Alors I String inverse ≠ 0 : - Si $I_{Cellules\ String} = 0$ Alors le String PV est en mode

		récepteur. - Si $I_{Cellules\ String} \neq 0$ Alors le String PV est en mode circuit-ouvert.
	Déf1	• Si $I_{Cellules\ String} = 0$ et $I_{String\ inverse} \neq 0$ Alors le string PV est en mode récepteur. • Si $I_{Cellules\ String} \neq 0$ et $I_{String\ inverse} \neq 0$ Alors le string PV est en mode circuit-ouvert.

À partir de ce tableau, nous avons conclure que :

Les deux défauts impédance et inversion de polarité peuvent créer le défaut court-circuit dans les cas suivants :

- L'augmentation du nombre des cellules PV en impédance et en inversion de polarité.
- Diode by-pass en inversion de polarité.

➢ Les défauts impédance et inversion de polarité peuvent créer le défaut circuit-ouvert dans les cas suivants :

- L'impédance des composants défectueux est dépassé certaine valeur, mathématiquement elle converge vers l'infini.
- Une diode anti-retour en inversion de polarité montre la présence d'un string en circuit-ouvert dans le cas de la présence du courant fourni par leurs cellules PV. Donc, elle possède même influence d'une diode anti-retour en circuit-ouvert.

I.5.1 Les modes de fonctionnement d'un champ PV

La figure I-10 et I-11 présentent les modes de fonctionnement normal et anormal d'un champ PV. Ces deux figures peuvent donner une vision plus claire et plus détaillée sur les points critiques du fonctionnement d'un champ PV. Comme le montre la figure I-9, il existe trois zones principales [6]. Comme les figures I.11 et I 12 suivantes :

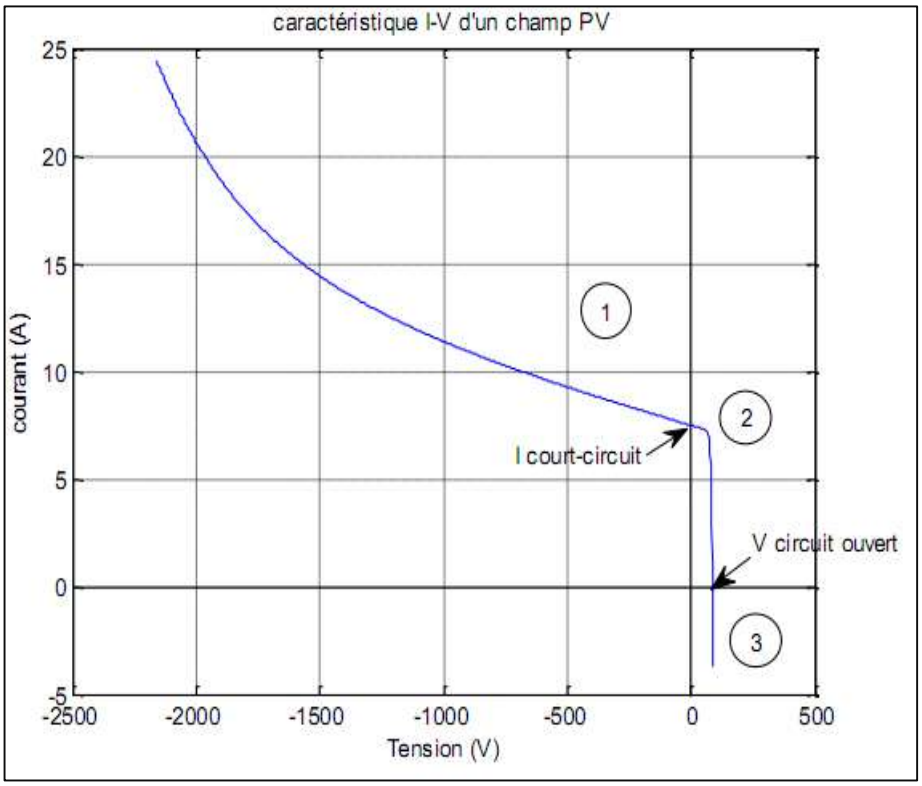


Figure I.10 Caractéristique I-V d'un champ PV [10].

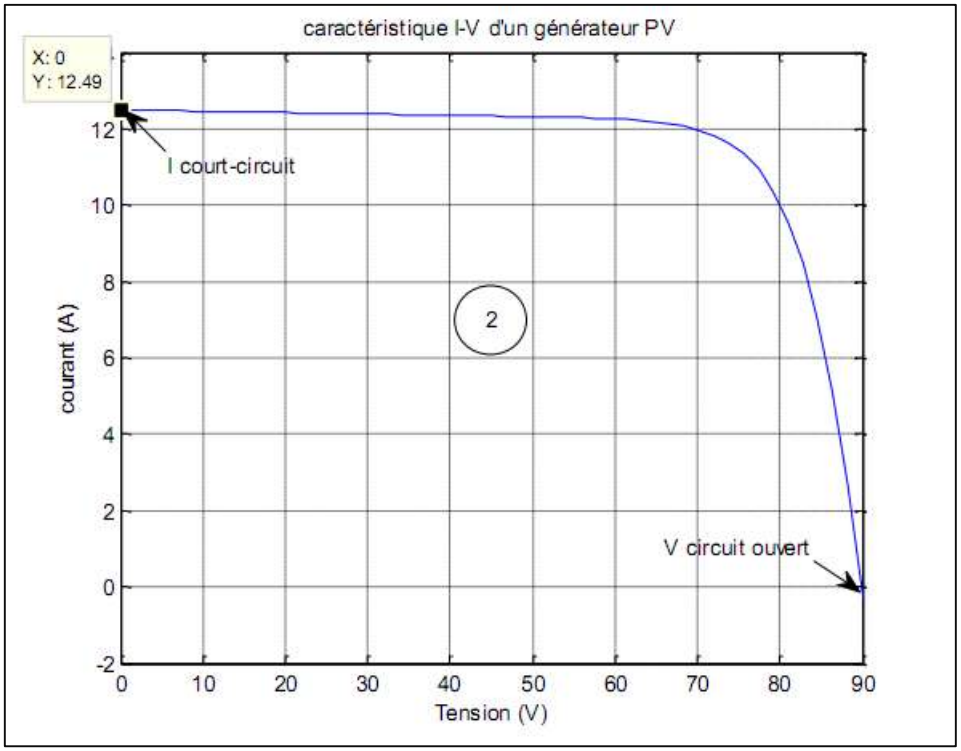


Figure I.11 : Caractéristique I-V d'un champ PV en mode générateur [10].

a) Zone 1

Lorsqu'un champ PV est forcé par un circuit extérieur, il fournit un courant supérieur à sa valeur de court-circuit et une tension négative. Le courant du champ PV continue à augmenter jusqu'à ce que la tension atteigne sa valeur de claquage. La zone 1 présente le champ PV en mode récepteur.

b) Zone 2

Un champ PV dans la zone 2 fonctionne en mode générateur. Il peut fournir une puissance sous forme d'une tension et d'un courant continu. Cette zone est définie dans deux intervalles :

- L'intervalle du courant est limité par deux valeurs : zéro et le courant de court-circuit. Il présente les différentes valeurs du courant du fonctionnement normal du champ PV en mode générateur.
- L'intervalle de la tension est également limité par deux valeurs : zéro et la tension de circuit-ouvert. Il présente les différentes valeurs de la tension du fonctionnement normal du champ PV en mode générateur.

c) Zone 3

À cause de certains actionneurs, la tension produite par un champ PV dépasse sa valeur de circuit-ouvert. Dans ce cas, le champ PV fournit un courant négatif. Sachant que, les cellules PV seront endommagées si cette tension continue à augmenter. Cette zone présente le fonctionnement du champ PV en mode récepteur.

d) Synthèse

À partir des figures I-10 et I-11, nous pouvons conclure que :

- Si la tension d'un champ PV en mode générateur continue à augmenter, alors elle ne peut pas atteindre sa valeur de circuit-ouvert ou bien la dépasser.

$$\forall V_{Gnrateur} \nearrow \Rightarrow V_{Gnrateur} \ngeq V_{Circuit_ouvert}$$

- Si le courant fournit par un champ PV en mode générateur contenue à augmenter, il ne peut pas atteindre la valeur de court-circuit ou bien la dépasser.

$$\forall\, I_{Gnrateur} \nearrow \Rightarrow\ I_{Gnrateur} \ngeq\ I_{court_circuit}$$

I.5.2. Synthèse

L'étude et l'analyse des points précédents montrent l'influence importante des défauts court-circuit, circuit-ouvert, impédance et inversion de polarité sur le fonctionnement du champ PV. Pour toutes ces raisons, la problématique principale de ce projet de recherche est née dans cette optique. L'idée est de proposer une solution pour assurer le fonctionnement

normal du champ PV. Il est indispensable d'utiliser des fonctions avancées du pronostic et du diagnostic de ces défauts, afin d'améliorer la productivité des champs PV.

I.6. Protection d'un générateur photovoltaïque

Comme pour les autres centrales électriques, il existe plusieurs sortes de protection pour une installation photovoltaïque : protection des intervenants, protection contre la foudre, protection du générateur PV [6].

I.6.1. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques

Ce type de protection inclue la protection contre les contacts directs, la protection contre les contacts indirects, comme il est expliqué dans les deux paragraphes suivants :

I.6.1.1. Protection contre les contacts directs

Les matériels PV partie courant continu doivent toujours être considérés comme sous tension et disposer de protection par isolation des parties actives ou par enveloppe [11].

I.6.1.2. Protection contre les contacts indirects

Les modes de protection doivent intégrer les dispositions mises en œuvre côté DC et AC ainsi que la présence ou non d'une séparation galvanique par transformateur entre les parties DC et AC [11].

I.6.2. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions

Les surtensions sont présentes de plusieurs manières dans une installation PV. Elles peuvent être :

1. transmises par le réseau de distribution et être d'origine atmosphérique (foudre) et/ou dues à des manœuvres.
2. générées par des coups de foudre à proximité des bâtiments et des installations PV, ou sur les paratonnerres des bâtiments.
3. générées par les variations de champ électrique dues à la foudre.

En règle générale, un système de protection contre la foudre destiné à un générateur PV se compose des éléments suivants [12]:

1. Système extérieur de Protection contre la Foudre (SPF).
2. Installation de mise à la terre et équilibrage de potentiel.
3. Blindage magnétique et câblage.

I.6.3. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités

Le générateur PV comme toutes autre générateur d'énergie électrique doit être protégé contre les surintensités, et autre types de problèmes

I.6.3.1. Ombrage d'un générateur

L'ombrage partiel d'une cellule va forcer cette dernière à travailler dans le quadrant Q3 (voir figure I.11), c'est-à-dire d'inverser la polarité de la tension de l'élément et de l'élever au seuil tension inverse de la jonction (UC ≈ -15 V a -25 V). La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds.

Dans la cellule affectée et non à une augmentation significative du courantI_{sc}. Les points chauds peuvent endommager définitivement le module PV. Une protection contre les surintensités est sans effet, car l'augmentation de la puissance à dissiper est liée à l'apparition d'une tension inverse

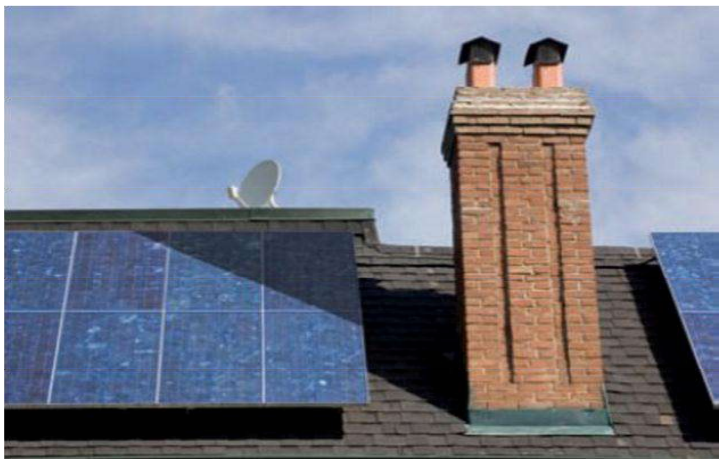


Figure I.12 : ombrage des panneaux par un cheminé de la maison [6].

Une diode By-pass va, en permettant au courant des autres éléments en série de contourner la cellule « ombrée » Figure I-13 :

1. éviter la surtension inverse ainsi que les points chauds liés à cet ombrage,

2. laisser les autres cellules non ombragées de la chaîne générer leur courant normal, à la place du courant sensiblement égal au courant réduit fourni par la cellule ombragée.

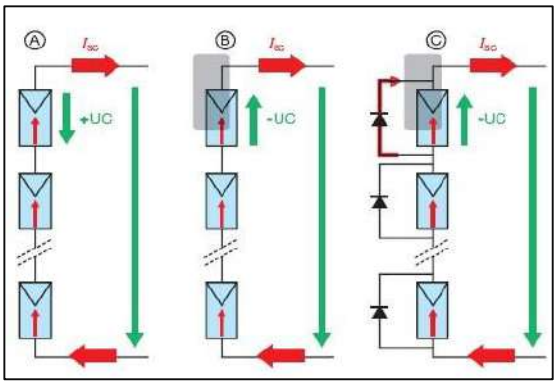


Figure I.13 : système photovoltaïque en (A) fonctionnement normal, (B) présence d'un ombre : échauffement de la cellule, (C) protection par la mise en place diode de by-pass [13].

I.6.3.2. Nécessité de protection contre les courants inverses

Le dimensionnement des câbles de chaînes dépend fortement des chutes de tension ; les notions de courants admissibles pour la protection des canalisations contre les surcharges sont généralement automatiquement satisfaites et ne nécessitent pas la mise en place de protection pour assurer cette fonction.

Le principal critère de sélection des fusibles est la valeur d'IRM (courant inverse maximum PV) que le module peut supporter temporairement jusqu'à ce que le fusible de protection choisi interrompe le courant de défaut généré suite à un défaut.

