



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique.

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Électrotechnique.

Spécialité : Électrotechnique Industrielle.

Réalisé par :

Boukrif khelaf

et

Djourdikh salah

Thème

Diagnostic d'un système photovoltaïque par la technique FRA

Soutenu le: **04/07/2023.**

Devant le Jury composé de :

Mr: M. rezki	M.C.A	Univ. Bouira	Président
Mr: A.melah	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur
Mm: N.yassa	M.C.A	Univ. Bouira	Encadreur
Mm: G.ouadfel encadreur	M.C.B	Univ. Bab ezouar	Co-



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيدة (ة) بوكريه خديجة الصفة: طالب، استاذ، باحث طالب

الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 100418465 والصادرة

بتاريخ: 2023/04/15

المسجل (ة) بكلية / معهد العلوم التكنولوجية قسم هندسة كهربائية

والمكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة
دكتوراه).

عنوانها: diagnostique d'un systeme photovoltaïque
par la technique FRA

تحت إشراف الأستاذ (ة):

Yann Naïroun

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة
الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/07/06

جف

توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



Turnitin

%

20

النسبة:

S. Melal

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيدة (ة) لورديخ صالح الصفة: طالب، استاذ، باحث صالح
الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 9358019 والصادرة
بتاريخ: 29/10/2017

المسجل (ة) بكلية / معهد علوم التكنولوجيا قسم هندسة كهربائية
و المكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة
دكتوراه).

عنوانها: Diagnostic d'un système photovoltaïque par
La technique FRA.

تحت إشراف الأستاذ(ة):

..... Yasser et Amina

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة
الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023 107 106

توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



%

27

النسبة:

h. melal
JH

الامضاء:

Dédicaces 1

Je dédie ce mémoire aux plus chères personnes du monde à mes parents à qui je dois mon éducation et ma réussite. De tout temps leur affection a été ma plus Grande joie qui me rappelle que je dois travailler. Je leur devrais de les aimer encore plus quoi que rien ne puisse égaler leur amour, leur tendresse

A Mes frères et mes sœurs

A ma promotrice et co promotrice Yassa Nacira et Ouadfel Ghania

Tous mes chers amis

Djourdikh Salah

Dédicaces 2

Et ne voilà-t-il par une occasion pour dire quelques mots en guise de reconnaissance pour tous celles et ceux qui sans cesse veillaient jusqu'à l'aube pour qu'aujourd'hui nous soyons la ,à toi maman Merci pour avoir veillé sur moi, et priés toujours pour moi, à toi mon père, rien qu'en regardant dans tes yeux je devine l'amour sans limite que tu me réserves merci aussi.

A Mes frères et mes sœurs

A mon promoteur et co promoteur Yassa Nacira et Ouadfel Ghania

Tous mes chers amis

Boukrif khelaf

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et l'énergie pour terminer ce modeste travail. Toute notre immense gratitude pour madame YASSA et madame OUADFEL pour l'honneur d'elles nous ont accordé en acceptant de nous accompagner tout au long de ce travail de recherche. La confiance et sympathie qu'elles nous ont témoignée. Nous les remercions également pour les conseils non seulement pour ce travail, mais aussi au cours de notre formation de master. Nous remercions, également, les enseignants qui ont accepté d'évaluer ce travail de recherche. Nos remerciements sont adressés pour tous nos enseignants qui nous ont accompagnées tout au long de notre cursus universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche et que chacun veuille bien trouver ici le témoignage de notre gratitude.

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE ET LES METHODES DE DIAGNOSTIQUE.	
I.1. INTRODUCTION	5
I.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	5
I.3. CLASSIFICATIONS DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	6
I.4. LES AUTRES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES COMPOSITES	7
I.5. LES CONSTITUANTS D'UN PV	8
I.1.1. Générateur PV	9
I.5.1. Diode de by-pass.	9
I.5.2. La boite de jonction	9
I.5.3. Module PV.....	10
I.5.4. String PV	10
I.5.5. Champ PV.....	11
I.6. CLASSIFICATION DES DEFAUTS DE GENERATEUR PV.....	11
I.6.1. Dfinition de quelque notions	11
I.6.2. Types de défauts dans le système photovoltaïque	12
I.6.3. Types de défauts dans le système photovoltaïque	12
I.6.4. Type de défaut dans les modules PV	13
I.6.4.1. Diode de by-pass et la diode anti retour	13
I.6.4.2. Câblage et connecteur.....	14
I.6.4.3. Ombrage d'un générateur	14
I.7. LE DIAGNOSTIQUE	15
I.7.1. Les étapes de détection et diagnostic des pannes	15
I.7.2. Méthodes de diagnostic	16
I.7.3. Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs	16
I.7.3.1. Les méthodes à base de modèles qualitatifs	17
I.7.3.2. Méthode électrique	17
I.7.4. Méthode de réflectométrie.....	17
I.7.5. Méthodes sans modèles	18
I.7.6. Méthodes qualitatives	18

I.7.6.1. Méthode d'infrarouge.....	18
I.7.6.2. Méthode de traitement de signal.....	19
I.7.6.3. Méthode d'analyse FRA.....	19
Conclusion.....	19

CHAPITRE II : ETUDE COMPORTEMENTALE D'UNE CELLULE SOLAIRE AVEC FRA

II.1. INTRODUCTION.....	24
II.2. MODELES EQUIVALENTS.....	24
II.3. MODELE STATIQUE ET DYNAMIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	24
II.3.1. Modèle statique.....	24
II.3.2. Modèle dynamique.....	26
II.3.3. L'impédance dynamique de la cellule solaire.....	27
II.4. PRINCIPE DE LA METHODE DE DETERMINATION DES PARAMETRES HF DE LA CELLULE SOLAIRE EN SI.....	28
II.5. METHODE DE L'ANALYSE DE LA REPONSE FREQUENTIELLE FRA.....	30
II.5.1. Principe de la méthode FRA.....	30
Conclusion.....	28

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DES DEFAUTS DANS UN PV

III.1. INTRODUCTION.....	29
III.2. ETUDE EXPERIMENTALE.....	29
III.2.1. Détermination de la caractéristique de la cellule saine.....	29
III.2.2. Le matériel utilisé.....	29
III.2.3. Détermination de la caractéristique de six cellules saine mise en série.....	30
III.2.4. Application et étude défaut.....	32
III.2.4.1. Défaut de diode by-pass.....	32
III.2.4.1.1 Défaut diode déconnectée.....	32
III.2.4.1.2 Défaut de diode inverse.....	34
III.2.4.2. Défaut de poussière.....	35
III.2.4.3. Défaut d'ombrage.....	36
III.2.4.4. Défaut de connectique.....	37
III.3. REPONSE FREQUENTIELLE D'UNE CELLULE SOLAIRE EN SILICIUM.....	38
III.3.1. Tests expérimentaux avec la FRA sur une cellule solaire en (Si) à l'état sain.....	38

III.3.2. Partie de la manipulation avec FRA	38
III.3.2.1. Les résultats d'expérience FRA	38
III.3.2.2. Application de défaut de court-circuit avec la FRA	39
III.3.2.3. Application de défaut de circuit ouvert avec la FRA.....	39
III.4. APPLICATION DE DEFAUT EN SIMULATION.....	40
III.4.1. Extraction du paramètre à simuler	40
III.4.2. Application des défauts.....	41
III.4.2.1. Défaut de court-circuit	41
III.4.2.2. Défauts de circuit ouvert.....	42
III.4.2.3. Défauts de connectique 10 ohm.....	44
III.4.2.4. Défauts de connectique 210 ohm.....	45
Conclusion	48
CONCLUSION GENERALE	50

Liste des Figures

Figure I.1. Constitution d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.2. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	7
Figure I.3. Les cellules photovoltaïques en plastique, composites et organique Technologie Flexcell	8
Figure I.4. La composition du panneau solaire	9
Figure I.5. Système photovoltaïque en: (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre:échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass. 9	9
Figure I.6..la boîte de jonction	10
Figure I.7. Mise en série des cellules PV dans la chaîne PV	10
Figure I.8.Montre différentes configurations possibles pour le module	11
Figure I.9. Montre l'emplacement de la diode by-pass et la diode anti retour.....	13
Figure I.10. Defaut de câblage et connecteur entre les modules PV	14
Figure I.11. (A) cheminai applique un ombrage partiel sur un panneau solaire (B) les quadrants de fonctionnement d'une cellule solaire en SI.....	14
Figure I.12. Processus de diagnostic de défauts	15
Figure I.13.Un plant qui illustre la déférente méthode de diagnostic	16
. Figure I.14.Principe des méthodes de diagnostic avec modèles	16
Figure I.15. Principe de la réflectométrie pour localiser. Le défaut dans un string PV	18
Figure I.16.. Exemple de détection de défauts par thermographie infrarouge	19
Figure II.1. Modèle équivalent statique d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure II.2. Caractéristiques I-V d'une cellule solaire en fonctionnement normal	26
Figure II.3. Modèle équivalent dynamique d'une cellule photovoltaïque	27
Figure II.4. Schéma simplifiée du modèle dynamique équivalent	27
Figure II.5. Le diagramme d'impédance de la cellule solaire avec les spectres de Nyquist	29
Figure II.6. Diagramme de Bode illustre le changement des paramètres d'une cellule	30
Figure II.7. Principe de la technique de l'analyse de la réponse fréquentielle [1].....	32
Figure III.1. Module de cellule solaire en SI.....	30
Figure III.2. (A) Montre les matériels utilisés lors de la manipulation (b) schéma explicatif sur le branchement des éléments utilisé.	30
Figure III.3. Caractéristique (P-V) et (V-I) d'une cellule et six cellules solaire en fonctionnement normale.....	31
Figure III.4. Schéma d'un groupe de cellules PV avec diode by-pass déconnectée.[2].	32

Figure III.5. Caractéristique (I-V) diode déconnectée.	33
Figure III.6. Image explicative le phénomène d'inversion de polarité de diode.	34
Figure III.7. Caractéristique (I-V) diode inverse. Défaut de diode inversé.....	35
Figure III.8. Image explicative le cas de défaut de poussière.	35
Figure III.9. Caractéristique (I-V) des cellules PV lors le défaut poussière.	36
Figure III.10. Image explicative le phénomène d'inversion de polarité de diode.	36
Figure III.11. Image explicative le phénomène d'inversion de polarité de diode	37
Figure III.12. Caractéristique (I-V) des cellules lors défaut connectique. Interprétation et analyse des résultats.....	37
Figure III.13. Comparaison de la réponse fréquentielle en impédance entre une cellule et six cellules.....	38
Figure III.14. Représentent les courbes des cellules en C-C avec la courbe de l'état sain.	39
.Figure III.15. Visualise le graphe de l'état sain et l'état de circuit ouvert.	39
Figure III.16. la différence entre le résultat pratique et le résultat de la simulation à l'état sain.	40
Figure III.17. Les courbes dans le cas d'application de court circuit à différents niveaux de notre chaîne cellule.....	41
Figure III.18. Zoom sur la partie de.....	42
Figure III.19. Zoom sur la partie Cp.....	43
Figure III.20. zoom sur partie de variation R_s	42
Figure III.21. Comparaison entre le défaut de circuit ouvert et l'état sain.....	43
Figure III.22. Représente un zoom sur la partie R_s	43
Figure III.23. une comparaison entre les courbes de défaut de connectique 10 ohm et l'état sain.	44
Figure III.24. Zoom sur la partie de $R_s + R_p$	
Figure III.25. Zoom sur la partie de Cp.....	44
Figure III.26. le zoom sur la partie R_s	45
Figure III.27. une comparaison entre les courbes de défaut de connectique 210 ohm et l'état sain.	46
Figure III.28. zoom sur la partie $R_s + R_p$	46
Figure III.29. zoom sur la partie Cp. ...	46
Figure III.30. zoom sur la partie R_s	47

Liste des Tableau

Tableau I.1. les déférents défaut et leur classement.....	13
Tableau III.1. montre les paramètre a simuler.....	41

Listes des Acronymes et Symboles

PV : Photovoltaïque.
CPV : cellule photovoltaïque.
SI : silicium
I_{ph} : Le photo-courant.
R_{sh} : Résistance shunt de la cellule.
N : Le nombre de niveau de la tension de sortie
P : Puissance
R_s : Résistance série de la cellule
D : Diode
I_d : Courant de diode
I_{Sh} : Courant de la résistance shunt (A)
R_p : Résistance parallèle
V : Tension de cellule photovoltaïque
I : Courant de la cellule photovoltaïque
ICC : Courant de court-circuit
I_s : Courant de source
ISC : Le courant de court-circuit
VOC : La tension de circuit ouvert
V_T : La tension aux bornes du générateur
MPP : Le point de puissance maximale
FF : Facteur de forme
VMPP : Tension au point de puissance maximale (V)
IMMP : Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum (A)
PMMP : Puissance au point de puissance maximale
P_{max} : La puissance maximale
DC : Direct Curent (courant continu (CC)).
GPV : Générateur photovoltaïque
DC/DC Convertisseur (Courant Continue/Courant Continue).
F : La fréquence
MPPT : Point de puissance maximale (maximum power point Tracking)
DC/AC : Convertisseur (Courant Continue/Courant Alternatif).
AC : Alternatif Curent (Courant Alternatif (CA)).
V_{sc} : La tension
R : La résistance de matériau
FRA : Analyse de La réponse en fréquence
R_s : résistance série
R_p : résistance parallèle
C_p : capacité parallèle
n_p : nombre de cellule en parallèle
n_s : nombre de cellule en série
CC : court-circuit
CO : circuit-ouvert

Introduction générale

Introduction Générale

L'énergie photovoltaïque est une solution prometteuse, durable et respectueuse de l'environnement pour répondre à nos besoins croissants en énergie. Elle permet de convertir l'énergie lumineuse en électricité à l'aide de cellules solaires. Au cours des dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance significative en raison de facteurs tels que la baisse des coûts de production et les politiques de soutien. Cela a rendu l'investissement dans l'énergie solaire de plus en plus attractif, offrant un retour sur investissement intéressant.

Cependant, comme tout système industriel, les systèmes photovoltaïques peuvent présenter des défauts et des anomalies pendant leur fonctionnement. Ces problèmes peuvent entraîner une diminution de la performance, voire une panne complète du système, ce qui a un impact direct sur la productivité et les bénéfices potentiels. De plus, les coûts de maintenance nécessaires pour remettre le système en état de fonctionnement normal doivent être pris en compte.

La détection et la localisation des défauts dans les systèmes photovoltaïques sont essentielles pour assurer un fonctionnement fiable et efficace des installations. L'objectif est de développer un système intégré de surveillance et de diagnostic des défauts, fournissant des fonctionnalités avancées. Un tel système permettrait de réduire les coûts de maintenance, d'augmenter la productivité et d'améliorer la disponibilité des installations photovoltaïques. Il offre aux utilisateurs une solution pratique et conviviale pour assurer le bon fonctionnement de leurs installations [1-4].

Les méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques peuvent être classées en deux catégories principales : les méthodes basées sur des modèles et les méthodes sans modèle. Dans notre mémoire, nous nous concentrons sur l'application de la technique d'analyse des réponses en fréquence FRA (frequency response analysis) pour le diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques. Nous nous intéressons spécifiquement aux défauts du côté courant continu (DC) du système PV ainsi qu'aux défaillances de l'onduleur. L'objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique et de permettre une surveillance efficace de l'installation PV en utilisant la FRA [5].

L'objectif de notre mémoire vise à appliquer la technique FRA pour le diagnostic des défauts dans les systèmes PV, en se concentrant sur les défauts du côté DC du système PV ainsi que sur les défaillances. Dans le but d'assurer une surveillance efficace de l'installation PV.

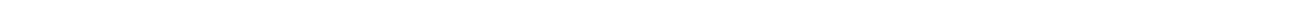
Le travail dans ce mémoire est organisé en trois chapitres, comme suit :

- Le premier chapitre concerne la partie théorique et principe de fonctionnement d'une cellule, module et générateur photovoltaïque et les classifications des défauts qui peuvent se présenter au niveau d'un générateur photovoltaïque et les méthodes différentes de diagnostic plus courantes.
-

- Dans le deuxième chapitre nous focalisons sur l'utilisation de l'analyse de la réponse fréquentielle pour la détection et la localisation des défauts dans les panneaux photovoltaïques. Notre objectif est de développer une technique de diagnostic avancée qui permettra d'assurer la continuité, l'efficacité énergétique, la fiabilité et la durabilité des installations solaires. En exploitant ces deux approches, nous visons à contribuer à l'optimisation des performances des panneaux photovoltaïques et à favoriser une utilisation plus efficace de l'énergie solaire dans notre transition vers un avenir énergétique durable.
- Le troisième chapitre est composé de deux parties. : La première partie concerne l'étude expérimentale pour obtenir les caractéristiques (I-V) et (P-V) des cellules solaires à l'état sain (sans défauts) et en présence de défauts. La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale pour l'amélioration du modèle électrique équivalent à haute fréquence d'une cellule solaire en Silicium saine, et par la suite on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de l'influence de plusieurs défauts sur les paramètres caractéristiques et sur la réponse fréquentielle de la cellule.

Nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I



Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïque et les méthodes de diagnostic

I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque désigne le phénomène physique qui est associé à la conversion directe de la lumière solaire en électricité par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques. C'est un moyen propre et renouvelable de produire de l'électricité, sans émissions de gaz à effet de serre ni dépendance aux combustibles fossiles [6].

Dans ce chapitre, nous invoquerons quelques concepts fondamentaux dans le domaine du PV. Nous commencerons par introduire les cellules solaires et leurs propriétés photovoltaïques. Ensuite, nous examinerons comment l'association de plusieurs cellules en série ou en parallèle forme un générateur photovoltaïque (GPV) avec une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire qui présente un point de puissance maximale. Ensuite, nous aborderons les défauts les plus couramment rencontrés dans les systèmes photovoltaïques et les méthodes de diagnostic associées à chacun d'entre eux [7].

I.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion photoélectrique repose sur les propriétés du rayonnement et des semi-conducteurs. La figure I.1 peut illustrer son principe de fonctionnement. La couche supérieure de la cellule est un semi-conducteur en silicium dopé de type N (excès de charges négatives). Cette couche contient un grand nombre d'électrons libres par rapport à la quantité de matière. La couche inférieure de la cellule est un semi-conducteur en silicium dopé de type P (excès de charges positives). Cette couche contient moins d'électrons libres que le matériau intrinsèque [7].

Lorsque la lumière, sous forme de photons, frappe la cellule solaire, les photons sont absorbés par le matériau. L'énergie des photons est transférée aux électrons du semi-conducteur, créant ainsi des paires électron-trou. Les électrons libres de la couche N sont attirés vers la couche P en raison de la différence de charges électriques. Ce déplacement crée un courant électrique, qui peut être utilisé pour alimenter des dispositifs ou stocké pour une utilisation ultérieure [8].

La figure (I.1) représente Constitution d'une cellule photovoltaïque.

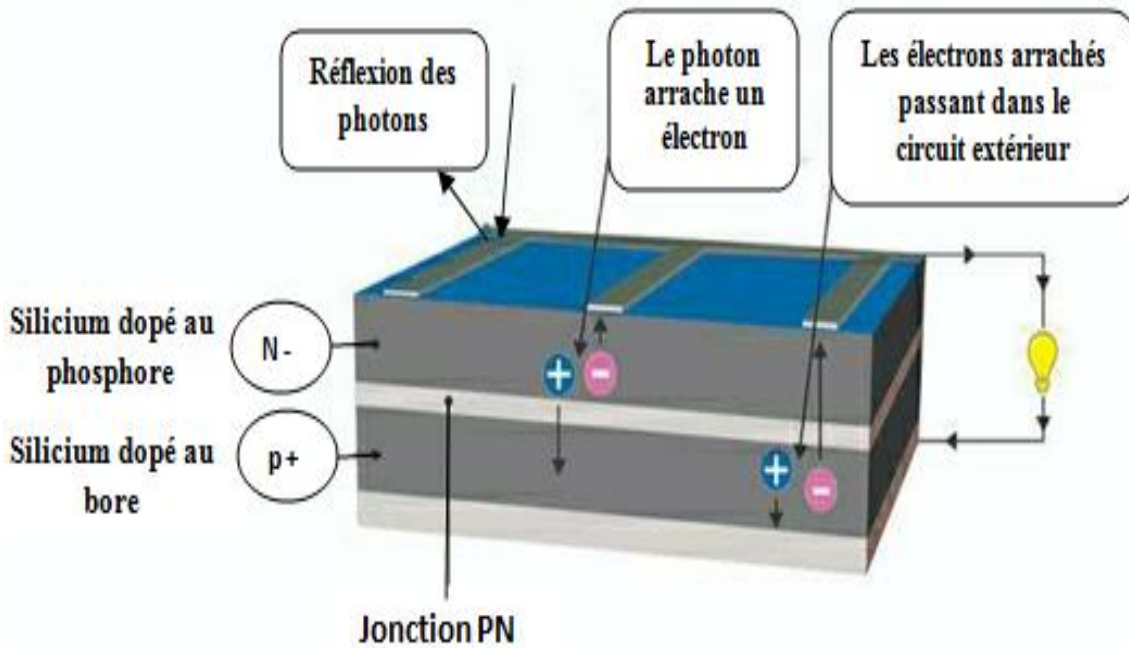


Figure II.1. Constitution d'une cellule photovoltaïque [9].

