

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira
Faculté des Sciences Appliquées



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
-البويرة -
كلية العلوم التطبيقية

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réaliser par : Belgacem Nazim

Thème

Fault detection of PV panels based on P–V curve monitoring

Pr. M. Rezki

Univ Bouira

Président

Dr. Z. Asradj

Univ Bouira

Examineur

Dr. S. Madi

Univ Bouira

Encadrante

2025/2026

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira
Faculté des Sciences Appliquées



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
-البويرة -
كلية العلوم التطبيقية

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réaliser par : Belgacem Nazim

Thème

**Détection des défauts des panneaux photovoltaïques basée sur
la surveillance des courbes caractéristiques**

Pr. M. Rezki

Univ Bouira

Président

Dr. Z. Asradj

Univ Bouira

Examineur

Dr. S. Madi

Univ Bouira

Encadrante

2025/2026



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

Au meilleur des pères et à ma très chère maman, qu'ils

*Trouvent en moi la source de leur fierté, eux qui ne
cessent de me*

*Donner avec amour le nécessaire pour que je puisse
arriver à*

Ce que je suis aujourd'hui.

*Que Dieu les protège et que la réussite soit toujours à
ma*

Portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Et à la mémoire de mon frère

Namir que Dieu ait son âme

À toute ma famille

Et à tous mes amis, et surtout taki, nour, meriem.

À tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'ont

*Aidé et encouragé de près ou de loin, qui étaient
toujours à*

*Mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin
d'études*



REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Tout Puissant pour nous avoir accordé la force et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements au docteur Saida Madi, notre encadrant dévoué, non seulement pour nous avoir proposé ce sujet de mémoire, mais aussi pour son soutien indéfectible et ses conseils méticuleux tout au long de ce parcours de recherche. Sous sa direction, nous avons eu le privilège de plonger dans le monde de la recherche dans des conditions optimales. Nous lui sommes profondément reconnaissants pour la confiance qu'il a placée en nos capacités, pour son attention constante et, par-dessus tout, pour son extraordinaire patience.

Sans ses précieux conseils, son soutien continu et sa grande disponibilité, la réussite de ce travail n'aurait pu être possible.

Notre gratitude s'adresse également à nos familles, en particulier à nos parents, frères et sœurs, pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux éminents membres du jury de thèse qui ont gracieusement consacré de leur temps pour examiner notre travail et l'enrichir de leurs précieuses suggestions, améliorant ainsi considérablement la qualité de ce mémoire.

Enfin, nous exprimons notre gratitude aux enseignants dévoués du Département de Génie Électrique pour leurs profondes connaissances.

-NAZIM-

Résumé

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont sensibles à divers défauts qui réduisent leur efficacité et leur fiabilité. Ces défauts se classent en deux catégories : les défauts électriques et les défauts physiques. Cette thèse porte sur les défauts électriques des panneaux photovoltaïques. Les courbes de performance d'un panneau Kyocera KC200GT ont été simulées à l'aide du logiciel MATLAB dans des conditions de test standard. De plus, l'influence des conditions atmosphériques, telles que le rayonnement solaire, la température ambiante et l'ombrage partiel, sur les performances du panneau PV a été étudiée. Cinq types de défauts ont été identifiés : circuit ouvert, court-circuit, ombrage partiel, points chauds et dégradation induite par la tension (PID). Une signature électrique caractéristique a été identifiée pour chaque défaut sur les courbes I-V et P-V, ainsi qu'une méthode de calcul de la perte de puissance associée, qui varie de 10,5 % (PID) à 100 % (circuit ouvert).

Mots-clés : photovoltaïque, détection de défauts, modèle à une diode, courbe I-V, courbe P-V, ombrage partiel.

Abstract

Photovoltaic (PV) systems are susceptible to various faults that reduce their efficiency and reliability. These faults can be classified into two categories: electrical faults and physical faults. This thesis focuses on electrical faults in photovoltaic panels. The performance curves of a Kyocera KC200GT panel were simulated using MATLAB software under standard test conditions. Additionally, the effects of atmospheric conditions, such as solar radiation, ambient temperature, and partial shading, on the PV panel's performance were investigated. moreover, five faults have been identified in photovoltaic panels: open circuit, short circuit, partial shading, hot spots, and voltage-induced degradation (PID).

A characteristic electrical signature was identified for each fault on the I-V and P-V curves, along with a method for calculating the associated power loss, which ranges from 10.5% (PID) to 100% (open circuit).

Keywords: photovoltaics, fault detection, single-diode model, I-V curve, P-V curve, partial shading.

ملخص

تتعرض أنظمة الخلايا الكهروضوئية لأعطال متنوعة تُقلل من كفاءتها وموثوقيتها. تُصنف هذه الأعطال إلى فئتين: أعطال كهربائية وأعطال فيزيائية. تركز هذه الأطروحة على الأعطال الكهربائية في الألواح الكهروضوئية. تمت محاكاة منحنيات أداء لوحة Kyocera KC200GT باستخدام برنامج MATLAB في ظل ظروف اختبار قياسية. بالإضافة إلى ذلك، دُرست تأثيرات الظروف الجوية، مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة والتظليل الجزئي، على أداء اللوحة الكهروضوئية. علاوة على ذلك، تم تحديد خمسة أعطال في الألواح الكهروضوئية: الدائرة المفتوحة، والدائرة القصيرة، والتظليل الجزئي، والبقع الساخنة، والتدهور الناتج عن الجهد (PID). تم تحديد بصمة كهربائية مميزة لكل عطل على منحنيات التيار-الجهد (I-V) والقدرة-الجهد (P-V)، إلى جانب طريقة لحساب فقد الطاقة المرتبط به، والذي يتراوح من 10.5 (PID) % إلى 100% (الدائرة المفتوحة).

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، كشف الأعطال، نموذج الصمام الثنائي الأحادي، منحنى التيار-الجهد، منحنى القدرة-الجهد، التظليل الجزئي.



Sommaire



Sommaire

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	III
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1	Introduction	4
I.2	Les énergies renouvelables :.....	4
I.2.1	Type d'énergies renouvelables :.....	4
I.2.2	Avantages et inconvénients des énergies renouvelables :.....	5
I.2.3	L'importance des énergies renouvelables	6
I.2.4	Transition vers l'énergie solaire photovoltaïque	6
I.3	Principe de fonctionnement d'un panneau PV :	7
I.3.1	L'effet photovoltaïque :	7
I.3.2	Structure d'une cellule PV :	8
I.1.1.1	Matériaux semi-conducteurs et types de cellules :	8
I.1.1.2	Structure interne de la cellule	9
I.1.1.3	Cellules et modules photovoltaïques :	11
I.4	Modélisation électrique du panneau :	12
I.4.1	Modèle à une diode (modèle à cinq paramètres) :	12
I.4.2	Modèle à deux diodes (modèle à sept paramètres)	15
I.5	Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque :	17
I.5.1	Courbes caractéristiques courant-tension (I–V) et puissance- tension (P–V)....	17
I.5.2	Le point de puissance maximale (The Maximum Power Point MPP) :	19
I.5.3	Facteur de forme (Fill Factor) :	20
I.6	Influence des paramètres externes sur les performances du panneau PV :	21

I.6.1	Influence de l'irradiante sur les performances du panneau PV :	21
I.6.2	Influence de la température sur les performances du panneau PV :	23
I.6.3	Influence de l'ombrage partiel sur les performances du panneau PV :	24
I.7	Conclusion :	27

Chapitre II : Analyse des Défaits dans les Panneaux

II.1	Introduction	29
II.2	Classification des défauts dans un panneau photovoltaïque.....	29
II.2.1	Défaut de circuit ouvert (Open-Circuit) dans un panneau photovoltaïque :	29
II.2.2	Défaut de court-circuit (short-circuit) dans un panneau photovoltaïque :	30
II.2.3	Défaut d'ombrage partiel dans un panneau photovoltaïque :	31
II.2.4	Les points chauds (Hot spots) dans un panneau photovoltaïque.....	32
II.2.5	Dégradation potentielle induite (PID) dans un panneau photovoltaïque	33
II.3	Effet des défauts sur les courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et tension-pression (P-V) :	34
II.3.1	Effet du défaut de dégradation PID sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :	36
II.3.2	Effet du défaut de point chaud sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :	37
II.3.3	Effet du défaut de l'ombrage partiel sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :	38
II.3.4	Effet du défaut du court-circuit sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :	39
II.3.5	Effet du défaut du circuit-ouvert sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :	40
II.4	Diminution de la puissance maximale (P_{max}) dans un panneau photovoltaïque :	41
Conclusion générale		47
Bibliographie et référence		57

Liste des figures

Figure I.1: Principales sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, géothermie).....	5
Figure I.2 : Du panneau solaire à la cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.3 Schéma de principe de l'effet photovoltaïque	7
Figure I.4 : Différents types de cellules photovoltaïques.....	9
Figure I.5 Structure interne de la jonction P-N d'une cellule photovoltaïque en silicium	10
Figure I.6 Architecture multicouche d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.7 : Rôle protecteur du film EVA : comparaison d'un module avec et sans encapsulation	11
Figure I.8 : Association de panneaux photovoltaïques en série et en parallèle formant un champ (array) PV.....	12
Figure I.9 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque : modèle à une diode	13
Figure I.10 : Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes (7 paramètres) d'un panneau photovoltaïque.....	15
Figure I.11 : Courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance- tension pour un panneau photovoltaïque KC200GT à STC.....	18
Figure I.12 Représentation graphique du point de puissance maximale MPP.....	19
Figure I.13 : Représentation graphique du facteur de forme d'un module photovoltaïque.	20
Figure I.14 : Influence de l'irradiance sur les performances du panneau photovoltaïque KC200GT.....	22
Figure I.15 : Influence de la température sur les performances du panneau photovoltaïque KC200GT	23
Figure I.16 : Influence de l'ombrage partiel du panneau photovoltaïque KC200GT	25
Figure II.1 : Représentation schématique des défauts dans un panneau photovoltaïque	30
Figure II.2 : Défaut d'ombrage partiel dans un panneau photovoltaïque	32
Figure II.3 Défaut Points Chauds.....	33
Figure II.4 : Défaut du PID sur la luminescence des cellules en silicium cristallin.....	34
Figure II.5 Courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque Kyocera KC200GT en conditions STC.....	35

Figure II.6 Effet du défaut de dégradation PID sur les courbes caractéristiques I-V et P-V pour le panneau KC200GT.....	34
Figure II.7: Effet du défaut de point chaud sur les courbes caractéristiques I-V et P-V pour le panneau KC200GT.....	35
Figure II.8 Effet d'un ombrage partiel de 30% sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.....	37
Figure II.9 effet de défaut du court-circuit sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque KC200GT	39
Figure II.10 Effet de défaut du circuit-ouvert sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque KC200GT : Annulation totale du courant ($I = 0$ A, $P_{max} = 0$ W).....	41

Liste des tableaux

Tableau I.1 La puissance maximal du module photovoltaïque KC200GT	19
Tableau I.2 La facture de forme pour le module photovoltaïque KC200GT.....	21
Tableau II.1 Effet de chaque défaut dans un panneau photovoltaïque calculé à l'aide de MATLAB.....	41
Tableau II.2 : Synthèse comparative de l'impact des différents défauts sur les paramètres électriques du module Kyocera KC200GT.....	44

Liste des symboles et abréviations

Eg :	Énergie de la bande interdite (gap) du semi-conducteur, (eV)
EVA	Ethylene Vinyl Acetate (encapsulant des cellules photovoltaïques)
FF	Fill Factor (Facteur de forme)
G	Irradiance solaire (W/m^2)
GADF	Gramian Angular Difference Field
GMPP	Maximum global de puissance (Global Maximum Power Point)
Gn :	Irradiance nominale aux STC (1000) (W/m^2)
I	Courant de sortie du module photovoltaïque (A)
I0	Courant de saturation inverse de la diode (A)
I0,n	Courant de saturation nominal aux STC(A)
I01, I02	Courants de saturation inverse des diodes D1 et D2 (modèle à 2 diodes) (A)
IA	Intelligence Artificielle
Id	Courant traversant la diode (A)
Id1, Id2	Courants des diodes D1 et D2 (modèle à 2 diodes) (A)
IEC	International Electrotechnical Commission (Commission électrotechnique internationale)
Imp	Courant au point de puissance maximale (A)
Iph	Courant photogénéré (A)
Iph,n	Courant photogénéré nominal aux STC (A)
IR	Infrarouge
Isc	Courant de court-circuit (A)
Isc,n	Courant de court-circuit nominal aux STC (A)
Ish	Courant de fuite à travers la résistance shunt (A)
I-V	Courant-Tension (Current-Voltage)
K	Constante de Boltzmann (J/K)