Du fait que notre travail porte uniquement sur des défauts conduisant à une baisse de production, nous ne nous intéressons donc qu'aux composants servant à la protection du générateur PV [6]:

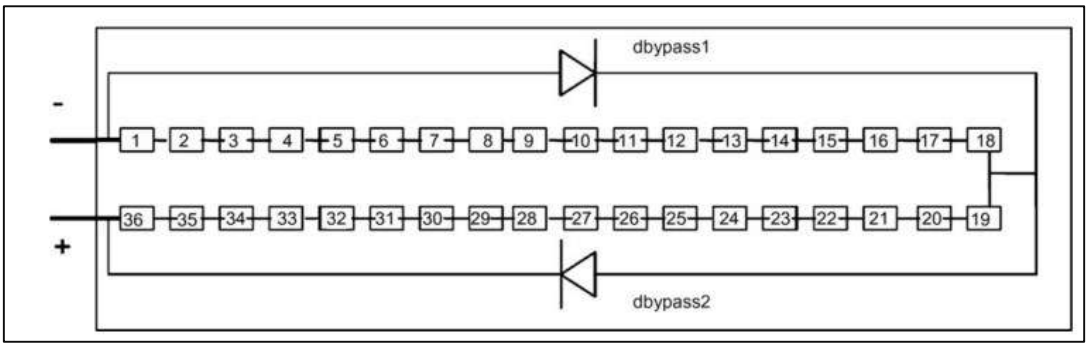


Figure I.14 : Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass [13].

I.6.3.3. Diode de bypass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse.

La plupart des modules PV commerciaux sont constitués par association de cellules solaire en série incluant une ou deux diodes de by-pass (figure I-14). L'une des configurations les plus populaires que nous pouvons trouver sur le marché des modules PV. Quelques modules PV sont offerts sans diodes de by-pass. Ceci peut être compris parce que dans des applications autonomes, où le rangé (le string) PV est constituée juste par association des modules PV en parallèle, chargeant une batterie de 12 ou 24 V, l'inclusion des diodes de bypass n'est pas du tout nécessaire.

D'autre part, dans de grands modules PV, ayant par exemple 72 cellules en série, quelques fabricants incluent six diodes de by-pass, une pour chaque 12 cellules.

La conception de rangée PV et la configuration des diodes de by-pass dans Les modules PV constituants la rangée, a un grand influence sur la probabilité et la sévérité de l'apparition de points chauds le long du string PV [13].

I.6.3.4. Diode anti-retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de

la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string (voir Figure I-15)

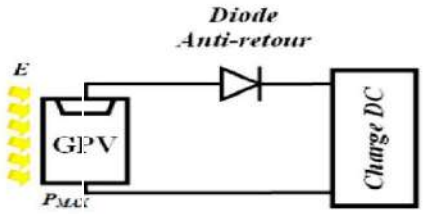


Figure I.15: diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion des autres strings [6].

I.7.Indice de performance (facteur de qualité pour l'installation PV)

L'indice de performance est l'une des valeurs les plus importantes pour l'évaluation de l'efficacité d'une installation photovoltaïque.

Concrètement, l'indice de performance désigne le rapport entre le rendement énergétique réel et le rendement énergétique théoriquement possible. Il est en grande partie indépendant de l'orientation de l'installation photovoltaïque et du rayonnement sur l'installation photovoltaïque. Ceci étant, l'indice de performance permet de comparer des installations photovoltaïques reliées au réseau sur différents emplacements, à travers le monde entier [17].

Les installations photovoltaïques performantes atteignent toutefois un indice de performance pouvant aller jusqu'à 80 %.

L'indice de performance est une grandeur de définition pure, qui, sous l'action de certains facteurs, peut même atteindre des valeurs supérieures à 100 %. Ceci s'explique par le fait que, lors du calcul de l'indice de performance, on utilise, pour les panneaux photovoltaïques, des caractéristiques qui ont été déterminées dans des conditions de test standard (1 000 W/m² pour le rayonnement et 25 °C pour la température des panneaux). Dans la réalité, des conditions différentes influent ainsi sur l'indice de performance.

Les facteurs suivants peuvent avoir une influence sur la valeur PR:

I.7.1. Facteurs environnementaux

1. Température des panneaux photovoltaïques

2. Rayonnement solaire et dissipation d'énergie
3. Ombrage ou encrassement de l'appareil de mesure.
4. Ombrage ou encrassement des panneaux photovoltaïques

I.7.2. Autres facteurs

1. Période d'enregistrement.
2. Pertes dans les lignes.
3. Coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques.
4. Coefficient de rendement de l'onduleur.
5. Différentes technologies solaires de l'appareil de mesure et des panneaux photovoltaïques.
6. Orientation de l'appareil de mesure.

I.8. Conclusion

Comme le domaine du photovoltaïque est vaste et complexe, on s'est contenté d'un bref sommaire sur ce phénomène et son champ d'application. Par contre l'objectif de ce chapitre est orienté vers les caractéristiques I-V des cellules photovoltaïques et leurs paramètres les plus usuels. Certains parmi eux constitueront les jalons de notre étude sur le diagnostic des défauts fréquents chez les panneaux solaires et seront traités ultérieurement. De même, une étude sur l'influence de la disposition des cellules et leur connexion dans une installation PV a été envisagée dans ce chapitre puisqu'elle constitue une partie prenante dans notre travail.

Chapitre II

Modélisation d’un champ PV en fonctionnements normal et défaillant

II.1.Introduction

Dans la partie précédente, on a essayé de préciser certains éléments clés des cellules photovoltaïques à savoir les caractéristiques I-V, la puissance maximale le rendement etc. Ces éléments serviront d'outils pour l'établissement de modèles des cellules photovoltaïques afin d'être employés dans un environnement théorique tel qu'un simulateur pour la conception et l'étude de panneau solaire aussi bien sur le plan comportement que sur la rentabilité énergétique etc.

L'objectif de la modélisation et l'aboutissement à un modèle qui nous permet non seulement d'obtenir la caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement normale et pour des fins de diagnostic des défauts quelconques mais au nombre limité dans notre travail. Comme il existe toute une pléiade de modèles, on s'est limite notre étude aux plus importants à savoir le modèle classique, celui de Bishop etc.

II .2.Les modèles de la cellule PV

La partie modélisation du système photovoltaïque est réalisée dans le but de générer des indicateurs de défauts (symptômes) pour notre système de diagnostic. L'objectif du système de diagnostic étant de détecter et localiser des défauts dans le côté DC du système PV, nous avons choisi d'arrêter l'analyse du système PV à la seule sous partie concernant le côté DC du générateur PV.

II.2.1. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établit par Shokley pour une seule cellule PV [21], est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

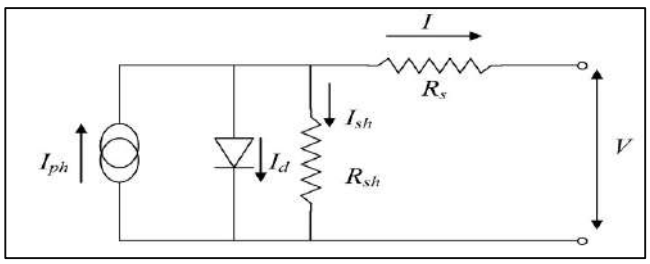


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [10].

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_S I}{R_{sh}} + I_s \left[\exp\left\{\frac{q(V - R_S I)}{ART}\right\} - 1\right] \quad \text{(II-1)}$$

Où :

I : Courant fourni par la cellule [A]

V : Tension à la borne de la cellule [V]

I_{ph}: Photocourant [A], proportionnel à l'irradiance, avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [°C]

R_s: Résistance série [ohm].

R_{sh}: Résistance shunt (ou parallèle) [ohm].

q : Charge de l'électron = 1,602. 10^{-19} Coulomb

R : Constante de Boltzmann = 1,38. 10^{-23} J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser $R_s$de telle sorte que R_{sh}soit très important.

Le photo-courant I_{ph}varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des

Valeurs données aux conditions de référence:

$$I = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}}[I_{ph_{ref}} + \mu_{Ics}(T - T_{ref})] \quad \text{(II-2)}$$

Où :

Φ etΦ_{ref}: Irradiance effective et de référence [W/m²].

T et T_{ref}: Température effective et température de référence [K].

μ_{Ics}: Coefficient de température du photo-courant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon

L'expression :

$$I_S = I_{ref}.\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3.\exp\left[\left(\frac{q.Eg}{A.K}\right).\left(\frac{1}{T_{ref}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad \text{(II -3)}$$

Où:

Eg : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin Eg = 1.12 eV, Silicium amorphe Eg = 1,7 eV, CIS = 1.03 eV, CdTe = 1.5 eV).Les conditions de référence Φ etΦ_{ref}:

Sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (Vco, Ico, Vmax, Imax), se sont, soient les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000 W/m², 25°C, spectre AM1.5), soient des valeurs issues d'une mesure du module.

II.2.2. Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction P-N. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau [21]. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure II-2.

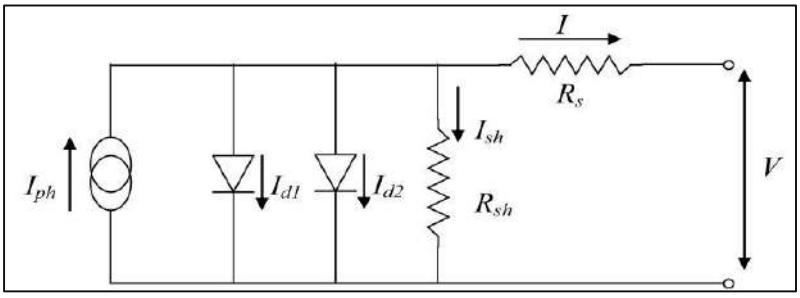


Figure II.2 : schéma équivalent d'une cellule PV modèle a deux diodes [10].

$$I = -I_{ph} + \frac{V-R_s I}{R_{sh}} + I_{s1}[\{\exp\frac{q(V-R_S.I)}{A.R.T}\} - 1] + I_{s2}[\exp\{\frac{q(V-R_S.I)}{2.A.R.T}\} - 1] \quad \text{(II-4)}$$

II.2.3. Modèle empirique

Ce modèle décret le comportement de la cellule PV par le circuit équivalent montré dans la figure II-3. L'avantage majeur de ce modèle le nombre limité des paramètres qui peuvent être facilement trouvé dans les data-sheets des constructeurs.

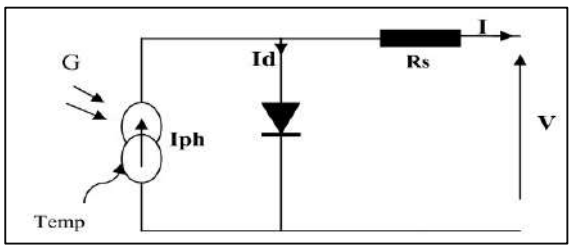


Figure II.3 : Circuit équivalant simple de la cellule PV [10].

La relation entre le courant de sortie et la tension aux bornes de la cellule est dérivée de L'équation 2.1 en supposant que $R_{sh}=\infty$ [22].

$$I = I_{ph} - I_0.\left[\exp\left\{\frac{(V+R_S.I)}{V_t}\right\} - 1\right] \quad \text{(II -5)}$$

II.2.4. Modèle de Bishop

Parmi les modèles de cellules photovoltaïques proposés dans la littérature, le modèle de Bishop est généralement retenu comme le modèle le plus adapté pour modéliser une cellule PV tant en fonctionnement normal qu'en fonctionnement dans le régime inverse. Ce modèle peut être exprimé par l'équation suivante, dans laquelle I et V sont respectivement le courant et la tension d'une cellule PV [10, 20].

$$I = I_{ph} - I_0.\left[\exp\{\frac{(V+R_S.I)}{V_t}\} - 1\right] - \frac{V-R_sI}{R_{sh}}\left[1 + K\left(1 - \frac{(V+R_S.I)}{V_{br}}\right)^{-n}\right] \quad \text{(II-6)}$$

C'est une équation à 2 inconnues (I et V) et 8 paramètres. Ces paramètres sont :

I_{ph}: Photocourant : courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

- $V_t = (ak_bT_c/q)$: Tension thermique de la diode. Elle dépend de température de la cellule T_c tandis que a, k_b et q sont respectivement le facteur d'idéalité de diode (1 à 2), la constante de Boltzmann (1.38 10^{-23} J/°K) et la charge de l'électron (1.602 *10^{-19} C).
- R_s: Résistance série de la cellule
- R_{sh}: Résistance shunt de la cellule
- k : Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4)
- n : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)
- V_{br}: Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

Le terme I_{sh}du courant de fuite, qui est fonction de la tension de sortie de la cellule et qui contrôle sa caractéristique inverse (II.7), consiste en un terme ohmique (courant à travers la résistance shunte) et le facteur de multiplication non-linéaire, qui décret l'effet d'avalanche :

$$I_{sh} = \frac{V-R_sI}{R_{sh}}\left[1 + K\left(1 - \frac{(V+R_S.I)}{V_{br}}\right)^{-n}\right] \quad \text{(II -7)}$$

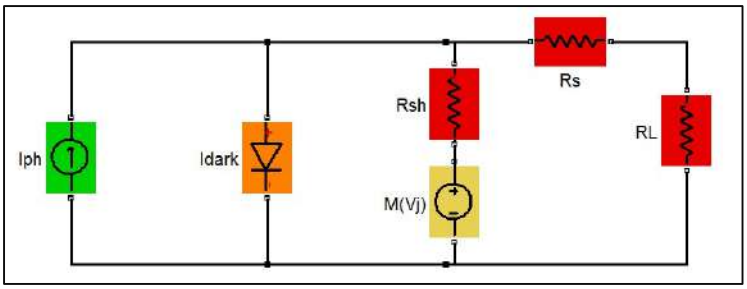


Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle de Bishop [10].

