

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués (E.S.E)

Par

- **Haddad Yakoub**
- **Louassa Nabil**

Intitulé

*Etude d'une nouvelle approche de détection des défauts dans un système
photovoltaïque*

Évalué le : 14/09/2021

Par la commission d'évaluation composée de :*

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Abdelhakim LATOUI</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Mohamed El Hossine DAACHI</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. Hamadache. Fouzia</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2020/2021

* Conformément à :

- L'arrêté n°055 du 21 janvier 2021 Fixant dispositions exceptionnelles autorisées en matière d'organisation et gestion pédagogique, de l'évaluation et de la progression des étudiants, durant la période COVID-19 au titre de l'année universitaire 2020-2021 ;
- Procès-verbal de la réunion de l'équipe du domaine des Sciences et Technologies du mois de Mai 2021.

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant pour ce qu'il nous a tant donné comme volonté, santé et surtout patience, pour pouvoir, durant toutes ces longues années d'études d'arriver là où nous sommes aujourd'hui et de concrétiser tous nos efforts par ce modeste travail.

Nous tenons en premier lieu à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Docteur Daachi Med Elhocine, pour avoir d'abord proposé ce thème, et pour ses conseils, son aide pour faire avancer notre travail.

Nous remercions tous les enseignants et les responsables du département d'électronique de l'université Bordj Bou Arreridj pour leurs aides et leurs encouragements.

Nous tenons enfin à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail

Haddad Yakoub / Louassa Nabil

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire de Master à :

L'âme pure de mon père.

À Ma mère qui m'a soutenu tout au long de mon parcours.

*À mon frère Bachir, Et ma sœur, Sur tout pour mon grand-mère, pour toute la
Famille, et Des encouragements constants et un soutien moral.*

À mon ami et partenaire "Louassa Nabil"

À tous les enseignants de ma période d'étude

À tous mes amis et collègues

Haddad Yakoub

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire de Master :

À ma mère et mon père

À mes sœurs, mes frères et ma grand-mère

À toute ma famille: Louassa

À mon amie et binôme "Haddad Yakoub"

À tous les enseignants de ma période d'étude

À tous mes amis et collègues

Louassa Nabil

Liste des figures

Figure I.1: Composants d'un GPV

Figure I.2: structure d'une cellule photovoltaïque au silicium

Figure I.3: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Figure I.4 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques.

Figure I.5: Caractéristique $I(V)$ pour l'association parallèle.

Figure I.6: Générateur photovoltaïque formé de N_m module en série et N_{bp} branche en parallèle.

Figure I.7 : Circuit équivalent simple de la cellule PV.

Figure I.8: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

Figure I.9: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diode.

Figure I.10: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

Figure I.11 : Système photovoltaïque en présence d'une ombre, protection par la mise en place d'une diode de by-pass.

Figure I.12 : Système photovoltaïque, protection par la mise en place d'une diode d'anti-retour.

Figure II.1: Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Figure II.2:Caractéristique I-V d'un module PV avec dix-huit (18) cellules ombrées (25%, 50%)

Figure II.4: caractéristique I - V avec une résistance série croissante comme paramètre dans un module et dans dix-huit cellules

Figure II.5:Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de by-pass.

Figure II.6:Schéma d'un groupe de cellules PV avec la diode By-pass court-circuitée.

Figure II.7:Caractéristique $I(V)$ d'un module PV avec une diode By-pass "Court-circuitée"

Figure II.8:Schéma d'un groupe de cellules PV avec diode by-pass inversée

Figure II.9:Caractéristique I-V avec diode by pass inversée

Figure III.1: Quelques exemples de la localisation de défauts par la caméra thermique

Figure III -2: Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV

Figure III -3 : Allure de la caractéristique I -V d'un champ PV en fonctionnement défaillant

Figure III-4 : Caractéristiques défaillantes d'un module PV

Figure III-5: Algorithme de diagnostic du GPV

Figure III-6 : Schéma de détection de défauts sous Simulink.

Figure III-7 : la caractéristique de I-V en absence du défaut

Figure III-8 : Affichage de la décision (aucun défaut).

Figure III-9 : modification de la valeur de R_s

Figure III-10 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de Mismatch de R_s

Figure III-11 : Affichage de la décision (Mismatch de R_s).

Figure III-12 : Représentation BPD inversée dans Simulink.

Figure III-13 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de BPD inversée

Figure III-14 : Affichage de la décision (BPD inversée).

Figure III-15 : Représentation de l'ombrage partiel dans Simulink.

Figure III-16 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de l'ombrage partiel

Figure III-17 : Affichage de la décision (ombrage partiel).

Figure III-18 : Représentation de l'ombrage total dans Simulink.

Figure III-19 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de l'ombrage total

Figure III-20 : Affichage de la décision (ombrage total).

Figure III-21 : Représentation des deux défauts Ombrage total avec Mismatch de R_s dans Simulink.

Figure III-22 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de l’Ombrage total avec Mismatch de R_s

Figure III-23 : Affichage de la décision (Ombrage total avec Mismatch de R_s).

Figure III-24: Représentation des deux défauts Ombrage partiel avec BPD inversée dans Simulink.

Figure III-25 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de l’Ombrage partiel avec BPD inversée

Figure III-26 : Affichage de la décision (Ombrage partiel avec BPD inversée).

Figure III-27: Représentation des trois défauts Ombrage partiel avec BPD inversée avec Mismatch de R_s dans Simulink.

Figure III-28 : la caractéristique de I-V en présence du défaut de l’Ombrage partiel avec BPD inversée

Figure III-29 : Affichage de la décision (Ombrage partiel avec BPD inversée avec Mismatch de R_s).

Table des matières

Liste des figures	5
Introduction générale	10
I .1 Introduction :.....	13
I .2 Sources d'énergie renouvelables :.....	13
I .3 Générateur photovoltaïque (GPV) :	13
I.3.1 la cellule photovoltaïque :	14
I.3.1.1 Définition :.....	14
I.3.1.2 Principe de fonctionnement :.....	14
I.3.1.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	15
I.3.1.4 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :.....	15
I.3.1.4.1 Courant de court-circuit :.....	16
I.3.1.4.2 Tension de circuit ouvert	16
I.3.1.4.3 Facteur de forme :	16
I.3.1.4.4 Le rendement :	16
I .4 Les modules photovoltaïques :.....	17
I.4.1 Association en série	17
I.4.2 Association en parallèle	17
I.4.3 Association en série parallèle	18
I.5 Modélisation de la cellule photovoltaïque	19
I.5.1 Modèle électrique idéal.....	19
I.5.2 Modèle à une seule diode.....	20
I.5.3 Modèle à deux diodes	21
I.6 Système de protection.....	22
II.6.1 Diode By-pass	22
II.6.2 Diode anti-retour	23
I .7 conclusion :	24
II.1 Introduction	26
II.2 Etude des différents défauts	26
II.2.1 Défauts dans le système photovoltaïque.....	26

II.3 Effet des différents défauts sur le comportement d'un générateur	
PV :	27
II.3.1 Résultats de simulation des différents défauts :	28
II.3.1.1 Défaut d'ombrage	29
II.3.1.2 Défaut de la résistance série R_s	31
II.3.1.3 Défaut de diodes de by-pass :	32
II.3.1.3.1 diode by-pass en court-circuit	33
II.3.1.3.2 Diode by-pass inverse	34
II.4 Conclusion :	35
III-1 Introduction	37
III-2 Méthodes de diagnostic d'un générateur PV	37
III-2-1 Méthodes de diagnostic utilisées dans l'industrie	37
III-2-1-1 Méthodes non -électriques	37
III-2-1-2 Méthodes électriques	38
III-2-2 Méthodes dans la littérature	39
III-2-2-1 Méthode de réflectométrie	39
III-2-2-2 Analyse de la puissance et de l'énergie produite	39
III-2-2-3 Analyse du point de fonctionnement	39
III-2-2-4 Analyse de la caractéristique statistique	40
III-3 Identification des symptômes moyennant l'analyse des caractéristiques électriques en présence de défauts :	41
III-3-1 Paramètres de diagnostic	42
III-3-2 Vecteurs formant la matrice des symptômes	43
III-4 Résultats de simulation :	44
III-5 Organigramme de la méthode utilisée pour le diagnostic	46
III-5.1 Détection d'un seul défaut	47
III-5.2 Détection de deux défauts	54
III-5.3 Détection de trois défauts	57
III.6 conclusion :	59
Conclusion générale	60
BIBLIOGRAPHIE	61

Introduction générale

La pollution causée par l'utilisation des énergies fossiles avec les multiples risques relatifs à l'énergie nucléaire (gestion des déchets et accidents : réacteur nucléaire de Fukushima -Japon-, ...), a poussé les états à investir davantage dans les énergies propres et renouvelables. L'énergie photovoltaïque, pour ne citer que cela, s'avère l'énergie renouvelable la plus prometteuse. Cependant, un système PV, lors de son fonctionnement, n'est jamais à l'abri d'anomalies (défauts) pouvant réduire ses performances en termes de production d'énergie voire même son indisponibilité totale. Aussi pour certains défauts, s'ils ne sont pas pris en charge au moment opportun, le système PV peut être endommagé que ce soit en partie ou bien en totalité. Cela fait que l'association d'outils de diagnostic est indispensable pour la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des systèmes PV. En effet, Il existe plusieurs techniques de diagnostic dans la littérature dédiées aux systèmes PV. La méthode la plus utilisée consiste en un traceur de courbe I-V caractérisant un générateur PV. La courbe I-V révèle ainsi des informations sur les performances d'un système PV servant à la détection des défauts en vue de leur correction.

Notre mémoire est justement réalisé dans le contexte de la détection de défauts moyennant l'analyse des caractéristiques électriques I-V du système PV. L'objectif primordial de ce travail est l'application d'une approche de détection permettant de détecter plusieurs défauts à la fois.

Par ailleurs, le reste du manuscrit est organisé autour de trois chapitres suivis d'une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les générateurs PV tout en commençant de la cellule PV en tant qu'élément de base. Dans le deuxième chapitre, nous donnons un ensemble de défauts fréquemment rencontrés dans la littérature. Nous allons étudier l'effet de chacun sur les caractéristiques électriques I-V via des simulations que nous réalisons dans l'environnement Matlab et dont nous nous servons dans le troisième chapitre. Le troisième chapitre qui représente le cœur de notre travail, est consacré à la présentation de quelques

techniques de diagnostic issues de littérature, puis nous présentons les résultats de simulation issus de l'application de la méthode électrique en ce qui concerne la détection des différents défauts.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale en formulant également quelques perspectives au présent travail.

Chapitre I : Généralité sur les générateurs photovoltaïques

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les générateurs PV partant de la cellule en tant qu'élément de base. Nous donnons la modélisation électrique d'une cellule PV sur laquelle est basée la caractérisation électrique. Pour comprendre le comportement d'un générateur PV, des courbes caractérisant un générateur PV seront également présentées.

I.2 Sources d'énergie renouvelables :

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [1]

Dans ce chapitre nous présentons les générateurs PV partant de la cellule en tant qu'élément de base. Nous donnons la modélisation électrique d'une cellule PV sur laquelle est basée la caractérisation électrique. Pour comprendre le comportement d'un générateur PV, des courbes caractérisant un générateur PV seront également présentées.

I.3 Générateur photovoltaïque (GPV) :

En raison de l'obtention de la quantité d'énergie dont on a besoin, les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure I.1). Les modules PV sont habituellement branchés en série- parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [2].

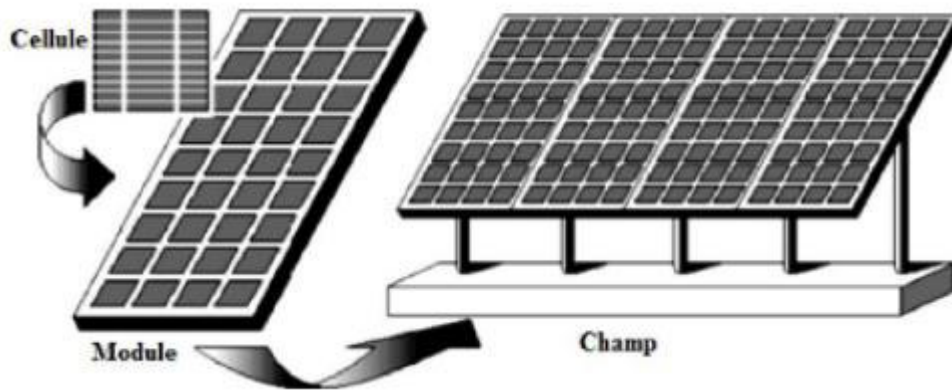


Figure I.1: Composants d'un GPV

I.3.1 la cellule photovoltaïque :

I.3.1.1 Définition :

La cellule photovoltaïque consiste en un dispositif permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [3]

I.3.1.2 Principe de fonctionnement :

Telle qu'une diode à jonction PN, la cellule PV est réalisée également de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC). [4]

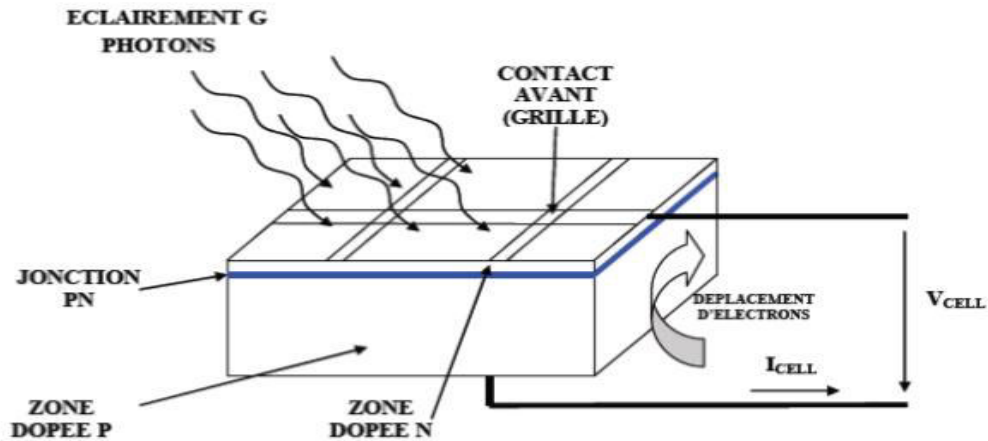


Figure I.2: structure d'une cellule photovoltaïque au silicium

I.3.1.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

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

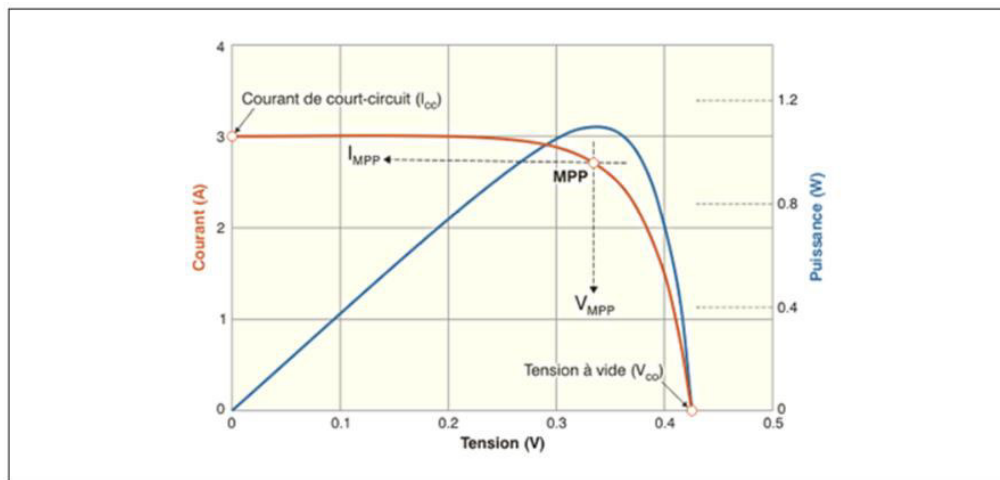


Figure I.3: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

- **Le courant de court-circuit I_{cc}** : Il correspond au courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court-circuit ($V_c=0$). I_{cc} est directement proportionnel à l'éclairement à la température ambiante. Il varie également en fonction de la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.
- **La tension à vide V_{oc}** : Elle correspond à la tension maximale générée par la cellule. Elle est produite dans des conditions de circuit-ouvert ($I_c=0$). La tension en circuit-

ouvert d'une cellule photovoltaïque varie de manière logarithmique avec l'éclairement et baisse avec l'augmentation de la température. On obtient sa valeur en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

- **Point de puissance maximale (PPM) :** La partie intéressante de la caractéristique $I(V)$, pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert (ou la tension à vide), ni au point de court-circuit, qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension. $P = V I$. Le point de puissance maximale est le point de fonctionnement $M(V_{PPM}, I_{PPM})$ pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale [5]

I.3.1.4 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants :

I.3.1.4.1 Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur *PV* est nul . Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo courant.

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{IR_s}{R_p} \quad (I-1)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_s \left[e^{\frac{q(IR_s)}{nKT}} - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}} \quad (I-2)$$

I.3.1.4.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV_{co}}{R_p}} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (I-3)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = \left(\frac{q}{nKT} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I-4)$$

I.3.1.4.3 Facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{pm} * I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} * V_{co}$.

Où : I_{cc} intensité de court-circuit et V_{co} tension de circuit ouvert.

$$FF = \frac{I_{pm} V_{pm}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (I-5)$$

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

I.3.1.4.4 Le rendement :

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

$$P_{in} \cdot \eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{pm} V_{pm}}{P_{in}} \quad (I-6)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [6].

I.4 Les modules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue en réalité un générateur électrique de très faible puissance à l'échelle des besoins de la plupart des applications dans la vie quotidienne. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires [7].

