

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : 2018/ESEM 11/87



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : ELECTRONIQUE DES
SYSTEMES EMBARQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

**Par: MENDIL Abderraouf
ABDELLI Mourad**

Intitulé

**Développement de modèles mathématiques
d'aide au diagnostic des systèmes
photovoltaïques**

Soutenu devant le jury composé de :

DJAZIA Kamel	Université de M'sila	Président
DRIF Mahmoud	Université de M'sila	Encadreur
SAIGAA Djamel	Université de M'sila	Co-Encadreur
BOUCHELAGHEM Ahmed	Université de Msila	Examineur

Année universitaire : 2017 /2018

Remerciements

Nous remercions tous ceux qui nous ont, de près ou de loin, aidé à réaliser notre projet.

Nous tenons plus particulièrement à remercier chaleureusement nos encadreurs, Messieurs DRIF Mahmoud et SAIGAA

Djamel pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée tout au long de notre démarche, pour leur disponibilité et leurs précieux conseils. Ils nous ont guidés avec compétence et patience tout au long de notre projet. Aussi, nous avons tiré pleinement profit de leur vaste expérience dans le domaine.

Dédicaces

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

*A ma mère

J'espère qu'elle le trouve récompensant de tous les sacrifices q'elle a consentis pou moi.

*A mon père

En témoignage de ma sincère gratitude pour ses sacrifices qu'il a consentis pour moi et pour toute la famille. Je l'invite à être miséricordieux de Dieu.

*A mes frères

Leur trouve toute ma profonde affectation et mes profondes considérations.

*A celle qui m'aime

En témoignage de mon respect.

*A tous mes amis

En témoignage de mon amitié et mon attachement

SOMMAIRE

Tables des matières.....	3
Liste des Figures.....	6
Liste des tableaux.....	8
Introduction Générale.....	9
Chapitre 1.Généralités sur la conversion photovoltaïque.....	11
1.1 Introduction.....	12
1.2 Conversion photovoltaïque.....	12
1.2.1. Historique.....	13
1.2.2.Effet photovoltaïque.....	13
1.2.3. Principe général.....	13
1.2.4. Cellule solaire.....	14
1.2.5. Cellule solaire et différents régimes de fonctionnement.....	14
1.2.6. Modèle d'une cellule solaire.....	15
1.2.7. Paramètres de performance d'une cellule.....	17
1.2.8. Module Photovoltaïque.....	19
1.2.9. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités.....	21
1.2.9.1. Protuction contre l'effet d'ombrage d'un générateur.....	21
1.2.9.2.Protection contre les courants inverses.....	22
1.3. Conclusion.....	23
Chapitre 2. <i>Défaut de fonctionnement d'un GPV et techniques de diagnostic</i>	24
2.1. Introduction.....	26
2. 2 Défauts de fonctionnement d'un générateur PV.....	26
2.3. Classification des défauts de générateur PV.....	27

2.4. Symptômes des défauts.....	28
2.4.1. Défaut de mis match et l’ombrage	28
2.4.2. Défaut de diode by-pass.....	29
2.4.3. Défaut de module.....	30
2.4.4. Défaut de connectique	31
2.4.5. Défaut de diode anti-retour	31
2.4.6. Symptômes des défauts du GPV	32
2.5. Méthodes de diagnostic.....	33
2.5.1. Méthode d’infrarouge	34
2.5.2. Méthode électrique.....	34
2.5.3. Méthode de réflectométrie.....	34
2.5.4. Méthode d’analyse du point de fonctionnement.....	35
<i>2.6. Conclusion.....</i>	<i>36</i>
Chapitre 3.Modélisation et simulation des défauts.....	37
3.1 Introduction	38
3.2. Modèle mathématique du module PV en l’absence de défauts(module sain).....	38
3.3. Modèle mathématique du module PV en présence de défauts (module défaillant).....	40
3.3.1. Sous-modèle de défaut d’ombrage partiel	40
3.3.2. Sous-modèle de défaut de salissure et la poussière.....	40
3.3.3. Modèle de défaut dû au Mis-match	41
3.3.4. Défaut de diode by-pass	41
a) Défaut de diode by-passdu au court-circuité.....	42
b) Défaut de diode by-pass du la polarisation inversé	42
c) Défaut de diode by-pass du au circuit ouvert.....	42
3.4 Etude de simulation et résultats.....	43

3.5. Simulation et résultats.....	45
3.5.1. Cas du défaut due l'ombrage partiel.....	46
3.5.2. Cas du défaut dû à la salissure et à la poussière.....	47
3.5.3. Cas du défaut dû au défaut de mis-match type résistance série.....	49
3.5.4. Cas du défaut dû au défaut de mis-match type résistance parallèle.....	50
3.5.5. Simulation du défaut de diode by-pass.....	51
3.5.5.1 Simulation du défaut de diode by-pass dû au court-circuit.....	51
3.5.5.2 Simulation du défaut de diode by-pass dû la polarisation inveré.....	54
3.5.5.3 Simulation du défaut de diode by-pass dû au circuit ouvert.....	55
3.6. .Algorithme de détection et localisation des défauts (DLD)	56
3.7 Conclusion	58
Conclusion Générale	59
Références Bibliographiques.....	60

Liste des Figures

Figure 1. 1	Caractéristique I-V d'une cellule solaire sous différents régimes.....	14
Figure 1. 2	Circuit électrique équivalent du modèle a une diode.....	15
Figure 1. 3	Caractéristique I-V d'une cellule solaire.....	17
Figure 1. 4	: Mise en série des cellules solaires en module PV	19
Figure 1. 5	Caractéristique de l'association en série de cellules solaires.....	20
Figure 1. 6	Caractéristique de l'association en parallèle de cellules PV	20
Figure 1. 7	Caractéristique I-V et P-V d'une connexion mixte(série-parallèle) avec N_p est le nombre de modules en série et N_{pp} est le nombre de branches de modules en parallèle. ...	20
Figure 1. 8.	(a) Ombrage des modules par un cheminé de la maison, (b) Fonctionnement de la cellule dans le 3ème quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre.....	21
Figure 1.9	Système photovoltaïque en : (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre : échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass.....	22
Figure 2. 1.	Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de by-pass défaillante ...	29
Figure 2. 2	Schéma bloc d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle	30
Figure 2. 3	Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défaillante.....	31
Figure 2. 4	Symptômes de différents défauts.....	31
Figure 2. 5	Exemple de détection de défauts par thermographie infrarouge	33
Figure 2. 6	Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string	34
Figure 3.1	Schéma équivalent d'une cellule solaire	37
Figure 3.2	Schéma équivalent d'un module photovoltaïque.....	38
Figure 3.3	Schéma bloc du modèle proposé dans l'environnement Matlab/simulink.....	43
Figure 3.4	Schéma bloc utilisé pour produire les différents défauts.....	44
Figure 3.5	Caractéristiques I-V d'un champ PV avec différents degrés d'ombrage	46

Figure 3.6 : Caractéristique I-V de champ lors défaut de poussière.....	47
Figure 3.7Caractéristique P-V de champ lors défaut de poussière	47
Figure 3.8Caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de Résistance série.....	48
Figure 3.9Caractéristiques I-V d'un champ PV lors de défauts de Résistance Parallèle	49
Figure 3.10 Caractéristiques P-V d'un champ PV lors de défauts de Résistance Parallèle ...	49
Figure 3.11Caractéristiques I-V d'un champ PV lors diode by-pass court-circuité	50
Figure 3.12 Caractéristiques P-V d'un champ PV lors diode by-pass court-circuité.....	51
Figure 3.13 Caractéristiques I-V d'un champ PV lors diode by-pass polarisation inversé	51
Figure 3.14 Caractéristiques P-V d'un champ PV lors diode by-pass polarisation inversé ...	52
Figure 3.15 Caractéristiques I-V d'un champ PV lors diode by-pass circuit ouvert	53
Figure 3.16 Caractéristiques I-V d'un champ PV lors les différents défauts de diode by-pass	54
Figure 3.17Algorithme de détection et localisation des défauts (DLD).....	56

Liste des tableaux

Tableau 2. 1 Différents défauts de GPV	26
Tableau 2. 2 Classification des défauts et les anomalies d'un GPV	27
Tableau 2. 3 Symptômes des défauts de mismatch et d'ombrage	28
Tableau 2. 4. Différents états d'une diode by-pass défaillante.....	29
Tableau 2. 5Différents symptômes d'un module défaillant.....	30
Tableau 2. 6 Différents symptômes d'un module défaillant.....	32
Tableau 3.1 Différents paramètres indicateurs de défauts et leurs natures	44
Tableau 3.2. Caractéristiques électriques de module utilisé dans la simulation.....	45
Tableau 3.3Effet d'ombrage sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	46
Tableau 3.4. Effet de la poussière sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	47
Tableau 3.5Effet de la variation de la résistance en série sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	48
Tableau 3.6Effet de la variation de la résistance en parallèle sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	50
Tableau 3.7Effet de Diode de by-pass du au court-circuit sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	51
Tableau 3.8 Effet de Diode de by-pass du la polarisation inverse sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	52
Tableau 3.9Effet de Diode de by-pass du au circuit ouvert sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	53
Tableau 3.10 Effet de Diode de by-pass du sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.....	54

Chapitre

1

Généralités sur la conversion photovoltaïque

1.1. Introduction

L'énergie électrique provenant d'une conversion photovoltaïque à partir de l'énergie solaire est devenue une alternative incontournable aux autres sources énergétiques en voie d'épuisement tel que le pétrole. Cette nouvelle source énergétique a montré par sa grande souplesse et son aptitude au fonctionnement en milieu hostile d'être la solution intéressante aux moyens de production conventionnels. De même, son exploitation est loin d'être préjudiciable à l'environnement que les combustibles fossiles et aussi d'avoir une portabilité et flexibilité inégalée par rapport aux autres ressources hydraulique, géothermique.

La conversion de cette nouvelle forme énergétique en électricité fut possible grâce à la découverte de nouveaux systèmes faits à base de cellules photovoltaïques.

Ces dernières sont faites de matériaux constituant le siège du phénomène de Conversion photovoltaïque dont l'essentiel sera discuté à travers ce chapitre.

1.2. Conversion photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire repose sur le principe de l'effet photovoltaïque. Ce dernier permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de production et de transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur comme le silicium. Ce matériau est composé de deux couches, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. La mise en contact des deux couches à dopages opposés dans ce semi-conducteur en y ajoutant des contacts métalliques constitue un élément connu: la diode. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction, créant ainsi un paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, comme représentée sur la figure 1.1, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, l'apparition d'un photocourant indépendant de la tension est proportionnel au flux lumineux et à la surface de la cellule [1]

1.2.1. Historique

Découvert en 1839 par le physicien A. Becquerel, l'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 60 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales. L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité par les cellules PV [2]

1.2.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque dont le terme souvent abrégé par les lettres P et V est un phénomène physique propre 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 [2]

1.2.3. 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, entraîne 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 la relation suivante :

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (1.1)$$

Où :

I_0 : courant de saturation de la diode,

n : facteur d'idéalité de la diode,

k : constante de Boltzmann,

q : charge électrique (en coulomb),

T : température en Kelvin,

L'équilibre thermodynamique est modifié lorsque des porteurs de charge sont injectés par polarisation ou par illumination. L'introduction des quasi-niveaux de Fermi E_{Fp} et E_{Fn} permettent d'exprimer simplement le régime quasi-équilibre [3].

1.2.4. Cellule solaire

Il existe un grand nombre de technologies permettant la fabrication de cellules photovoltaïques, mais beaucoup sont encore en phase de recherche. Les cellules actuellement industrialisées en grande quantité sont produites à partir de silicium (environ 80% en 2010 pour le silicium cristallin « c-Si »). La technologie amorphe (a-Si) qui a été une des technologies préférées a connu une baisse dans le marché actuel par rapport à la technologie couche mince. Par exemple, le marché de la technologie CdTe (Cadmium Telluride) a augmenté de 2% en 2005 à 13% en 2010. Une autre technologie de type couche mince comme CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) et les autres technologies émergentes sont en voie de se développer.

1.2.5. Cellule solaire et différents régimes de fonctionnement

La cellule solaire est normalement conçue pour fonctionner comme générateur en fournissant l'énergie électrique convertie de l'énergie solaire à une charge. Par contre, il se peut que cette même cellule, lorsqu'elle est interconnectée avec d'autres cellules, fonctionne comme un récepteur en absorbant de l'énergie débitée par les autres cellules. La caractéristique électrique d'une cellule solaire sous différents régimes de fonctionnement (caractéristique dans 3 cadrans) est illustrée dans la figure 1.1.

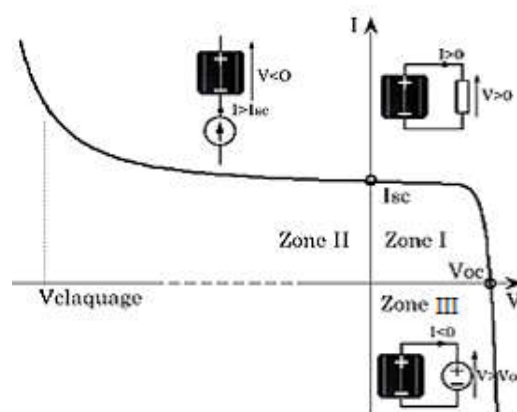


Figure 1.1. Caractéristique I-V d'une cellule solaire sous différents régimes

Dans cette figure, on peut remarquer deux points de fonctionnement importants : le courant de court-circuit (I_{sc}) et la tension de circuit ouvert (V_{oc}). Comme son nom indique, le courant de court-circuit correspond au courant quand la cellule est court-circuitée. Ce courant de court-circuit est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière, et pour une surface quelconque, ce courant de court-circuit dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit-ouvert est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant. Sa valeur est de l'ordre de 0.6 V pour la cellule de type Silicium cristallin. Ces deux points (V_{oc}) et (I_{sc}) délimitent le fonctionnement de la cellule en trois zones différentes.