Lors de la formation de la jonction P-N, les électrons libres de la région n se diffusent vers la couche p et se recombinent avec les trous présents dans la région (P). Ces électrons sont ensuite collectés par des contacts électriques situés à la surface des deux zones et dirigés vers le circuit externe, où ils fournissent de l'énergie électrique sous forme de courant continu. Pour éviter la perte de photons par réflexion à la surface, une couche antireflet est utilisée afin de minimiser les réflexions indésirables [8].

I.3. Classifications des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque, beaucoup sont encore en phase de recherche et développement [9]. La classification de ces cellules présentées en trois générations la première repose sur les wafers (des tranches fine) de silicium cristallin, qui est sciés sur des lingots de silicium pur [10]. La deuxième génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces. Ces technologies qui étaient initialement chères. La Troisième génération repose sur molécules organiques il en existe principalement deux type organiques moléculaires et organiques en polymères [11].

La figure (I.2) représente la différente technologie des cellules PV.

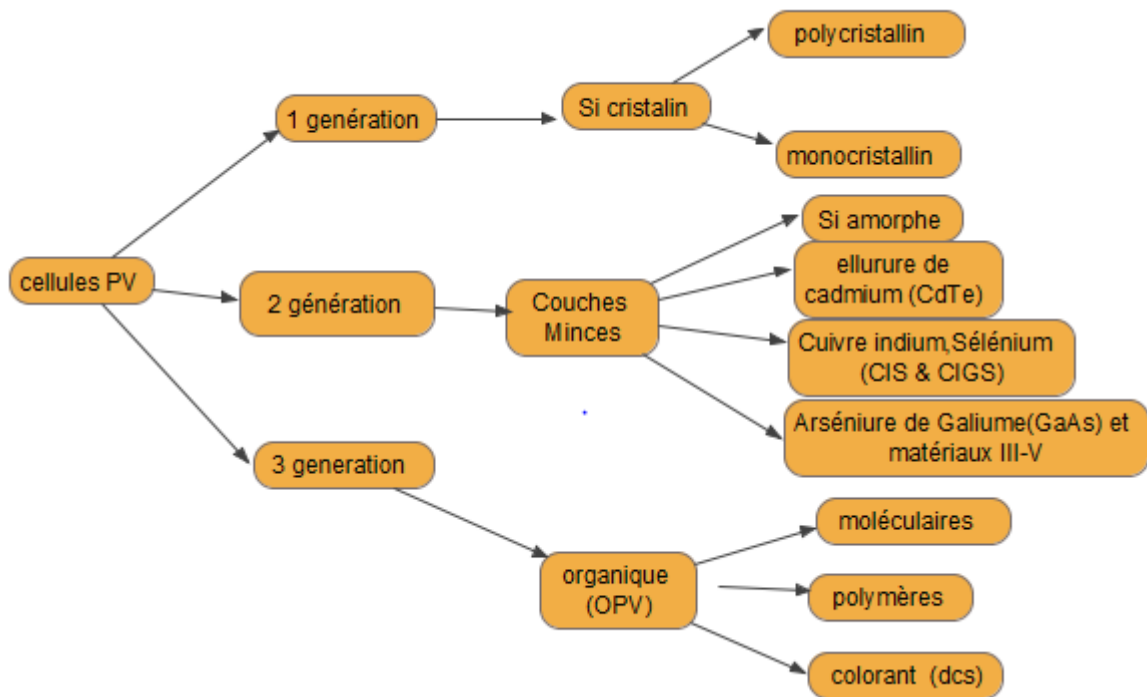


Figure II.2. Différents technologies des cellules photovoltaïques [11].

Au cours des dernières années, les technologies photovoltaïques les plus largement industrialisées et commercialisées ont été celles utilisant le silicium mono ou poly cristallin (représentant plus de 80% de la production mondiale) ainsi que le silicium en couches minces à base de silicium amorphe ou de CIS (Cuivre Indium Sélénium). Ces technologies ont atteint une quantité significative de déploiement à ce jour [11].

I.4. Les autres modules photovoltaïques composites

Il existe d'autres technologies de CPV que la technologie du "SI", mais elles ne sont pas dans la dernière phase de la production, mais elle se situe plus dans le domaine de la recherche. Voici quelques exemples de ces technologies :

Les couches minces (fine) de silicium amorphe ou CIS (cuivre-indium-sélénium) : Cette technologie utilise seulement 1% du "SI" utilisé dans la fabrication des modules cristallins équivalents. Ces cellules sont principalement utilisées dans des applications nécessitant un faible courant. Elles sont également utilisées dans des situations où une forte élévation de la température des modules est prévue, car leur rendement ne diminue pas avec l'augmentation de la chaleur. Cependant, leur rendement est deux fois inférieur à celui du silicium cristallin, ce qui signifie qu'une plus grande surface est nécessaire pour obtenir la même puissance installée. De plus, les modules CIS présentent un risque de toxicité pour l'environnement [11].



Figure II.3. Cellules photovoltaïques en plastique, composites et organique Technologie Flexcell [11].

I.5. Les constituants d'un PV

La première étape dans la fabrication d'un module PV, basée sur l'encapsulation, cette opération vise à regrouper les cellules ou des modules identique en série ou en parallèle afin d'arriver à des tensions et des courants selon le besoin de l'utilisateur [12, 13], serre aussi protéger le PV contre les facteurs extérieurs. Cette protection pour but d'augmenter de la durée de vie des PV plus de 20 ans. En pratique [14], l'encapsulation comprend plusieurs parties :

- La partie mécanique qui est rassemblé les cellules photovoltaïques encapsulées dans de l'EVA.
- un châssis en aluminium.
- une coque arrière en Tedlar
- une plaque de verre côté soleil.
- Une partie électrique permet de connecter le panneau solaire à l'installation. [15].

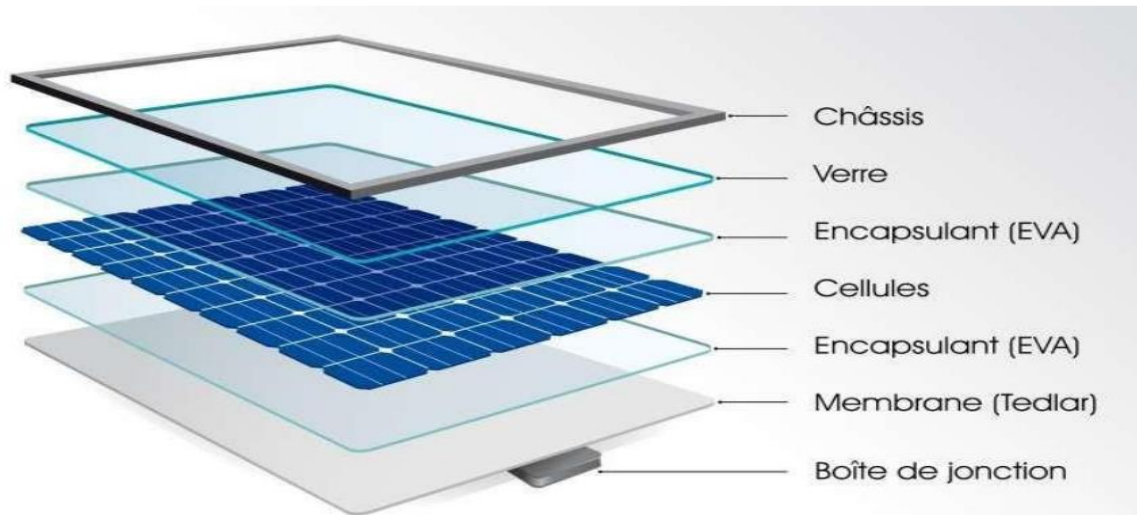


Figure II.4. Composition du panneau solaire [16].

I.1.1. Générateur PV

C'est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. la cellule photovoltaïque est le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en l'énergie électrique. [18]

I.5.1. Diode de by-pass

Les constructeurs de modules implantent généralement entre deux et cinq diodes by-pass par modules (dans le boîtier de connexion ou de jonction du module). Chacune des diodes by-pass est associée à un sous-réseau de cellules du module. Lorsqu'une des cellules du sous -réseau est ombragée, la diode by-pass devient passante, c'est-à-dire que le courant circule dans la diode en isolant ainsi du circuit électrique le sous-réseau de cellule associé [15, 19].

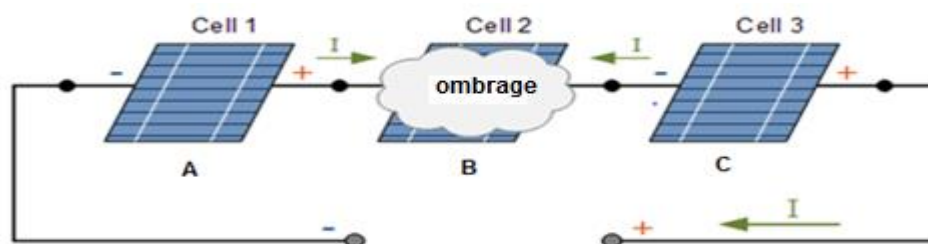


Figure II.5. Système photovoltaïque en : (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass [13].

I.5.2. La boîte de jonction

La boîte de jonction dans un panneau photovoltaïque occupe un rôle d'un connecteur entre un réseau de cellules solaires composé de modules, cellules solaires et d'un dispositif de contrôle de charge solaire. La boîte de jonction du module de cellule solaire il est important dans la composition du module solaire, qui relie principalement l'énergie générée par la cellule solaire avec

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les méthodes de diagnostic

des lignes externes. La boîte de jonction PV est collée avec le panneau arrière des composants par du gel de silice, et les fils sortants dans les composants sont connectés avec les fils internes dans la boîte de jonction, et les fils internes sont connectés avec les câbles externes pour rendre les composants et les câbles externes conductrices [15].

La figure (I.6) représente la boîte de jonction.

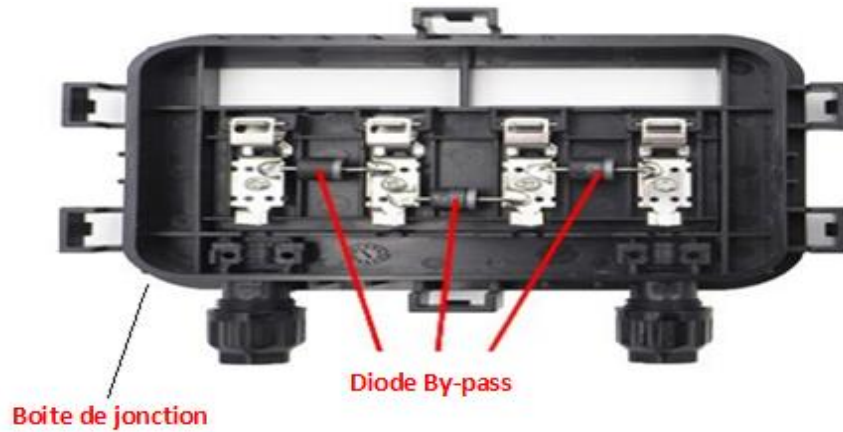


Figure II.6. Boîte de jonction [13].

I.5.3. Module PV

Les cellules individuelles ne possèdent pas une puissance adaptée aux utilisations courantes, donc il est nécessaire de les combiner. De plus, les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à leur environnement, c'est pourquoi elles sont équipées d'une protection mécanique appelée encapsulation. Pour toutes ces raisons, les cellules sont généralement connectées en série dans les modules commerciaux actuels. La mise en série des cellules permet d'augmenter la puissance. Le courant reste constant tandis que la tension est multipliée par le nombre de cellules connectées en série [20].

Les modules photovoltaïques courants sont généralement composés de 36 ou 72 cellules, bien que ce nombre puisse varier en fonction des applications spécifiques. Il existe des modules avec des configurations différentes, tels que 40, 54, 60, voire même 92 cellules en série [16].

I.5.4. 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 [16]. Comme le montre la figure (I.7).

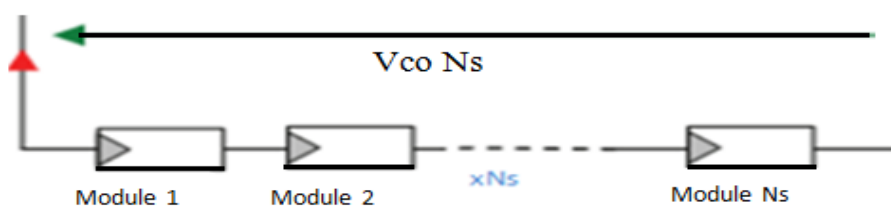


Figure II.7. Mise en série des modules PV dans la chaîne PV [16].

1.5.5. Champ PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire de regrouper les modules en série et en parallèle. Ce groupement forme un champ photovoltaïque. Il existe plusieurs configurations possibles pour interconnecter les modules dans un champ photovoltaïque : Connexion série parallèle simple, connexion Total et connexion pont lié [16]. Comme le montre la figure (I.8).

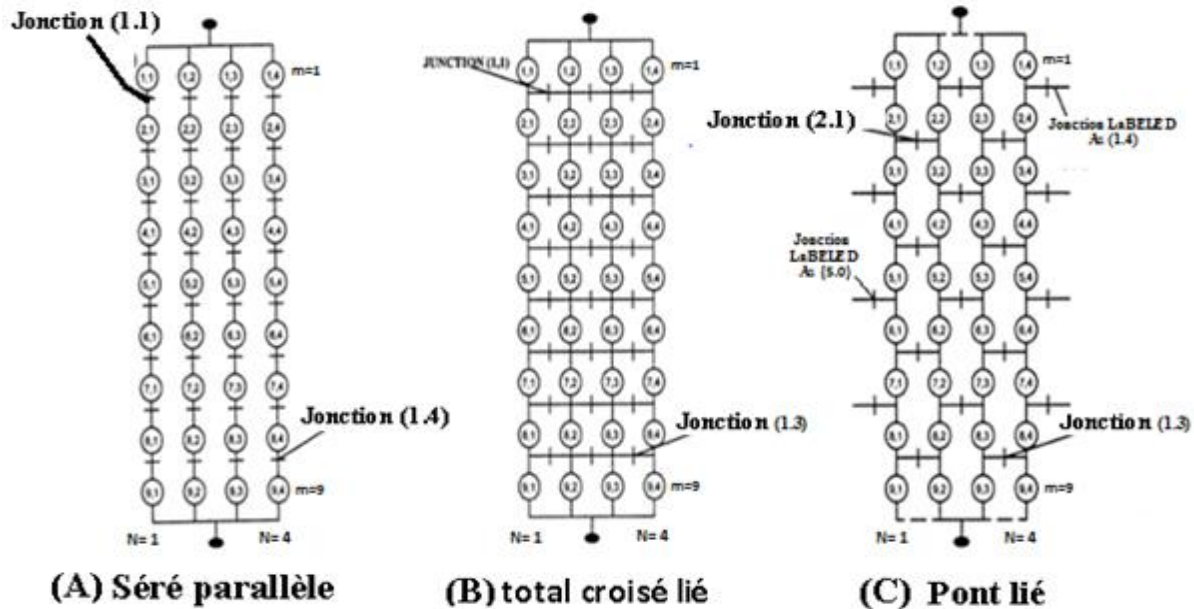


Figure II.8.Montre différentes configurations possibles pour le module [16].

1.6. Classification des défauts de générateur PV

Dans cette partie nous décrivons les différents défauts dans les panneaux photovoltaïques

- **Défaut** : On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique [14]. Ces défaut peuvent apparaître suite à une erreur de fabrication ou bien en raison des conditions climatiques [17].

1.6.1. Définition de quelque notions

Pour déterminer défaut dans un produit ou une installation en peut voir des symptômes de cette anomalie et la détecter et le localiser [21].

- **Symptôme** : C'est le changement de la quantité observée du comportement normal.
- **Détection** : Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.
- **Localisation** : Elle consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut [22].

I.6.2. Types de défauts dans le système photovoltaïque

Les défauts que l'on peut retrouver sur une installation photovoltaïque, surviennent autant lors de sa conception de son installation, que lors de son exploitation. Ils sont alors responsables d'une baisse voir d'un arrêt total de la production photovoltaïque. Les défauts sont classés dans un tableau suivant l'emplacement de leur apparition dans une installation PV (panneaux, connexion, câblage, système de protection) [22].

I.6.3. Types de défauts dans le système photovoltaïque

Tableau (I.1) représente les différents défauts et leur classement [20, 12].

Éléments du générateur PV	Origines de défauts d'anomalies
Générateur PV	<ul style="list-style-type: none"> • Pollution, sable, neige etc. • Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules etc. • pénétration de l'humidité, corrosion des liaisons. • module de performances différentes. • Module arraché ou cassé. • Modules court-circuité. • Modules inversés. • Mauvaise orientation et inclinaison des modules.
Boite de jonction	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture du circuit électrique. • Destruction de la liaison. • Corrosion des connexions.
Câblage et connecteur	<ul style="list-style-type: none"> • Circuit ouvert. • Court-circuit. • Mauvais câblage. • Corrosion des contacts. • Rupture du circuit électrique
Diodes de protection	<ul style="list-style-type: none"> • Inversion de la polarité des diodes au montage, diodes mal connectée. • Absence ou no fonctionnement de diodes

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les méthodes de diagnostic

Onduleur	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation à cause de la chaleur ou défaut d'isolement • Surtension ou onduleur non mis à la terre • Onduleur en choqe (cassé ou tombé) • Problème de connections • Onduleur en surtension
Le système d'acquisition	<ul style="list-style-type: none"> • Coupure de courant ou défaut de paramétrage • Carte électronique mal positionnée

Tableau II.1. Déférents défaut et leur classement.

I.6.4. Type de défaut dans les modules PV

En peut classifier les défauts dans un générateur PV dans l'ordre suivant :

I.6.4.1. Diode de by-pass et la diode anti retour

Défaut dans la diode de By-pass et la diode anti retour il revient généralement à cette cause un disfonctionnement ou détérioration de cette diode, qui a base des semi-conducteurs qui peuvent présenter certaines anomalies qui peuvent affecter leurs performances. Et aussi on peut se référé à ces a anomalie en Court-circuit ou à cause de mouvais connexion qui engendre un disfonctionnement de cette diode ou d'inversement de polarité de ses dernier en peut se schématisiez qu'elle que anomalie dans les figure(I.9)

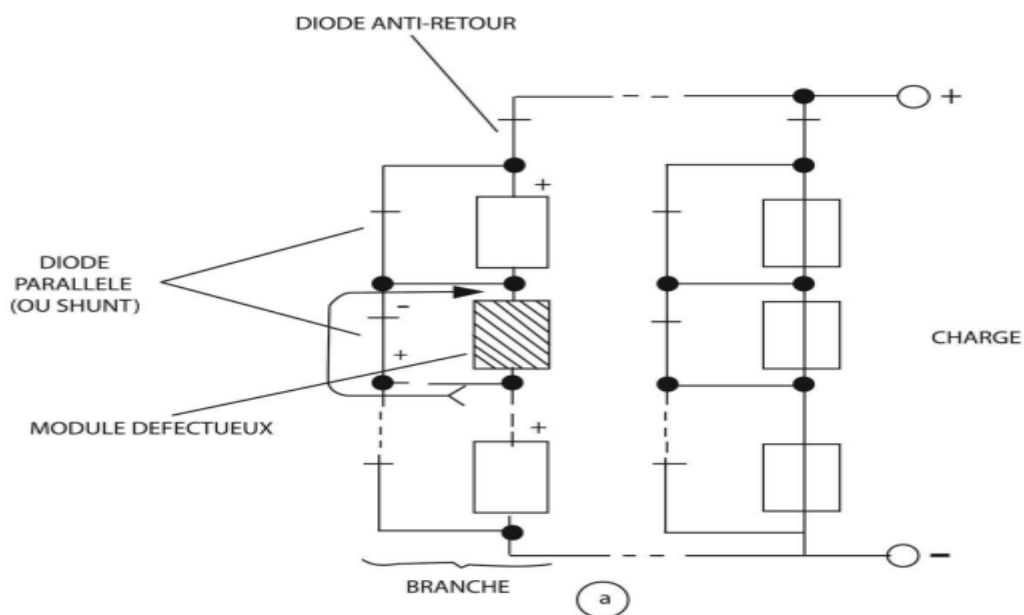


Figure II.9. Montre l'emplacement de la diode by-pass et la diode anti retour [5].