I.4.1 Association en série

Dans l'association en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La Figure I.4 montre la caractéristique résultante (I_{scc}, V_{sco}) obtenue en associant en série (indice s) ns cellules identiques (I_{cc}, V_{co}), ainsi :

$$I_{cc} = I_{sc} ; V_{co} = n_s \cdot V_{sc0}$$

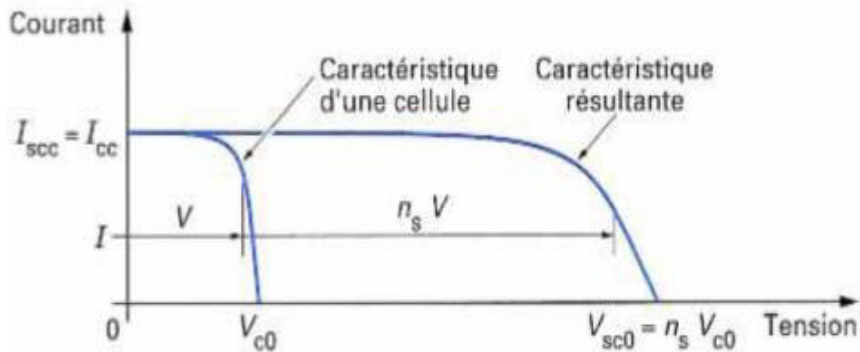


Figure I.4 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de Ns cellules identiques.

I.4.2 Association en parallèle

En associant Np modules identiques en parallèle, Figure I.5, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche, ainsi on écrit :

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co}$$

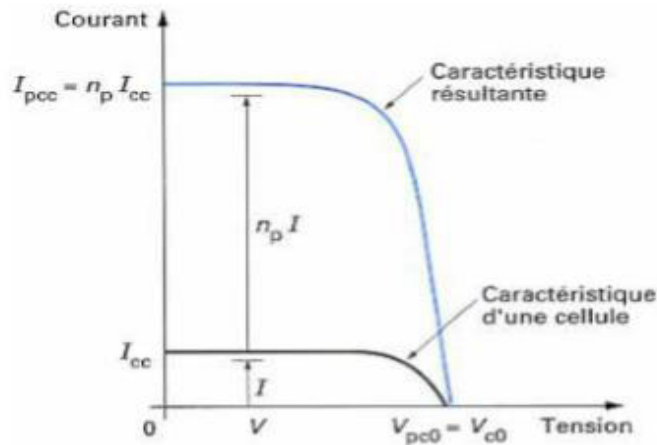


Figure I.5: Caractéristique I(V) pour l'association parallèle.

I.4.3 Association en série parallèle

En raison d'avoir de grandes puissances (quelque kW à quelque MW), sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux, et de les monter en

rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque ou sous-station [7].

La Figure I.6 présente un tel groupement de n_{ms} modules en série dans une branche et de n_{bp} branches en parallèle. Si P_m , V_m , I_m et R_m sont les caractéristiques du module de base, les caractéristiques correspondantes de la sous-station seront :

- $n_{ms} \cdot n_{bp} \cdot P_m$ pour la puissance .
- $n_{ms} \cdot V_m$ pour la tension.
- $n_{bp} \cdot I_m$ pour le courant.
- La résistance de charge optimale sera égale à $R_m \cdot n_{ms} / n_{bp}$ [7].

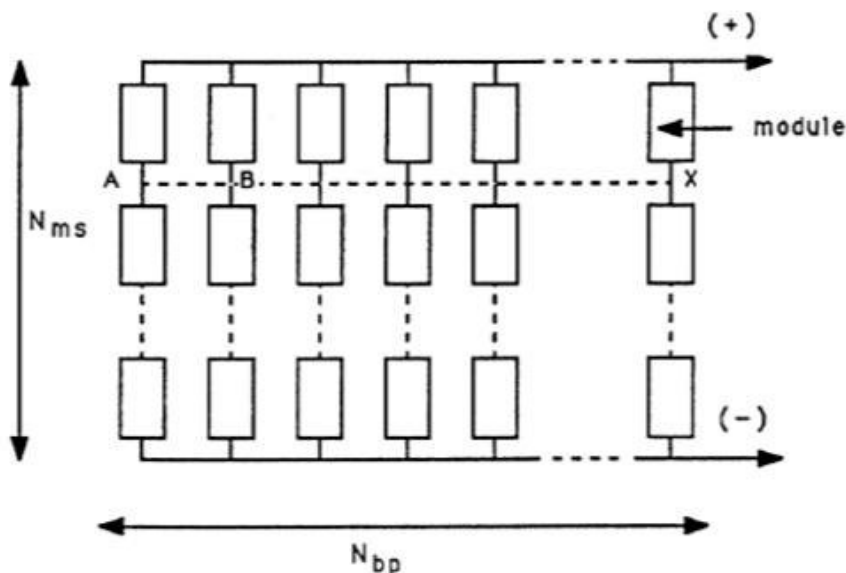


Figure I.6: Générateur photovoltaïque formé de N_m module en série et N_{bp} branche en parallèle.

I.5 Modélisation de la cellule photovoltaïque

I.5.1 Modèle électrique idéal

Le module photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (I-7) composé d'un générateur de courant qui produit un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente, et d'une diode parallèle qui correspond à l'aire de transition P-N du module PV

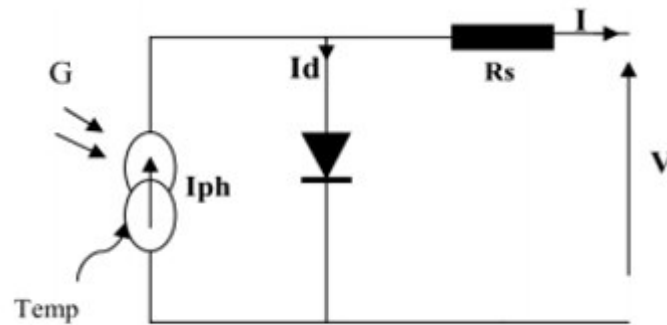


Figure I.7 : Circuit équivalent simple de la cellule PV.

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

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I-1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (I-7)$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A].

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

I_{ph} : Le photo-courant, proportionnel à l'irradiance, avec correction selon T .

I_0 : Le courant de saturation de diode.

R_s : Résistance série [ohm].

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

$V_t = (AKbTc/q)$: Tension thermique de la diode.

Elle dépend de température de la cellule T_c A est le facteur d'idéalité de diode, Kb la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et q la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

I.5.2 Modèle à une seule diode

Ce modèle contient une source de courant I_{ph} qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule et une diode pour modéliser la jonction PN de la cellule. La résistance série R_s et la résistance shunt R_{sh} représente l'état non idéal de la cellule. La résistance série représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal

et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules. La résistance parallèle représente tous les chemins traversés par le courant de fuite.

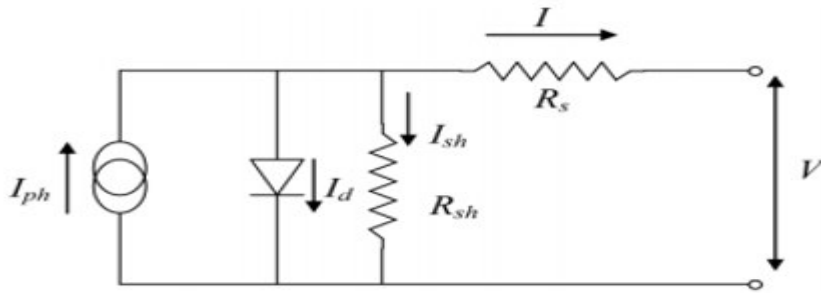


Figure I.8: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I-3)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I-8)$$

I.5.3 Modèle à deux diodes

La figure (I.9) représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{01} et I_{02} et de facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. La résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction.

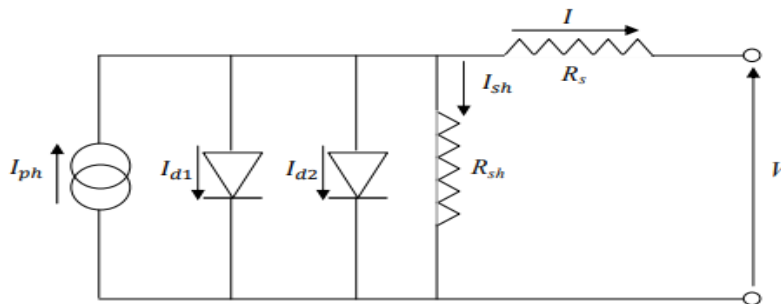


Figure I.9: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diode.

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

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (I-9)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_1 k_b T}\right) - 1 \right] - I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_2 k_b T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I-10)$$

Avec :

I_{01} (A) correspondant au courant de saturation de la diode1

I_{02} (A) correspondant au courant de saturation de la diode2

k_b (1.381×10^{-23} J/K), la constante de Boltzmann

T (K) : la température effective de la cellule

q : (1.602×10^{-19} C), la charge de l'électron

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2

I (A) : le courant fourni par la cellule

V (V) : la tension aux bornes de la cellule

R_{sh} (Ω) : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction

R_s (Ω): la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

[8]

I.6 Système de protection

Pour une telle installation photovoltaïque, il est indispensable de lui assurer une protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour)

- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [9].

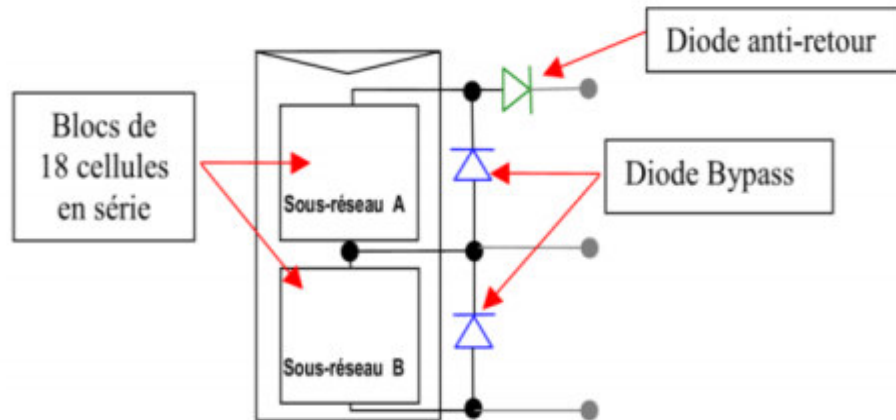


Figure I.10: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

II.6.1 Diode By-pass

Il est possible, par exemple sous l'effet d'un ombrage ou de la température que toutes les cellules placées en série n'aient pas les mêmes caractéristiques, et les cellules grises (moins ombrées) ne seront pas en mesure de produire autant de courant que les cellules non ombrées, créant ainsi des déséquilibres et des échauffements ou même déformer ou éclater la plaque en verre des panneaux.

Par ailleurs, quand un module devient grisé sa diode de dérivation devient «polarisée» et commence à conduire. Tout le courant supérieur au nouveau courant de court-circuit de la cellule ombragée est «court-circuité» par la diode, cela réduit considérablement la quantité de chauffage local à la zone ombrée.

En fin lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode de by-pass pour empêcher le fonctionnement dans la zone II (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci. Notons que dans les faits, pour des raisons économiques et de simplicité de réalisation, une diode de by-pass est placée en parallèle de chaque groupe de module [10].

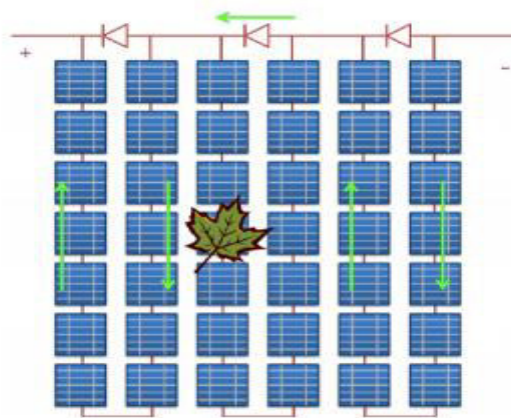


Figure I.11 : Système photovoltaïque en présence d'un ombrage, protection par la mise en place d'une diode de by-pass.

II.6.2 Diode anti-retour

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge, le risque est que des chaînes de cellules éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la charge ne se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela de diodes anti-retour (de blocage) mises en série avec le GPV comme le montre la Figure II.12 Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie de stockage ne débite sur le module PV [11].

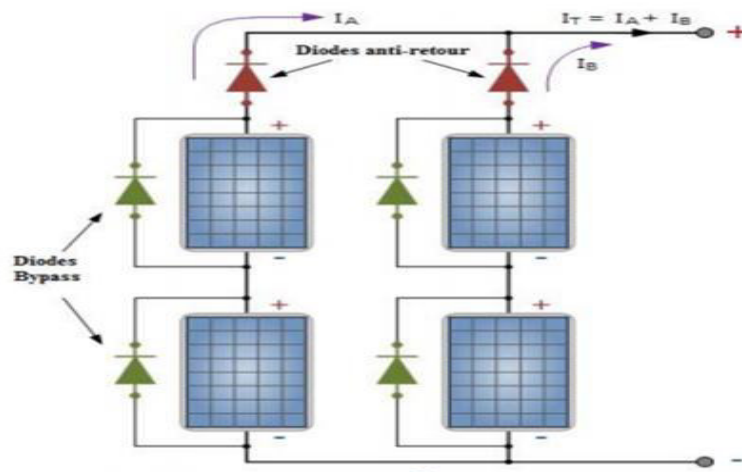


Figure I.12 : Système photovoltaïque, protection par la mise en place de diodes by-pass et diodes anti-retour.

I.7 conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le générateur PV en allant de l'élément de base qui est la cellule PV. Nous avons donné le principe de fonctionnement de la cellule PV, sa modélisation ainsi que sa caractérisation électrique. Nous présentés les différentes associations des cellules pour la formation de générateurs PV selon le besoin en puissance. Des composants servant à la protection du générateur sont également décrits dans ce chapitre. Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser au comportement d'un générateur PV à la présence de certains défauts.

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

II.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous décrirons divers défauts et anomalies liés aux différents composants du générateur PV. Pendant le fonctionnement, le système photovoltaïque peut être sujet différents défauts et conditions de fonctionnement anormales. Ces défauts et anomalies varient d'un système à l'autre, selon la conception, l'installation, l'exploitation et la maintenance. Nous aborderons également dans le premier titre un tableau contient une liste de La source d'erreurs la plus courante.

Les défauts dont il s'agit d'étudier sont :

- Défaut d'ombrage,
- Défaut de la résistance série,
- Défaut de la diode by-pass,
 - Diode by pass court-circuitée,
 - Diode by pass inversée.

II.2 Etude des différents défauts

Dans la section précédente, nous avons décrit les différents composants principaux qui composent une unité de production de système photovoltaïque. Dans cette section, nous décrirons diverses pannes et anomalies liées à ces composants.

II.2.1 Défauts dans le système photovoltaïque

Dans le tableau 2.1 qui suit, nous donnons les défauts les plus importants et fréquemment rencontrés dans la pratique selon la référence [4].

Les critères de sélection de ces défauts sont basés sur la criticité et l'incidence du produit selon toujours la même référence.

