REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Détection et localisation des défauts d'un système PV

Présenté par :

AMAR Fatima

ABDE LATIF Abdel raouf

Proposé et Dirigé par

Dr. HENINI Noureddine

Promoion 2020

REMERCIEMENTS

Avant tout, nos remerciements infinis sont adressés à « ***ALLAH*** le Tout Puissant » de m'avoir donné le courage et la santé pour achever ce travail.

En second lieu, nous tenons à le grand remerciement notre encadreur

Dr. HENINI Noureddine *qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.*

Nous tenons également à remercier tous nos enseignants de 2ème année mastère, ainsi que tous les autres qui nous ont suivis durant notre cursus universitaire.

Nos sentiments vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail**.**

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leur amour infini, leurs soutiens,

A mon cher mari , A mon cher frère , A Mes très chères

Sœurs (yousra et loubna), pour leurs encouragements, leurs aides,

A tous mes proches,

A tous mes amis,

A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études.

AMAR FATIMA

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de ma mère

A mon père

A mes frères et ma sœur

A toute ma famille, grande et petite.

A tous mes amis sans exception.

ABDE LATIF ABDE RAOUF

ملخص :

لا تزال موثقية وكفاءة انظمة الطاقة المتجددة موضوع الساعة . مثل جميع الانظمة الصناعية تخضع انظمة الطاقة المتجددة الى الاعطال والعيوب في تركيباتها او في عملها تفشل هذه الانظمة وتتدهور خلال فترة النشغيل وهذا يتطلب تطوير نظام تشخيصي هدفه الرئيسي هو توفير مؤشرات لكشف الاعطال وبالتالي الحفاظ على انتاج الطاقة من النظام الكهروضوئي.

يهدف هذا العمل الى اعطاء لمحة عامة عن طرق التشخيص المختلفة للأنظمة الكهروضوئية بما في ذلك التشخيص باستعمال الذكاء الاصطناعي

الكلمات المفتاحية

انظمة الطاقه المتجددة , تشخيص الاعطال , النظام الكهروضوئي , الذكاء الاصطناعي

Résumé :

La fiabilité et l'efficacité des systèmes d'énergie renouvelable reste le sujet de l'heure. Comme tous les systèmes industriels, les systèmes d'énergie renouvelable sont sujets à des défauts et défauts dans leurs installations ou dans leur fonctionnement. Ces systèmes tombent en panne et se détériorent au cours de la période de fonctionnement et cela nécessite le développement d'un système de diagnostic dont l'objectif principal est de fournir des indicateurs pour détecter les défauts et ainsi préserver la production d'énergie du système photovoltaïque.

Ce travail vise à donner un aperçu Général sur les différentes méthodes de diagnostic pour les systèmes PV, y compris l'intelligence artificielle.

Mots-clés : systèmes d'énergie renouvelable, diagnostic des défauts, système photoélectrique, l'intelligence artificielle.

Abstract :

The reliability and efficiency of renewable energy systems remains the hot topic. Like all industrial systems, renewable energy systems are subject to faults and defects in their installations or in their operation. These systems fail and deteriorate during the period of operation and this requires the development of a diagnostic system, the main objective of which is to provide indicators to detect faults and thus preserve the energy production of the system. photovoltaic.

This work aims to give a general overview on the different diagnostic methods for PV systems, including artificial intelligence.

Keywords : renewable energy systems, fault diagnosis, photoelectric system, artificial intelligence

TABLE DES MATIERES

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Table des matière

Tables des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : **Description d'un système photovoltaïque**

I .1 Introduction …….....5

I.2 Systèm photovoltaïque …….....……...….5

I.1.2 Définition …….....…….....5

I .2. 3 Principe de fonctionnement …….....……6

I.2.4 Description d'un système photovoltaïque …….....…….....6

I .2.4.1 Générateur PV …….....……..…7

I .2.4 .2 Convertisseur …….....……..….12

I .2.4 .3 Câblages et boite de jonction …….....…….....15

I .2.4 .4 Système de protection …….....……16

I.3. Conclusion …….....….....….19

Chapitre II : Modélisation analytique de l'installation photovoltaïque

II.1.Introduction.....21

II.2.Modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque.....21

II.2.1.Modélisation d'une cellule PV.....21

II.2.1.1.Caractéristique électrique d'une cellule PV.....21

II.2.1.2.Modèles de cellules PV.....23

II.2.2. Modélisation d'une cellule PV en utilisant le modèle de Bishop.....25

II.2.3. Simulation d'une cellule PV.....29

II.2.3.1.Influence des paramètres d'une cellule photovoltaïque.....30

II.2.3.1.1.Influence de la variation de l'ensoleillement.....30

II.2.3.1.2.Influence de la variation du courant de saturation inverse de la diode.....31

II.2.3.1.3.Influence de la variation de la résistance série.....32

II.2.3.1.4.Influence de la variation de la résistance shunt.....32

II.2.3.1.5.Influence de la variation du facteur d'idéalité de diode.....33

II.2.3.1.6.Mise en série de cellule PV 34

II.2.3.1.7.Mise en parallèle de cellules PV.....34

II.2.4. Modélisation d'un champ PV en fonctionnement sain.....37

II.2.5. Simulation d'un champ PV en fonctionnement sain…….....…….38

II.3.Conclusion.....39

ChapitreII : Défauts liés aux systèmes photovoltaïques et méthodes de diagnostic

III.1 *Introduction* 42

III.2 Défaut 42

III.3 Défauts rencontrés dans un champ PV…….....……...….42

III.4 Système de diagnostic…….....…….....…...52

III.4.1 Etapes du diagnostic…….....…….....….53

III.4.2 Classification des méthodes de diagnostic…….....…….....54

III.4.3 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV ….....….....55

III.4.3.1Méthodes non –électriques…….....….....56

III.4.3.2 Méthodes électriques…….....….....……..58

III.4.4 Choix de l'approche de diagnostic…….....…….....…63

III.4.5 Conclusion…….....…….....….64

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau II .1 : Modèles couramment utilisés pour les cellules photovoltaïques 24

Tableau II.2 : Paramètres choisis pour la simulation.....29

Tableau III.3.1 : Défauts dans le générateur photovoltaïque 45

Tableau III.3.2 : Défauts dans la boîte de jonction.....47

Tableau III.3.3 : Défauts dans le système de câblage 48

Tableau III .3.4 : Défauts dans le système de protection.....49

Tableau III.3.5 : Défauts de l'onduleur.....51

Tableau III.3.6 : Défauts dans le système d'acquisition des données.....52

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire ……..6
Figure I -2**:** Système PV connecté au réseau et ses composants……7
Figure I -3: *Principe de l'effet photovoltaïque*……...8
Figure I -4: *Évolution de la répartition des technologies de cellule industrialisées*…8
Figure I -5: *Exemple de dispositifs photovoltaïques à concentration*……..9
Figure I -6: Mise en série des cellules PV dans le module……10
Figure I -7: Module PV avec deux diodes de bypass qui se chevauchent (overlap) …… 11
Figure I -8 : *Coupe d'un module PV avec cadre*…….……...11
Figure I **-9** Différentes configurations pour un champ de 36 modules……...12
FigureI-10 **:** Différents étages du groupe convertisseurs de la chaîne de conversion photovoltaïque…… …… ...…..……...13
Figure I -11**:** Onduleur central (Central-plant inverter). …….…….13
Figure I -12: Hacheur multiple string avec un onduleur central…….13
Figure I -13: Onduleur multiple string. …….…….14
Figure I -14: (a) Connecteurs débrochables &Câble, (b) Boite de jonction……...15
Figure I -15: *Module PV avec deux diodes by-pass (a)sans ombrage, (b)avec ombrage.* …….…….17
Figure I -16: Protection avec une diode anti-retour *: (a)sans diode anti-retour(b) avec diode anti-retour* ……...18
Figure II-1:Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque 22
Figure II -2: Schéma du modèle de Bishop d'une cellule photovoltaïque 25
Figure II -3: Caractéristique (I-V) d'une cellule PV (STC). 29
Figure II -4: Influence de la variation de l'ensoleillement 30
Figure II -5: Influence de la variation courant de saturation inverse de diode (STC) 31
Figure II -6 : *Influence de la variation de température.*…….*32*
Figure II -7: Influence de la variation de la résistance série (STC) 32
Figure II -8: Influence de la variation de la résistance shunt (STC) 33
Figure II -9 : Influence de la variation du facteur d'idéalité de diode (STC).....….33
Figure II -10: Caractéristique (I-V) de trois cellules montées en série(STC) 34
Figure II -11: Caractéristiques (I-V) de trois cellules montées en parallèle (STC) 35
Figure II -12: Topologie Bridge Linked d'un champ PV (m, n) 36

Figure II -13: Différents composants du champ PV (a)cellules, (b) groupes de cellules et (c) module 37

Figure II -14: Caractéristique (I-V) d'un champ PV en fonctionnement sain……..…38

Figure III -1 : Exemples de défauts rencontrés dans des générateurs PV……..43

Figure III.2 : Exemples de défauts rencontrés dans des boîtes de jonction……43

Figure III.3 : Exemples de défauts rencontrés dans le système de câblage……....44

Figure III.4 : Exemples de défauts de diodes de by-pass……...….44

Figure III.5 : Une classification des méthodes de diagnostic……..……54

Figure III.6 : Méthodes de diagnostic de défauts d'un générateur PV……..56

Figure III.7 : Exemple de la localisation de défauts par la caméra thermique……57

Figure III.8 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV……..58

INTRODUCTION GENERALE :

Aujourd'hui, l'énergie est une base fondamentale essentielle au progrès social et économique de tout pays. La demande d'énergie est l'un des problèmes majeurs auxquels la vie moderne est confrontée au quotidien sans solution en raison de l'indisponibilité de ressources suffisantes à partir des ressources énergétiques conventionnelles telles que les combustibles fossiles et nucléaires . Les combustibles fossiles tels que les gaz naturels et le pétrole sont très importants dans la production d'électricité malgré la pollution atmosphérique et leurs autres problèmes .

La pollution de l'air contribue aux pluies acides et au smog en plus de l'augmentation de la température de la terre en raison de la concentration de dioxyde de carbone. En outre, l'énergie nucléaire est complexe, coûteuse et son combustible est très dangereux et nécessite une technologie de sécurité et de précautions très élevée . De plus, les combustibles nucléaires représentent principalement les meurtres et les pollutions pour l'environnement et la terre .

Les seules ressources permanentes sont les énergies renouvelables qui vont résoudre de nombreux problèmes environnementaux liés aux sources d'énergie fossile et à l'énergie nucléaire.

Les sources renouvelables sont naturellement existantes et elles sont déjà partiellement exploitées économiquement. Les sources d'énergie renouvelables comme le vent, le solaire, la biomasse, l'hydroélectricité, les vagues et les marées sont permanentes, sûres et illimitées dans le sens et leurs mises en oeuvre pour soutenir les approvisionnements et les demandes d'énergie. Ainsi, les efforts des gouvernements sont entrepris pour explorer d'autres sources d'énergie et satisfaire la réduction de la pollution .

La technologie solaire électrique ou photovoltaïque (PV) est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus innovantes pour générer de l'énergie électrique dans le monde .
L'intérêt d’utilisé les systèmes photovoltaïques (PV) ont connu une croissance rapide au cours de la dernière décennie en raison de nombreux avantages : une source d'énergie mondiale, sans pollution, sans bruit, facile à installer, il est possible de convertir installé et / ou incorporé dans les bâtiments et en plus de ça le développement de l’électronique et les outils informatiques.

Le marché photovoltaïque a augmenté de 100 GW en 2018, tandis que la capacité totale a atteint 505 GW dans le monde .

L'Algérie est un pays de grande surface saharienne ; les chercheurs veulent en profiter de ce type de ressources, alors en peut dire que notre pays est l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire dans le monde .

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct qui peut transformer les rayons solaires en énergie électrique à travers les panneaux PV , et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec les contraintes d'environnements locaux et globaux (l'ombrage total ou partiel des panneaux solaires dû aux nuages, aux arbres, poussière, neige, l'ombres des aux feuilles, aux bâtiments……). Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes et reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, réfrigération, climatisation, sources lumineuses, véhicules électriques, centrales photovoltaïques, utilisation militaire, domaine spatial, et dans les systèmes hybrides .

Pendant le fonctionnement du système PV, les cellules peuvent subir des perturbations dues à l'exposition à des facteurs atmosphériques externes ou à diverses pannes internes, ce qui affecte la stabilité du système et réduit leur efficacité et leur rendement de production. La détection efficace et précise des défauts du système PV peut protéger le système contre les temps d'arrêt ou l'effondrement, tout en améliorant l'efficacité du système PV, en garantissant un fonctionnement sûr et en réduisant les coûts de production d'électricité. Par conséquent, le développement de méthodes de diagnostic pour la détection des défauts dans le comportement des systèmes PV est particulièrement important et nécessaire en raison du degré d'expansion des systèmes PV et de la nécessité d'optimiser leur fiabilité et leurs performances .

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, comme suit :

dans le premier chapitre nous avons donnée une Définition sur Le terme « photovoltaïque » ,le Principe de fonctionnement du système PV nous avons aussi présenté en détail les composantes principales de ce système .

Le chapitre deux est consacré à la modélisation et la simulation d'un champ photovoltaïque en fonctionnement sain. Dans ce chapitre, les différents modèles de cellules existants qui

permettent d’obtenir les caractéristiques d’une cellule photovoltaïque sont cités. Le modèle de cellule PV qui sera retenu dans nos travaux est le modèle de Bishop qui contient huit paramètres, ce dernier peut décrire la totalité de la caractéristique de la cellule en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la simulation de l'influence de quelques paramètres du modèle qui sont choisis sur les caractéristiques d’une cellule photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, les principaux défauts associés à un système photovoltaïque et un aperçu sur les différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques sera démontré.

Chapitre I :

Description d'un système photovoltaïque

I .1.Introduction :

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique .il est constitue principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs module photovoltaïque, un ensemble des batteries pour le stockage d'énergie électrique, un ou plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif.

I.2. Système photovoltaïque :

I.2.1 Définition :

Le terme « photovoltaïque » vient du grec et qui signifie lumière, il est composé de deux parties : « photos » «lumière » et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituants la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [1].

I .2.2 Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches .on trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative N en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libre s positives P. de part et autre du cœur de la cellule ,on a une couche conductrice (k) autrement dit une grille métallique ,puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion .on a donc une couche qui sert de cathode (pôle+) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle-) en dessous la couche semi-conductrice P. aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un

revêtement anti-réflexion sur couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. l'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. pour finir, on relie les cellule entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante.

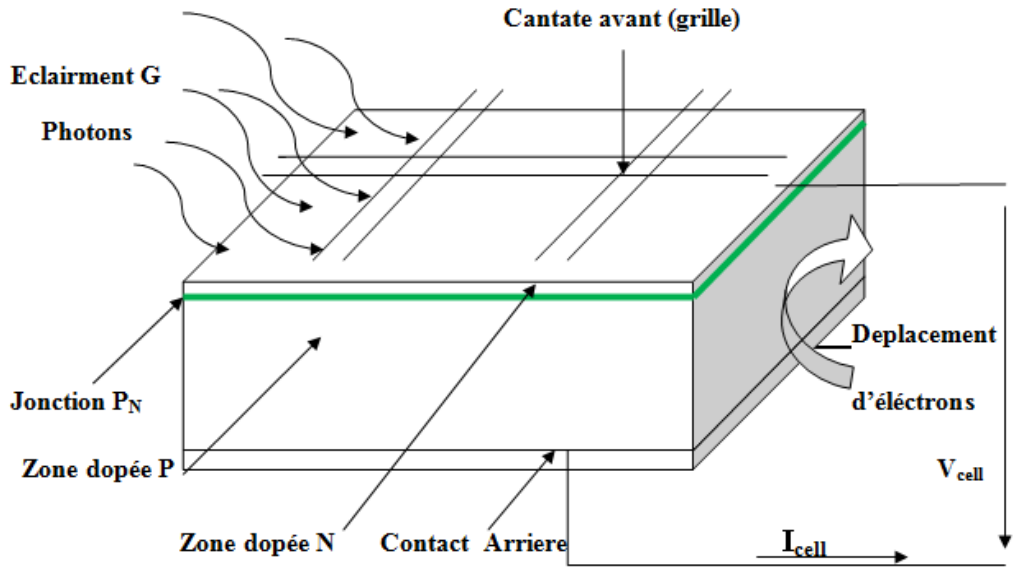


Figure 1-1: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire .

I .2.3 Description d'un système photovoltaïque :

Le synoptique électrique d'un système PV connecté au réseau est illustré dans la Figure I-1 . Nous le décrivons en considérant les différents composants suivants :

- Générateur PV : unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu.
- Convertisseur
- Câblage et boîte de jonction
- Système de protection : y compris la diode de bypass, diode anti-retour et les autres dispositifs de sectionnement.

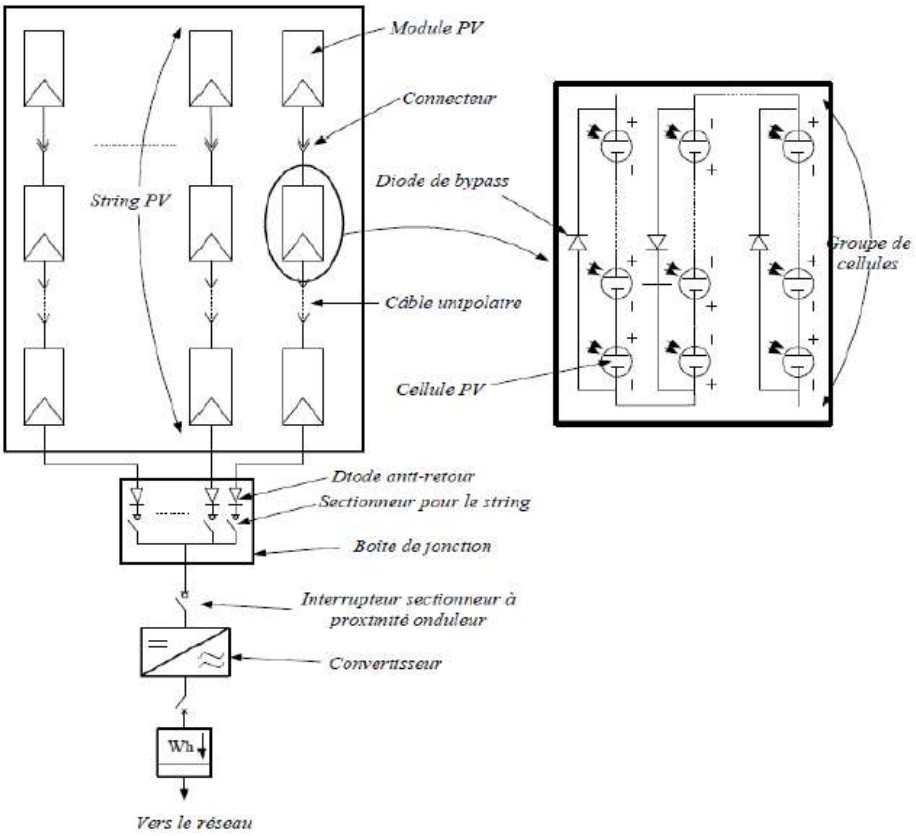


Figure 1-2: Système PV connecté au réseau et ses composants .