I.6.4.2. Câblage et connecteur

La figure (I.10) représente défaut de connectique.

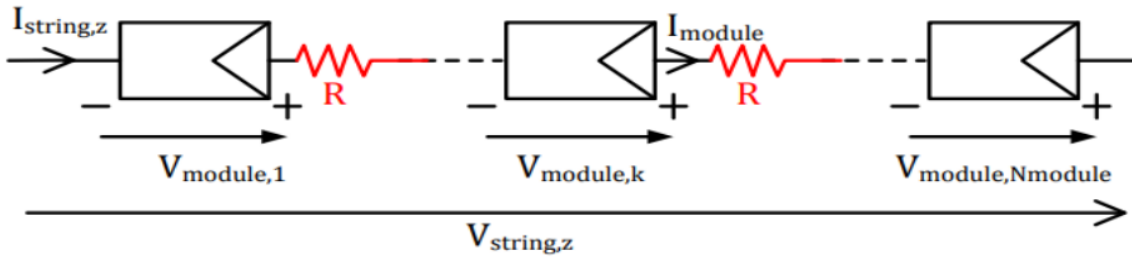


Figure II.10. Défaut de connectique entre les module da PV [22].

I.6.4.3. Ombrage d'un générateur

L'ombrage partiel d'une cellule va forcer cette dernière à travailler dans le quadrant Q3 (voir figure I.11.), c'est-à-dire d'inverser la polarité de la tension de l'élément et de l'élever au seuil tension inverse de la jonction ($U_C \approx -15 \text{ V}$ à -25 V). La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds. Les points chauds peuvent endommager définitivement le module PV.

La figure (A) en dessous représente l'effet de l'ombrage applique par une cheminai sur un panneau solaire et la figure (B) illustre les quadrants de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

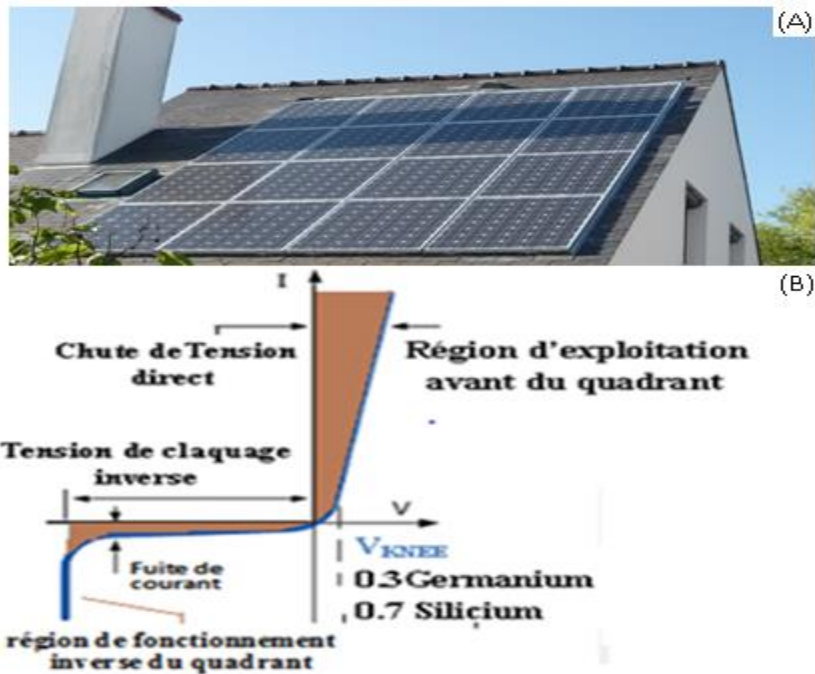


Figure II.11. (A) Cheminai applique un ombrage partielle sur un panneau solaire (B) les quadrants de fonctionnement d'une cellule solaire en SI [14].

I.7. Diagnostique

Pour attendre l'objectif d'une durée de vie longue et efficace plus de vingt ans sans pertes de production, la détection et le diagnostic des pannes est une phase primordial qui consistent à identifier la cause des pannes à l'aide d'un ensemble d'observations basée sur l'analyse d'informations telles que le modèle de référence et/ou l'analyse de données et de signaux. La figure (I.12) montre le processus qu'il est nécessaire de suivre pour diagnostiquer les défauts.

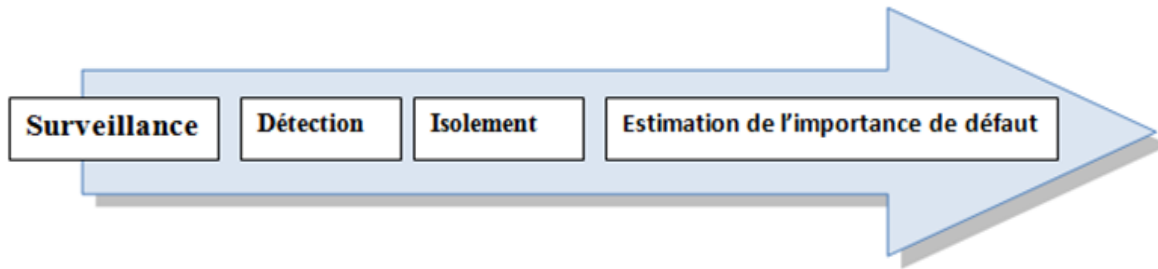


Figure II.12. Processus de diagnostic de défauts

I.7.1. Les étapes de détection et diagnostique des pannes

- La surveillance : première étape, consiste de surveillé le système offre la possibilité De rassemblé des informations pour préparer une plateforme solide pour la deuxième étape
- La détection : c'est l'étape secondaire nécessaire pour déterminer la cause principale de la défaillance, suite à une comparaison entre le comportement observé dans la première étape et une référence saine.
- L'isolement : c'est la troisième étape consiste à classer le défaut selon l'ampleur de sa criticité, et selon la dynamique du système dans lequel la défaillance est présentée, par la suite, une méthode de diagnostic de défaut la plus efficace sera choisie .
- La dernière étape consiste à reconnaître plus finement le défaut et les causes qui ont engendré la défaillance constatée. On trouve dans les travaux antérieur une vaste variété des méthodes de diagnostic électrique et non électrique, destructives ou non destructives, néanmoins, elles sont classifiées en deux grande catégories selon le type de connaissance utilisé pour détecter le défaut [2]. La figure I.13 donne un panorama général des principales méthodes de diagnostic.

I.7.2. Méthodes de diagnostic

La figure (I.13) représente les différentes méthodes de diagnostic.

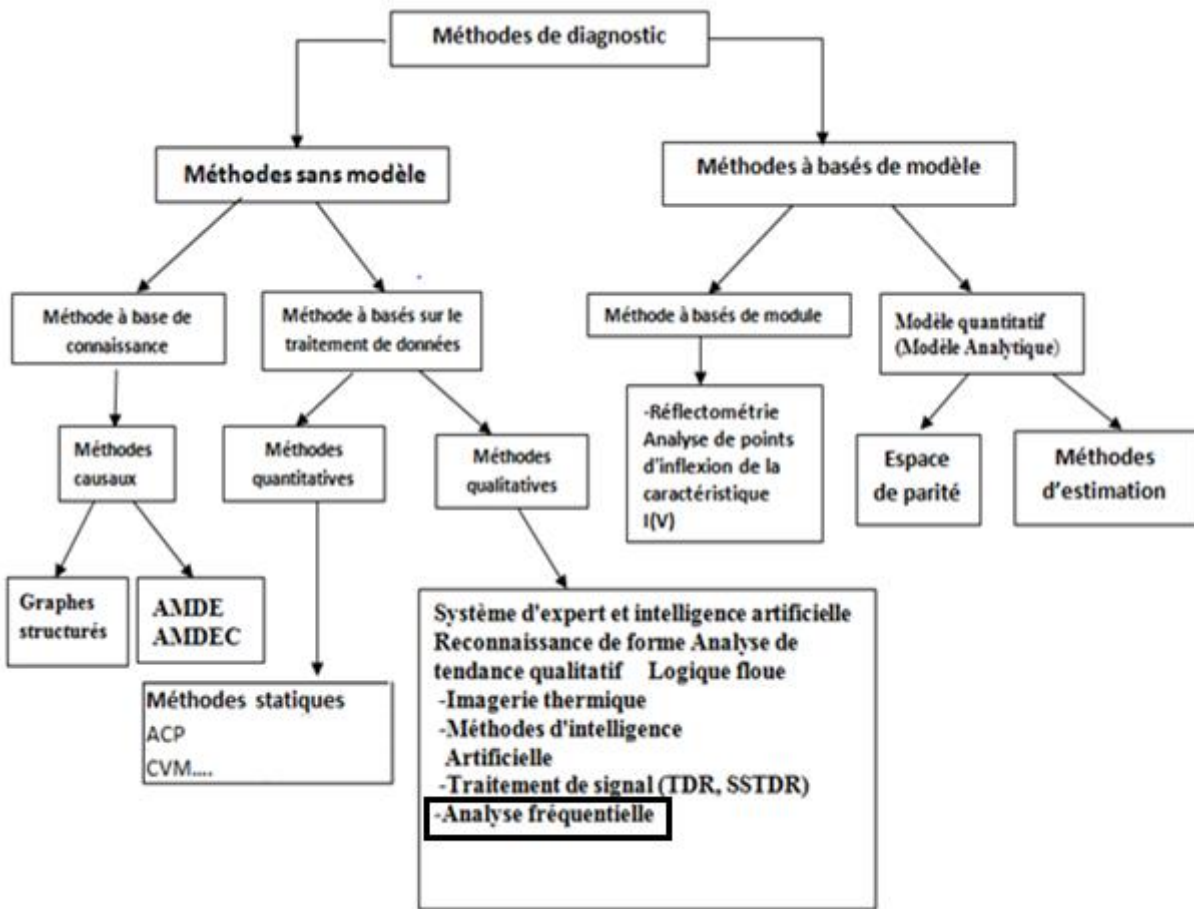


Figure II.13. Différentes méthodes de diagnostic [1].

Deux stratégies principales peuvent être identifiées pour le diagnostic des défauts. La première stratégie est le diagnostic basé sur le modèle, qui utilise un modèle dynamique précis du système et compare le comportement réel du système avec le comportement attendu selon le modèle, qu'il soit qualitatif ou quantitatif. Toute différence entre les deux indique la présence d'une défaillance, comme il est illustré dans le schéma de la figure (I.14).

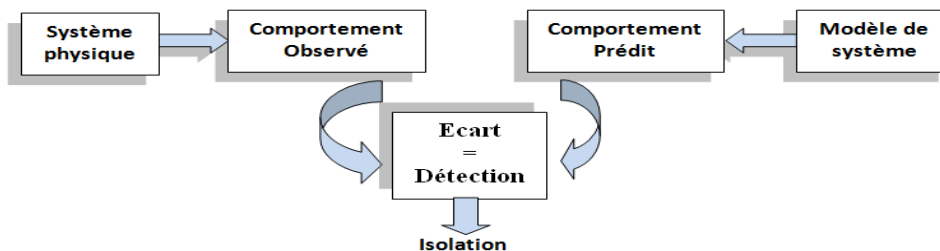


Figure II.14. Principe des méthodes de diagnostic avec modèles [3].

I.7.3. Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs

Ces méthodes sont basées sur l'estimation d'états. Un défaut est détecté si on trouve un écart entre ces variables de modèle, de système dépasse un certain seuil. Un résidu est généré à ce stade

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les méthodes de diagnostic

et comparé à toutes les signatures de défaut connues pour isoler et identifier le défaut. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic [3]. On cite quelle que une :

- 1) La méthode d'espace de parité : Repose sur la vérification de la cohérence (parité) des modèles du procédé avec les mesures issues de capteurs et des entrées connues (consignes, signal de commande, etc...).
- 2) La méthode à base d'observateurs : Cette méthode se base sur la reconstruction de la sortie du processus à l'aide d'observateurs, de la comparer avec la sortie mesurée, puis à utiliser l'écart entre ces deux fonctions.
- 3) La méthode d'estimation paramétrique : Suppose l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système. Donc son principe repose sur l'identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel pour détecter l'apparition de défaillances dans le système [3, 4].

I.7.3.1. Méthode à base de modèle qualitatif

Les modèles qualitatifs permettent de tirer le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique, peuvent être classifiées selon le niveau d'abstraction considéré du système à diagnostiquer [16, 3].

I.7.3.2. Méthode électrique

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

- Le courant débité par le champ PV.
- La tension aux bornes du champ PV.

La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du champ PV, il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires qui sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques. Ces données nécessitent un capteur spécifique (sonde de température et cellule de référence). Il convient, dans le cas où ces grandeurs sont nécessaires, de les traiter à l'aide d'un automate spécifique. Cet automate est relié à l'onduleur et centralise la totalité des données afin de les enregistrer et/ou de les envoyer sur un serveur distant [18].

I.7.4. Méthode de réflectométrie

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

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les méthodes de diagnostic

électrique de câbles et de lignes. Elle fournit des informations pour la détection, la localisation et la caractérisation de défauts [19].

La figure (I.15) représente principe de la réflectométrie.

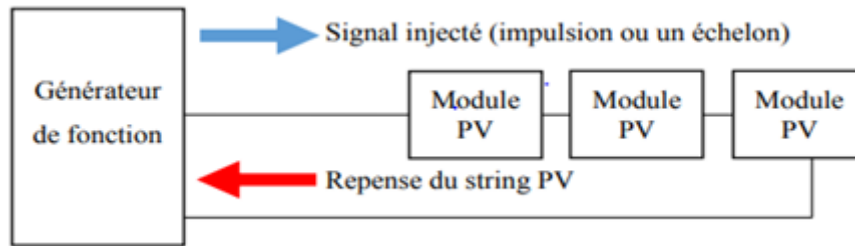


Figure II.15. Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV [18, 20].

I.7.5. Méthodes sans modèles

Dans le domaine industriel, on se trouve face à des situations difficiles à obtenir un modèle du système. En effet, seules les méthodes de surveillance sans modèles sont opérationnelles pour ce type d'applications industrielles. Ces méthodes de diagnostic se basent sur des informations issues d'une expérience préalable, sur des règles heuristiques ou encore sur des exemples de résolution. Les méthodes de traitement des méthodes sans modèles peuvent être divisées en plusieurs types, en site seulement les plus répandues dans le domaine de diagnostic [20].

I.7.6. Méthodes qualitatives

Cette méthode vise sur l'exploitation d'une base de connaissance qui nécessite l'existence d'un large éventail des données historiques correspondant aux divers modes de fonctionnement de l'installation. Ces méthodes comprennent les méthodes à base de reconnaissance des formes. En fait une simple présentation sur les diverses méthodes [20].

I.7.6.1. Méthode d'infrarouge

Cette méthode se base sur le principe selon lequel tous les matériaux émettent un rayonnement infrarouge dans une plage de longueurs d'onde dépendant de leur température. En analysant la distribution de température au niveau d'un module photovoltaïque, il est possible de localiser d'éventuelles anomalies si elles se produisent [2, 15].

La figure (I.16) montre un exemple de détection des défauts par thermographie infrarouge.

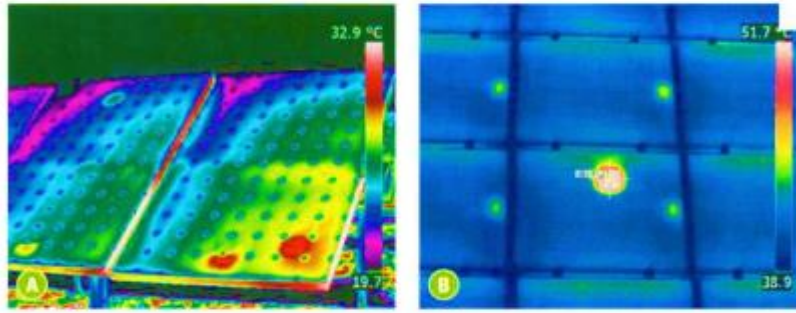


Figure II.16. Exemple de détection des défauts par thermographie infrarouge [20, 23].

I.7.6.2. Méthode de traitement de signal

Cette méthode de diagnostic elle sert à étudier un défaut ou même un phénomène en fonction du temps, de l'espace, d'une fréquence ou autre. Se basant sur la transformation de Fourier et la transformation en Z, qui sont des techniques qui permettent de faire le point sur les informations acquises (qui sont des signaux) à propos du comportement de l'élément qu'on doit le surveiller au cours de son fonctionnement ou même son dysfonctionnement ces informations [2].

I.7.6.3. Méthode d'analyse FRA

L'analyse fréquentielle est largement utilisée dans de nombreux domaines, tels que le traitement du signal audio, la compression de données, l'analyse de vibrations, la reconnaissance de formes, etc. Elle permet de mieux comprendre les caractéristiques fréquentielles des signaux et d'extraire des informations précieuses pour diverses applications [5].

La méthode d'analyse FRA implique généralement l'application d'un signal sinusoïdal à différentes fréquences au système, et la mesure de la réponse du système en termes de gain et de phase. Ces mesures sont ensuite utilisées pour construire des diagrammes de Bode, des courbes de Nyquist ou d'autres représentations graphiques, qui permettent d'analyser le comportement du système sur une large gamme de fréquence [5].

Conclusion

Ce chapitre est consacré à fournir une idée générale sur le concept de l'énergie solaire photovoltaïque, ils mettent l'accent sur la structure des cellules solaires, leurs caractéristiques et leur principe de fonctionnement. Il aborde également les différents types de technologies utilisées et discutons des défauts qui peuvent survenir dans une installation photovoltaïque, car ils sont essentiels pour comprendre les relations entre les différents éléments constitutifs. Il examine aussi les relations et les causes des multiples défauts, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine, dans le domaine des installations photovoltaïques. De plus, il discute les méthodes de diagnostic utilisées après des interventions sur les générateurs photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, notre travail consiste à faire le point sur la modélisation des cellules solaires à base de silicium (SI), en passant du modèle statique au modèle dynamique.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les méthodes de diagnostic

L'objectif est d'extraire les paramètres de la cellule pour mieux comprendre son comportement à haute fréquence en utilisant la méthode de l'analyse de réponse en fréquence (FRA).

CHAPITRE II

II. Chapitre : Étude comportementale d'une cellule solaire avec la technique FRA

II.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous avons évoqué le modèle statique et le modèle dynamique et le passage de modèle à un autre afin d'explorer les possibles défauts dans les cellules solaires, et on a aussi abordé la technique FRA, son principe de fonctionnement et son application dans la mesure des paramètres de l'impédance dynamique. Cette mesure est ensuite utilisée pour détecter les défauts dans les modules photovoltaïques en analysant la réponse en fréquence de leur impédance [1].

II.2. Modèles équivalents

Les cellules photovoltaïques peuvent être décrites à l'aide de modèles dynamiques, dont les paramètres dépendent des propriétés spécifiques des cellules et des conditions de fonctionnement dans lesquelles elles se trouvent [24, 25]. Ces modèles sont généralement composés de combinaisons de composants résistifs et capacitifs, dont les valeurs des paramètres sont liées à des phénomènes physiques spécifiques. Ainsi, l'utilisation de ces modèles offre un intérêt particulier pour la caractérisation des cellules photovoltaïques.