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

Tableau II.1:Classification des défauts et les anomalies d'un GPV

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 entre Cellules, Modules de Performances différentes, Détérioration des cellules, Pénétration de l'humidité 	Défaut de mismatch et d'ombrage
Groups de cellules	<ul style="list-style-type: none"> • Distraction 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 • Distraction de la liaison • Corrosion des connexions • Corrosion des contacts 	Défaut de connexion
Champ	<ul style="list-style-type: none"> • Distractions des diodes sa absence de diodes inverse de la polarité des diodes • Diode mal connectée • Diode court-circuitée 	Défaut de diode anti-retour

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

II.3 Effet des différents défauts sur le comportement d'un générateur PV :

Pour voir l'effet de différents défauts sur le comportement d'un générateur PV moyennant les paramètres indicateurs des défauts, nous avons réalisé des simulations dans l'environnement Matlab. (Figure II.1)

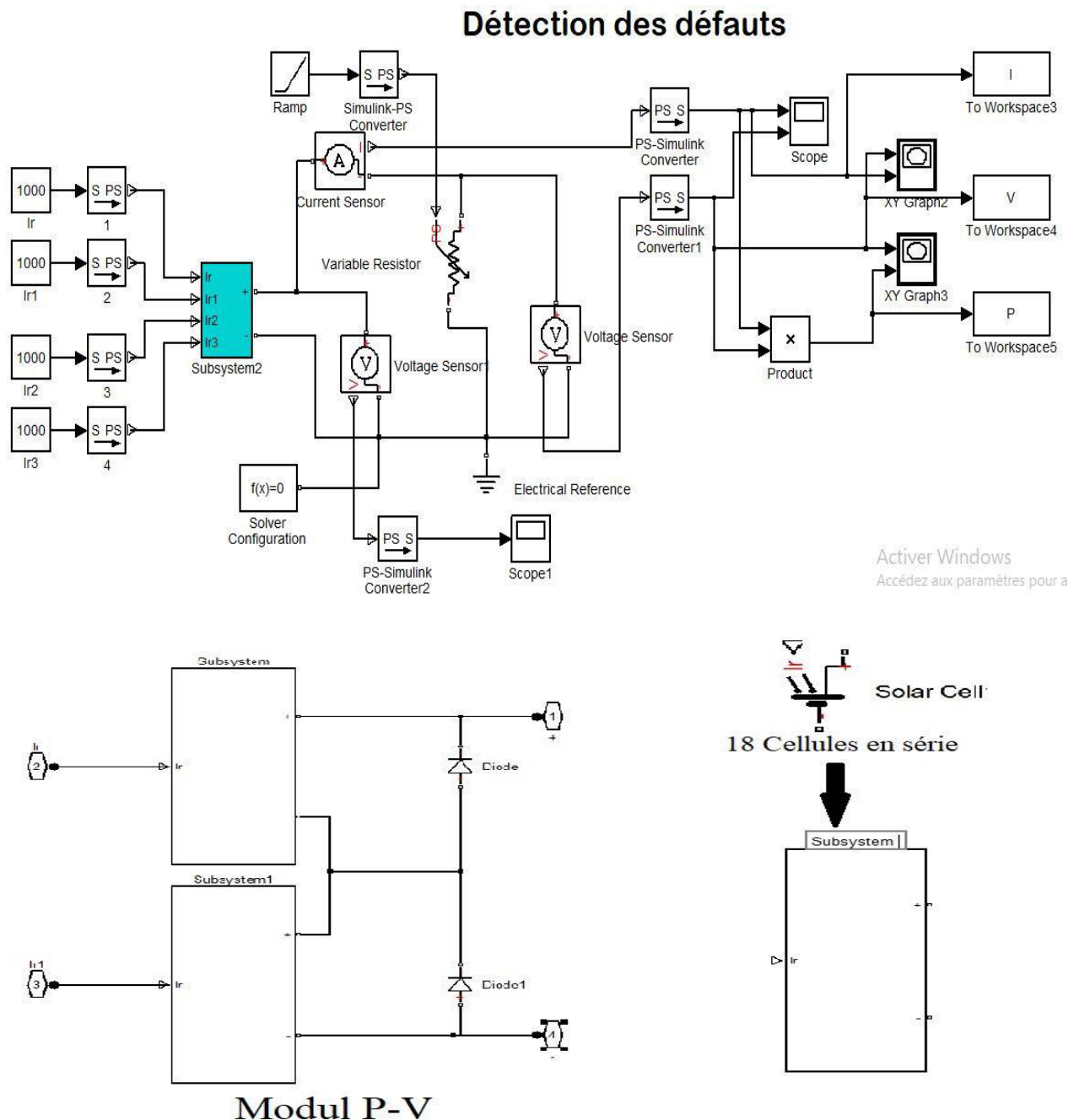


Figure II.1: Schéma bloc du générateur PV dans MATLAB-SIMULINK

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

II.3.1 Résultats de simulation des différents défauts :

En raison de comprendre le comportement du générateur PV en présence d'un ensemble de défauts, nous avons préféré de créer des défauts au niveau d'un générateur PV considéré dans l'environnement Matlab et d'analyser ce que donne leur simulation.

A noter que le générateur étudié est composé de quatre modules de 18 cellules chacun, bien sûr protégé par des diodes by-pass.

II.3.1.1 Défaut d'ombrage

On distingue deux types d'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel. L'ombrage total empêche tout le rayonnement d'atteindre les cellules photovoltaïques, par contre l'ombrage partiel empêche seulement le rayonnement d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (une cheminée, un arbre, poussière, Neige,).

- **L'ombrage partiel**

L'ombrage partiel est souvent inévitable en milieu urbain car dans certaines conditions, on ne peut pas garantir une irradiation homogène sur la totalité du générateur PV (ombres partielles sur le générateur PV, liées par exemple à des feuilles d'arbre tombées à l'automne, ombres d'infrastructures de bâtiments, des poussières sur l'ensemble des cellules.) Il est considéré comme le défaut le plus couramment rencontré dans un générateur PV, ce défaut minimise fortement la puissance de sortie et rend parfois la commande des convertisseurs inefficace, Car la puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV se mettent en conduction.

Ainsi, lorsqu'une ou plusieurs cellules d'un générateur PV sont éclairées différemment par rapport à ses proches voisines, un comportement dégradé apparaît pour le générateur PV, les cellules recevant moins d'énergie doivent dissiper le surplus de courant délivré par celles qui sont les plus éclairées, créant ainsi des échauffements (haut spot) si le module n'est pas protégé de manière adéquate.

Et Pour éviter la surchauffe de la cellule et les points chauds, les diodes de dérivation sont placées dans des boîtes de connexion, ce qui limite la tension inverse de la cellule ombrée, et ce qui limite la température. Néanmoins, si la distribution des diodes de dérivation n'est pas appropriée ou il ya un mauvais fonctionnement de ces diodes, la cellule ombrée peut surchauffer, pouvant aller jusqu'à la destruction d'une partie du générateur PV si le défaut

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

persiste. Ces phénomènes ont une incidence directe sur la production d'énergie et la puissance délivrée par le générateur peut alors fortement chuter par rapport à la puissance produite sous un éclairage homogène. En résumé, ce défaut doit être évité le plus possible sous peine de détériorer rapidement un générateur PV. Jusqu'à présent, pour éviter des détériorations définitives, des diodes de protection sont placées sur les générateurs PV de forte puissance (diode by-pass). Cependant, ces protections sont coûteuses en perte du rendement [13].

Plusieurs cas peuvent se présenter pour les défauts d'ombrage de sorte que la forme de la caractéristique I-V change d'un cas à un autre. Pour cela, nous avons considéré deux cas : dans le premier cas, nous modifions le facteur d'ombrage de dix-huit (18) cellules ombragées dans un seul module (25 % puis 50 %). Les résultats de la simulation sont présentés dans la Figure II.2.

Quant au second cas, nous avons préféré de créer un ombrage au niveau de deux modules à savoir :

- Dix-huit (18) cellules (premier module) ombragées à 25% et de dix-huit (18) cellules (deuxième module du même générateur) ombragées à 50%.
- Dix-huit (18) cellules (premier module) ombragées à 75% et de dix-huit (18) cellules (deuxième module du même générateur) ombragées à 50%.

Les résultats de simulation sont présentés dans la Figure II.3.

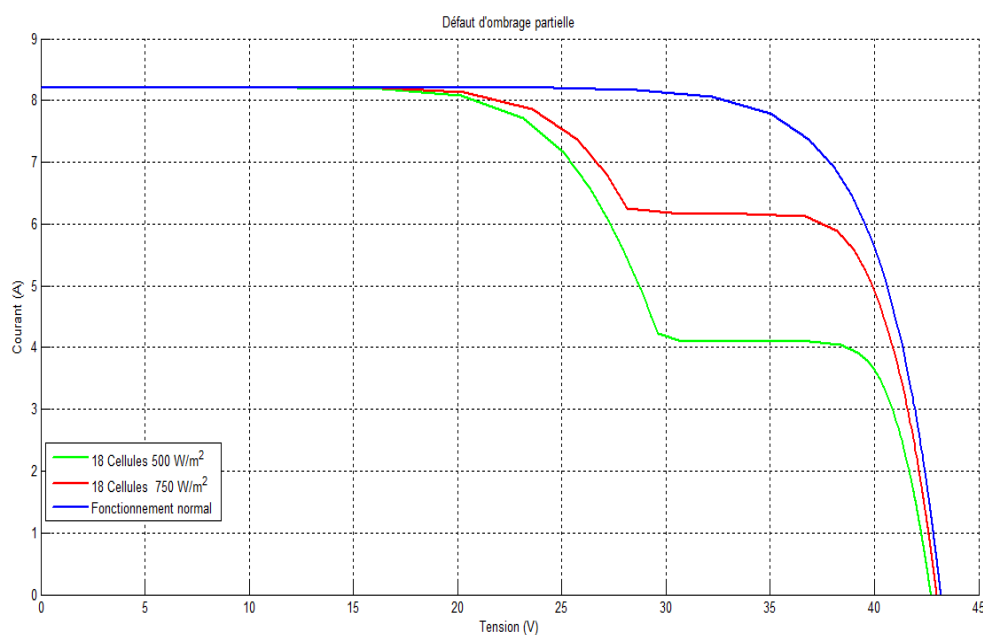


Figure II.2: Caractéristique I-V d'un module PV avec un seul module ombragé (25%, 50%)

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

Un simple examen de la figure II.2, montre un changement de la caractéristique I-V et qui dépend du degré de l'ombrage. Alors, la présence de l'ombrage sur un seul module (18 cellules) provoque une diminution de la puissance au fur et à mesure que le pourcentage de l'ombrage augmente. Aussi, l'apparition d'un seul point d'inflexion correspond bien au nombre de diodes by-pass intervenues, dans ce premier cas, une seule diode intervenue.

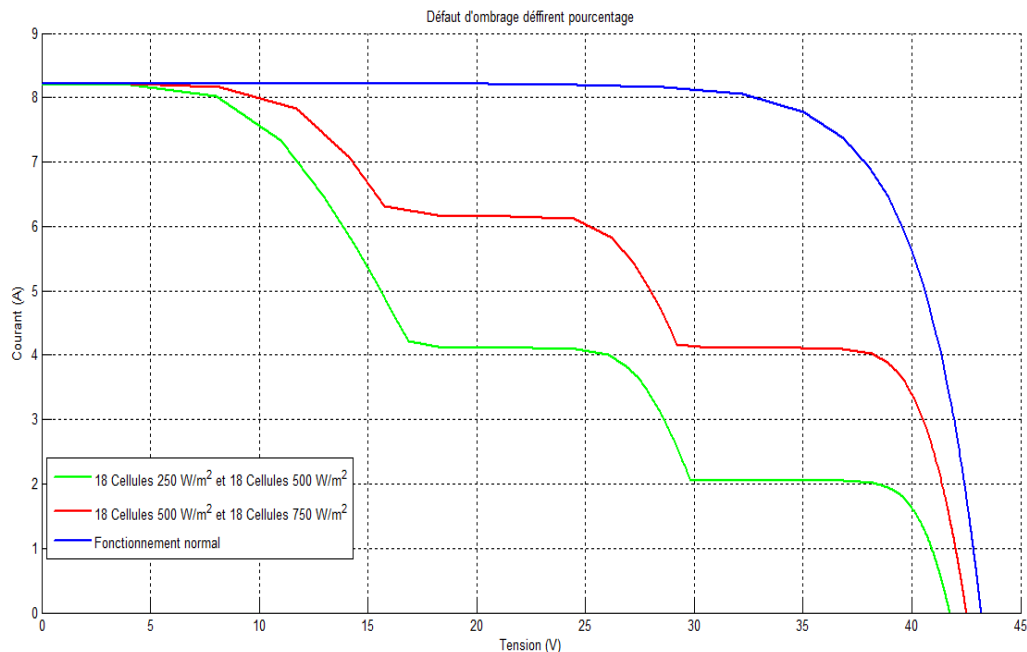


Figure II.3: Caractéristique I-V pour deux modules ombragés (25% et 50% , puis 50% et 75%)

En examinant la figure II.3, nous pouvons conclure que la présence de l'ombrage sur un deux modules provoque davantage une diminution de la puissance au fur et à mesure que le pourcentage de l'ombrage augmente. Aussi, l'apparition de deux points d'inflexion correspond bien au nombre de diodes by-pass intervenues, dans ce second cas, deux seules diode intervenues.

II.3.1.2 Défaut de la résistance série R_s

La résistance série R_s est la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur. La résistance du métal lie les cellules photovoltaïques, mais aussi la résistance du matériau semi-conducteur. Au fur et à mesure que la résistance série augmente, le facteur de forme diminue. Cela conduit à une diminution de l'efficacité des cellules [14]

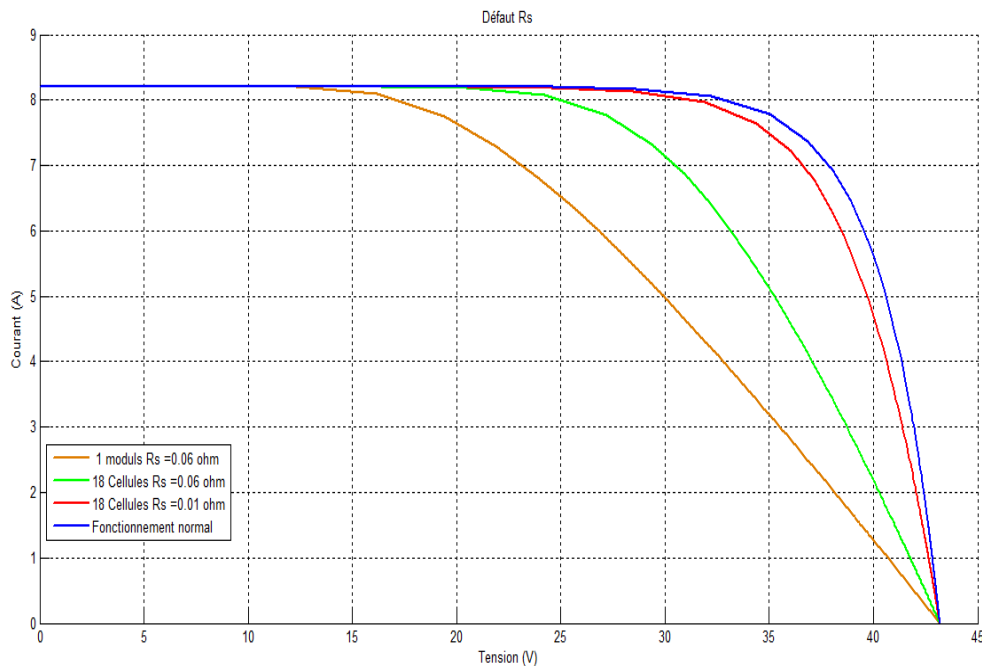


Figure II.4: caractéristique I - V avec une résistance série croissante comme paramètre dans un module et dans dix-huit cellules

D'après les résultats de simulation donnés dans la figure II.4 (caractéristiques I-V), nous constatons bien que plus la résistance série augmente plus il y a une diminution de la tension et par conséquent une perte de la puissance

II.3.1.3 Défaut de diodes de by-pass :

Les diodes by-pass, connues en électronique sous le nom de diodes de roue libre, sont connectées en parallèle avec des cellules ou des panneaux solaires individuels pour fournir un chemin de courant autour d'eux en cas de défaillance d'une cellule ou d'un panneau ou d'un circuit ouvert. De cellules ou de panneaux connectés pour continuer à fournir de l'énergie à une tension réduite au lieu de n'avoir aucune alimentation du tout. Le courant à travers une rangée de cellules solaires est limité par la résistance ou la condition de polarisation de la cellule avec la « résistance la plus élevée ». Lorsqu'une cellule est ombragée, sa résistance au passage du courant augmente. L'augmentation de la résistance d'une seule cellule limite le courant total que le panneau solaire peut fournir au groupe de batteries. Pour éviter cette éventuelle inefficacité, une diode de dérivation est nécessaire. Dans des conditions de fonctionnement normales, la diode de dérivation est polarisée en inverse et essentiellement "invisible" pour l'ensemble du système [14].

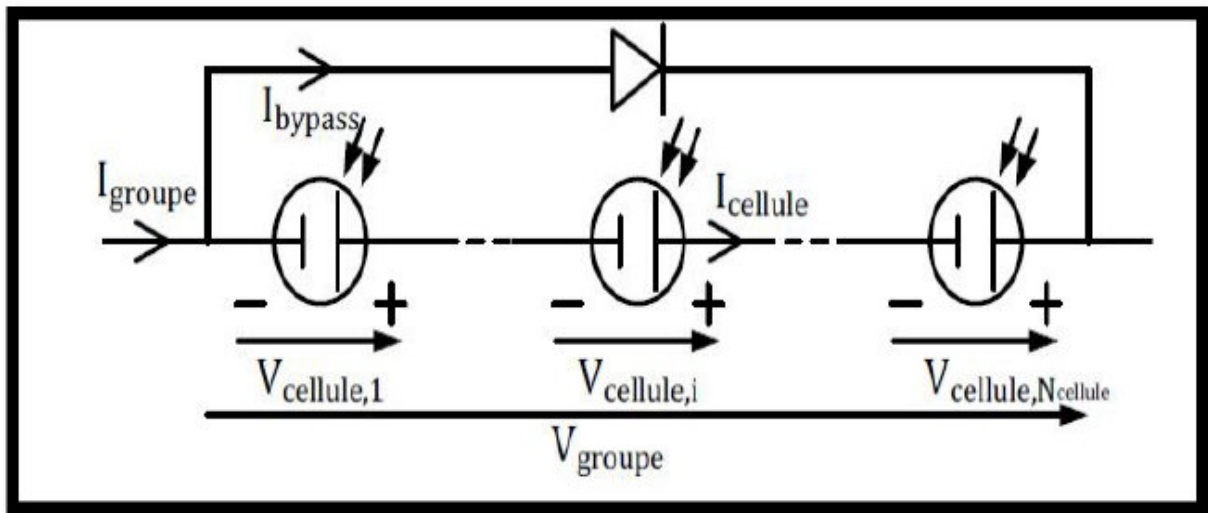


Figure II.5: Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de by-pass.

Dans ce qui suit, nous allons étudier les différents cas:

- Diode by-pass en Court-circuit.
- Diode Inversée.