I .2.3.1 Générateur PV :

Le générateur photovoltaïque est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en l'énergie électrique est la cellule photovoltaïque.

i) Cellule photovoltaïque

Le principal composant d'un générateur PV est la cellule, qui convertit directement l'énergie solaire en électricité sous forme de CC. La conversion PV est une application de l'effet photovoltaïque découvert par Becquerel en 1839. Certains matériaux semi-conducteurs comme le silicium possèdent la propriété de générer de l'électricité quand ils reçoivent la lumière du soleil. Le principe est le suivant : les photons de la lumière solaire transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur. Ces derniers se mettent en mouvement et créent un courant électrique, collecté par une grille métallique très fine (fig. 1-3) [2].

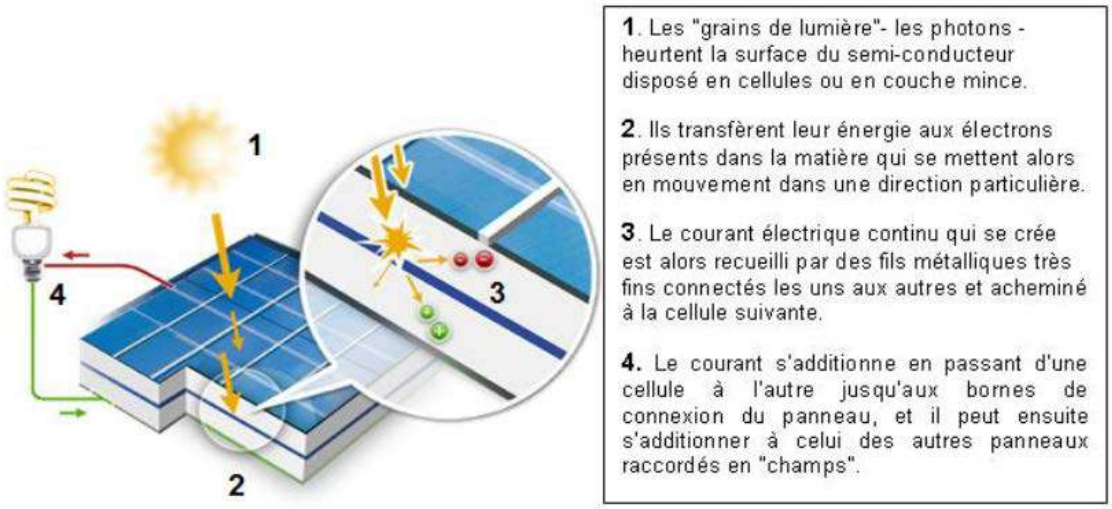


Figure 1-3: Principe de l'effet photovoltaïque

Sur le plan technologique ; il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques. La figure (1-4) représente l'évolution chronologique de la répartition des différentes filières industrielles du photovoltaïque[3] .

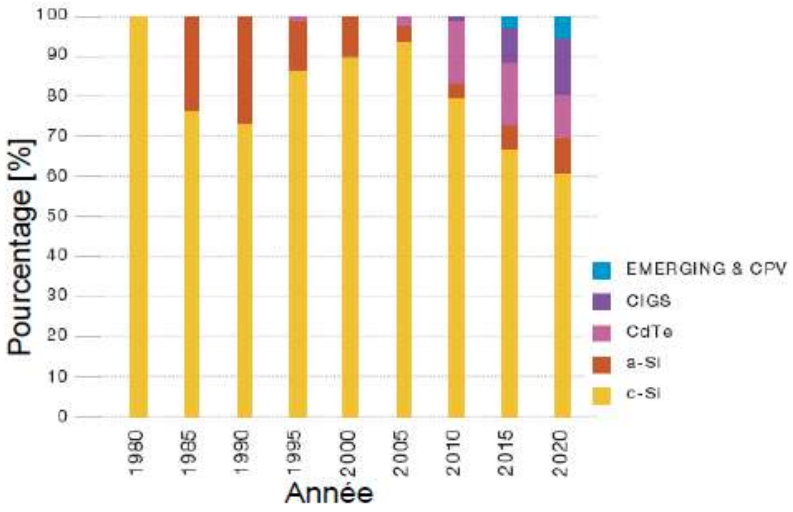


Figure 1-4: Évolution de la répartition des technologies de cellule industrialisées

Actuellement, la technologie la plus répandue sur le marché est la technologie au silicium. Le silicium est le deuxième élément, en termes d'abondance sur notre planète après l'oxygène. Il existe trois catégories principales de cellules au silicium : les cellules monocristallines, poly-cristallines, et amorphes. Pour la technologie couche mince, on

distingue plusieurs catégories parmi lesquelles : la technologie CIGS (Cuivre-indium-gallium-sélénium), la technologie CdTe (Cadmium-tellure), et la technologie GaAs (Gallium Arsenic). La technologie amorphe, qui a été une des technologies préférées, a connu une baisse dans le marché actuel par rapport à la technologie couche mince. Par exemple, la technologie CdTe a augmenté de 2% en 2005 à 13% en 2010 (fig.1-5). D'autres technologies de cellules photovoltaïques sont au stade de la recherche et développement comme :

La technologie CPV (le photovoltaïque à concentration), des centrales photovoltaïques, qui utilisent des dispositifs concentrateur entre le soleil et la cellule PV. Ce qui permet d'utiliser une surface de cellule beaucoup plus petite et avec des rendements très importants de 30-40 %. La concentration est obtenue par un système de miroirs paraboliques ou de lentilles de Fresnel[4] .

Les technologies émergentes, encore au stade de la recherche. L'une d'elles, la filière organique, consiste à déposer des semi-conducteurs organiques sur un substrat de plastique ou de verre. Malgré un rendement relativement faible, entre 5% à 10%, cette filière offre des perspectives intéressantes de réduction de coûts. Ces nouvelles technologies promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque [5].



Figure 1-5: Exemple de dispositifs photovoltaïques à concentration

Le rendement typique d'une cellule PV au silicium monocristallin, est de l'ordre 15% à 22%. Cette cellule délivre une puissance maximale de 1.7 W, soit typiquement un courant de 2.6 A sous 0.6 V. Il s'agit donc d'un générateur élémentaire, à très basse tension et de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les cellules sont ainsi souvent commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques[6] .

ii) Module photovoltaïque :

La tension et le courant, donc la puissance, d'une cellule ne sont pas adaptées aux applications courantes, il est donc nécessaire de les associer. De plus, les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à l'environnement extérieur, elles sont donc munies d'une protection mécanique (l'encapsulation). Pour toutes ces raisons, les cellules sont assemblées en modules photovoltaïques.

Les cellules sont généralement connectées en série dans les modules courants commercia-lisés. La mise en série des cellules permet d'augmenter la puissance. Le courant reste iden-tique tandis que la tension est multipliée par le nombre de cellules en série. Un module PV « classique » contient 36 ou 72 cellules. Mais ce nombre de cellules peut varier selon les mo-dules servant aux applications spécifiques. On peut trouver des modules de 40, 54, 60 ou même 92 cellules en série. La Figure 1-6 montre un module contenant 36 cellules interconnectées en série.

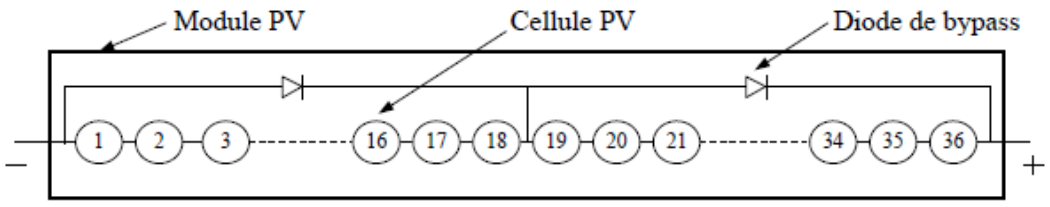


Figure 1-6: Mise en série des cellules PV dans le module

Les cellules dans un module sont associées en plusieurs groupes. Chaque groupe est en-suite connecté en antiparallèle avec une diode, appelée diode de bypass ou diode de dériva-tion. Cette diode sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement dans le régime in-verse.

On compte généralement 18 cellules pour une diode de bypass. Par contre, ce nombre peut varier selon les différents fabricants des modules. Par ailleurs, pour mieux

protéger les cel-lules, la connexion de chaque cellule individuelle à une diode de bypass a été également pro-posée . De plus, d'autres architectures de connexion des diodes de bypass dans le module, comme on peut le voir dans la Figure 1-8, ont été également proposées . Mais ces propositions ne sont pas largement appliquées du fait de la difficulté de fabrication.

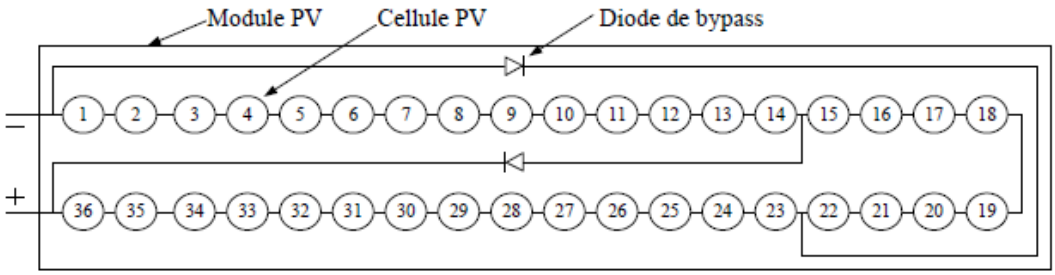


Figure 1-7:Module PV avec deux diodes de bypass qui se chevauchent (overlap)

La figure 1-8 montre la vue en coupe d'un module en silicium cristallin comprenant :

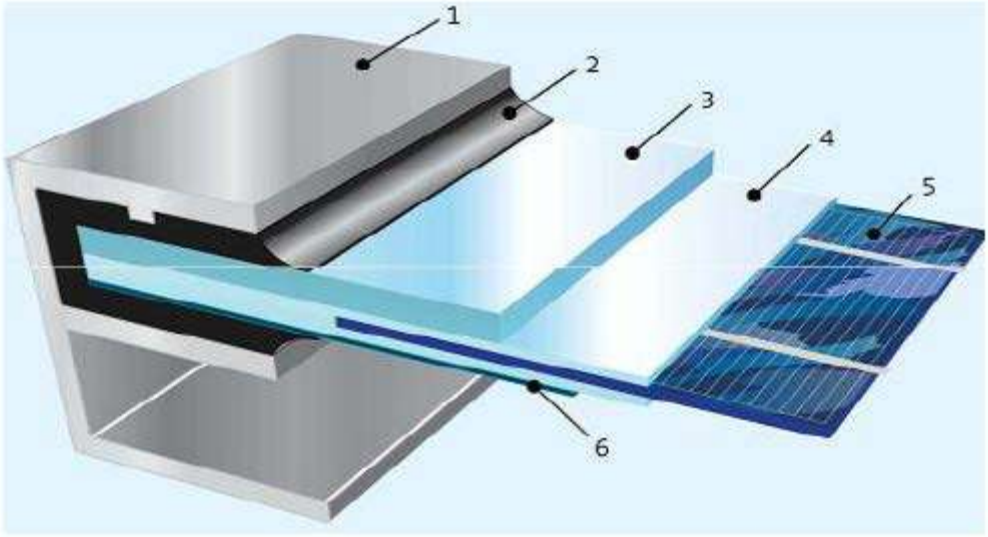


Figure 1-8 : Coupe d'un module PV avec cadre

(1) un cadre ou support en aluminium, **(2)** joint d'étanchéité, **(3)** une plaque de verre trempé avec une meilleure transmission optique, **(4)** un support EVA (éthylène-acétate de vinyle) est une résine transparente enrobant les cellules photovoltaïques (il est utilisé à cause de ces propriétés : diélectrique, thermique, d'étanchéité et aussi son excellente transmission optique), **(5)** cellule PV, **(6)**

film Tedlar : polymère à haute résistance aux agressions extérieures : ultra violée, variations de température, atmosphères corrosives.

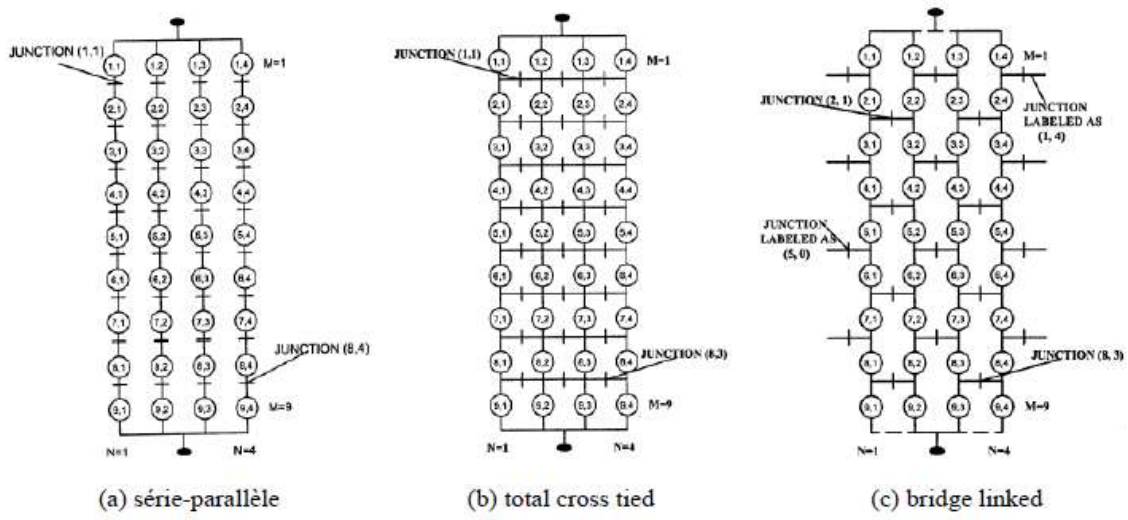
iii) String PV :

Un string PV, appelé également chaîne PV, est un ensemble de modules connectés en série afin de générer la tension de sortie spécifiée.

iv) Champ photovoltaïque :

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est néces-saire de regrouper les modules en série et en parallèle. Ce groupement forme un champ pho-Atovoltaïque.

Il existe plusieurs configurations possibles pour interconnecter les modules dans un champ photovoltaïque : interconnecter les 36 modules d'un champ photovoltaïque. Il a été montré que les deux der-nières configurations peuvent améliorer la performance du champ mais la viabilité écono-mique connexion série parallèle simple, connexion Total Cross Tied, connexion Bridge Linked . La Figure I-9 montre différentes configurations possibles pour empêche l'utilisation de telles configurations . Nous ne retenons donc dans ce travail la connexion série parallèle simple.



(a) série-parallèle (b) total cross tied (c) bridge linked

Figure 1-9 Différente configuration pour un champ de 36 modules

I .2.3.2 Convertisseur :

Le groupe convertisseur a pour rôle d'extraire la puissance maximale du générateur PV et la convertir en puissance alternative avant de l'injecter dans le réseau. Pour

accomplir ce rôle, ce groupe de convertisseurs est composé d'un étage de hacheur suivi par un étage d'onduleur comme on peut le voir dans figure 1.10 [7]

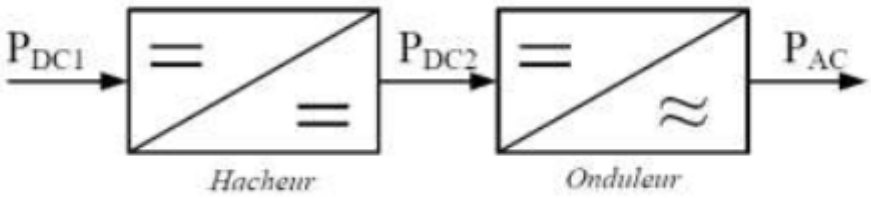


Figure 1-10 : Différents étages du groupe convertisseurs de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleur photovoltaïques, donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les hacheurs multiples strings avec un onduleur central et les onduleurs intégrés aux modules [8].

- **Onduleur central (Central-plant inverter) :**

Dans les onduleurs centraux, habituellement on utilise un grand onduleur pour convertir la puissance du côté *(DC-DC)* des modules (*PV)* à une puissance (*AC)* sur le côté alternatif. Dans ce système, les modules de (*PV)* sont en série pour former un panneau, et plusieurs de ces panneaux sont reliés en parallèle au hacheur.

Le schéma bloc d'un tel arrangement est donné par la Figure 1-11

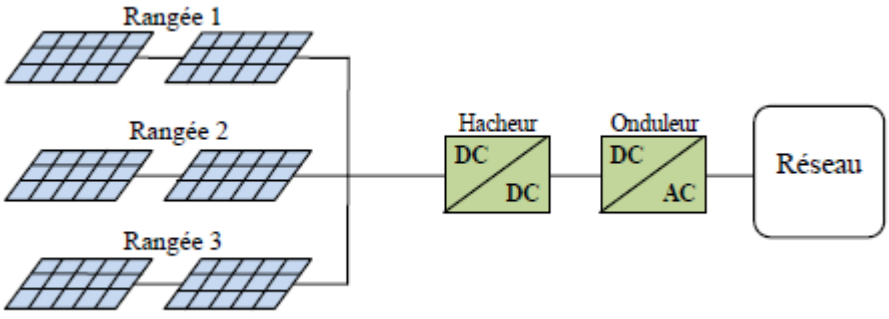


Figure 1-11: Onduleur central (Central-plant inverter).

- **Hacheur multiple string avec un onduleur central :**

Le schéma du montage est donné par la Figure 1-12. Dans le multiple-string du convertisseur *(DCDC)*, chaque hacheur survolteur possède un transformateur qui assure l'isolation galvanique et un lien de conversion commun *(DC-AC)*.

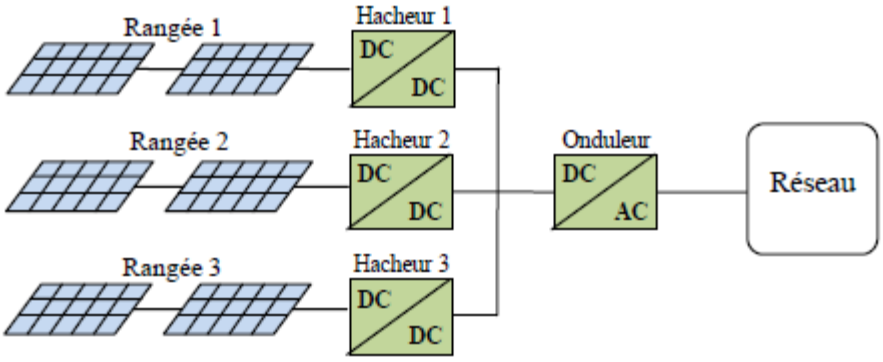


Figure 1-12: Hacheur multiple string avec un onduleur central.