Zone I : Elle correspond au fonctionnement en générateur de la cellule avec $0 \leq I \leq I_{sc}$ et $0 \leq V \leq V_{oc}$. C'est le fonctionnement dit normal de la cellule dans laquelle elle débite la puissance produite à la charge.

Zone II : Elle correspond au fonctionnement en récepteur de la cellule avec $I > I_{sc}$ et $V < 0$. Quand le courant traversant la cellule est forcé par un circuit extérieur à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. La croissance du courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite appelée tension de claquage. L'étude expérimentale sur différentes cellules de type cristallin a montré que la valeur de la tension de claquage varie entre -10 V et -30 V.

Zone III : Elle correspond de nouveau au fonctionnement en récepteur de la cellule, mais avec cette fois-ci $I < 0$ et $V > V_{oc}$. Quand la tension aux bornes de la cellule est amenée à dépasser sa tension de circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une limite, la cellule sera irrémédiablement endommagée [4].

1.2.6. Modèle d'une cellule solaire

Nous pouvons citer à titre d'exemple, le modèle à une diode (figure 1.2), qui est le plus utilisé de par sa simplicité d'élaboration, sa rapidité à simuler, ainsi que sa précision [5].

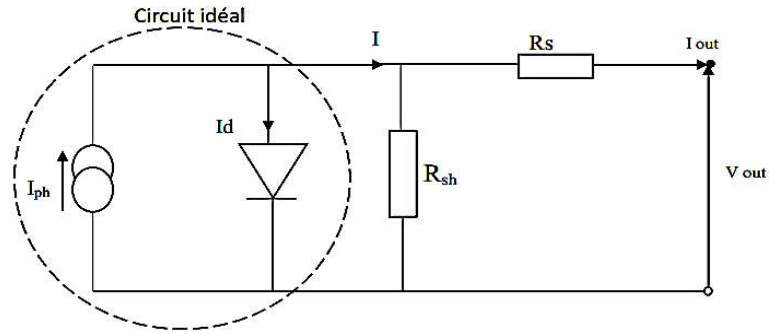


Figure 1.2. Circuit électrique équivalent du modèle à une diode

Ce modèle contient une source de courant I_{ph} qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule et une diode en parallèle, qui représente la jonction PN. La résistance série R_s tient compte des pertes ohmiques des matériaux, des métallisations et du contact semi-conducteur. La résistance parallèle ou shunt R_{sh} représente le courant de fuite qui se situe entre le dessus et le dessous de la cellule.

L'équation du modèle à une diode de la cellule PV est donnée par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{n V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

a) Le photo-courant

Le courant I_{ph} est le photo-courant qui dépend de la température et de l'ensoleillement ainsi que du coefficient de température du court-circuit généralement donné dans les références constructeurs (α). Le courant I_{ph} peut s'écrire comme suit :

$$I_{ph} = \left(I_{ph,STC} + \alpha(T_c - 25) \right) \frac{G}{G_{STC}} \quad (1.2)$$

Où :

$I_{ph,STC}$: est le photo-courant aux STC (1000W/m^2 , AM1.5) ; en [A].

α : est le coefficient de température du courant de court-circuit en [A/°C]

T_c : est la température cellule ; en [°C]

G : est l'éclairement reçu par la cellule solaire [W/m^2]

G_{STC} : est l'éclairement aux STC.

La température de la cellule peut être donnée en fonction de la température ambiante par l'expression suivante :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G \quad (1.3)$$

Où :

T_c : est température de la cellule en [°C]

T_a :est la température ambiante en [°C]

NOCT : est la température de fonctionnement normale de la cellule solaire (Normal Operating CellTempérature).

b) Le courant de saturation de la diode

Le courant de saturation inverse de la diode qui représente la valeur asymptotique du courant en polarisation inverse, dépend de la température et de largeur de bande d'énergie dumatériau de la cellule solaire.

$$I_o = I_{o.ref} \left(\frac{T_c}{T_{c.STC}} \right)^3 \exp \left(\frac{q E_g}{m T_{c.STC}} \right) \left(\frac{1}{T_{c.STC}} - \frac{1}{T_c} \right) \quad (1.4)$$

Où :

I_o : est le courant de saturation inverse à la température T_c

$I_{o.ref}$: est le courant de saturation inverse de référence

E_g : est l'énergie de la bande interdite. Pour le silicium, elle est égale à 1.12eV

La tension thermique V_t est donnée par l'équation suivante :

$$V_t = n \frac{kT}{q} \quad (1.5)$$

k :est la constante de Boltzmann

n : est le facteur d'idéalité de la diode.

q : est la charge d'électron.

1.2.7. Paramètres de performance d'une cellule

La caractéristique I-f (V) d'une cellule solaire illuminée a la forme représentée dans la figure 1.4 dont la tension aux bornes de la charge est balayée de zéro à V_{oc} .

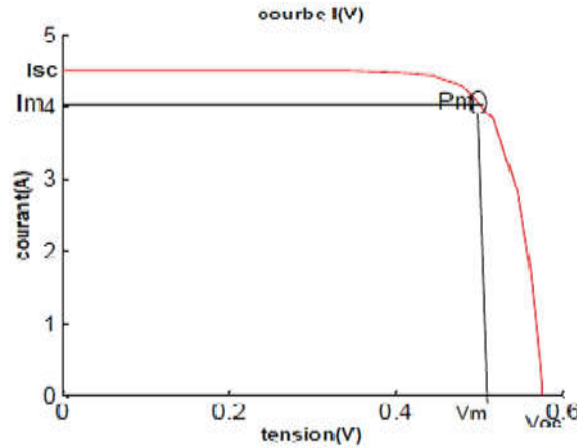


Figure 1.4. Caractéristique I-V d'une cellule solaire

Où :

I_m : est le courant délivré par la cellule au point de puissance maximale P_m .

V_m : est la tension aux bornes de la cellule au point de puissance maximale P_m .

a) Tension de circuit-ouvert

Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairage et sans circuit de Charge ($V=V_{oc}$, $I=0$). Elle est donnée par l'expression suivante [14] :

$$V_{oc} = n V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (1.6)$$

c) Courant de court-circuit

IL représente le courant délivré par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle ($V=0$). Il est donné par l'expression suivante :

$$I_{sc} = \left(I_{ph,STC} + \alpha (T_c - 25) \right) \frac{G}{G_{STC}} \quad (1.7)$$

d) Puissance débitée

La puissance fournie par la cellule est le produit I.V :

$$P = I.V = \left[I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{n V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right] . V \quad (1.8)$$

Cette puissance est au maximum, $P=P_m$ si la dérivée $\frac{\partial P}{\partial V} = 0$

e) Facteur de forme

Le facteur de forme est donné par le rapport entre la puissance maximale est le produit ($V_{oc}I_{sc}$)

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{I_m V_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.9)$$

f) Rendement de conversion

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{I_m V_m}{G A_c} \quad (1.10)$$

Où A_c est la surface active de la cellule (en m^2) et G est l'éclairement incident (en W/m^2)

1.2.8. Module Photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement connectées en série dans les modules couramment commercialisés. La mise en série des cellules solaires permet d'augmenter la puissance. Le courant reste identique tandis que la tension est multipliée par le nombre de cellules en série.

Un module photovoltaïque «classique » contient 36 ou 72 cellules. La Figure 1.5 montre un module contenant 36 cellules interconnectées en série[6].

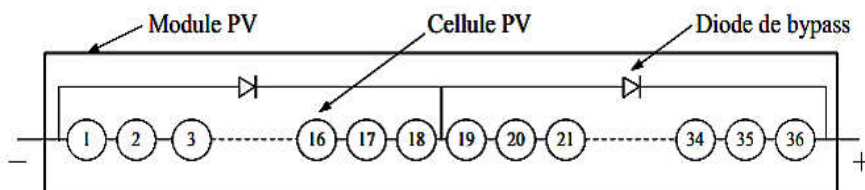


Figure 1.5. Mise en série des cellules solaires en module PV

Les caractéristiques I-V Et leur caractéristique de l'association en série et en parallèle sont représentées en figures 1.6 et 1.7.

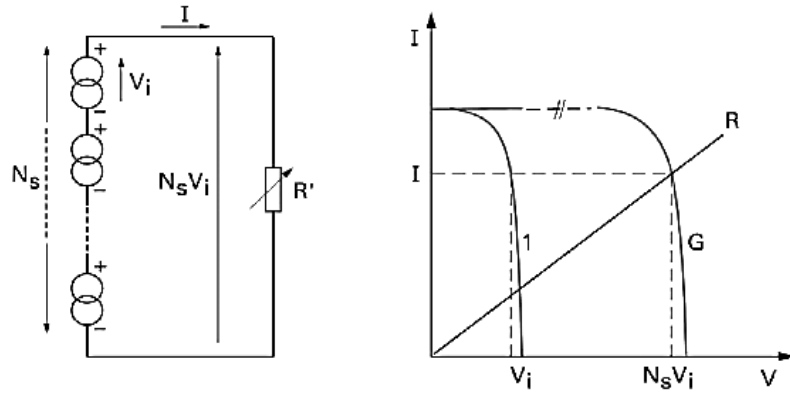


Figure 1.6. Caractéristique de l'association en série de cellules solaires

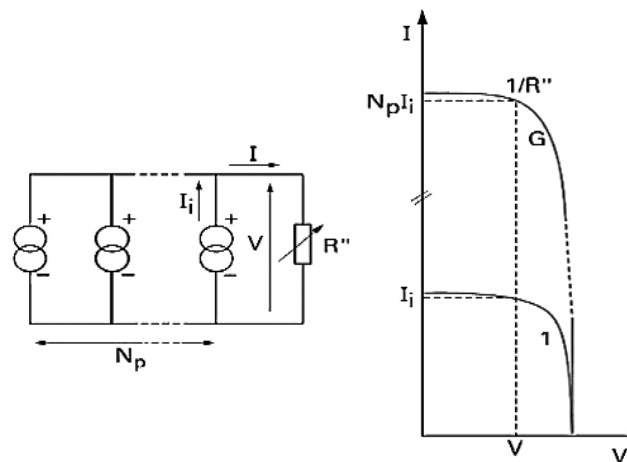


Figure 1.7. Caractéristique de l'association en parallèle de cellules solaires

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est parfois obligé d'utiliser un groupement mixte de modules PV, c'est-à-dire série-parallèle, la figure 1.8 montre les caractéristiques I-V et P-V pour un branchement mixte .

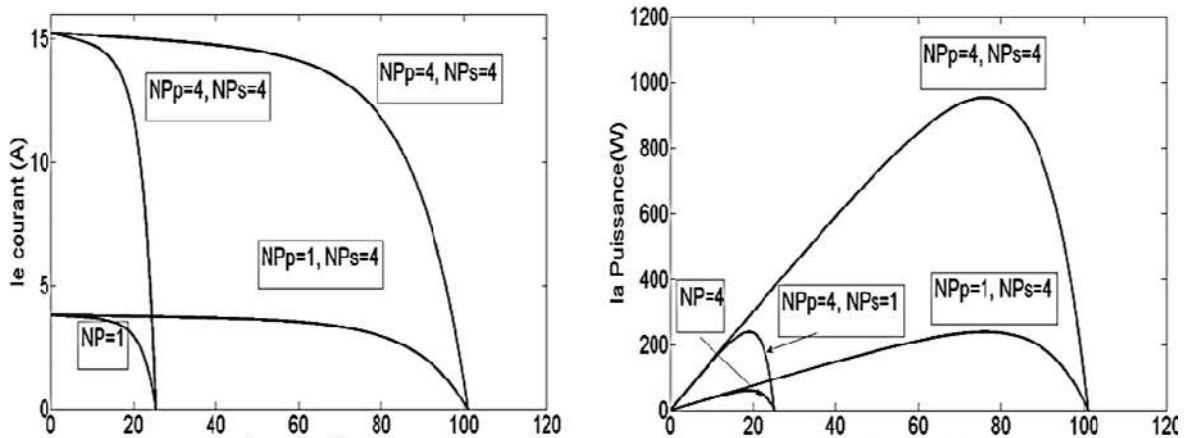


Figure 1.8. Caractéristiques I-V et P-V d'une connexion mixte (série-parallèle). Avec NPs est le nombre de modules en série et NPp est le nombre de branches de modules en parallèle.

1.2.9. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités

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

1.2.9.1. Protection contre l'effet d'ombrage partiel

L'ombrage partiel d'une cellule va forcer cette dernière à travailler dans le quadrant

Q3 (voir figure I-7), 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 ($UC \approx -15 \text{ V}$ à -25 V). La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds.

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 dans la cellule affectée et non à une augmentation significative du courant I_{sc} [7].