KI	Coefficient de température du courant de court-circuit (A/K)
LMPP	Local Maximum Power Point (Maximum local de puissance)
LSTM	Long Short-Term Memory (réseau de neurones récurrent)
MPP	Maximum Power Point (Point de puissance maximale)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Recherche du point de puissance maximale)
Ns	Nombre de cellules connectées en série
P	Puissance de sortie du module (W)
PID	Potential Induced Degradation (Dégradation potentielle induite)
Pmax	Puissance maximale (W)
P-N	Jonction Positive-Négative (jonction semi-conductrice)
P-V	Puissance-Tension (Power-Voltage)
PV	Photovoltaïque
Q	Charge élémentaire de l'électron (C)
RF	Random Forest (Forêt aléatoire)
Rs	Résistance série (Ω)
Rsh	Résistance shunt (parallèle) (Ω)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (Système de contrôle et d'acquisition de données)
STC	Conditions standards de test (Standard Test Conditions)
SVM	Support Vector Machine (Machine à vecteurs de support)
T	Température (K ou °C)
Tn	Température nominale aux STC (K)
UV :	Ultraviolet
V	Tension de sortie du module photovoltaïque (V)
Vd	Tension aux bornes de la diode (V)
Vmp	Tension au point de puissance maximale (V)

V_{oc}	Tension de circuit ouvert (V)
$V_{oc,n}$	Tension de circuit ouvert nominale aux STC (V)
V_t	Tension thermique d'une cellule ($k \cdot T/q$) (V)
$V_{t,n}$	Tension thermique nominale aux STC (V)
XGBoost :	Extreme Gradient Boosting (algorithme de boosting de gradient)
n	Facteur d'idéalité de la diode
n_1, n_2	Facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2
β_I	Coefficient de température du courant (A/K)
ΔT	Écart de température par rapport à la valeur nominale ($T - T_n$) (K)



Introduction générale



Introduction générale

Face à la raréfaction des ressources en combustibles fossiles et à l'urgence climatique, la transition vers les énergies renouvelables est devenue une priorité mondiale.[31] Parmi celles-ci, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place prépondérante grâce à son abondance, la flexibilité de son installation et sa propreté. [32]Au cours de la dernière décennie, le déploiement des systèmes photovoltaïques a connu une forte croissance, renforçant ainsi son rôle dans la production d'énergie[33].

En pratique, les panneaux solaires ne fonctionnent pas dans des conditions de test standard (STC). Exposés aux variations climatiques et environnementales, les panneaux photovoltaïques sont susceptibles de présenter divers défauts au cours de leur cycle de vie[34]. Ces défauts, qu'ils soient électriques (circuit ouvert, court-circuit) ou physico-environnementaux (ombrage partiel, points chauds, dégradation induite par le potentiel (PID)), entraînent une baisse du rendement énergétique, une réduction de la durée de vie des installations et peuvent, dans certains cas, présenter un risque pour la sécurité des biens et des personnes [35].

La détection rapide et le diagnostic précis de ces défauts sont donc essentiels pour garantir la rentabilité, la fiabilité et la durabilité des installations photovoltaïques.

Ce mémoire se compose de deux chapitres, suivis d'une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré aux systèmes photovoltaïques. Il présente le contexte des énergies renouvelables, le principe physique de l'effet photovoltaïque, la structure de la cellule solaire ainsi que les modèles électriques à une diode et à deux diodes utilisées pour représenter mathématiquement le comportement d'un module photovoltaïque. Ce chapitre étudie également les caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque (courbes courant-tension, puissance-tension, point de puissance maximale et facteur de forme) ainsi que l'influence des paramètres externes (irradiance solaire, température et ombrage partiel) sur les performances du module Kyocera KC200GT, retenu comme cas d'étude.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude des défauts affectant les panneaux photovoltaïques. Ces défauts sont regroupés en deux catégories principales : (i) les défauts électriques, tels que les circuits ouverts et les courts-circuits, et (ii) les défauts physiques et environnementaux, tels que l'ombrage partiel, les points chauds et la dégradation induite par le potentiel (PID). Pour chacun de ces défauts, une simulation numérique a été réalisée sous MATLAB. Les courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) ont été obtenues à partir du modèle à une diode en tenant compte de la présence des diodes de dérivation. Les résultats

obtenus ont permis d'identifier les signatures électriques caractéristiques de chaque défaut et d'évaluer leur impact sur les performances énergétiques du module photovoltaïque.



Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques



I.1 Introduction

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire en énergie électrique représente aujourd'hui une alternative essentielle face à l'épuisement des ressources fossiles. Dans le cadre de la transition énergétique, cette technologie se distingue par sa flexibilité d'installation, sa capacité d'adaptation aux environnements variés et son impact environnemental réduit par rapport aux sources conventionnelles. Le développement de cette filière repose sur l'utilisation de cellules photovoltaïques, constituées de matériaux semi-conducteurs assurant la transformation directe du rayonnement solaire en électricité.

Ce chapitre présentera les principes fondamentaux du phénomène de conversion photovoltaïque ainsi que les caractéristiques des matériaux qui en constituent la base.

I.2 Les énergies renouvelables :

On appelle énergies renouvelables toutes les sources d'énergie provenant de phénomènes naturels constamment renouvelés comme le rayonnement solaire, le vent ou encore le cycle de l'eau. Elles ne s'épuisent pas à l'échelle humaine et ont un impact environnemental réduit, contrairement aux énergies fossiles. Elles offrent ainsi une alternative pérenne aux sources d'énergie classiques [1].

I.2.1 Type d'énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont classées en plusieurs catégories, chacune utilisant un phénomène naturel différent, voire la figures I.1. Les plus importantes sont les suivants [2] :

- L'énergie solaire : elle provient du rayonnement du soleil et peut être transformée en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques ou en chaleur à l'aide de capteurs thermiques.
- L'énergie éolienne : elle est générée par la force du vent qui actionne des turbines pour produire de l'électricité.
- L'énergie hydraulique : elle provient du mouvement de l'eau (chutes, rivières, marées) et est transformée en électricité au moyen de turbines.
- La biomasse : elle est obtenue à partir de matières organiques (végétaux, déchets agricoles) afin de produire de la chaleur, de l'électricité ou des biocarburants.
- L'énergie géothermique : c'est l'énergie de la chaleur naturelle de la Terre qui est exploitée pour produire de l'électricité ou du chauffage.

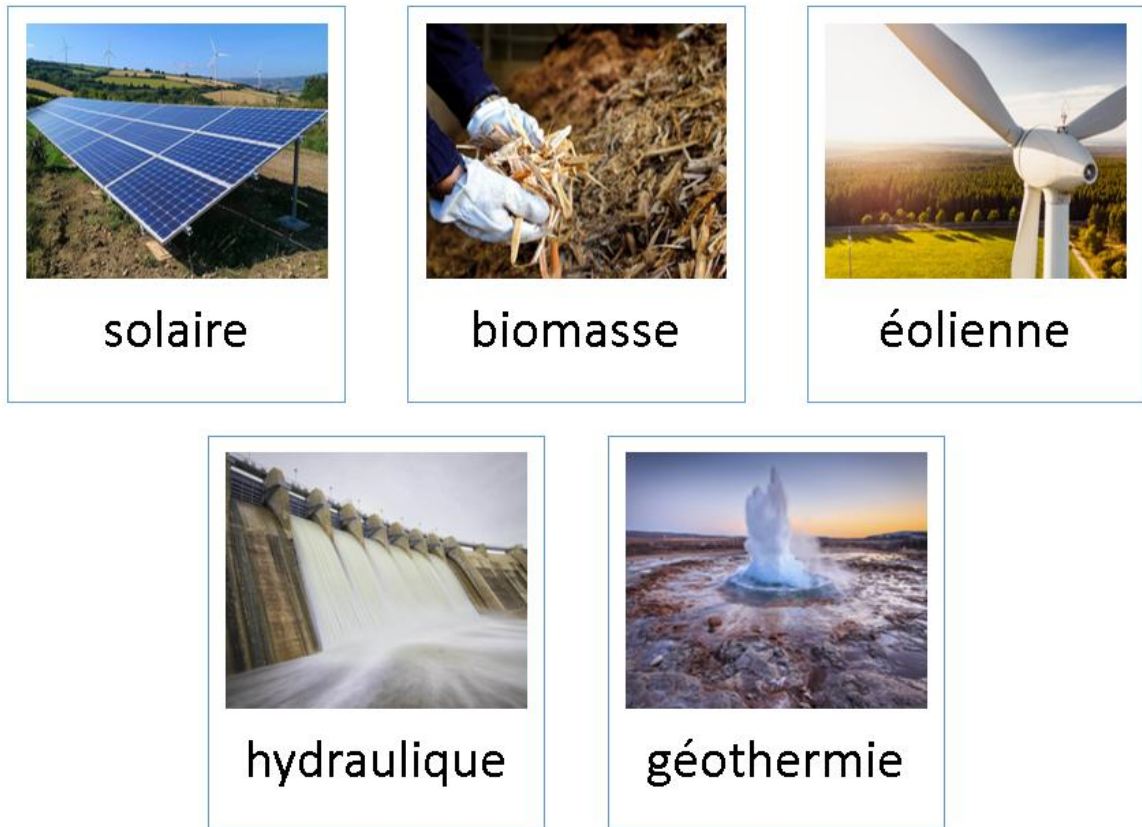


Figure I.1: Principales sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, géothermie).

Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place croissante dans le mix énergétique mondial, avec une capacité installée en augmentation rapide ces dernières années.

I.2.2 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables présentent de nombreux des avantages, tels que [1-2] :

- Ressources inépuisables le soleil, le vent et l'eau sont disponibles chaque jour. À l'inverse du pétrole ou du charbon, ces sources ne disparaîtront pas.
- Faible pollution : Les panneaux solaires et les éoliennes ne rejettent pas de fumée noire. Pas de CO₂. Pas de gaz toxiques. L'air reste plus propre.
- Disponibles localement : La plupart des pays ont du soleil ou du vent. Cela réduit la dépendance aux importations d'énergie.
- Coûts en baisse : Aujourd'hui, les panneaux solaires coûtent beaucoup moins cher qu'il y a dix ans. L'électricité verte devient aussi abordable que l'électricité classique.
- Emplois locaux : Il faut des gens pour installer les panneaux, les réparer et les nettoyer. Ces emplois ne peuvent pas être délocalisés. On les fait sur place.

Les énergies renouvelables présentent de nombreux inconvénients, tels que [1]:

- 1) Production variable : Pas de soleil la nuit, pas de vent certains jours. La production dépend directement de la météo.
- 2) Le coût de départ est élevé : Acheter des panneaux solaires ou une éolienne coûte cher au début. Il faut plusieurs années avant de rentabiliser l'installation.
- 3) Investissement initial élevé : Acheter et installer des panneaux ou des éoliennes demande un budget important. Le retour sur investissement prend plusieurs années.
- 4) Le stockage est difficile : Produire de l'électricité ne suffit pas. Il faut aussi la garder pour plus tard. Les batteries coûtent encore cher. Stocker de grandes quantités reste un vrai problème.
- 5) Impact de fabrication : Fabriquer un panneau solaire demande de l'énergie. On utilise aussi des produits chimiques. Mais sur toute sa durée de vie, un panneau produit bien plus d'énergie propre qu'il n'en a consommée pour le fabriquer.

I.2.3 L'importance des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables jouent un rôle clé dans la transition énergétique mondiale. Elles permettent de réduire la dépendance aux énergies fossiles, de limiter les émissions de CO₂ et de promouvoir un développement durable [1].

Leur développement constitue aujourd'hui une priorité dans de nombreux pays, et aussi qu'elles créent des emplois locaux et renforcent l'indépendance énergétique.

I.2.4 Transition vers l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire elle se distingue de l'autre source énergies par son abondance et son accessibilité. Elle représente une solution prometteuse pour la production d'électricité propre, notamment grâce aux systèmes photovoltaïques, qui permettent une conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique [1].

L'énergie photovoltaïque affiche la plus forte croissance du secteur énergétique. La capacité installée a augmenté de 25 % en 2022, atteignant près de 4,5 % de la production mondiale d'électricité [2].

Ainsi, les cellules photovoltaïques apparaissent comme un moteur clé pour accélérer la transition énergétique [3].

I.3 Principe de fonctionnement d'un panneau PV :

Les panneaux photovoltaïques se composent de plusieurs cellules solaires reliées en série et en parallèle afin de générer une puissance de sortie déterminée, voire la figure I.2.