Ii.3.Modélisation du générateur PV en fonctionnement sain

Nous avons présenté précédemment le modèle de Bishop qui nous permet d'obtenir la caractéristique I-V d'une cellule PV. Dans cette partie, nous décrivons la procédure reposant sur cette caractéristique pour établir la caractéristique I-V d'un générateur PV en fonctionnement sain [10,20].

II.3.1. Configuration retenue

Pour illustrer la démarche, nous avons retenu la configuration du champ comme montré dans la figure suivante :

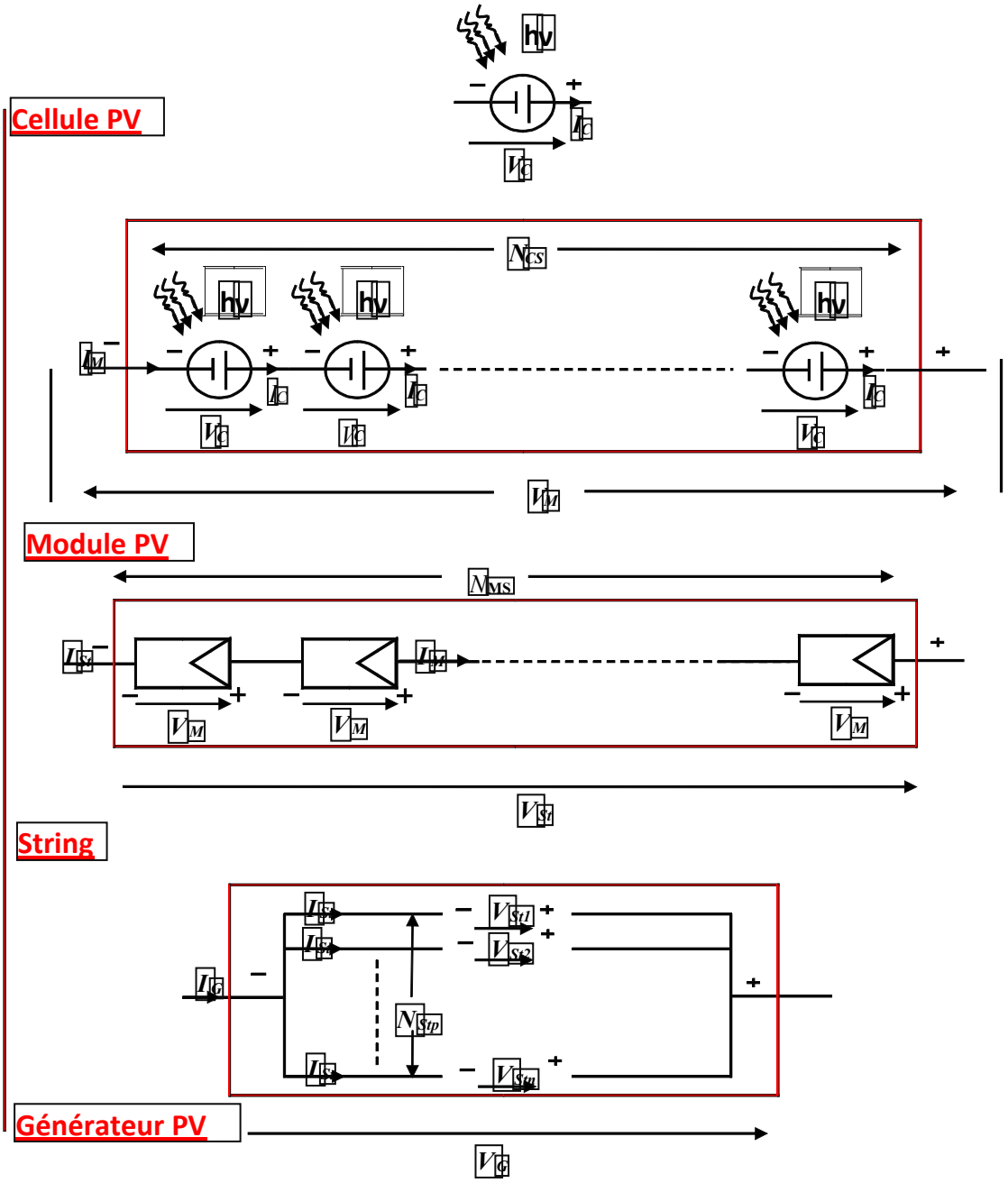


Figure II.5 : Configuration retenu pour la modélisation [6].

II.6.Modélisation du générateur PV en défauts

II.6.1. Classification des défauts pour la modélisation

Dans le cadre de ce mémoire, les défauts les plus rencontrés dans une installation photovoltaïque ont été pris de [10]. Les défauts choisis ont été classifié selon leurs origines, intrinsèques ou extrinsèques au système PV. Deux groupes de défauts ont été formés :

- Défauts intrinsèques ;
- Défauts extrinsèques

Dans chaque groupe de défauts, un tableau a été établi reprenant le type du défaut, sa conséquence principale, puis son degré d'impact sur la production du système ou criticité (1 : faible, 2 : moyen, 3 : fort), son occurrence (1 : faible, 2 : moyenne, 3 : forte). Ainsi que sa phase d'origine (C : Conception ; I : Installation ; E : Exploitation), (les défauts cités dans cette classification sont à titre indicatif, plus de connaissance sur ces défauts, se référé à [10].

II.6.1.1. Défauts intrinsèques

Tableau II.1 : défauts intrinsèques du générateur PV [6].

Défaut	**Conséquences**	**Cri.**	**Occ.**	**Ori.**
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des performances	3	3	I, C
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances	2	3	I, C
Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module /support	Corrosion	2	3	C
Module male ou pas ventilé	Echauffement	2	2	I, C
Module mal fixé	Déplacement de module, diminution des performances	2	2	I, C
Module non câblée	Diminution des performances	2	2	I, C
Fissure	Perte d'étanchéité,	3	1	E
	détérioration des cellules, diminution du shunt, diminution des performances			
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules	3	1	E
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, incendie	3	1	I, E

Pénétration de l'humidité	Hot-Spot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre	3	1	E
Modules de performances différentes	Diminution des performances du champ	1	3	I, E
Sortie par le bas des boites de connexions impossible	Mauvais câblage	1	3	C, I
Bouchons de presse-étoupe manquant sur la boite de connexion	Pénétration d'eau, corrosion des liaisons	1	3	C, I
Boite de connexion montée à l'envers	Entrée d'eau dans le boitier par le presse-étoupe	1	3	C, I
Augmentation de la résistance série due au cycle thermique	Diminution des performances	2	1	E
Détérioration de la couche anti-reflet	Diminution des performances	2	1	E
Inclinaison des modules trop faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité	2	1	C, I
Dégradation des interconnexions	Détérioration des joints, diminution des performances, augmentation de la résistance série, de la chaleur	2	1	E
Support mécanique des modules inadéquat	Effort mécanique important sur les modules	2	1	C, I
Mauvaise résistance mécanique des supports des modules	Déformation du support	2	1	C, I
Diffusion du phosphore (dopant) vers la surface	Perte d'adhérence de l'encapsulation	2	1	E
Important courant de fuite	Echauffement	2	1	E
Echauffement des modules par la boite de connexion	Décollement du Tedlar, diminutiodes performances	2	1	C, I

Panneaux inaccessibles	Nettoyage impossible	2	1	C, I
Modules produisant moins que prévu	Diminution des performances	1	1	E
Apparition de bulles à la surface des modules	Diminution des performances	1	1	E

II.6.1.2 Défauts extrinsèques.

Tableau II.2 : Défauts extrinsèques du générateur PV [6].

Défaut	**Conséquences**	**Cri.**	**Occ.**	**Ori.**
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance	3	3	E
Air marin	Corrosion			
Dégradation des modules par vandalisme	Diminution des performances, non fonctionnement de l'installation	3	2	E
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation	3	2	I, E
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules	3	1	E
Déformation du cadre des modules	Infiltration d'eau	3	1	E
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules	3	1	E
Délaminage	Diminution des performances, échauffement	3	1	E
Foudre	Détérioration des modules	3	1	E
Tempête	Module arraché, cassé	3	1	E
Faiblesse des structures au vent	Module arraché, cassé	3	1	C, I
Foudre sur l'installation	Destruction des modules	3	1	E
Ombrage partiel (feuilles d'arbre, déjection)	Hot Spot, détérioration de cellules	2	1	E
Dégradation de l'encapsulant à cause des ultraviolets, EVA jaunissant	Adsorbe les photons qui n'arrivent plus jusqu'à la cellule, diminution des performances	2	1	E

Dégradation à cause de la lumière	Diminution des performances, surtension, destruction de diodes	2	1	E
Dégradation à cause de la chaleur	Diminution des performances, échauffement, détérioration des joints	2	1	E
Nid d'insectes sur les modules	Diminution des performances	2	1	E

II.6.2Modélisation des différents défauts

De la même manière que pour la modélisation du champ en fonctionnement normal, nous considérons la configuration du champ présentée dans le Tableau II-2

II.6.2.1. Défaut de mismatch et d'ombrage

Les défauts de mismatch et d'ombrage se sont des défauts fréquents aux systèmes PV, dans ce qui suit, on parle de ces défauts (les définir), leur modélisation, et la caractéristique IV résultante de ces deux défauts.

i) Définition

Le défaut de ''**mismatch''** est le défaut causé par le groupement de cellules possédant une caractéristique I-V non identique. Tout changement dans l'un des paramètres de l'équation (II-1) conduira à la dissemblance de leur caractéristique. Le défaut d'ombrage est un cas particulier du défaut de mismatch car sa présence conduit à une réduction de l'ensoleillement reçu par des cellules. Le changement de ces paramètres provient de deux facteurs principaux.

Premièrement, des cellules pourraient posséder des propriétés physiques différentes suite à une tolérance dans la fabrication. Seule la tolérance de la puissance du module est donnée par les fabricants de la cellule ou du module. Elle peut varier entre +/-3% et +/-5% selon les fabricants.

Deuxièmement, des cellules PV peuvent être exposées à des conditions de fonctionnement différentes causées par les différents défauts. D'une manière qualitative, les paramètres de la cellule affectés par ces défauts peuvent être identifiés (voir Tableau II-4).

Tableau II.3 : Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule.

Nature des défauts	**Paramètres affectés**
Module arraché ou cassé Ombrage : Feuille d'arbre, déjections, Sable, pollution, neige etc.	Variation de I_{ph}
Echauffement des cellules	Variation de T
Dégradation des interconnexions Fissure Corrosion des liaisons entre cellules	Variation de R_s
Modules de performances différentes Détérioration des cellules Pénétration de l'humidité	Variation de tous les paramètres des cellules

ii) Modélisation

Selon le Tableau II-4, le défaut de ''**mismatch**'' et d'ombrage peut être modélisé par la variation des différents paramètres de la cellule. Du fait de la disparité des paramètres des cellules dans un champ, les relations dans l'équation (II-2) ne peuvent plus être utilisées. Lors de la mise en série des composants, la tension produite par chaque composant n'est plus égale pour un même courant. Et lors de la mise en parallèle des composants, le courant fourni par chaque composant n'est plus identique pour une même tension

Etape 1 : Détermination de la caractéristique de la cellule

Pour déterminer la caractéristique I-V d'une cellule, on reprend la procédure de la Figure II-7. On impose le courant sur une plage souhaitée et on cherche la tension correspondante. L'équation (II-8) donne la relation du courant et de la tension de la $i^{ème}$ cellule d'un groupe (voir configuration dans le Tableau II-3).

$$I_{cellules} = I_{imposée} \quad (II.8)$$

Dans le cas du mismatch, pour un courant donné, la tension produite par les cellules n'est pas forcément identique car leurs paramètres ne sont pas les mêmes. Nous supposons qu'une cellule est à 50% ombrée. La figure suivante montre l'allure d'une cellule « ombrée » et celle d'une cellule « bonne ».

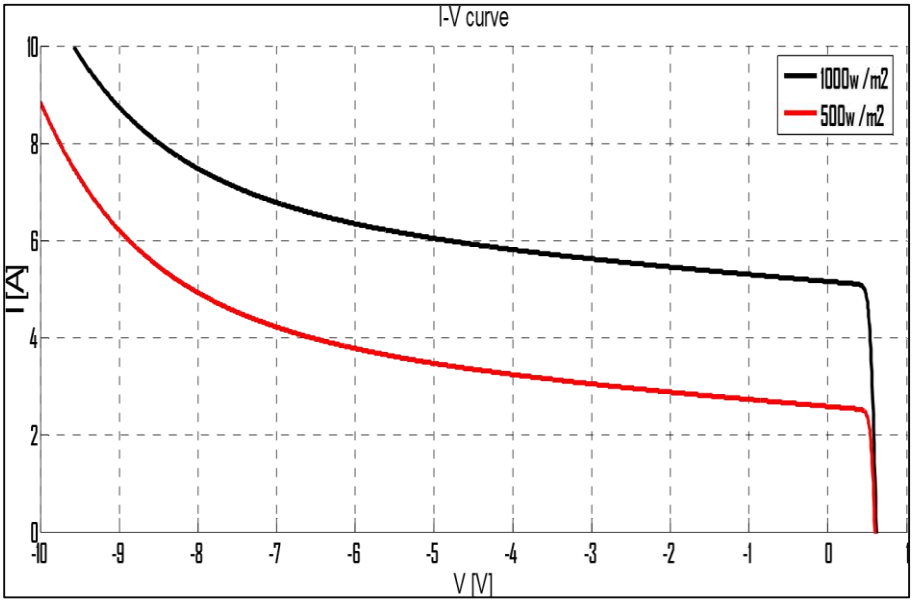


Figure II.6 : Caractéristique I-V d'une cellule "bonne"(en noir) et d'un autre "ombré" (en rouge) [9].

Etape 2 : Détermination de la caractéristique du groupe

Dans le cas d'un groupe de cellules, la somme de la tension de toutes les cellules dans le groupe peut être négative. Ceci provient du fait qu'une ou des cellules dans le groupe produisent une tension négative lorsqu'elles sont traversées par un courant supérieur à leur courant de court-circuit. C'est dans cette situation que la diode de bypass joue son rôle en devenant passante quand la somme totale de la tension des cellules devient négative et en dérivant ainsi le courant en excès pour la cellule ombrée (voir Figure II-8).