II.3. Modèle statique et dynamique d'une cellule solaire

II.3.1. Modèle statique

L'étude de l'influence des différents paramètres sur le fonctionnement des cellules solaires permet de remédier aux problèmes liés à une mauvaise installation photovoltaïque tels que le faible rendement, le coût élevé de la production d'électricité et l'encombrement de l'espace. En comprenant l'impact de chaque paramètre sur la caractéristique I-V du panneau solaire, il devient possible d'améliorer le rendement en utilisant des matériaux de cellules solaires plus performants et en réduisant les pertes dues aux défauts lors du fonctionnement [26].

Le modèle équivalent statique d'une cellule photovoltaïque, illustré dans la Figure II.1, se compose d'un générateur de courant I_{ph} connecté en parallèle avec une diode, ainsi que d'une résistance parallèle R_{sh} et d'une résistance série R_s .

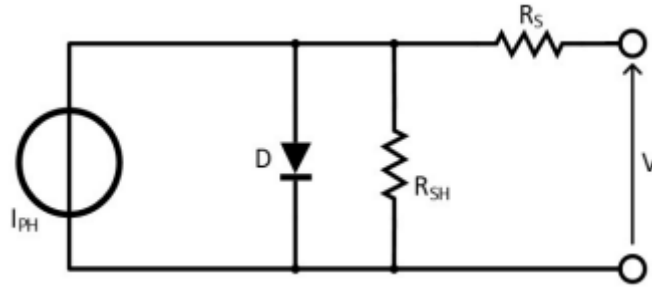


Figure II.1. Modèle équivalent statique d'une cellule photovoltaïque [27].

À partir du modèle statique d'un panneau solaire, deux caractéristiques sont obtenues : la caractéristique courant-tension (V-I) et la caractéristique tension-puissance (V-P), comme illustré dans la Figure (II.2). À partir de la caractéristique V-I, plusieurs paramètres électriques peuvent être déterminés, notamment :

- La tension à vide (V_{oc}) qui correspond à la tension maximale produite par le panneau solaire lorsqu'aucun courant ne circule à travers lui.
- Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui représente le courant maximal que le panneau solaire peut fournir lorsque la tension est nulle.
- La tension maximale (V_{max}), le courant maximal (I_{max}) et la puissance maximale (P_{max}) qui correspondent aux valeurs de tension, courant et puissance lorsque le panneau solaire est à son point de fonctionnement optimal pour maximiser la puissance de sortie.
- Le facteur de puissance qui indique l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en électricité.
- La résistance série (R_s) qui est calculée à partir de la pente de la partie linéaire de la caractéristique V-I près de la tension à vide (V_{oc}).
- La résistance shunt (R_{sh}) qui est calculée à partir de la pente de la partie linéaire de la caractéristique V-I près du courant de court-circuit (I_{cc})

En utilisant les lois de Kirchhoff, on peut déduire l'équation qui caractérise la variation du courant en fonction de la tension

$$I = I_{ph} - I_D - I_R \quad (\text{II.1})$$

$$I = I_{ph} - I_0 - \left\{ \exp\left(\frac{q(v + I_{RS})}{nkT}\right) - 1 \right\} - \frac{(v + I_{RS})}{R_{Sh}} \quad (\text{II.2})$$

La figure (II.2) représente les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une cellule à état saine.

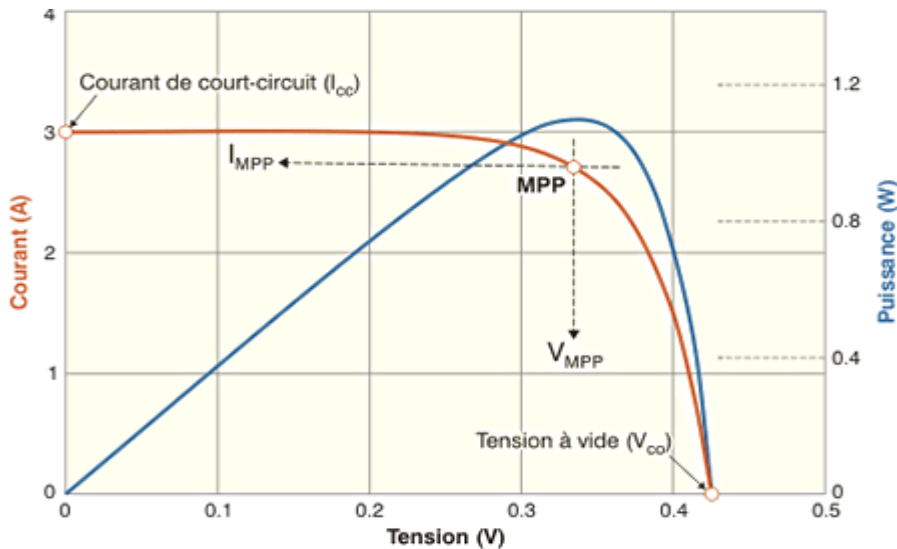


Figure II.2. Caractéristiques I-V d'une cellule solaire en fonctionnement normal [28].

La courbe courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque à un certain niveau d'éclairement est déterminée par plusieurs paramètres clés : la tension à vide (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{sc}) et le point de puissance maximale (MPP) qui correspond aux valeurs optimales de tension (V_{opt}) et de courant (I_{opt}). Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les performances électriques d'une cellule solaire [28].

À partir de ce modèle statique on peut dériver le modèle dynamique équivalent, tel qu'illustré dans la Figure (II.3). Une version simplifiée de ce modèle est présentée dans la Figure (II.4).

II.3.2. Modèle dynamique

La Figure (II.3) présente le modèle dynamique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque. Pour obtenir le circuit équivalent en courant alternatif (AC) d'une cellule solaire, on remplace la diode du circuit en courant continu (DC) par les éléments suivants en parallèle : La capacité de diffusion (C_d), la capacité de transition (C_t), et la résistance dynamique (R_d). De plus, le modèle comprend la résistance shunt (R_{sh}) en parallèle et la résistance série (R_s) [29, 30, 1].

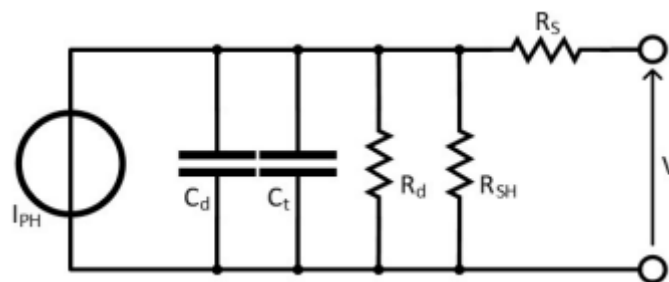


Figure II.3. Modèle équivalent dynamique d'une cellule photovoltaïque [27].

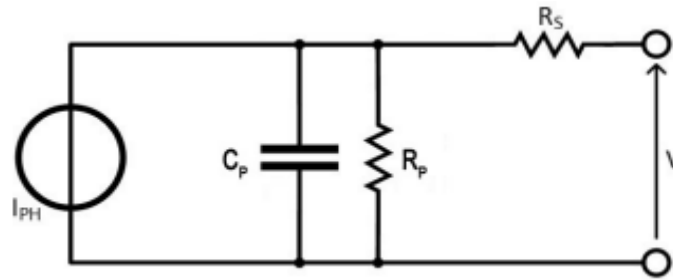


Figure II.4. Schéma simplifiée du modèle dynamique équivalent [27].

La capacité des modules solaires dépend de plusieurs facteurs tels que la technologie utilisée et l'intensité lumineuse. Elle est fortement influencée par la capacité de diffusion, qui est liée à la durée de vie des porteurs minoritaires [1]. La capacité d'une cellule solaire photovoltaïque résulte de trois contributions principales :

- La capacité de jonction, qui représente la charge accumulée dans la zone de déplétion de la jonction.
- La capacité de diffusion, qui correspond à la charge des porteurs minoritaires présents dans les régions dépourvues de champ électrique au sein de la jonction.
- La capacité de transition des charges, qui peut être attribuée à la présence de défauts dans la cellule solaire

II.3.3. L'impédance dynamique de la cellule solaire

L'impédance complexe est un paramètre essentiel pour caractériser les circuits et les composants électriques et électroniques. Il existe différentes méthodes permettant de mesurer l'impédance complexe, telles que la méthode I-V, la méthode du pont, la méthode de l'analyse de réseau, etc. Lorsqu'on s'intéresse à la réponse en fréquence de l'impédance complexe, c'est-à-dire aux valeurs de l'impédance complexe dans une plage de fréquences donnée, le dispositif testé, comme une cellule solaire, doit être soumis à un signal sinusoïdal d'amplitude fixe et de fréquence variable [1].

L'impédance dynamique équivalente d'une cellule solaire dans des conditions d'obscurité, soumise à une tension sinusoïdale et à une fréquence de signal ω , peut être représentée par l'équation (II.3) [1, 31 - 33].

$$Z(V,T,\omega) = R(V,T,\omega) + jX(V,T,\omega) \tag{II.3}$$

$$= \left[R_s + \frac{\left[\{R_{sh} + R_d(V,T)\} R_{sh} R_d(V,T) \right]}{\left[\omega R_{sh} R_d(V,T) \{C_d(V,T,\omega) + C_T(V,T)\} \right]^2 + \left[R_{sh} + R_d(V,T) \right]^2} \right]$$

$$-j \left[\frac{\omega \{R_{sh} R_d(V,T)\}^2 \{C_d(V,T,\omega) + C_t(V,T)\}}{\omega R_{sh} R_d(V,T) \{C_d(V,T,\omega) + C_t(V,T)\}^2 + [R_{sh} + R_d(V,T)]^2} \right] \quad (II.3)$$

L'équation (II.3) peut être réécrite en utilisant le modèle équivalent simplifié du circuit. Dans ce modèle, la capacité parallèle équivalente (C_p) est définie comme la combinaison en parallèle de C_d et C_t , et la résistance parallèle équivalente (R_p) est définie comme la combinaison en parallèle de R_{sh} et R_d . Cela permet de simplifier l'expression de l'impédance complexe. Ainsi, en utilisant ces équivalences, on peut réécrire l'équation de l'impédance complexe de manière plus concise.

$$Z(T,V,\omega) = \left[R_s + \frac{R_p}{(\omega R_p C_p)^2} \right] \left[\frac{\omega R_p^2 C_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] \quad II.4$$

L'utilisation de la FRA d'impédance permet d'obtenir des informations sur l'état interne de la cellule solaire en analysant de nouveaux paramètres tels que les capacités de diffusion et de transmission. Le rapport entre ces deux capacités varie selon la polarité de la tension appliquée [34]. Cette approche permet ainsi d'obtenir des informations détaillées sur le comportement de la cellule solaire [1].

II.4. Principe de la méthode de détermination des paramètres HF de la cellule solaire en Si

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour déterminer les paramètres d'une cellule solaire [35]. La première technique utilise le diagramme de Nyquist, qui est appliqué à la cellule solaire dans l'obscurité. Sur ce diagramme, on peut observer une forme presque semi-circulaire, ce qui suggère l'utilisation d'un modèle simple de circuit parallèle RC pour extraire les paramètres tels que la capacité parallèle, la résistance parallèle et la résistance série à partir du tracé de l'impédance complexe.

La seconde technique est illustrée par le diagramme de Bode, qui est également appliqué à la cellule solaire dans l'obscurité. Cette technique permet d'analyser la réponse en fréquence de la cellule et d'obtenir des informations sur ses paramètres dynamiques. Le diagramme de Bode peut fournir des indications sur la capacité, la résistance et d'autres caractéristiques de la cellule solaire.

En résumé, ces techniques, à savoir le diagramme de Nyquist et le diagramme de Bode, permettent d'évaluer les paramètres d'une cellule solaire en se basant sur des mesures

CHAPITRE II : Étude comportementale d'une cellule solaire avec la FRA

réalisées dans l'obscurité. Elles offrent une méthode pratique pour déterminer la capacité, la résistance et d'autres paramètres importants de la cellule solaire.

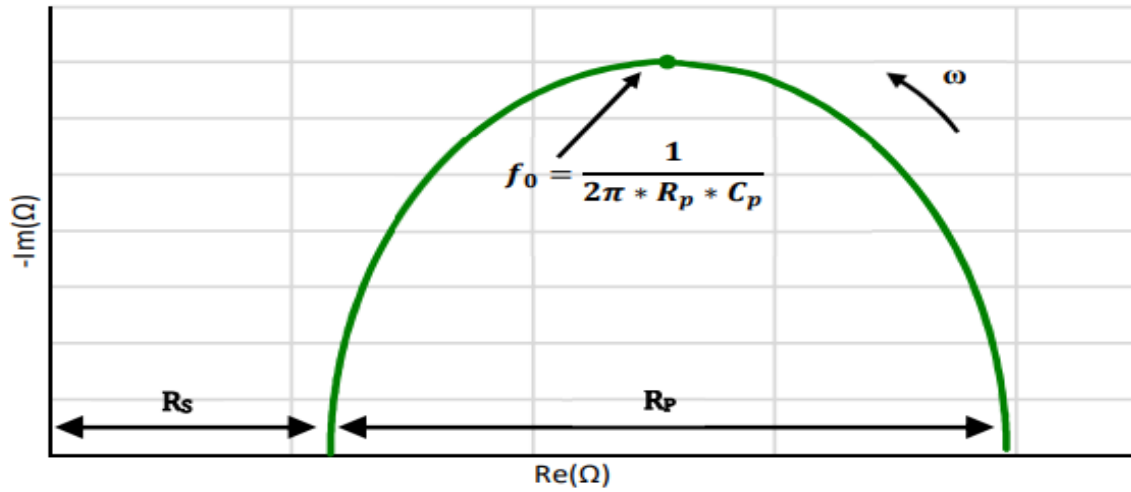
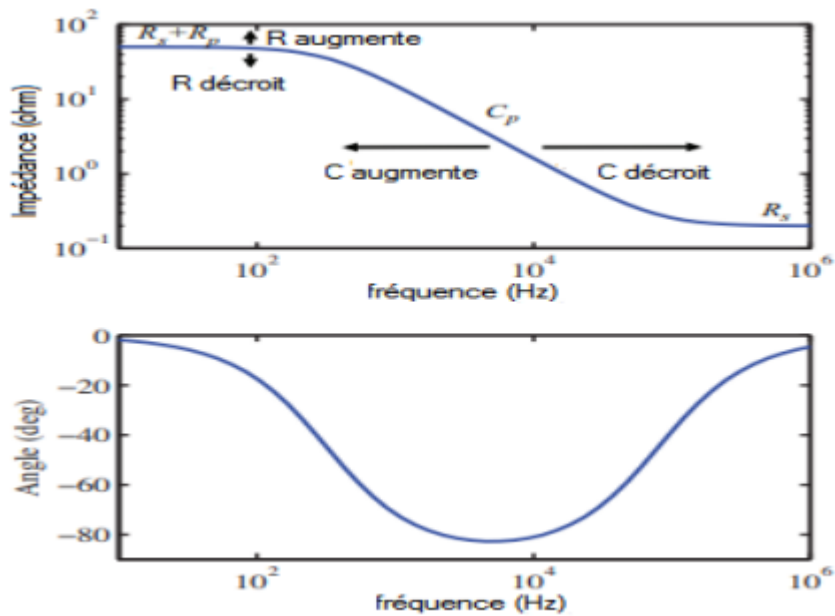


Figure II.5. Diagramme d'impédance de la cellule solaire avec les spectres de Nyquist [23].

La deuxième méthode est illustrée dans la figure (II.6), qui représente le diagramme de Bode



appliqué à une cellule à la cellule dans l'obscurité.

Figure II.6. Diagramme de Bode illustre le changement des paramètres d'une cellule [1].

II.5. Méthode de l'analyse de la réponse fréquentielle FRA

Existe de nombreuses techniques de diagnostic des défauts qui sont utilisées pour détecter les défaillances dans les installations photovoltaïques. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est une méthode particulièrement sensible aux variations électriques qui peuvent survenir pendant la fabrication, le transport, l'installation, la maintenance ou l'exploitation des dispositifs. En conséquence, la FRA est considérée comme l'une des méthodes les plus puissantes pour évaluer l'état des dispositifs électriques. Elle permet de détecter les éventuels problèmes et de fournir des informations précieuses sur la santé et les performances des installations photovoltaïques. Grâce à l'analyse de la réponse en fréquence, il est possible d'identifier et de localiser les défauts, d'évaluer l'impact de ceux-ci sur les performances du système, et d'orienter les actions de maintenance et de réparation de manière ciblée [37, 1].

II.5.1. Principe de la méthode FRA

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est une méthode puissante pour évaluer l'état des transformateurs et des moteurs électriques. Elle a été introduite pour la première fois en 1978 par Dick et Erven [36]. Cette technique de test non destructif peut être utilisée de manière autonome pour détecter les défauts ou en complément d'autres tests afin de confirmer les résultats ou de localiser les dommages détectés [1].

La FRA repose sur la mesure de la réponse d'un dispositif sur une large gamme de fréquences. Ces réponses fournissent des informations de diagnostic sous forme d'une fonction de transfert qui est liée à la structure du réseau RLC du dispositif testé. Le réseau RLC représente la géométrie et la construction de l'échantillon testé [37].

L'analyse de la réponse en fréquence est un test de diagnostic comparatif qui compare la réponse réelle d'un dispositif, également appelée "empreinte" ou "signature", avec une

CHAPITRE II : Étude comportementale d'une cellule solaire avec la FRA

réponse de référence mesurée lorsque le dispositif est en bon état. Grâce à sa grande sensibilité, la FRA permet de détecter des défauts que d'autres techniques d'évaluation de l'état ne peuvent pas détecter, et elle peut révéler les changements dans les caractéristiques et permettre le diagnostic des défauts [1].

Ces dernières décennies, l'analyse de la réponse en fréquence a attiré beaucoup d'attention, en particulier en raison du développement d'équipements de mesure précis qui permettent une analyse précise de la FRA pour la détection des défauts. Pour effectuer une mesure FRA, un signal est injecté dans le dispositif à tester, tel qu'une tension sinusoïdale sur une large gamme de fréquences, un signal impulsionnel à faible tension avec une fréquence suffisante, ou un échelon de tension. Ensuite, le signal de sortie est mesuré et comparé au signal d'entrée pour obtenir une réponse en fréquence qui peut être comparée aux données de référence [37]. La comparaison se fait sur les grandeurs d'impédance et de phase, et toute anomalie observée sur ces deux caractéristiques indique la présence d'un défaut dans le dispositif testé [1].

La figure (II.7) illustre le principe de mesure de la FRA sur un dispositif électrique. Les tensions et courants aux bornes de l'objet testé sont mesurés et transformés dans le domaine fréquentiel, en considérant uniquement la composante de fréquence d'excitation pour le traitement ultérieur des données. Cela permet d'obtenir les valeurs mesurées de la tension d'excitation et de la réponse en courant correspondante pour l'objet testé. En calculant le rapport entre la tension d'excitation et la réponse en courant pour chaque fréquence analysée, on peut obtenir une caractéristique d'impédance [1].