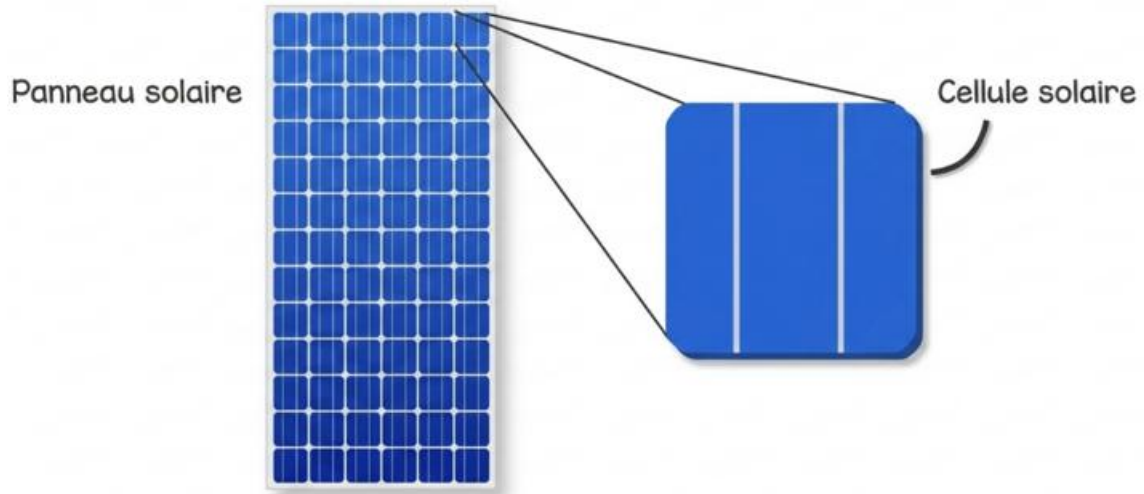


Figure I.2 : Du panneau solaire à la cellule photovoltaïque

Une cellule PV est l'unité essentielle d'un système de production d'énergie solaire dans laquelle la lumière du soleil est rapidement convertie en énergie électrique. La cellule solaire est un dispositif à jonction P-N via l'action de l'effet photovoltaïque [4].

I.3.1 L'effet photovoltaïque :

Le phénomène physique essentiel qui assure la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque. Ce terme désigne la génération d'une force électromotrice EMF au sein d'un matériau semi-conducteur exposé à un rayonnement lumineux, voire la figure I.3.

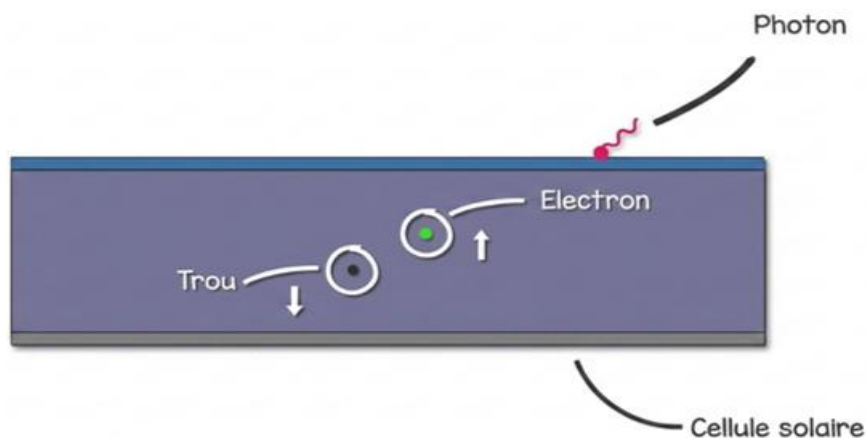


Figure I.3 Schéma de principe de l'effet photovoltaïque

Le processus de conversion se déroule en trois étapes cruciales [5] :

- 1) Absorption des photons : lorsqu'un photon solaire atteint la surface de la cellule, le semi-conducteur l'absorbe si son énergie est suffisante, c'est-à-dire supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du silicium ($E_{\text{photon}} \geq E_g = 1.12 \text{ eV}$). L'énergie transférée provoque l'éjection d'un électron de la bande de valence, créant ainsi une paire électron-trou.
- 2) Création de paires électron-trou : l'électron, une fois excité, traverse la bande interdite et entre dans la bande de conduction, laissant derrière lui un trou ayant une charge positive. Cette transition constitue le mécanisme fondamental de génération de porteurs libres dans le semi-conducteur.
- 3) Séparation et collecte des charges : le champ électrique interne à la jonction P-N guide les porteurs de charge : les électrons se déplacent en direction de la zone de type N tandis que les trous se dirigent vers la zone de type P. Cette dissociation engendre une différence de potentiel aux extrémités de la cellule, produisant par conséquent un courant électrique constant connu sous le nom de photocourant I_{ph} .

Ce photocourant est directement proportionnel au flux de photons incidents, c'est-à-dire au rayonnement solaire G , comme indiqué par l'équation I.1.

$$I_{\text{ph}} \propto G \quad (\text{I.1})$$

I.3.2 Structure d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur qui convertit directement l'énergie lumineuse incidente en énergie électrique par l'intermédiaire de l'effet photovoltaïque. Elle constitue l'élément de base de tout système photovoltaïque, et plusieurs cellules peuvent être interconnectées pour former des modules ou des panneaux.

Cette conversion d'énergie s'effectue sans pièces mobiles ni émission de gaz à effet de serre en phase d'exploitation, ce qui fait de la cellule photovoltaïque un composant central des systèmes de production d'électricité à partir de sources renouvelables [6].

I.3.2.1 Matériaux semi-conducteurs et types de cellules :

Le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques c'est le silicium, grâce à son abondance, de sa stabilité chimique et de ses propriétés électroniques adaptées. La largeur de bande interdite (band gap) du silicium est d'environ 1,12 eV, ce qui lui permet d'absorber efficacement une partie significative du spectre solaire [7]. En fonction du procédé de fabrication, on distingue plusieurs types de cellules, voire la figure I.4 :

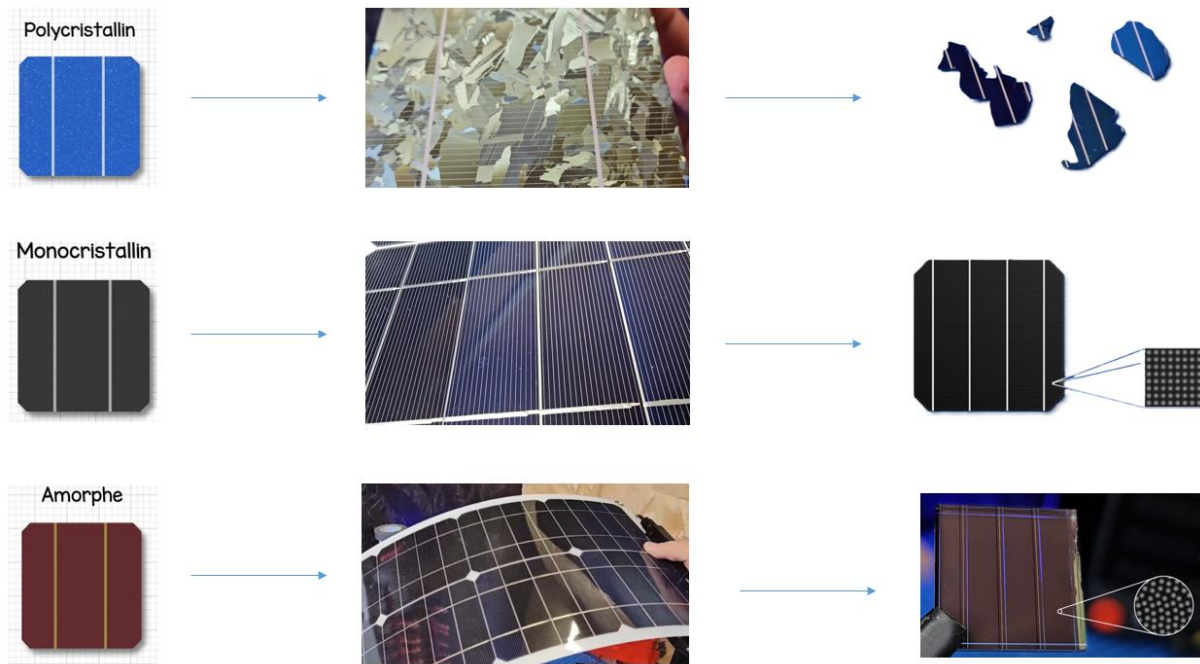


Figure I.4 : Différents types de cellules photovoltaïques

- Le silicium monocristallin : Il provient d'un seul cristal pur. Il offre le meilleur rendement parmi les trois technologies. Cependant, son coût de fabrication reste élevé
- Le silicium polycristallin : Il est composé de plusieurs cristaux. Son rendement est légèrement inférieur au monocristallin. Mais son prix est plus accessible. C'est un bon compromis pour de nombreuses applications
- Le silicium amorphe : Il ne possède pas de structure cristalline ordonnée. On le dépose en couches très minces. Cela réduit les coûts de production. En revanche, son rendement est nettement plus bas.

Aujourd'hui, les cellules en silicium cristallin (monocristallin et polycristallin) dominent encore le marché résidentiel et industriel [8]

I.3.2.2 Structure interne de la cellule

Une cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur constitué de plusieurs couches fonctionnelles superposées, chacune jouant un rôle précis dans le processus de conversion photoélectrique. La figure I.5 illustre cette architecture multicouche caractéristique. De la surface vers la base, on distingue les éléments suivants [6]

- 1) La jonction P-N : la cellule photovoltaïque est réalisée en dopant différemment deux couches du même semi-conducteur (voir la figure I.6) :

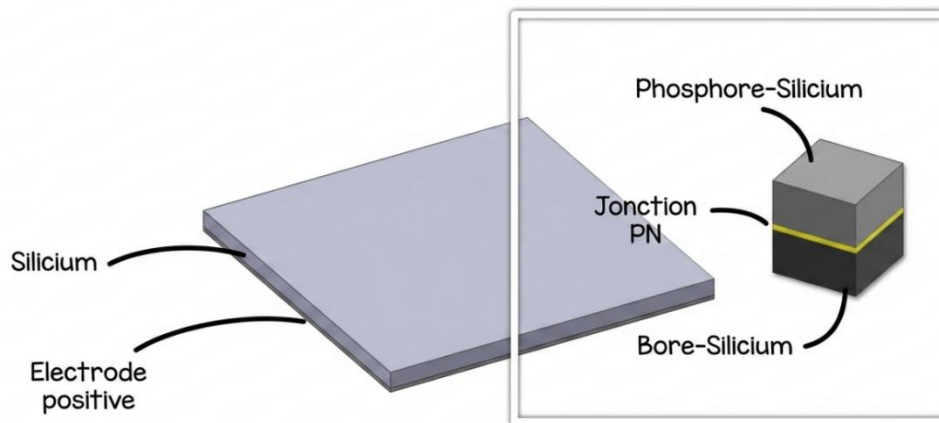


Figure I.5 Structure interne de la jonction P-N d'une cellule photovoltaïque en silicium

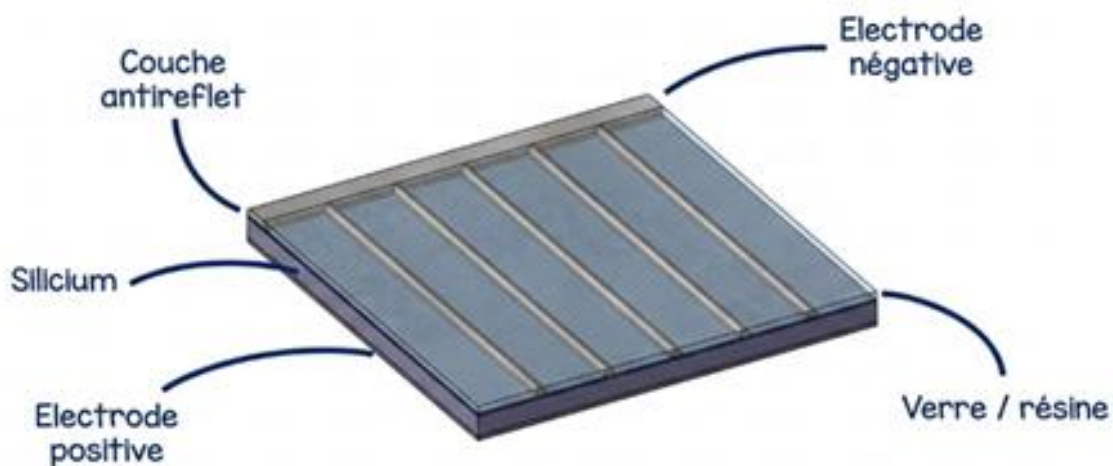


Figure I.6 : Architecture multicouche d'une cellule photovoltaïque

- Couche N (émetteur) : c'est une couche fine de silicium dopée aux atomes donneurs (phosphore), riche en électrons libres. Elle constitue la face avant de la cellule.
- Couche P (base) : c'est une couche épaisse de silicium dopée aux atomes accepteurs (bore), riche en trous. Elle constitue le substrat principal de la cellule et absorbe la majorité des photons incidents.