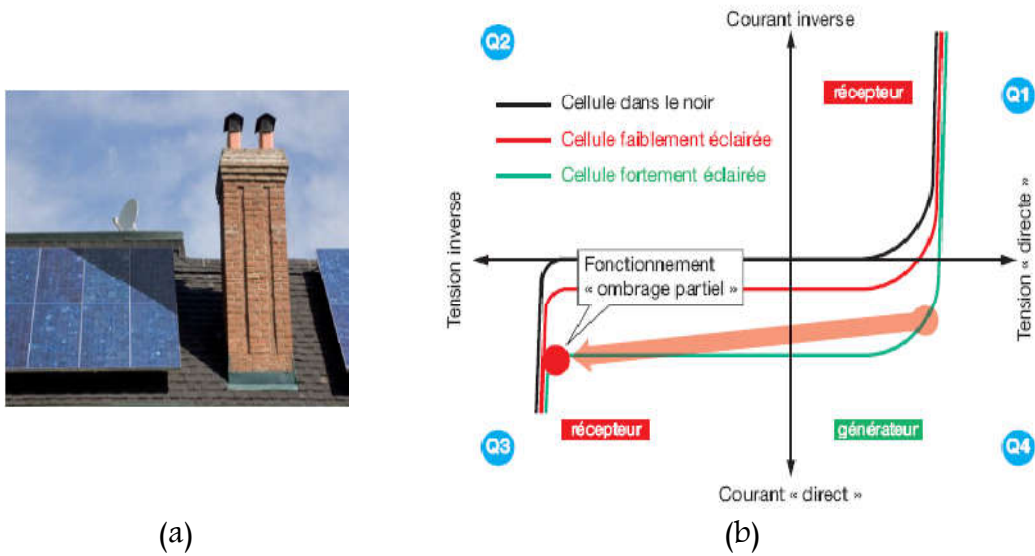


Figure 1.9. (a) Ombrage des modules par un cheminé de la maison, (b) Fonctionnement de la cellule dans le 3ème quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre.

Une diode By-pass va, en permettant au courant des autres éléments en série de contourner la cellule ombragée (Figure 1.10) et ce, pour éviter la surtension inverse ainsi que les points chauds liés à cet ombrage et laisser les autres cellules non ombragées de la chaîne générer leur courant normal, à l'aplace du courant sensiblement égal au courant réduit fourni par la cellule ombragée[13].

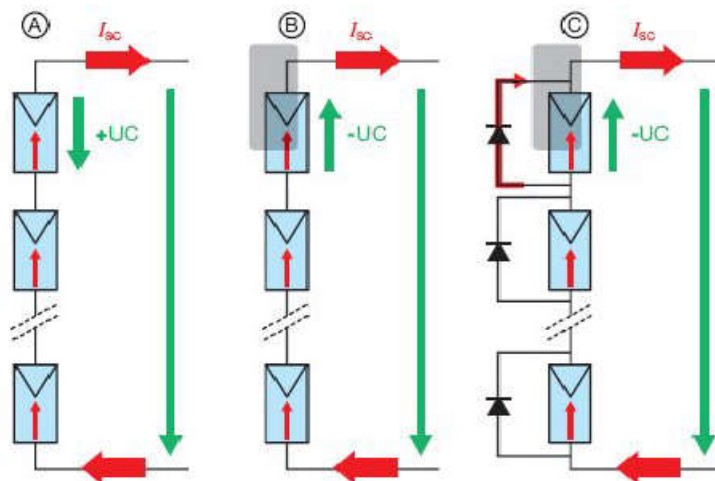


Figure 1.10. Système photovoltaïque en : (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre : échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass.

1.2.9.2. 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) 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 [4].

1.3. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est orienté vers les caractéristiques I-V des cellules et la conversion photovoltaïque 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.

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.

Dans les grandes installations, une station solaire PV peut comprendre des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques, où la stabilité et la qualité de la puissance générée sont en corrélation avec l'état de fonctionnement de chaque cellule. Le défi soulevé, dans ce type d'installation, est comment surveiller l'immense réseau de cellules photovoltaïques afin de maintenir le fonctionnement normal de la station. Généralement les générateurs PV sont considérés fiables par rapport aux autres systèmes, mais comme tous procédés, un système PV peut être exposé à plusieurs pannes provoquant le dysfonctionnement de ce dernier, plusieurs études ont constaté que la fiabilité des systèmes PV est fortement dépendante du matériel utilisé pour la construction des panneaux PV, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire. Un système PV peut avoir plusieurs défauts que ce soit les défauts de types construction, ou les défauts matériels et électriques causés par les conditions climatiques. A ce titre, nous pouvons citer le défaut le plus couramment rencontré dans un générateur PV qui est le défaut d'ombrage partiel.

Aussi bien, le fonctionnement d'un générateur PV avec défaut et anomalies, provoque une baisse de performance, voire l'indisponibilité totale du système. Toutes ses conséquences défavorables vont évidemment réduire la productivité, et donc réduire le profit de l'installation, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal. Dans la littérature, il existe plusieurs algorithmes et méthodes de détection et localisation de défauts, que ce soit pour les systèmes industriels en général ou pour les stations photovoltaïques. Ces algorithmes sont conçus en fonction de l'étape de diagnostic voulue (détection, localisation, identification de défaut). Leur application nécessite une quantité de données suffisantes sur l'état de la station.

Ce mémoire est organisé autour trois chapitres qu'on décrit comme suit : Dans le premier chapitre on a fait une description généralité sur la conversion photovoltaïque Comme nous avons faire exposé la Chaîne de conversion d'un système photovoltaïque de relater l'effet photovoltaïque et Cellule solaire et différents régimes de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre :La première étape : représentée les différent Défauts de fonctionnement d'un GPVLa deuxième étape : exposé les différentes techniques de diagnostic

Le dernier chapitre (chapitre 03) est consacré aux résultats de la simulation des différents dispositifs photovoltaïques et leur discussion par l'utilisation de modèle simple.et ce dernière chapitre est consacrée de discriminer la totalité des défauts choisis dans notre étude.

Chapitre

2

Défauts de fonctionnement d'un GPV et techniques de diagnostic

2.1. Introduction

La complexité des systèmes industrielle et L'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement deviennent aujourd'hui un enjeu très important de l'automatisation. Pour atteindre ces objectifs, les chercheurs ont développé plusieurs techniques et méthodes pour la surveillance des systèmes industriels, que ce soit pour les systèmes avec ou sans modèle.

L'objectif de ce chapitre est de donner les différents défauts de fonctionnement d'un GPV et les techniques de diagnostic.

2.2. Défauts de fonctionnement d'un générateur PV

Pour mieux comprendre nous avons défini quelques notions dans les points suivantes :

- **Défaut** : On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.
- **Diagnostic** : la détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut (complète la détection par l'isolation et l'identification).
- **Défaillance** : une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées.
- **Symptôme**: c'est le changement de la quantité observée du comportement normal.
- **Détection** : Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de Dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.
- **Localisation** : Elle consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

Le tableau 2.1 présente les principaux défauts et anomalies classés suivant l'emplacement de leur apparition au niveau d'un générateur PV[4].

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

Tableau 2.1 : Différents défauts de GPV

2.3. Classification des défauts de générateur PV

Il existe plusieurs classifications des défauts qui sont citées dans la littérature. Dans notre travail, nous avons opté pour la classification par niveau d'apparition de défaut et l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape (cellule, groupe de cellules, modules, strings, champ). Le tableau 1.2 présente cette classification.

La première colonne montre la succession des composants. La deuxième donne la nature des différents défauts intervenant dans les étapes et la dernière colonne donne la dénomination de chaque catégorie de défauts pour la modélisation et la dernière colonne donne la dénomination de chaque catégorie [19].

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination des défauts
Cellule	<ul style="list-style-type: none"> • Module arraché ou cassé • Pylônes, cheminée, sable, neige etc. • Echauffement des cellules • Dégradation des interconnexions • Fissure • Corrosion des liaisons cellules, Modules de performances différentes, • Détérioration des cellules, • Pénétration de l'humidité 	Défaut de mismatch et d'ombrage
Groupe de cellules	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des diodes • Absence de diodes, • Inversion de la polarité des diodes • Diode mal connectée • Diode court-circuitée 	Défaut de diode by-pass
Module	<ul style="list-style-type: none"> • Modules court-circuités, • Modules shuntés 	Défaut de module
String	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture du circuit électrique • Destruction de la liaison • Corrosion des connexions • Corrosion des contacts 	Défaut de connexion

Tableau 2.2. Classification des défauts et les anomalies d'un GPV

2.4. Symptômes des défauts

Dans cette partie, nous présentons des défauts en prenant de compte les impacts de la sévérité des défauts sur le comportement d'un GPV.

2.4.1. Défauts de mismatch et d'ombrage

Le défaut de mismatch est le défaut causé par le groupement de cellules possédant une des caractéristiques I-V non identique. Tout changement dans l'un de leurs paramètres 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. Deuxièmement, des

Chapitre 2

cellules PV peuvent être exposées à des conditions de fonctionnement différentes causées par les différents défauts, notamment les défauts mentionnés dans le Tableau 2.2.

Défauts	Symptômes
Ombrage	<ul style="list-style-type: none"> • Isc inchangé • Voc diminue pour un nombre important de cellules ombrées • Facteur de forme diminue en fonction du facteur d'ombrage • Présence d'un point d'inflexion
Poussière	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction d'Isc en fonction coefficient de transmission • Voc diminue pour un coefficient de transmission très faible
Résistance Série	<ul style="list-style-type: none"> • Voc et Isc inchangés • Facteur de forme diminue en fonction de la croissance de la valeur de R_s • Présence d'un point d'inflexion pour une valeur importante de R_s • Déviation de pente par rapport à celle de la courbe normale • Voc inchangée pour une faible sévérité • Facteur de forme diminue en fonction de la réduction de la valeur normale
Résistance Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> • Isc inchangé • Voc inchangée pour une faible sévérité • Facteur de forme diminue en fonction de la réduction de la valeur de R_p • Déviation de pente par rapport à celle de la courbe normale
Température	<ul style="list-style-type: none"> • Isc inchangé • Voc et le facteur de forme diminuent en fonction de l'augmentation de la température

Tableau 2.3. Symptômes des défauts de mismatch et d'ombrage.

2.4.2. Défaut de diode by-pass

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 2.4 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 2.1 montre un schéma d'un groupe de cellules (groupe $j^{\text{ème}}$) dans lequel la diode de bypass est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, prendre un des

états défailants de la diode : court-circuit, circuit ouvert, impédance quelconque et diode inversée.

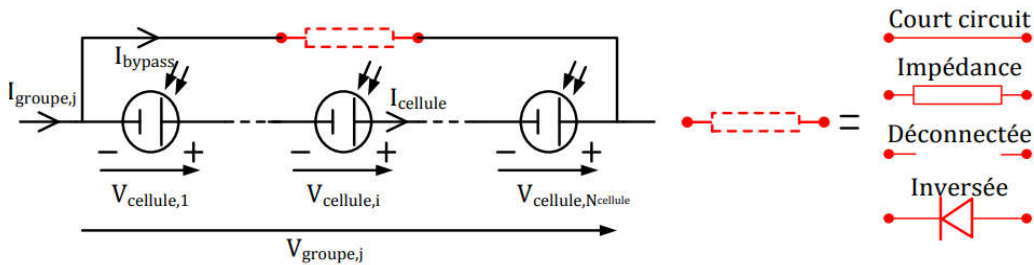


Figure 21. Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de by-pass défailante

Défaut	Symptômes
Court-circuit	<ul style="list-style-type: none"> • Isc inchangé • Voc diminue en fonction du nombre de diodes court-circuitées • Diminution de Voc est facile à quantifier (-10V par diode)
Circuit-ouvert	<ul style="list-style-type: none"> • Voc inchangée - Isc et FF diminuent fortement en fonction du nombre de cellules ombragées - Déviation de pente par rapport à celle de la courbe normale
Inversée	<ul style="list-style-type: none"> • Voc diminue en fonction du nombre de diodes inversées - Isc et FF diminuent fortement en fonction du nombre de cellules ombragées

Tableau 2.4. Différents états d'une diode by-pass défailante

2.4.3. Défaut de module

Le défaut de module se réfère à tous les défauts électriques associés à la connexion d'un module dans un string PV. Selon le tableau 2.5, ces défauts électriques sont :-module court-circuité, -module connecté en parallèle avec une impédance -et inversion de la polarité du module.

Défaut	Symptômes
Module	<ul style="list-style-type: none"> • Isc inchangé • Voc diminue pour le défaut de type court-circuit

	<ul style="list-style-type: none"> • Voc reste quasiment inchangée pour des faibles valeurs de la résistance qui shunte le module. Elle diminue progressivement en fonction de la diminution de la résistance • Déviation de la pente pour les défauts de type module shunté
--	--

Tableau 2.5. Différents symptômes d'un module défaillant

2.4.4. 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.

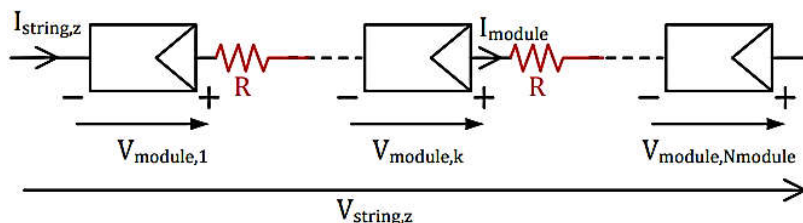


Figure 2.2. Schéma bloc d'un string PV avec la résistance de connectique non nulle

2.4.5. Défaut de diode anti-retour

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 2.3 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 défectueux de la diode[17][18].