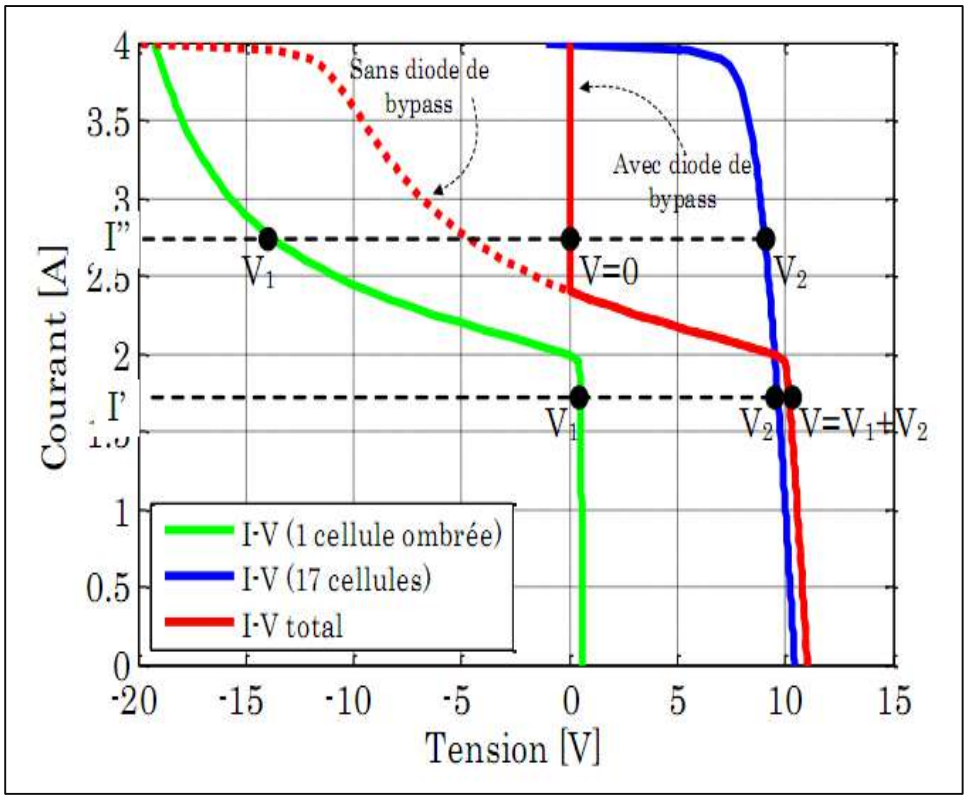


Figure II.7 : Caractéristique d'un groupe de cellules protégé par la diode de bypass [9].

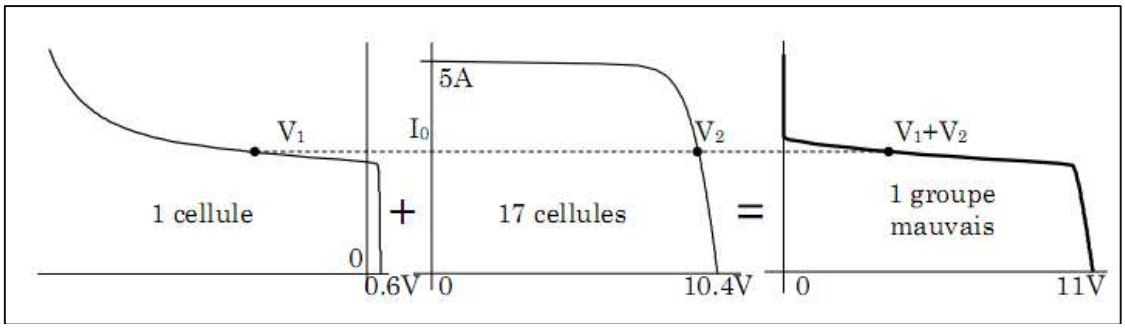
L'équation (II-9) donne la relation du courant et de la tension du j^{ème} groupe de cellules d'un module (voir configuration dans le Tableau II-2).

Continuons avec l'exemple précédent. La figure suivante montre l'allure d'un groupe de cellules dans lequel une cellule est ombrée et l'allure d'un groupe de cellules « bon ».

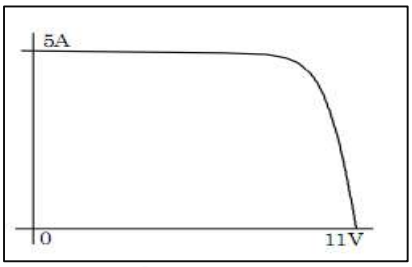
$$I_{cellule} + I_{bypass} \quad \text{(II.9)}$$

$$V_{groupe,j} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \text{ si } \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \geq 0 \quad \text{(II.10)}$$

$$V_{groupe,j} = 0 \text{ si } \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \leq \quad \text{(II.11)}$$



(a) groupe « mauvis »



(b) groupe «bon »

Figure II.8 : Caractéristique I-V d'un groupe « mauvais » et « bon » [6].

Etape 3 : Détermination de la caractéristique du module

Les 'équations (II-12) donnent la relation du courant et de la tension du k^{ème} module d'un string (voir configuration dans le Tableau II-6).

$$I_{module,k} = I_{groupe} \quad \text{(II-12)}$$

$$V_{module,k} = \sum_{j=1}^{N_{groupe}} V_{groupe,j} \quad \text{(II.13)}$$

L'allure d'un module qui contient un groupe de cellules « mauvais » est montrée dans la Figure II-10 (en rouge). Et l'allure du module « bon » est montrée dans la Figure II-10 (en noir).

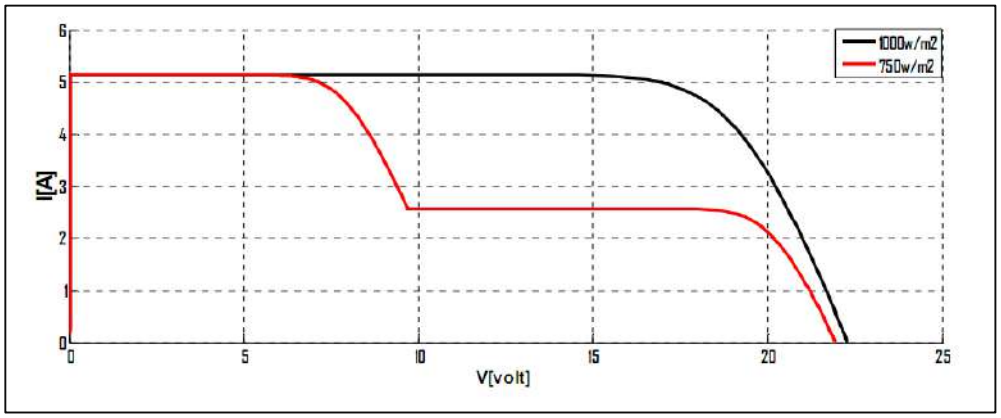


Figure II.9 : Caractéristiques I-V d'un module "bonne" et d'un autre "ombré"[9].

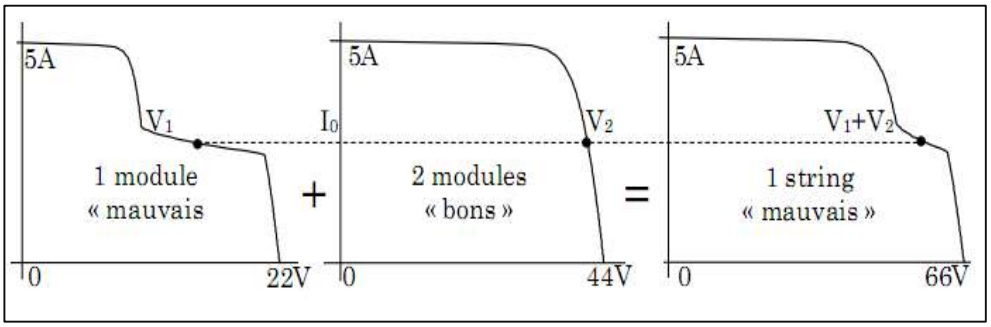
Etape 4 : Détermination de la caractéristique du string

L'équation (II-15) donne la relation du courant et de la tension du $z^{ème}$ string du champ (voir configuration dans le Tableau II-2).

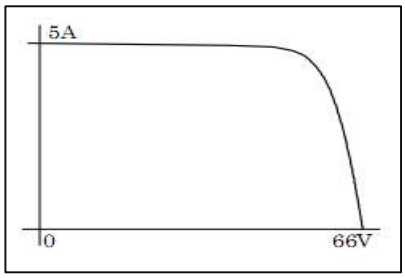
$$I_{string,z} = I_{module} \quad \text{II.14)}$$

$$V_{string,z}=\sum_{K=1}^{N_{module}} V_{module,k} \quad \text{(II-15)}$$

La formation de la caractéristique I-V d'un string contenant un mauvais module et deux bons modules est montrée dans la figure suivante.



(a) String « mauvais »



(b) String «bon »

Figure II.10 : Caractéristique I-V d'un string « mauvais » et « bon » [6].

Etape 5 : Détermination de la caractéristique du champ Lorsque les strings sont connectés en parallèle, la contrainte d'égalité de la tension à leurs bornes s'applique. Cette contrainte implique que le courant fourni par chaque string n'est pas forcément le même. La valeur du courant du string, après la connexion en parallèle, peut être donc déduite d'une interpolation de la caractéristique du string pour la valeur attendue de la tension du string, respectant la contrainte d'être identique pour chaque string. Prenons un exemple concret où 2 strings dont la caractéristique n'est pas identique sont mis en parallèle (voir Figure II-12).

Pour une tension donnée (V'), le courant fourni par chaque string n'est pas le même. I_1 et I_2 pour chaque string sont déduits d'une interpolation de leur caractéristique respective.

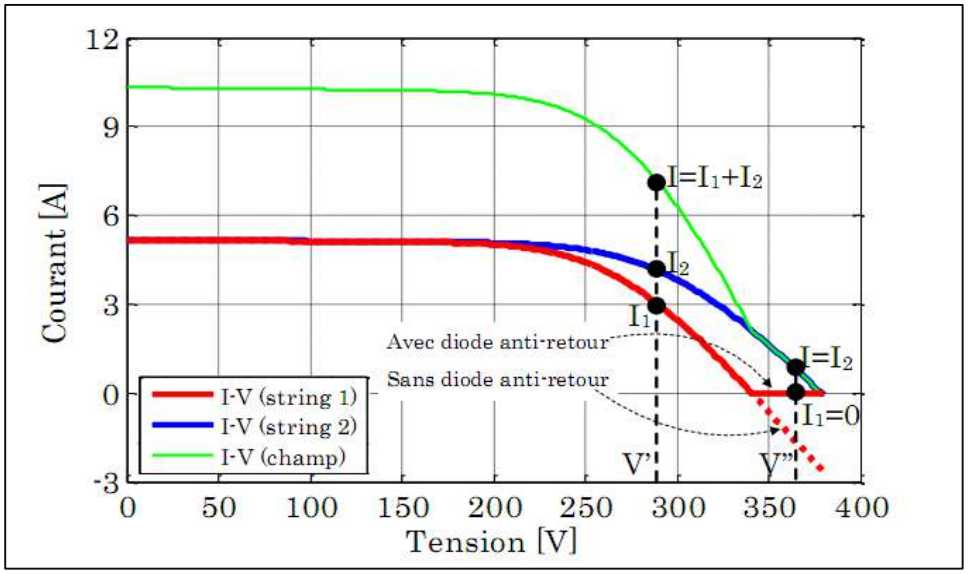


Figure II.11 : Caractéristique d'un champ PV protégé par la diode anti-retour [9].

En fonctionnement normal du champ PV, la diode anti-retour conduit et laisse passer le courant produit par le string. En cas de mismatch, il se peut que cette diode devienne bloquée. Prenons le même exemple de la Figure II-14, la tension de fonctionnement (V'') est bien supérieure à la tension de circuit ouvert du string 1. La diode anti-retour du string est donc bloquée. Ce blocage empêche le courant débité par le string 2 de circuler dans le sens inverse dans le string 1. L'équation (II-17) donne la relation du courant et de la tension

$$I_{champ} = V_{imposée} \quad \text{(II-16)}$$

$$I'_{string,z} = \text{Interpolation}\ (V_{champ}, I_{string,z}, V_{string,z}) \quad \text{(II-17)}$$

$$I_{champ} = \sum_{z=1}^{N_{string}} I'_{string,z} \text{ Avec } I'_{string,z}=0 \text{ si } V_{string,z} < V_{champ} \quad \text{(II-18)}$$

En tenant compte de l'exemple considéré, la caractéristique du champ obtenu à partir de la démarche proposée est :

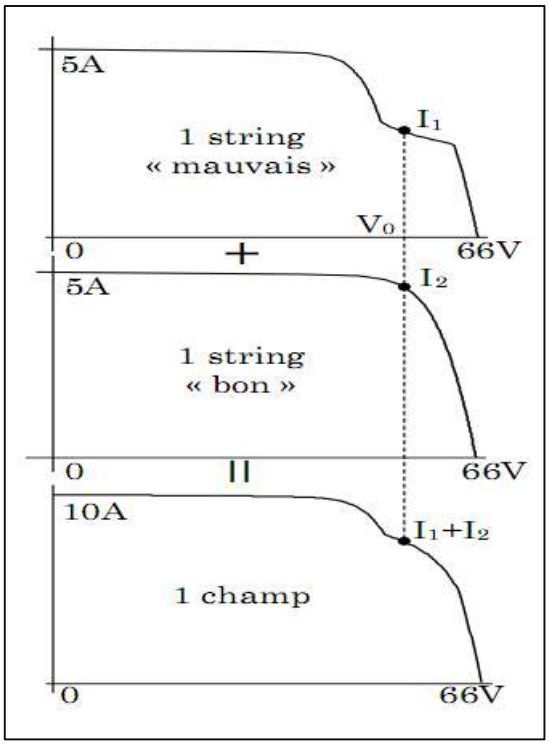


Figure II.12 : formation de la caractéristique I-V du champ PV selon l'exemple considéré[6].

iii) Quelques résultats

Pour illustrer l'impact de chaque paramètre sur la caractéristique du module, un seul paramètre est modifié à la fois. Les paramètres utilisés dans cette simulation sont indiqués dans le Tableau II-4.