À l'interface entre ces deux couches se forme une zone de déplétion, siège d'un champ électrique interne permanent. Ce champ est responsable de la séparation des paires électron-trou générées par l'absorption des photons, faisant de la jonction P-N le cœur actif de la cellule photovoltaïque.

- 2) Verre de protection : C'est la couche supérieure transparente du module. Elle protège la cellule contre les chocs, l'humidité et la poussière. Elle transmet aussi le maximum de rayonnement solaire vers les couches actives.

- 3) Couche antireflet : Un film mince déposé sur la surface de la cellule, voir la figure I.6. Il est souvent fait de nitrure de silicium (Si_3N_4). Il réduit les pertes par réflexion de la lumière. Il augmente ainsi le rendement d'absorption des photons.
- 4) Contact métallique arrière (l'électrode positive) : Une électrode en aluminium déposée au dos de la cellule. Elle collecte les trous. Elle ferme aussi le circuit électrique externe.
- 5) Contact métallique avant (l'électrode négative) : Une grille de fils métalliques fins sur la face avant. Elle collecte les électrons. Elle n'obstrue pas trop la surface exposée à la lumière
- 6) Le film EVA : C'est une feuille polymère transparente, voir la figure I.7. On la place de chaque côté des cellules dans le module. Elle joue trois rôles essentiels : l'encapsulation des cellules, la protection contre l'humidité, et l'adhésion mécanique entre le verre, les cellules et le backsheet. Sa dégradation progressive sous UV et à la chaleur est une cause de la dégradation PID. Nous analyserons ce phénomène au Chapitre II.

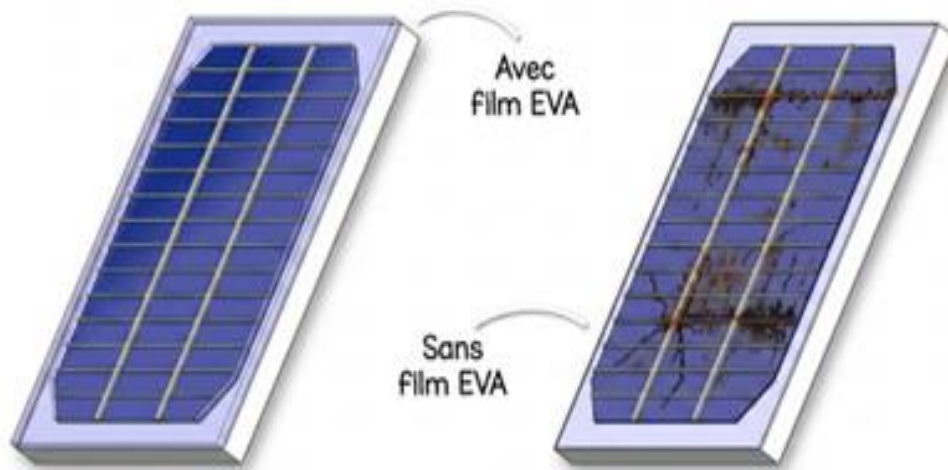


Figure I.7 : Rôle protecteur du film EVA : comparaison d'un module avec et sans encapsulation

I.3.2.3 Cellules et modules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque individuelle produit une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V sous un courant de quelques ampères, ce qui est insuffisant pour la plupart des applications. Pour obtenir des niveaux de tension et de puissance exploitables, les cellules sont associées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque. Plusieurs modules interconnectés constituent un panneau, et un ensemble de panneaux forme un champ (array) photovoltaïque (voir la figure I.8). Pour obtenir des niveaux de tension et de puissance exploitables, les modules sont interconnectés en série pour augmenter la tension, et en parallèle pour augmenter le courant,

formant ainsi un champ photovoltaïque (array) connecté à un régulateur de charge ou un onduleur [9].

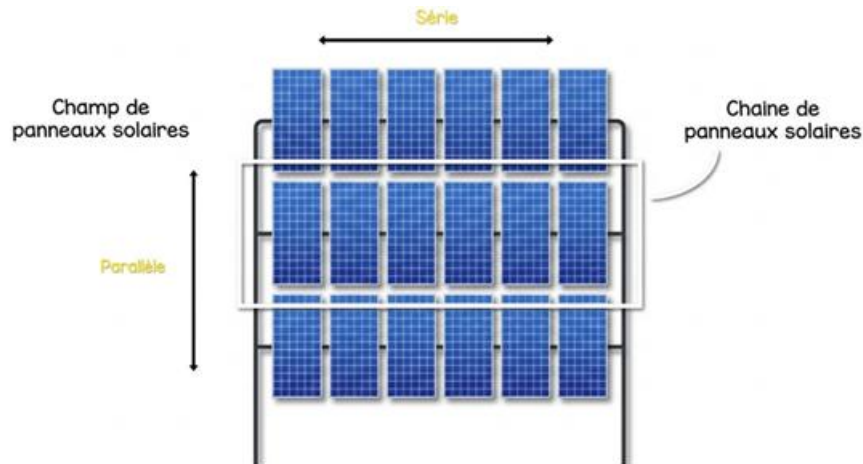


Figure I.8 : Association de panneaux photovoltaïques en série et en parallèle formant un champ (array) PV

Le module Kyocera KC200GT, étudié dans ce mémoire, regroupe 54 cellules en série, délivrant une tension en circuit ouvert de $V_{oc} = 32.9 \text{ V}$, et une puissance nominale de 200 W dans les conditions standards de test 'standard test conditions STC' ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, et $T = 25 \text{ °C}$).

I.4 Modélisation électrique du panneau :

La modélisation d'un panneau photovoltaïque consiste à représenter son comportement par un circuit électrique équivalent. Il est permis de prédire les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du module en fonction des conditions environnementales (l'irradiance solaire G et la température T), sans recourir à des mesures expérimentales coûteuses. Deux modèles sont principalement utilisés dans la littérature : le modèle à une diode et le modèle à deux diodes [9].

I.4.1 Modèle à une diode (modèle à cinq paramètres) :

Le modèle à une diode, également appelé modèle à cinq paramètres, est le modèle le plus répandu dans la littérature scientifique pour sa simplicité et sa précision satisfaisante. Son circuit équivalent illustré à la figure I.9 est composé des éléments suivants [9] :

- I_{ph} : c'est une source de courant photogénéré, proportionnelle à l'irradiance G
- D : c'est une diode idéale représentant la jonction P-N.

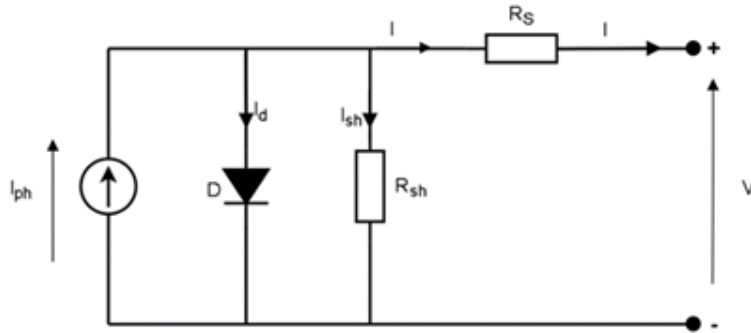


Figure I.9 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque : modèle à une diode

- R_s : c'est une résistance série, modélisant les pertes ohmiques dans les contacts et connexions.
- R_{sh} : c'est une résistance shunt, modélisant les courants de fuite

Pour obtenir l'équation analytique régissant le comportement du module, nous appliquons les lois fondamentales des circuits électriques (lois de Kirchhoff) à la figure I.9 [9].

1) Étape 1 : Application de la loi des Nœuds

En appliquant la loi des nœuds au sommet du circuit (jonction parallèle), la somme des courants entrants est égale à la somme des courants sortants comme montré par l'équation I.2.

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \quad (I.2)$$

L'utilisation de cette équation permet de calculer le courant du module PV à l'aide de l'équation suivante :

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

2) Étape 2 : Expression du courant de la diode (I_d)

Le courant traversant la diode idéale D suit la loi de Shockley d'un semi-conducteur [25] est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \times \left[\exp\left(\frac{V_d}{(n \times N_s \times V_t)}\right) - 1 \right] \quad (I.4)$$

Où $V_t = k \cdot \frac{T}{q}$ est la tension thermique d'une cellule photovoltaïque, avec :

- $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann
- $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C est la charge de l'électron
- T = la température en Kelvin

Aux conditions standards de test 'Standard Test Conditions STC' la température est égale à 298.15 K et la tension thermique d'une cellule photovoltaïque est égale à 0.02585 V.

3) Étape 3 : Application de la Loi des Mailles

En observant la maille de sortie, la tension interne V_d aux bornes de la diode est égale à la tension aux bornes du module (V) augmentée de la chute de tension provoquée par la résistance série (R_s). La tension interne V_d aux bornes de la diode est obtenue à l'aide de l'équation I.5.

$$V_d = V + I \times R_s \quad (I.5)$$

En remplaçant cette équation dans l'équation I.4, le courant résultant est donné par l'équation I.6.

$$I_d = I_0 \times \left[\exp \left(\frac{(V + I \times R_s)}{(n \times N_s \times V_t)} \right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

4) Étape 4 : Expression du courant de fuite shunt (I_{sh})

D'après la loi d'Ohm, le courant I_{sh} qui circule à travers la résistance parallèle R_{sh} dépend directement de la tension V_d à ses bornes comme indiqué par l'équation suivante :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{(V + I \times R_s)}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

5) Étape 5 : Équation finale implicite

En plaçant les équations (I6) et (I7) dans l'équation (I.3), nous arrivons à l'équation fondamentale qui donne le courant I du module PV en fonction de sa tension de sortie V , comme indiqué par l'équation suivante :

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

Le courant photogénéré par le module photovoltaïque est directement proportionnel à l'irradiance solaire G . il est calculé par l'équation suivante :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_I \times \Delta T) \times \left(\frac{G}{G_n} \right) \quad (I.9)$$

Où :

- $I_{ph,n}$: le courant photogénéré à les conditions nominales STC (A)
- K_I : le coefficient de température du courant de court-circuit (A/K)
- $\Delta T = T - T_n$: l'écart de température par rapport aux conditions nominales (K)
- G : l'irradiance actuelle (W/m^2)
- $G_n = 1000 W/m^2$: l'irradiance nominale aux STC

Le courant de saturation dépend fortement de la température selon la relation suivante :

$$I_0 = I_{0,n} \times \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \times \exp \left[\left(\frac{q \times E_g}{n \times k} \right) \times \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.10)$$

Où :

- $I_{0,n}$: le courant de saturation nominal aux STC (A)
- $E_g = 1.12 eV$: l'énergie de la bande interdite du silicium
- $T_n = 298.15 K (25^\circ C)$: la température nominale

Le courant de saturation nominal est déterminé à partir des données de la fiche technique selon l'équation I.11.

$$I_{0n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{n \times N_s \times V_{t,n}}\right) - 1} \quad (I.11)$$

où :

- $I_{sc,n}$: le courant de court-circuit nominal aux STC (A)
- $V_{oc,n}$: la tension en circuit ouvert nominale aux STC (V)
- $V_{t,n} = \frac{k \times T_n}{q}$: la tension thermique nominale

La relation entre le courant photogénéré nominal et le courant de court-circuit nominal est donnée par l'équation suivante [25] :

$$I_{ph,n} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} \times I_{sc,n} \quad (I.12)$$

Cette équation tient compte de l'effet des résistances R_s et R_{sh} sur le courant de court-circuit.

I.4.2 Modèle à deux diodes (modèle à sept paramètres)

Le modèle à deux diodes en tenant compte de manière distincte de deux mécanismes physiques de recombinaison des porteurs de charge au sein de la cellule photovoltaïque [8]. Son circuit électrique équivalent est illustré à la figure I.10.