II.3.1.3.1 diode by-pass en court-circuit

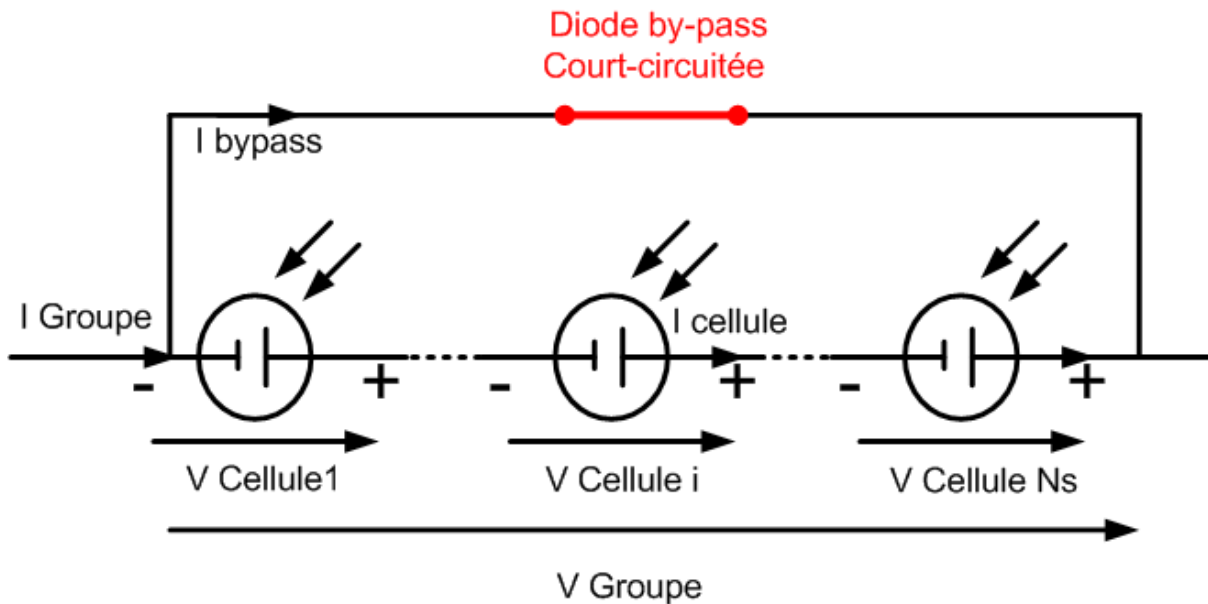


Figure II.6: Schéma d'un groupe de cellules PV avec la diode By-pass court-circuitée.

Dans le cas de court circuit, la diode se comporte comme une liaison électrique.[14]

$$V_{Groupe} = 0$$

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

$$I_{\text{Groupe}} = I_{\text{cellule}} + I_{\text{by.pass}}$$

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

Figure II.7

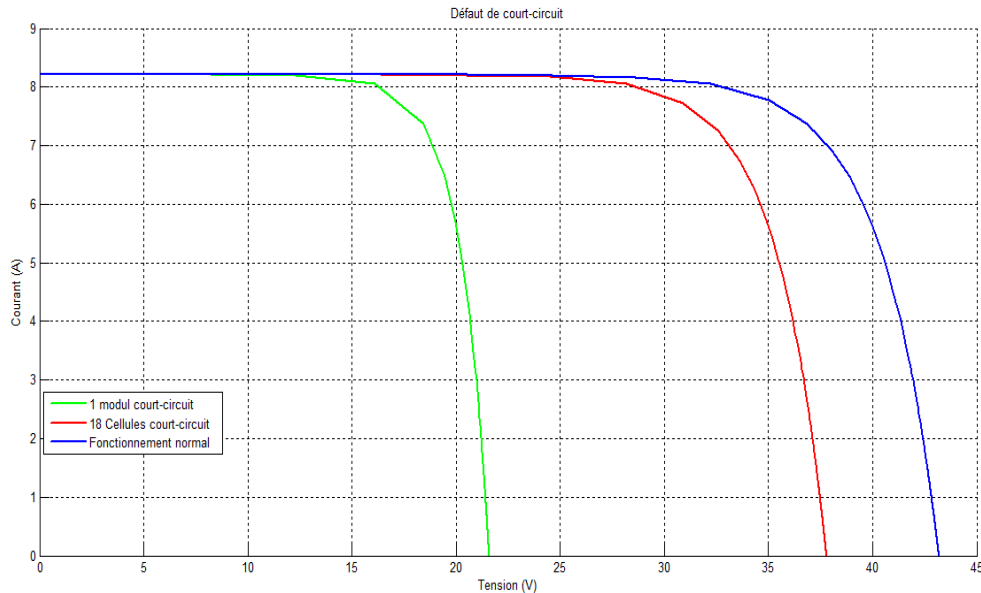


Figure II.7:Caractéristique I(V) d'un module PV avec une diode By-pass "Court-circuitée"

A partir de la figure II.7, on constate que le courant de court-circuit demeure constant car la tension en circuit ouvert diminue proportionnellement au nombre de diodes en court-circuit. La chute de tension en circuit ouvert est déterminée graphiquement.

II.3.1.3.2 Diode by-pass inverse

Lorsque la diode by-pass est inversée, elle conduit lorsque la tension totale des cellules qu'elle protège est positive

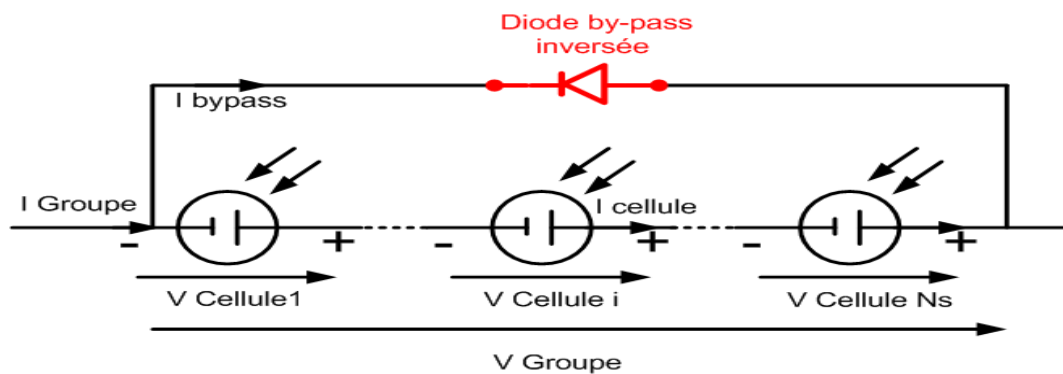


Figure II.8:Schéma d'un groupe de cellules PV avec diode by-pass inversée

Chapitre II : Défauts dans un générateur PV et leur effet sur les caractéristiques électriques

Les résultats de simulation relative à la diode by-pass inversée sont donnés dans la figure II .9 suivante :

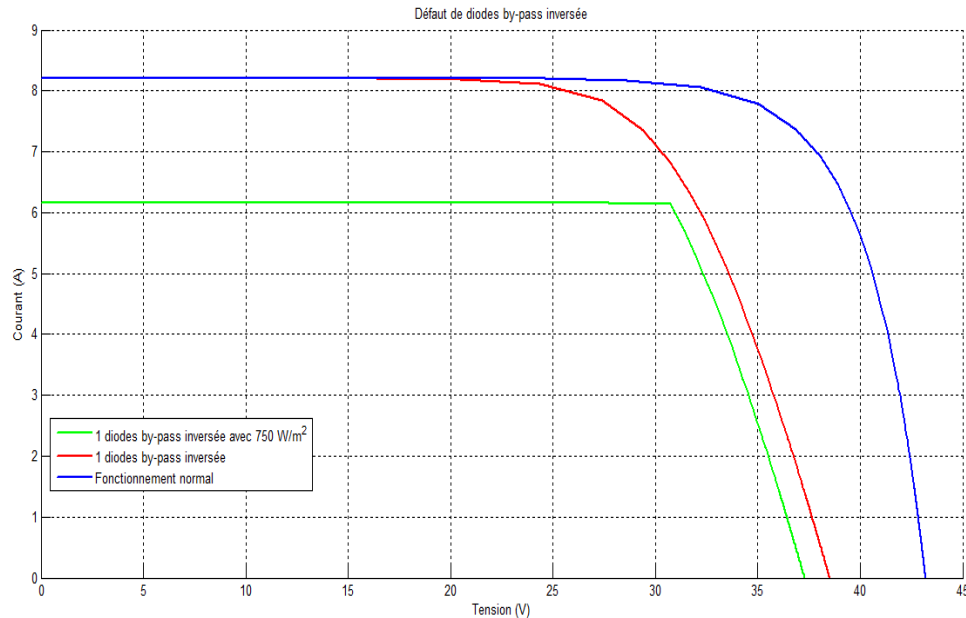


Figure II.9:Caractéristique I-V avec diode by pass inversée

En l'absence de l'ombrage, la diode By-pass est passante, alors la tension du module est diminuée. En présence d'ombrage la diode By-pass est bloquée, cela est équivalent au cas où la diode By-pass est déconnectée.

Nous constatons que la tension de circuit ouvert diminue selon le nombre de diodes inversées alors que le courant de court-circuit et le facteur de forme subissent une forte diminution en fonction du nombre de cellules ombrées.

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents défauts rencontrés fréquemment dans la pratique avec également leurs effets sur les caractéristiques I-V. dans le chapitre qui suit, nous présentons les différentes techniques dédiées au diagnostic des systèmes PV tout en appliquant une d'entre elles dite électriques dans notre étude, en se servant des résultats du présent chapitre.

**Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées
aux systèmes PV et résultats de simulation.**

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plus particulièrement à la détection de défauts dans un système PV. Nous présentons tout d'abord les différentes méthodes de diagnostic relevant de la littérature. En ce qui concerne la détection de défaut, nous allons créer des défauts (ombrage, diode by-pass inversée/ court-circuitée...) au niveau d'un générateur PV dans l'environnement Matlab. Puis, par comparaison des différents paramètres caractérisant le générateur PV en fonctionnement sain et défaillant, une décision sur la nature du défaut dont il s'agit sera établie. La technique de détection étudiée sera testée dans différents cas de figures : présence d'un seul défaut, deux défauts ou plusieurs défauts à la fois.

III-2 Méthodes de diagnostic d'un générateur PV

En effet, deux grandes familles de techniques dédiées au diagnostic d'un générateur PV peuvent être distinguées : celles utilisées dans l'industrie, et d'autres qui relevant de la littérature. Dans les deux paragraphes qui suivent nous décrivons. Ces deux catégories :

- Méthodes courantes industrialisées.
- Méthodes proposées dans la littérature.

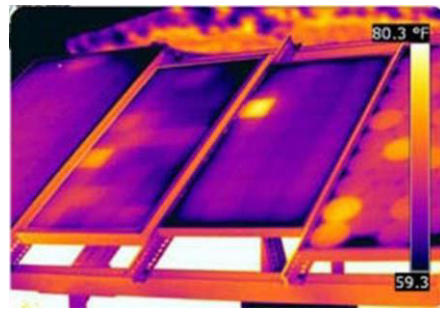
III-2-1 Méthodes de diagnostic utilisées dans l'industrie

On peut distinguer deux catégories de méthodes de diagnostic courantes industrialisées : des méthodes reposant sur l'analyse du courant et de la tension (que nous appellerons méthodes électriques) et des méthodes reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V (que nous appellerons méthodes non -électriques) [4].

- Méthodes non électriques.
- Méthodes électriques.

III-2-1-1 Méthodes non -électriques

Il existe plusieurs méthodes non-électriques, destructives ou non destructives, pour diagnostiquer le défaut au niveau de cellule P V. Le défaut principal qui peut avoir lieu à ce niveau est la fissure de la cellule. On peut citer comme méthodes : les essais mécaniques de flexion, l'imagerie par photoluminescence et électroluminescence, tests de thermographie [19,20]. Pour le diagnostic des modules PV, la méthode de l'imagerie (caméra thermique) infrarouge est largement appliquée [4].



(a) cellule court-circuitée



(b) corrosion dans la boîte de jonction

Figure III.1: Quelques exemples de la localisation de défauts par la caméra thermique

Quelques succès de la localisation de défauts utilisant la caméra thermique ont été reportés: courant de fuite dans la cellule, augmentation de la résistance de la connectique entre les cellules, échauffement anormal des cellules, conduction de la diode de by-pass

Cette méthode peut être également appliquée pour les connectiques dans la boîte de jonction, la fonctionnalité de la diode anti-retour.

III-2-1-2 Méthodes électriques

Dans ces méthodes les grandeurs mesurées les plus courantes sont :

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

Il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires que sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques [4].

Les mesures du côté AC sont plus importantes en nombre car directement liées à l'énergie qui sera vendue. Il est courant de relever :

- Le courant AC.
- La tension AC.
- La fréquence.
- L'impédance du réseau vue par l'onduleur.

Des mesures écrites dans les deux paragraphes précédents, il est aisé de déduire :

- La puissance instantanée DC
- La puissance instantanée AC

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

- L'énergie produite sur différentes périodes (suivant la capacité de stockage des données) côtés DC et AC.

On y ajoute souvent :

- La durée de fonctionnement de l'onduleur
- La date de mise en service
- Le CO2 non rejeté dans l'atmosphère (économisé)

Les alertes de défaillance du système (principalement les défauts d'isolement).

III-2-2 Méthodes dans la littérature

Les différentes méthodes proposées dans la littérature pour la détection et la localisation des défauts ou l'une des deux fonctions (détection ou localisation), sont les suivantes :

III-2-2-1 Méthode de réflectométrie

La méthode de réflectométrie est une méthode de diagnostic qui consiste à envoyer un signal dans le système ou le milieu à diagnostiqué. Ce signal se propage selon la loi de propagation du milieu étudié et lorsqu'il rencontre une discontinuité, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. L'analyse du signal réfléchi permet de déduire des informations sur le système ou le milieu considéré [4].

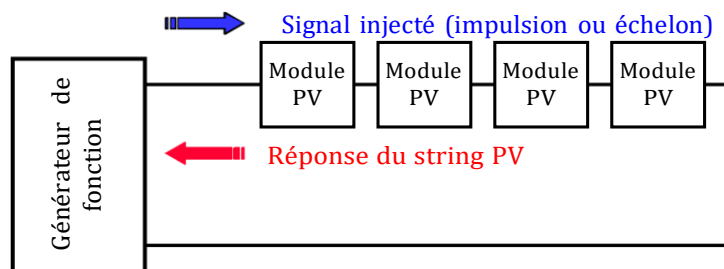


Figure III -2: Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV

III-2-2-2 Analyse de la puissance et de l'énergie produite

La puissance ou l'énergie mesurée est comparée à celle attendue et lorsqu'une déviation importante a lieu, on considère qu'il y a un défaut.

L'analyse mentionnée consiste à générer des attributs supplémentaires de la chute de la puissance ou de l'énergie produite telles que : la durée, l'amplitude, la fréquence et les instants de la chute. Ces mêmes attributs sont également prédéterminés pour les différents défauts considérés. Lors de leur comparaison, le défaut dont la valeur des attributs considérés est la plus proche de celle déduite des grandeurs mesurées est considéré comme le défaut responsable de la chute [4]

III-2-2-3 Analyse du point de fonctionnement

Outre la comparaison de la puissance ou de l'énergie produite actuelle et celle attendue, la comparaison du point de la puissance maximale actuel (courant et tension correspondant à la puissance maximale) et celui attendu peut apporter plus d'information sur l'état du système PV. La comparaison relationnelle entre ces courants et entre ces tensions donne deux couples de valeur binaire (0 ou 1). Suivant la combinaison de ces deux couples, la nature des problèmes du champ PV peut être identifiée.

Les quatre familles de problèmes sont les suivantes :

- modules défectueux dans un string.
- string défectueux.
- famille de défauts non discriminables : ombrage, erreur de MPPT, vieillissement.
- fausses alarmes.[14]

III-2-2-4 Analyse de la caractéristique statistique

La déformation de la caractéristique courant-tension peut être provoquée par le changement de la condition de fonctionnement (ensoleillement ou température) ou par l'apparition d'un ou des défauts dans le système PV. La figure III-3 montre l'allure de la caractéristique I-V en mode défaillant (ombrage d'un module de 36 cellules à 50%) comparée à celle du mode normal.

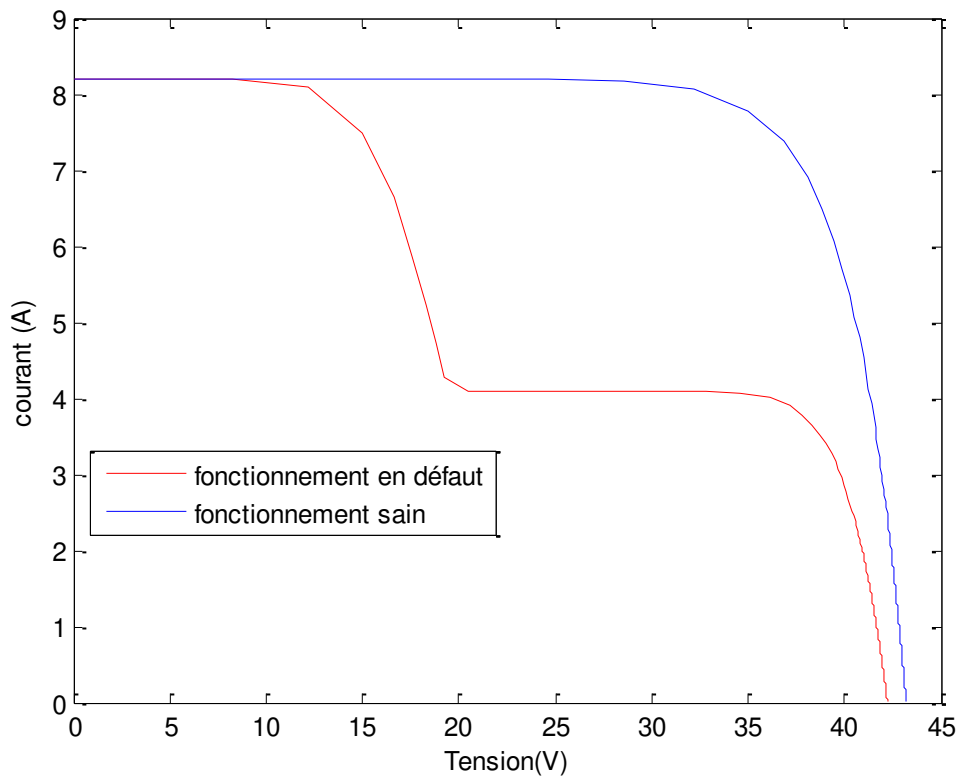


Figure III -3 : Allure de la caractéristique I -V d'un champ PV en fonctionnement défaillant

En exploitant des informations de la caractéristique I-V du champ PV (en défaut), la détection et la localisation de défauts peuvent être réalisées. Une telle analyse est issue de la littérature :

- La dérivée du courant par rapport à la tension (dI /dV) tout au long de la caractéristique permet de détecter le défaut d'ombrage dans un string ou dans un champ.
- L'extraction des paramètres (résistance série, température de fonctionnement au STC – Conditions de Test Standard, point de puissance maximale au STC) permet de détecter le défaut dans un module ou dans un string (augmentation de la résistance série entre cellules ou entre modules, vieillissement) [15].