- **Onduleur Multiple-string :**

La Figure 1-13 montre le schéma fonctionnel d'un système de conversion de multiple convertisseur (multiple-string). Il se comporte d'un ensemble de modules reliés en série du côté (*DC)*, et la conversion individuelle de la puissance de (*DC)* en (*AC)* est assurée par un petit onduleur. Beaucoup de tels onduleurs sont reliés en parallèle du côté *(AC).* Cet arrangement n'est pas affecté en ombrageant des panneaux. Il n'est pas aussi sérieusement affecté par l'échec de l'onduleur.

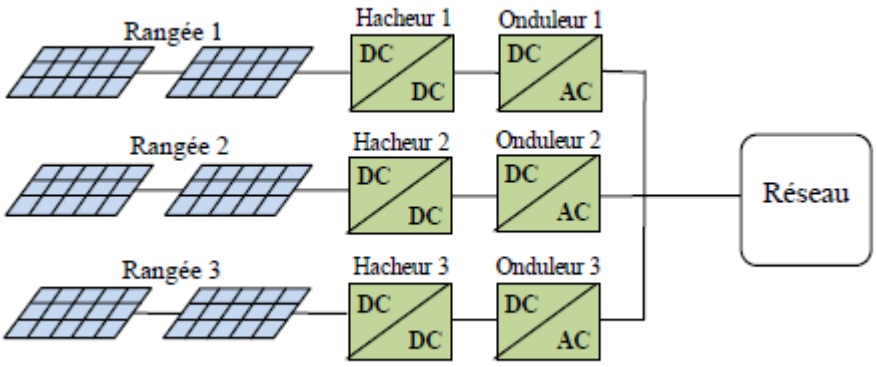


Figure 1-13: Onduleur multiple string.

I .2.3.3 Câblages et boite de jonction :

Seuls les câbles dits solaires à isolation double, sont adaptés au câblage des installations photovoltaïques montées en intérieur ou en extérieur. Généralement, ils sont unipolaires avec un conducteur flexible en cuivre mais les types bipolaires peuvent être utilisés aussi. Ces câbles sont extrêmement robustes, supportent de fortes contraintes mécaniques et font preuve d'une très bonne résistance à la chaleur et au froid (plage de température entre -50°C à 125°C), aux ultra violés, à la non propagation du feu et une très bonne stabilité aux intempéries, toutes ces propriétés leur confèrent une durée de vie élevée d'au moins 25 ans [9]. Des connecteurs débrochables, de types mâles et femelles (fig.1-14.a), sont utilisés dans le raccordement pour simplifier la procédure d'installation et éviter tout risque d'inversion de polarité. Ces derniers disposent de très bonnes caractéristiques diélectriques et d'étanchéité [10]

Les boites de jonction (fig.1-14.b) sont des enveloppes qui comprennent tous les composants nécessaires à la protection et au raccordement en parallèle des strings de champ photovoltaïque. Elles contiennent souvent les composants : des fusibles, d'interrupteur-sectionneur, des parafoudres, de diode anti-retour et des points de tests[10,11] .

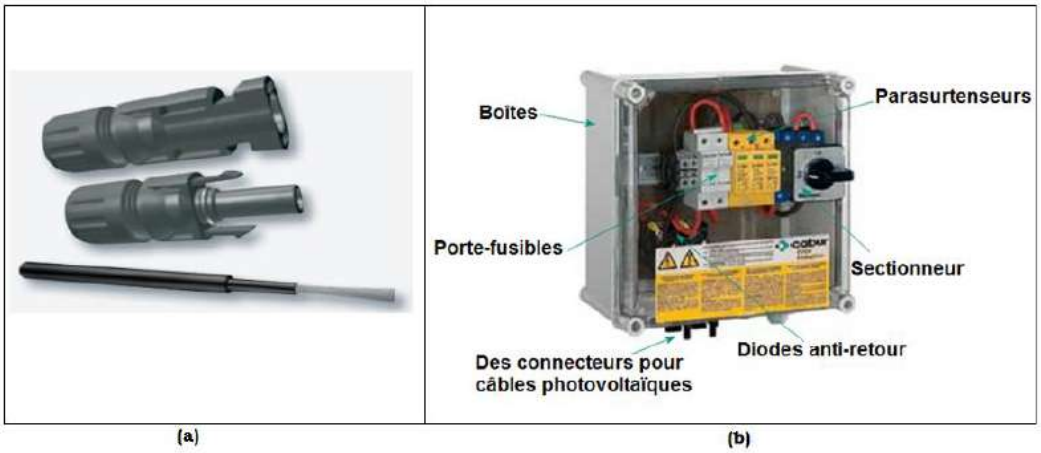


Figure 1-14: (a) Connecteurs débrochables &Câble, (b) Boite de jonction

I .2.3.4 Système de protection :

Des protections électriques sont ajoutées aux modules PV, afin d'augmenter sa durée de vie, en évitant les pannes liées à l'association des cellules. Pour cela, deux types de protections sont employées dans l'installation PV .

La protection avec une diode anti-retour « Blocking diode » (Technique de blocage du courant), en cas de connexion en parallèle des modules PV, pour éviter les courants négatifs dans les générateurs photovoltaïques ;

La protection à l'aide de diode by-pass « By-pass diode» (Technique de contournement du courant), lors de la mise en série des cellules, permet de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds.

a) Diode de Bypass :

Pour éviter les phénomènes de point chaud, les constructeurs ont équipé leurs modules photovoltaïques avec des diodes by-pass. Elles sont généralement installées dans un boitier de connexion au dos du module. Il peut y en avoir de deux jusqu'à cinq diodes, suivant les fabricants et le nombre de cellules. Chacune des diodes by-pass est associée à un groupe de cellules du module (généralement 18 cellules par groupe). Dans l'état de fonctionnement normal la diode by-pass est bloquée, lorsqu'une ou des cellules du groupe est ombrée(s) ou endommagée(s), celle-ci devient passante, en court-circuitant le groupe de cellules associé en défaut et évitant ainsi l'apparition d'un sur-échauffement (Point chaud), ce qui peut endommager le groupe affecté et peut dégrader définitivement les performances du module PV en entier ou risque de feu. Comme le montre la figure (1-15).

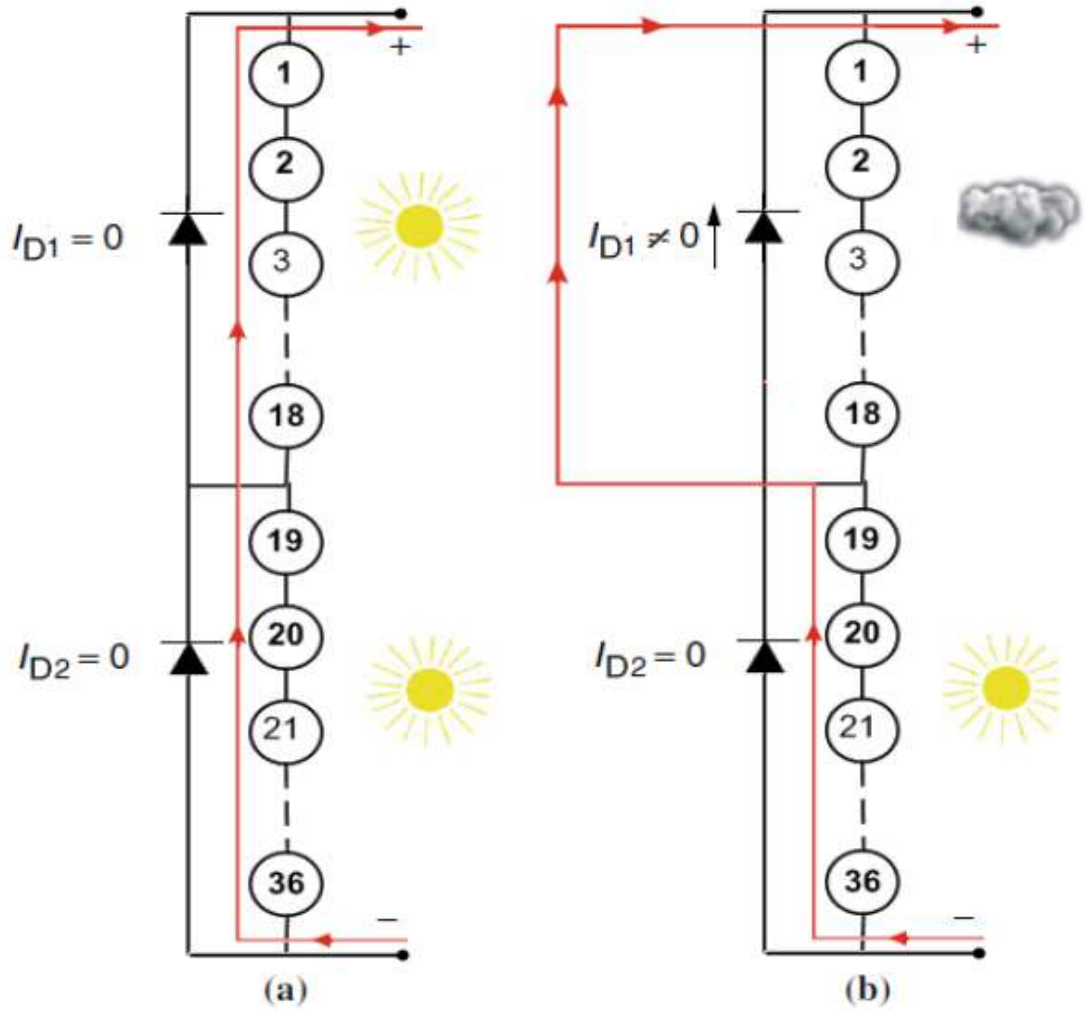


Figure 1-15: Module PV avec deux diodes by-pass (a)sans ombrage, (b) avec ombrage.

b) Diode anti-retour

Pour empêcher le retour du courant électrique vers le module PV pendant l'obscurité (éviter la décharge des accumulateurs à travers les panneaux photovoltaïques), des diodes anti-retour sont placées entre le module et les batteries. Ce phénomène a également été remarqué dans les installations photovoltaïques ayant plusieurs strings en parallèle mais cette fois le courant circule dans les strings ayant une tension supérieure au string ayant une tension inférieure. Il se produit entre les strings du champ photovoltaïque, en raison de : l'inégalité des modules, ou l'ombrage ou à cause des défauts d'un string. Pour éviter ces courants inverses dans le champ PV, des diodes anti-retour sont placées en tête de chaque string en série pour isoler temporairement ou définitivement le string en défaut des autres strings, comme est représenté sur la figure (1-16) [12].

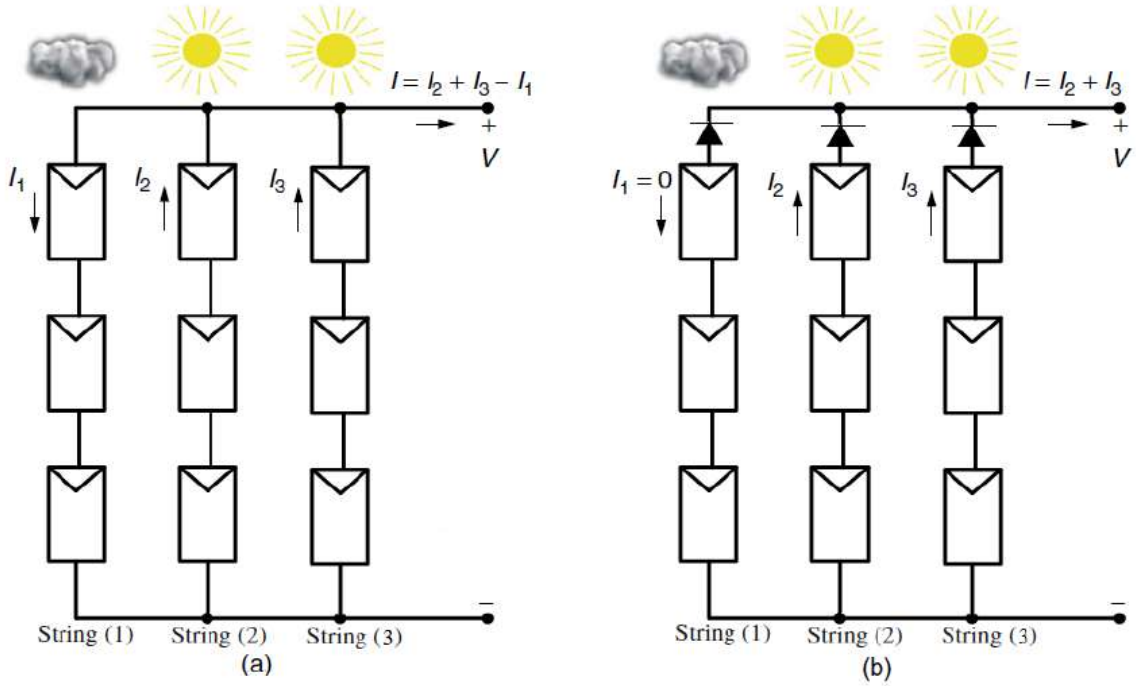


Figure 1-16: Protection avec une diode anti-retour

(a)sans diode anti-retour(b) avec diode anti-retour

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donnée un aperçu générale sur le système PV ,son principe de fonctionnement En plus nous avons présenté en détail les composantes principales du système PV .

Chapitre III

Défauts liés aux systèmes photovoltaïques et méthodes de diagnostic

III.1 Introduction :

Les défauts qui subit les installations photovoltaïques est la pertinentes major qui a fait la casse-tête des chercheurs car la présence de ces défauts abaisse exponentiellement les kilowatts produit par les centrales. Plusieurs solutions ont été proposé dans littérature mais reste timide devant la complexité du problème [18] .

Dans ce chapitre, on s'intéresse dans sa première partie à la présentation des défauts rencontrés dans l'installation photovoltaïque et leur classification, selon les différents composants du champ PV . La deuxième partie de ce chapitre et consacrée a donné un aperçu sur les différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques .

III.2 Défaut

C'est toute déviation ou tout écart d'au moins une caractéristique observée du système surveillé par rapport à sa caractéristique de référence requise, correspondante à l'état de fonctionnement normal et standard. Un défaut ne provoque pas généralement un arrêt complet du système mais peut entrainer une probable défaillance. Un défaut peut être d'origine physique dû au dysfonctionnement des matériels, aux erreurs de conception, aux erreurs de conduite et d'utilisation opérationnelle des systèmes ou aux erreurs lors des actions de maintenance. Suite à un défaut, le système est incapable d'accomplir la fonction principale pour laquelle a été conçu.

III.3 Défauts rencontrés dans un champ PV :

L'étude menée dans les travaux de "L.Bun" a permis de collecter les défauts les plus rencontrés dans une installation photovoltaïque, qui peuvent être classifiés en sept grands groupes selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV :

- Défauts dans le générateur photovoltaïque ;
- Défauts dans la boîte de jonction ;
- Défauts dans le système de câblage ;
- Défauts dans le système de protection ;
- Défauts de l'onduleur ;
- Défauts dans le système d'acquisition des données.

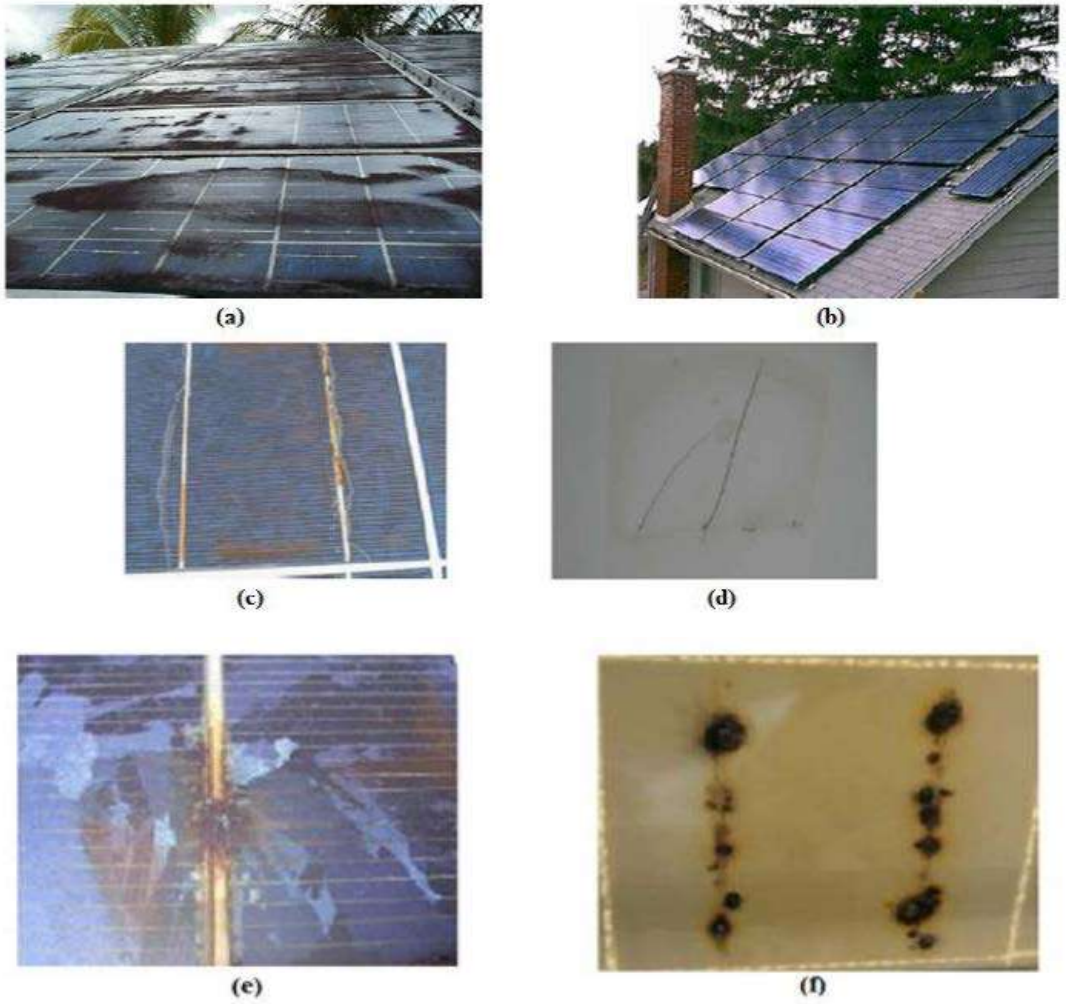


Figure III -1 : Exemples de défauts rencontrés dans des générateurs PV, (a) salissure, (b) ombrage, c) échauffement de la cellule (face avant), (d)échauffement de la cellule (face arrière), (e) échauffement des soudures (face avant), (f) échauffement des soudures (face arrière)



Figure III.2 : Exemples de défauts rencontrés dans des boîtes de jonction



Figure III.3 : Exemples de défauts rencontrés dans le système de câblage

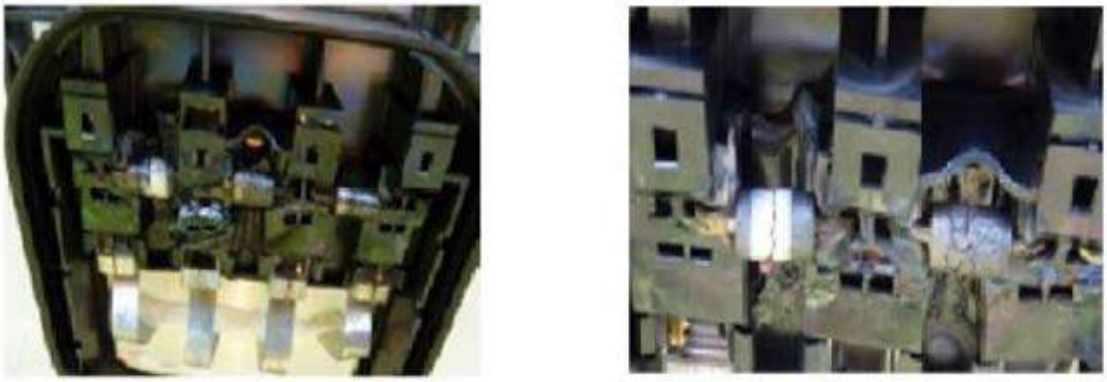


Figure III.4 : Exemples de défauts de diodes de by-pass

Les tableaux ont été établis en considérant le type du défaut, sa conséquence principale, puis son degré d'impact sur la production du système ou criticité (1 faible, 2 moyen, 3 fort), son occurrence (1 faible, 2 moyenne, 3 forte) ainsi que sa phase d'origine (C : Conception ; I : Installation ; E : Exploitation).