Tableau II.4 : Paramètre utilisé dans la simulation en cas de mismatch

Paramètres	Nb. Cellules	Nb. Diodes bypass	I_{ph}(A)	T_C (°K)	R_s (ohm)	R_p (ohm)	a	I_0(A)
Valeur	72	4	4	298	0.015	5	1.22	2.3e-8

II.6.2.2.Défaut de diodes de bypass

i) Définition

Dans son bon état, la diode de bypass est passante quand la somme de la tension des cellules qu'elle protège est négative et elle est bloquée dans le cas contraire. Dans son état défaillant, ce rôle de protection n'est plus assuré. Selon le Tableau II-3, les défauts électriques associés à cette diode sont : diode court-circuitée, diode déconnectée et diode inversée. En plus de ces défauts électriques, cette diode pourrait être éventuellement claquée en cours de fonctionnement et se comporter comme une impédance d'une valeur quelconque. La Figure II-15 montre un schéma d'un groupe de cellules (groupe j^{ème}) dans lequel la diode de bypass est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, prendre un des états défaillants de la diode : court-circuit, circuit ouvert, impédance quelconque et diode inversée.

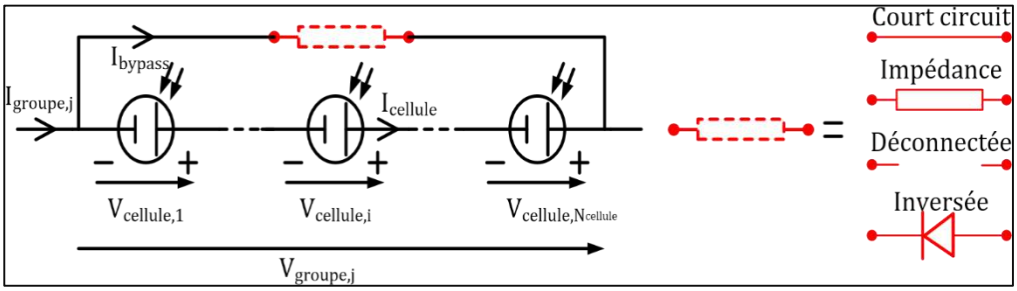


Figure II.13 : Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de bypass défaillante[6].

ii) Modélisation

- **Cas « court-circuit »**

La tension du groupe de cellules s'annule. Le courant du groupe de cellules est égal à la somme du courant circulant dans les cellules et de celui circulant dans le chemin court-circuitant. Le courant circulant dans les cellules est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuitant porte le courant en excès.

$$V_{groupe,j} = 0 \quad \text{(II-19)}$$

$$I_{groupe} = I_{bypass} + I_{cellule} \quad \text{(II-20)}$$

- Cas « impédance Z quelconque »

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

$$V_{groupe,j} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \quad \text{(II-21)}$$

$$I_{groupe} = I_{cellule} + V_{groupe,j}/Z \quad \text{(II-22)}$$

- Cas « circuit ouvert »

La tension du groupe est égale à la somme de la tension des cellules du groupe. Le courant du groupe est égal au courant circulant dans le string de cellules.

$$V_{groupe,j} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \quad \text{(II-23)}$$

$$I_{groupe=}I_{cellule} \quad \text{(II-24)}$$

- Cas « inversion de la polarité »

Contrairement à son fonctionnement normal, la diode conduit quand la somme de la tension des cellules qu'elle protège est positive et se bloque dans le cas contraire.

$$V_{groupe,j} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} \text{ Si } \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} < 0 \quad \text{(II-25)}$$

$$V_{groupe,j} = 0 \text{ si } \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule,i} > 0 \quad \text{(II-24)}$$

$$I_{groupe} = I_{cellule} + I_{bypass} \quad \text{(II-25)}$$

Selon la Figure II.2, le défaut de diode de bypass n'est pris en compte que dans l'étape de détermination de la caractéristique du groupe de cellules. La démarche de calcul des autres composants du champ PV.

II.6.2.3.Défaut de module

i) Définition

Le défaut de module se réfère à tous les défauts électriques associés à la connexion d'un module dans un string PV. Selon le Tableau II-3, ces défauts électriques sont : module court-circuité, module connecté en parallèle avec une impédance et inversion de la polarité du module. La Figure II.17 montre le schéma d'un module avec l'élément qui représente, à chaque fois, un des états défaillants de la connexion du module.

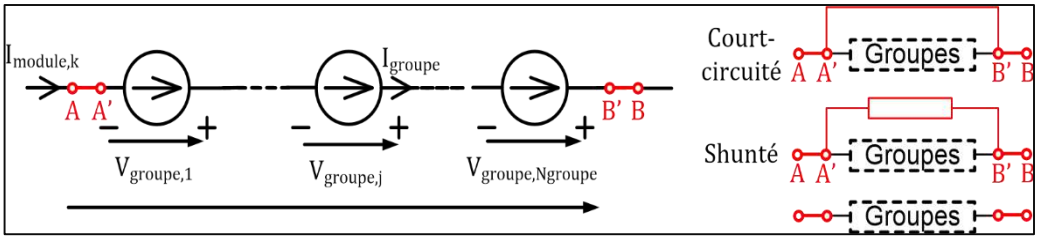


Figure II.14 : Schéma bloc d'un module PV défaillant [6].

ii) Modélisation

- **Cas « module court-circuité »**

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

$$I_{module} = I_{shunt} + I_{groupe} \quad \text{(II-26)}$$

$$V_{module,k=0} \tag{II-27}$$

- **Cas « module connecté en parallèle avec une impédance »**

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

$$V_{module,k} = \sum_{j=1}^{N_{groupe}} V_{groupe,j} \tag{II-28}$$

$$I_{module=}I_{groupe} + \frac{V_{module,k}}{Z} \tag{II-29}$$

- **Cas « inversion de la polarité d'un module »**

Si un module dans le string PV est inversé, il sera traversé par un courant contraire à celui du string. Dans cette situation, les cellules dans le module inversé sont forcées de fonctionner dans le quadrant IV de la Figure II.3 et se comportent comme un récepteur avec une tension positive et un courant négatif.

$$I_{module=-}I_{groupe} \tag{II-30}$$

$$V_{module,k} = \sum_{j=1}^{N_{groupe}} V_{groupe,j} \tag{II-31}$$

Comme on peut le voir dans la Figure II.2, les défauts de module n'interviennent que dans l'étape de détermination de la caractéristique du module. La démarche de calcul des autres composants du champ PV.

iii) Quelques résultats

La Figure II-18 montre le comportement d'un string PV composé de 9 modules en série lors de différents défauts de module.

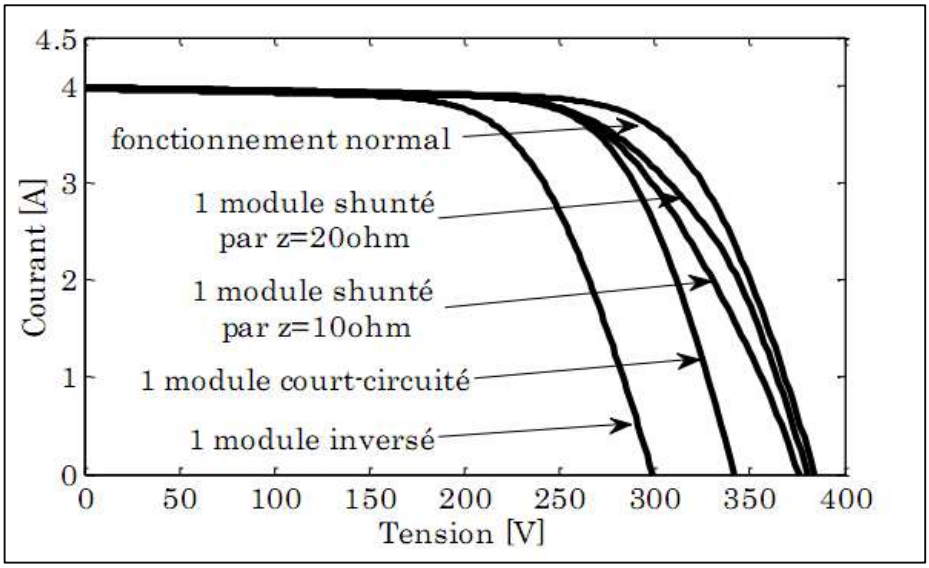


Figure II.15 : Caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de diode de module [6].

Dans le cas où le module est connecté en parallèle avec une impédance, la perte en courant du string augmente en fonction de la baisse en impédance. Quand un module est court-circuité, le string perd la tension d'un module. Si un module est inversé, le string perd deux fois la tension produite par un module car la tension produite par le module inversé sera soustraite de la tension produite par les autres modules.

II.6.2.4.Défaut de connectique

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

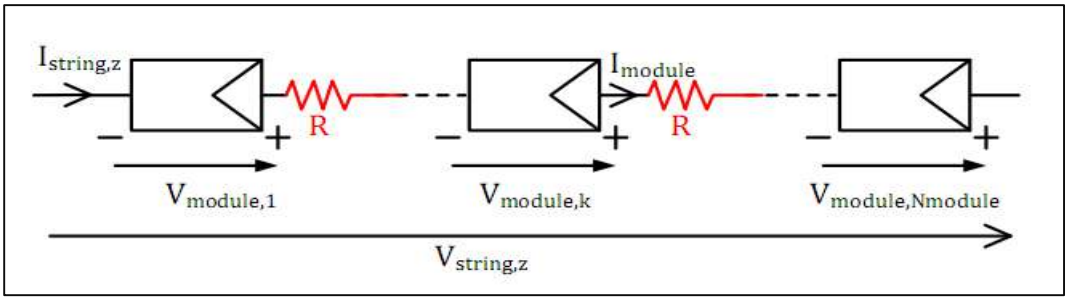


Figure II.16 : Schéma bloc d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle [6].

Le défaut de connectique n'intervient que dans l'étape de détermination de la caractéristique du string. La démarche de calcul des autres composants du champ PV. Les relations entre courant et tension du z^{ème} string PV sont montrées dans l'équation (II-32).

$$I_{string,z} = I_{module} \tag{II-32}$$

$$V_{string,z} = \sum_{k=1}^{N_{module}} V_{module,k} - R * I_{string,z} \tag{II-33}$$

Le comportement d'un string PV de 9 modules en série en fonction de différentes valeurs de la résistance de connectique est montré dans la Figure II.18. Plus la résistance de connectique est importante, plus la tension du string chute pour un courant donné.

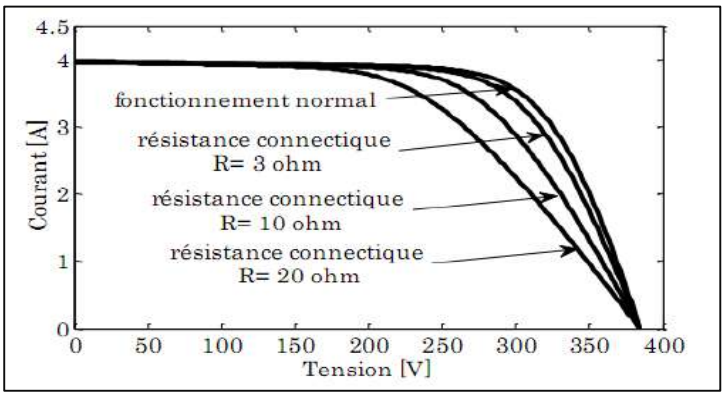


Figure II.17 : Caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de diode de connectique[6].

II.6.2.5.Défaut de diode anti-retour Définition

i) Définition

De la même manière que pour la diode de bypass, 4 types de défauts peuvent être envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et inversée.

La Figure II.19 montre un schéma d'un champ PV dans lequel la diode anti-retour est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, représenter un des états défaillants de la diode

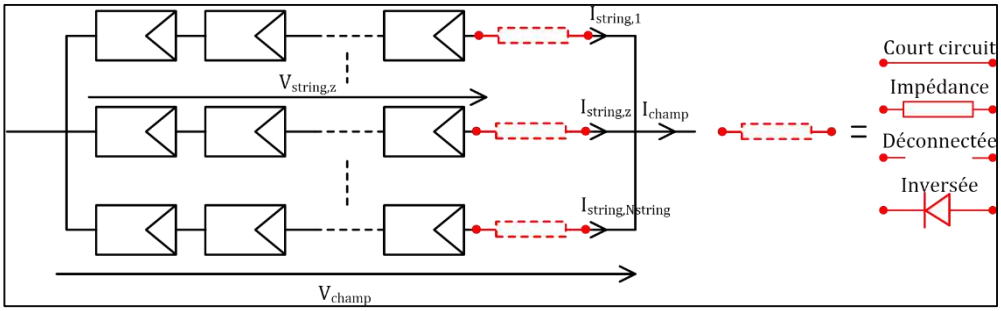


Figure II.18 : Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défaillante [6].

ii) Modélisation

- **Cas « court-circuit »**

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

$$V_{champ} = V_{imposée} \quad \text{(II-34)}$$

$$I'_{string,z} = \text{Intrepolation}\left(V_{champ}, I_{sting,z}, V_{string,z}\right) \quad \text{(II-35)}$$

$$I_{champ} = \sum_{z=1}^{N_{string}} \quad \text{(II-36)}$$

- **Cas « impédance Z quelconque »**

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

$$V_{champ} = V_{imposée} \quad \text{(II-37)}$$

$$I'_{string,z} = \text{Intrepolation}\left(V_{champ}, I_{sting,z}, V_{string,z} - Z * I_{string,z}\right) \quad \text{(II-38)}$$

$$I_{champ} = \sum_{z=1}^{N_{string}} I'_{string,z} \quad \text{(II-39)}$$

- **Cas « circuit ouvert »**

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

$$V_{champ} = V_{imposée} \quad \text{(II-40)}$$

$$I'_{string,z} = \text{Intrepolation}\left(V_{champ}, I_{sting,z}, V_{string,z}\right) \quad \text{(II-41)}$$

$$I_{champ} = \sum_{z=1}^{N_{string}} I'_{string,z} \quad \text{Avec} \quad I'_{string,z} = 0 \text{ si la diode est déconnectée} \quad \text{(II-42)}$$

- **Cas « inversée »**

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

$$V_{champ} = V_{imposée} \quad \text{(II-43)}$$

$$I'_{string,z} = \text{Intrepolation}\left(V_{champ}, I_{sting,z}, V_{string,z}\right) \quad \text{(II-44)}$$

$$I_{champ} = \sum_{z=1}^{N_{string}} I'_{string,z} \text{Avec} \quad I'_{string,z} = 0 \text{ si } V_{string,z} > V_{champ} \quad \text{(II-45)}$$

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et développé une démarche de modélisation pour les systèmes PV en défaut. L'intérêt réside dans l'obtention de la caractéristique I-V du système PV (module, string, champ) pour les différents défauts que nous avons considérés.