Le schéma de la figure II.7 explique le principe e la méthode FRA

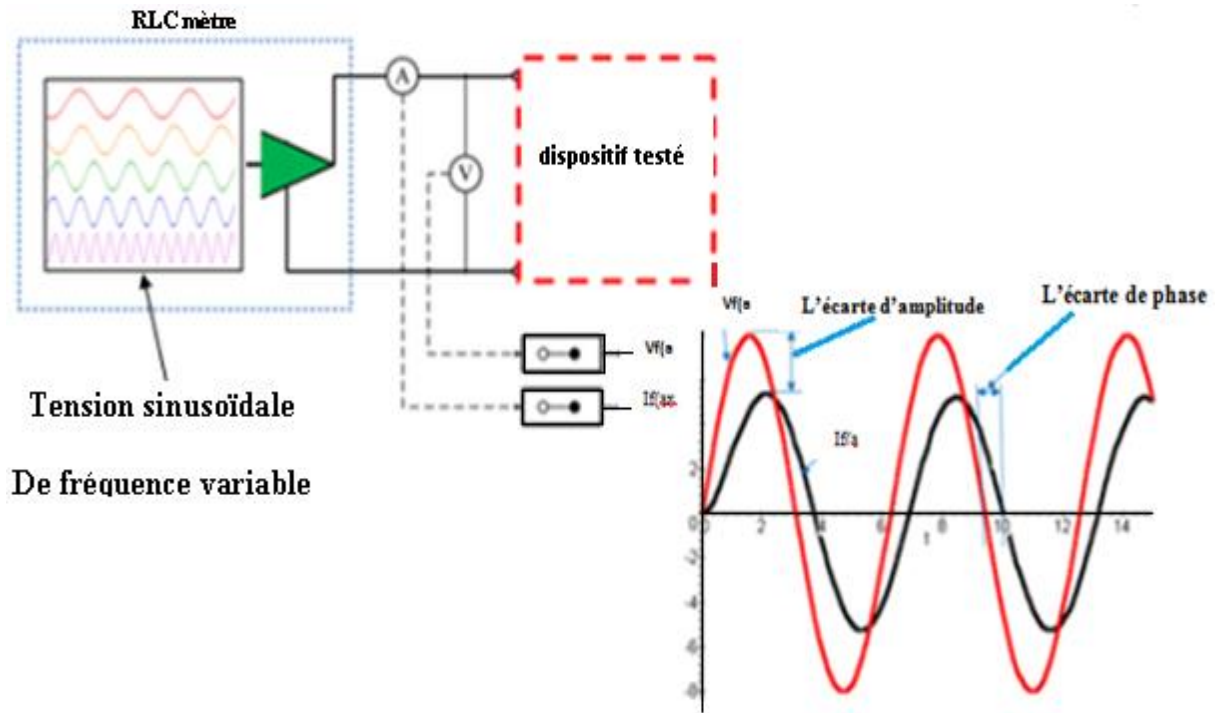


Figure II.7. Principe de la technique de l'analyse de la réponse fréquentielle [1].

Conclusion

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude du modèle statique et du modèle dynamique d'une cellule solaire en silicium, en mettant l'accent sur l'utilisation de la technique (FRA). Cette technique permet d'analyser les mécanismes complexes qui se produisent aux interfaces de la cellule solaire, afin de détecter les anomalies et les défauts d'un point de vue électrique.

Ces données ne suffisent pas, il est essentiel de comprendre en profondeur les phénomènes physiques et leur expression en termes d'impédance sur l'ensemble de la gamme de fréquences. La FRA offre la possibilité d'explorer les capacités d'investigation de la cellule solaire en silicium à un niveau local. Les diagrammes de Bode et de Nyquist peuvent présenter des caractéristiques spécifiques, telles que la partie imaginaire de la chute ohmique, ce qui rend leur interprétation plus complexe. La prochaine section du chapitre décrira l'approche.

CHAPITRE III

III. Chapitre 3: Étude expérimentale des défauts dans un système PV.

III.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre on a passé à l'objectif principal visé par ce mémoire, qui consiste à réaliser une étude expérimentale en laboratoire qui est pour but d'appliquer des différents défauts sur un groupe des cellules photovoltaïques (PV). Pour cela on a divisé ce travail en deux parties.

La première partie est consacrée à faire une expérience sur les différents défauts sur une et un groupe de cellules mise en série qui peuvent survenir lors du fonctionnement. (Court-circuit, ombra, poussière, inversion de diode et déconnexion de diode...) afin d'extraire la caractéristique (I-V) et (P-V). Et la deuxième partie se fait avec la méthode FRA qui permet

Et par la suite cette étude une simulation sur Matlab et faite pour voir et comparer les résultats trouvés. Ce dernier est un outil précieux dans l'étude des systèmes photovoltaïques. Elle permet d'analyser les performances des cellules PV en présence de défauts et de proposer des solutions pour optimiser leur fonctionnement. Cette simulation des défauts revêt une importance cruciale dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche, notamment dans le contexte des systèmes photovoltaïques (PV). Elle permet de modéliser et d'étudier les différents défauts qui peuvent survenir dans les cellules photovoltaïques.

III.2. Etude expérimentale

III.2.1. Détermination de la caractéristique de la cellule saine

On a mis une cellule en série avec une charge variable pour mesurer le courant débité sur l'ensemble du système comme l'explique la (Figure III. 1) et le schéma qui t'accorde à côté d'elle. On a préparé une cellule saine et on l'éclairer pour récupérer sa tension et son courant pour but de tracer sa caractéristique en (I-V) et (P-V).

III.2.2. Matériel utilisé

Une cellule de taille 107 x 61 mm il peut fournir jusqu'à 5(W) dans les conditions adéquates et de résistance variable une torche d'éclairage blanche. Un voltmètre et un wattmètre.

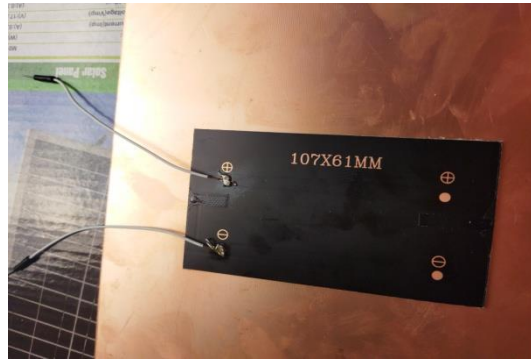


Figure III.1. Module de cellule solaire en SI

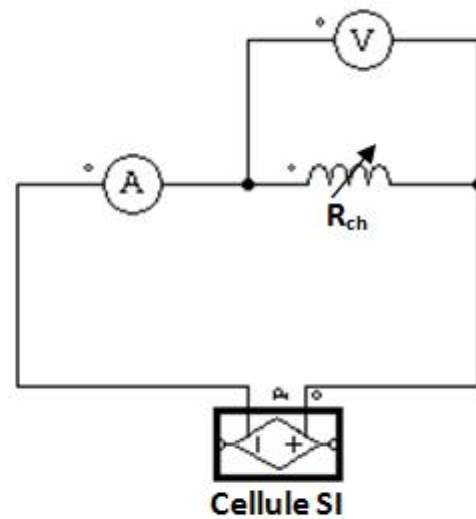
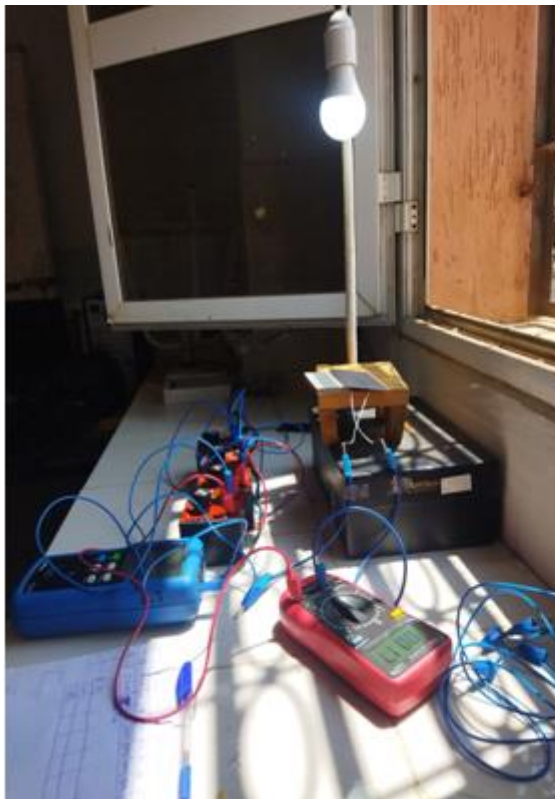


Figure III.2. (A) Montre les matériels utilisés lors de la manipulation (b) schéma explicatif sur le branchement des éléments utilisés.

III.2.3. Détermination de la caractéristique de six cellules saine mise en série.

La figure (III.3) illustre l'essai utilisé pour déterminer la caractéristique (I-V) et (P-V) pour une seule et groupe de six cellules solaire mise en série.

La figure (III.3). Montre le résultat obtenu.

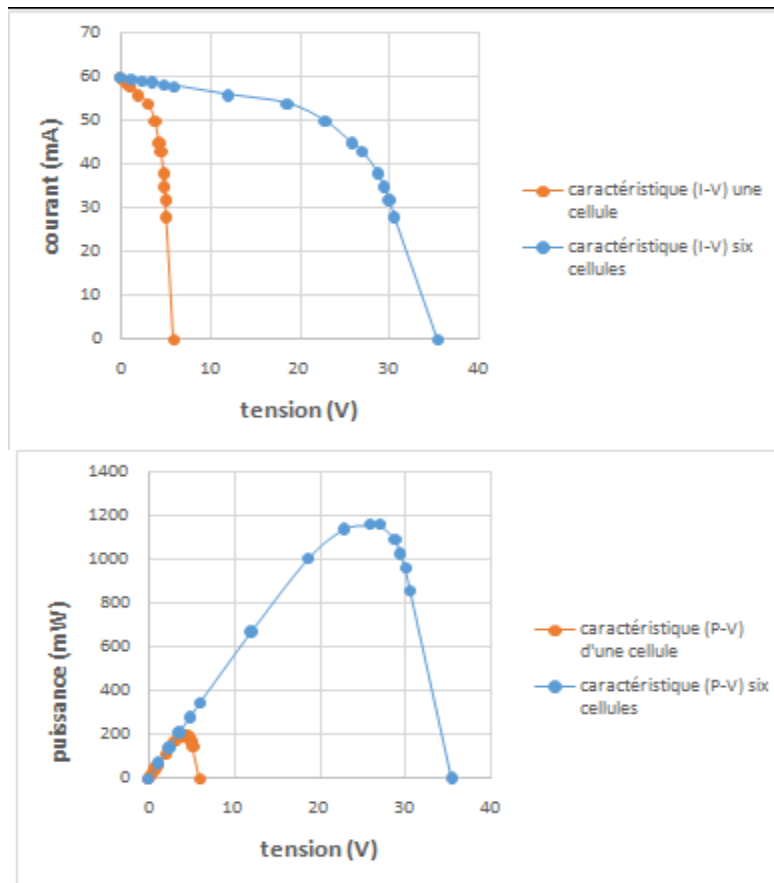


Figure III.3. Caractéristique (P-V) et (I-V) d'une cellule et six cellules solaire en fonctionnement normale.

✓ **Analyse et Interprétation**

À partir des résultats de la manipulation au fonctionnement normal on a arrivé a obtenu la caractéristique (P-V) comme le montre à la figure III.3 le graphe (A), les paramètres déterminés pour une cellule sont :

- La tension à vide est $V_{oc} = 5.9$ (V), et la puissance maximale $P_{max} = 193.5$ (mW),

Et d'apes le graphe on à déterminer d'autre caractéristique comme le paramètre pour une cellule son :

- Puissance maximale $P_{max} = 193.5$ (mW).
- La tension $V_{max} = 4.3$ (V).

Les paramètres obtenus pour six cellules sont :

- $V_{oc} = 35.4$ (V).
- $P_{max} = 1161$ (mW),
- $V_{max} = 25.8$ (V).

De la même manière que précédemment et à partir de la manipulation de en fonctionnement normal on a arrivé a obtenu la caractéristiques (I-V) comme le montre la figure III.3 graphe (B) pour une cellule :

- Le courant de court-circuit $I_{cc} = 60 \text{ (mA)}$,
- Le courant $I_{max} = I_{cc} = 60 \text{ (mA)}$,

En conclure donc :

- La puissance d'une cellule saine $P_1 = V_1 \times I$ (III.1)
- La puissance de six cellules saine $P_2 = V_2 \times I$ (III.2) avec $V_2 \equiv 6 \times V_1$ (III.3)

III.2.4. Application et étude défaut

Dans notre étude on a pris quelque défaut qui on rencontre lors de l'utilisation des panneaux solaire et pour cela nous avons appliqué quelque défauts sur l'ensemble de cellules de notre panneau, parmi ces défauts :

- Défaut de diode by-pass (court-circuit, circuit-ouvert, diode inverse).
- Défaut d'ombrage.
- Défaut de connectique.
- Défaut de poussière.

III.2.4.1. Défaut diode by-pass

Les défauts électriques associés à cette diode sont :

- diode court-circuitée.
- diode déconnectée.
- diode inversée.

III.2.4.1.1 Défaut diode déconnectée

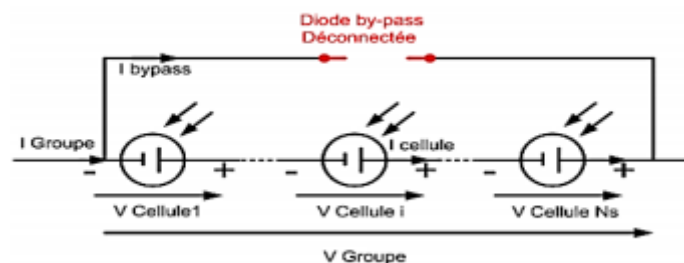


Figure III.4. Schéma d'un groupe de cellules PV avec diode by-pass déconnectée [18].

De la même manière que précédemment on ajout deux diode by-pass, dans cette manipulation de six cellules en série, on applique le défaut qui consiste à déconnectée la

premier diode qui est ont parallèle avec les trois premières cellules PV pour l'essayer et nous comparons le graphique obtenu avec le graphe de l'état sain.

La figure III.5.Montre les résultats obtenus.

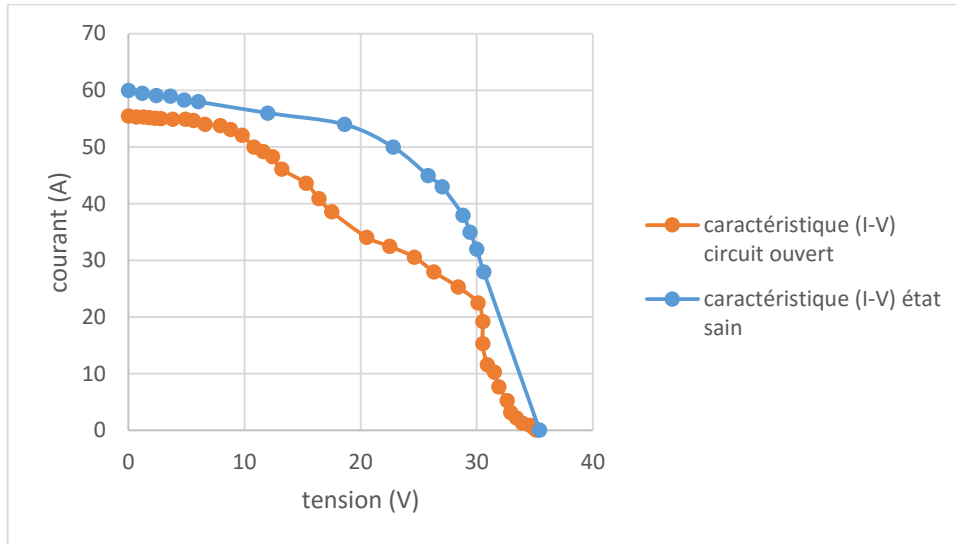


Figure III.5. Caractéristique (I-V) diode déconnectée.

✓ Interprétation

La figure.III.5. Montre la caractéristique (I-V) des cellules avec le défaut de diode by-pass circuit ouvert.

D'après les graphes on remarque que la courbe de défaut et diminué par rapport à l'état sain. Le courant de court-circuit diminué $I_{cc} = 55.5 \text{ Ma}$ para port à l'état sain. Voc inchangé

III.2.4.1.2 Défaut court-circuit

On ajout deux diode by-pass dans cette manipulation de 6 cellules en série, on applique le défaut court-circuit les trois premières et les trois dernier cellules PV Pour l'essayer et nous comparons le graphique obtenu avec le graphe de l'état sain.

La figure III. 2. Montre les résultats obtenus.

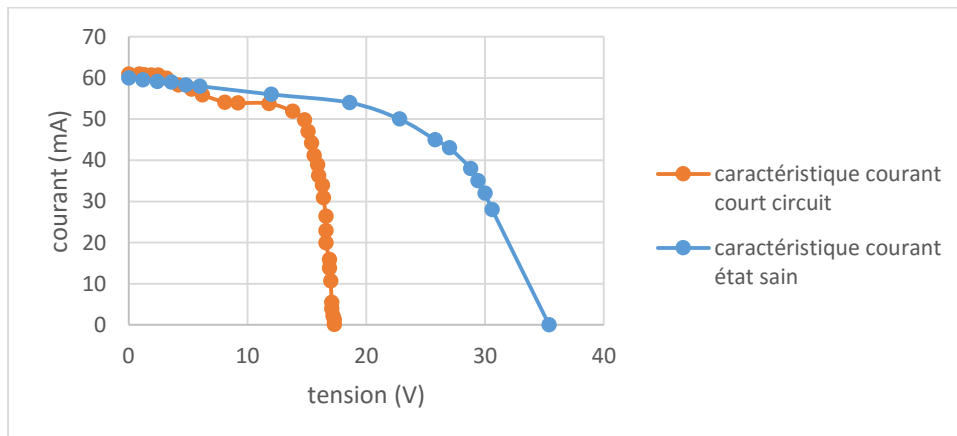


Figure III. 3. Caractéristique (I-V) court-circuit.

✓ **Interprétation**

La Figure montre la caractéristique (I-V) des cellules on court-circuit

D'après les graphes on remarque que la courbe de défaut et diminué par rapport à l'état sain

La tension de circuit ouvert diminue de valeur **Voc = 35.4 (V)** jusqu'à **Voc =17.3 (v)**

Diminution de Voc est facile à quantifier (**-18.1V par diode**)

Voc diminue en fonction du nombre de diodes court-circuitées

Isc inchangé

III.2.4.1.3 Défaut de diode inverse

Nous avons inversé la polarité de la première diode by-pass qui relie les trois premier cellules

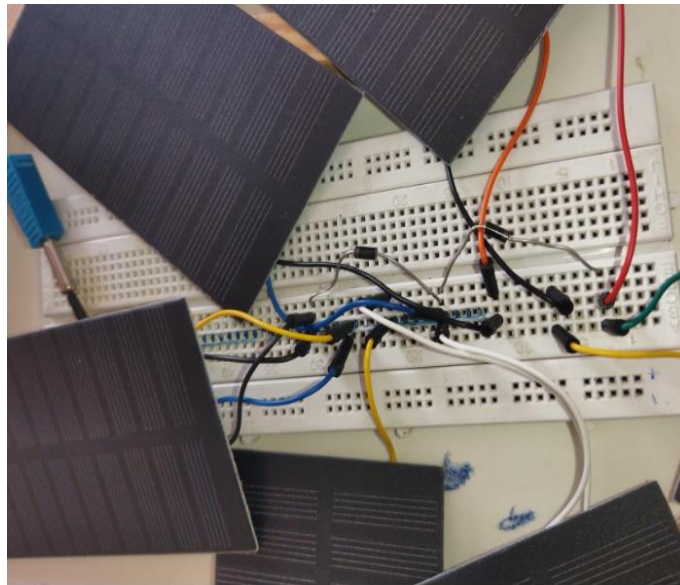


Figure III.6. Explicatif le phénomène d'inversion de polarité de diode.

Les résultats obtenus sont représenté sur la figure III.7.

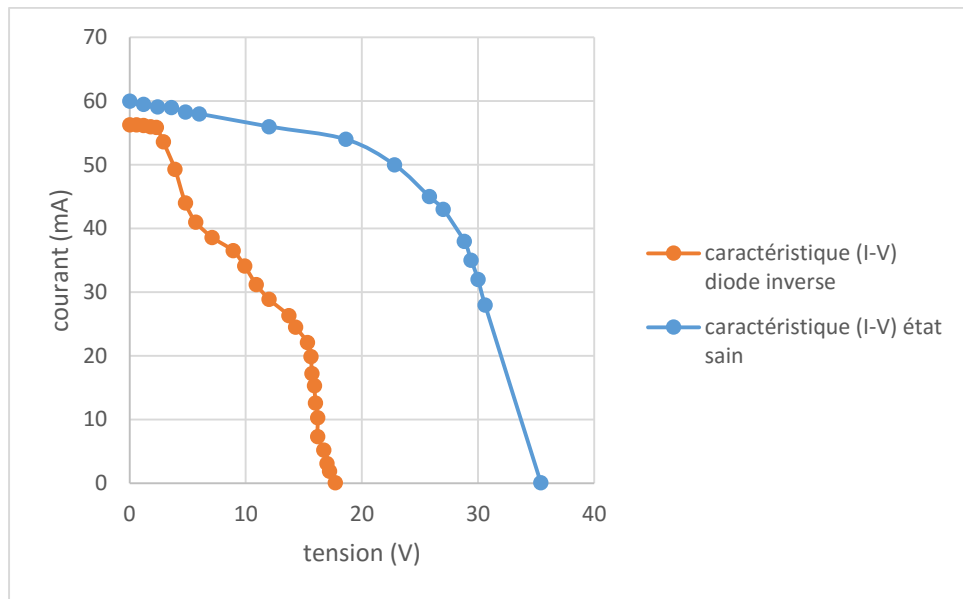


Figure III.7. Caractéristique (I-V) diode inverse. Défaut de diode inversé.