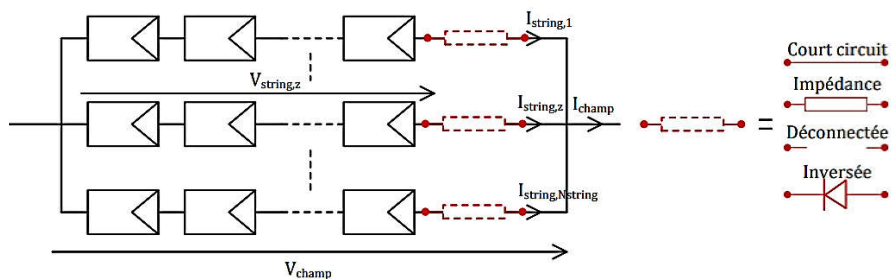


Figure 2.3. Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défectueuse

2.4.6. Symptômes des défauts du GPV

Les symptômes évoluent en fonction de trois facteurs principaux, à savoir :

- La sévérité des défauts : au fur et à mesure que l'amplitude du défaut évolue les symptômes changent.
- Condition de fonctionnement : l'ensoleillement affecte considérablement symptômes manifestés
- Type du GPV : Pour un GPV uni-modulaire, un string ou un champ PV l'effet du défaut n'est pas le même.

Dans cette étude, on se limitera à cinq symptômes qui se présentent fréquemment au niveau d'un GPV comme le montre la figure 2.4. Le choix des symptômes est l'étape cruciale qui fait réussir un algorithme de diagnostic.

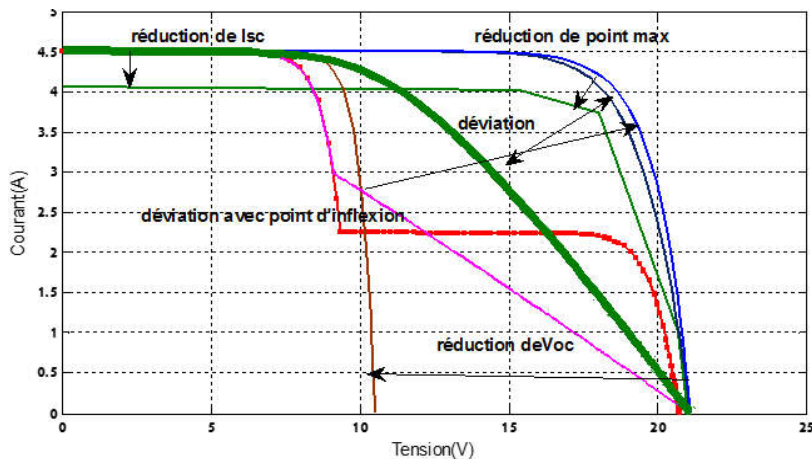


Figure 2. 4. Symptômes de différents défauts

Les études de simulation du comportement d'un module PV lors des défauts considérés ont montré qu'il est possible d'identifier des symptômes potentiels qui peuvent être utilisés pour remonter à la nature de défauts. Un défaut quelconque pourrait générer un seul ou plusieurs symptômes mais certains symptômes sont communs à plusieurs défauts. Donc, la combinaison des symptômes identifiés, appelés également signatures de défauts, permet d'identifier le défaut ou un groupe de défauts responsables du comportement examiné.

A titre d'exemple, la comparaison de la caractéristique I-V d'un GPV en défaut avec celle en fonctionnement normal peut conduire à l'identification des symptômes potentiels pour faire le diagnostic (tableau 2.6).

Symptôme 1	Il se traduit par la réduction de la puissance produite par le module PV qui nous alerte sur l'état de santé de notre générateur PV. Ce symptôme est efficient mais n'est pas concluent, car il semble évident qu'un défaut quelconque, une fois apparu, entraînera une perte de la puissance produite. Donc pour trouver l'origine d'un défaut, on doit recourir a Par ailleurs, on peut souligner que cette constatation n'est pas toujours vraie car certains défauts lorsqu'ils apparaissent tous seuls (défauts simples), ne conduisent à aucune perte de puissance ; cas de déconnexion de la diode de by-pass.
Symptôme 2	Il présente la réduction de la tension de circuit ouvert du module PV. Il est défini par l'écart entre la tension de circuit-ouvert d'un GPV en fonctionnement normal et celle en fonctionnement défaillant.
Symptôme 3	Il présente la réduction du courant de court-circuit du GPV. Il s'exprime par l'écart entre le courant de court-circuit du GPV en fonctionnement normal et celui en fonctionnement défaillant.
Symptôme 4	Il se réfère à la déviation brusque de la caractéristique I-V du GPV en défaut qui peut conduire la convexité de la courbe.
Symptôme 5	Il se réfère à la déviation de la pente de la caractéristique I-V en défaut par rapport à celle en fonctionnement normal.

Tableau 2.6. Différents symptômes d'un module défaillant

2.5. Méthodes de diagnostic

Plusieurs méthodes de diagnostic sont rapportées dans la littérature [14], à savoir :

- Méthode d'infrarouge
- Méthode électrique
- Méthode de réflectométrie
- Méthode d'analyse de point de fonctionnement

2.5.1. Méthode d'infrarouge

Il existe plusieurs méthodes non-électriques, destructives ou non destructives, pour diagnostiquer le défaut au niveau de la cellule solaire. Le défaut principal qui peut avoir lieu à ce niveau est la fissure de la cellule au niveau du module photovoltaïque. La méthode de l'imagerie d'infrarouge (caméra thermique) est largement appliquée. Cette méthode repose sur le fait que tous les matériaux émettent un rayonnement infrarouge sur

une plage de longueur d'onde qui dépend de la température du matériau. En examinant la distribution de la température au niveau du module, des anomalies (si elles ont lieu) peuvent être localisées.

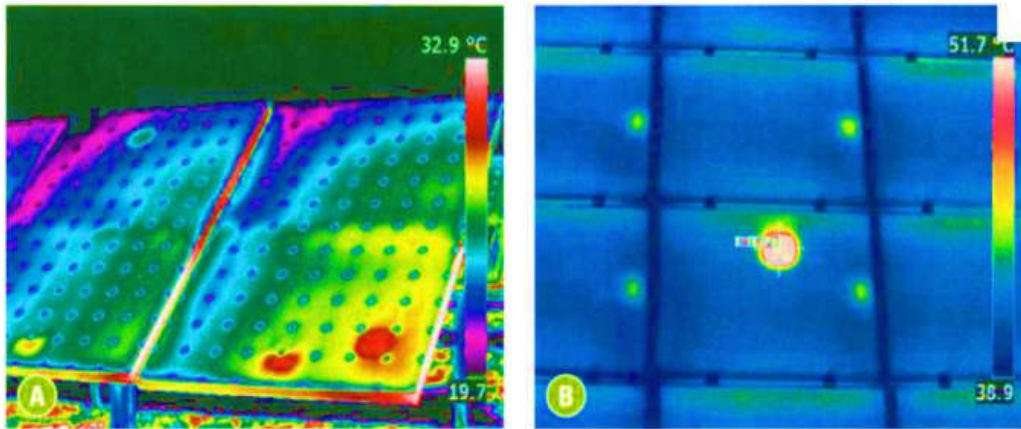


Figure 2.5. Exemple de détection de défauts par thermographie infrarouge

2.5.2. Méthode électrique

Les systèmes de monitoring actuels d'un système PV sont essentiellement intégrés aux onduleurs. Dans ce cadre, les grandeurs mesurées les plus courantes sont :

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

Il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires qui sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques. Ces données nécessitent un capteur spécifique (sonde de température et cellule de référence). Il convient, dans le cas où ces grandeurs sont nécessaires, de les traiter à l'aide d'un automate spécifique. Cet automate est relié à l'onduleur et centralise la totalité des données afin de les enregistrer et/ou de les envoyer sur un serveur distant [8].

2.5.3. Méthode de réflectométrie

La méthode de réflectométrie électrique est une méthode électrique qui permet de mesurer les caractéristiques électriques d'une ligne de transmission et de détecter tout point de discontinuité. La réflectométrie est couramment utilisée pour la détermination de

l'état électrique de câbles et de lignes. Elle fournit des informations pour la détection, la localisation et la caractérisation de défauts [9].

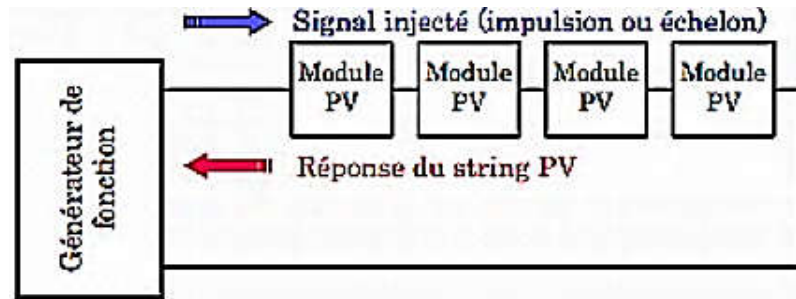


Figure 2. 6. Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV

2.5.4. Méthode d'analyse du point de fonctionnement

La comparaison de la puissance maximale mesurée à celle simulée peut apporter plus d'informations sur le comportement du générateur PV. L'idée principale consiste à identifier le type de défaut présent sur une installation PV et plus particulièrement sur le générateur PV[10]. Ces défauts sont regroupés en quatre familles :

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

2.6. Conclusion

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

Chapitre

3

Modélisation et simulation

3.1. Introduction

L'objectif principal de ce troisième chapitre est le développement d'un modèle mathématique universel décrivant le comportement d'un module PV en absence et en présence de défauts. Pour ce faire, nous avons exploité le modèle mathématique à une exponentielle (ou simple diode) pour créer des sous-modèles dont chacun d'eux exprime un défaut. En effet, nous nous sommes limité dans cette étude à sept défauts, qui peuvent avoir lieu au niveau d'un module PV.

Dans ce cadre, nous allons présenter chaque sous-modèle séparément, ensuite, nous présenterons le modèle général qui intègre les sept défauts faisant l'objet de cette étude. Nous présenterons également une étude de simulation afin de valider la véracité de ce modèle proposé.

3.2. Modèle mathématique du module PV en l'absence de défauts (module sain)

Le modèle mathématique exploité dans le cadre de cette étude est associé à une cellule qui s'en déduit à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le circuit électrique équivalent est représenté sur la figure 3.1. Le courant I à la sortie de la cellule est alors [15][16]:

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{m V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

I_{ph} : Photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A).

R_s : Résistance série de la cellule (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt de la cellule (Ω).

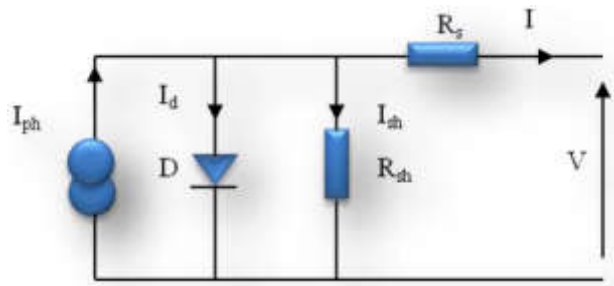


Figure 3.1. Schéma équivalent d'une cellule solaire

Comme tout module photovoltaïque est un ensemble de cellules associées en série et muni au moins d'une diode de by-pass pour protéger le module contre le mismatch, l'ombrage, le hot-spot, etc.(figure 3.2) donc les équations décrivant un module PV sont les suivantes :

- Equation $I_M(V_M)$ du module PV

$$I_M = I_{ph} - I_{oM} \left[\exp\left(\frac{V_M + I_M R_{sM}}{m v_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M R_{sM}}{R_{shM}} \quad (3.2)$$

- Equation $I_{BP}(V_{BP})$ de la diode de by-pass

$$I_{BP} = I_{oBP} \left[\exp\left(\frac{-V_{BP}}{m v_t}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

Où :

V_M et I_M sont respectivement la tension et le courant du module PV (avec $V_M = N_s V$ et

$I_M = I$)

R_{sM} et R_{shM} sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle du module (avec $R_{sM} = N_s R_s$; $R_{shM} = N_s R_{sh}$)

V_{BP} et I_{BP} sont respectivement la tension et le courant de la diode by-pass