III.3.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque :

Défaut	Conséquence	Criticité	Occurrence	Origine
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance	3	3	E
Inversion des liaisons de Sortie	Module mal câblé, diminution des Performances	3	2	I ,C
Air marin	Corrosion	3	2	E
Dégradation des modules par Vandalisme	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation	3	2	E
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation	3	2	I E
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances	2	3	C I
Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module/support	Corrosion	2	3	C
Module mal ou pas ventilé	Échauffement	2	2	I C
Modules non câblés	Diminution des performances	2	2	I C
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances	3	1	E
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules	3	1	E
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, Incendie	3	1	I C
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules	3	1	E
Déformation du cadre des Modules	Infiltration d'eau	3	1	E
Corrosion du cadre des Modules	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules	3	1	E
Délaminage	Diminution des performances, Echauffement	3	1	E
Foudre	Détérioration des modules	3	1	E
Tempête	Module arraché, cassé	3	1	E
Pénétration de l'humidité	Hotspot, augmentation du courant	3	1	E

	de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre			
Faiblesse au vent des Structures	Destruction des modules	3	1	C I
Modules de performances Différentes	Diminution des performances du champ	1	3	I C
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossible	Mauvais câblage	1	3	C I
Bouchons de presse-étoupe manquant sur la boîte de connexion	Pénétration d'eau, corrosion des liaisons	1	3	I C
Boîte de connexion montée à l'envers	Entrée d'eau dans le boîtier par le presse-étoupe	1	3	I C
Ombrage partiel (feuilles d'arbre, déjections)	Hotspot, détérioration de cellules	2	1	E
Dégradation de l'encapsulant à cause des ultraviolets, EVA jaunissant	Absorbe les photons qui n'arrivent plus jusqu'à la cellule, diminution des performances	2	1	E
Augmentation de la résistance série due au cycle thermique	Diminution des performances	2	1	E
Détérioration de la couche anti-reflet	Diminution des performances	2	1	E
Dégradation à cause de la Lumière	Diminution des performances, surtension, destruction de diodes	2	1	E
Dégradation à cause de la chaleur	Diminution des performances, échauffement, détérioration des joints	2	1	E
Inclinaison des modules trop Faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité	2	1	C I
Dégradation des Interconnexions	Détérioration des joints, diminution des performances, augmentation de la résistance série, de la chaleur	2	1	E
Support mécanique des	Efforts mécaniques importants sur	2	1	C I

modules inadéquat ou mal posé	les Modules			
Mauvaise résistance mécanique des supports des modules	Déformation du support	2	1	C I
Diffusion du phosphore (dopant) vers la surface	Perte d'adhérence de l'encapsulant	2	1	E
Important courant de fuite	Échauffement	2	1	E
Échauffement des modules par la boîte de connexion	Décollement du Tedlar, diminution des Performances	2	1	C I
Nid d'insectes sur les Modules	Diminution des performances	2		E
Panneaux inaccessibles	Nettoyage impossible	1	2	C I
Module produisant moins que prévu	Diminution des performances	1	1	E
Apparition de bulles à la surface des modules	Diminution des performances	1	1	E

III.3.2 Défauts dans la boîte de jonction :

Défaut	**Conséquences**	**Criticité**	**Occurrence**	**Origine**
Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre	**3**	**2**	**C I**
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	**2**	**3**	**I**
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre	**2**	**2**	**I**
Boîte de jonction sans presseétoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	**2**	**2**	**I**
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	**2**	**2**	**C I**
Infiltration d'eau par les vis de Fixation	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	**2**	**2**	**I**
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et Maintenance	**1**	**3**	**I**
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution des performances	**2**	**1**	**E I**
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique	**2**	**1**	**E**
Fourreaux non prévus	Destruction de la protection	**2**	**1**	**C**

pour usage extérieur				
Liaison sans protection	Destruction de la liaison	**2**	**1**	**C I**
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie	**2**	**1**	**I**

III.3.3 Défauts dans le système de câblage :

Défaut	**Conséquences**	**Criticité**	**Occurrence**	**Origine**
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement	**2**	**3**	**C**
Connexion desserrée ou Cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes	**2**	**3**	**I E**
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage	**2**	**3**	**I**
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit Electrique	**2**	**3**	**C I**
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique	**2**	**2**	**E**
Câbles non fixés	Boucle de câblage, circuit ouvert	**2**	**2**	**I**
Mauvais câblage	Court-circuit, claquage des diodes antiretour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur	**2**	**2**	**I**
Toron	Boucle électromagnétique	**2**	**2**	**I**
Câbles d'arrivée des souschamps entamés lors du dénudage	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	**2**	**2**	**I**
Absence de graisse de Silicone	Humidité	**2**	**2**	**I**
Câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit	**2**	**2**	**I**

	ouvert, arc électrique			
Câble rongé par des rats	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique	**2**	**2**	**E**
Modification du câblage par l'usager non compétent	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	**2**	**2**	**E**
Boîte de connexion décollée	Connexion des cellules en série Endommagée	**2**	**1**	**E**

III.3.4 Défauts dans le système de protection :

Défaut	**Conséquences**	**Criticité**	**Occurrence**	**Origine**
Protections inappropriées ou Mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation	2	2	C
Interrupteur, disjoncteur Inapproprié	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture	3	1	C
Disjoncteur différentiel non conforme à la norme	Non déclenchement, tension entre neutre et terre	3	1	C
Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur	Dysfonctionnement en cas de pluie	3	1	C I
Parafoudre non connecté à la Terre	Pas de protection	3	1	I
Impossibilité de déconnecter les modules par branche	Problème de sécurité	1	3	CI
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret	Problème de sécurité	1	3	C
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes	Échauffement	2	1	C I
Sous dimensionnement des diodes de	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la	2	1	C

bypass	boîte de jonction			
Absence de protection contre les courants inverses	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction	2	1	C
Diode mal connectée	Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses	2	1	I E
Inversion de la polarité des diodes au montage	Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot	2	1	I E
Phénomènes de résonance	Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension	2	1	C
Dégradation à cause de la Lumière	Non fonctionnement des diodes de Bypass	2	1	E
Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé	Température de destruction atteinte	2	1	C I
Vieillissement des Disjoncteurs	Non fonctionnement des disjoncteurs	1	1	E

III.3.5 Défauts de l'onduleur

Défaut	**Conséquences**	**Criticité**	**Occurrence**	**Origine**
Dégradation à cause de la chaleur	Détérioration de l'onduleur, des Connexions	3	2	E C I
Faux contact	Arrêt de l'onduleur	3	2	I
Surtension	Déconnexion de l'onduleur	3	2	C
Fusible fondu	Arrêt de l'onduleur	3	2	E C I
Foudre sur le réseau	Surtension, destruction de l'onduleur	3	2	E
Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur	Déconnexion de l'onduleur	3	2	C
Onduleur sous dimensionné	Destruction de l'onduleur	2	3	C
Bobine des filtres,	Arrêt de l'onduleur	3	1	E C I

thyristors, capacités en défaut				
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur	3	1	E
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur	3	1	C I
Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances	3	1	E
Onduleur installé dans un lieu non Etanche	Panne de l'onduleur	3	1	I C
Onduleur mal fixé	Chute de l'onduleur	3	1	I
Onduleur surdimensionné	Perte de puissance, diminution des performances	2	1	C
Visserie et bouton de commande Oxydés	Réglage impossible	2	1	E
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances	2	1	C
Pile de sauvegarde HS	Perte de données	1	2	E
Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence	Mauvaise information sur l'intensité	1	2	E I
Onduleur non mis à la terre	Disjoncteur différentiel non Actif	1	2	I
Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Perte de données	1	1	E
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible	Pas d'information sur le Fonctionnement	1	1	E

III.3.6 Défauts dans le système d'acquisition des données

Défaut	**Conséquences**	**Criticité**	**Occurrence**	**Origine**
Coupure de courant	Perte de données	1	3	E
Sonde de température non câblée	Mesure impossible	1	3	I
Sonde d'ensoleillement non câblée	Mesure impossible	1	3	I
Défaut de paramétrage	Enregistrement de fausses Données	1	3	I
Mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou Erronée	1	3	I
Afficheur de données mal placé (trop haut)	Données non visibles	1	2	C I
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives, défaut de	1	2	I

	Commande			
Non configuré pour l'acquisition des Données	Pas de donnée enregistrée	1	2	I
Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible	1	2	E I
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court-circuit	1	1	C I
Acquisition de données vierge	Aucune information Enregistrée	1	1	E
Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Données non fiables	1	1	E

III.4 Système de diagnostic :

Le diagnostic était à l'origine utilisé dans le domaine médical. Ce terme signifie le raisonnement conduisant à l'identification de la cause (origine) d'une défaillance, d'un problème ou d'une maladie sur la base de caractéristiques ou de symptômes constatés par des observations, des contrôles ou des tests (il s'agit donc d'acquérir des connaissances par des signes observables), comme dans son sens médical, le diagnostic des systèmes industriels est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique. Il a pour objet de trouver la cause d'une défaillance. Nous adopterons la définition qui a été retenue par les instances de normalisation :(L'Association Française de Normalisation (AFNOR) et la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) ont défini avec précision les vocabulaires à utiliser dans les différents secteurs industriels [18] : ″ **Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test** ″. Cette définition très courte et concise résume les deux tâches essentielles en diagnostic :

Observer les symptômes de la défaillance ;

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

III.4.1 Etapes du diagnostic :

La procédure du diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes [19] :

- **Acquisition des données**

Cette fonction doit fournir une image du procédé. Les fonctions suivantes doivent être réalisées :

- Conditionnement et prétraitement du signal ;
- Validation du signal de mesure.

- **Détection**

La détection est le premier niveau du diagnostic consiste à prendre une décision binaire : soit le système fonctionne correctement, soit une panne s'est produite. Le résultat de la procédure de détection est une alarme signifiant que le fonctionnement réel du système ne concorde plus avec le modèle de fonctionnement sain.

- **Localisation**

C'est le deuxième niveau du diagnostic, déclenché par une procédure de détection, consistant à déterminer de manière plus approfondie les composants défaillants : capteur, actionneur, processus ou unité de commande.

- **Identification**

L'identification d'un défaut est le fait d'estimer l'amplitude et l'évolution temporelle du défaut afin d'expliquer au mieux le comportement du système. Cette partie d'identification du défaut est la dernière phase de la procédure de diagnostic.

- **Prise de décision**

Une fois le fonctionnement incorrect du système constaté, il est primordial d'agir de façon à maintenir les performances souhaitées ou à limiter les dégradations sur le système réel. Cette prise de décision permet de choisir entre plusieurs options comme arrêter le système pour faire de la maintenance ou accepter un fonctionnement dégradé. Il peut encore s'agir, quand cela est possible, de reconfigurer ou de réorganiser le système.

III.4.2 Classification des méthodes de diagnostic

On trouve dans les travaux antérieurs une vaste variété des méthodes de diagnostic, néanmoins en peut les classifier en deux grandes catégories selon le type de connaissance utilisé pour détecter le défaut [20]. La figure III.3 donne un panorama général des principales méthodes de diagnostic.

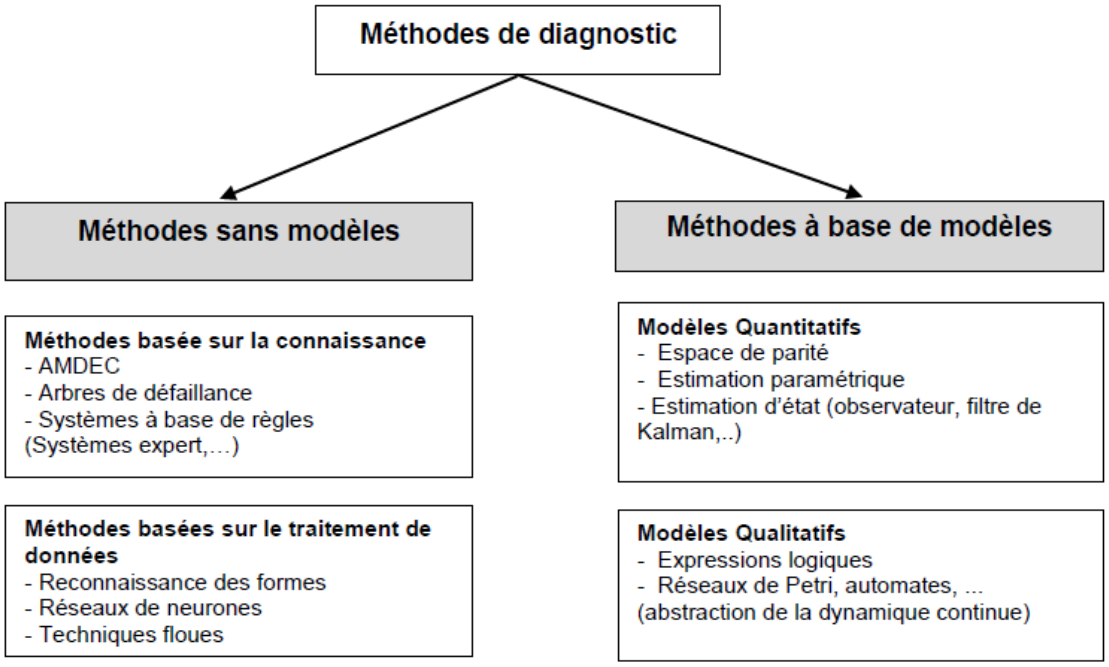


Figure III.5 : Une classification des méthodes de diagnostic.

Comme il est montré dans la figure précédente, en peut envisager deux grande catégories des méthodes de diagnostic. La première catégorie dite sans modèle, de son nom le modèle du système ne rentre pas dans la procédure de diagnostic, seul les informations du contrôleur et celle des capteurs sont mettre en vigueur. À leur tour les méthodes appartiennent à cette catégorie il subdivise en deux, méthodes basé sur la connaissance et méthode basé sur le traitement de donné.

La deuxième catégorie regroupe les méthodes à base de modèle quantitatif et les méthodes à base de modèle qualitatifs. Comme il est connue les modèles des systèmes industriels, s'il existe sont généralement complexe.

De ce point de vue en s'intéressera dans le reste de cette thèse au première catégorie de méthodes. bien précisément celle basées sur le traitement de donné vus nombreux avantages qui présente par apport aux méthodes basée sur la connaissance.

III.4.3 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV :

Les condition climatiques (les effets d'ombrage, l'encrassement des modules), conditions d'exploitation (vieillissement des modules PV) et des défauts de fabrication sont la cause principale au anomalies apparue dans les différents étages du système photovoltaïque, du module puis le câblage et la protection et enfin les convertisseurs de puissance [22].

Semblable à tous les systèmes industriel, les systèmes de surveillance jouent un rôle essential dans les installations photovoltaïques, car ils remplissent la tâche de contrôle et la détection

des défauts[22]. Dans ce contexte, les chercheurs ont proposé plusieurs méthodes de diagnostic dédié au centrales photovoltaïque. Trois fonctionnalités de base qui distingue une méthode à l'autre, à savoir la rapidité de détection de l'anomalie, l'optimisation des donnés d'entré et la sélectivité (c'est-à-dire la capacité à distinguer les différents défauts).

Ils peuvent être classés globalement en deux catégories principales [23] :

Méthodes visuelles et thermiques [24,25] (non électriques), qui peuvent être utilisées pour détecter la décoloration, le brunissement, les salissures de surface, les points chauds, la rupture et la délamination.

- Méthodes électriques pouvant être utilisées pour détecter et diagnostiquer les modules PV, les chaînes et les réseaux défectueux, y compris les défauts d'arc, les défauts de mise à la terre, les diodes, etc.

Le graphe suivant présente les différentes méthodes de diagnostic.