✓ Analyse et interprétation

D'après les graphes on remarque que la courbe de défaut est diminuée par rapport à l'état sain.

La tension de circuit ouvert diminue de valeur $V_{oc} = 35.4$ (V) jusqu'à $V_{oc} = 17.7$ (v)

Diminution de V_{oc} est facile à quantifier (**17.7V par diode**)

V_{oc} diminue en fonction du nombre de diodes inversé I_{sc} inchangé.

III.2.4.2. Défaut de poussière

Dans cette manipulation nous avons dou poudré la poussière sur une cellule et on a vu l'effet de cette dernière sur la caractéristique (I-V)

La figure III.9. Montre les résultats obtenus.



Figure III.8. Explicatif le cas de défaut de poussière.

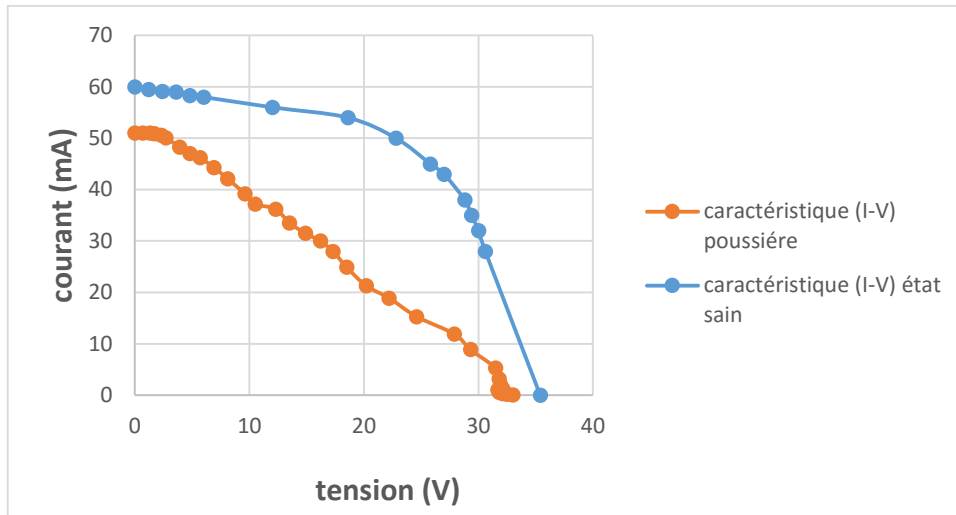


Figure III.9. Caractéristique (I-V) défaut poussière.

✓ Interprétation

La figure III.9. Montre la caractéristique (I-V) des cellules lors défaut de poussière. D'après le graphe on remarque que la courbe de défaut est diminuée par rapport à l'état sain, la tension de circuit ouvert diminue $V_{oc} = 33$ (V), le courant de court-circuit est diminué $I_{cc} = 51$ mA.

III.2.4.3. Défaut d'ombrage

Nous avons mis des feuilles d'arbre pour créer l'ombrage partiel pour obtenir la caractéristique (I-V).



Figure III.10. Image explicative le cas de défaut d'ombrage.

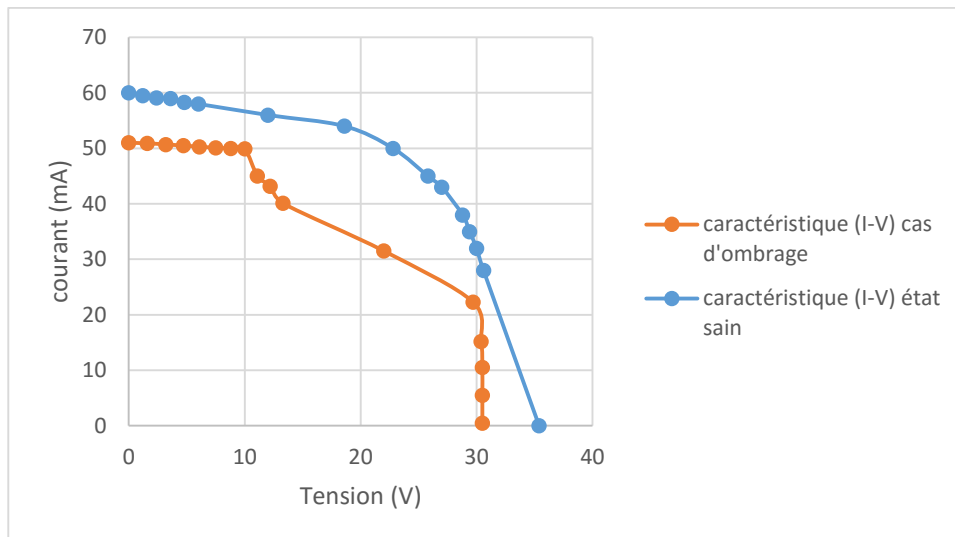


Figure III.11. Caractéristique (I-V) défaut d'ombrage.

✓ **Interprétation**

La figure.III.11. Montre la caractéristique (I-V) des cellules lors défaut d'ombrage s'applique en remarque que la courbe de défaut et diminué par rapport à l'état sain , et la tension de circuit ouvert diminue de valeur $V_{oc} = 30.5 \text{ (V)}$ de même pour le courant de court-circuit qui diminué d'ordre $I_{cc} = 51 \text{ mA}$.

III.2.4.4. Défaut de connectique

Dans cette manipulation de six cellules en série, nous avons appliqué le défaut de connectique sur une cellule PV. La figure III.12. Montre les résultats obtenus.

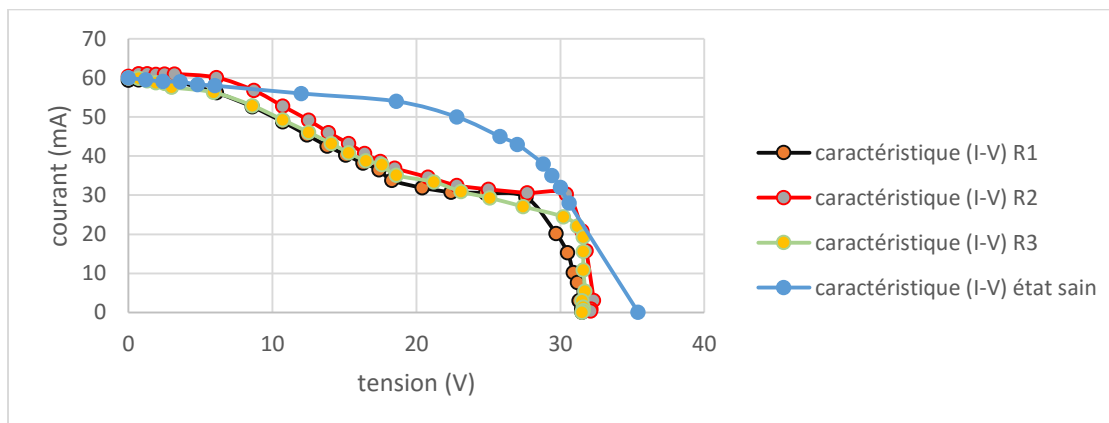


Figure III.12. Caractéristique (I-V) des cellules lors défaut connectique.

✓ **Interprétation et analyse du résultat**

À partir de graphe on voit que dans le défaut de connectique il y a une augmentation dans l'amplitude de courant de court-circuit (I_{cc}) en comparant avec l'état sain cette augmentation et relie relativement à l'augmentation de la résistance connectique. Cette variation dans l'amplitude de I_{cc} est accompagné avec une diminution dans la valeur de V_{oc} par rapport l'état sain.

III.3. Réponse fréquentielle d'une cellule solaire en Silicium

III.3.1. Tests expérimentaux avec la FRA sur une cellule solaire en (Si) à l'état sain

En prend la même cellule solaires et on mesure son l'impédance dynamique dans l'obscurité à température ambiante. Le signal de stimulation est Une tension d'amplitude fixe et de fréquence variable. Mesures La FRA des cellules photovoltaïques a été réalisée à l'aide de Tableau RLC mètre. Le compteur RLC mètre est capable de mesurer des paramètres des Appareils électriques dans la gamme de fréquences [20 kHz à 5 MHz] [5]. Il est Connecté entre les deux bornes d'entrée de la cellule photovoltaïque. L'impulsion injectée à l'entrée de la cellule elle soit récupérée à la sortie. le RLC mètre il est branche a microordinateur pour tracer et affichée ces raiponces en fréquence.

III.3.2. Partie de la manipulation avec FRA

III.3.2.1. Les résultats d'expérience FRA

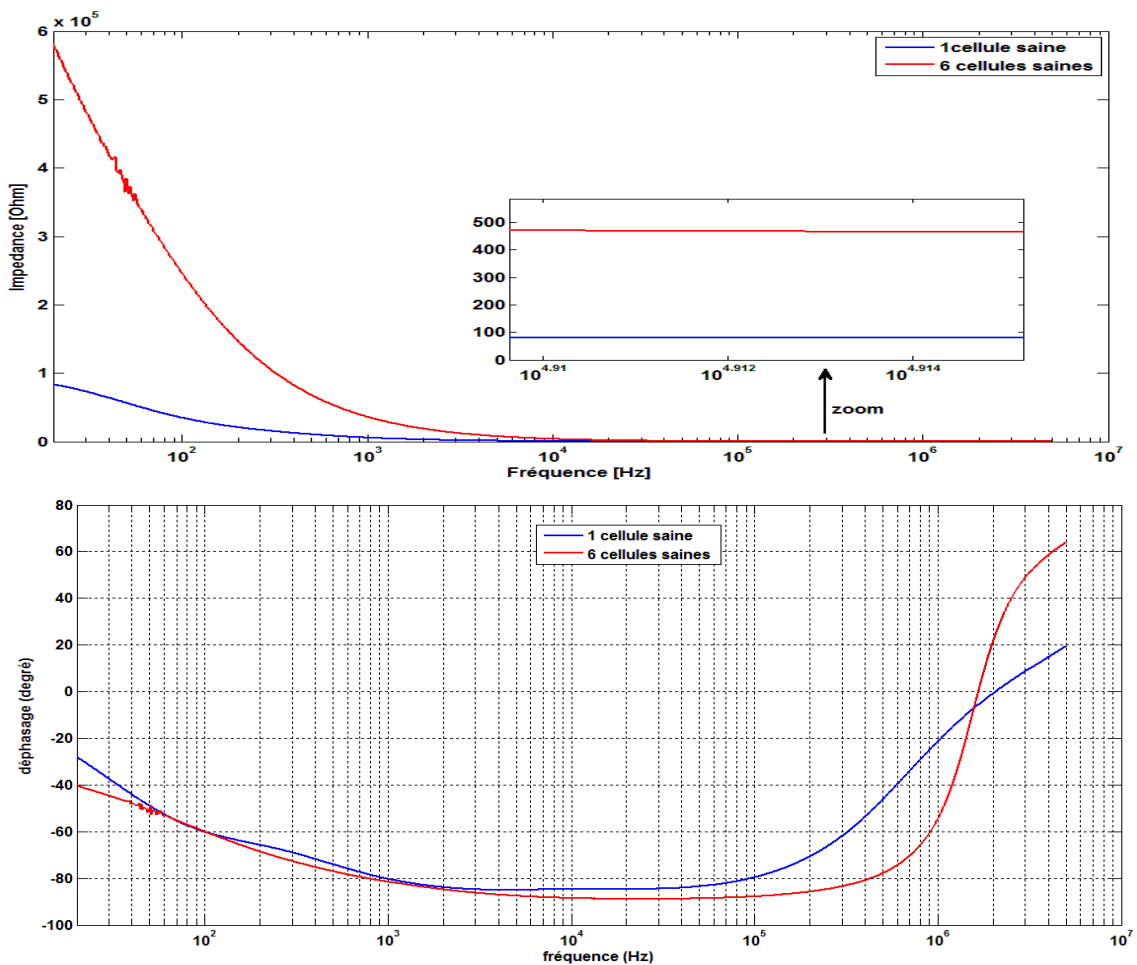


Figure 0.1. Comparaison de la réponse fréquentielle en impédance et phase entre une cellule et six cellules.

✓ **Interprétation et analyse des résultats**

En voit que l'impédance fréquentiel de six cellules très grandes par rapport à celle d'une cellule, un groupe de cellule multiplie par six qu'on compare au cas d'une seule cellule

$$Z_{6\text{cel}} = 6 \times Z_{1\text{ce}} \quad (0.1)$$

III.3.2.2. Application de défaut de court-circuit avec la FRA

Nous avons court-circuité dans un premier temps une cellule et pour deux cellule et on compare le résultat obtenu avec l'état sain

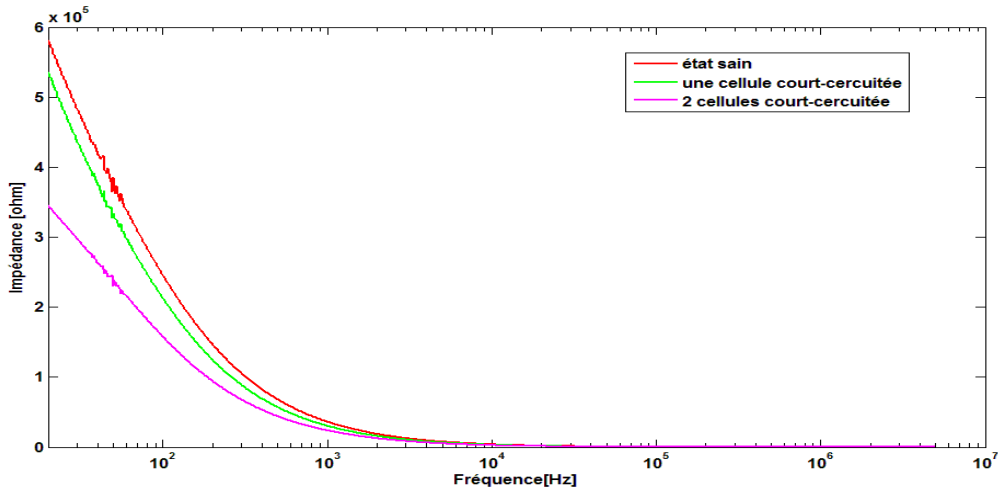
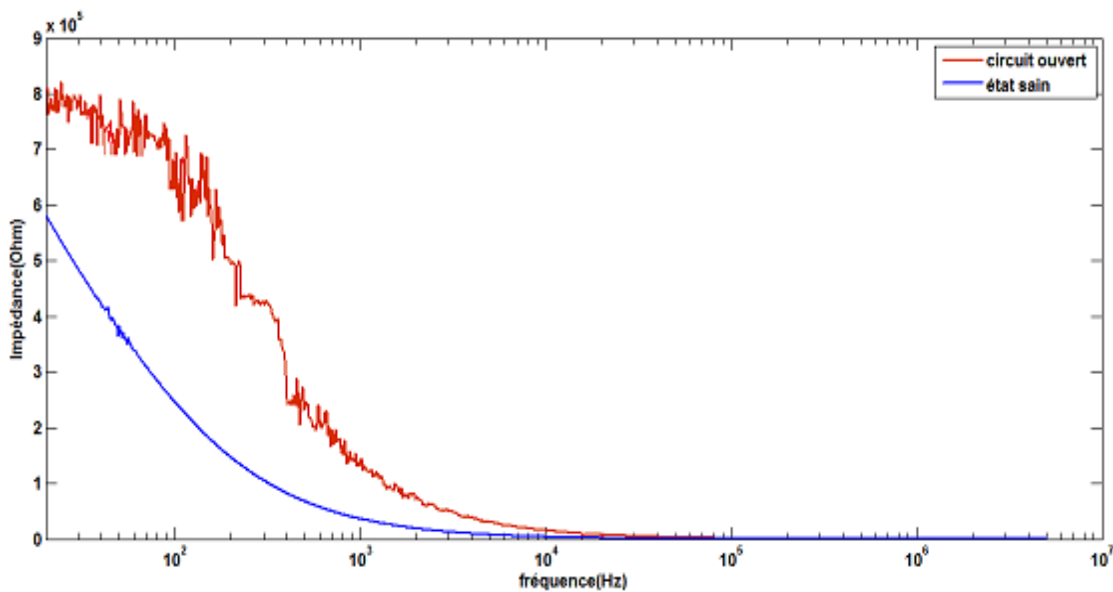


Figure 0.2. Montre les courbent des cellules en court-circuit avec la courbe de l'état sain.

✓ **Itreppretation**

D'après la figure.III.14 en remarque que les réponses fréquentielles d'impédance des cellules court-circuité ils sont tout au-dessous de l'état sain saine avec une diminution dans l'amplitude de l'impédance mesure.

III.3.2.3. Application de défaut de circuit ouvert avec la FRA



.Figure 0.3. Visualise le graphe de l'état sain et l'état de circuit ouvert.

En remarque que y'a une différence dans l'amplitude de l'impédance (Z) entre la courbe de circuit ouvert et la courbe de l'état sain. Le circuit ouvert provoque une augmentation dans l'amplitude de (Z) d'ordre de 2×10^5 par rapport à l'état sain, cette augmentation il est due à la présence d'une forte impédance provoqué dans notre groupe de cellule l'ord de l'application de ce défaut.

III.4. Comparaison entre les résultats obtenue lord de la simulation et la pratique

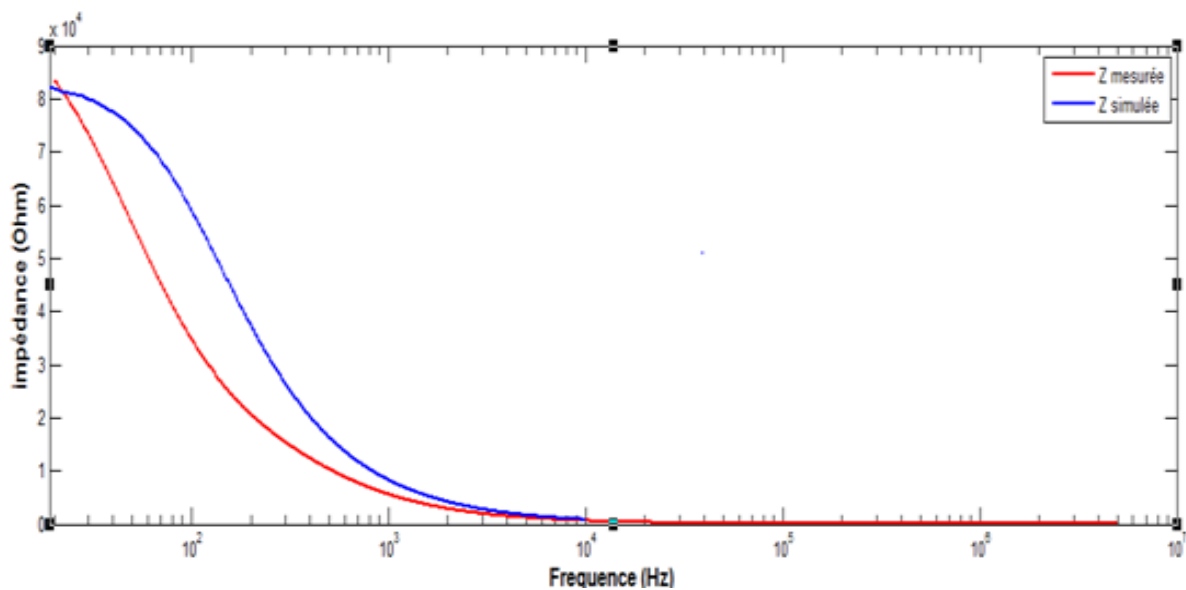


Figure 0.4. Différence entre le résultat pratique et le résultat de la simulation à l'état sain.

✓ Discussions et interprétation

En remarque que y'a une légère différence entre la courbe de l'impédance mesuré et la courbe simulé cette est due à la présence d'une capacité parasite interne reliant la cellule à la terre qu'on n'a pas prise en compte dans notre étude.