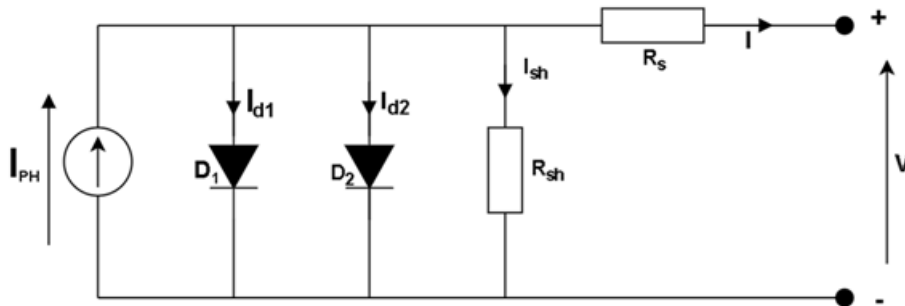


Figure I.10 : Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes (7 paramètres) d'un panneau photovoltaïque.

Ce circuit introduit deux diodes en parallèle [8] :

- La diode ' D_1 ' modélise la recombinaison dans la zone quasi-neutre, avec un facteur d'idéalité ' $n_1 \approx 1$ ' dominant à fort éclairement.
- La diode ' D_2 ' modélise la recombinaison dans la zone de déplétion (zone de charge d'espace), avec un facteur d'idéalité ' $n_2 \approx 2$ ' dominant à faible éclairement.

Pour modéliser le comportement de ce circuit, il faut appliquer les lois de Kirchhoff.

1) Étape 1 : Application de la loi des nœuds

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les courants au niveau de la branche supérieure, le courant photogénéré est divisé entre les deux diodes, la branche de fuite parallèle et la charge externe (voire l'équation I.13).

$$I_{ph} = I_{d1} + I_{d2} + I_{sh} + I \quad (I.13)$$

En exprimant le courant de sortie I fourni par le panneau par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (I.14)$$

2) Étape 2 : Expression des courants des diodes (I_{d1} et I_{d2})

En appliquant l'équation de Shockley aux deux jonctions PN parallèles, nous obtenons les équations des courants des diodes D1 et D2 données respectivement par les équations (I.15) et (I.16).

$$I_{d1} = I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{(n_1 \times N_s \times V_t)}\right) - 1 \right] \quad (I.15)$$

$$I_{d2} = I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{(n_2 \times N_s \times V_t)}\right) - 1 \right] \quad (I.16)$$

Où I_{01} et I_{02} représentent respectivement les courants de saturation inverse de la première et de la deuxième diode.

3) Étape 3 : Détermination de la tension de branche V_d

Par la loi des mailles, la tension interne V_d appliquée aux bornes des trois branches parallèles est donné par l'équation suivante :

$$V_d = V + I \times R_s \quad (I.17)$$

4) Étape 4 : Expression du courant de fuite shunt (I_{sh})

Selon la loi d'Ohm, le courant traversant la résistance parallèle R_{sh} est exprimé par l'équation (I.18).

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{(V + I \times R_s)}{R_{sh}} \quad (I.18)$$

5) Étape 5 : Équation analytique générale

En remplaçant les équations (I.15-I.18) dans l'équation (I.14), on obtient le courant du module photovoltaïque, comme indiqué par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[\exp\left(\frac{V + I \times R_s}{(n_1 \times N_s \times V_t)}\right) - 1 \right] - I_{02} \times \left[\exp\left(\frac{V + I \times R_s}{(n_2 \times N_s \times V_t)}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \quad (I.19)$$

Afin de réduire le coût computationnel et de simplifier la phase d'identification des paramètres, une démarche courante dans la littérature consiste à poser l'égalité des courants de saturation inverse ($I_{01} = I_{02} = I_0$) et à fixer les facteurs d'idéalité à leurs valeurs théoriques ($n_1 = 1$ et $n_2 = 2$) [26]. Sous ces conditions, l'équation (I.19) sera obtenue comme indiqué par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[\exp \left(\frac{V+I \times R_s}{N_s \times V_t} \right) - 1 \right] - I_0 \times \left[\exp \left(\frac{V+I \times R_s}{2 \times N_s \times V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V+I \times R_s}{R_{sh}} \quad (I.20)$$

Cette formulation simplifiée préserve un excellent compromis entre la fidélité physique des recombinaisons et la vitesse de calcul lors des simulations numériques [26].

I.5 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque sont étudiées à partir de ses courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), ainsi que par la détermination du point de puissance maximale (MPP) et l'évaluation du facteur de remplissage (Fill Factor), dans des conditions de test standard. L'analyse repose sur la résolution numérique du modèle à une diode du module Kyocera KC200GT, implémenté et simulé à l'aide du logiciel MATLAB afin de reproduire ses performances électriques en conditions réelles [9].

I.5.1 Courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance- tension (P-V)

La courbe I-V représentée dans la figure I.11 illustre la relation non linéaire entre le courant délivré et la tension aux bornes du module photovoltaïque, régie par l'équation mathématique (I.8). Cette non-linéarité provient du modèle à une diode intégrant le courant photogénéré, le courant de saturation et les résistances série et shunt.

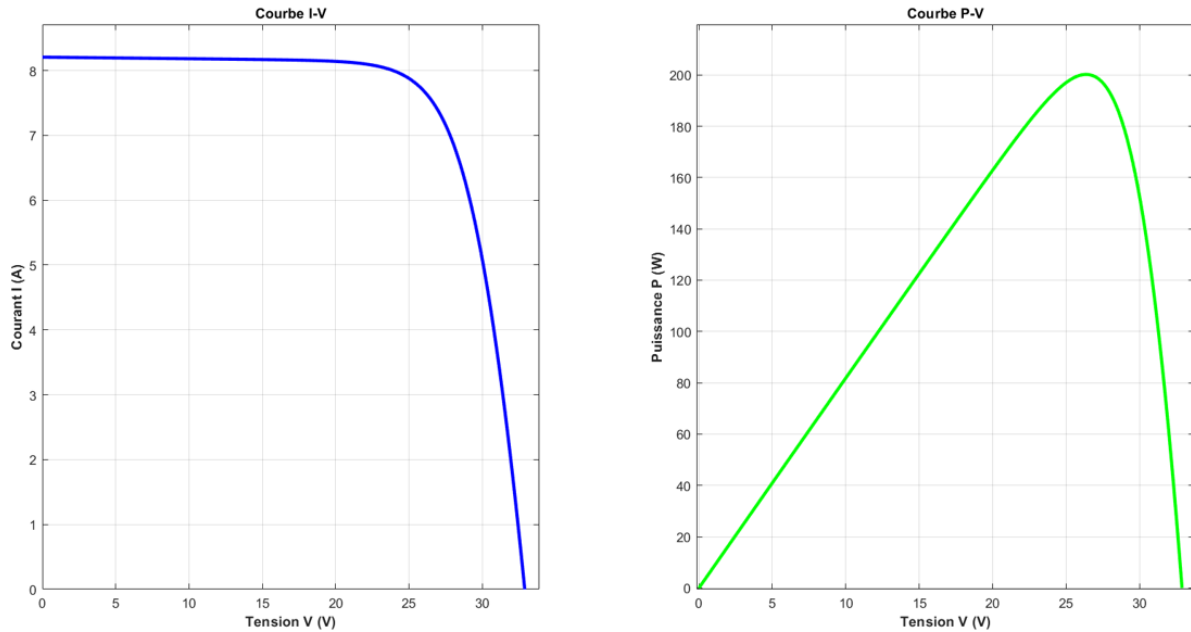


Figure I.11 : Courbes caractéristiques courant-tension (I–V) et puissance- tension pour un panneau photovoltaïque KC200GT à STC.

La courbe P-V représentée dans la figure I.11 est obtenue en appliquant l'égalité « $P = V \times I$ » à chaque point. Elle présente une forme en cloche, débutant à puissance nulle au court-circuit, atteignant un maximum au MPP, puis redescendant à zéro au circuit ouvert. La courbe puissance-tension est fortement influencée par les conditions environnementales, ce qui justifie [10]. L'utilisation d'algorithmes de suivi du point de puissance maximale pour une surveillance en temps réel [9]. La courbe I-V présente trois zones de fonctionnement distinct :

- Zone 1 : source de courant correspondante à une tension de $0 \leq V \leq V_{mp}$: le courant reste quasi-constant proche de $I_{sc} = 8.21$ A. Cette zone correspond à un comportement de source de courant contrôlée par la lumière.
- Zone 2 : knee point « Genou » correspondant à une tension $V \approx V_{mp}$: zone de transition marquée autour de V_{mp} (dans le cas étudié $V_{mp} = 26.38$ V), où se situe le MPP.
- Zone 3 : source de courant correspondante à une tension de $V_{mp} \leq V \leq V_{oc}$: le courant chute rapidement vers zéro à l'approche de $V_{oc} = 32.90$ V.

La courbe P-V adopte une forme unimodale asymétrique avec un seul maximum correspondant à $P_{max} = 200.17$ W [9].

I.5.2 Le point de puissance maximale (The Maximum Power Point MPP) :

Le point de puissance maximale ‘MPP’ est le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque pour lequel la puissance électrique est maximale. Il est caractérisé par la tension V_{mp} et le courant I_{mp} , dont le produit donne par l’équation (I.21) :

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (I.21)$$

Sur la courbe I-V, il correspond au point de coordonnées (V_{mp}, I_{mp}) . Sur la courbe P-V, il apparaît comme le sommet unique de la courbe (voire la figure I.12). En dehors de ce point, toute déviation vers une tension plus haute ou plus basse entraîne une réduction de la puissance produite.

Les résultats de simulation obtenus sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau I.1 La puissance maximal du module photovoltaïque KC200GT

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Tension au point de puissance maximale	V_{mp}	26.38	V
Courant au point de puissance maximale	I_{mp}	7.59	A
Puissance maximale	P_{max}	200.2242	W

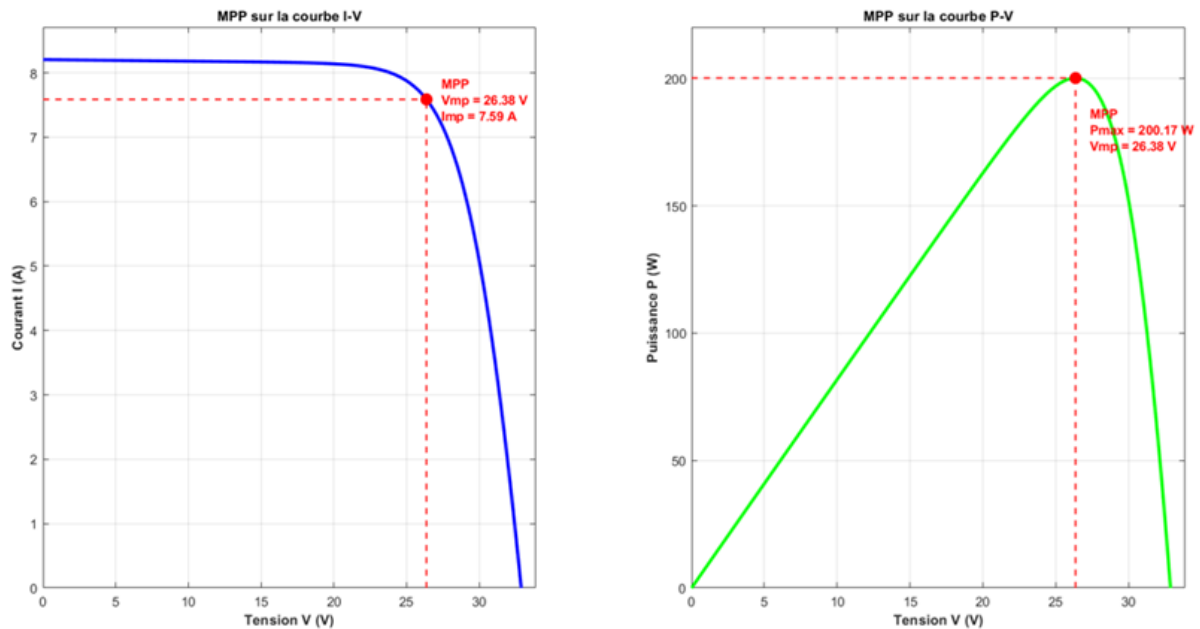


Figure I.12 : Représentation graphique du point de puissance maximale MPP

Ce point se situe dans la zone de transition entre le régime de courant constant et la chute rapide du courant. Le suivi de ce point à l'aide d'algorithmes MPPT est essentiel afin de maximiser la puissance extraite du système [8].

I.5.2 Facteur de forme (Fill Factor) :

Le facteur de forme (FF) est un paramètre adimensionnel fondamental permettant d'évaluer la qualité du module photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale réellement extractible et la puissance théorique idéale [7], comme donné par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (I.22)$$

La figure I.13 illustre graphiquement le facteur de forme à partir des courbes I–V, en mettant en évidence la différence entre la puissance théorique et la puissance réelle au point de puissance maximale (MPP).