Une étude bibliographique sur les différentes approches de modélisation a été menée. Ceci nous a conduits à choisir l'approche par l'addition de la caractéristique I-V qui consiste à déterminer la caractéristique I-V d'un champ PV.

Suivant la hiérarchie des étapes de la modélisation proposée (groupe , module , string et champ) et les conséquences possibles que les défauts retenus dans le chapitre I peuvent y

avoir lieu , ces défauts ont été restructurés et classifiés en cinq catégories pour la modélisation :

- Défauts de mismatch et d'ombrage
- Défauts de la diode de bypass
- Défauts de module
- défaut de connectique
- défaut anti-retour

Chapitre III

Résultats de simulation et discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va simuler les défauts qu'on a cité dans chapitre deux avec logiciel matlab bloque Simulink et voir les résultats avent de faire une comparaison avec l'état normal ou l'état défaut.

III.2. Simulation d'influence du type de connexion sur la caractéristique I-V

Il existe trois types de connexion de cellules PV et qui sont une rangé série simple, un block séries-parallèle, et une connexion série des blocks séries-parallèle. [20].

L'effet de ces types de connexion sur la producti1on de l'énergie électrique fut révélateur de distinction est étudié et a été mis en relief en référence. La configuration souhaitée du circuit d'interconnexion des cellules pour produire l'énergie nécessaire à une application donnée est obtenu par le calcul du nombre de cellules en série pour générer la tension demandée, et le nombre de rangées en parallèle pour produire le courant demandé.

Le schéma de la figure I.1 représenté la simulation de la connexion de cellule en série et en parallèle

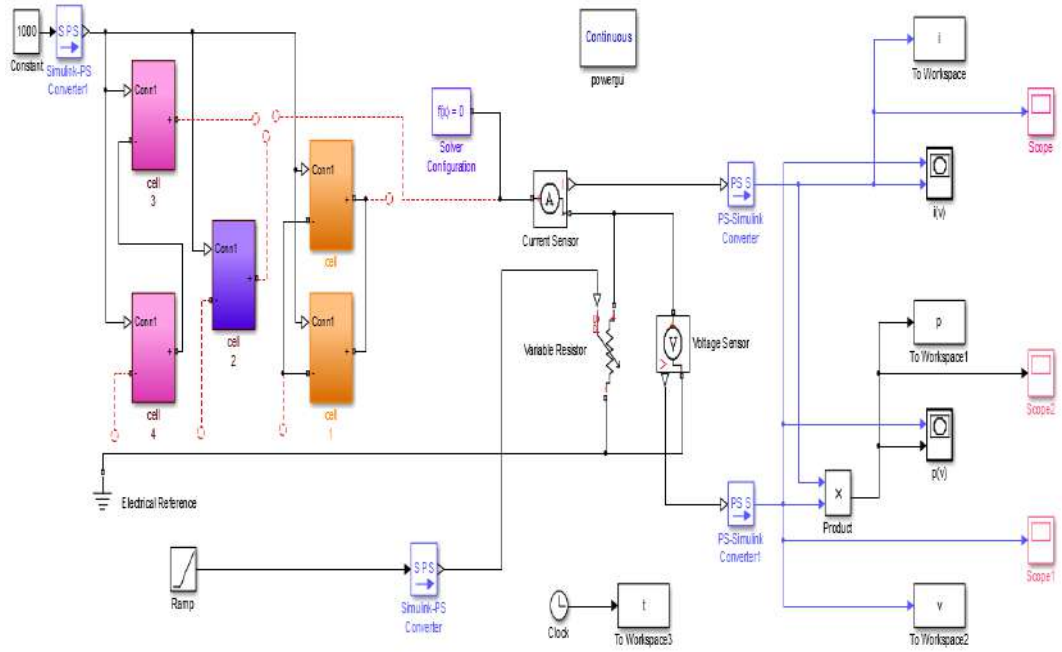


Figure III.1 : Caractéristiques I-V d'un module PV lors de l'ombrage

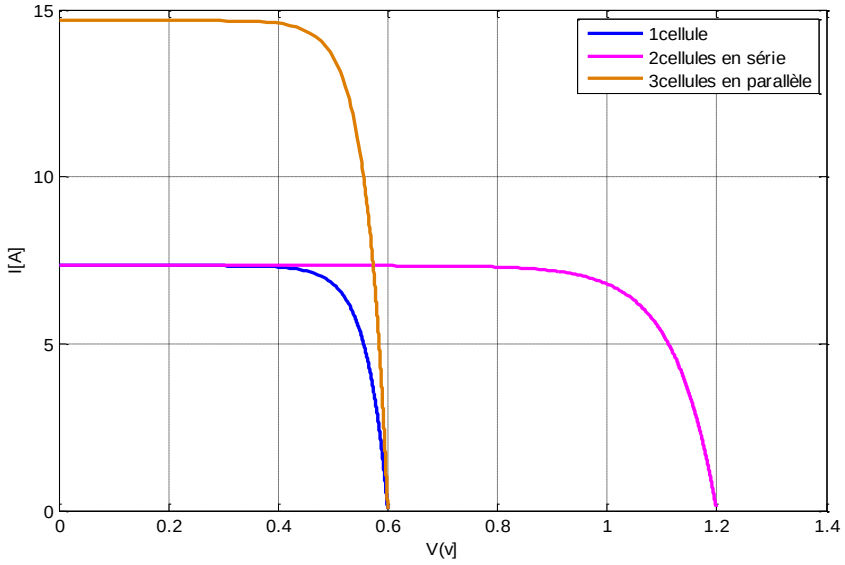


Figure III.2 : Variation de la caractéristique I-V par la connexion de cellule Série et en parallèle.

III.3 les résultats de simulation des différents défauts

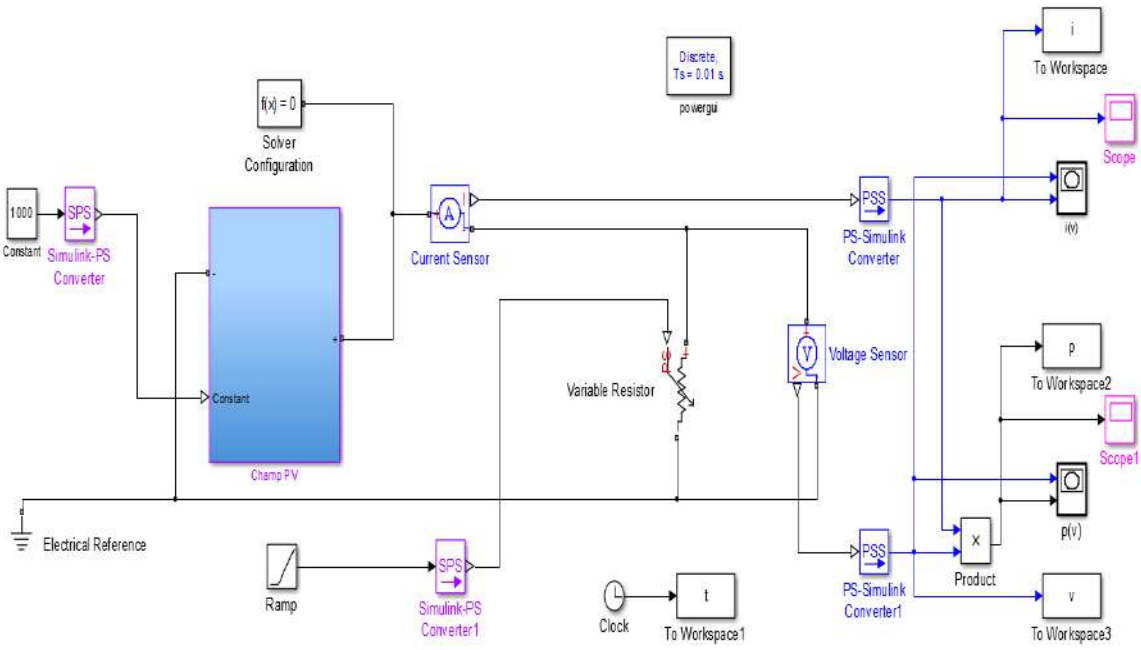
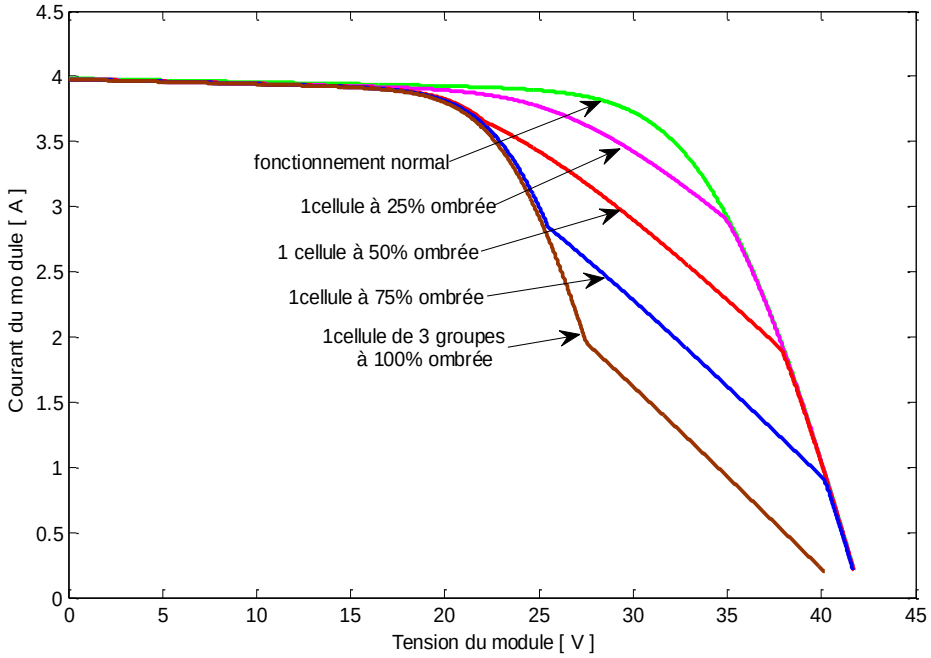


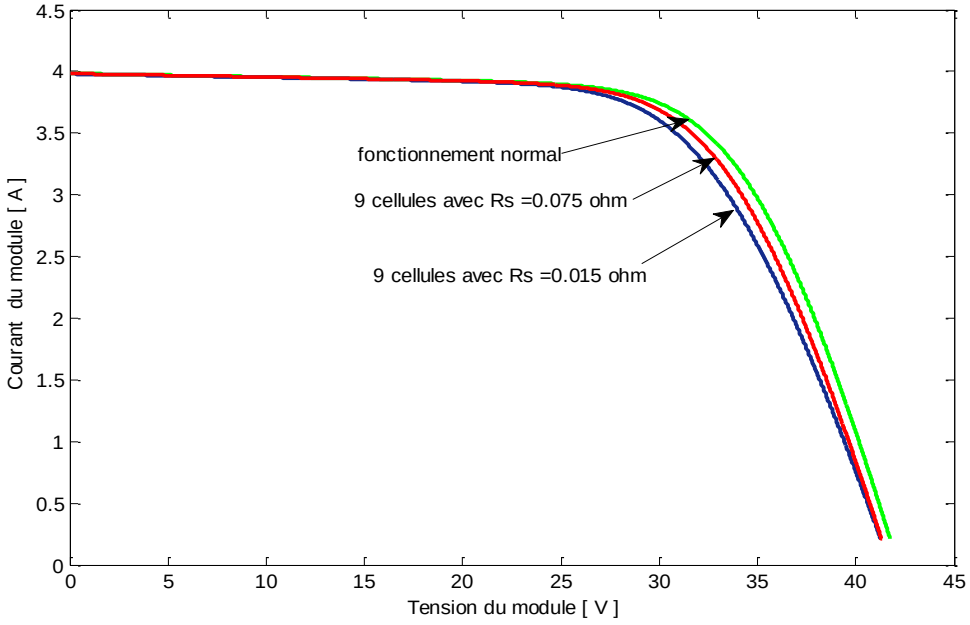
Figure III.3 : Schéma de connexion de champ PV sur bloc Simulink

III.3.1 défaut de mismatch et d'embrage

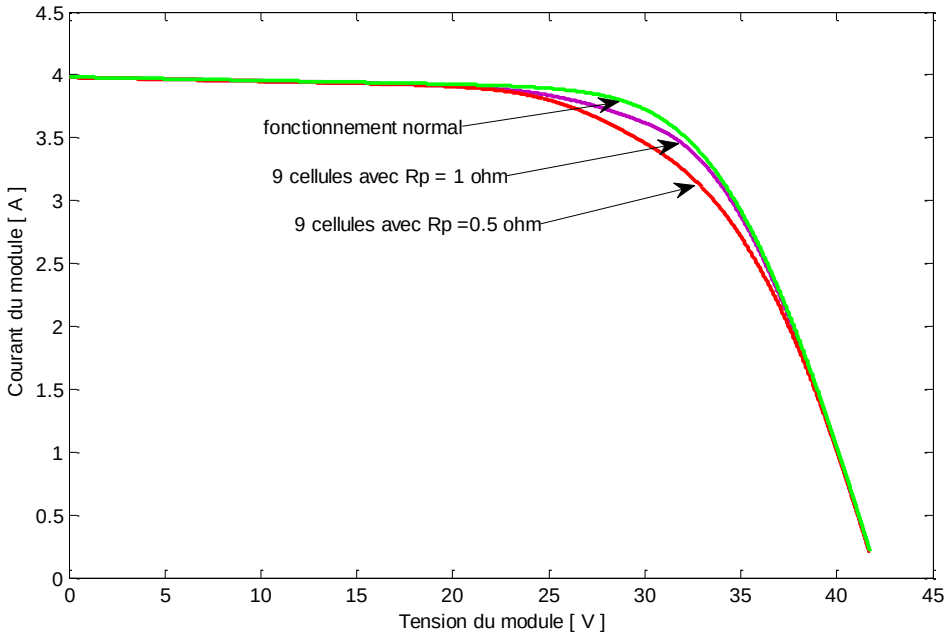
La Figure II-4montre des résultats de simulation d'un module lors d'un défaut de mismatch et d'ombrage.