III.5. Application de défaut en simulation

Simulink est une plate-forme complète pour la simulation et la modélisation de systèmes dynamiques dans divers domaines. Il propose une interface graphique conviviale et une collection de bibliothèques comprenant des blocs de modélisation.

Dans notre cas le Simulink est la plateforme idéale pour valider notre résultat obtenu en pratique et les vérifier [40].

III.5.1. Extraction du paramètre à simuler

Nous avons exploité le diagramme de Bode pour déterminé les paramètres hauts fréquence de notre cellule les résultats obtenus sont représenté dans le tableau ci-dessous :

L'extraction des paramètres se fait par rapport au graphe qu'on a recopié de la manipulation avec la FRA sur une cellule et 6 cellules en absence de défaut.

	Résistance R_s (Ω)	Résistance R_p (Ω)	Capacité C_p (F)
Valeur de paramètre	13.4	83486.6	$19.07 * 10^{-9}$

Tableau 0.1. Montre les paramètres à simuler.

III.5.2. Application des défauts

Nous avons appliqué plusieurs types de défauts sur l'ensemble de cellules de notre panneau, parmi ces défauts :

- Défaut de court-circuit
- Défaut de circuit ouvert
- Défaut de connectique

III.5.2.1. Défaut de court-circuit

On a un panneau qui est constitué de six cellules en série, nous avons court-circuité chaque cellule PV, pour appliquer le défaut. En commence par la première cellule jusqu'au la sixième cellule et Chaque fois en fait une comparaison par rapport à l'état sain.

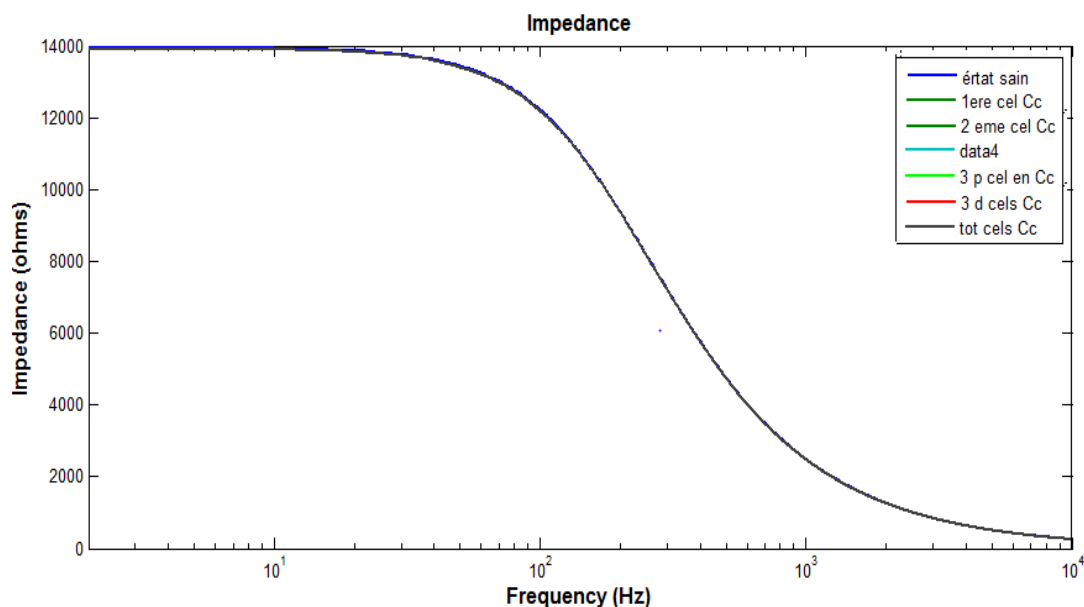


Figure 0.5. Montre les courbent dans le cas d'application de court-circuit a différent niveau de notre groupes de cellules.

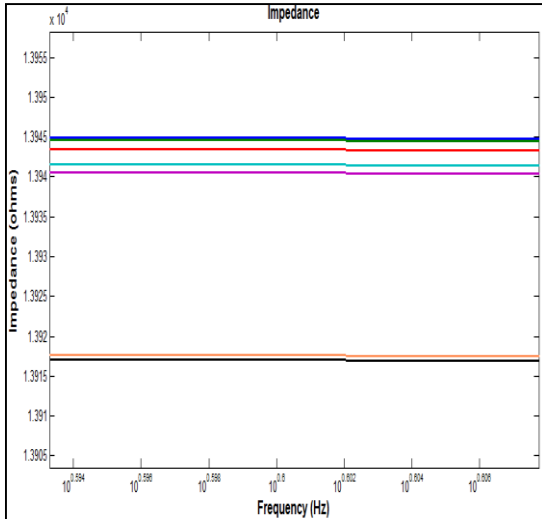


Figure 0.6. Zoom sur la partie de variation $R_s + R_p$.

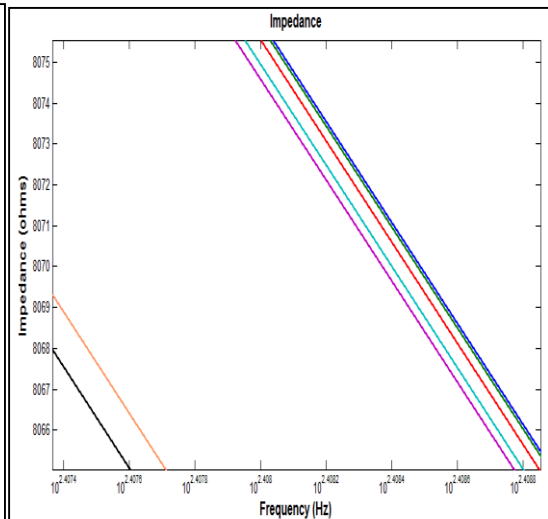


Figure 0.7. Zoom sur la partie C_p .

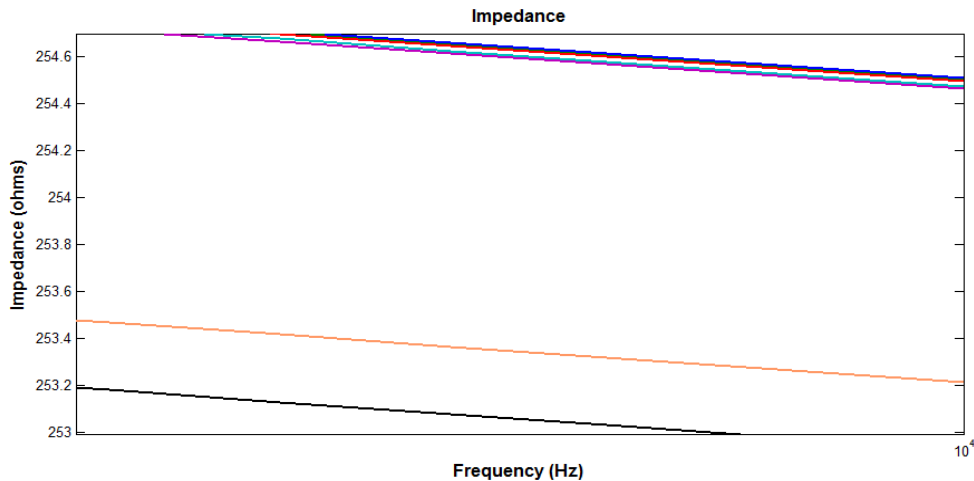


Figure 0.8. Zoom sur partie de variation R_s .

✓ Interprétation des résultats

La figure III 17. Montre le graphe de l'impédance en fonction de la fréquence d'une cellule et plusieurs cellules en défauts de court-circuit simultanément, et nous avons constaté que la réponse fréquentielle impédance du court-circuit est inférieure à celui de l'état sain pour tous les différents régions ($R_s + R_p$ et C_p, R_s).

III.5.2.2. Défauts de circuit ouvert

De la même manière que précédemment, le défaut d'ouverture est appliqué sur l'installation. Pour ce défaut on ouvre chaque sortie de cellule en utilisant soit une résistance d'une grande valeur branchée en série à l'extrémité de chaque cellule ou en vue appliqué le défaut, ou en utilisant un interrupteur. La figure.III.21 montre le résultat obtenu.

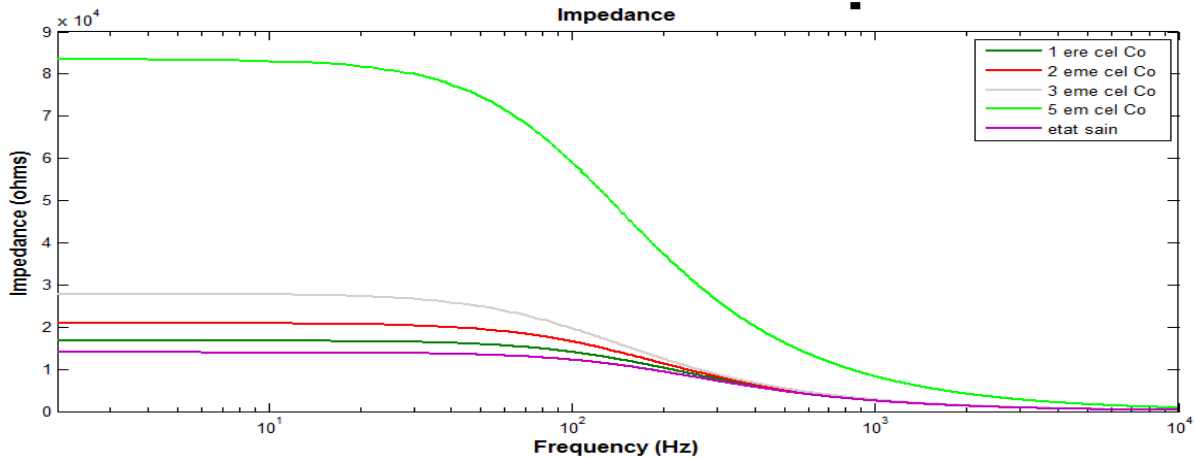


Figure 0.9. Comparaison entre le défaut de circuit ouvert et l'état sain..

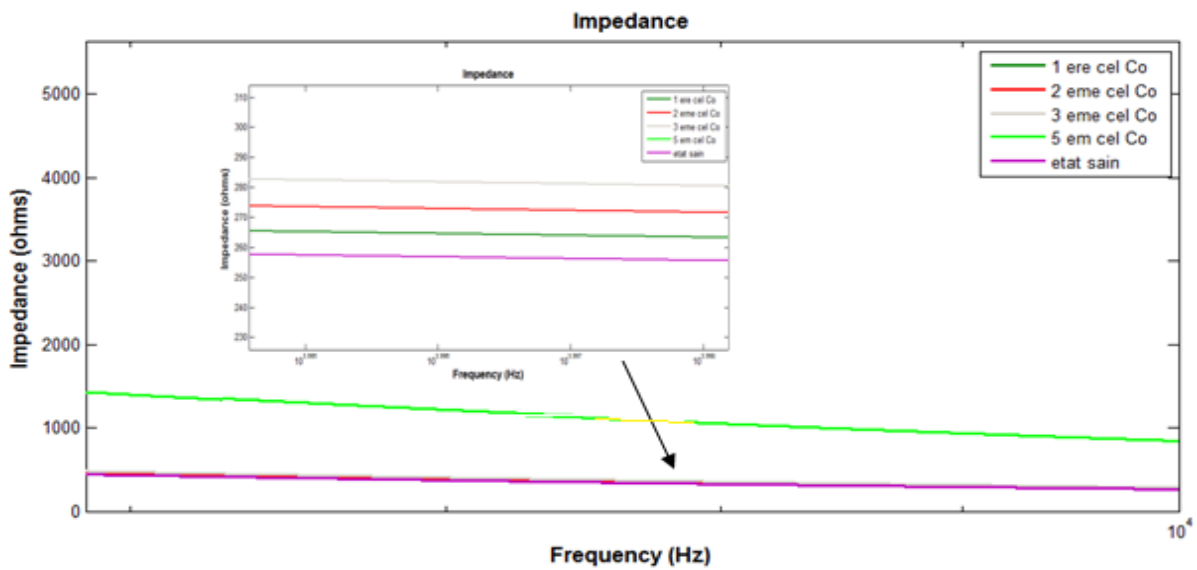


Figure 0.10. Représente un zoom sur la partie Rs.

✓ Interprétation

En voit que la courbe de l'impédance fréquentiel se varie de façon croissante relativement avec le déplacement de défaut de la première cellule jusqu'au la dernière cellule comme le montre la figure III.21.

Des résultats révèlent que la courbe de défaut de circuit ouvert présente une augmentation significative dans la zone 1 (R_p+R_s), la zone 2 (C_p) et la zone R_s . La figure II.21. Illustre la réponse fréquentielle de l'impédance d'un groupe de cellule sain ainsi que de plusieurs cas de défauts de circuit ouvert a déférentes niveaux.

. Ces défauts ont été appliqués sr les cellules, et il a été constaté que la réponse en fréquence de l'impédance pour le défaut de circuit ouvert est plus élevée que celle de l'état normal, ce qui peut être détecté par la technique FRA en termes de position de la cellule.

III.5.2.3. Défauts de connectique 10 ohm.

Le défaut de connectique est un problème qui se manifeste par une augmentation de la résistance de connexion entre deux éléments photovoltaïques. En situation normale, cette résistance est pratiquement nulle. Cependant, dans des situations anormales telles que la corrosion de la connectique ou un mauvais serrage des vis, cette résistance peut augmenter. Dans les cas les plus extrêmes, une résistance infinie peut être utilisée pour représenter un module qui est complètement déconnecté du reste du système photovoltaïque [33].

Le défaut de connectique est réalisé avec le placement d'une résistance d'une valeur 10 ohm devant chaque cellule.

La figure III.23. Représente une comparaison entre les courbes de défaut de connectique et l'état sain.

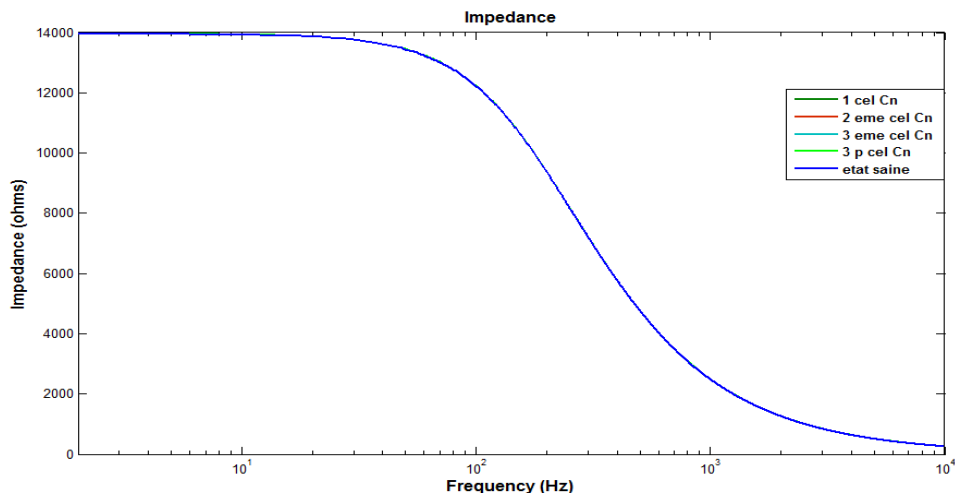


Figure 0.11. Comparaison entre les courbes de défaut de connectique 10 ohm et l'état sain.

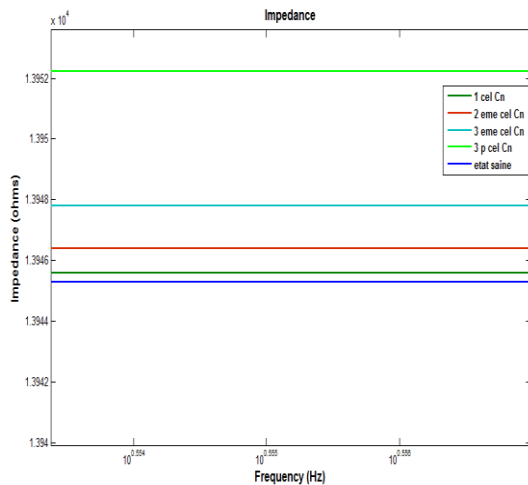


Figure 0.12. Zoom sur la partie de R_s+R_p

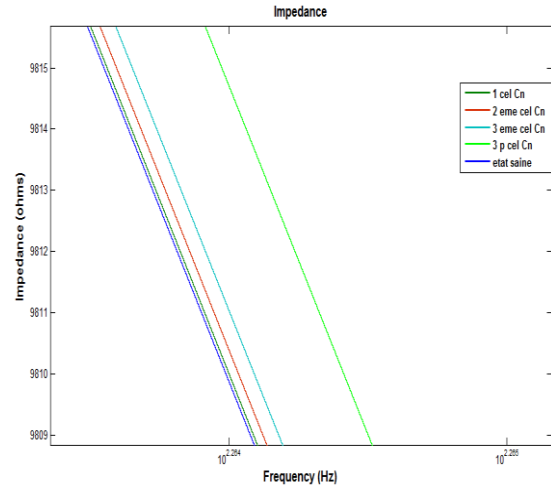


Figure 0.13. Zoom sur la partie de C_p .

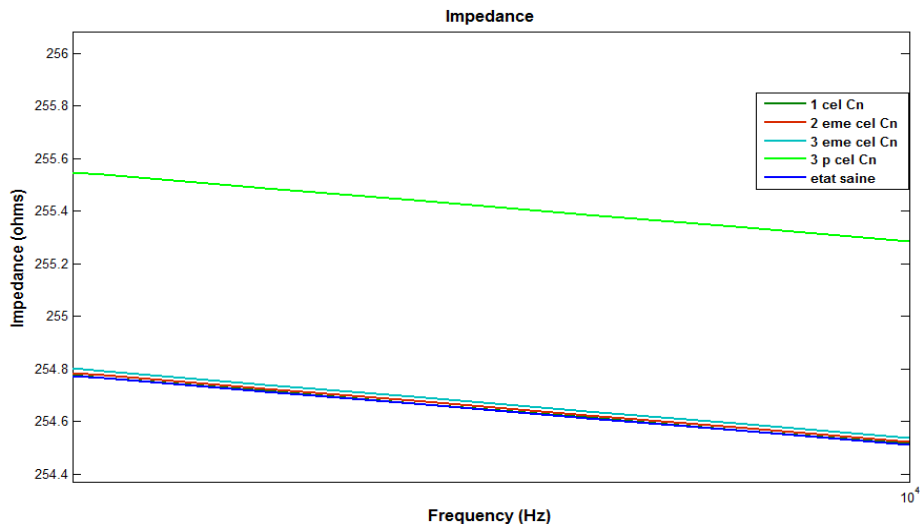


Figure 0.14. Le zoom sur la partie Rs.

✓ Analyse et interprétations

La courbe de défaut de connectique se situe au-dessus de la courbe de l'état sain. Zone de variation de (R_s+R_p) et (C_p) et (R_s) , l'impédance avec le défaut de connectique augmente d'une valeur maximum quand le défaut appliqué sur les six cellules par rapport à chaque cellules et à l'état sain.

La **figure III.23-26**. Montre la réponse en fréquence d'impédance de connectique défectueuse entre une ou plusieurs cellules, nous déplaçons le défaut vers une unité adjacente, et nous constatons que la réponse en fréquence d'impédance du défaut est supérieure à celle de l'état sain. La FRA détecte l'emplacement du défaut de connexion, il peut aussi indiquer la gravité du défaut lorsqu'il y a plusieurs défauts de connexion.

III.5.2.4. Défauts de connectique 210 ohm

Le défaut de connectique est réalisé avec le placement d'une résistance d'une valeur 10 ohm devant chaque cellule.