L'analyse de la caractéristique I-V consiste à étudier l'impact des différents défauts (dans la cellule, module, string et champ) sur la performance du champ PV, donc sur la caractéristique I-V elle-même.

III-3 Identification des symptômes moyennant l'analyse des caractéristiques électriques en présence de défauts :

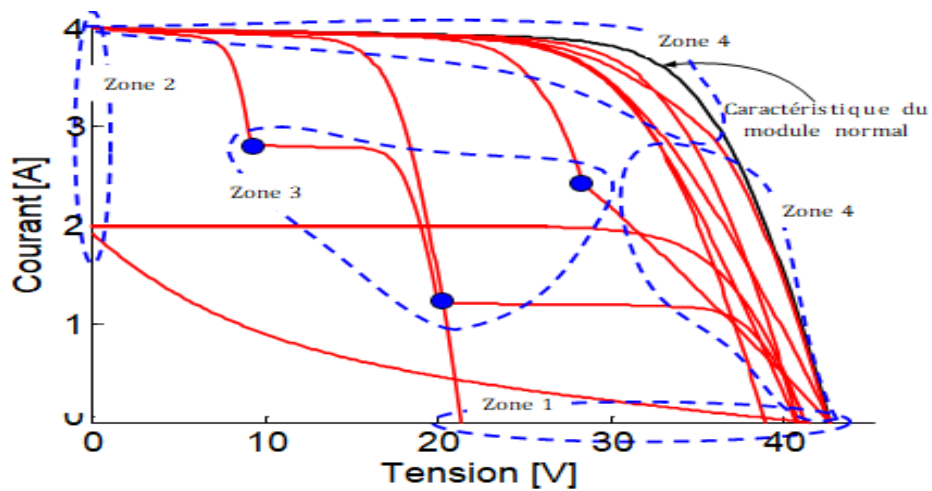


Figure III-4 : Caractéristiques défaillantes d'un module PV

Le Tableau III-1 présente les différents symptômes issus de la présence de défauts d'après la référence [4]

Tableau III-1 : différents symptômes identifiés via une comparaison des caractéristiques

Symptôme	Zone de la caractéristique I-V	Nom du symptôme
s1	-	réduction de la puissance maximal
s2	zone 1	réduction de la tension de circuit ouvert
s3	zone 2	réduction du courant de court-circuit
s4	zone 3	présence d'un ou des points d'inflexion
s5	zone 4	déviations de la pente

Le symptôme « s1 » est le tout premier symptôme que l'on puisse extraire de cette comparaison car il semble évident qu'un Défaut quelconque, une fois apparu, entraînera une

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

perte de la puissance produite. Par contre, cette constatation n'est pas toujours vraie car certains défauts, lorsqu'ils apparaissent tout seul (défauts simples), ne conduisent à aucune perte de puissance. On peut citer comme exemple la déconnexion de la diode de by-pass.

Le symptôme « s2 » est l'écart entre la tension de circuit ouvert du système PV en fonctionnement normal et celle en fonctionnement défaillant (voir zone 1 de la figure).

Le symptôme « s3 » est l'écart entre le courant de court-circuit du système PV en fonctionnement normal et celui en fonctionnement défaillant (voir zone 2 de la figure).

Le symptôme « s4 » se réfère à la déviation brusque de la caractéristique I-V en défaut qui conduit dans cette dernière à un ou des points d'inflexion comme l'on peut le voir dans la zone 3 de la figure.

Le symptôme « s5 » se réfère à la déviation de la pente de la caractéristique I-V en défaut par rapport à celle en fonctionnement sain (voir zone 4 de la figure). On considère qu'il n'y a pas de déviation si le profil de la chute en tension et en courant est constant tout au long de la courbe I-V. Dans le cas contraire, on constate qu'il y a une déviation. On s'intéressera dans ce cas au profil de la chute en tension dans la partie verticale de la courbe (partie à courant faible) et au profil de la chute en courant dans la partie horizontale de la courbe (partie à courant fort). [4]

III-3-1 Paramètres de diagnostic

Pour la conception d'un algorithme de détection de défauts pouvant affecter un générateur photovoltaïque, nous considérons quatre paramètres indicateurs de performances d'un GPV. Pour la réalisation des symptômes de signatures correspondant aux défauts, deux états logiques, « 0 » et « 1 », ont été considérés pour chaque symptôme indiquant ainsi leur présence ou bien leur absence à savoir : le facteur de performance, réduction de courant de court-circuit, réduction de la tension de circuit ouvert, ratio du courant

➤ Facteur de performance

Le facteur de performance «**PF : Performance Factor**» apparaît en tout Défaut. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale mesurée et la puissance maximale de référence. La réduction du facteur de puissance PF est dans tous les défauts, excepté la déconnexion la diode de by-pass DBP, car ce dernier défaut n'apparaît que s'il y a un ombrage partiel. Il s'exprime par la relation suivant :

$$PF = \frac{P_{mp(mes)}}{P_{mp(réf)}} \cdot 100\% \quad (\text{III.1})$$

➤ **Réduction du courant de court-circuit**

Ce paramètre peut être exprimé par l'écart entre le courant de court-circuit du GPV en fonctionnement normal $I_{sc} (réf)$ et celui en fonctionnement défaillant $I_{sc} (mes)$. Il est donné par l'expression suivant.

$$\Delta I_{sc} = I_{sc(réf)} - I_{sc(més)} \quad (\text{III.2})$$

➤ **Réduction de la tension du circuit-ouvert**

Elle représente l'écart entre la tension de circuit ouvert du GPV en fonctionnement normal $V_{OC} réf$ et celle en fonctionnement défaillant $V_{OC} més$. Cet écart s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta V_{co} = V_{co(réf)} - V_{co(més)} \quad (\text{III.3})$$

➤ **Ratio du courant**

Il est défini par le rapport du courant correspondant à la puissance maximal et le courant de court-circuit. Il est donné par la relation suivant:

$$C_R = \frac{I_{mpp}}{I_{cs}} \quad (\text{III.4})$$

III-3-2 Vecteurs formant la matrice des symptômes

L'association des cinq paramètres révélateurs de défauts décrits précédemment, constitue un vecteur de diagnostic représentant les symptômes de mauvaises performance ou paramètres de diagnostic (PF, ΔI_{sc} , ΔV_{oc} , C_R , V_R). Pour l'établissement d'une stratégie de diagnostic, il est nécessaire d'attribuer à chaque composante du vecteur un 1 ou un 0 selon la présence ou l'absence de défaut qu'elle représente. Cela conduit à établir une matrice décrivant les éventuelles possibilités relatives aux défauts.

A titre d'exemple, nous donnons, dans le tableau III.2, douze combinaisons possibles du vecteur sous forme de matrice avec les défauts correspondant à chaque situation. On convient d'appeler cette représentation matrice des symptômes.

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

Tableau III.2: Nature de défauts et états des paramètres de diagnostic

Nature de défaut	Etat des paramètres de diagnostic			
	PF	ΔI_{SC}	ΔV_{OC}	C_R
Aucun défaut	0	0	0	0
Ombrage partiel	1	0	0	1
Ombrage complet	1	1	0	1
BPD inversée	1	0	1	1
BPD court-circuitée	1	0	1	1
Mismatch de R_s	1	0	0	0

III-4 Résultats de simulation :

La méthode de diagnostic que nous avons utilisée dans ce mémoire est la méthode électrique. Pour le test de la méthode considéré dans l'environnement Matlab, nous avons créé un générateur PV composé de quatre modules de dix huit cellules chacun. Chaque module est protégé par une diode by-pass.

Donc, pour tester la méthode de diagnostic, nous avons considéré plusieurs scénarios via la création de plusieurs défauts au niveau du générateur PV, à savoir :

- a. Un seul défaut :
 - Ombrage partiel affectant un seule module PV,
 - Ombrage total affectant tous les modules PV,
- b. Deux défauts à la fois :
 - Ombrage partiel avec le cas de la diode by-pass inversée,
 - Défaut de la diode série d'un module avec ombrage total,
- c. Trois défauts à la fois :
 - Ombrage partiel + défaut de la résistance série + diode by-pass inversée.

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

Pour la présentation des résultats de simulation, nous tenons à rappeler que la méthode utilisée pour le diagnostic est dite méthode électrique. Elle est inspirée de la référence [16]

Il s'agit en fait de calculer les paramètres suivants :

Le facteur de performance PF , réduction de courant de court-circuit ΔI_{sc} , réduction de la tension de circuit ouvert ΔV_{oc} , ratio du courant C_R , la résistance série R_s

Puisque il s'agit de la comparaison des paramètres du générateur en fonctionnement sain (référence) et des mêmes paramètres en présence des défauts, on procède comme suit :

- Lorsque R_s issue du fonctionnement sain est différente de R_s du issue du fonctionnement défaillant, l'application dans l'environnement Matlab affiche: [défaut de résistance série]
- Lorsque ΔV_{oc} est différent de 0 et PF est inférieur de 100, l'application dans l'environnement Matlab affiche [diode by-pass inversée]
- Lorsque ΔI_{sc} est différent de 0 et PF est inférieur de 100, l'application dans l'environnement Matlab affiche [Ombrage total]
- Lorsque ΔI_{sc} est différent de 0 et C_R est inférieur de 1, l'application dans l'environnement Matlab affiche [Ombrage partiel]
- Si aucune condition des conditions précédentes n'est vérifiée, l'application dans l'environnement Matlab affiche [Aucun défaut]

Pour les résultats de simulation, nous présentons les caractéristiques correspondantes aux différents défauts avec également les résultats d'identification de la nature du défaut affichés sur la fenêtre Matlab.

III-5 Organigramme de la méthode utilisée pour le diagnostic

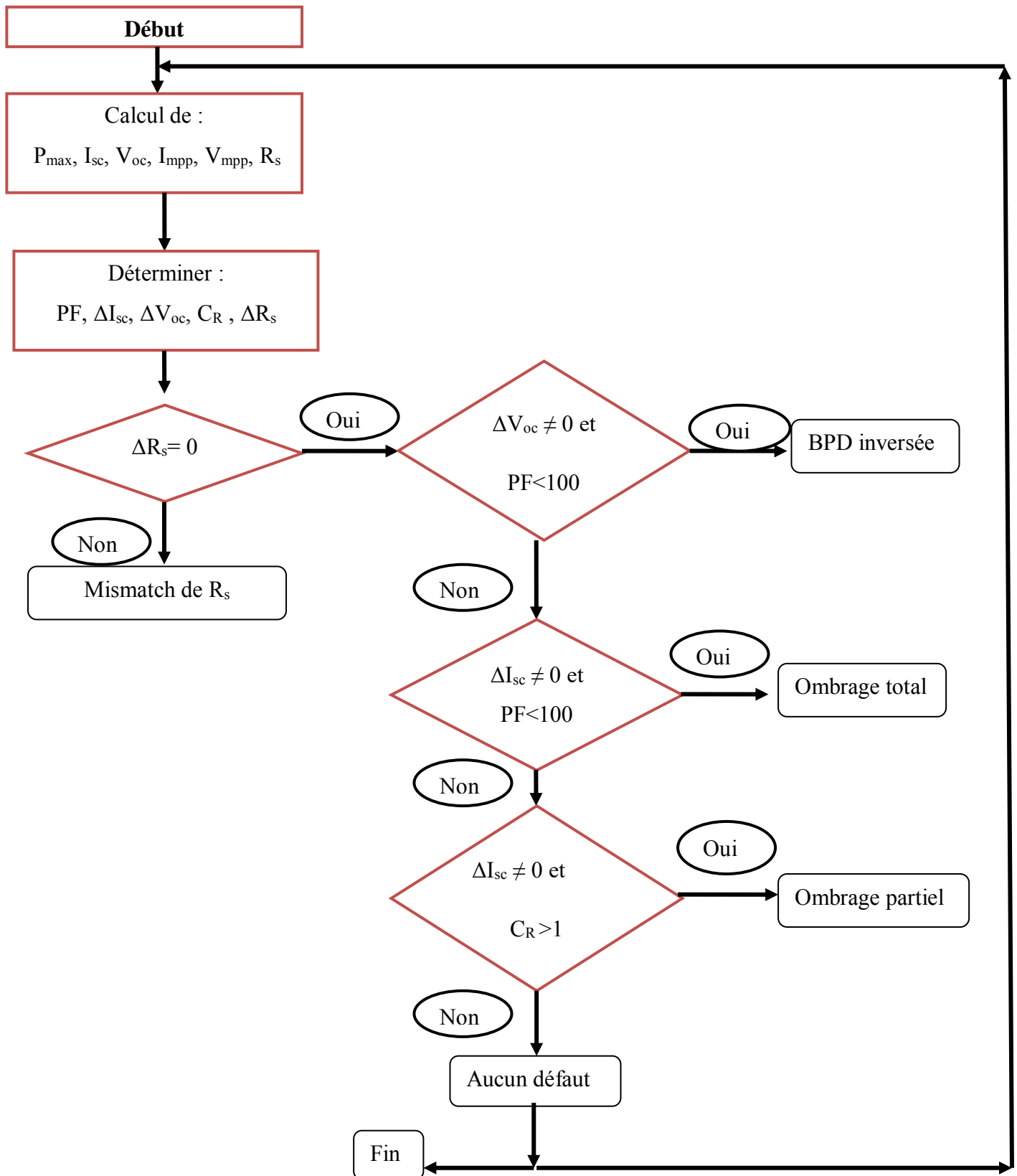


Figure III-5: Algorithme de diagnostic du GP

III-5.1 Détection d'un seul défaut

➤ 1^{er} cas : aucun défaut

Détection des défauts

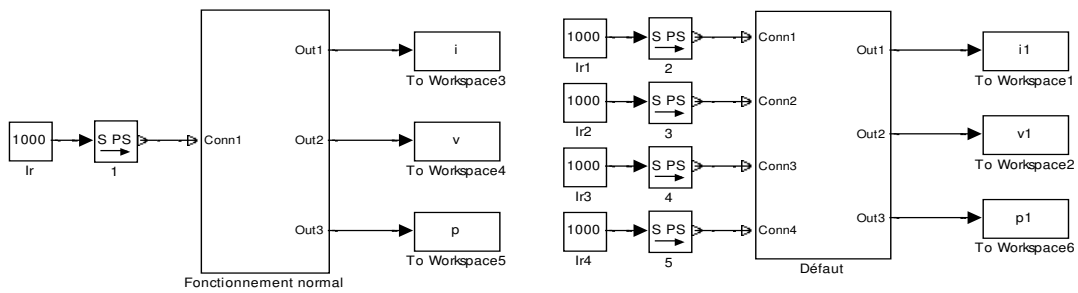


Figure III-6 : Schéma de détection de défauts sous Simulink.