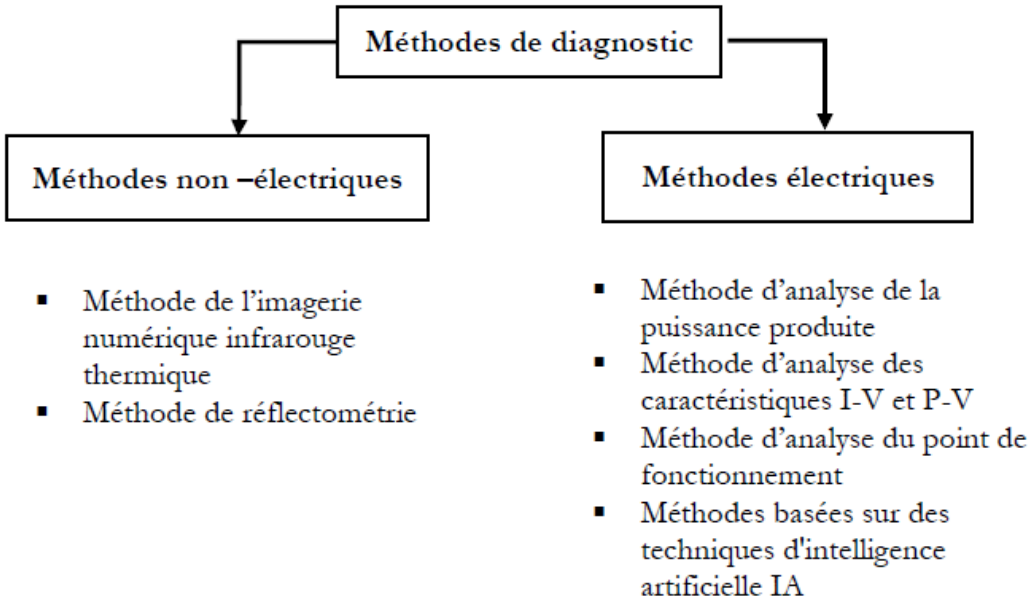


Figure III.6 : Méthodes de diagnostic de défauts d'un générateur PV

III.4.3.1Méthodes non –électriques

Cette catégorie de méthodes est principalement destinée à la détection de la fissure. On peut citer comme méthodes : les essais mécaniques de flexion, l'imagerie par photoluminescence et électroluminescence. Dans notre cas (diagnostic des modules PV) l'imagerie infra rouge et réflectométrie sont les plus répondu [26].

a) Méthode de l'imagerie numérique infrarouge thermique

Les inspections visuelles et l'analyse de l'imagerie infrarouge et thermique pour la détection et la localisation des défauts sont classées comme des méthodes non électriques. Ces méthodes n'exigent pas de données électriques mesurées du système PV. Les méthodes visuelles et thermiques sont utilisées spécifiquement pour détecter la décoloration, le brunissement, les salissures, points chauds, rupture et délaminage des modules PV [21-22]. L'inspection visuelle des modules est long et ne convient pas aux systèmes PV à grande échelle.

Les méthodes de détection des défauts thermiques et infrarouges dépendent généralement aux équipements (caméras thermiques ou infrarouges, drones, etc.) et Les vitesses de détection sont basées sur la fréquence de la surveillance des plantes. Ces méthodes sont révélées efficaces [24-25], mais elles ne sont pas adaptées aux installations photovoltaïques de petite échelle.

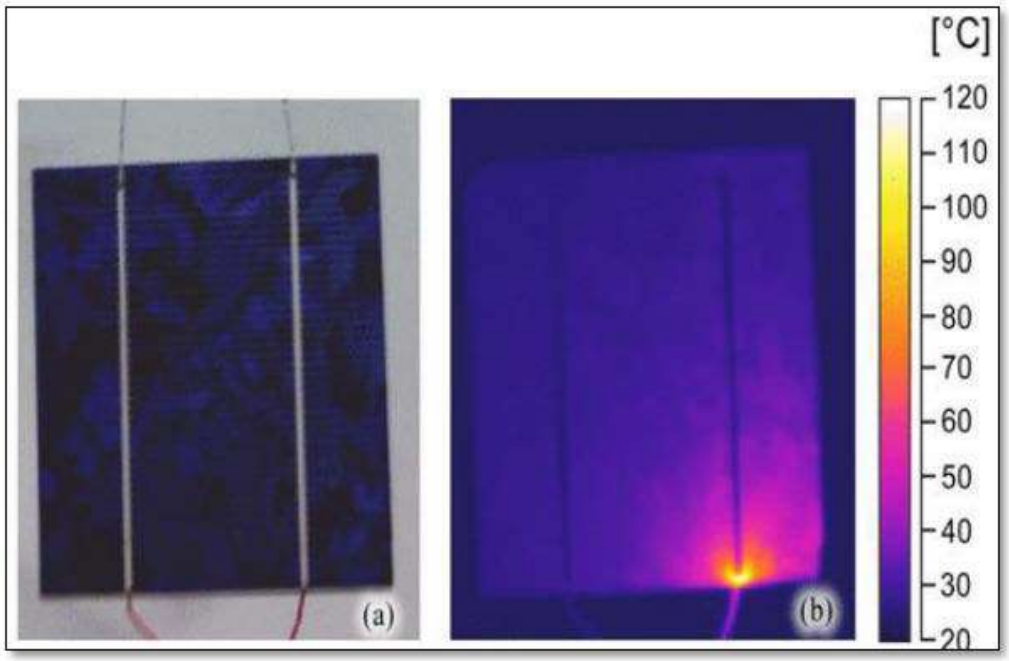


Figure III.7 : Exemple de la localisation de défauts par la caméra thermique.

b) Méthode de réflectométrie

La réflectométrie fonctionne sur le même principe que celui d'un radar : une impulsion ou un signal est transmis dans le champ PV à diagnostiquer. N'importe quelle discontinuité (fissure, défaut, court-circuit, circuit ouvert) se comporte comme un obstacle à cette impulsion incidente et provoque une réflexion. Puis de mesurer les échos retournés. Le retard et l'amplitude des échos sont utilisés pour obtenir des informations sur la localisation, la

caractérisation et éventuellement la prédiction du défaut. Elle a seulement besoin d'un point d'accès, qu'il demande une précision dans leur détermination. Néanmoins, elle est adaptée pour les réseaux de topologie complexes. Aussi, elle peut être intégrée dans les systèmes de contrôle. Cependant, la détection précoce de défauts d'un champ PV nécessite un traitement de données puissant avec un échantillonnage très rapide, ce qui augmente la complexité et le coût du système de diagnostic.

Cette méthode a été est utilisée par [27-28], et par "T. Takashima et all" [29]. Dans le but de détecter le défaut de type "circuit ouvert", "court-circuit" et "augmentation de l'impédance de la connectique", dans un string photovoltaïque.

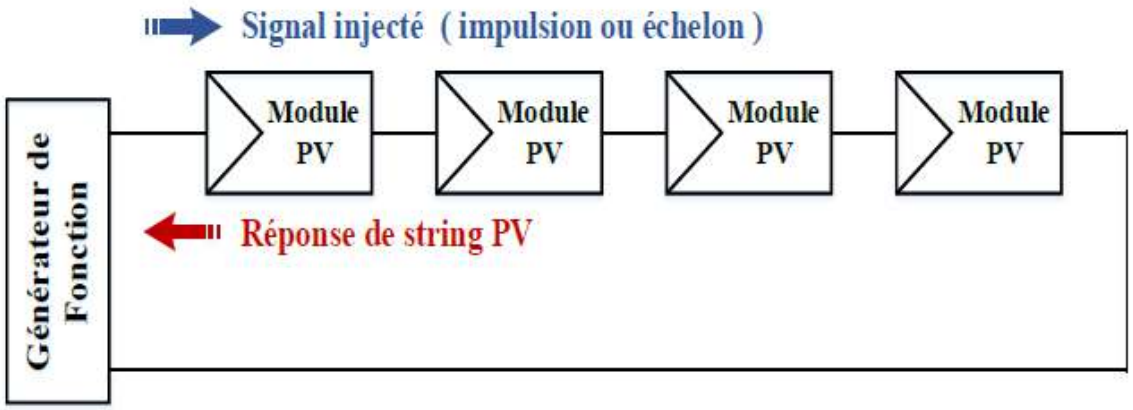


Figure III.8 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV.

III.4.3.2 Méthodes électriques

Les données d'entré pour ces méthodes sont les paramètre électriques (courant, tension et puissance). Quatre principaux type de méthode sont proposée dans la littérature sur laquelle nous nous concentrons dans ce paragraphe.

a)Méthode d'analyse de la puissance produite

Elle est appliquée par [30-31]. Elle est efficace pour déterminer si un champ PV fonctionne normal ou non. Cette méthode utilise l'irradiation solaire et les données de température des modules pour prédire la sortie du panneau photovoltaïque avec un modèle de circuit équivalent. Deux indicateurs correspondant aux pertes thermiques et aux pertes de puissance sont définis.

L'algorithme de détection reconnaît un fonctionnement défectueux du système lorsque les pertes mesurées sont beaucoup plus élevées que les pertes simulées. Des indicateurs basés sur

les rapports des valeurs de courant et de tension simulées et mesurées sont alors utilisés pour identifier les défauts de chaîne ou les défauts d'ombrage [32].

b) Méthode d'analyse des caractéristiques I-V et P-V

Le recueil de grandeurs mesurées (courant et tension) à différents points du champ photovoltaïque permet de détecter et de localiser précisément l'emplacement du défaut à l'aide des capteurs placés dans le champ PV. Plusieurs études sont menées dans ce cadre par différents
auteurs [33,34,35].

c) Méthode d'analyse du point de fonctionnement

Cette méthode repose sur l'analyse et la comparaison du point de puissance maximale actuel de l'installation PV et celui attendu [36-37]. Cette méthode offre la possibilité de détecter automatiquement la présence d'un défaut sans interrompre le système.

d) Méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle IA

Le diagnostic des systèmes physiques complexes contenants plusieurs types de descriptions et d'éléments, et celles basées sur des modèles purement mathématiques ne peuvent pas offrir une méthodologie adéquate avec la précision requise, pour résoudre les problèmes qui se posent dans ce domaine. Par conséquent, les méthodes de l'IA ont été développées pour imiter le raisonnement humain dans la prise de la décision. Elles ont pour objectif de simplifier et rendre la tâche du diagnostic plus simple et plus facile.
Au cours de la dernière décennie, les techniques d'intelligence artificielle ont prouvé leur capacité de modélisation, de contrôle, de prédiction et de prévision dans le système PV [38].

1. Les algorithmes génétiques (AG)

Les AGs sont des techniques d'optimisation stochastiques. Ils ont été introduits par Hollande en 1970. Ils sont basés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique :

- Un mécanisme de codage est utilisé pour représenter les variables du problème d'optimisation.
- Fonction de fitness - ou fonction objectif - fournit le mécanisme d'évaluation de chaque chromosome et la formation de la population apte.
- Un croisement est utilisé pour combiner les chromosomes.
- Les chromosomes sont soumis à une mutation, pour garder l'espace de solution assez riche.

Les AGs sont révélés être un outil puissant pour l'optimisation. Ils ont été appliqués en coopération avec d'autres méthodes de l'IA pour le diagnostic des champs PV dans [39]. Par exemple, les AGs sont utilisés pour isoler les caractéristiques de l'espace d'entrée qui fournit les informations les plus importantes, pour un réseau des neurones qui détecte les défauts dans un champ PV [41]. Donc, le nombre d'entrées du réseau est réduit, et le temps de calcul est diminué. Ainsi, le processus de diagnostic devient plus rapide et plus précis dans son classification.

2. Machine à vecteur de support (SVM)

La SVM est une méthode relativement nouvelle de l'apprentissage computationnelle. Elle est basée sur la théorie statistique de l'apprentissage présenté par V-N. Vapnik. Cette technique peut séparer les données de l'espace en deux classes. Elle est appelée également séparateurs à vaste marge destinée à résoudre des problèmes de diagnostic des champs PV comme dans [41-42].

En SVM, l'espace d'entrée d'origine est mappé dans un espace de grandes dimensions de produit scalaire, appelé espace d'apprentissage. Dans cet espace, l'hyperplan optimal est déterminé pour maximiser la capacité de généralisation du classifier. Il est obtenu en exploitant la théorie d'optimisation, et le respect de l'éclairage fourni par la théorie de l'apprentissage statistique.

Les SVMs ont un potentiel pour traiter de très grands espaces de données, car leur entraînement est réalisé de telle sorte que la dimension de petits vecteurs n'a pas d'influence sur leur performance. Par conséquent, elle est particulièrement bien adaptée pour traiter des données de très haute dimension. Concernant la classification des défauts, il constitue d'un avantage, car la dimension de données n'a pas à être limitée.

3. Logique floue (LF)

La logique floue fournit un cadre systématique pour traiter la connaissance qualitative. Pour cela, la plupart des systèmes experts actuellement utilisent la logique floue à la place du traitement traditionnel pour cette raison il est devenu très utilisé maintenant.

L'un des avantages de la logique floue réside dans le but que les règles dans la base de connaissances ne doivent pas être détaillées et exactes, comme avec les systèmes experts traditionnels. Avec la logique floue, les règles peuvent être généralisées pour couvrir un plus grand nombre de cas. Aussi, la logique floue fournit un moyen facile pour traiter les contradictions dans la base de connaissances.

Concernant le diagnostic des défauts, les systèmes flous sont utiles, parce que le diagnostic a souvent besoin d'un traitement basé sur la connaissance. Dans la pratique, il est très difficile d'obtenir des représentations adéquates au comportement complexe et hautement non linéaire des systèmes défectueux à l'aide de modèles quantitatifs. L'utilisation de modèles qualitatifs flous peut également prendre en compte les incertitudes associées à la description du système.

Dans [43], les auteurs ont présenté un algorithme rentable basé sur FL pour détecter le DA (Défaut d'arc) dans un PVS. Selon les auteurs, de bons résultats peuvent être attendus lorsque le détecteur fonctionne avec le DC-AC et non comme un appareil autonome. Une méthode basée sur l'analyse théorique des courbes I-V et le système de classification FL pour la détection des défauts côté DC d'un système GCPV de 1,1 kWp est développée dans [44-45]. Le défaut recherché est un effet d'ombrage partiel dans les modules PV. Le taux de classification est supérieur à 98%. Une autre méthode basée sur la règle floue de TakagiSugeno Kahn (TSKFR) a été décrite dans [46]. La méthode consiste à comparer la puissance mesurée et la puissance estimée ; une valeur seuil doit être déterminée. Les résultats ont montré que le système est capable de reconnaître plus de 90% des conditions de panne, même en présence de données bruyantes. Les défauts recherchés sont : cellules cassées, ombrage progressif et court-circuit.

4. Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Il existe deux propriétés principales de RNAs pouvant les rendent intéressants pour le diagnostic des systèmes de production. Tout d'abord, ils sont capables de se rapprocher des fonctions non linéaires. Aussi, ils sont très bons pour les tâches de reconnaissance de formes, comme dans le diagnostic des champs PV dans [47-48].

Les RNAs n'utilisent pas une description mathématique du système. Pour cela, un processus s'appelant l'apprentissage du réseau doit être pris pour mettre en oeuvre les connaissances sur le champ PV. Le principe d'apprentissage est d'alimenter le réseau à l'entrée, puis de régler les paramètres internes de façon que la sortie du réseau se rapproche de la sortie du système réel, à chaque cycle d'apprentissage. Le principal avantage des RNAs réside dans la non-utilisation de modèles mathématiques. De plus, ils sont applicables aux systèmes difficiles à modéliser. Néanmoins, ils présentent quelques inconvénients :

- L'apprentissage du réseau nécessite un ensemble de données du fonctionnement du champ PV, qui doit être pris à partir du processus réel ou leurs modèles.
- La sortie du réseau est définie que pour les situations pour lesquelles elle a été entraînée, et non pas pour tous les cas possibles.

- Pour les systèmes complexes, le nombre de neurones dans le réseau augmente et le temps de calcul devient énorme.

Malgré les inconvénients du RNA et la multiplicité des outils de classification, il reste le plus utilisé dans la littérature pour le traitement des problèmes nécessitent une grande précision.

Quelques articles sont récemment publiés dans les applications de le RNA pour la détection et le diagnostic des défauts dans le système PV. Par exemple, l'utilisation de la technique RNA a été démontrée pour diagnostiquer les défauts dans un système PV connecté au réseau [49], cinq modes diagnostic de défaut ont été examinés (c.-à-d., Le dispositif d'alimentation ne peut pas être fourni normalement, le défaut du dispositif d'alimentation, la surchauffe des dispositifs d'alimentation, la valeur de sortie trop faible tension.

5. Réseaux de neurones flous (neuro-floue)

Les valeurs numériques nettes obtenues à partir des réseaux de neurones peuvent être considérées comme un inconvénient du système de diagnostic. Car, l'information heuristique ou qualitative peut être nécessaire, et souvent les connaissances pour les systèmes de diagnostic sont disponibles uniquement sous forme qualitative. La solution est de combiner les réseaux de neurones et la logique floue, pour créer des réseaux de neurones flous. Cette approche est utilisée pour le diagnostic des champs PV dans [50-51]. Elle montre sa prometteuse en intégrant la connaissance qualitative et quantitative, grâce à un système neuro-flou. Il est possible de combiner la capacité d'apprentissage des réseaux de neurones avec la représentation de la connaissance explicite de la logique floue.

Dans [52], les auteurs ont développé une Méthode de détection de défauts neuro-flous pour les systèmes photovoltaïques. Cette méthode est basée sur le calcul d'ensembles de paramètres d'un module PV dans différentes conditions de fonctionnement, au moyen d'une approche Neuro-flous. Les résultats montrent que le système de diagnostic est capable de discerner entre des conditions de fonctionnement normales et défectueuses et avec la même existence défectueuse de bruit et de perturbations.

III.4.4 Choix de l'approche de diagnostic

Suite à cette recherche bibliographique, nous remarquons que chaque méthode décrite ci-dessus a ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'une approche pour un système donné dépend des caractéristiques, des connaissances disponibles et du type de défauts à

diagnostiquer. Il n'y a pas une distinction nette entre les différentes techniques de diagnostic de défauts, et de leurs domaines d'application. Elles peuvent être souvent utilisées pour se compléter les unes des autres.

Néanmoins certaines ces méthodes souffrent du problème d'ambigüité ce qui nous a conduits à recourir à une approche basée sur le concept de logique floue pour une résolution effective.

III.4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons, présenté les différents défauts d'une installation photovoltaïque et leur classifications.

Ensuit nous avons présenté les différentes étapes et méthodes de diagnostic pour détecter et localiser les défauts dans un système photovoltaïque.

Chapitre II :

Modélisation analytique de l'installation photovoltaïque

II.1. Introduction

L'objectif principal de ce deuxième chapitre est de décrire la modélisation des systèmes PV en fonctionnement sain allant de la cellule PV jusqu'au champ PV. Parmi les modèles des cellules PV proposés dans la littérature, le modèle de Bishop est généralement retenu comme le modèle le plus adapté pour modéliser une cellule PV tant en fonctionnement normal qu'en fonctionnement dans le régime inverse. On suppose que toutes les cellules du champ PV sont identiques et soumises aux mêmes conditions de fonctionnement d'ensoleillement et de température. Par ailleurs, la variation des paramètres de la cellule PV et les conditions météorologiques ayant un impact considérable sur le fonctionnement des modules PV, l'influence de l'ensoleillement et de la température de la cellule PV sur sa production électrique sera également menée dans ce chapitre.

II.2. Modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules photovoltaïques permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en énergie électrique. La cellule PV est l'élément clé dans l'installation PV, fabriquée avec des matériaux semi-conducteurs (jonction P- N.).Lorsqu'elle est exposée à la lumière, un déséquilibre de la charge électrique est produit dans les deux couches (P et N), provoquant un mouvement de la charge à travers la jonction produisant ainsi un courant électrique continu.