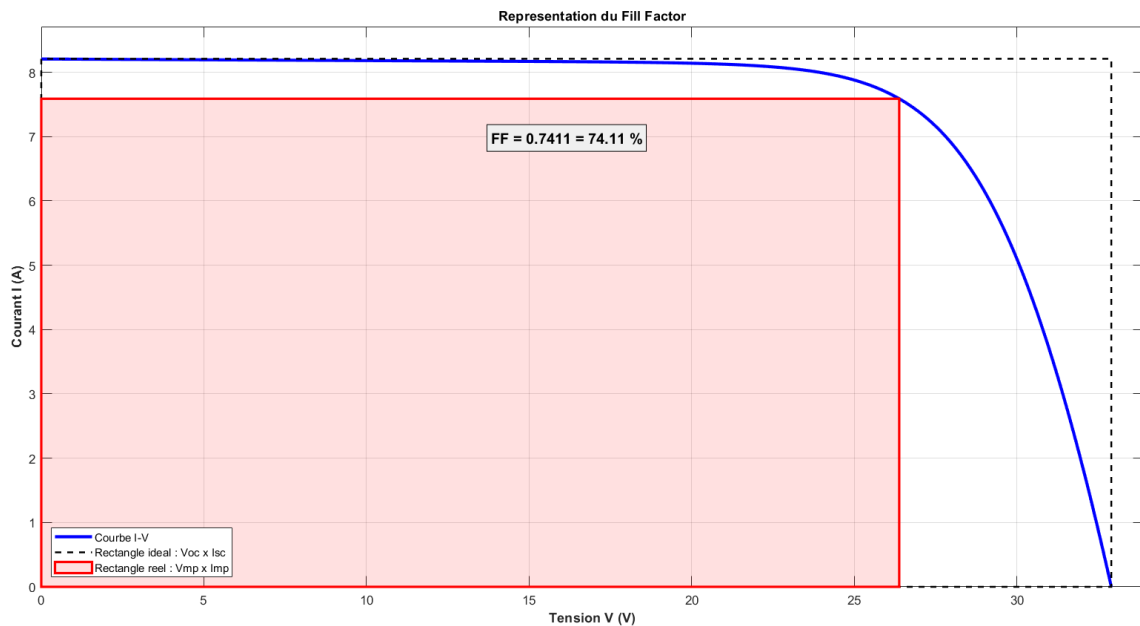


Figure I.13 : Représentation graphique du facteur de forme d'un module photovoltaïque.

Le facteur de forme est directement lié à la qualité de la jonction P-N et aux pertes résistives internes du module. Un facteur de forme élevé traduit une faible résistance série et de faibles pertes internes [7].

Le tableau I.2 résume l'application numérique de la facture de forme au module photovoltaïque KC200GT.

La valeur du facteur de forme conforme aux standards des modules en silicium (FF typique : 70 % – 82 %), indique un bon compromis entre [7] :

- Les pertes ohmiques liées à la résistance série $R_s = 0.221 \Omega$
- Les courants de fuite associés à la résistance shunt $R_{sh} = 415.4 \Omega$

Une diminution du facteur de forme constitue généralement un indicateur de dégradation du module photovoltaïque [7], ce qui en fait un paramètre clé pour la détection des défauts analysée au chapitre II.

Tableau I.2I Facteur de forme (Fill Factor) pour le module photovoltaïque Kyocera KC200GT en conditions de test standard (STC)

Type	Expression	Valeur
Puissance idéale (rectangle)	$V_{ov} \times I_{sc}$	$32.90 \times 8.21 = 270.109W$
Puissance réelle	$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$	$26.38 \times 7.59 = 200.2242W$
Facteur de forme FF	$\frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$	74.1271 %

I.6 Influence des paramètres externes sur les performances du panneau PV :

L'évaluation des performances électriques d'un module photovoltaïque nécessite une compréhension approfondie de ses interactions avec son environnement opérationnel. Pratiquement, le générateur PV est soumis à des fluctuations climatiques continues et à des perturbations physiques qui altèrent son rendement de conversion [26]. À l'aide d'une modélisation à une diode résolue par la méthode itérative de Newton-Raphson, cette section analyse les variations des caractéristiques électriques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) du panneau Kyocera KC200GT. Les impacts de trois facteurs critiques, à savoir : l'intensité du rayonnement solaire, l'élévation de la température de jonction et les phénomènes d'ombrage partiel non uniforme, ont été analysés dans les sous-sections suivantes.

I.6.1 Influence de l'irradiante sur les performances du panneau PV :

L'irradiance solaire, symbolisée par G et mesurée en W/m^2 , indique la quantité de puissance du rayonnement solaire captée par un mètre carré du module photovoltaïque. Elle représente un élément essentiel dans l'opération des systèmes photovoltaïques, car elle fixe directement le volume d'énergie accessible pour la transformation en électricité. Du point de vue physique, une forte irradiance signifie un grand nombre de photons incidents sur la cellule photovoltaïque, stimulant ainsi la production de porteurs de charge dans le matériau semi-conducteur. La

figure I.14 présente les courbes I–V et P–V du module photovoltaïque KC200GT pour différents niveaux d’irradiance variant de 200 à 1000 W/m² à une température constante (25°C).

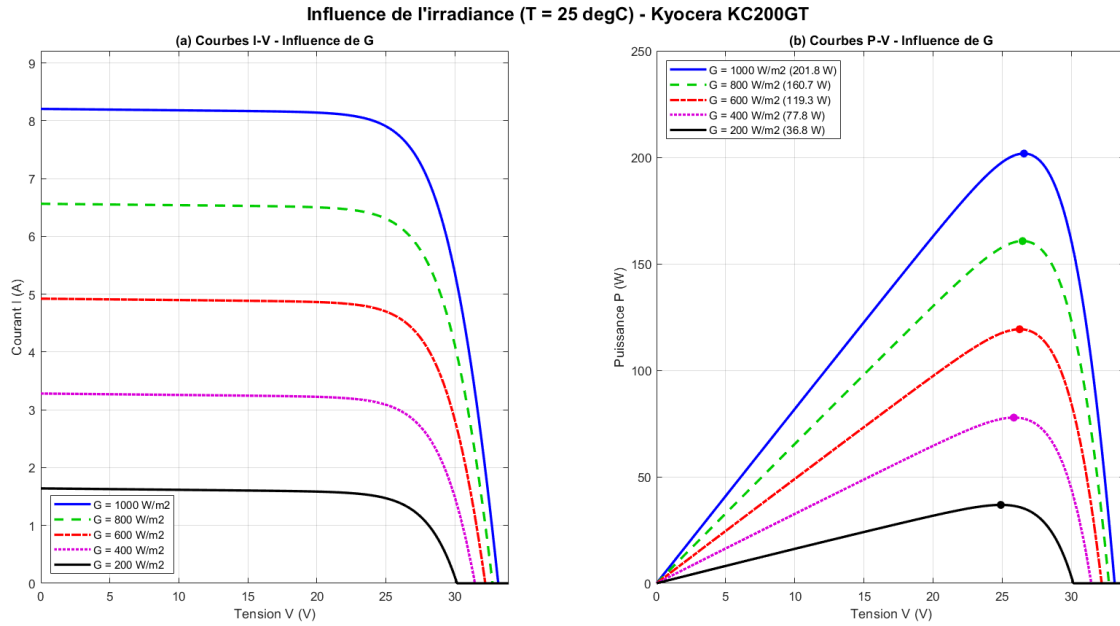


Figure I.14 : Influence de l’irradiance sur les performances du panneau photovoltaïque KC200GT

Les résultats de simulation montrent que le courant de court-circuit (I_{sc}) est fortement dépendant de l’irradiance, avec une variation quasi linéaire. En effet I_{sc} diminue de 8.21 A à 1.64 A lorsque l’irradiance passe de 1000 à 200 W/m². Ce comportement s’explique par le fait que le nombre de porteurs de charge générés par effet photovoltaïque est directement proportionnel au flux de photons incidents. En revanche, la tension de circuit ouvert (V_{oc}) est faiblement affectée, passant de 33.15V à 30.18V ce qui confirme que V_{oc} dépend logarithmiquement de l’irradiance. Concernant la puissance maximale, une diminution financièrement significative est observée. La puissance maximale passe de 201.8 W à 36.8 W soit une perte de plus de 80 %. Cette réduction est directement liée à la baisse du courant généré. Ainsi, l’irradiance constitue le paramètre le plus influent sur la puissance produite par le module photovoltaïque [7].

Le courant photogénéré, I_{ph} , est directement proportionnel à l’irradiance. Cette relation fondamentale s’exprime par ‘équation suivante [11] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{scn} + \beta_I (T - T_n)] \quad (I.23)$$

Où

- G_n : c’est l’irradiance nominale (1000 W/m²),
- I_{scn} : c’est le courant de court-circuit aux STC

- β_I : c'est le coefficient de température du courant
- T_n : c'est la température nominale

Cette proportionnalité explique pourquoi le courant produit par un panneau solaire varie linéairement avec l'ensoleillement.

I.6.2 Influence de la température sur les performances du panneau PV :

La température opérationnelle d'un module photovoltaïque correspond à la température réelle des cellules, qui peut être nettement supérieure à la température de l'environnement. Elle est influencée par divers éléments comme l'irradiance, les conditions météorologiques et la circulation de l'air à travers le module. L'augmentation de la température a un impact direct sur les caractéristiques électriques du semi-conducteur, en particulier la tension et les pertes internes [7]. La figure I.15 illustre l'effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque KC200GT pour trois valeurs de température (25 °C, 50 °C et 75 °C) à irradiance constante (100 W/m²).

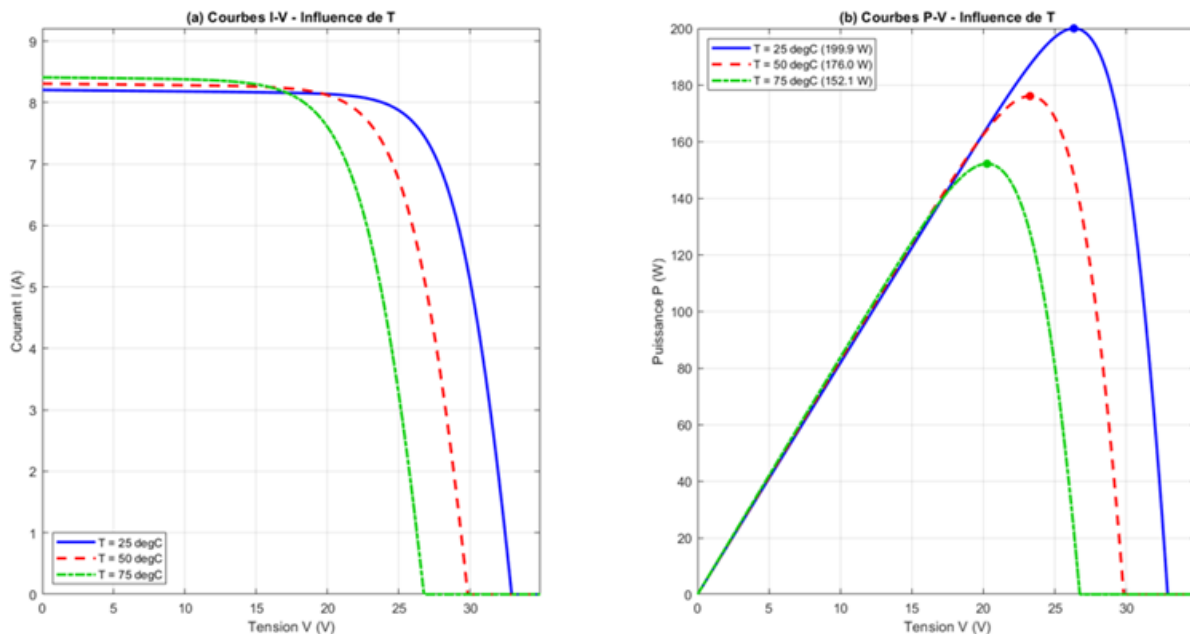


Figure I.15 : Influence de la température sur les performances du panneau photovoltaïque KC200GT

Les résultats montrent que l'augmentation de la température entraîne une légère augmentation du courant de court-circuit, passant de 8.21 A à 8.42 A. Ce phénomène est lié à la diminution de la bande interdite (bandgap) du silicium, et facilite l'excitation de certains porteurs de charge. En revanche, la tension de circuit ouvert diminue de manière significative, de 32.91 A à 26.76

A, en raison de l'augmentation des phénomènes de recombinaison interne. Cette diminution de la tension entraîne une réduction de la puissance maximale, qui passe de 199.9 W à 152.1 W soit une perte d'environ 24 %. Ainsi, la température a un impact négatif sur les performances du module, principalement à travers la diminution de la tension.