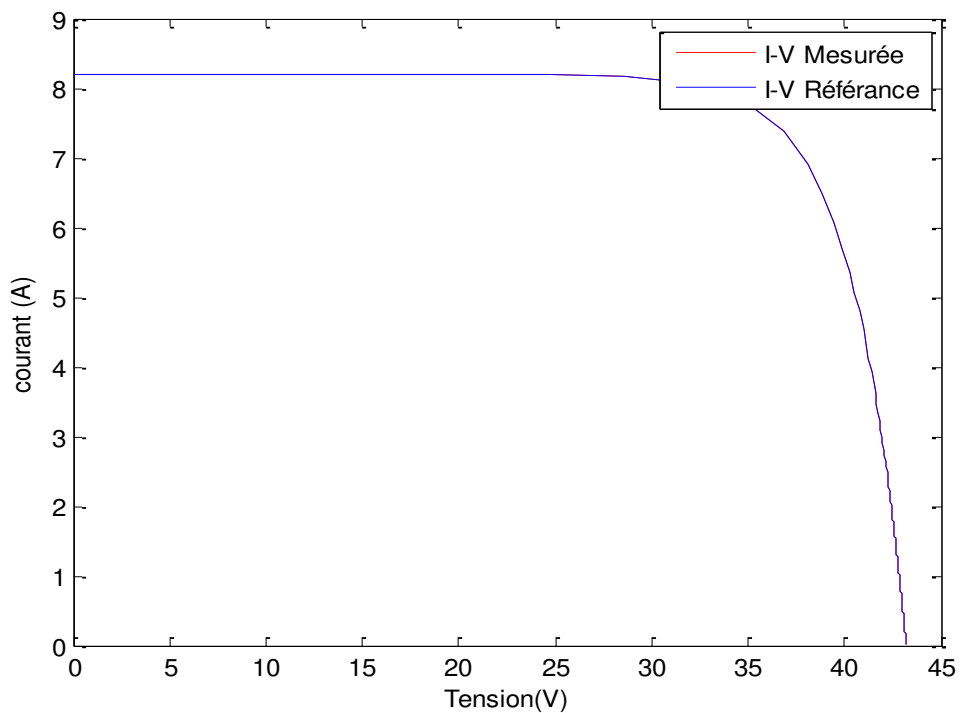
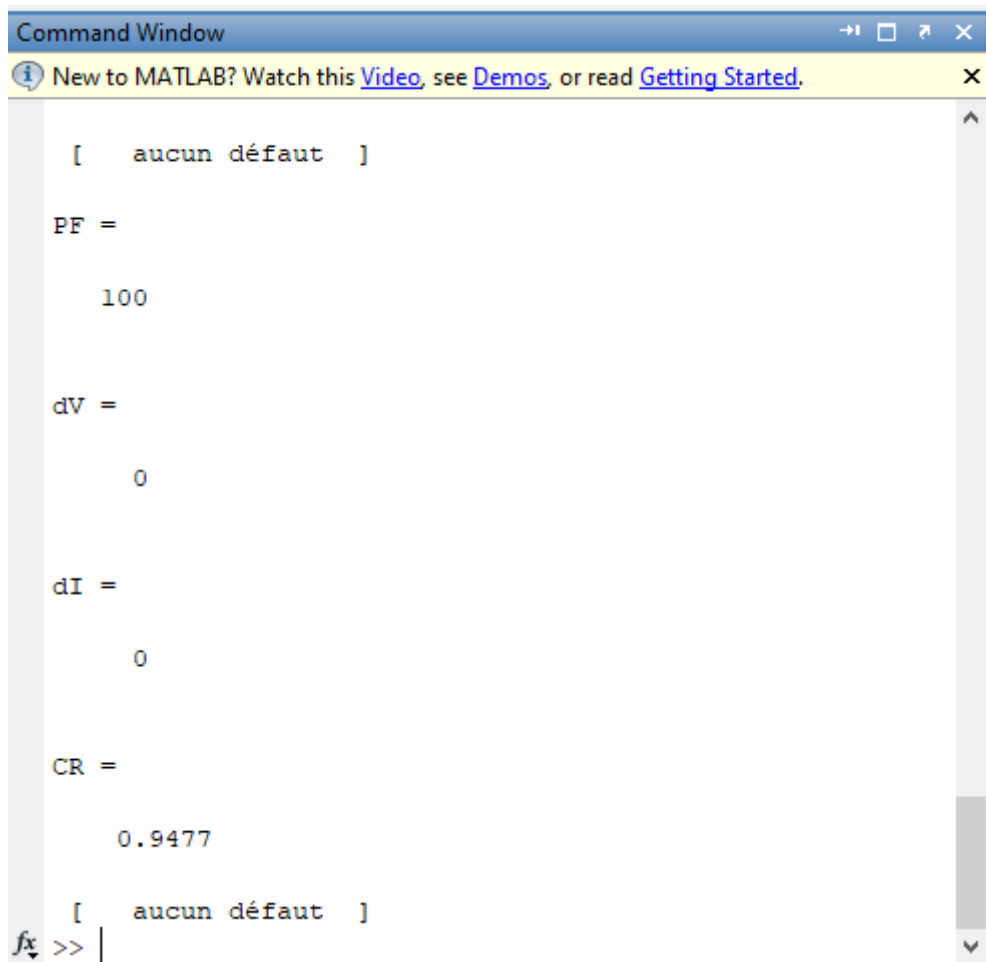


Figure III-7 : la caractéristique de I-V en absence du défaut



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
[ aucun défaut ]
PF =
    100
dV =
     0
dI =
     0
CR =
    0.9477
[ aucun défaut ]
fx >>
```

Figure III-8 : Affichage de la décision (aucun défaut).

➤ 2^{eme} cas : Mismatch de R_s

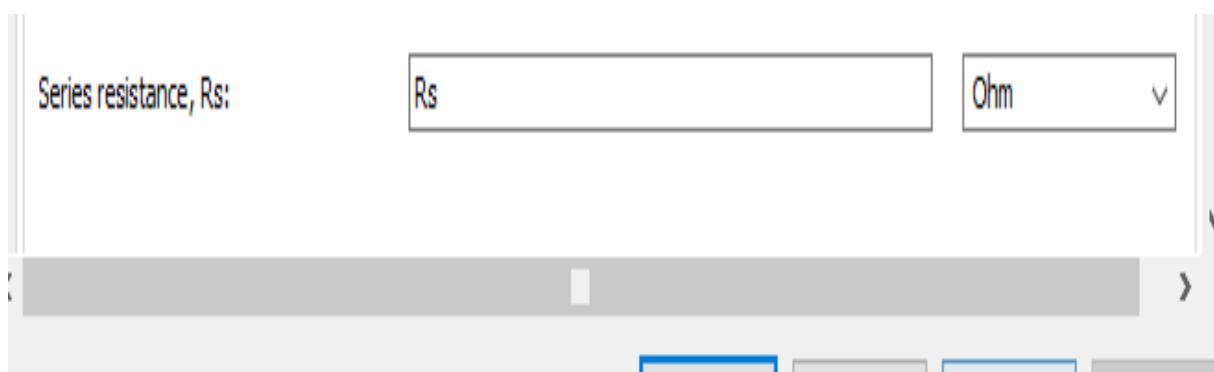


Figure III-9 : modification de la valeur de R_s

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

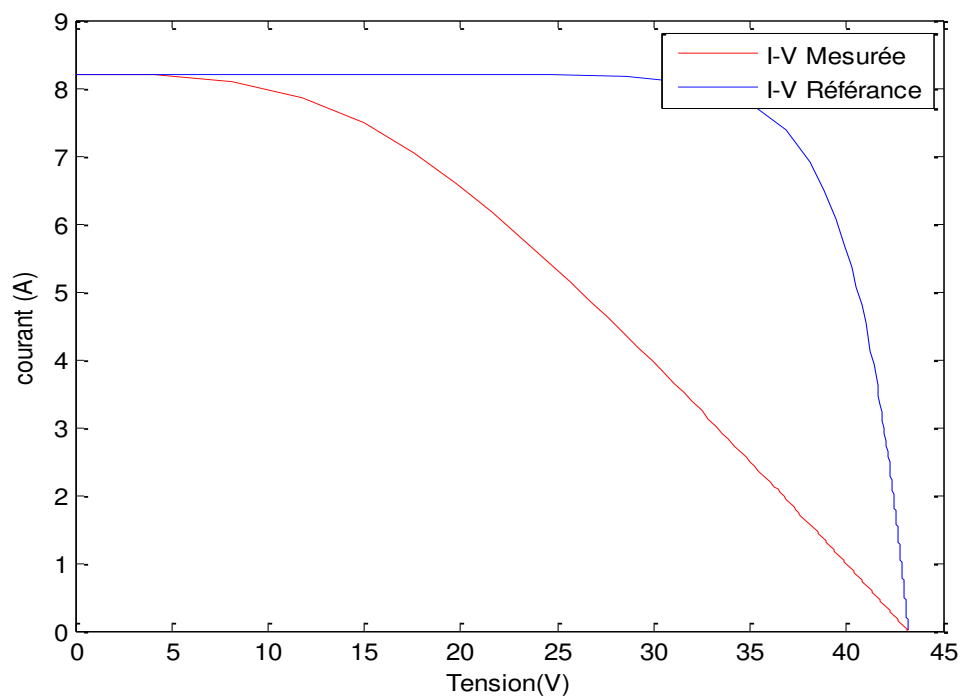


Figure III-10 : la caractéristique I-V en présence du défaut de Mismatch de R_s

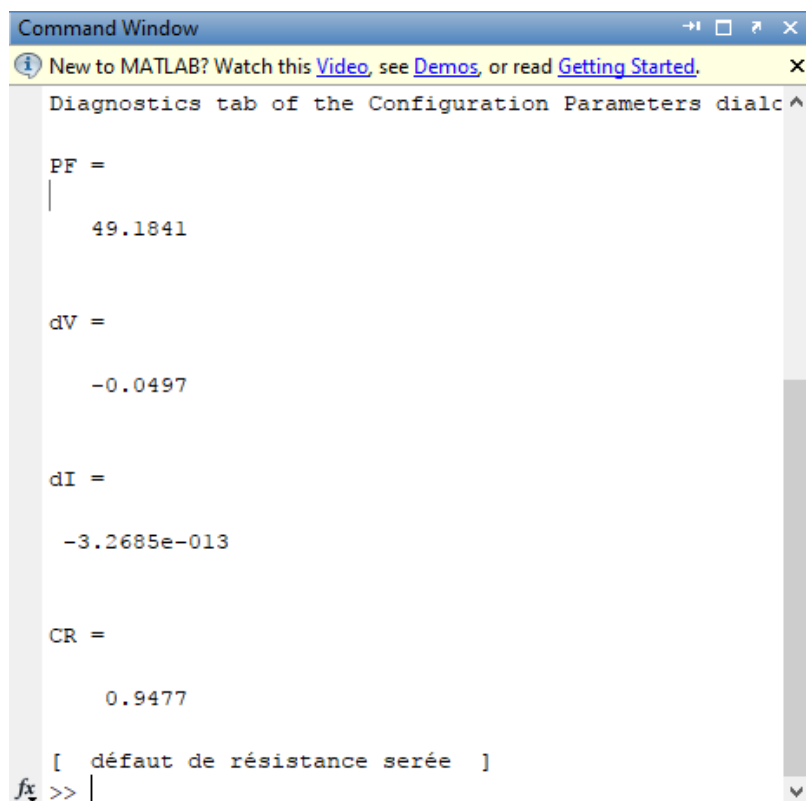


Figure III-11 : Affichage de la décision (Mismatch de R_s).

➤ 3^{eme} cas : BPD inversée

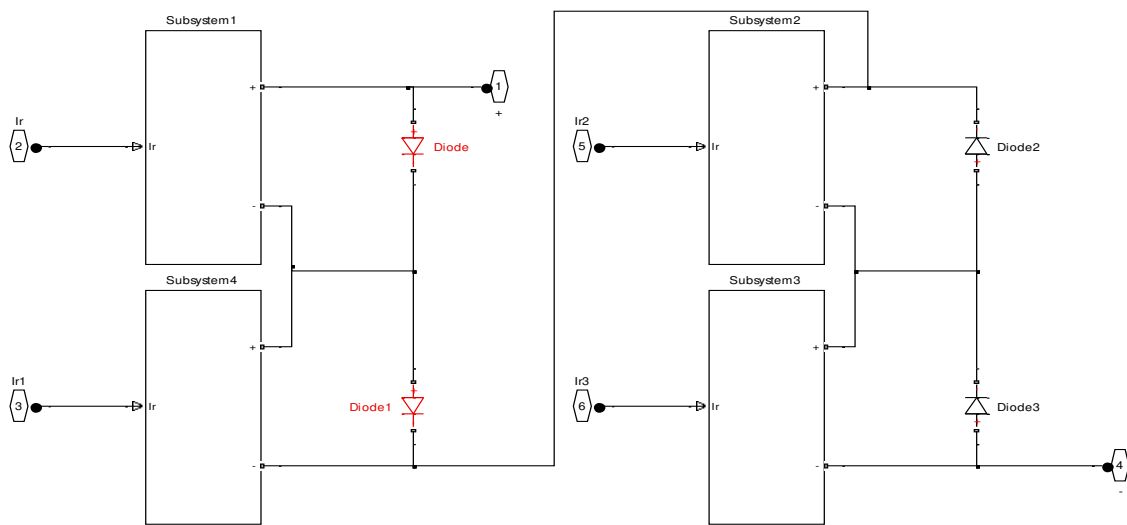


Figure III-12 : Représentation BPD inversée dans Simulink.

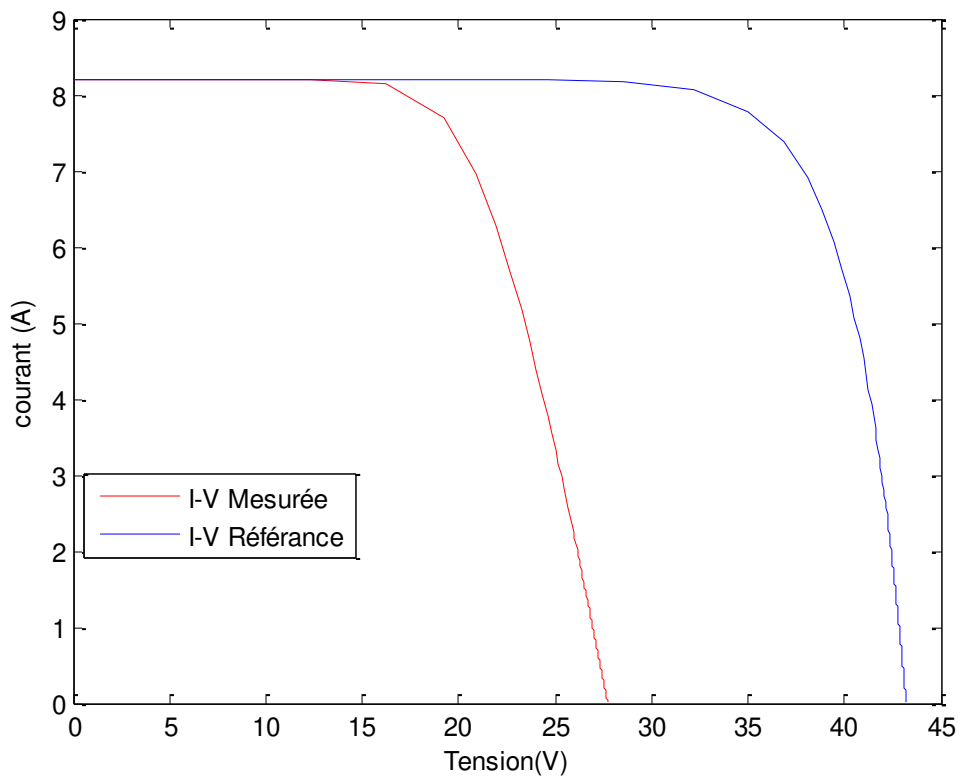
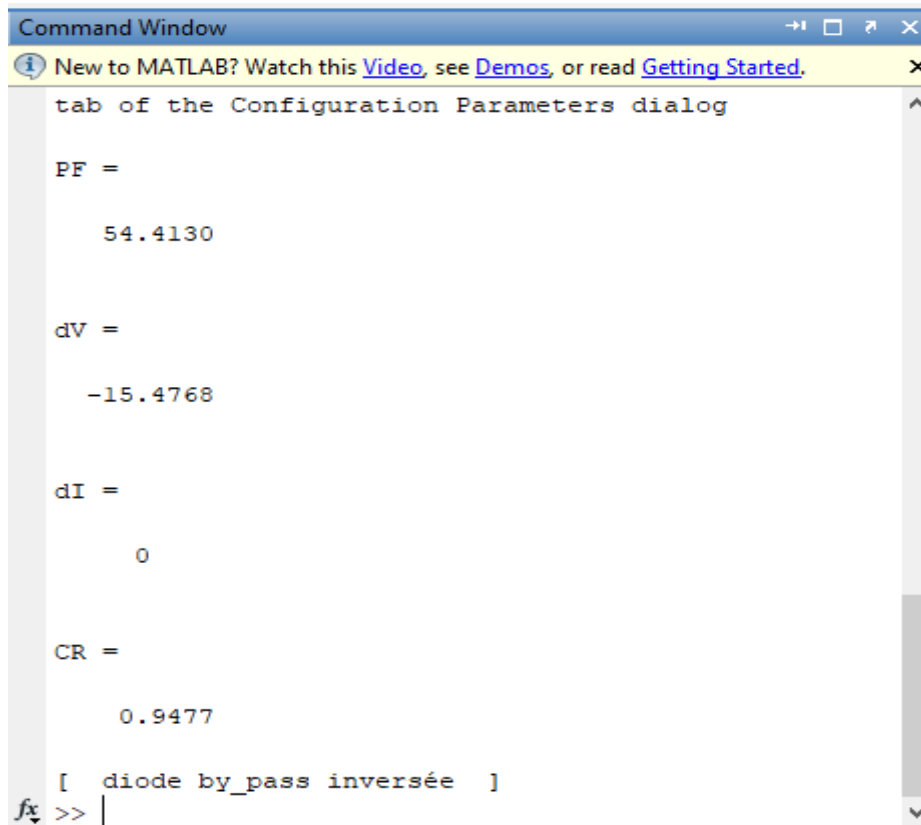


Figure III-13 : la caractéristique I-V en présence du défaut de BPD inversée

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
tab of the Configuration Parameters dialog

PF =

    54.4130

dV =

   -15.4768

dI =

     0

CR =

    0.9477

[ diode by_pass inversée ]
fx >> |
```

Figure III-14 : Affichage de la décision (BPD inversée).

➤ 4^{eme} cas : Ombrage partiel

Détection des défauts

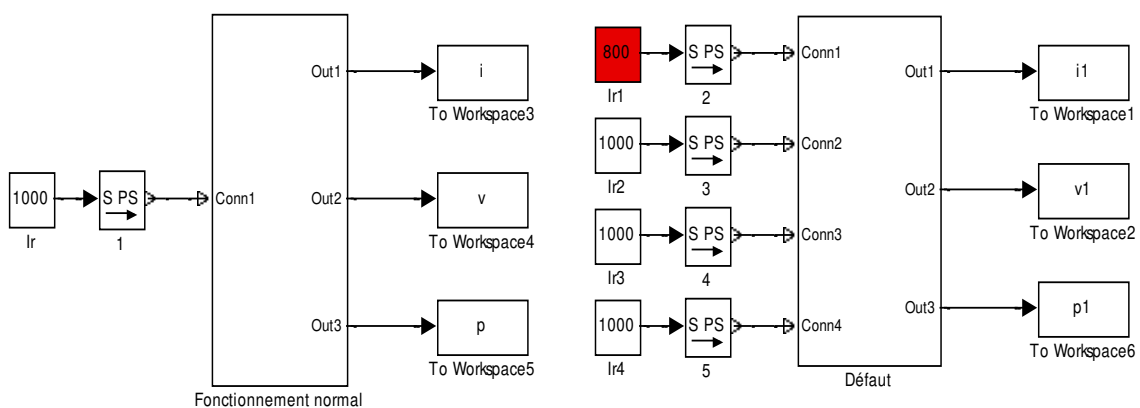


Figure III-15 : Représentation de l'ombrage partiel dans Simulink.