II.2.1. Modélisation d'une cellule PV

En fonctionnement nominal, les cellules PV sont utilisées pour produire de l'énergie avec une tension de circuit ouvert et de courant de court-circuit qui correspond au courant quand la cellule est court-circuitée, il est proportionnel à la surface de la cellule et dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit ouvert est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant.

II.2.1.1. *Caractéristique électrique d'une cellule PV*

Dans l'état de fonctionnement normal, la cellule PV est conçue pour fonctionner comme un générateur en fournissant l'énergie électrique sous forme CC 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 courant-tension d'une cellule PV peut fonctionner dans trois quadrants, comme le montre la figure (***II*** -1) [14]. La cellule PV est caractérisée par deux points de fonctionnement principaux :

- Le courant de court-circuit I_{sc} .
- La tension de circuit ouvert V_{oc} .

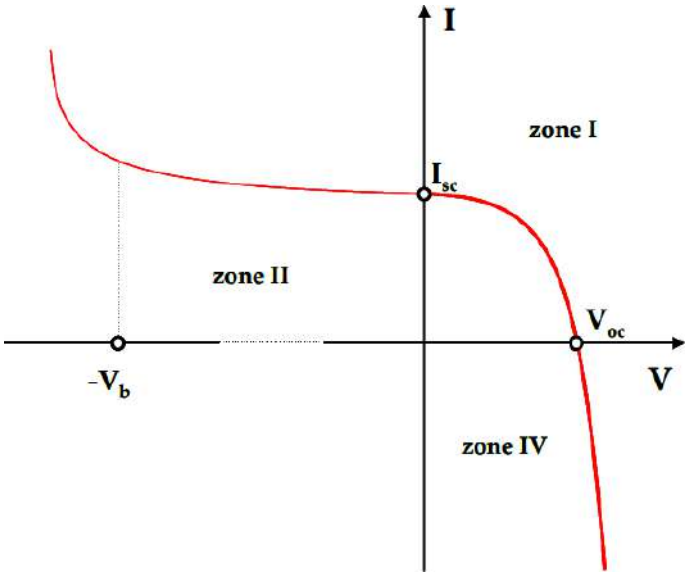


Figure II -1 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

On remarque que ces deux points de fonctionnement et délimites les zones de fonctionnement de la cellule :

Zone I : 0 < I I_{sc} et **0 ≤ V ≤ Voc** «fonctionnement en générateur de la cellule»

Zone II : I > Isc et V < Voc «fonctionnement en récepteur de la cellule»;

Zone IV : I < 0 et V > Voc «fonctionnement en récepteur de la cellule ».

- Le " quardant 1 " correspond au fonctionnement normal de la cellule, elle est utilisée pour produire de l'énergie avec une tension de circuit ouvert V_{oc} d'environ 6 V pour les technologies cristallines et des courants de court-circuit I_{sc} de plusieurs ampères suivant la surface de la cellule et sa technologie [14].

- Si le courant qui traverse la cellule en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant de court-circuit I_{sc} " quardant 2 ", la cellule travaille alors comme un récepteur. La cellule produit une tension négative à ses bornes, la croissance en courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite : la tension de claquage V_b [13]. La tension de claquage de la cellule varie entre 10V – et 30V– [15].
- Si c'est la tension aux bornes de la cellule est amenée à dépasser V_{oc} , en raison du circuit extérieur " quardant 4 ", la cellule va à nouveau travailler comme un récepteur, un courant inverse circule dans la cellule, si ce courant inverse dépasse une limite, la cellule sera endommagée [13].

Afin d'éviter ces deux modes de fonctionnement comme un récepteur, des systèmes de protection sont utilisés : diodes by-pass et protection contre-courant (des fusibles ou diode anti retour). Les diodes by-pass permettent d'éviter qu'un courant de surintensité circule à travers les cellules en lui proposant un chemin alternatif. Pour éviter le fonctionnement de la cellule en contre- courant, des fusibles ou des diodes anti retour sont implantées au bout de chaque string.

II.2.1.2. Modèles de cellules PV

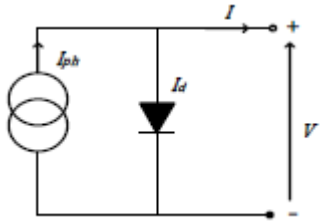
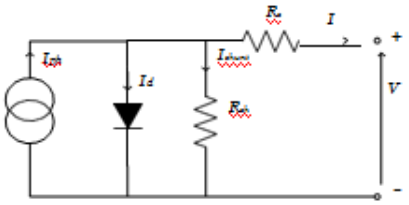
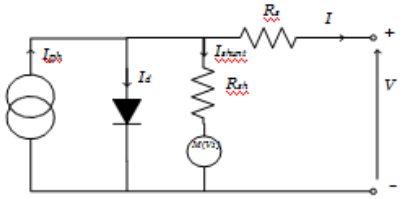
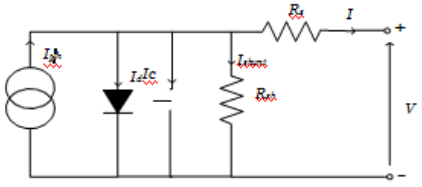
Plusieurs modèles de cellules photovoltaïques existent et varient en complexité et en précision, fonctionnant dans diverses conditions. Essentiellement, chaque modèle est une amélioration du modèle idéal (modèle à troi paramètres) qui contient une source de courant, représentant la puissance lumineuse incidente, et une diode en parallèle qui correspond à la jonction . Des éléments supplémentaires sont ajoutés pour améliorer la description du comportement de la cellule PV. Les modèles les plus courants sont présentés et comparés dans le tableau (***II*** -1) [14].

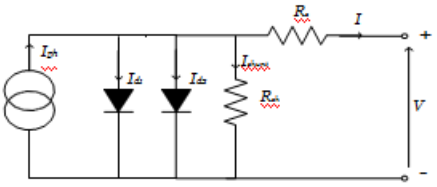
Le modèle à une diode est le plus répandu pour représenter une cellule PV, grâce à sa simplicité et sa précision. L'évolution de ce modèle a conduit à des modèles plus précis, tels que le modèle de Bishop qui décrit le comportement de polarisation inverse d'une cellule PV [16]. Le modèle à deux diodes permet d'améliorer le modèle à une seule diode, qui apporte une meilleure précision tout en rendant la modélisation plus complexe. En outre, des modèles dynamiques ont été proposés par l'introduction d'une capacité afin de modéliser le comportement dynamique de la cellule PV. La complexité du modèle est reliée au nombre de paramètres à identifier. L'étude d'une cellule PV en fonctionnement défaillant exige l'utilisation d'un modèle qui peut décrire la totalité

de la caractéristique de la cellule PV (les trois zones (fig. ***II*** -1)), qui prend en compte l'effet d'avalanche de la cellule [14,13]. Par exemple le modèle à une seul diode

représente seulement la zone I, en fonctionnement normal de la cellule, il ne prend pas en compte l'effet d'avalanche de la cellule zone II et IV.

Tableau II -1 : Modèles couramment utilisés pour les cellules photovoltaïques

Modèle	Schéma Électrique	Nombre de paramètres	Précision
Modèle Idéal		3	Bas
Modèle à une diode		5	Bonne
Modèle de Bishop		8	Bon (avec régime inverse)
Modèle dynamique à une diode		6	Bon (avec Comportement dynamique)

Modèle à deux diodes		7	Très bon

II.2.2. Modélisation d'une cellule PV en utilisant le modèle de Bishop

L'effet d'avalanche de la cellule est pris en considération dans le modèle de Bishop (enajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire) en série avec la résistance shunt) [16]. Alors le modèle de cellule PV qui sera retenu dans nos travaux est le modèle de Bishop qui contient huit paramètres

Le modèle de Bishop est représenté par le circuit électrique de la figure (***II*** -2), qui se compose d'une source de courant produit un Photo-courant qui dépend de l'éclairement solaire et une diode connectée en parallèle pour modéliser la jonction de la cellule, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt et une résistance série [17].

- La résistance série R_s représentant la somme des résistances des différentes couches de la cellule. Elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur, de la résistance de contact des grilles collectrices et de leur résistivité
- La résistance shunt R_{sh} qui caractérise les courants de fuite dans la diode ainsi que les effets de bords de la jonction. Elle dépend de la manière dont cette dernière a été réalisée.

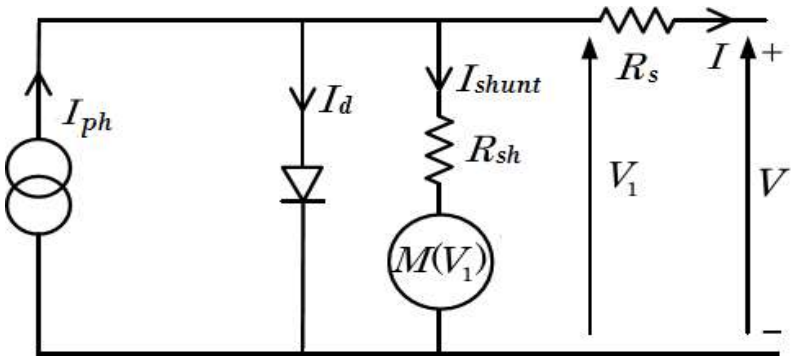


Figure II -2 : *Schéma du modèle de Bishop d'une cellule photovoltaïque*

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I=I_{ph} - I_d - I_{shunt} \qquad \text{(II .1)}$$

avec :

- I Courant délivré par la cellule [A];
- I_d Photo-courant [A].Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule ;
- I_{ph} Couran de diode [A] .
- I_{shunt} Courant shunt [A].
- Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat}\left[\exp\left(\frac{q(V+IRs)}{nKt}\right) - 1 = I_{sat}\left[\exp\left(\frac{(V+IRs)}{VT}\right) - 1\right]\right. \qquad \text{(II.2)}$$

avec:

V :Tension aux bornes de la cellule [V] .

I_{sat} :Courant de saturation de la diode[A] .

V_T: Tension thermique de la diode. Elle dépend de la température T de lacellule;

q : Charge de l'électron q = 1 ,602 * 10^{-9} [coulomb]

k : Constante de Boltzmann k =1, 38 * 10^{-23} [J/°K]

n : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2 ;

T : Température effective de la cellule **[kelvin]**

R_S : Résistance série de la cellule [ohm]

Le courant de la résistance shunt est calculé par [16] :

$$I_{shunt} = \frac{V1}{Rsh}\left[1 + \alpha\left(1 - \frac{V1}{Vb}\right)^{-m}\right] \qquad (II.3)$$

avec :

- Rsh: Résistance shunt de la cellule [ohm]
- V_b: Tension de claquage de la cellule ;(-10 V a -30 V)
- α: Coefficient de réglage de Bishop ; (3.4 à 4)
- m: Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)

Nous avons alors : $V - V_1 + IR_S$

Nous aurons donc :

$$I_{shunt} = \frac{V + IRs}{Rsh}\left[1 + \alpha\left(1 - \frac{V + IRs}{Vb}\right)\right] \qquad (II.4)$$

Alors le courant de sortie de la cellule PV sera décrit comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{V + IRs}{VT}\right) - 1\right] - \frac{V + IRs}{Rsh}\left[1 + \alpha\left(1 - \frac{V + IRs}{Vb}\right)^{-m}\right] \qquad (II.5)$$

On a donc une équation à deux inconnues (I ,V) et huit paramètres (I_{ph} I_{sat} R_s V_t R_{sh} α m) , elle ne peut pas être résolue analytiquement. La résolution de l'équation de cette forme peut être effectuée en utilisant les méthodes itératives (la méthode de dichotomie, la méthode de Lagrange, la méthode du point fixe et la méthode de Newton Raphson). La méthode de Newton Raphson est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires, elle est choisie pour sa convergence rapide de la réponse.

L'algorithme de cette méthode est basé sur l'utilisation du développement de Taylor, rappelons que nous avons :

$$f(x) = f(x_n) + (x - x_n)\ f'(x_n) + \frac{(x-xn)2}{2}\ f''(x_n) + \ldots\ldots \text{(II.6)}$$

Si nous approximons uniquement par les deux premiers termes de cette série, nous obtenons

$\mathbf{F(x) = f(x_n) + (x - x_n)\ f'(x_n)}$. Une approximation d'une racine de cette fonction est donc :

$$\mathbf{X} = x_n - \frac{f(xn)}{f'(xn)}$$

L'algorithme de Newton-Raphson consiste à considérer cette approximation comme itère suivant. Nous aurons donc :

$$X_{n+1} = x_n - \frac{f(xn)}{f'(xn)}$$

f ' (x_n) :est la dérivée de la fonction .

x_n : une valeur actuelle et est une prochaine valeur.

La réécriture de l'équation 2 donne la fonction suivante :

$$f(I) = I_{ph} - I - I_{sat}\left[\exp\frac{V+IRs}{VT} - 1)\right] - \frac{V+IRs}{Rsh}\left(1 + M(V1)\right) = 0 \qquad \text{(II.7)}$$

L'application de la méthode de newton Raphson donne l'équation récursive suivante, le courant de sortie est calculé itérativement.

$$\mathbf{I_{n+1} = I_n - \frac{f(In)}{f'(In)} = I_n - \frac{Iph - In - Isat\left[\exp\left(\frac{V+InRs}{VT}\right) - 1\right]\frac{V+InRs}{Rsh}\left(1 + M(V1)\right)}{-1 - Isat\left[\frac{Rs}{VT}\ exp\left(\frac{V+InRs}{VT}\right)\right] - \frac{Rs}{Rsh}\left(1 + M(V1) - \frac{V+InRs}{Rsh}\ (M'(V1)\right)}} \qquad \text{(II.8)}$$

II.2.3. Simulation d'une cellule PV

Le modèle de la cellule est exprimé par l'équation (2-5), dans laquelle et sont le courant et la tension de la cellule PV. C'est une équation à deux inconnues (I etV) et huit paramètres. Le tableau (***II*** -2) représente, les huit paramètres choisis pour la simulation de la cellule PV. La simulation est faite sous les conditions standards de test(STC) , rayonnement solaire $G = 1000\ W/m^2$, température de la cellule 25° C et la masse atmosphérique Ma=1.5, avec n=1.2 facteur de qualité de la diode.

Tableau II -2 : *Paramètres choisis pour la simulation*

Paramètres	I_{ph} (A)	I_{sat} (A)	R_s Ω	R_{sh} Ω	α	V_t	V_b	M
Valeur	4.75	1e-8	0.005	9	3.4	0.0308	-20	0.1

La figure (***II*** -3) montre la caractéristique I-V d'une cellule PV obtenue à partir du modèle choisi sous MATLAB. Elle décrit la totalité de la caractéristique de la cellule (les trois zones) (fig. ***II*** -3.a) et la première zone (fig. ***II*** -3.b)

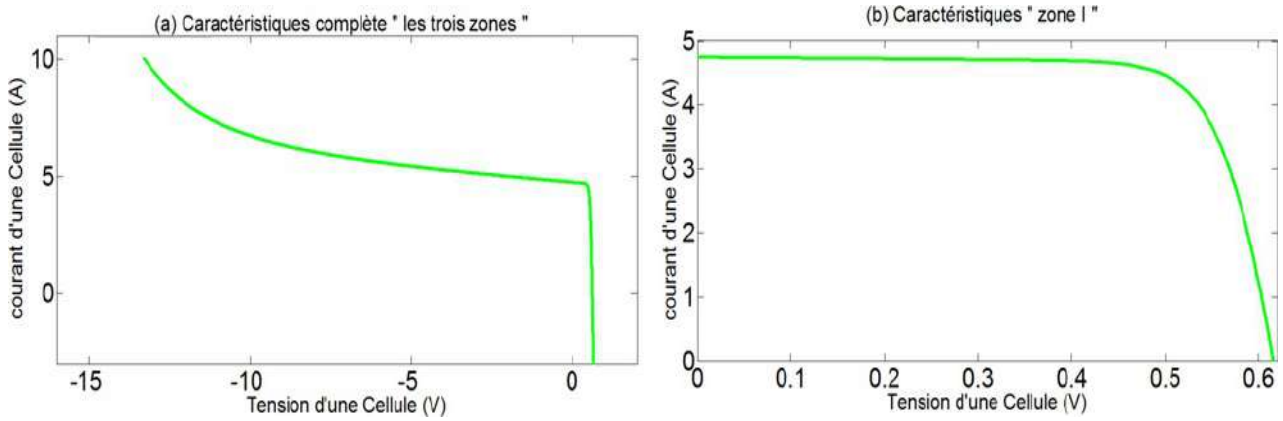


Figure II -3 : *Caractéristique (I-V) d'une cellule PV (STC).*

L'étude de l'influence des paramètres du modèle sur la caractéristique I-V de la cellule PV sera examinée dans la deuxième partie de ce chapitre.

II.2.3.1. *Influence des paramètres d'une cellule photovoltaïque*

Nous avons présenté dans la partie précédente la démarche d'obtention de la caractéristique ($I-V$) d'une cellule PV à l'aide du modèle Bishop qui contient huit paramètres. La connaissance de l'influence de ces paramètres sur la caractéristique du modèle est très importante pour pouvoir ensuite classifier le type de défaut responsable de la variation de ces paramètres [13]. Dans cette analyse, nous nous intéressons qu'aux cinq premiers paramètres : le photo-courant, le courant de saturation inverse, la résistance série, la résistance shunt et le facteur d'idéalité de la diode.

II.2.3.1.1. *Influence de la variation de l'ensoleillement*

Les variations du courant en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante (T=25°C) , sont présentées dans la figure (2-4). On peut remarquer que dans la zone de tension négative, le courant augmente tout d'abord linéairement et proportionnellement à l'ensoleillement, puis, il augmente brusquement jusqu'à ce que la tension de claquage soit atteinte. Mais dans la zone de tension positive, on peut observer que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'ensoleillement. Tandis que la tension du circuit ouvert est légèrement proportionnelle à l'ensoleillement.