I_{oBP} est le courant de saturation inverse de la diode de by-pass

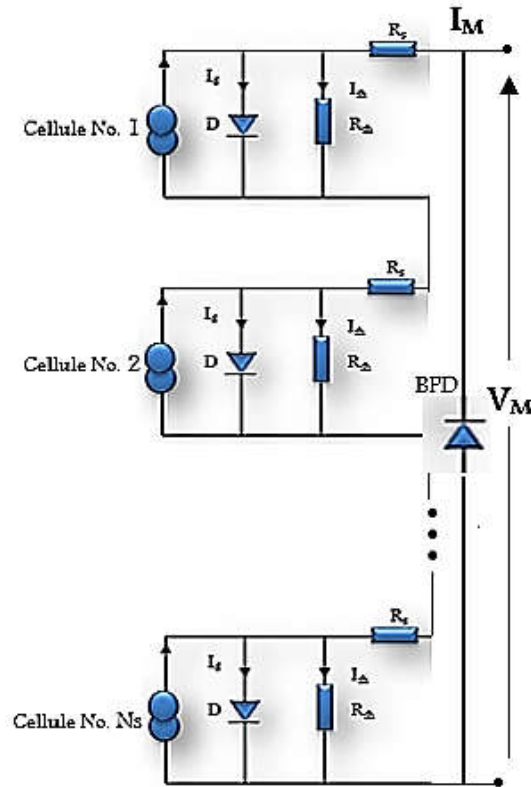


Figure 3.2. Schéma équivalent d'un module photovoltaïque

3.3. Modèle mathématique du module PV en présence de défauts (module défaillant)

3.3.1. Sous-modèle du défaut dû à l'ombrage partiel

Dans ce cas, on introduit dans l'équation 3.2 seulement le coefficient k_{sh} qui représente le pourcentage ou degré d'ombrage ($k_{sh}=1$; module totalement ombragé totale, $k_{sh}=0$; module totalement illuminé), où son effet apparait uniquement sur le courant photo-généré, i.e. il est proportionnel au degré d'ombrage. Ce sous-modèle est donné par la relation suivante :

$$I_M = (1 - k_{sh}) I_{ph} - I_{oM} \left[\exp \left(\frac{V_M + I_M R_{sM}}{m v_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M R_{sM}}{R_{shM}} \quad (3.4)$$

3.3.2. Sous-modèle du défaut dû à la salissure et la poussière

Le phénomène de salissure et poussière est défini comme une couche occultant le module PV et présente un coefficient de transmission k_{tr} qui dépend de l'épaisseur de

cette couche. Il varie de zéro (pour une couche épaisse) à 0.9 (pour une couche très légère) où son effet apparait également uniquement sur le courant photo-généré. Ce sous-modèle est donné par la relation suivante :

$$I_M = k_{tr} I_{ph} - I_{oM} \left[\exp \left(\frac{V_M + I_M R_{sM}}{m v_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M R_{sM}}{R_{shM}} \quad (3.5)$$

3.3.3. Sous modèle du défaut dû au mis-match

Le défaut de mis-match est le défaut causé par le groupement de cellules possédant des caractéristiques I-V non identiques. Tout changement dans l'un des paramètres de l'équation 3.1 conduira à la dissemblance de leur caractéristique. Dans notre étude, on considère deux types de défauts : défaut dû à la dispersion de la résistance série et défaut dû à la dispersion de la résistance parallèle.

Dans ce sous-modèle, le comportement de la caractéristique I-V est étudié lorsque le paramètre de la résistance série augmente d'un certain pourcentage k_{m-rs} . Dans ce cas, une éventuelle oxydation des contacts métalliques ou de la connectique peut parfois apparaître. Quant au défaut de mismatch dû à la résistance parallèle, on peut parfois enregistrer la diminution de la résistance parallèle d'un certain pourcentage k_{m-rsh} . Dans ce modèle, les autres paramètres sont considérés sans effets ($k_{sh} = 0$, $k_{tr} = 1$). Alors, ce sous-modèle peut s'exprimer par la relation suivante :

$$I_M = I_{ph} - I_{oM} \left[\exp \left(\frac{V_M + I_M R_{sM} (1 + k_{m-rs})}{m v_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M R_{sM} (1 + k_{m-rs})}{R_{shM} (1 - k_{m-rsh})} \quad (3.6)$$

3.3.4. Défaut de diode by-pass

Dans son bon état, la diode de by-pass 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.

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. Dans cette étude, on se limitera aux trois états défaillants de la diode, à savoir: le court-circuit, le circuit ouvert, l'inversion de la

polarité. En effet, nous introduit dans l'équation de la diode un paramètre de contrôle k_{BP} qui exprime les trois défaut suivants: - $k_{BP}=-1$ (diode inversée, - $k_{BP}=0$ (diode court-circuitée), $k_{BP}=1$ (diode en circuit ouvert)

a) Défaut de diode by-pass dû au court-circuit

La tension du groupe de cellules s'annule. Le courant du groupe de cellules constituant le module PV est égal à la somme du courant circulant dans les cellules et de celui circulant dans le chemin court-circuit. 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. Dans ce sous-modèle, nous avons :

$$\begin{aligned} V_{BP} &= (R_{BP} I_{BP} + V_{oBP}) \\ \text{Avec } V_M &= k_{BP} V_{BP}; k_{BP} = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Où : R_{BP} la résistance dynamique de la diode (Ω)

I_{BP} Le courant traversé la diode (A)

V_{oBP} La barrière de potentielle (V)

a) Défaut de diode by-pass dû la polarisation inverse

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.

$$\begin{aligned} V_{BP} &= (R_{BP} I_{BP} + V_{oBP}) \\ \text{Avec } V_M &= V_{oBP} K_{BP}; k_{BP} = -1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

b) Défaut de diode by-pass dû au circuit ouvert

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.

$$\begin{aligned} V_{BP} &= (R_{BP} I_{BP} + V_{oBP}) \\ \text{Avec } V_M &= V_{oBP} K_{BP}; k_{BP} = 1 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Après avoir présenté les différents sous-modèles exprimant les sept défauts faisant l'objet de ce travail, nous présentons dans la section suivante le modèle proposé. Ce modèle intègre tous les coefficients et facteurs indicateurs des défauts en question.

$$I_M = k_{tr}(1 - k_{sh})I_{ph} - I_{oM} \left[\exp\left(\frac{V_M + I_M(1 + k_{m-rs})R_{sM}}{m v_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M(1 + k_{m-rs})R_{sM}}{(1 - k_{m-rsh})R_{shM}} \quad (3.10)$$

$$\text{Avec } V = V_{BP}k_{BP}$$

3.4. Simulation et résultats

Pour élucider les différents effets des paramètres indicateurs de défauts, nous avons implémenté le modèle développé de l'équation 3.10 et réalisé une étude de simulation à l'aide de logiciel Matlab/Simulink. En effet, sous forme de schéma bloc, ce modèle est constitué de quatre blocs inter-liés (figure 3.3) :

- Les paramètres climatiques (éclairage ; en W/m^2 et température ; en $^{\circ}C$) et les paramètres indicateurs de défauts comme entrées, à savoir : le degré d'ombrage ($k_{sh}= 0 \div 1$), le coefficient de transmission ($k_{tr}=0 \div 0.9$), le paramètre de mismatch type résistance série ($k_{m-rs}= 0 \div 1$), le paramètre le paramètre de mismatch type résistance parallèle ($k_{m-rsh}= 0 \div 1$) et paramètre indicateur du défaut de la diode de by-pass (diode court-circuité ; $k_{BP}=0$, diode inversée ; $k_{BP}=1$)
- Le cœur ou le bloc central représente le modèle mathématique exprimé par l'équation 3.10,
- Et le bloc de sortie permet la visualisation des résultats sous forme graphique (courbe I-V) et numérique (paramètres électriques ; V_{oc} , I_{sc} , P_{mp}).

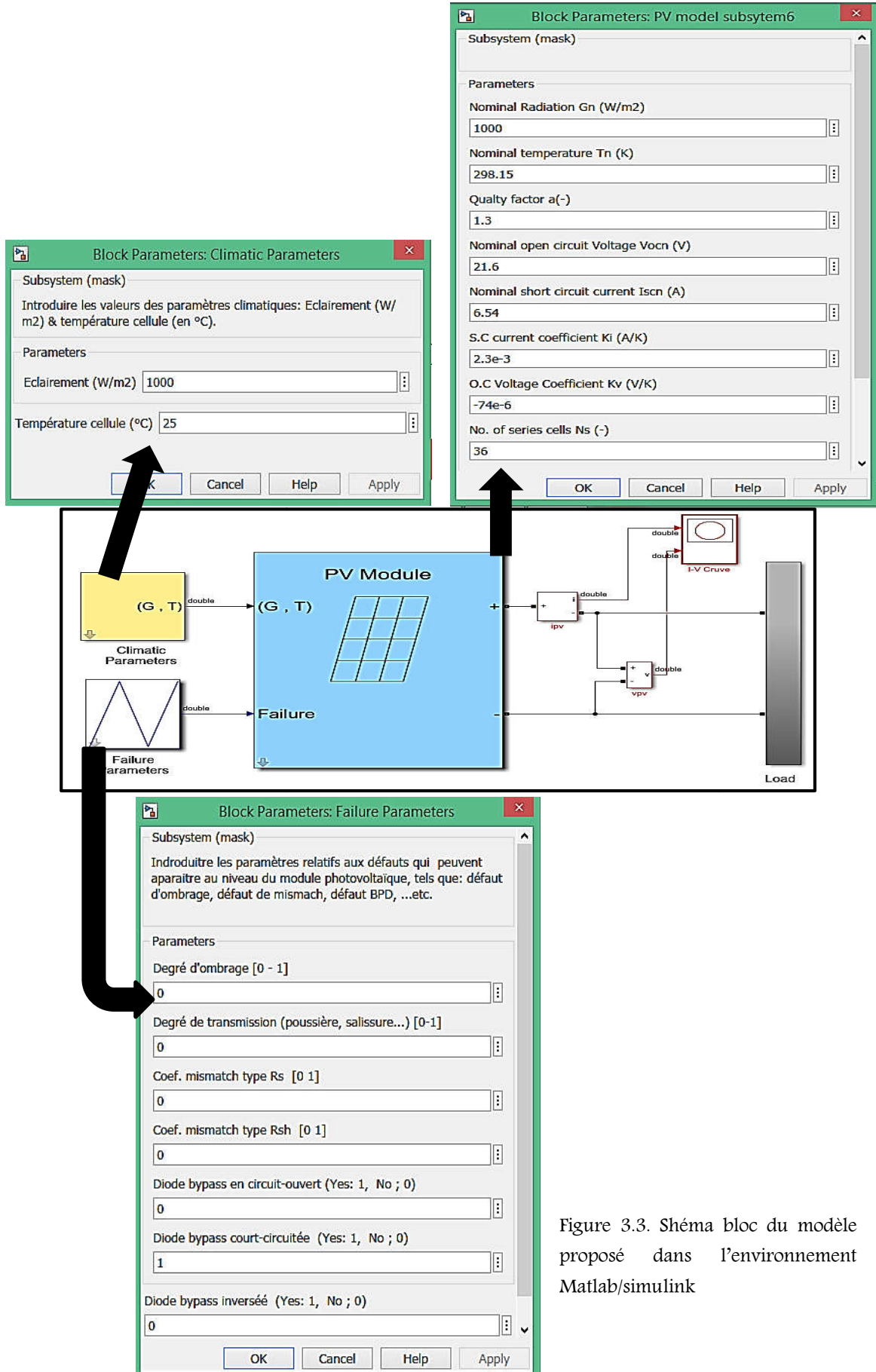


Figure 3.3. Schéma bloc du modèle proposé dans l'environnement Matlab/simulink

Il est à noter que ces paramètres indicateurs de défauts sont introduits pour chaque module sous forme de vecteur.

	k_{sh}	k_{tr}	k_{m-rs}	k_{m-rsh}	k_{BP}
Module sain (aucun défaut)	0	1	0	0	1
Ombfrage partiel	]0 1[	1	0	0	1
Ombfrage total	1	1	0	0	1
Poussière ou salissure	0	]0 0.9[	0	0	1
Mismatch type R_s	0	1	]0 1[	0	1
Mismatch type R_{sh}	0	1	0	]0 1[	1
Diode by-pass court-circuitée	0	1	0	0	0
Diode by-pass en circuit-ouvert	0	1	0	0	1
Diode by-pass inversée	0	1	0	0	-1

Tableau 3.1. Différents paramètres indicateurs de défauts et leurs natures

3.5. Simulation et résultats

Pour élucider les différents effets de paramètres indicateurs des défauts, nous avons réalisé une étude de simulation à l'aide de logiciel Matlab/Simulink.

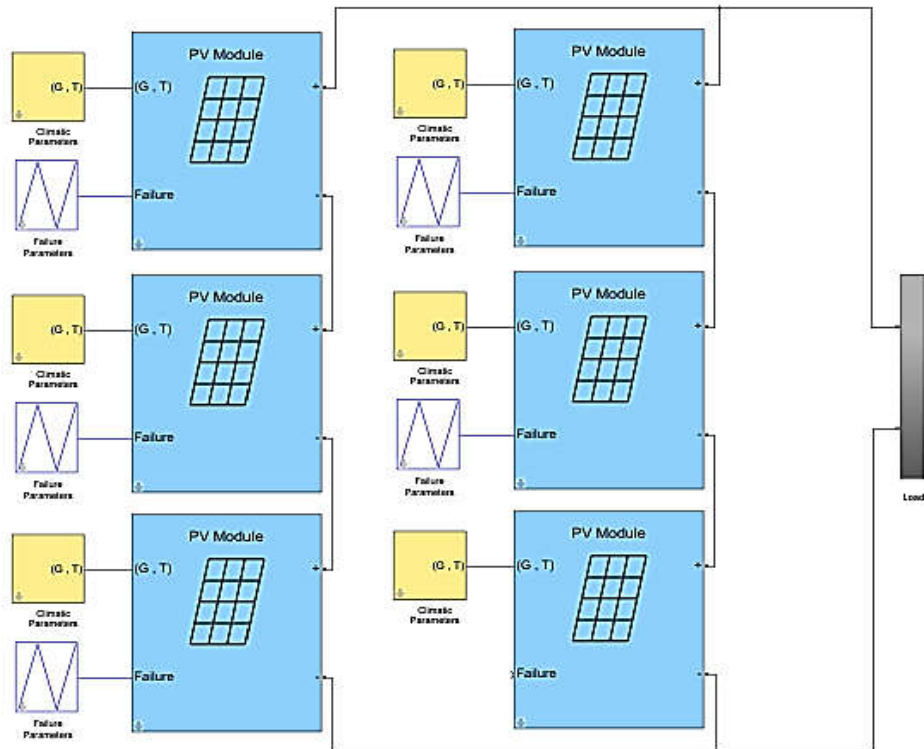


Figure 3. 4. Schéma bloc utilisé pour produire les différents défauts.