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

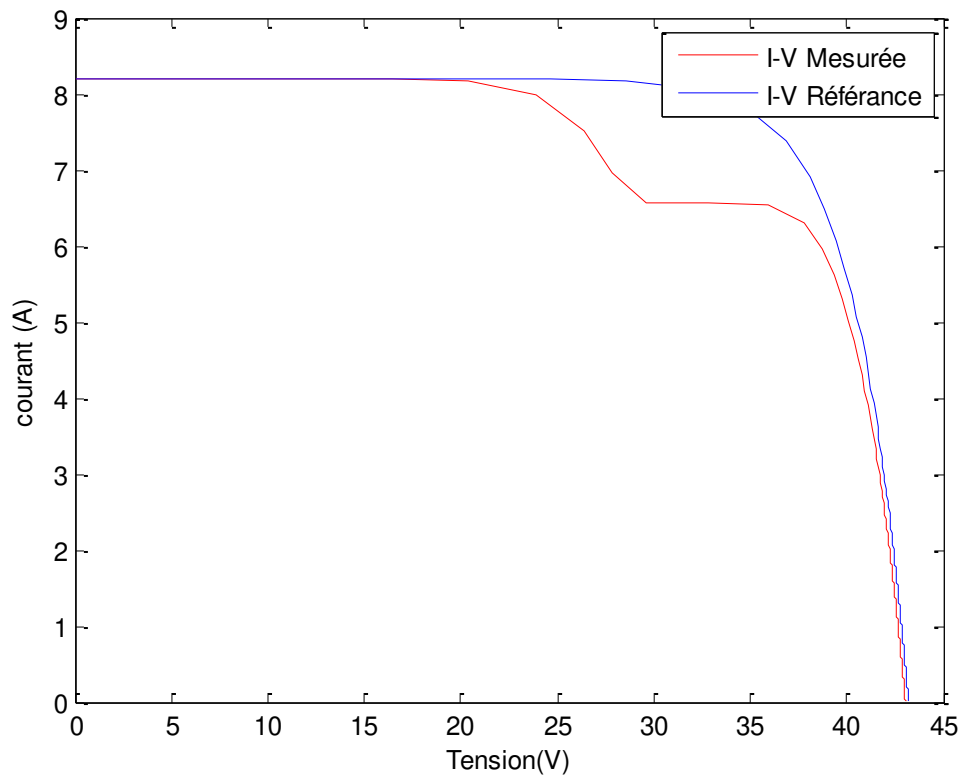


Figure III-16 : la caractéristique I-V en présence du défaut de l'ombrage partiel

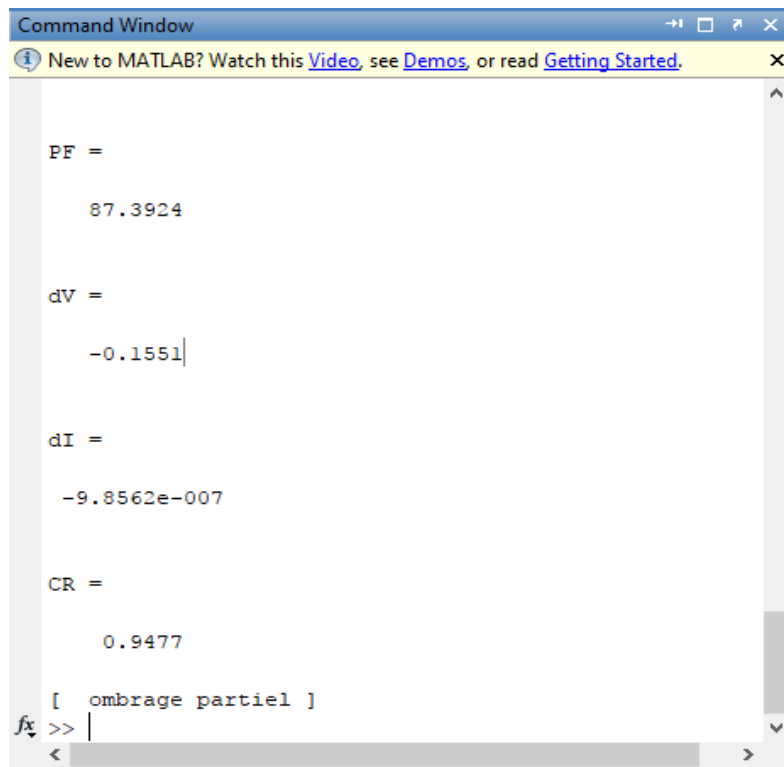


Figure III-17 : Affichage de la décision (ombrage partiel).

➤ 5^{eme} cas : Ombrage total

Détection des défauts

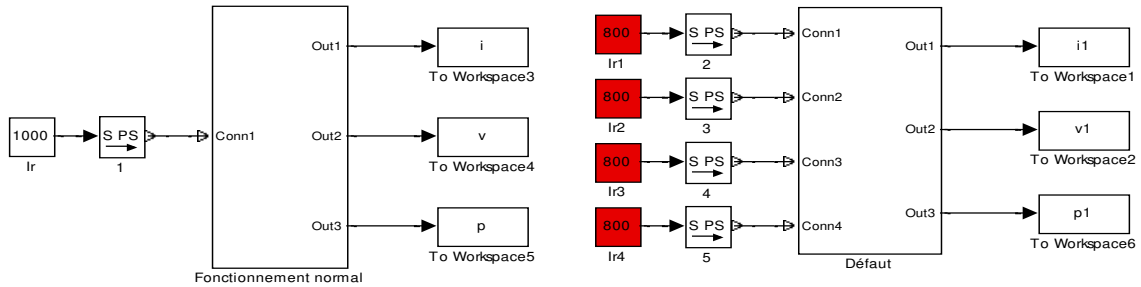


Figure III-18 : Représentation de l'ombrage total dans Simulink.

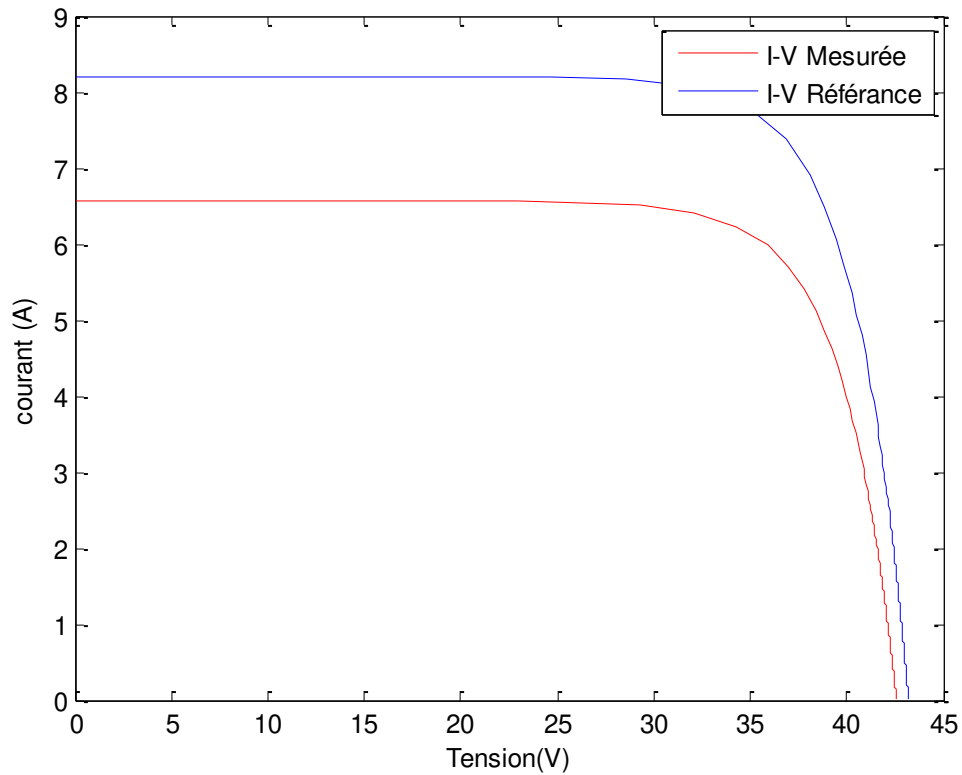
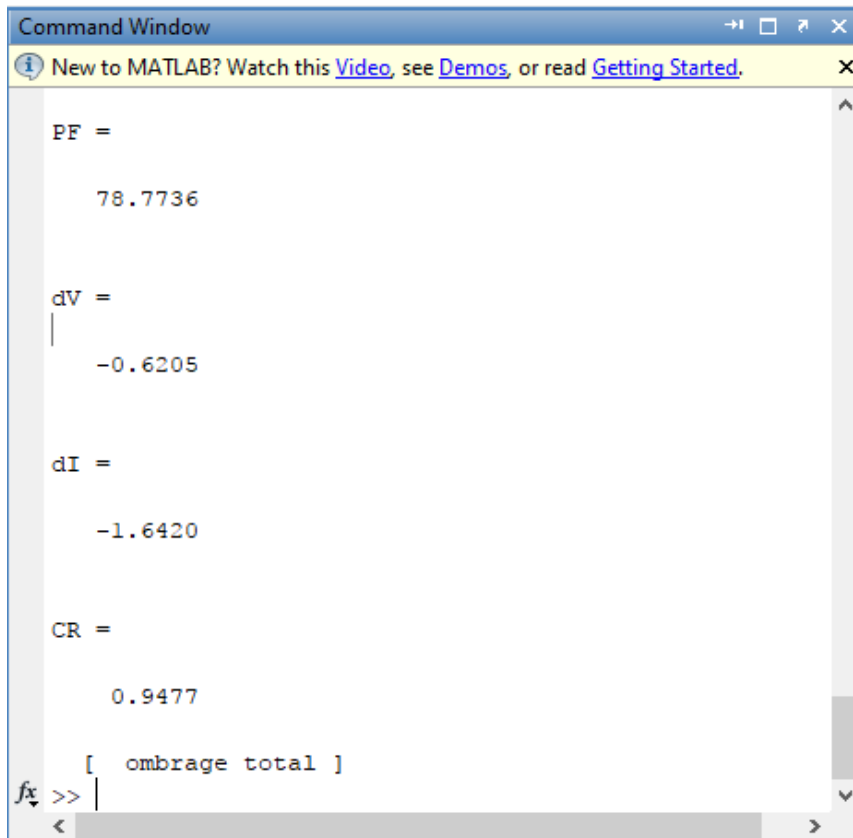


Figure III-19 : la caractéristique I-V en présence du défaut de l'ombrage total

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

PF =

    78.7736

dV =

    -0.6205

dI =

    -1.6420

CR =

    0.9477

[ ombrage total ]
fx >>
```

Figure III-20 : Affichage de la décision (ombrage total).

III-5.2 Détection de deux défauts

- 1^{er} cas : Ombrage total avec Mismatch de R_s

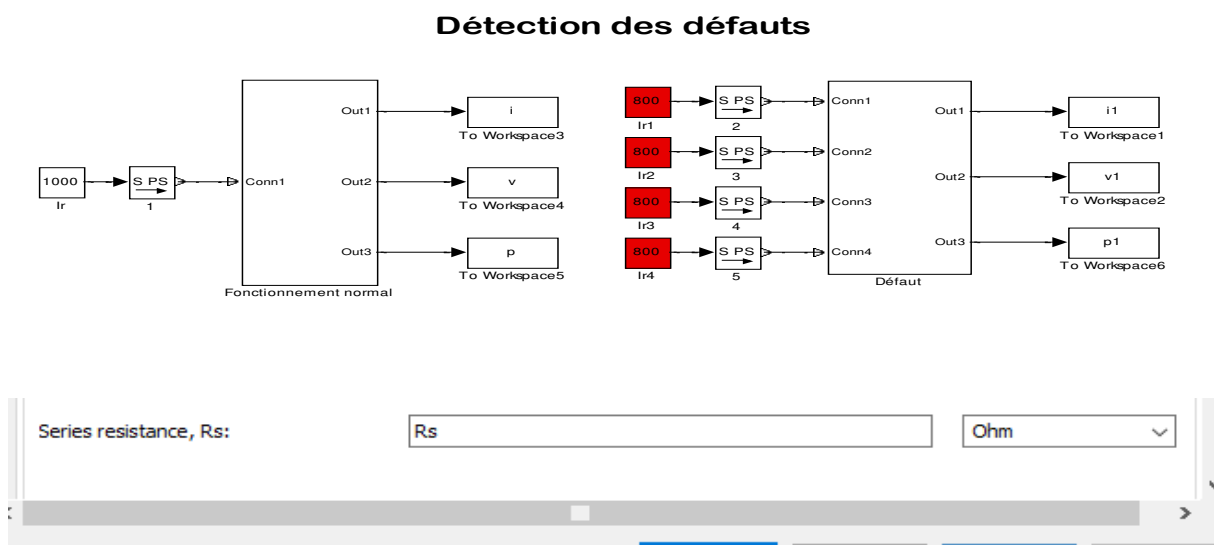


Figure III-21 : Représentation des deux défauts Ombrage total avec Mismatch de R_s dans

Simulink.

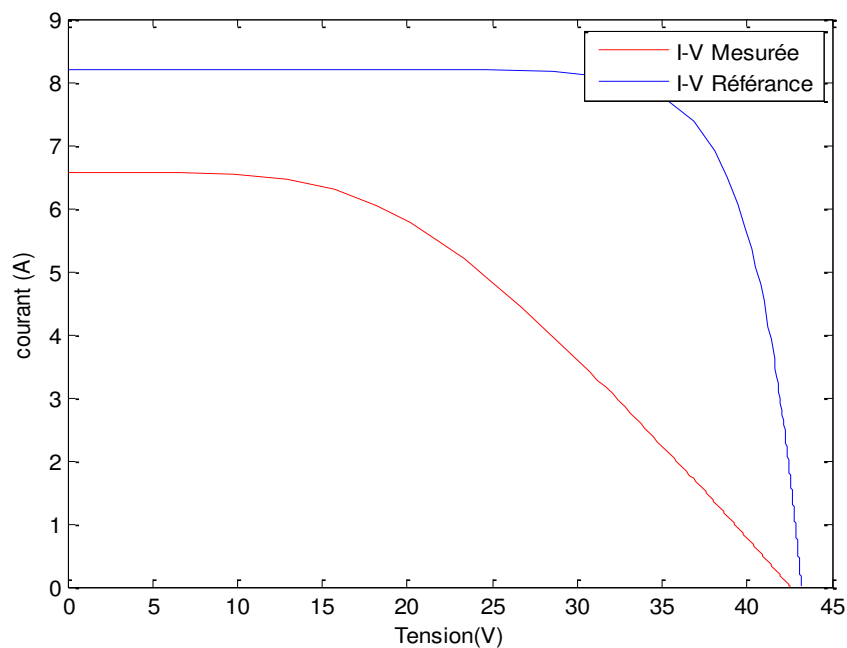


Figure III-22 : la caractéristique I-V en présence du défaut de l’Ombrage total avec Mismatch de R_s

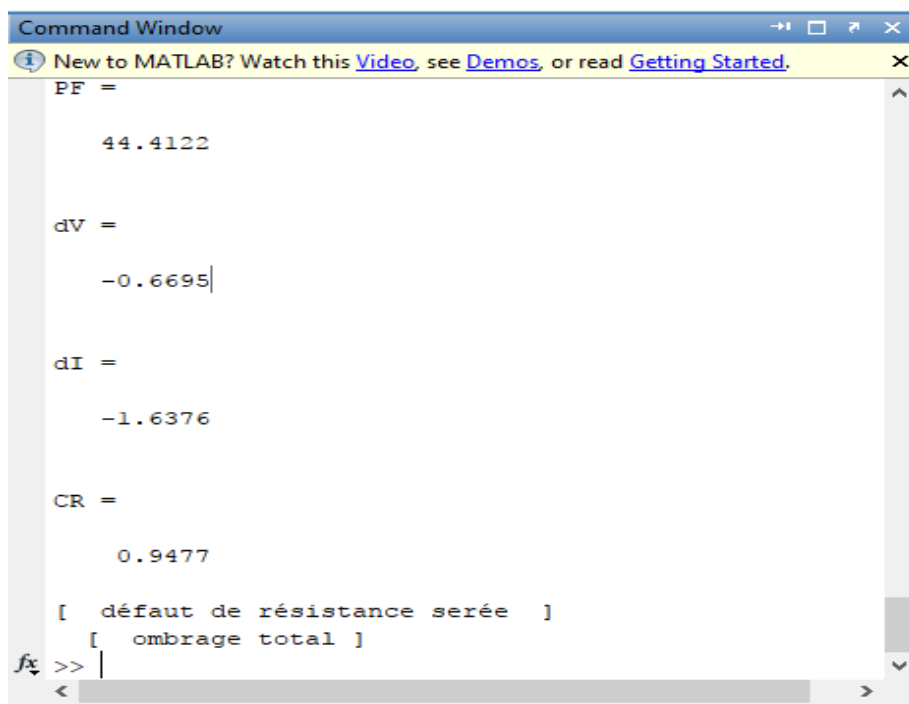


Figure III-23 : Affichage de la décision (Ombrage total avec Mismatch de R_s).

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

➤ 2^{ème} cas : Ombrage partiel avec BPD inversée

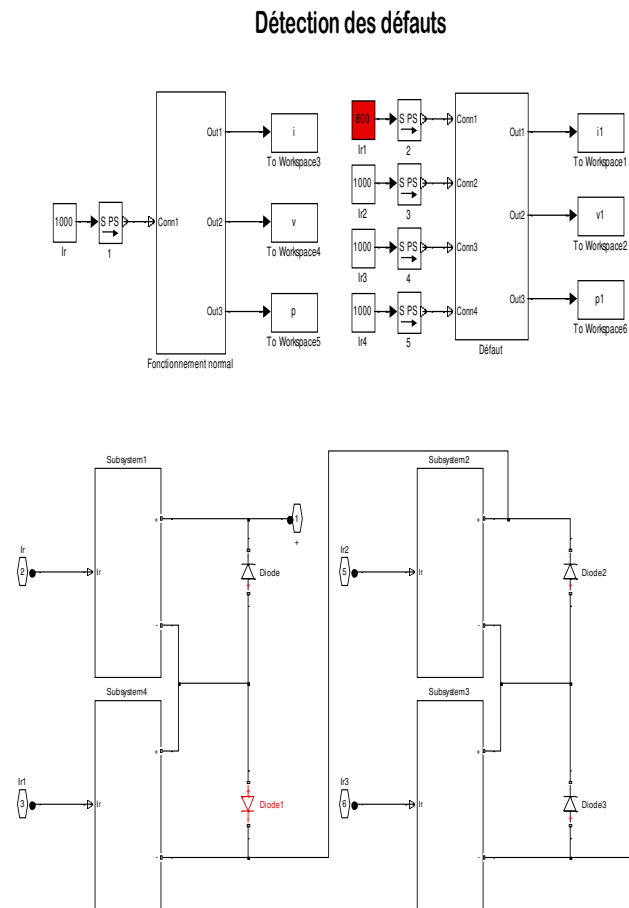


Figure III-24: Représentation des deux défauts Ombrage partiel avec BPD inversée dans Simulink.

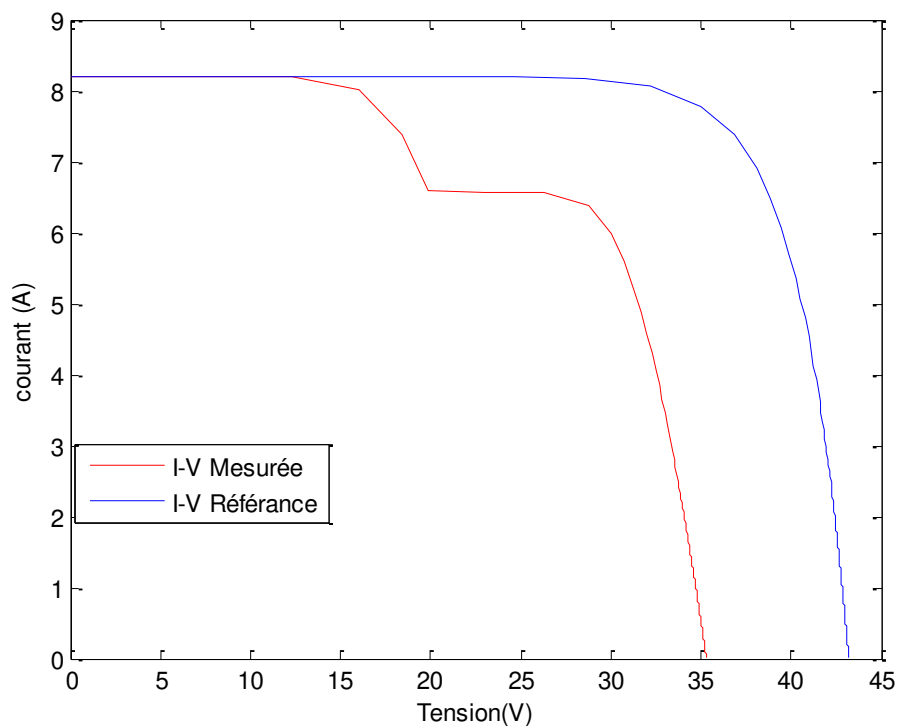


Figure III-25 : la caractéristique I-V en présence du défaut de l'Ombrage partiel avec BPD inversée

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
PF =
    67.5452

dV =
   -7.8941

dI =
|
-9.8562e-007

CR =
    0.9477

[ diode by_pass inversée ]
[ ombrage partiel ]
fx >> |
<
```