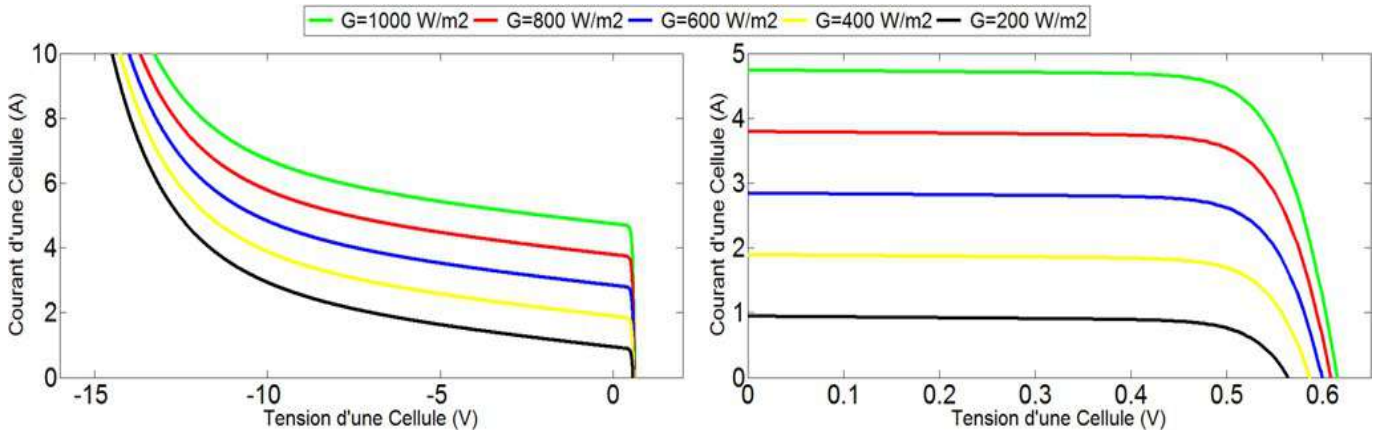


Figure II -4 : *Influence de la variation de l'ensoleillement*

2.2.3.1.1. ***Influence de la variation du courant de saturation inverse de la diode***

La figure (***II*** -5) ci-dessous illustre l'effet du courant de saturation inverse de diode sur la caractéristique I-V de la cellule PV sous les conditions (STC) . On constate que l'augmentation du courant de saturation inverse de la diode I_{sat} provoque une réduction de la tension de circuit ouvert V_{co} par contre, il n'y a aucune influence sur le courant de court-circuit de la cellule I_{sc} .

Contrairement à l'ensoleillement, plus le courant de saturation inverse I_{sat} augmente plus la tension de circuit ouvert V_{co} diminue.

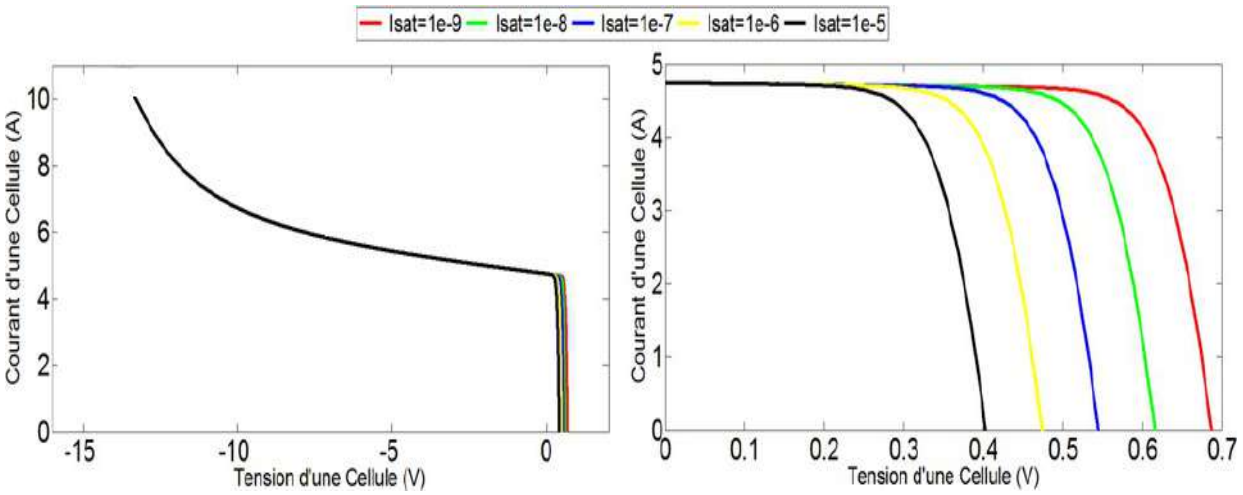


Figure II -5 : *Influence de la variation courant de saturation inverse de diode (STC)*

La figure (***II*** -6) ci-dessous illustre l'effet de la température sur la caractéristique I-V de la cellule PV. On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant de court- circuit de la cellule I_{sc} , en même temps, on assiste à une diminution de la tension de circuit ouvert de la cellule V_{oc} .

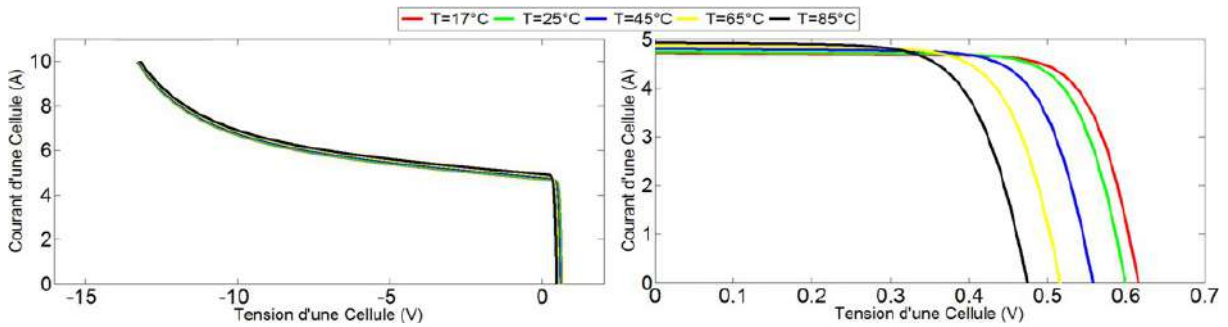


Figure II -6 : *Influence de la variation de température*

II.2.3.1.3. ***Influence de la variation de la résistance série***

La résistance série R_s représente la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur, la résistance du métal qui connecte les cellules et la résistance du matériau semi-conducteur [13]. La figure (***II*** -7) représente l'évolution de la caractéristique I-V d'une cellule PV en fonction de la résistance série R_s . On peut remarquer que la résistance série R_s peut modifier la forme de la courbe. Le facteur de forme diminue au fur et à mesure que la résistance série R_s augmente. Ceci entraîne un rendement plus faible de la cellule PV. Cette résistance n'a pas d'influence sur la tension de circuit ouvert V_{oc}

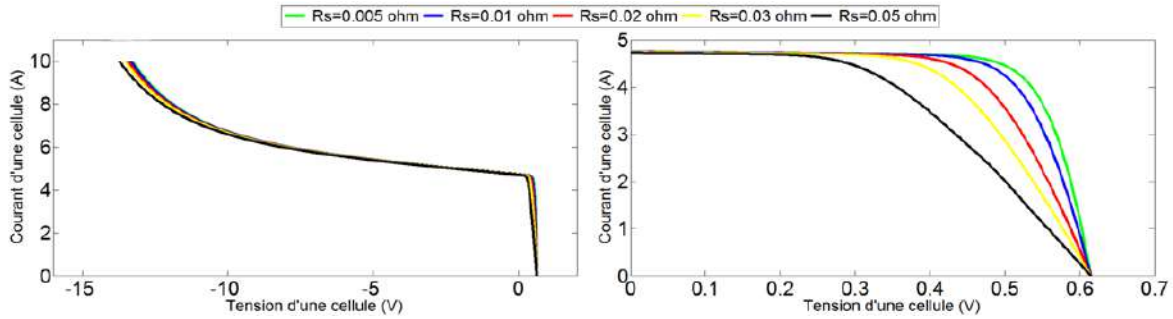


Figure II-7 : *Influence de la variation de la résistance série (STC)*

II.2.3.1.4. ***Influence de la variation de la résistance shunt***

L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque est représentée sur la figure (***II*** -8). Cette résistance représente tout chemin du courant de fuite : courant de fuite entre des cellules, courant de fuite entre la cellule et le bord du module etc. [13]. D'après les résultats obtenus, pour de grandes valeurs de la résistance shunt R_{sh} , on n'observe aucune modification dans la zone de tension positive. Par contre, il y a des modifications très importantes dans la zone de la tension négative. On remarque une chute en tension de circuit ouvert V_{oc} et en courant de court-circuit I_{sc} , dans le cas de réduction importante de la résistance shunt.

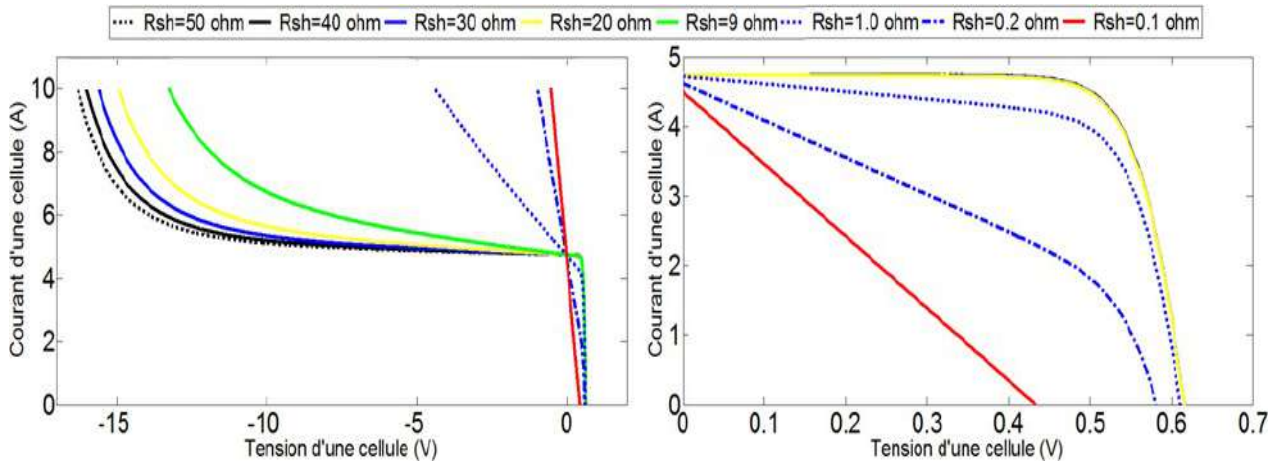


Figure II -8 : *Influence de la variation de la résistance shunt (STC)*

2.2.3.1.5. ***Influence de la variation du facteur d'idéalité de diode***

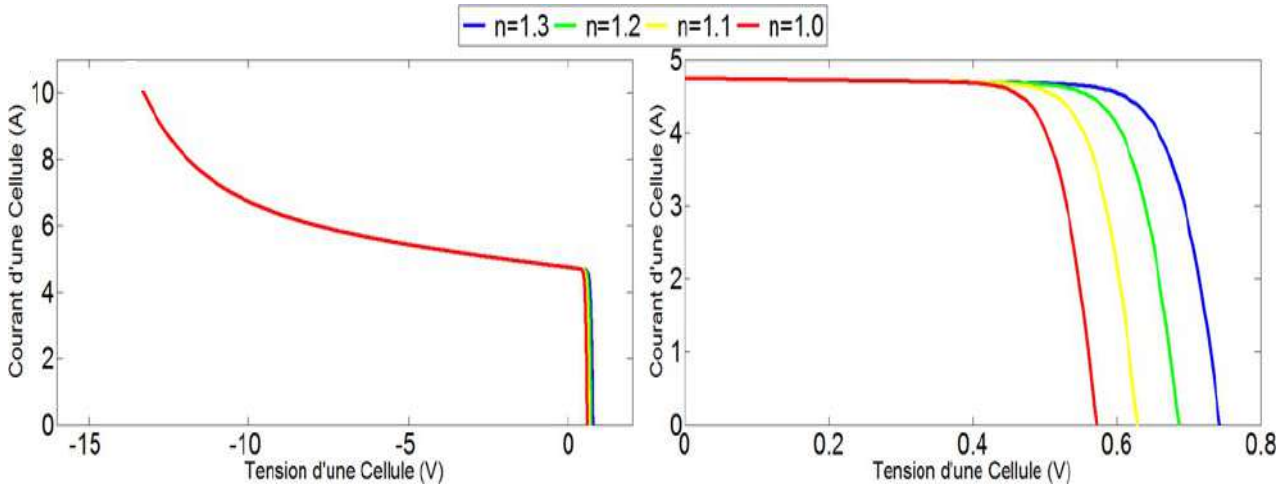


Figure II -9 : *Influence de la variation du facteur d'idéalité de diode (STC)*

La figure (***II*** -9) montre une variation de la caractéristique d'une cellule PV pour plusieurs valeurs du facteur d'idéalité de diode . Selon ces résultats, on peut constater que ce facteur n'a aucune influence sur le courant de court-circuit I_{sc} . Par contre la tension de

circuit ouvert $V_{oc\ varie}$ proportionnellement en fonction de ce facteur.

II.2.3.1.6. *Mise en série de cellule PV*

L'association de plusieurs cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur PV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (fig. ***II*** -10).

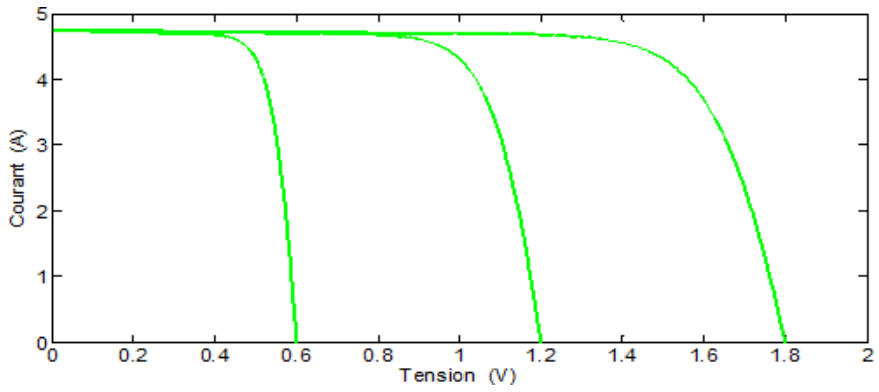


Figure II -10 : *Caractéristique (I-V) de trois cellules montées en série(STC)*

II.2.3.1.7. *Mise en parallèle de cellules PV*

En additionnant des cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité du courant augmente proportionnellement au nombre de cellule en parallèle dans la branche, comme le montre la figure (***II*** -11).

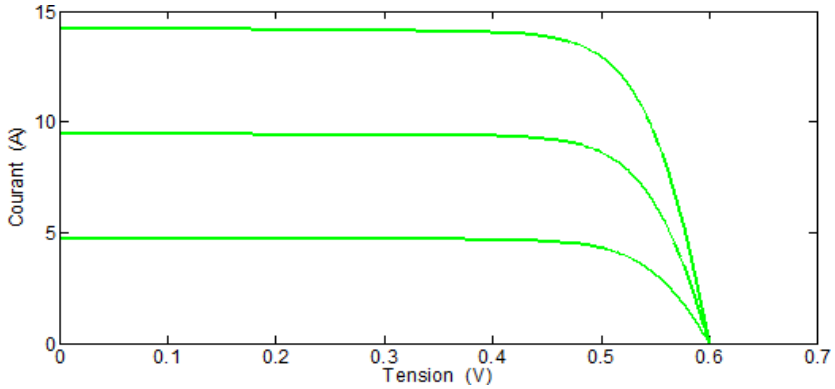


Figure 2-11 : *Caractéristiques (I-V) de trois cellules montées en parallèle (STC)*

II.2.4. *Modélisation* d'un champ PV en fonctionnement sain

Comme il a été adressé au premier chapitre, seule la structure Bridge Linked (BL) est retenue dans ce travail. La topologie (BL) présentée dans la figure (2-12), réduit le nombre de connexions entre les modules des strings adjacents d'environ la moitié par rapport à la topologie Total Cross Tied (TCT). Les connexions commencent après le deuxième module entre le premier et le deuxième string et elles sont mises en place pour chaque deux modules. Entre le deuxième et le troisième string les connexions commencent après le premier module et sont mises en œuvre après chaque deux modules. Les connexions des autres strings sont reliées en suivant le même modèle. On remarque que cette configuration, est composée de plusieurs mailles répétitives, chaque maille est constituée de quatre modules de deux strings adjacents, reliées entre eux par des connexions.

En considérant qu'un champ PV est composé de strings contenant modules par string, nous pouvons déterminer [(M-1)*(N-1 /2)] connexions. La connexion prend la valeur si (n,m) elle est située au-dessous et à droite de module (m ,n) .

Le courant traversant la connexion(m,n) est exprimé comme suit :

$J_{mn}=I_{mn}+I_{m,n+1}-I_{m+1,n}-I_{m+1,n+1}$

avec : I_{mn} le courant généré par le module (m,n)

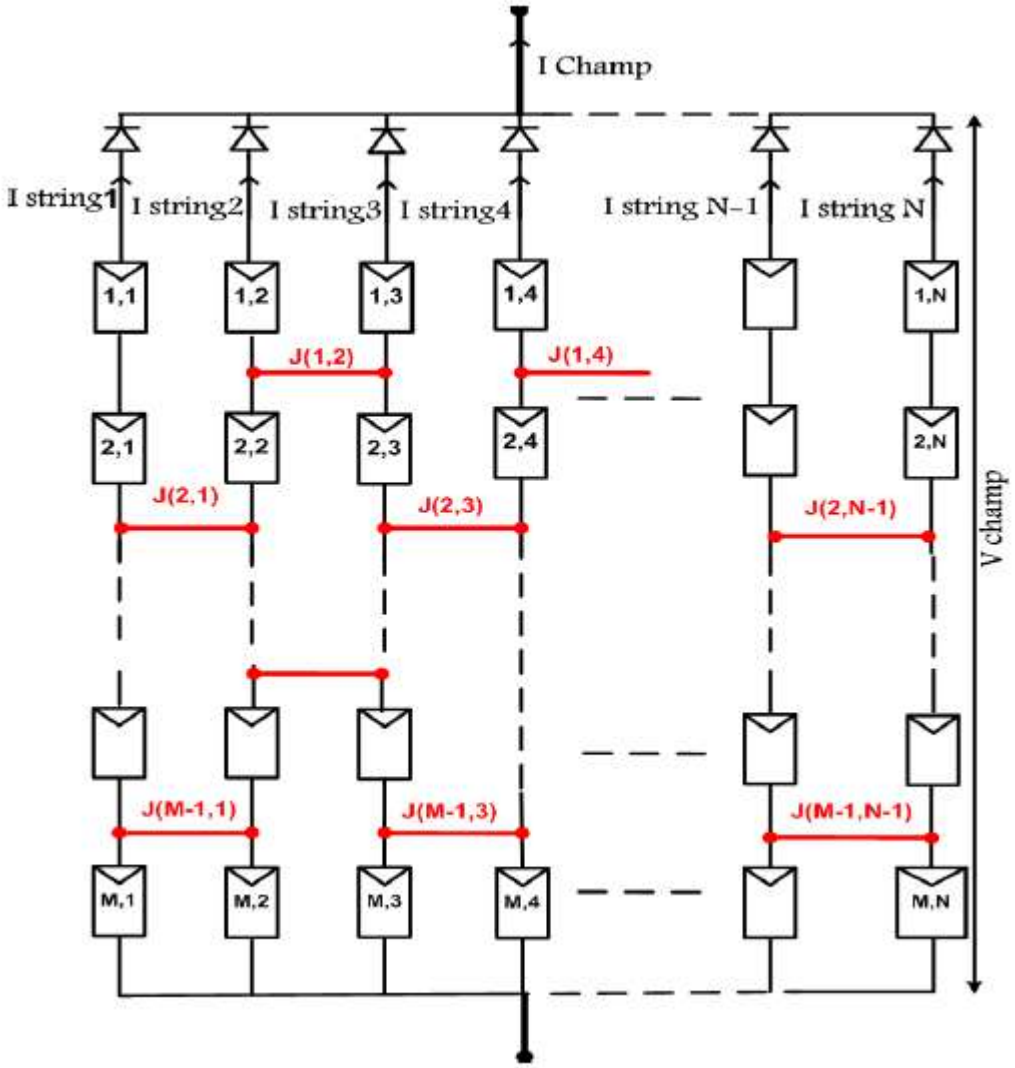


Figure II -12 : *Topologie Bridge Linked d'un champ PV (m, n)*

Le champ PV contient (M*N) modules, chaque module est constitué par N_g groupes de cellules (N_g représente le nombre de groupes en série dans le module), chaque groupe est associé avec une diode by-pass. Dans notre étude, on va utiliser une diode by-pass par groupe sans chevauchement. Chaque groupe contient N_s cellules (N_s : nombre de cellules en série par groupe). La figure (***II*** -13) montre les différents composants d'un champ PV.