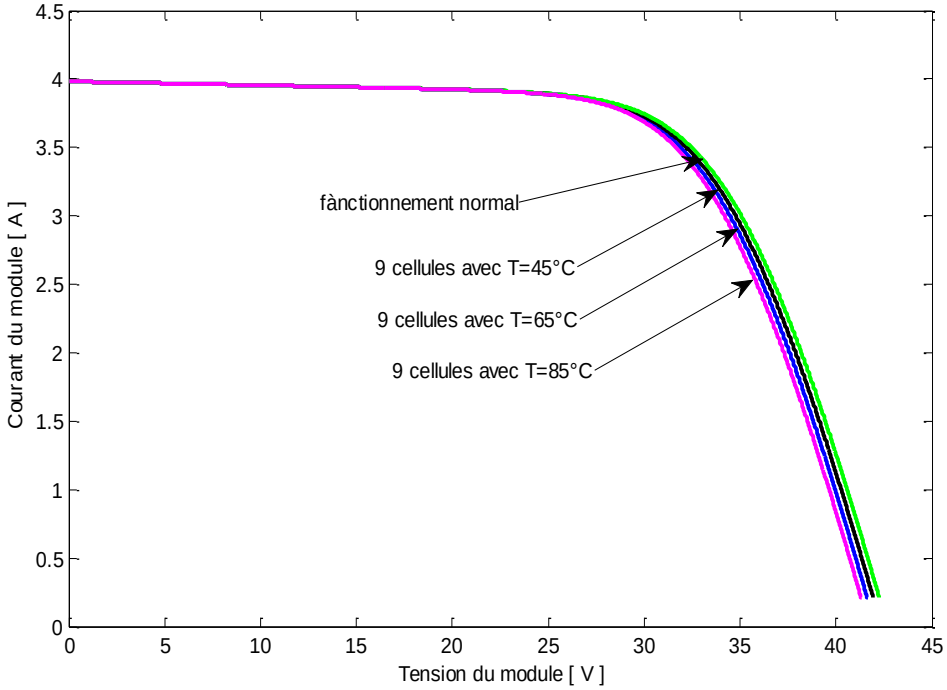
FigureIII.4 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de l'ombrage



FigureIII.5 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de mismatch type « Rs»



FigureIII.6 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de mismatch type « Rp »



FigureIII.7 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de mismatch type « T »

La Figure II.4 montre une famille de caractéristiques d'un module lors de différents scénarii d'ombrage. Les « bosses » présentes dans cette figure sont dues au fait qu'une ou plusieurs diodes de bypass se mettent en conduction. Selon le pourcentage d'ombrage sur la cellule, la diode de bypass se met en conduction à différents niveaux de courant de fonctionnement. Il est à remarquer également que la perte en tension est en fonction du nombre de diodes de bypass en conduction.

La Figure II.5 est le cas d'un défaut de mismatch dû à la dispersion de la résistance série. Dans cette figure, on voit que la perte en tension pour un courant donné est plus importante à mesure que la résistance série augmente. Pour une limite donnée, la perte en tension peut être suffisamment grande pour ensuite rendre la tension du groupe négative et faire basculer la diode de bypass en mode passant.

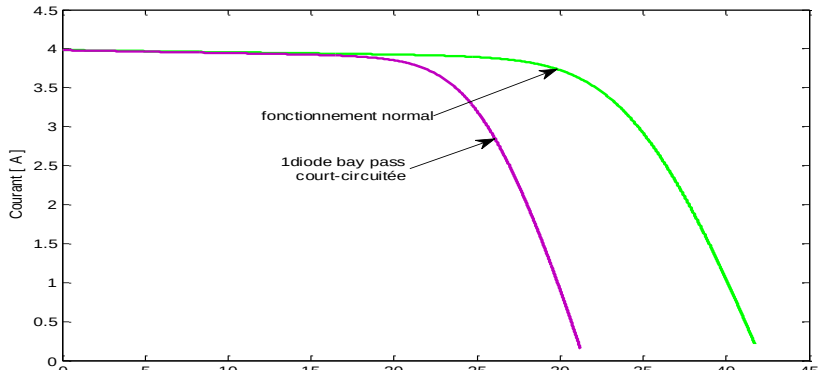
La Figure II.6 est le cas d'un défaut de mismatch dû à la dispersion de la résistance parallèle. Pour une tension donnée, la perte en courant est plus importante à mesure que la résistance parallèle est petite. Si la résistance parallèle est suffisamment petite, elle peut absorber quasiment la totalité du courant produit par la cellule.

La Figure II.7 est le cas d'un défaut de mismatch dû à la dispersion de la température des cellules.

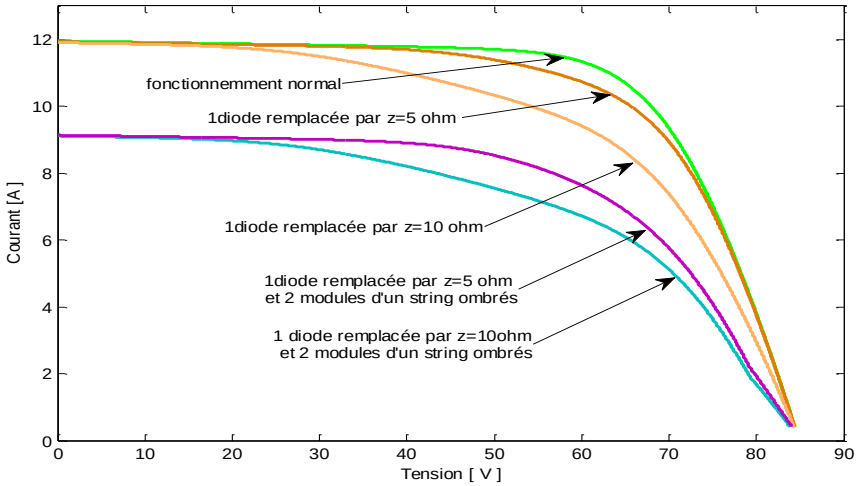
Dans ce cas, la tension chute en fonction de la croissance en température des cellules

III.3.2 défaut de diode bypass

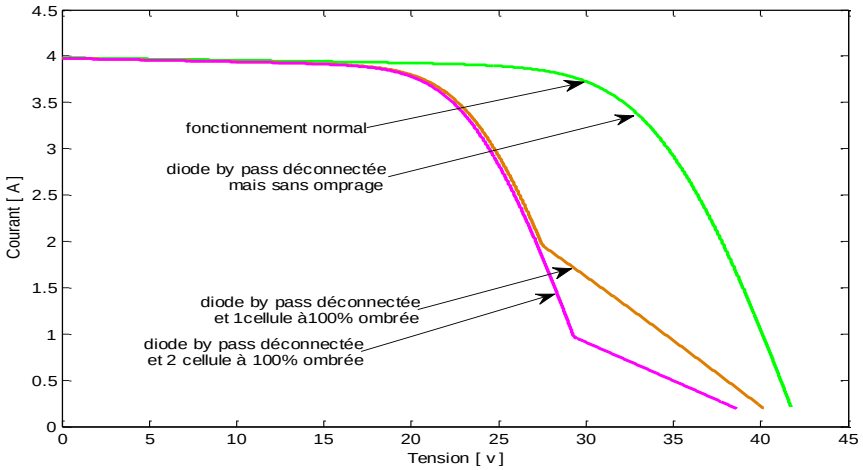
La Figure II.8 montre quelques résultats de simulation d'un module lors de différents défauts de diode de bypass. Les mêmes paramètres de cellule que dans le cas de défaut de mismatch sont utilisés dans cette



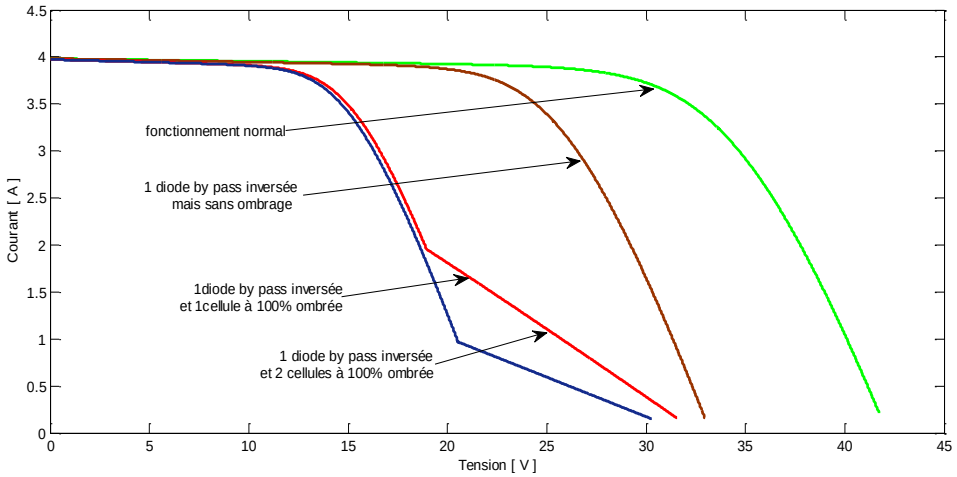
FigureIII.8 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (court-circuitée)



FigureIII.9 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (claquée)



FigureIII.10 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (déconnectée)



FigureIII.11 : caractéristiques I-V d'un module PV lors de diode bypass (inversée)

La Figure II.8 montre le cas d'une diode de bypass court-circuitée. Dans ce cas, un quart de la tension produite est perdue dans le module car il y a 4 diodes de bypass dans un module.

La Figure II.9 montre le cas où la diode de bypass est en défaut et se comporte comme une impédance. Ce type de défaut se manifeste de la même manière que le défaut de mismatch dû à une variation de la résistance parallèle. Plus l'impédance diminue, plus elle absorbe le courant produit par le groupe qui devrait être normalement fourni à la charge.

La Figure II.10 correspond au cas où la diode de bypass est déconnectée. Sans ombrage, aucune perte de courant ou de tension n'est présente dans le module. Avec un ombrage, la perte en tension augmente en fonction de la croissance de l'amplitude de l'ombrage car il n'y a plus de protection assurée par la diode de bypass.

La Figure II.11 montre le comportement d'un module quand une diode de bypass est inversée. Sans ombrage, cette diode de bypass est passante car la tension à ses bornes est positive. Un quart de la tension du module est perdu. Avec un ombrage, le module se comporte comme dans le cas où la diode est déconnectée car la diode est bloquée quand la tension à ses bornes est négative.

III.3.3 défaut de module

La figure suivante montre le comportement d'un string composé de deux modules en série lors de différents défaut de module.

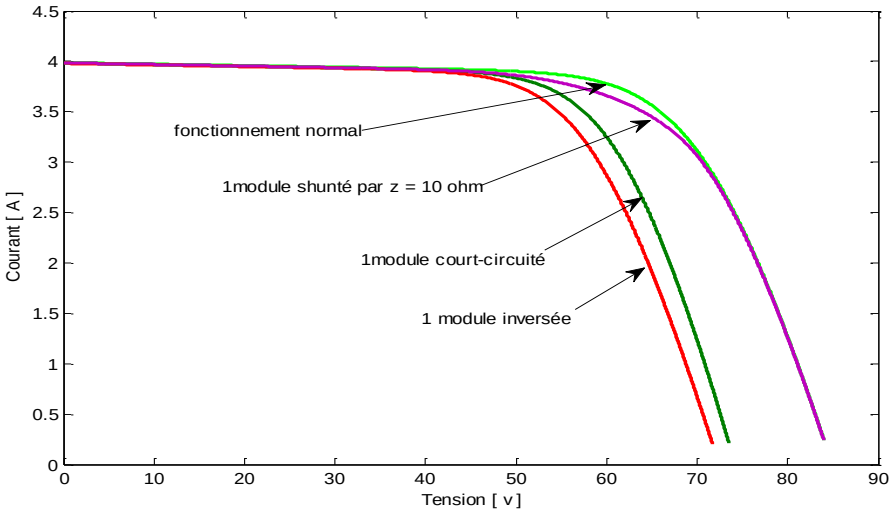


Figure III.12 : caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de module

III.3.4 défaut connectique

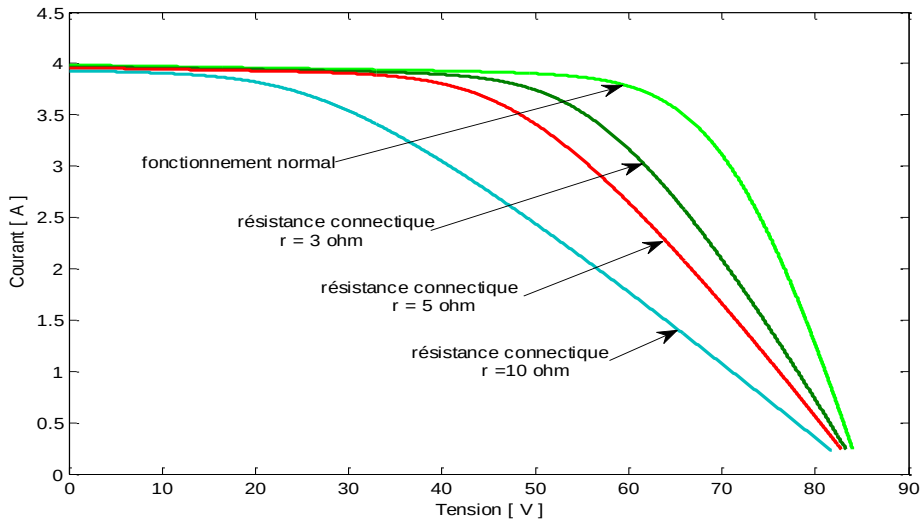


Figure III.13 : caractéristiques I-V d'un string PV lors de défauts de connectique

III.3.5 défaut de diode anti-retour

Le comportement d'un champ PV lors de défauts de la diode anti-retour composé de trois strings de deux modules est illustré dans la Figure II.14. Deux cas différents ont été examinés pour chaque type de défauts de la diode : string équilibrés et déséquilibré.
Le déséquilibre entre ces deux strings est intentionnellement provoqué en introduisant un défaut supplémentaire dans un des strings. Dans cet exemple, deux modules de l'un des deux strings sont complètement ombrés.