Dans cette étude, nous avons procédé à la simulation du comportement d'un champ photovoltaïque d'une configuration de 3x2 (2 branches en parallèle de 3 modules PV chacun) sous différents défauts. Dans les sections suivantes, nous présenterons les résultats des différents cas envisagés.

Le module photovoltaïque faisant l'objet de cette étude de simulation possède les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques électriques sous (STC)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	coefficient de tension KV (k/V)	coefficient actuel KI (A/K)	Ns cellules associées en série	Facteur de qualité a (-)	Température (C°)	Eclairement (W/m)
Les valeurs de module	6.54	21.6	$-74e^{-7}$	$2.3e^{-3}$	36	1.3	25	1000

Tableau 3.2. Les Caractéristiques électriques de champ utilisé dans la simulation

3.5.1. Cas du défaut dû à l'ombrage partiel

Pour étudier l'effet du défaut dû à l'ombrage partiel sur le champ PV en question, nous avons introduit un vecteur d'indicateurs des défauts dont seulement le degré ou le pourcentage d'ombrage qui varie. Dans ce cas d'étude, plusieurs scénarios ont été envisagés, à savoir :

- un module ombragé à moitié ($k_{sh}=0.5$),
- un module totalement ombragé ($k_{sh}=1$),
- 02 modules d'une même branche ombragés à moitié,
- 02 modules d'une même branche totalement ombragés
- une branche totalement ombragée.

La Figure 3.5 rassemble les caractéristiques I-V issues des différents cas d'ombrage envisagés et le tableau 3.2 regroupe tous les résultats obtenus. Il est à noter que d'une façon générale, plus le module est ombragée (en pourcentage de sa surface) plus la perte de puissance générée est importante. En outre, l'effet relatif de l'ombrage est d'autant plus important quand l'ensoleillement est fort.

Selon les résultats de simulation obtenus pour ce type de défaut on peut remarquer que :

- ✓ I_{sc} inchangé
- ✓ V_{oc} diminue pour un nombre important de cellules ombrées
- ✓ Facteur de forme diminue en fonction du facteur d'ombrage
- ✓ Présence d'un point d'inflexion

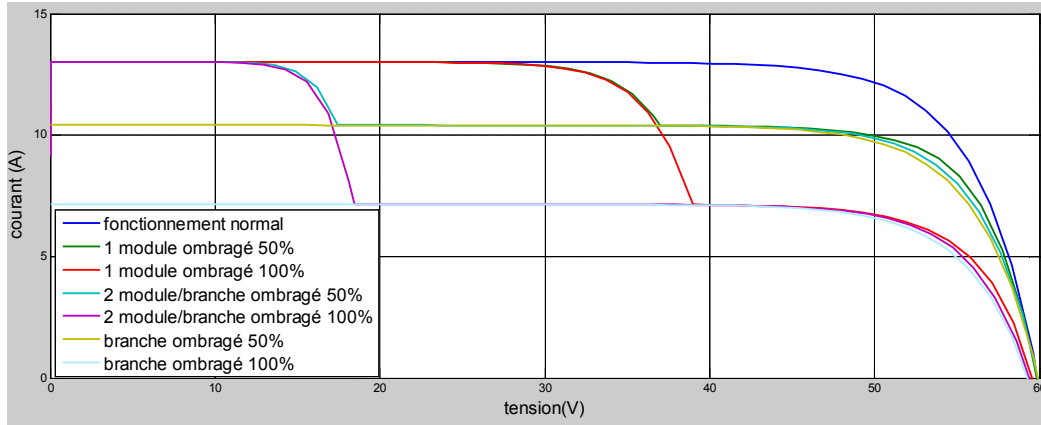


Figure 3.5 : Caractéristiques I-V d'un champ PV avec différents degrés d'ombrage

Partie du champ ombragée	Degré d'ombrage	Paramètres électriques			Pertes
	k_{sh}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
1 module	0.5	13.02	60	469	23
1 module	1.0	13.02	60	413	32
2 modules/branche	0.5	13.01	60	463	24
2 modules/branche	1.0	13.01	59	302	50
1 branche	0.5	9.76	59	455	25
1 branche	1.0	6.15	59	299	51

Tableau 3.3. L'effet d'ombrage sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.2. Cas du défaut dû à la salissure et à la poussière

Dans le même schéma bloc et même paramètre de configuration de champ PV nous avons Réalisé la figure suivante et nous remarquons la réduction de courant de court-circuit avec une variation légère de tension de circuit ouvert selon la sévérité de défaut.

- ✓ Réduction d' I_{sc} en fonction coefficient de transmission
- ✓ V_{oc} diminue pour un coefficient de transmission très faible

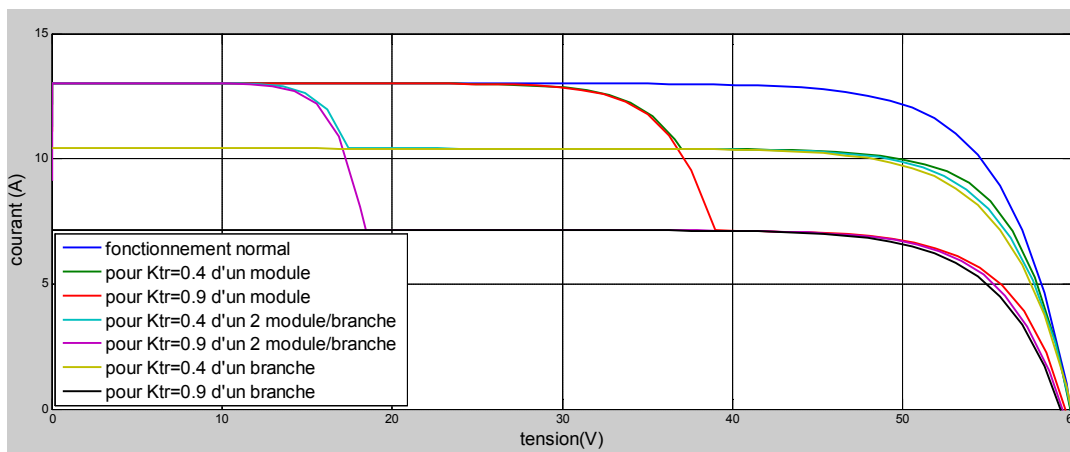


Figure 3. 6. Caractéristique I-V de champ lors défaut de poussière

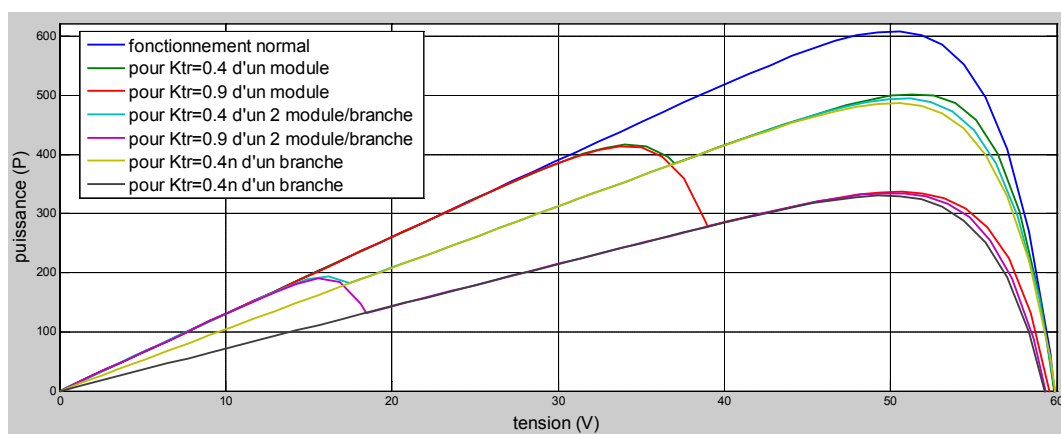


Figure 3.7 : caractéristique P-V de champ lors défaut de poussière

Perte affectée par le poussière	Coefficient de transmission	Paramètres électriques			Pertes
		$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$P_{mp}(w)$	
1 module	0.4	13.02	60	502	17
1 module	0.9	13.02	60	414	32
2 modules/branche	0.4	13.02	60	495	19
2 modules/branche	0.9	13.01	59	334	29
1 branche	0.4	10.42	59	487	20
1 branche	0.9	7.16	59	330	46

Tableau 3.4.L'effete de la poussière sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.3. Cas du défaut dû au défaut de mis-match type résistance série

La résistance série (R_s) du module PV a un grand impact sur la pente de la courbe I-V près de la tension en circuit ouvert (V_{oc}), donc la valeur de la résistance série R_s est calculée en évaluant la pente dI/dV de la courbe IV au V_{oc} . L'équation de R_s est dérivée en différenciant l'équation I-V, puis en réorganisant en termes de R_s . La figure suivante présente l'effet de la variation de la résistance en série sur la courbe courant-tension Sans Matlab.

Selon les résultats de simulation obtenus pour ce type de défaut on peut remarquer que :

- ✓ V_{oc} et I_{sc} inchangés
- ✓ Facteur de forme diminue en fonction de la croissance de la valeur de R_s
- ✓ Présence d'un point d'inflexion pour une valeur importante de R_s
- ✓ Déviation de pente par rapport à celle de la courbe normale
- ✓ V_{oc} inchangée pour une faible sévérité
- ✓ Facteur de forme diminue en fonction de la réduction de la valeur normale

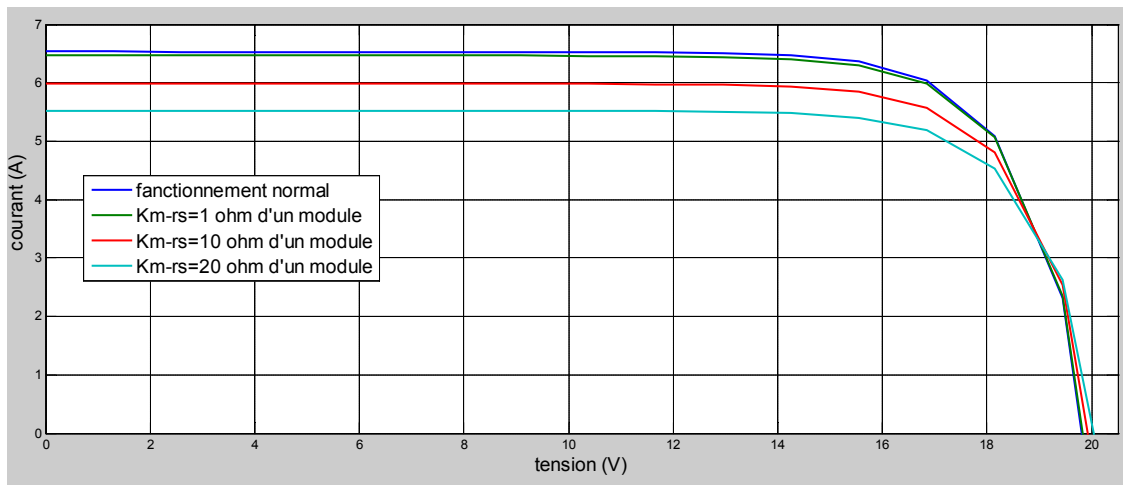


Figure 3.8. Caractéristiques I-V d'un module PV lors de défauts de Résistance série.

Le comportement d'un module PV en fonction de différentes valeurs de la résistance série est montré dans la Figure 3.8. Plus la résistance de connectique est importante, plus la tension du module chute pour un courant donné.

Défaut de mis match	résistance série	Paramètres électriques			Pertes
	k_{m-rs}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
Fonctionnement normal	0	6.6	19.8	101	0
1 module	1	6.5	20	101	0
1 module	10	6	19.9	94	6.9
1 module	20	5.5	19.8	87	14

Tableau 3.5. L'effet de la variation de la résistance série sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.4. Cas du défaut dû au défaut de mis-match type résistance parallèle

La figure 3.9 illustre, pour une tension donnée, la perte en courant qui est élevée lorsque la résistance parallèle diminue. Si cette résistance est suffisamment petite, elle peut absorber tout le courant généré et faire apparaître une forte déviation de la caractéristique I-V par rapport à celle du fonctionnement normal. Selon les résultats de simulation obtenus pour ce type de défaut on peut remarquer que :

- ✓ Le courant de court-circuit est inchangé
- ✓ La tension de circuit ouvert est inchangée pour une faible sévérité
- ✓ Le facteur de forme diminue en fonction de la réduction de la valeur de la résistance shunt.
- ✓ Déviation de pente par rapport à celle de la courbe normale.

Nous avons représentés sur la figure suivante la simulation des différents valeurs de la Résistance parallèle (R_p).