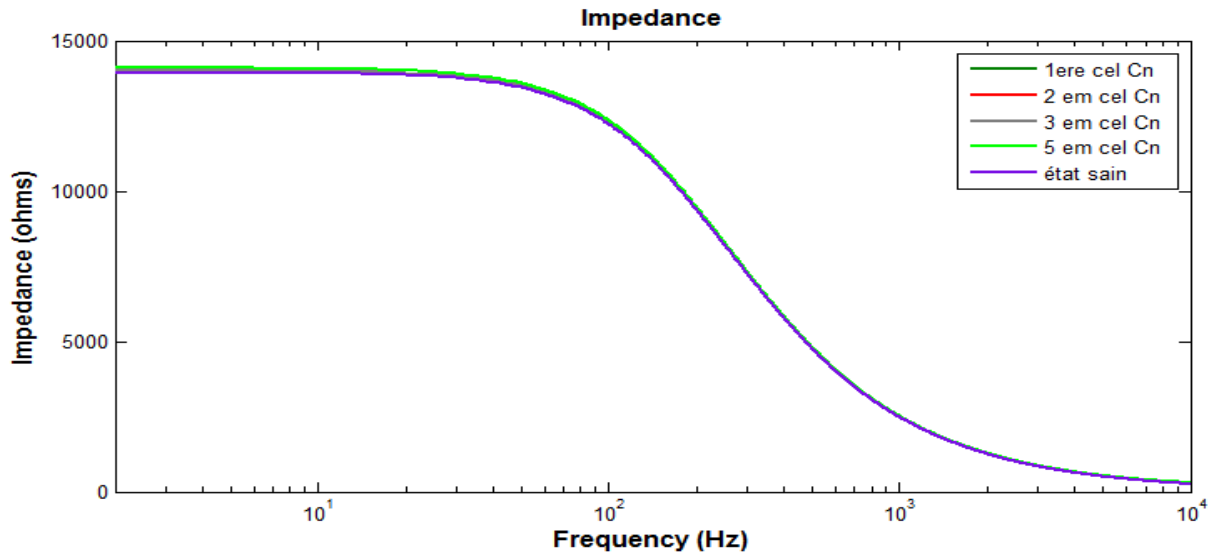


Figure 0.15. Comparaison entre les courbes de défaut de connectique 210 ohm et l'état sain.

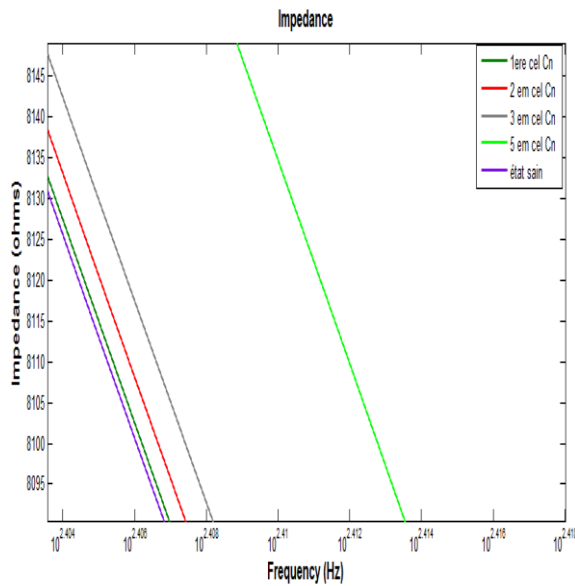


Figure 0.17. Zoom sur la partie Cp.

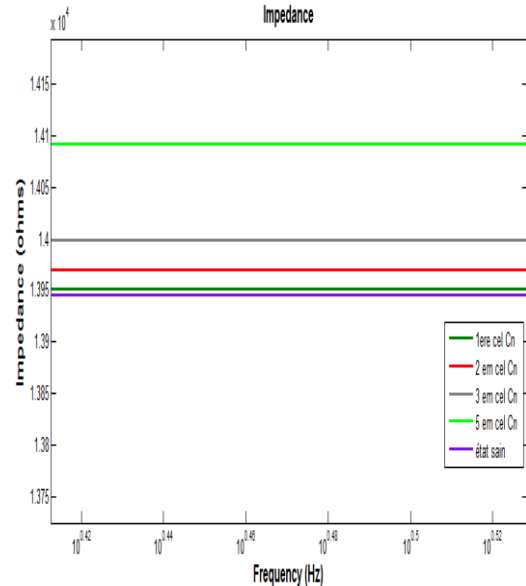


Figure 0.16. Zoom sur la partie Rs

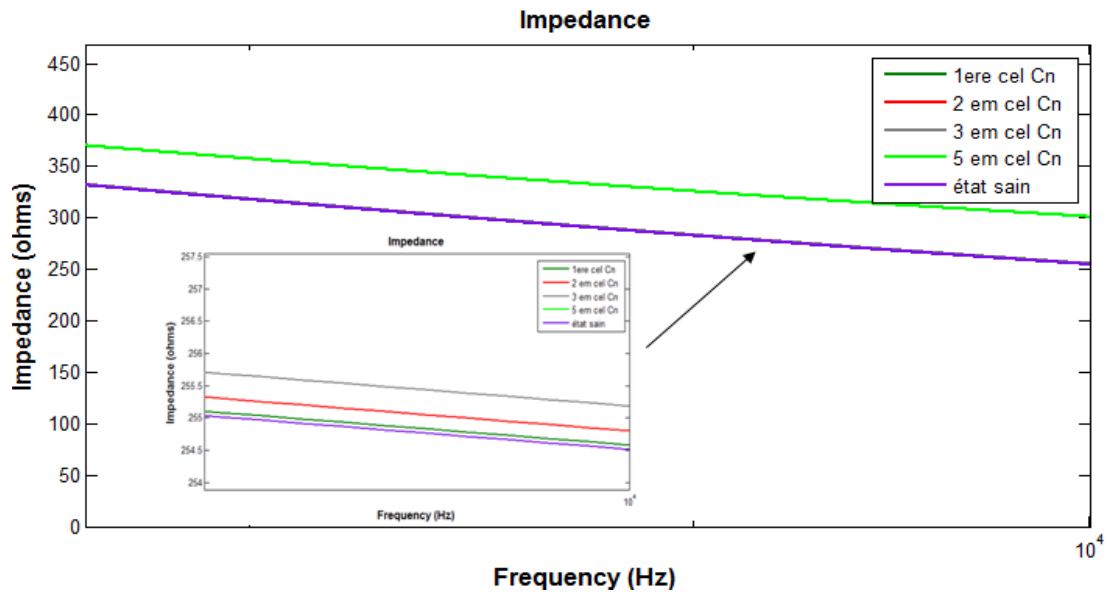


Figure 0.18. Zoom sur la partie Rs.

✓ Interprétation

La figure III.27-30. Montre la réponse en fréquence d'impédance de connectique ($R = 210$ ohm) défectueuse entre une ou plusieurs cellules, nous déplaçons le défaut vers une cellule adjacente, et nous constatons que la réponse en fréquence d'impédance du défaut de connectique est supérieure à celle de l'état sain dans la zone (R_p+R_S et C_p). , on remarque que la valeur de R_p+R_S et C_p s'approche de sa valeur dans l'état sain.

Et par contre dans la zone R_s le défaut appliqué pour les 6 cellules augmentent dans valeur maximum par rapport à l'état sain et les autres cellules

La technique FRA détecte l'emplacement du défaut de connexion, peut nous indiquer la gravité du défaut lorsqu'il y a plusieurs défauts de connectique dans les cellules PV en augmentant de manière excessive l'impédance dynamique des cellules PV.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit et élaboré une approche expérimentale pour évaluer les défauts des panneaux solaires photovoltaïques (GPV). L'objectif principal était d'obtenir les caractéristiques courant-tension (I-V) de plusieurs cellules solaires pour différents types de défauts que nous avons pris en considération, tels que court-circuit, l'ombrage, diode inverse, les accumulations de poussière et le circuit ouvert.

Dans cette étude, nous avons développé et expérimentalement vérifié un modèle d'impédance dynamique dépendant de la fréquence pour les cellules solaires. Nous avons également réalisé une étude diagnostique basée sur la technique de l'analyse de réponse en fréquence (FRA) sur des installations photovoltaïques. Les défauts tels que le court-circuit, les circuits ouverts et les problèmes de connexion, ainsi que leurs réponses en fréquence, ont été analysés. En comparant les signatures de ces défaillances à celles des installations de référence en bon état de fonctionnement, cette analyse nous a permis de distinguer la nature de chaque défaillance. Ces résultats sont importants pour la maintenance et l'optimisation des installations photovoltaïques, car ils permettent d'identifier rapidement les problèmes et de prendre des mesures correctives appropriées pour assurer un fonctionnement optimal.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le domaine de photovoltaïque offre de nombreuses perspectives en tant que source d'énergie renouvelable, apportant des avantages environnementaux, économiques et sociaux. Pour soutenir la transition mondiale vers une production d'électricité propre et durable, il est essentiel de continuer à développer cette technologie et à en favoriser son adoption.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire visent à améliorer l'efficacité énergétique des installations photovoltaïques en proposant une nouvelle méthode de diagnostic des défauts. Cette méthode repose sur l'analyse de la réponse fréquentielle et permet de surveiller et de maintenir le bon fonctionnement des systèmes photovoltaïques, garantissant ainsi leur fiabilité et leur continuité de service.

L'objectif de cette recherche est de détecter et de localiser les défauts présents dans la partie DC des systèmes photovoltaïques, plus précisément du côté générateur PV. Il s'agit de développer une méthode capable d'identifier les défauts susceptibles de réduire la production d'énergie, tout en tenant compte des contraintes économiques liées à ces systèmes.

Pour minimiser les coûts associés à la surveillance et à la maintenance des installations photovoltaïques, une approche novatrice a été adoptée, réduisant ainsi le nombre de mesures nécessaires. Cette méthode propose une détection et une localisation efficaces des défauts, sans compromettre la précision et la fiabilité des résultats.

Les résultats obtenus dans ce mémoire représentent une avancée significative dans le domaine de la détection et de la localisation des défauts dans les systèmes photovoltaïques. Ils contribuent à améliorer la performance et la durabilité des installations tout en réduisant les coûts de maintenance. En fin de compte, ces avancées favorisent une utilisation plus efficace et rentable de l'énergie solaire, soutenant ainsi la transition vers des sources d'énergie plus durables.

Il convient de souligner que les performances du diagnostic, en termes de détection et de localisation des défauts, dépendent de la structure du composant étudié, notamment du nombre de composants. Les principaux avantages de la méthode basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle sont sa simplicité de traitement des données, sa facilité de mise en pratique, sa sensibilité à la gravité des défauts et aux bruits. Cette méthode permet de distinguer différents types de défauts.

En résumé, les travaux de recherche présentés dans ce mémoire offrent de nouvelles perspectives pour améliorer l'efficacité énergétique des installations photovoltaïques grâce à une méthode innovante de détection et de localisation des défauts. Ces avancées contribuent à renforcer la

performance et la durabilité des installations, tout en réduisant les coûts de maintenance, favorisant ainsi une utilisation plus efficace et rentable de l'énergie solaire.

Références bibliographiques

- [1] G.ouadfel, « détection et localisation de défaillances dans les systèmes photovoltaïques », thèse de doctorat en sciences, option de génie électrique, université de yahia farés médéa, 2022
- [2] M.konate, « utilisation des outils du traitement de signal pour le diagnostic du moteur asynchrone », mémoire de master, spécialité traitement de l'information et systèmes électroniques, université saad dahlab de blida, 2016.
- [3] H. derbel, « diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides », automatique / robotique. Université joseph-fourier - grenoble i, 2009. Français.
- [4] F. barruel, N. chantreuil, A. labrunie, « procédé de diagnostic de la défaillance d'un générateur photovoltaïque » france patent fr2944647 (a1), 2010.
- [5] Z. meziani, « modélisation des modules photovoltaïques » thèse de doctorat, université de batna .2012.
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque> . consulté le 15/06/2023.
- [7] F. abbassi, « optimisation d'un système de pompage photovoltaïque .application aux sites sahariens » .thèse de licence professionnel, université kasdi merbah ouargla,2018.
- [8] <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>. consulté le 15/06/2023.
- [9] A.toulait, r.aïli, « modélisation et simulation sous Matlab/Simulink d' photovoltaïque adapté par une commande mppt »mémoire de fin d'étude de master academique, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2014.
- [10] Energie solaire photovoltaïque.doc / b. flèche - d.delagnes / juin 07.
- [11]<https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques>. consulté le 20/06/2023.
- [12] M. k. nazeeruddin, f. de angelis, s. fantacci, a. selloni, g. viscardi, p. liska, s. ito, b. takeru, m. grätzel, *j. am. chem. soc.* 2005, 127, 16835.86.

- [13] D. rekioua, e. matagne, « optimisation des systèmes d'énergies photovoltaïques », université of bejaia. université catholique de louvain.2012
- [14] A. belaout, « etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (pv) par emploi de la caractéristique courant-tension », présenté à la faculté de technologie département d'électronique, université – sétif-1-u-s-1 (algérie).
- [15] <https://www.dsnsolar.com/info/the-solar-pv-junction-box-54220374.html>. consulté le 15/06/2023.
- [16] R.khenfer, «détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques», thèse de doctorat en science, département d'électrotechnique option automatique, université ferhat abbes - sétif 1ufas (algérie).
- [17] L.bailly, « cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface », thèse de doctorat, université bordeaux i, 2010.
- [18] L.bun, « détection et localisation de défauts pour un système pv », thèse de doctorat, université de grenoble, france, 2011.
- [19] A, khenfer, « etude et conception d'une architecture en vue de la détection de défauts dans une installation photovoltaïque », mémoire de magister, université sétif-1- décembre.
- [20] M.drif, A .chebabhi, «etude d'identification et localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque », mémoire de master, département d'électronique, universite mohamed boudiaf – m'sila, juin 2016.
- [21] N. leuret, C. miquel, J. sarantou, « méthode de détection des disfonctionnement dans les installations pv », l'association de hespul.
- [22] Y. mokhtari , « diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire », mémoire de master, sciences et technologies électrotechnique machines électriques, université mohamed khider de biskra, dimanche 7 juillet 2019.
- [23] I.mameri, F. aberkane, « détection des défauts d'un générateur photovoltaïque par la méthode d'analyse en fréquence fra », mémoire de fin d'étude, épatement de génie électrique, université akli mohand oulhadj bouira, année universitaire 2019/2020.
- [24] E. thouti, V. K. komarala, « investigation of parasitic absorption and charge carrier recombination losses in plasmonic silicon solar cells using quantum efficiency and impedance spectroscopy », solar energy, vol. 132, july 2016, pages 143-149
-

- [25] I. mora-sero et al, « impedance spectroscopy characterisation of highly efficient silicon solar cells under different light illumination intensities », *energy environ. sc.*, 2009, 2, 678–686.
- [26] W.kim, duong, V-H.nguyen, t.-t.,W. choi, « analysis of the effects of inverter ripple current on a photovoltaic power system by using an ac impedance model of the solar cell. *renewable energy* », 59, 150– 157. doi:10.1016/j.renene.2013.03.035
- [27] P. alexis gril, J. vernier, D. depernet. « caractérisation de panneaux photovoltaïques par mesure d'impédance ». *symposium de génie électrique*, jul 2018, nancy, france. fihal-02130104.
- [28] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques>.
- [29] D. t. cotfas, P. a. cotfas, S.kaplanis, « méthode and techniques to determine the dynamic parameters of solar cells : review. *renewable and sustainable energy reviews* », 61, 213– 221. doi:10.1016/j.rser.2016.03.051. (2016).
- [30] N.katayama, S. osawa, S. matsumoto, T. nakano, m. sugiyama, (2019). *degradation and fault diagnosis of photovoltaic cells using impedance spectroscopy. solar energy materials and solar cells*, 194, 130– 136.
- [31] k. kim, A.seo, g.-s., b.-h. cho, P. T krein,. (2016). « photovoltaic hot-spot detection for solar panel substrings using ac parameter characterization. *ieee transactions on power electronics* », 31(2), 1121–1130.
- [32] R Kumar, A. suresh, J. nagaraju, « silicon (bsfr) solar cell ac parameters at different temperatures. *solar energy materials and solar cells* », 85(3), 397–406. (2005).
- [33] o.olayiwola, I. barendse, (2019). « photovoltaic cell/module equivalent electric circuit modelling using impedance spectroscopy. *ieee transactions on industry applications* », 1–1.
- [34] M. forghani, j. mccarthy. P. cameron, S. davey et scott w. donne, « semiconductor properties of electrodeposited manganese dioxide for electrochemical capacitors: mott-schottky analysis », *journal of the electrochemical society*, volume 168, number 2, 2021.
- [35] E. chahid, N. hamid, D. agliz, M. feddaoui, A. komina, A. malaoui, « extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire organique à base de (p3ht : pcbm) », *revue de l'entrepreneuriat et de l'innovation*, vol. 2, no 6 (2018)
-

[36] A. chanane, diagnostic des défauts dans les enroulements de transformateur, thèse de doctorat, université yahia fares médéa, algérie, 2017.

[37] K. senobari, R. sadeh, H.borsi, (2018). « frequency response analysis (fra) of transformers as a tool for fault detection and location », à review. electric power systems research , 155, 172– 183. doi:10.1016/j.epsr.2017.10.014.

[38] Guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers, iee c57.149-2012.

<https://doi.org/10.1109/access.2018.2890150>

[39] A. shawahna, S.M. sait, a. el-maleh. «fpga-based accelerators of deep learning networks for learning and classification». à review. iee access, 7: 7823-7859. (2018)

[40] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Simulink>

ملخص

أصبحت الخلايا الكهروضوئية شائعة كمصدر للطاقة المتجددة ، حيث تحول ضوء الشمس إلى كهرباء بطريقة مستدامة وصديقة للبيئة. ومع ذلك ، يمكن أن تعاني هذه الأنظمة من عيوب تقلل من كفاءتها أو حتى تسبب أضرارًا. يعد تشخيص الأعطال أمرًا ضروريًا لتقليل تكاليف الصيانة وضمان استمرارية الخدمة. في هذه الدراسة ، نركز على الكشف عن الأعطال وموقعها مثل الثنائيات العكسية والدوائر المفتوحة والدوائر القصيرة ومشاكل الموصل والتظليل والغبار. نحن نستخدم طريقة تشخيص تحليل الاستجابة الترددية (FRA) ، وهي طريقة بسيطة وموثوقة. تقلل هذه الطريقة من كمية المعلومات المراد معالجتها أثناء اكتشاف الأخطاء ، بغض النظر عن مدى خطورتها. أثبتت التجارب والمحاكاة باستخدام Matlab صحة هذا النهج ، مما يدل على قدرة FRA على اكتشاف الأخطاء وتحديد موقعها. تصف النتائج التي تم الحصول عليها الحالة الصحية للنظام الكهروضوئي ، حيث يعتبر أي اختلاف عن الحالة الصحية خطأ

الكلمات المفتاحية: FRA, نظام PV, كشف الاعطال, التشخيص ,

Résumé

Les cellules photovoltaïques sont devenues populaires en tant que source d'énergie renouvelable, convertissant la lumière solaire en électricité de manière durable et respectueuse de l'environnement. Cependant, ces systèmes peuvent présenter des défauts qui réduisent leur efficacité, voire entraînent des dommages. Le diagnostic des défauts est essentiel pour réduire les coûts de maintenance et garantir la continuité du service. Dans cette étude, nous nous concentrons sur la détection et la localisation de défauts tels que les diodes inverses, les circuits ouverts, le court-circuit, les problèmes de connectique, l'ombrage et la poussière. Nous utilisons la méthode de diagnostic basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle (FRA), qui est simple et fiable. Cette méthode réduit la quantité d'informations à traiter tout en détectant les défauts, indépendamment de leur gravité. Des expériences et des simulations avec Matlab ont validé cette approche, démontrant la capacité de la FRA à détecter et localiser les défauts. Les résultats obtenus décrivent l'état de santé du système photovoltaïque, où toute variation par rapport à l'état sain est considérée comme un défaut.

clés : FRA, Système PV, .détection des défaut, diagnostic.

Abstract

Photovoltaic cells have become popular as a renewable energy source, converting sunlight into electricity in a sustainable and environmentally friendly way. However, these systems can suffer from faults that reduce their efficiency or even cause damage. Diagnosing faults is essential to reduce maintenance costs and ensure continuity of service. In this study, we focus on the detection and location of faults such as reverse diodes, open circuits, short circuits, connector problems, shading and dust. We use the Frequency Response Analysis

(FRA) diagnostic method, which is simple and reliable. This method reduces the amount of information to be processed while detecting faults, regardless of their severity. Experiments and simulations using Matlab have validated this approach, demonstrating the ability of FRA to detect and locate faults. The results obtained describe the health state of the photovoltaic system, where any variation from the healthy state is considered a fault.

.Keywords: PV system, FRA, fault detection,diagnosis.