L'analyse des courbes I-V et P-V montre que la température affecte principalement la tension de circuit ouvert, ce qui entraîne une réduction significative de la puissance maximale délivrée par la cellule. Le courant de court-circuit n'augmente que très faiblement, rendant l'effet global défavorable. Ainsi, l'élévation de la température constitue un facteur défavorable majeur pour les performances des générateurs photovoltaïques, justifiant l'importance de la gestion thermique dans les installations situées en régions chaudes [7].

I.6.3 Influence de l'ombrage partiel sur les performances du panneau PV :

L'ombrage partiel se produit lorsqu'une partie d'un module photovoltaïque est exposée à une irradiance plus faible que le reste de sa surface, en raison d'obstacles tels que les arbres, les bâtiments voisins, les cheminées ou l'accumulation de poussière. Ce phénomène est particulièrement critique dans les systèmes dans lesquels les cellules ou modules sont connectés en série, car le courant traversant l'ensemble de la chaîne est limité par la cellule ou le module produisant le courant le plus faible. Pour protéger les modules photovoltaïques des effets néfastes de l'ombrage, des diodes bypass sont installées. Un groupe de cellules protégées par une diode bypass est appelé « sous-module » ou « sous-chaîne ». Normalement, un module photovoltaïque est divisé en plusieurs sous-modules.

Les diodes bypass sont des composants électroniques intégrés aux modules photovoltaïques, connectés en parallèle avec des groupes de cellules, afin de limiter les effets négatifs de l'ombrage partiel [12].

Leur principe de fonctionnement repose sur la protection des cellules ombragées. Lorsqu'une ou plusieurs cellules reçoivent une irradiance réduite, les diodes bypass s'activent pour contourner ces cellules, permettant au courant de passer par un chemin alternatif.

Ce mécanisme remplit plusieurs fonctions essentielles :

- Limitation des pertes de puissance : en évitant que l'ensemble du courant soit bloqué par les cellules ombragées
- Restauration des performances : comme le montrent vos résultats (54,37 W → 151,25 W)

- Prévention des points chauds : en dérivant le courant, elles empêchent l'élévation locale de température
- Maintien de l'intégrité du module : elles contribuent à la fiabilité et à la longévité du système

La figure I.16 présente l'effet de l'ombrage partiel sur les courbes I–V et P–V du module photovoltaïque KC200GT. Dans cette figure, trois configurations ont été considérées, à savoir : le fonctionnement normal, l'ombrage sans diode de dérivation et l'ombrage avec diode de dérivation.

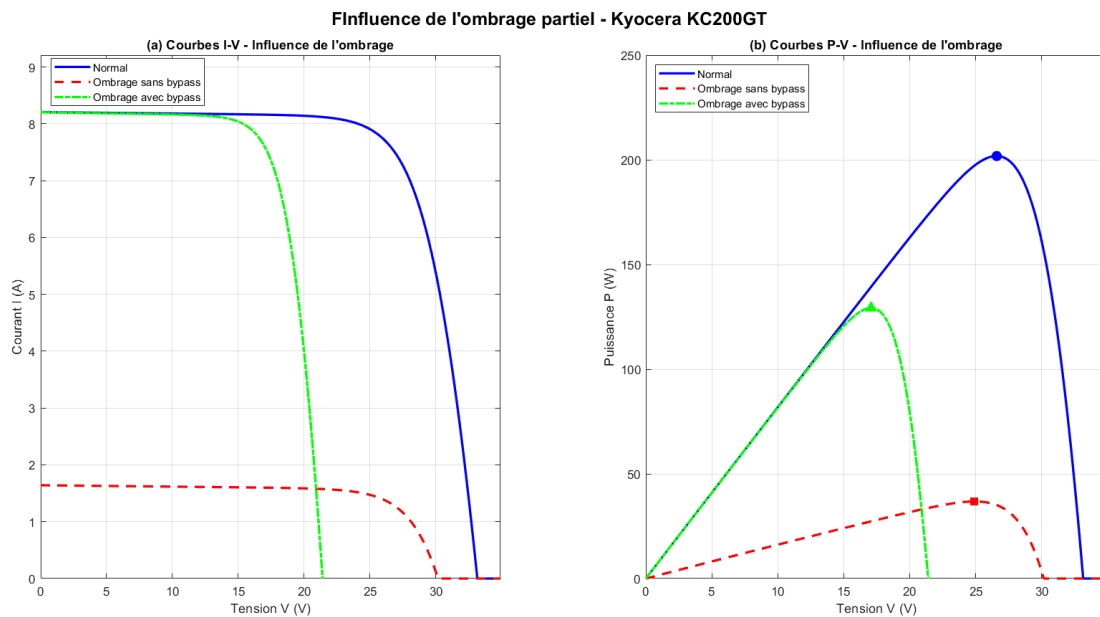


Figure I.16 : Influence de l'ombrage partiel du panneau photovoltaïque KC200GT

Les résultats montrent que, en fonctionnement normal, la puissance maximale atteint 201.8 W pour une tension optimale de 26.59 V. En présence d'ombrage sans diode bypass, la puissance chute drastiquement à 36.8W ce qui correspond à une perte supérieure à 80 %. Cela s'explique par le fait que le courant est limité par le groupe de cellules ombragé qui agit comme un goulot d'étranglement électrique pour l'ensemble du circuit de balayage.

En revanche, lorsque les diodes bypass sont activées, la puissance maximale remonte à 129.2W, avec une tension optimale de 17.07 V. Cette amélioration est due au contournement du groupe ombragé par la diode devenue passante à son seuil de -0.7 V, permettant aux autres groupes de fonctionner normalement. Cependant, cette récupération reste partielle et s'accompagne d'une déformation en marche d'escalier sur la courbe I–V et d'une allure multi pics sur la courbe P–V. Ces altérations démontrent que l'ombrage demeure un facteur critique, car la

présence de plusieurs pics de puissance peut tromper les algorithmes standards de suivi du point de puissance maximale (MPPT) [12].

II.4.2 Discussion comparative approfondie des résultats de simulation

L'analyse comparative des signatures électriques obtenues sous MATLAB pour le module Kyocera KC200GT met en évidence des comportements distincts selon la nature du défaut. Alors que le défaut de circuit ouvert annule complètement la production ($P_{\max} = 0$ W), les autres anomalies provoquent des dégradations partielles quantifiables qui altèrent l'allure des courbes caractéristiques :

- Le défaut de court-circuit partiel se traduit par une réduction par paliers de la tension de circuit ouvert (V_{oc}), tandis que le courant global reste initialement proche du courant de court-circuit (I_{sc}) nominal.
- L'ombrage partiel sans diode de dérivation agit comme un goulot d'étranglement, limitant le courant de toute la chaîne. L'activation des diodes de dérivation (bypass) permet de récupérer une partie de la puissance, mais introduit une distorsion sous forme de marches d'escalier sur la courbe I-V et des pics multiples (LMPP et GMPP) sur la courbe P-V. Cette caractéristique est cruciale car elle peut induire en erreur les algorithmes de suivi MPPT conventionnels.
- La dégradation induite par le potentiel (PID) se distingue par une diminution sévère de la pente de la courbe I-V dans la zone de transition (knee point), ce qui est mathématiquement corrélé à une chute drastique de la résistance shunt (R_{sh}) du modèle à une diode.

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, le comportement d'un module photovoltaïque en conditions normales de fonctionnement et en cas d'ombrage partiel a été étudié. Les simulations effectuées ont montré l'influence des paramètres externes comme l'irradiance et la température, sur les caractéristiques I-V et P-V.

Les résultats montrent que l'irradiance agit surtout sur le courant produit, et que la température agit sur la tension de sortie, affectant ainsi directement la puissance maximale et le point de fonctionnement optimal (MPP).

Cependant, en conditions réelles, les installations photovoltaïques sont souvent affectées par divers défauts susceptibles d'altérer leurs performances. Le chapitre suivant sera donc dédié à l'étude des défauts (comme l'ombrage partiel, les courts-circuits et les circuits ouverts) et à leur influence sur les performances du système et les courbes caractéristiques.



Chapitre II

Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques



Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

II.1 Introduction

Plusieurs défauts peuvent affecter les panneaux photovoltaïques. Ces défauts réduisent leurs performances et leur puissance. Généralement, ces anomalies affectent les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension du panneau. Dans ce chapitre, les différents défauts des panneaux photovoltaïques sont examinés et leur impact sur leur rendement est analysé. Enfin, les méthodes de détection et de diagnostic de ces défauts sont présentées.

II.2 Classification des défauts dans un panneau photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont sensibles à divers défauts en cours de fonctionnement. Certains sont d'ordre électrique et affectent directement le courant et la tension. D'autres sont d'ordre physique ou environnemental, endommageant les matériaux ou bloquant la lumière du soleil. Tous ces problèmes réduisent l'efficacité, la fiabilité et la sécurité du système. Les chercheurs ont identifié jusqu'à **17** types de défauts différents dans les panneaux photovoltaïques [13]. Chaque défaut affecte les performances du panneau de manière spécifique.

Dans cette section, ces défauts sont classés en cinq grandes catégories, incluant les défauts électriques et physiques, tels que : circuits ouverts, courts-circuits, ombrage partiel, points chauds et dégradation potentielle (Potentially induced degradation PID).

II.2.1 Défaut de circuit ouvert (Open-Circuit) dans un panneau photovoltaïque :

Un défaut de circuit ouvert est une interruption du circuit électrique au sein d'un panneau photovoltaïque, empêchant la circulation du courant. Ce type de défaut peut affecter différents niveaux du système, notamment les cellules individuelles, les modules ou l'ensemble du champ photovoltaïque. La figure II.1 illustre une représentation schématique typique de ce défaut, mettant en évidence la discontinuité du circuit électrique [13]. Plusieurs facteurs provoquent un défaut de circuit ouvert dans un panneau photovoltaïque. Souvent, des contraintes mécaniques cassent les câbles. Les connecteurs peuvent aussi se desserrer ou rouiller. Parfois, les soudures entre les cellules lâchent. Une diode de bypass en panne peut aussi causer ce problème si elle reste bloquée en mode ouvert. Dans les grandes installations, la panne d'un micro-onduleur déconnecte parfois une chaîne entière de modules. Cela crée alors un circuit ouvert à l'échelle du système. L'apparition d'un défaut de circuit ouvert dans un panneau photovoltaïque traduit principalement par une diminution significative, voire une annulation, du courant de sortie du

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

panneau photovoltaïque. Comme illustré par la figure II.1, la courbe courant-tension ($I-V$) présente une chute rapide du courant, avec une disparition quasi totale de la zone de courant constant. En revanche, la tension de circuit ouvert (V_{oc}) reste globalement inchangée ou n'est que faiblement affectée [14]. Sur la caractéristique puissance-tension ($P-V$), ce défaut entraîne une réduction importante de la puissance maximale délivrée (P_{max}), en raison de la limitation du courant. Dans le cas d'un système comportant plusieurs chaînes connectées en parallèle, un circuit ouvert affectant une seule chaîne diminue le courant total proportionnellement, tandis que les autres chaînes continuent de fonctionner normalement, ce qui limite partiellement l'impact global sur la production [13].