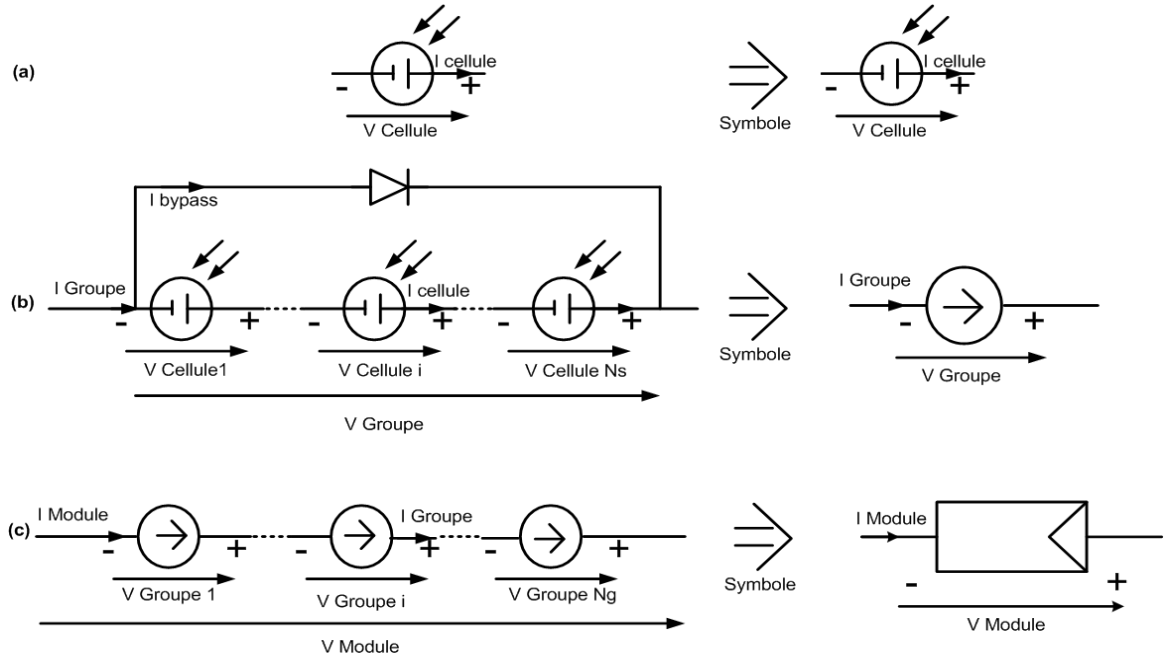


Figure II -13 : *Différents composants du champ PV (a)cellules, (b) groupes de cellules et (c) module*

En fonctionnement sain le comportement de toutes les cellules est identique:

- La diode de by-pass est bloquée car la somme des tensions des cellules est positive. Tout le courant circule dans les cellules ($I_{bypass}=0$);
- La diode anti-retour est passante car la tension de tous les strings est identique. Les diodes laissent passer le courant (I_{string}) produit par chaque string.

- Le courant de champ PV(I_{champ}) en fonction sain :

$$I_{champ} = I_{string} * N$$

$$I_{string}=I_{Module}=I_{Groupe}=I_{Cellule}$$

La tension du champ PV en fonctionnement sain :

$$V_{champ}=V_{string} = M*V_{Module}=N_g*V_{Groupe}=N_s*V_{cellule}$$

avec :

N_s: nombre de cellules mises en série par groupe ;

Ng: nombre de groupes de cellules mises en série par module ;

M : nombre de modules par string ;

N : nombre de strings mis en parallèle par champ.

II.2.5. ***Simulation d'un champ PV en fonctionnement sain***

La figure (***II*** -14) montre la formation de la caractéristique du champ PV en fonction sain à partir de celle de la cellule. On prend : $N_s = 18$, $N_g = 2$, $M = 3$

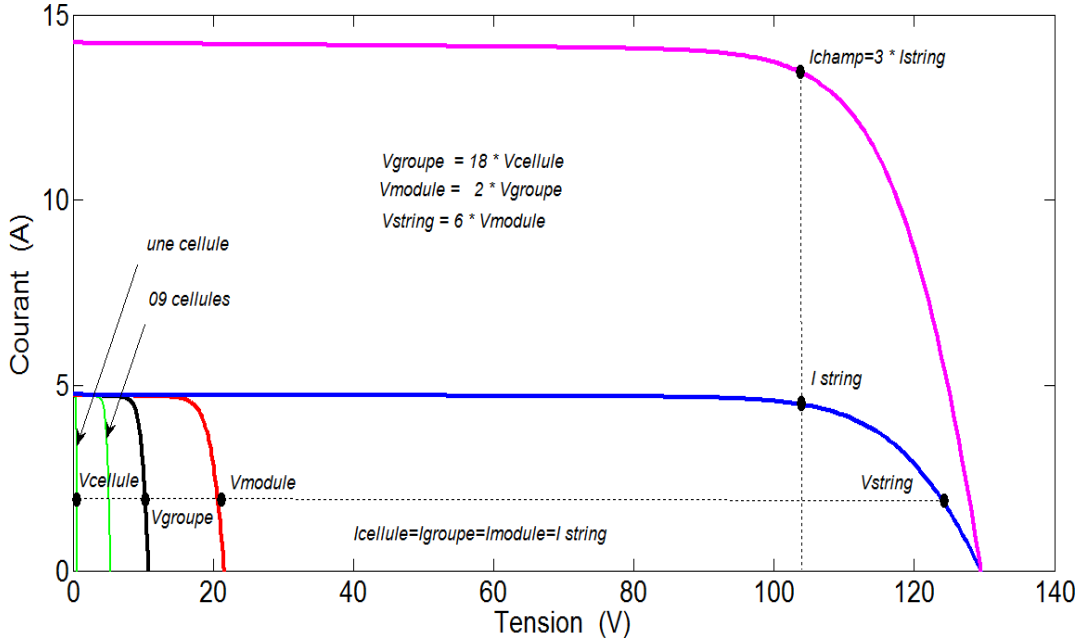


Figure II -14 : *Caractéristique (I-V) d'un champ PV en fonctionnement sain*

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles électriques équivaux de la cellule photovoltaïque. Notre étude ensuite est basée sur la modélisation d'une cellule PV en utilisant le modèle de Bishop à huit paramètres. Nous avons décrit, le circuit électrique équivalent d'une cellule, leur caractéristique , ainsi que la simulation et l'étude de l'influence des divers paramètres(l'éclairement, la température, les résistances série et shunt, le courant de saturation

inverse et le facteur d'idéalité de la diode) sur leur caractéristique puis nous avons abordé l'association des cellules en série, en parallèle, et la modélisation et la simulation d'un champ PV en fonction sain connectée en Bridge Linked (BL).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La sureté énergétique est considéré comme la plus importante article dans l'agenda des pays développé et sous-développé aussi car les indice des énergies classique (fossile) sont inquiétantes. Les réserve du pétrole ainsi des celle du gaz abaisse d'une manière dramatique et ne pourra pas satisfaire les besoins du marché mondiale dans les futures proches décades.

De ce fait la boussole des chercheurs ainsi des dirigeants est tourné vers les énergie renouvelable comme alternative à celle fossile, connue par sa durabilité et moins polluantes les énergies renouvelables font l'objet des milliers de projet de recherche dans la dernière décade, ces derniers ont prouver que ces énergies sont prometteurs est capable de remplacer les énergies classique surtout dans le domaine de production de l'électricité.

L’énergie solaire photovoltaïque est l'une de ses énergies qui nous intéressent dans notre payé, vue la quantité lumineuse considérable qui distingue le désert algérien. Les centrales de test installée dans quelque région saharienne ont dévoilé le rideau sure plusieurs problèmes techniques qui limite la production de ces centrales.

Les défauts qui subit les installations photovoltaïques est la pertinentes major qui a fait la casse-tête des chercheurs car la présence de ces défauts abaisse exponentiellement les kilowatts produits par les centrales. Plusieurs solutions ont été proposé dans littérature mais restent insuffisantes devant la complexité du problème.

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

Le premier chapitre expose des généralités sur les systèmes PV ,son principe de fonctionnement En plus nous avons présenté en détail les composantes principales du système PV .

Le deuxième chapitre traite la modélisation du système photovoltaïque, les différents modèles d'une cellule photovoltaïque (modèle à trois paramètres, à cinq paramètres ou plus), nous avons retenu le modèle de Bishop à huit paramètres. Ensuite nous avons étudié l'influence de quelques paramètres du modèle choisis selon les caractéristiques de la cellule.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude du différents défauts qui peut subir un système photovoltaïque et les méthodes de diagnostic. Les méthodes du diagnostic en été classifié en deux grande catégorie, méthode électrique et non électrique

.

Bibliographies :

[1] A.Houssein, N.Heraud, I.Souleiman, G.Pellet, "Monitoring and fault diagnosis of photovoltaic panels", EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, Ghardaïa, Algeria, 2-4 November 2010.

[2] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), revue "Produire de l'électricité grâce à l' énergie solaire," ADEME, 2014.

[3] European Photovoltaic Industry Association (EPIA), " revue Solar photovoltaic electricity Solar generation 6," l'association européenne du photovoltaïque, 2011.

[4] "Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives - Le photovoltaïque concentré." [Online]. Available: http://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-1-3-4-photo-concentre.html.

[5] "Etat des lieux et perspectives de la filière photovoltaïque | Energies & Environnement." [Online]. Available: http://energie.sia-partners.com/20131212/etat-des-lieux-et-perspectives-de-la-filiere-photovoltaique/.

[6] S. Astier, "Conversion photovoltaïque: de la cellule aux systèmes," Tech. l'ingénieur D3936, 2008.

[7] Long Bun "Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque" Thèse de doctorat dans l'énergie électrique. Université de Grenoble, 2011.

[8] Daniel CLENET **"**Démarreurs et variateurs de vitesse électroniques", Schneider electric, CT 208 éditions novembre 2003.

[9] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie(ADEME), "Spécifications techniques relatives à la protection des personnes et des biens dans les installations photovoltaïques raccordées au réseau BT ou HTA," ADEME, 2012.

[1O] "SIGMA TEC Photovoltaïque." [Online]. Available: http://www.sigma-tec.fr/textes/texte_cables.html.

[11] “Cabur - Produits pour installations photovoltaïques.” [Online]. Available: http://www.cabur.it/products3.asp.

[12] A. Aloña Berasategi, “New Optimized Electrical Architectures of Photovoltaic Generators with High Conversion Efficiency,” Thèse de doctorat,Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier),Université Toulouse, 201

[13] L. Bun, “Détection et localisation de défauts pour un système PV,” Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELAB), Université de Grenoble, 2011.

[14] D. Picault, “Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies,” Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELAB), Université de Grenoble, 2010

[15] M. C. Alonso-García and J. M. Ruíz, “Analysis and modelling the reverse characteristic of photovoltaic cells,” Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 90, no. 7–8, pp. 1105–1120, May 2006.

[16] J. Bishop, “Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits,” Sol. cells, vol. 25, pp. 73–89, 1988.

[17] E. L. Meyer and E. E. van Dyk, “Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters,” IEEE Trans. Reliab., vol. 53, no. 1, pp. 83–92, Mar. 2004.

[18] W. Rezgui. Système intégré pour la supervision et le diagnostic des défauts dans les systèmes de production d’énergies: les installations photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2 -Batna-, 2015.

[19] D. Maquin,J. Ragot, Diagnostic des systèmes linéaires. 2000.

[20] P. Ripoll. Conception d'un système de diagnostic flou appliqué au moteur automobile. Thèse de Doctorat, université de Chambéry, 1999.

[21] D. W. Peter. Fault Detection and Performance Visualisation for a Grid-Connected Photovoltaic Power Plant Using Sensor Data. Master of Engineering Thesis, Stellenbosch University, 2019.

[22] A. Mellit, G. M. Tina,S. A. Kalogirou. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. Renewable Sustainable Energy Reviews. Vol 91, pp. 1-17, 2018;

[23] G. M. Tina, F. Cosentino,C. Ventura, Monitoring and diagnostics of photovoltaic power plants. In Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II. 2016, Springer. p. 505-516.

[24] J. A. Tsanakas, L. D. Ha,F. Al Shakarchi. Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery. Renewable Energy. Vol 102, pp. 224-233, 2017.

[25] J. A. Tsanakas, L. Ha,C. Buerhop. Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges. Renewable sustainable energy reviews. Vol 62, pp. 695-709, 2016.

[26] L. Bun. Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.

[27] M. K. Alam, F. H. Khan, J. Johnson,J. Flicker, PV arc-fault detection using spread spectrum time domain reflectometry (SSTDR). in 2014 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE). 2014. IEEE.

[28] G. Deans, S. McDonald, C. Baer,K. Cadien, Solar wafer emitter measurement by infrared reflectometry for process control: Implementation and results. in 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2014. IEEE.

[29] T. Takashima, J. Yamaguchi,M. Ishida, Fault detection by signal response in PV module strings. in 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2008. IEEE.

[30] D. Gaikwad,S. Mehraeen, Reactive power considerations in reliability analysis of photovoltaic systems. in 2012 IEEE Green Technologies Conference. 2012. IEEE.

[31] W. Yi-Bo, W. Chun-Sheng, L. Hua,X. Hong-Hua, Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system. in IEEE international conference on industrial technology. 2008. IEEE.

[32] A. Chouder,S. Silvestre. Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis. Energy conversion and Management. Vol 51, pp. 1929-1937, 2010;

[33] Y. Liu, B. Li,Z. Cheng, Research on PV module structure based on fault detection. in Chinese Control and Decision Conference. 2010. IEEE.

[34] X. Xu, H. Wang,Y. Zuo, Method for diagnosing photovoltaic array fault in solar photovoltaic system. in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2011. IEEE.

[35] T. Jianeng, Z. Yongqiang,W. Wenshan, Fault diagnosis method and simulation analysis for photovoltaic array. in International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011. IEEE.

[36] M. Uoya,H. Koizumi. A calculation method of photovoltaic array's operating point for MPPT evaluation based on one-dimensional Newton–Raphson method. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol 51, pp. 567-575, 2014.

[37] W. Xiao, M. G. Lind, W. G. Dunford,A. Capel. Real-time identification of optimal operating points in photovoltaic power systems. IEEE Transactions on industrial Electronics. Vol 53, pp. 1017-1026, 2006.

[38] A. Mellit,S. A. Kalogirou. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review,. Progress in energy combustion science,. Vol 34, pp. 574-632, 2008.

[39] S. I. Sulaiman, Z. Othman,T. K. A. Rahman, Dimensioning of photovoltaic array using Genetic Algorithm. in 2012 International Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE). 2012. IEEE.

[40] A. Mellit, S. A. Kalogirou,M. Drif. Application of neural networks and genetic algorithms for sizing of photovoltaic systems. Renewable Energy. Vol 35, pp. 2881-2893, 2010.

[41] F. Wang, Z. Zhen, Z. Mi, H. Sun, S. Su,G. Yang. Solar irradiance feature extraction and support vector machines based weather status pattern recognition model for short-term photovoltaic power forecasting. Energy Buildings. Vol 86, pp. 427-438, 2015.

[42] M. Hildmann, A. Rohatgi,G. Andersson, Constrained support vector machines for photovoltaic in-feed prediction. in 2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). 2013. IEEE

[43] B. Grichting, J. Goette,M. Jacomet, Cascaded fuzzy logic based arc fault detection in photovoltaic applications. in 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). 2015. IEEE.

[44] M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi,M. Dales. Diagnostic method for photovoltaic systems based on six layer detection algorithm. Electric Power Systems Research. Vol 151, pp. 26-39, 2017.

[45] M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi, M. Dales,P. Mather. Photovoltaic fault detection algorithm based on theoretical curves modelling and fuzzy classification system. Energy. Vol 140, pp. 276-290, 2017.

[46] P. Ducange, M. Fazzolari, B. Lazzerini,F. Marcelloni, An intelligent system for detecting faults in photovoltaic fields. in 2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. 2011. IEEE.

[47] B. Singh, D. T. Shahani,A. K. Verma. Neural network controlled grid interfaced solar photovoltaic power generation. IET Power Electronics. Vol 7, pp. 614-626, 2013.

[48] K.-H. Chao, M.-S. Yang,C.-P. Hung, Applying a CMAC neural network to a photovoltaic system islanding detection. in 2013 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2013. IEEE.

[49] Y. Wu, Q. Lan,Y. Sun, Application of BP neural network fault diagnosis in solar photovoltaic system. in International conference on Mechatronics and Automation. 2009. IEEE.

[50] F.-J. Lin, K.-C. Lu, T.-H. Ke, B.-H. Yang,Y.-R. Chang. Reactive power control of three-phase grid-connected PV system during grid faults using Takagi–Sugeno–Kang probabilistic fuzzy neural network control. IEEE Transactions on Industrial Electronic. Vol 62, pp. 5516-5528, 2015.

[51] E. Karatepe,T. Hiyama. Artificial neural network-polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions. IET Renewable Power Generation. Vol 3, pp. 239-253, 2009.

[52] L. Bonsignore, M. Davarifar, A. Rabhi, G. M. Tina,A. Elhajjaji. Neural network controlled grid interfaced solar photovoltaic power generation. Energy Procedia. Vol 62, pp. 431-441, 2014.