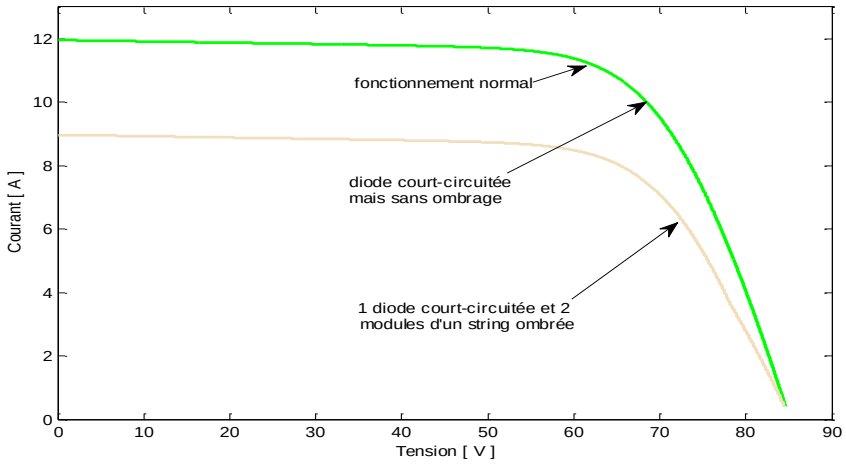


Figure III.14 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (court-circuitée)

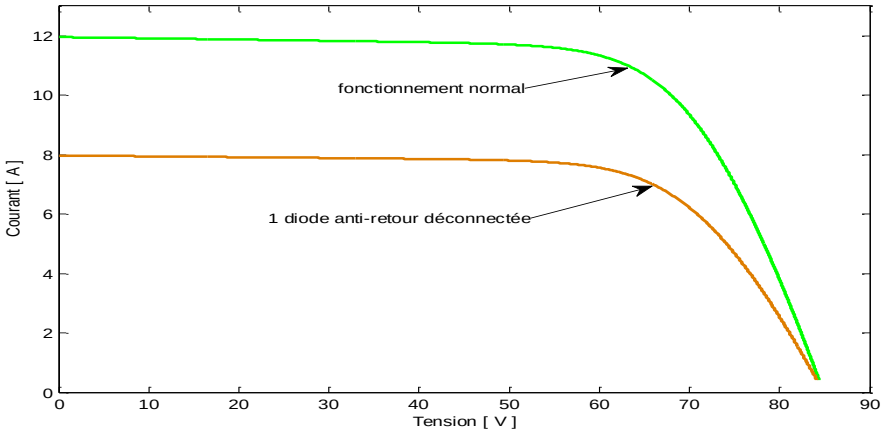


Figure III.15 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (déconnectée)

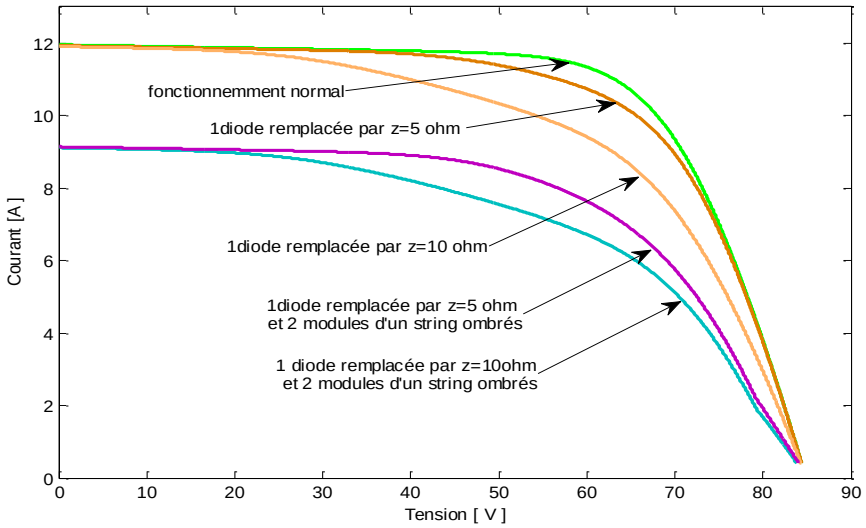


Figure III.16 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (claquée)

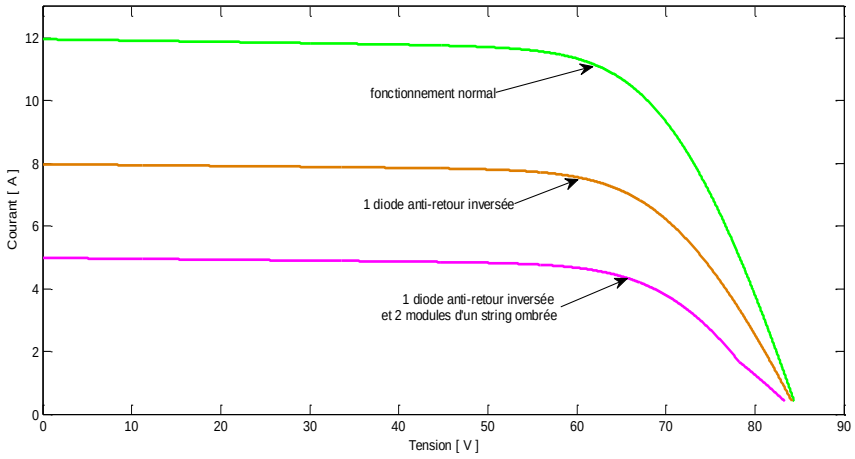


Figure III.17 : caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de diode anti-retour (inversée)

La Figure II.14 montre le cas où la diode anti-retour est court-circuitée. Si la tension des deux strings est équilibrée, le court-circuit de la diode de bypass n'affectera pas le comportement du champ. Si un string produit moins de tension que l'autre, le champ produira plus de courant quand la diode est en bon état que quand elle est court-circuitée.

La Figure II.15 montre le cas où une diode anti-retour est déconnectée. Il est évident dans ce cas que le champ perd la totalité du courant d'un string.

La Figure II.16 montre le cas où une diode anti-retour est défaillante et devient une impédance. Si la tension des deux strings est équilibrée, le champ provoque une chute de la tension et l'amplitude de cette chute est proportionnelle à l'impédance de la diode anti-retour. Cet effet est renforcé si un ombrage intervient en plus pour réduire la production du string encore en production. Par contre, dans ce cas, l'amplitude de la chute de tension est inversement proportionnelle à l'impédance de la diode anti-retour car plus l'impédance est grande plus elle s'oppose à la circulation du courant.

La Figure II.17 montre le cas où une diode anti-retour est inversée. Si la tension des deux strings est équilibrée, on perd la totalité du courant du string associé car la diode empêche le courant produit par le string de circuler. Par contre, dans le cas d'ombrage, la diode inversée laisse passer le courant (dans le sens inverse) débité par l'autre string.

III.4 Conclusion :

L'analyse de la caractéristique I-V peut être un moyen de visualiser l'influence de cas différents défauts le comportement de cette caractéristique pour cela paramètre de l'équation électrique de (cellule, module, string, champ) PV ont été modifié (Rs, Rp, ombrage, et T). Nous avons évalué, par la suite, les différences en tension entre les caractéristiques I-V en fonctionnement normal et défaillant.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

De ce qui précède, on peut conclure que l'énergie produite par le photovoltaïque est difficile à exploiter, cela est dù a la non linéarité de la caractéristique statique, de plus cette caractéristique change, si la température ou l'éclairement varient. Ce dernier changement entraîne une variation du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour le suivi du point de puissance maximale, quel que soit la valeur de l'éclairement ou de la température.

Ce mémoire est consacré à l'élaboration d'un système photovoltaïque et ces défauts.

En première partie, nous avons parlé sur le système et les composant du sur les caractéristiques I-V des cellules photovoltaïques et leurs paramètres les plus usuels.

En deuxième partie, nous avons proposé et développé une démarche de modélisation pour les systèmes PV en fonctionnement normal et défaillant, et on a classifié ces défauts en cinq catégories pour la modélisation

Dans la troisième partie, nous avons simulé les cinq défauts dans logiciel MATLAB bloc Simulink pour visualiser l'influence de ces défauts sur les caractéristique I-V du système.

La connaissance des défauts d'un système photovoltaïque permet d'appliquer un système de supervision pour la détection de ces défauts et d'éviter la détérioration de notre système.

References Bibliographiques

[1]. V. Agrawal, B. K. Panigrahi, P.M.V. Subbarao, Review of control and faul Diagnosis methods applied to coal mills, Journal of Process Control, In Press, Corrected Proof, Available online 7 May 2015.

[2]. M. Traore, A. Chammas, E. Duviella, Supervision and prognosis architecture based on dynamical classification method for the predictive maintenance of dynamical evolving systems, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 136, pp. 120-131, April 2015.

[3]. Lisa Hartling, Kenneth Bond, P. Lina Santaguida, Meera Viswanathan Donna M. Dryden, Dryden, Testing a tool for the classification of study designs in Systematic reviews of interventions and exposures showed moderate reliability and low accuracy, Journal of Clinical Epidemiology, Vol. 64, Issue. 8, pp. 861-871, August 2011.

[4]. A. Azadeh, O. Seraj, M. Saberi, A review and comparison of fuzzy regression Models for energy consumption estimation, in the proceeding of 2008 IEEE INDIN (6th IEEE International Conference on Industrial Informatics), pp. 1551 – 1555, Daejeon, 13-16 July 2008.

[5]. P. C. Choubey, A. Oudhia and R. Dewangan, A review: Solar cell current scenario and future trends, Recent Research in Science and Technology, Vol. 4, Issue. 8, pp. 99 – 101, 2012.

[6]. L. Bun, détection et localisation des défauts d'un champ PV, thèse doctorat, Laboratoire G2ELAB, École Doctorale EEATS, Université de GRENOBLE, 2011.

[7]. A. B.Arostegi, New Optimized Electrical Architectures of Photovoltaic Generators with High Conversion Efficiency, thèse doctorat, Unité de Recherche (LAAS-CNRS & TOTAL), École doctorale (ED GEET : Génie Electrique), Université Toulouse, 2013.

[8]. M. BRESSAN, Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque, thèse doctorat, Unité de recherche CNRS UPR 8521, École doctorale ED305, Université de Perpignan, 2014.

[9]. F.Bizzarri, A. Brambilla, L.Caretta, C. Guardiani, Monitoring performance and efficiency of photovoltaic parks, Renewable Energy, Vol 78, pp.314-321, June2015.

[10]. C. Bendel, A. Wagner, Photovoltaic measurement relevant to the energy yield, in the proceeding of 2003 IEEE PEC (3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion), pp. 2227-2230 Osaka, Japan, 18 May 2003.

[11]. Cahier Technique, "photovoltaïque 2010", Socomec SA, Strasbourg, 2010.

[12]. J.Birkl, P. Zahlmann, "protection contre des installations photovoltaïques : Exigences, procédures de test et applications pratiques", L'Artisan Electricien Electronicien N°439 - Avril/Mai 2010.

[13]. S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder, "Study of bypass diodes configuration on PV modules», Applide Energy 86 (2008).

[14]. V. Didier, "les onduleurs des systèmes photovoltaïques : fonctionnement, état de l'art et étude des Performances", rapport HESPUL, Villeurbanne, 2007.

[15]. S. Abdeslam, "Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau", mémoire de magistère, université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.

[16]. A. Ricaud, "modules et systèmes photovoltaïques", université de Savoir (Polytech' Savoie), sept 2008.

[17]. SMA Solar Technology AG, "indice de performance : facteur de qualité pour une installation photovoltaïque", Information technique, 2010.

[18]. K.Safia, L.Meriem, "contribution de l'effet des OTC sur les propriétés des cellules solaires: application aux structures: p-Si/n-Zno:Al", mémoire d'ingéniorat, université Ferhat Abbas, Sétif, 2011.

[19]. T. Rosario, "Commande et diagnostic des systèmes dynamiques : modélisation, analyse, commande par PID et par retour d'état, diagnostic", Ellipses Edition Marketing S.A., 2005.

[20]. Z. Benjellouli, "contribution à la modélisation d'une cellule solaire", mémoire de magistère, université de Bechar, 2009.