Figure III-26 : Affichage de la décision (Ombrage partiel avec BPD inversée).

III-5.3 Détection de trois défauts

- 1^{er} cas : Ombrage partiel avec BPD inversée avec de Mismatch (R_s)

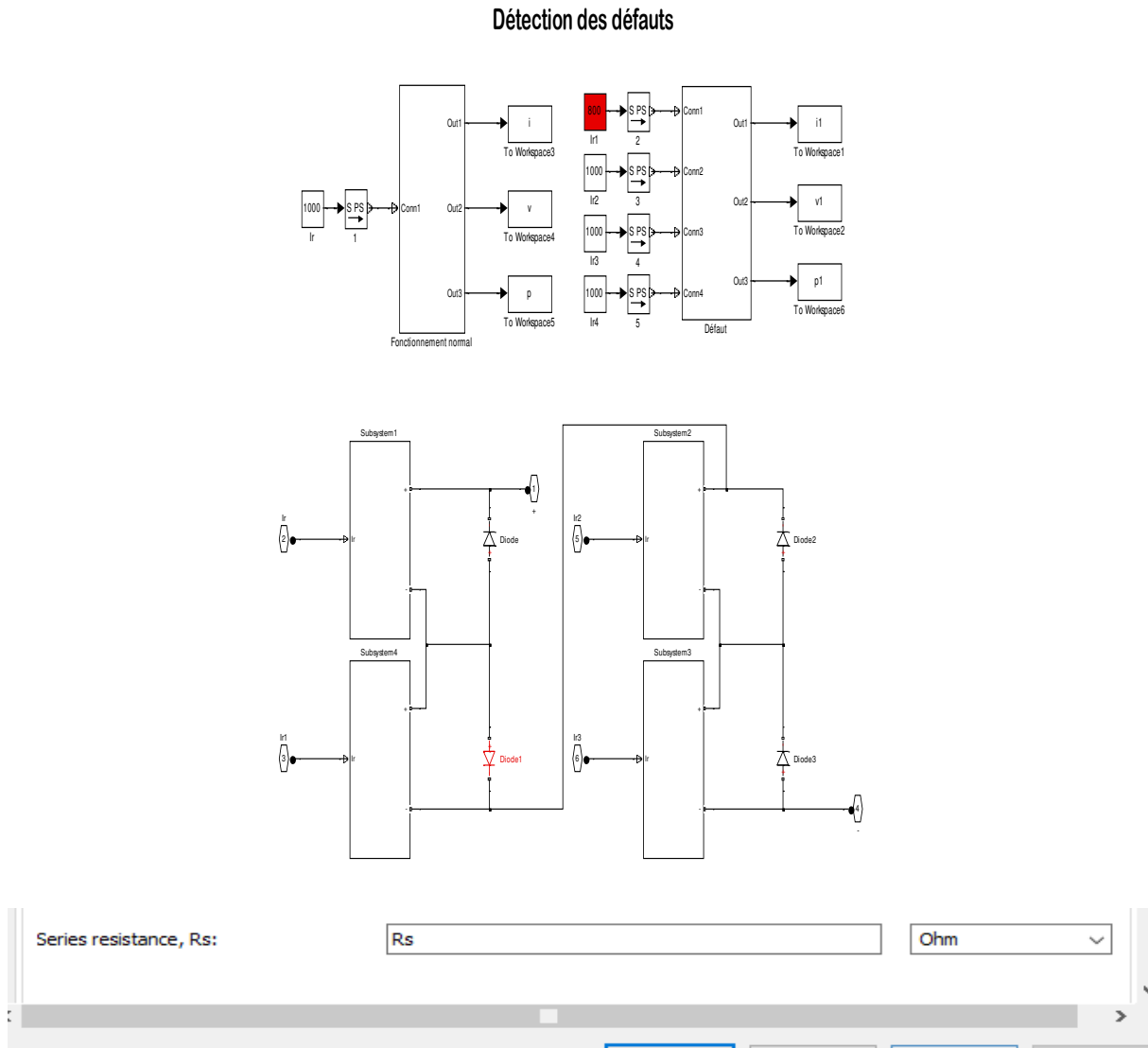


Figure III-27: Représentation des trois défauts Ombrage partiel avec BPD inversée avec défaut de Mismatch (R_s) dans Simulink.

Chapitre III : Techniques de diagnostic dédiées aux systèmes PV et résultats de simulation.

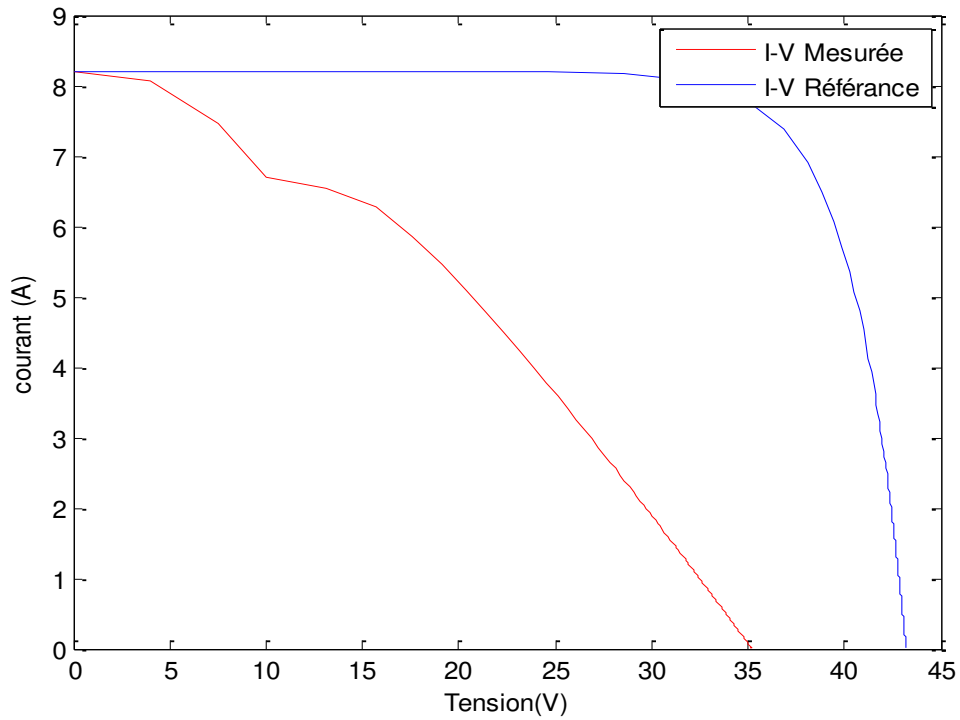


Figure III-28 : la caractéristique I-V en présence du défaut de l’Ombrage partiel avec BPD inversée avec de Mismatch (R_s)

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
[ tab of the Configuration Parameters dialog

PF =
    38.3145

dV =
    -8.0282

dI =
    -0.0049

CR = |
    0.9477

[ défaut de résistance serée ]
[ diode by_pass inversée ]
[ ombrage partiel ]
fx >> |
<
```

Figure III-29 : Affichage de la décision (Ombrage partiel avec BPD inversée avec de Mismatch (R_s)).

III.6 conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit quelques méthodes dédiées au diagnostic des systèmes PV. Pour la conception de notre algorithme de détection de défauts, nous nous sommes basés sur le calcul d'un ensemble de paramètres issus de la méthode électrique. Les résultats de simulation sont satisfaisants et donnent des décisions correctes en ce qui concerne l'identification de la nature des défauts, ce qui en fait un algorithme intéressant pour la détection de défauts dans les systèmes PV.

Conclusion générale

Un système PV n'est jamais à l'abri des défauts pouvant altérer son fonctionnement et par conséquent réduire ses performances en termes de production d'énergie, ce qui rend nécessaire l'association d'outils de diagnostics en vue de détecter ces défauts en raison de les corriger. Notre mémoire de fin d'étude est réalisé justement dans ce contexte. Pour mener à bien ce travail de mémoire, nous avons tout d'abord introduit les générateurs PV tout en présentant leur caractérisation électrique sous forme de courbes. Puisqu'il s'agit de l'étude et détection de défauts, nous avons préféré de réaliser des simulations dans l'environnement Matlab pour voir le comportement des caractéristiques électriques du générateur PV en présence d'un ensemble de défauts (ombrage, défauts dans la diode by-pass, ...), fréquemment rencontrés dans la pratique. Les résultats de simulation obtenus dans ce point nous ont permis de savoir l'effet de chaque défaut sur les caractéristiques électriques d'un tel générateur PV et dont nous nous sommes servis dans la détection de défauts par la suite. Puis, nous avons présenté un ensemble de techniques dédiées à la détection de défauts relevant de la littérature. Pour notre application, le choix est porté sur la méthode électrique basée bien sûr l'analyse des caractéristiques I-V et P-V relatives à un générateur PV. En fait Il s'agit de comparer les paramètres relatifs aux caractéristiques électriques issus d'un fonctionnement défaillant aux mêmes paramètres dits de référence c.-à-d. issus d'un fonctionnement sain. Les résultats de simulation obtenus ont démontré l'efficacité de l'approche électrique utilisée même lorsqu'il s'agit de la détection de plusieurs défauts à la fois, ce qui en fait une approche de détection intéressante.

Comme perspective à ce présent travail, nous envisageons améliorer cette technique de détection de défauts pour être non seulement appliquée à la détection de défauts, mais plutôt de localiser également le défaut dans une installation PV pour faciliter sa correction.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Dossier thermique –Courier ES n°03, « effet photovoltaïque et fonctionnement des installation Solaires isolées »,Javier 2000

[2] Corinne ALONSO, ‘‘Contribution à l’optimisation, la gestion et le traitement de L’énergie ’’, Mémoire pour l’habilitation à diriger les recherches, UNIVERSITÉ PAULSA BATIER – TOULOUSE III

[3]: «simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque a contact arrière interdigités ». Thèse doctorat Nichiporuk Oleksy 2005 l’institut national des sciences appliquées de Lyon.

[4] : « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». thèse doctorat M. Angel Cid Pastor 2006 Laboratoire d’Analyse et d’Architectures des Systèmes (LAASCNRS).

[5] : Cuong Hung.Tran « Améliorations d’une chaîne de conversion de l’énergie solaire en électricité autonome en vue d’application dans les pays en voie de développement» Thèse de docteur de l’université de Reims Champagne-Ardenne discipline : automatique, signal, productique, robotique 2019.

[6] B. Michaël." Développement d’un outil de supervision et de contrôle pour une Installation solaire photovoltaïque", thèse de doctorat, Université de Perpignan, 2014. France.

[7] : ATEK Mourad « Effets du taux d’ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS» diplôme de Magistère de Université Ferhat Abbas de SÉTIF 2013.

[8] :Belaout, A.(2018). Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension (Doctoral dissertation).

[9] : Angel Cid Pastor. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2006. Français

[10] : Stéphane VIGHETTI «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion» Doctorat Université de Grenoble-Institut polytechnique de Grenoble _24 septembre 2010.

- [11] :M. Angel Cid Pastor «Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electriques» Thèse Doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse_29 septembre 2006.
- [12] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, and J. M. Andújar, "A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the IV Curve of Photovoltaic Modules," in Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE, 2007, pp. 413–417.
- [13] M. G. Guvench, C. Gurcan, K. Durgin, and D. MacDonald, "Solar simulator and IV measurement system for large area solar cell testing," in Proceedings of the 2004 american society for engineering education annual conference & exposition, 2004.
- [14] KHENFER Amar" Thème Etude et conception d'une architecture en vue de la détection de défauts dans une installation photovoltaïque "Magister en Automatique de UNIVERSITE SETIF 1 09/12/2014
- [15] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "Photovoltaic module diagnostics by series resistances monitoring and temperature and rated power estimation" in Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Orlando, FL 2008, pp. 2195 – 2199.
- [16] Michaël Bressan. Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque. Electronique. Université de Perpignan, 2014. Français. tel-01068025

Résumé

Ce travail présente un algorithme dédié à la détection de défauts dans les systèmes photovoltaïques. Les défauts dont il s'agit de détecter et d'identifier la nature sont fréquemment rencontrés dans la pratique à savoir : les défauts d'ombrage partiel ou total, les défauts relatifs à la diode by-pass et les défauts de connectique. La méthode utilisée dans ce travail est celle dite électrique basée sur l'analyse des paramètres issus des caractéristiques IV d'un générateur PV. La détection est basée sur la comparaison de cinq paramètres issus d'un fonctionnement sain et défaillant du générateur PV. La méthode que nous avons testée dans ce présent mémoire permet de détecter la présence de plusieurs défauts avec bien sûr l'identification de leur nature.

Mots clés : Générateur PV, Caractéristique I-V, Défauts, Ombrage, Connectique, diode by-pass.

Abstract

This work presents an algorithm dedicated to fault detection in photovoltaic systems. The faults which it is a question of detecting and identifying the nature are frequently encountered in practice, namely: partial or total shading faults, faults relating to the bypass diode and connection faults. The method used in this work is the so-called electrical one based on the analysis of parameters from the IV characteristics of a PV generator. The detection is based on the comparison of five parameters resulting from healthy and faulty operation of the PV generator. The method that we have tested in this brief makes it possible to detect the presence of several defects with of course the identification of their nature.

Keywords: Photovoltaic generator, I-V characteristic, fault detection, shading, connections, bypass diode.