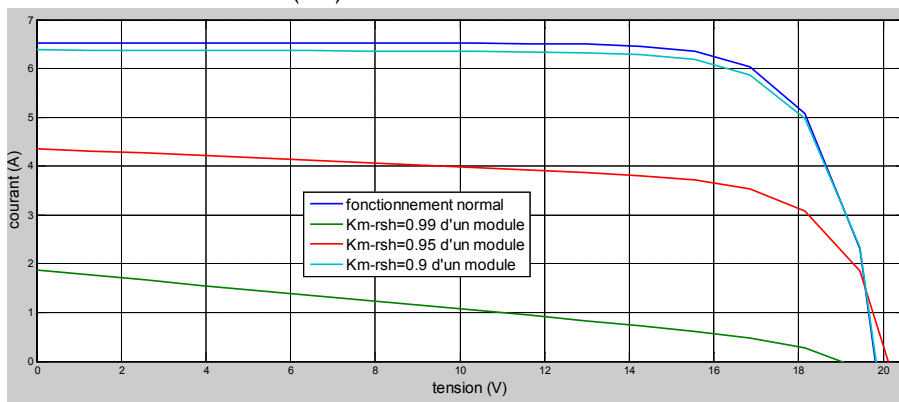


Figure 3.9. Caractéristiques I-V d'un module PV lors de défauts de Résistance

Parallèle

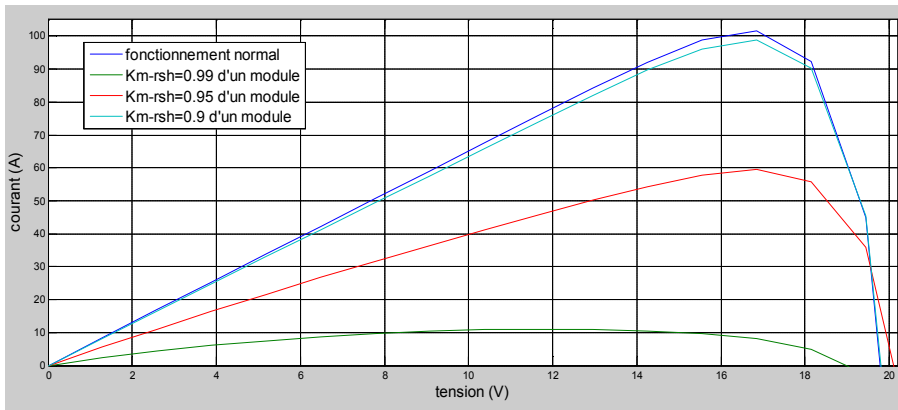


Figure 3.10. Caractéristiques P-V d'un module PV lors de défauts de Résistance

Parallèle

Défaut de mis match	résistance parallèle	Paramètres électriques			Pertes
	k_{m-rsh}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(A)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
Fonctionnement normal	0	6.5	19.9	101	0
1 module	0.9	6.3	19.9	99	2
1 module	0.95	4.3	20.2	59	42
1 module	0.99	1.8	19	11	89

Tableau 3.6. L'effet de la variation de la résistance parallèle sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.5. Simulation du défaut de diode by-pass

Les figures 3.11 et 3.12 présente les caractéristiques I-V & P-V du module en présence de la diode by-pass court-circuitée. Le courant d'un module sain et défectueux est égale à celui de la cellule mais la tension du circuit-ouvert du module sain est supérieur à la tension de circuit-ouvert du module défectueux, ce qui influe sur la puissance du module (sain ou défectueux). Ceci est dû à la présence de la diode by-pass court-circuitée dans le module défectueux.

3.5.5.1. Simulation du défaut de diode by-pass dû au court-circuit

Selon les résultats de simulation obtenus pour ce type de défaut on peut remarquer que :

- ✓ Le court de court circuit I_{sc} inchangé
- ✓ La tension de circuit ouvert diminué en fonction de nombre de diode

Courtcircuiteès

Diminution de V_{oc} est facile à quantifier (-10V par diode)

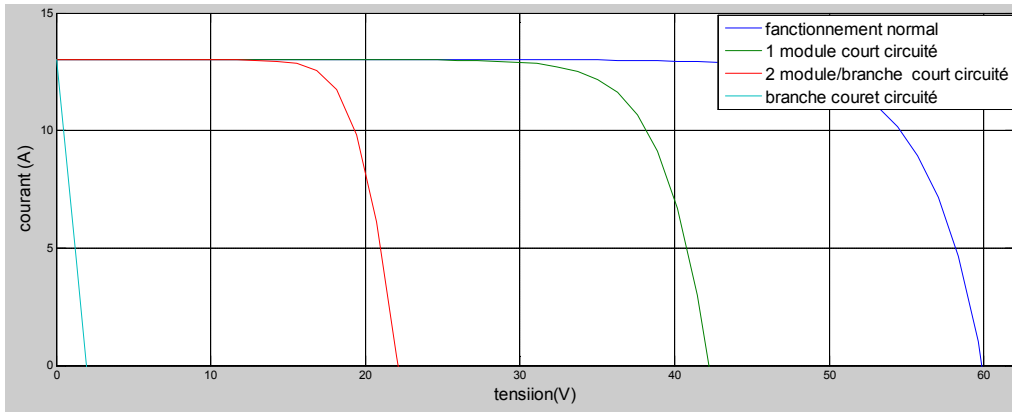


Figure 3.11. Caractéristiques I-V d'un champ PV lors diode by-pass court-circuité

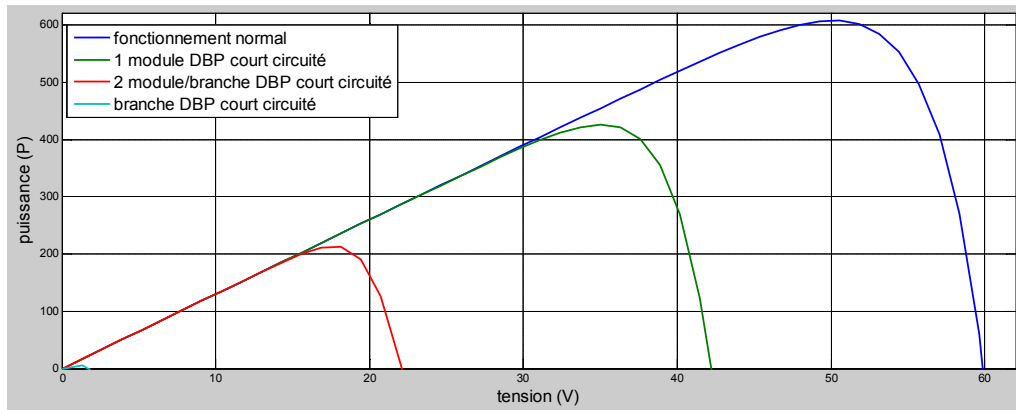


Figure 3.12. Caractéristiques P-V d'un champ PV lors diode by-pass court-circuité

Défaut de Diode de by-pass	court-circuité	Paramètres électriques			Pertes
		k_{BP}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(A)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
Fonctionnement normal	0	13.02	60	608	0
1 module	0	13.02	42	426	30
2 modules/branche	0	13.02	22	213	65
1 branche	0	13.02	2	6	92

Tableau 3.7. L'effet de Diode de by-pass du au court-circuit sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.5.1. Simulation du défaut de diode by-pass dû la polarisation inverse

La figure 3.13 et la figure 3.14 montre résultat de simulation d'un champ PV défilent (diode by-pass polarisation inversé) Selon les résultats de simulation obtenus pour ce type de défaut on peut remarquer que :

- ✓ V_{oc} diminue en fonction du nombre de diodes inversées
- ✓ I_{sc} et FF diminuent fortement en fonction du nombre de cellules ombragées

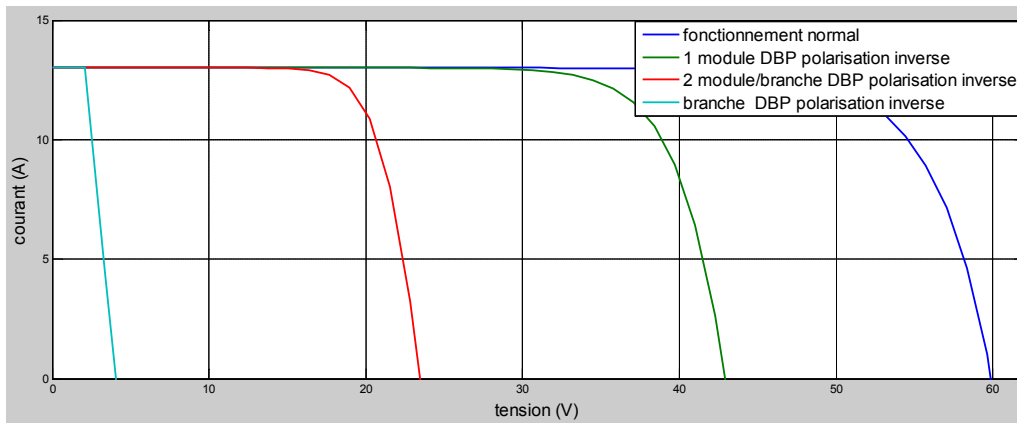


Figure 3.13. Caractéristiques I-V d'un champ PV lors diode by-pass polarisation inversé

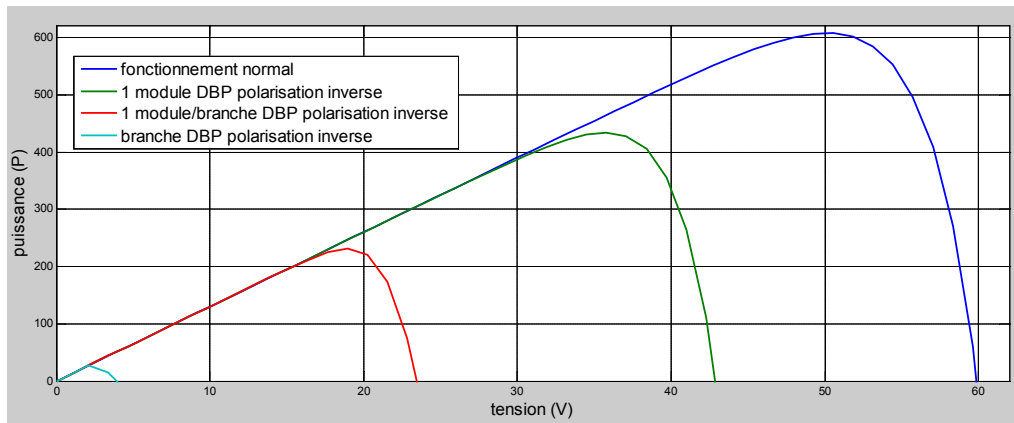


Figure 3.14. Caractéristiques P-V d'un champ PV lors diode by-pass polarisation inversé

Défaut de Diode de by-pass	polarisation inversée	Paramètres électriques			Pertes
	k_{BP}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
Fonctionnement normal	0	13.02	60	608	0
1 module	-1	13.02	42	435	28
2 modules/branche	-1	13.02	22	231	62
1 module	-1	13.02	4.5	27.3	96

Tableau 3.8. L'effet de Diode de by-pass du la polarisation inversée sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.5.2. Simulation du défaut de diode by-pass dû au circuit ouvert

La figure 3.15 montre Résultat de simulation d'un champ PV défilent (diode by-pass circuit ouvert).

- ✓ V_{oc} inchangée
- ✓ I_{sc} et FF diminuent fortement en fonction du nombre de cellules ombragées - Déviation de pente par rapport à celle de la courbe normale

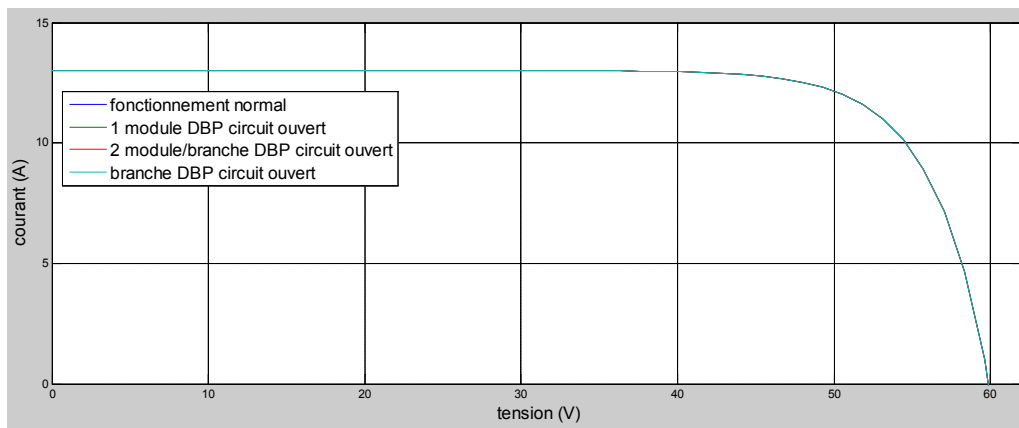


Figure 3.15 : Caractéristiques I-V d'un champ PV lors diode by-pass circuit ouvert

Défaut de Diode de by-pass	circuit ouvert	Paramètres électriques			Pertes
	k_{BP}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
Fonctionnement normal	0	13.02	60	608	0
1 module	1	13.02	60	608	0
2 modules/branche	1	13.02	60	608	0
1 module	1	13.02	60	608	0

Tableau 3.9. L'effet de Diode de by-pass du au circuit ouvert sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.5.5.3. Simulation du défaut de diode by-pass dû au circuit ouvert, court circuit, polarisation inversé :

La Figure 3.16 montre le comportement d'un champ PV composé de 3x2 (2 branches en parallèle de 3 modules PV chacun) lors de différents défauts de diode by-pass. Nous avons remarqué la réduction de la tension de circuit ouvert avec même courant de court-circuit, dans le statut de court circuit et la polarisation inversé

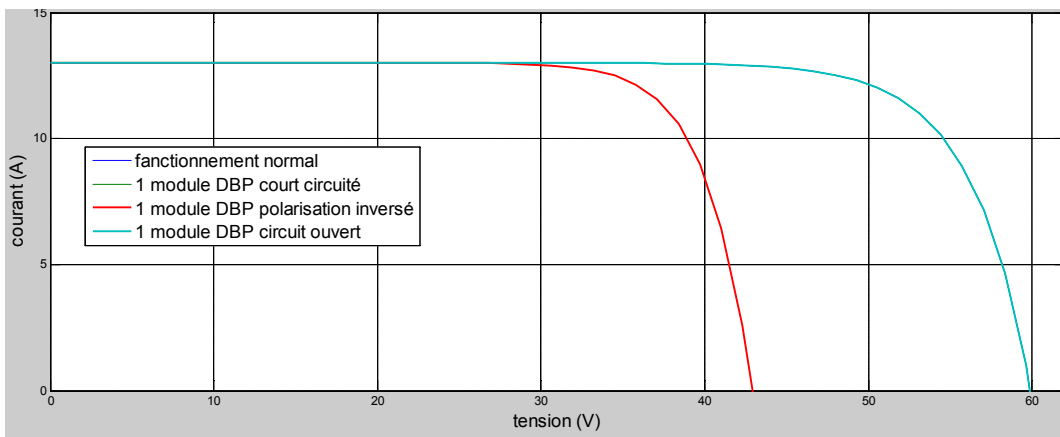


Figure 3.16. Caractéristiques I-V d'un champ PV lors des différents défauts de diode by-pass

Défaut de Diode de by-pass	Diode by-pass	Paramètres électriques			Pertes
	k_{BP}	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$P_{mp}(W)$	$\Delta P(\%)$
Fonctionnement normal	0	13.02	60	608	0
1 module court circuité	0	13.02	42	426	30
1 module circuit ouvert	1	13.02	60	608	0
1 module polarisation inversé	-1	13.02	42	435	28

Tableau 3.10. L'effet de Diode de by-pass du sur le rendement de systèmes PV et les Paramètres électriques.

3.6. Algorithme de diagnostic

A partir de l'analyse précédente, un algorithme est construit qui est capable de donner comme résultat une numérique (1 ou 0), suite à la prise comme données d'entrée la tension aux bornes du module (V), le courant qui produit (I), la température (T) et l'éclairement (G). Les étapes exécutives de cet algorithme peuvent s'inscrire comme telles :

1^{ère} étape : Mesuré Paramètres électriques (le courant de court circuit (I_{cc}) et la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le point de puissance maximale (P_{mp})).
2^{ème} étape : lecture des données

3^{ème} étape : Détermination le lieu et le type du défaut ($K_{tr}, K_{sh}, K_{m-rs}, K_{m-rsh}, K_{BP}$)

4^{ème} étape : Le vecteur ($K_{tr}, K_{sh}, K_{m-rs}, K_{m-rsh}, K_{BP}$) sera comparé à celui donné au tableau de la figure (3.1) qui constitue le dictionnaire des défauts pour décider sur le défaut qui par exemple provoque la diminution de la puissance.

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

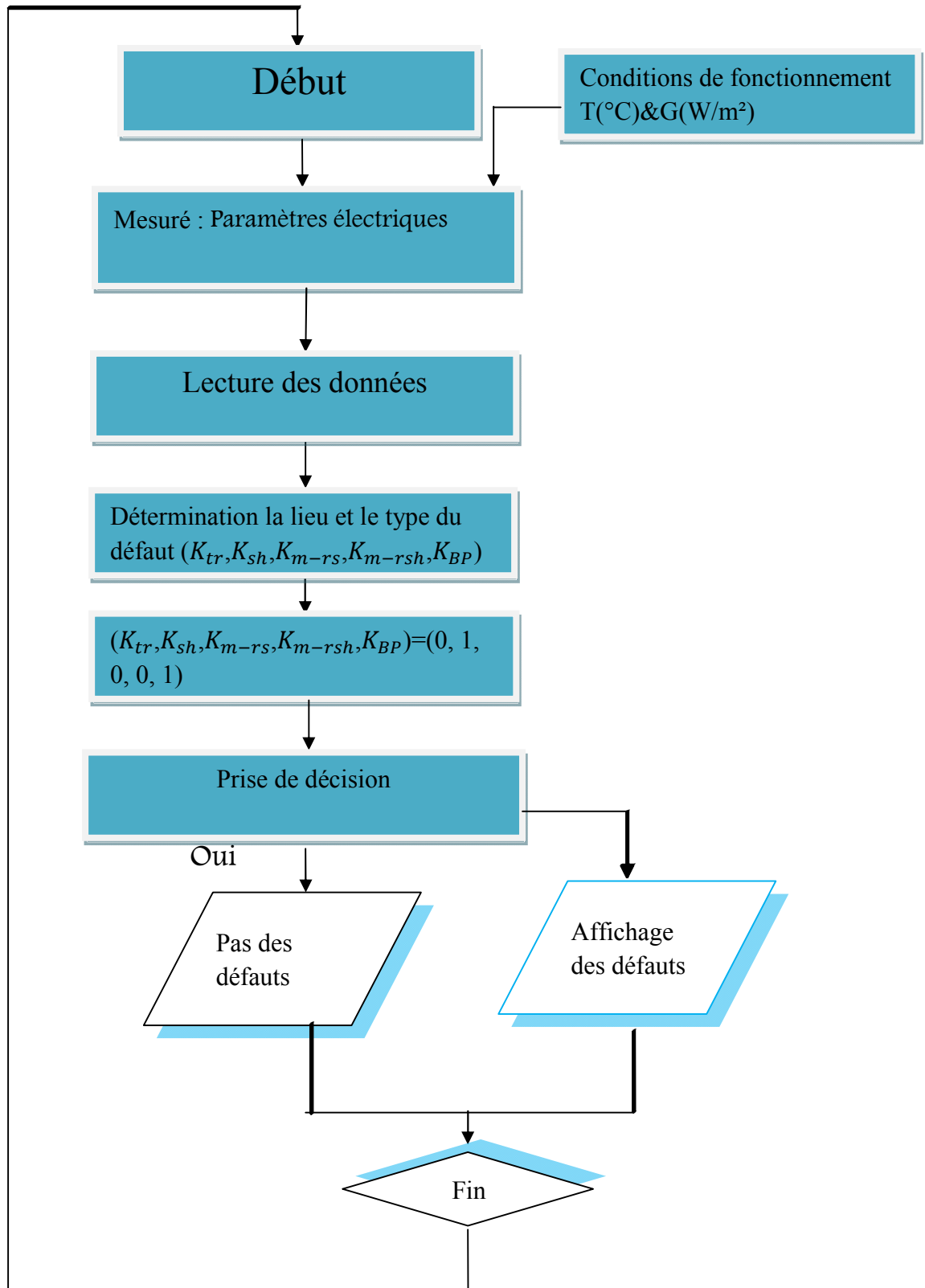


Figure 3.17. Algorithme de détection et localisation des défauts (DLD).

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre approche et les étapes relatives au développement d'un modèle mathématique décrivant les deux comportements d'un GPV (sain ou défaillant). Dans ce contexte, nous avons utilisé Matlab/Simulink pour obtenir résultats de simulation de quelques défauts possibles tels que : l'ombrage, la salissure et la poussière, la résistance série, la résistance parallèle et la diode by-pass.

Conclusion générale

Dans le cadre du travail de ce mémoire, on s'est principalement intéressé au diagnostic des défauts au niveau générateur PV par analyse de la caractéristique I-V. L'objectif est de développer un modèle mathématique qui peut discriminer la totalité des défauts considérés.

D'abord, pour un diagnostic dans le domaine photovoltaïque, une brève étude bibliographique sur les différentes approches théoriques des différentes méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts qui peuvent avoir lieu au niveau d'un GPV.

La deuxième étape consiste à établir une base de connaissance sur le comportement sain et comportement défaillant d'un GPV. Après nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le comportement du module PV. Ensuite la modification de caractéristique I-V qui consiste à une relation causale entre les principaux défauts considérés et la caractéristique résultante, l'extraction de cette relation que nous avons donné sous forme matrice de symptômes pour le développement un algorithme de détection et de localisation de défauts (DLD) en reposant sur cette matrice proposée.

En comparant la caractéristique I-V d'un modèle PV en fonctionnement sain et celle en fonctionnement défaillant pour les différents défauts considérés, trois symptômes en été retenus: réduction de la puissance maximale, réduction de la tension de circuit ouvert, réduction du courant de court-circuit. Le choix du seuil pour chaque symptôme a été fait en considérant les différents incertitudes (incertitude de modèle et de mesure) afin d'éviter les fausses alarmes et les problèmes de non détection.

Références bibliographiques

- [1] B. Michaël. "Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque", thèse de doctorat, Université de Perpignan, 2014. France.
- [2] Dossier thermique-Courier ES n°03, "effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées", Janvier 2000.
- [3] Y. Veschetti, "modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince", thèse de doctorat, université Luis Pasteur, Strasbourg 1, 2005.
- [4] L.Bun, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV", thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
- [5] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," IEE. Proc.-Electr. Power Appl., vol. 146, 2009
- [6] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 67 (2001), Page(s): 389-395
- [7] 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.
- [8] G. B. Alers, "Photovoltaic Failure Analysis: Techniques for Microelectronics and Solar," in *PV Module Reliability Workshop*, Colorado, USA, 2011.
- [9] H. R. Karshenas, and H. Saghafi, "Performance Investigation of LCL Filters in Grid Connected Converters" *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006. TDC '06. IEEE/PES, Page(s): 1-6.
- [11] A. Ricaud, "modules et systèmes photovoltaïques", université de Savoie (Polytech' Savoie), sept 2008.

- [12] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [13] W. Dallas., "Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers," Measurement Science and Technology, vol. 18, p. 852, 2007.
- [14] T. Takashima, J. Yamaguchi, K. Otani, T. Oozeki, K. Kato, et al., "Experimental studies of fault location in PV module strings," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 93, pp. 1079–1082, 2009.
- [15] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [16] D. Sera, "Real-time modelling, diagnostics and optimised MPPT for residential PV systems." These Dr. Aalborg University, 2009.
- [17] J. L. Crozier, "Characterization of Cell Mismatch in Photovoltaic Modules Using Electroluminescence and Associated Electro-optic Techniques." Nelson Mandela Metropolitan University, 2012.
- [18] P. Sánchez-Friera, M. Piliouguine, J. Peláez, J. Carretero, and M. Sidrach de Cardona, "Analysis of degradation mechanisms of crystalline silicon PV modules after 12 years of operation in Southern Europe," Prog. Photovoltaics Res. Appl., vol. 19, no. 6, pp. 658–666, 2011.
- [19] S. K. Firth, K. J. Lomas, and S. J. Rees, "A simple model of PV system performance and its use in fault detection," Sol. Energy, vol. 84, no. 4, pp. 624–635, 2010.

ملخص.

يهدف العمل المقدم في هذه الرسالة إلى تطوير نموذج رياضي عالمي يدمج جميع المعلومات التي تشير إلى الأخطاء الأكثر شيوعا على مستوى المولد الكهروضوئي والتي يمكن أن تكون بمثابة أداة تساعد في تشخيص الأنظمة الكهروضوئية. للمساعدة في تشخيص ومراقبة Matlab / simulink للقيام بذلك، قمنا بتطوير مخطط كتلة للنموذج المقترح في بيئة تشغيل مولداتنا الكهروضوئية من خوارزمية مقترحة على أساس تحديد أعراضها والحد من تعقيد صيانتها. النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد صحة هذه الأداة وحاجتها.

الكلمات المفتاحية: عطب-تشخيص-أعراض-Matlab/simulink

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objet, le développement d'un modèle mathématique universel intégrant tous les paramètres indicateurs des défauts les plus fréquents au niveau d'un générateur photovoltaïque et qui pourrait servir d'outil d'aide au diagnostic des systèmes PV. Pour ce faire, nous avons développé un schéma bloc du modèle proposé dans l'environnement Matlab/Simulink d'aide au diagnostic et la supervision du fonctionnement du GPV à partir d'un algorithme proposé qui se base sur l'identification de leurs symptômes. Les résultats obtenus confirment la validité de tel outil et sa nécessité dans l'étude de performance du GPV et la réduction de la complexité de son entretien.

Mots clés: Modèle mathématique, Défauts, diagnostic, symptômes, Matlab/Simulink.

Abstract

The work presented in this thesis aims at the development of a universal mathematical model integrating all the parameter indicating the most frequent faults at the level of a photovoltaic generator and which could serve as a tool to aid the diagnosis of PV systems. To do this, we have developed a block diagram of the model proposed in the Matlab / simulink environment to help diagnose and supervise the operation of our PV generators from a proposed algorithm based on the identification of their symptoms. The results obtained confirm the validity of such a tool and its need in the PVG performance study and the reduction of the complexity of its maintenance.

Key words : Mathematical model, Faults, Diagnostic, Symptômes, Matlab/Simulink.