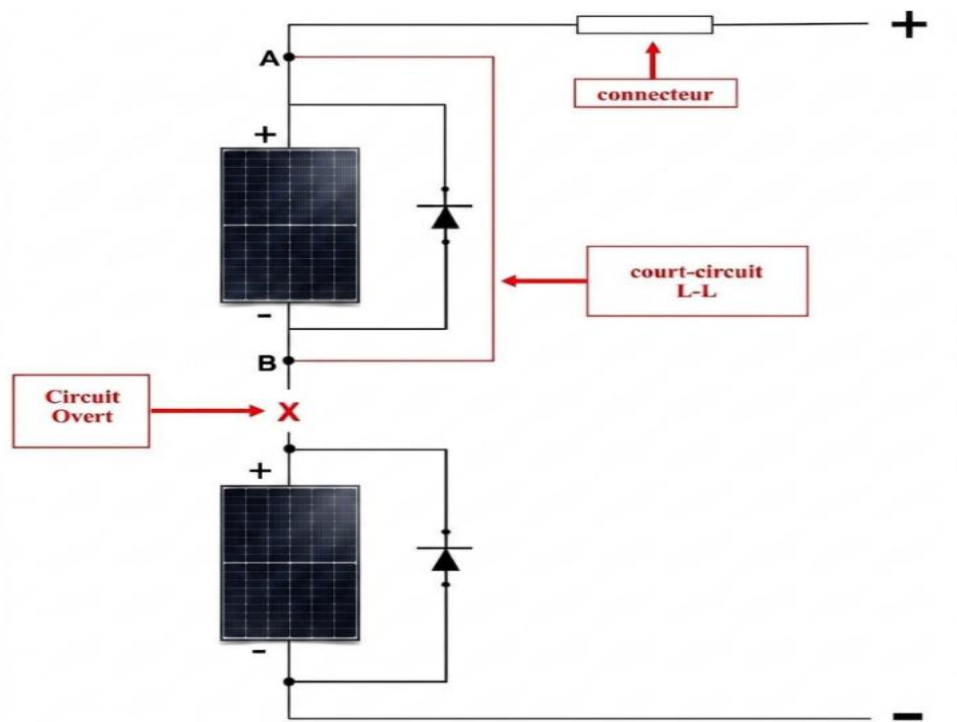


Figure II.1: Représentation schématique des défauts dans un panneau photovoltaïque

II.2.2 Défaut de court-circuit (short-circuit) dans un panneau photovoltaïque :

Le défaut de court-circuit correspond à l'établissement d'une connexion électrique anormale et non désirée entre deux conducteurs de potentiel différent au sein d'un générateur photovoltaïque. Ce type de défaut, généralement de nature ligne à ligne (L-L), crée un chemin de très faible impédance, entraînant une déviation du courant par rapport à son trajet normal et perturbant le fonctionnement global du système. Comme illustré dans la figure II.1, ce défaut se manifeste par un contact direct entre deux lignes conductrices, contrairement au défaut de circuit ouvert représenté dans la figure II.1 aussi, où le chemin du courant est interrompu [13].

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

Plusieurs facteurs provoquent les défauts de court-circuit. L'infiltration d'humidité dans le module est une cause très fréquente. Cette eau fait rouiller les contacts. Elle crée aussi des ponts conducteurs entre les cellules. De plus, les cycles de chaleur et les forces mécaniques créent des microfissures. Avec le temps, ces fissures se transforment en court-circuit internes. Enfin, de mauvaises manipulations lors du câblage ou des défauts de fabrication à l'usine causent aussi ce problème.

Contrairement au défaut de circuit ouvert présenté dans la figure II.1, le court-circuit de type L-L, illustré dans la figure II.1, affecte principalement la tension de sortie du générateur photovoltaïque. Sur la caractéristique courant-tension ($I-V$), cela se traduit par une chute rapide de la tension et par la disparition progressive de la zone de tension quasi constante [14].

En revanche, le courant de court-circuit (I_{sc}) reste généralement proche de sa valeur nominale, voire peut légèrement augmenter selon la localisation du défaut.

Sur la courbe puissance-tension ($P-V$), cette dégradation de la tension entraîne une diminution significative de la puissance maximale (P_{max}) [15].

Dans les configurations série-parallèle, un court-circuit localisé au niveau d'un module peut affecter l'ensemble de la chaîne. Les diodes de bypass peuvent alors s'activer afin d'isoler la partie défectueuse, ce qui introduit des déformations supplémentaires sur la courbe $I-V$ et modifie le comportement global du système [14].

II.2.3 Défaut d'ombrage partiel dans un panneau photovoltaïque :

L'ombrage partiel est un défaut externe qui survient lorsqu'une partie seulement de la surface d'un panneau ou d'un champ PV est privée d'ensoleillement, voir la figure II.2. Contrairement à l'obscurité totale, seules certaines cellules ou certains modules sont affectés. Les sources d'ombrage sont multiples et souvent environnementales. On peut citer le passage de nuages, la présence d'arbres, de bâtiments voisins, de poteaux électriques, ou encore l'accumulation de neige. L'accumulation de poussière ou de fientes d'oiseaux peut également créer des zones d'ombrage localisées. Dans les grands parcs solaires, l'ombrage peut être causé par d'autres structures du champ lui-même [16].

L'ombrage partiel est le défaut qui produit la signature la plus caractéristique sur les courbes caractéristiques. Sur la courbe courant-tension, il provoque l'apparition de multiples paliers ou "marches" (kinks) [17]. Sur la courbe puissance-tension, il se manifeste par l'apparition de multiples pics de puissance. Ce phénomène s'explique par l'activation des diodes de bypass : lorsque des cellules sont ombragées, elles ne produisent plus suffisamment de courant et se

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

comportent comme des récepteurs. Pour éviter leur échauffement excessif (hot spots), les diodes de bypass les court-circuitent, créant ainsi des paliers sur la courbe courant-tension [16].

La conséquence directe est une réduction de la puissance maximale globale et la difficulté pour les algorithmes MPPT conventionnels de trouver ce maximum global parmi les pics locaux (LMPP) [17].

L'analyse de l'ombrage partiel montre qu'il provoque l'apparition de points chauds et de pics multiples sur les caractéristiques électriques. L'utilisation des diodes de dérivation permet de limiter ces effets, mais introduit des marches d'escalier complexes sur la courbe P-V [36]. De plus, les techniques de diagnostic récentes basées sur l'intelligence artificielle facilitent grandement la détection et la classification automatique de ce type d'anomalie sous conditions changeantes [37].



Figure II.2 : Défaut d'ombrage partiel dans un panneau photovoltaïque

II.2.4 Les points chauds (Hot spots) dans un panneau photovoltaïque

Un point chaud est une zone précise d'une cellule ou d'un module photovoltaïque, voir la figure II.3. Cette zone devient beaucoup plus chaude que le reste du panneau. Cette forte surchauffe accélère la dégradation du matériel. Elle peut même détruire complètement le module. D'autres défauts provoquent souvent l'apparition d'un point chaud. Par exemple, les microfissures dans les cellules augmentent la résistance électrique locale. Cette résistance significative bloque le courant et dissipe de l'énergie sous forme de chaleur [18]. Cette surchauffe locale modifie le comportement électrique du panneau. La cellule touchée consomme de l'énergie au lieu d'en produire, car elle subit une polarisation inverse.

Ce phénomène déforme visiblement les courbes caractéristiques (I-V et P-V). Des variations ou des baisses distinctes de tension ont été observées sur les graphiques [18].

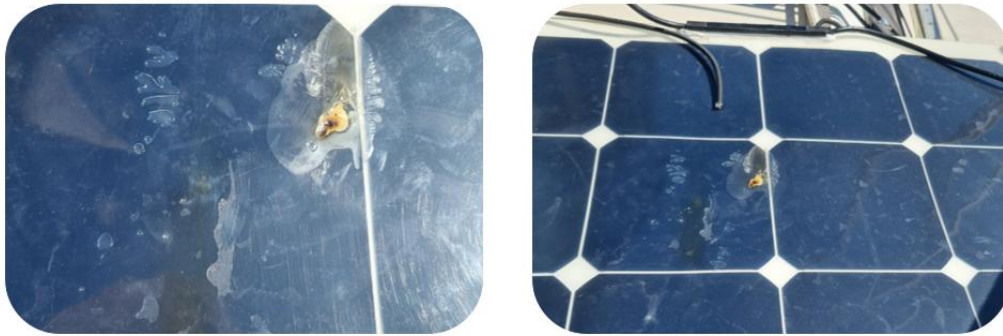


Figure II.3 : Défaut points chauds

II.2.5 Dégradation potentielle induite (PID) dans un panneau photovoltaïque

La dégradation potentielle induite (PID) représentée dans la figure II.4 est un phénomène de dégradation des performances des panneaux photovoltaïques, causé par des fuites de courant entre les cellules et le cadre du panneau, généralement mis à la terre. Ce phénomène affecte principalement les panneaux en technologie cristalline. Le PID est favorisé par plusieurs facteurs environnementaux et de conception. Les températures élevées et une humidité intense accélèrent le phénomène. La tension négative appliquée aux cellules par rapport au cadre est le principal facteur électrique déclencheur. Le PID se manifeste électriquement par une dégradation progressive des paramètres de sortie du module. On observe une diminution de la tension de circuit ouvert (V_{oc}), une réduction du facteur de forme (FF) et une baisse significative de la puissance maximale (P_{max}). Sur la courbe I-V, la dégradation apparaît comme un arrondissement de la courbe dans la région du point de puissance maximale [12]. PID représente un défi majeur pour la durabilité des installations photovoltaïques, car elle provoque d'importants courants de fuite à travers la face avant des cellules vers le cadre mis à la terre [38]. Ce phénomène engendre une dégradation sévère des paramètres intrinsèques du module, notamment une chute drastique de la résistance shunt et une baisse globale de la puissance maximale générée [39].

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

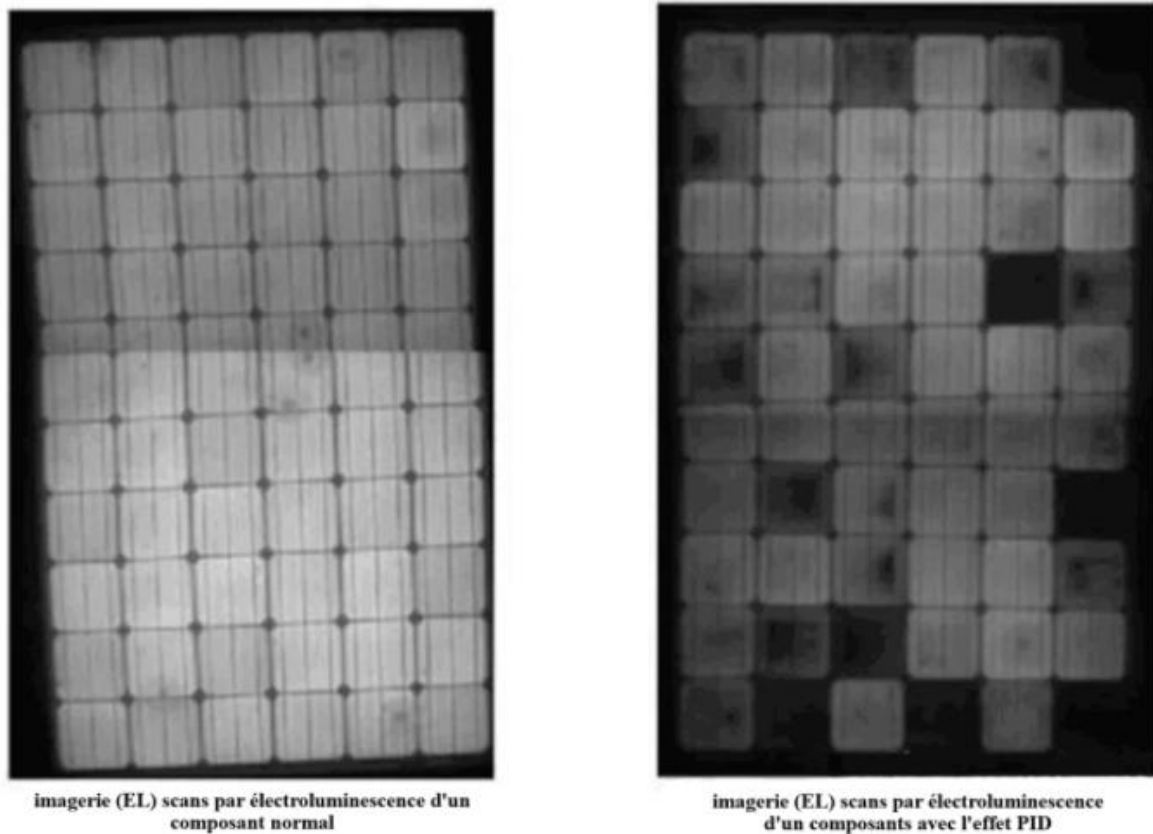


Figure II.4 : Défaut du PID sur la luminescence des cellules en silicium cristallin [41]

Comme illustré sur la Figure II.4 l'imagerie par électroluminescence (EL) permet de diagnostiquer de manière non destructive l'état interne des cellules. Le scan du composant normal (à gauche) présente une luminosité homogène, témoignant d'une bonne conduction électrique. En revanche, le scan du composant affecté par l'effet PID (à droite) montre des zones sombres distinctes (black cells) et une baisse sévère de la luminescence au niveau des cellules périphériques proches du cadre. Cela confirme visuellement la forte chute de la résistance shunt provoquée par les courants de fuite vers la terre.

Pour garantir la rentabilité et la sécurité des systèmes photovoltaïques, l'intégration d'outils de diagnostic avancés est devenue indispensable. Les méthodes basées sur la surveillance et l'analyse géométrique des courbes I-V et P-V permettent d'évaluer l'état de santé des panneaux de manière non invasive et très efficace [40].

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

II.3 Effet des défauts sur les courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et tension-puissance (P-V) :

L'analyse des courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), obtenues par simulation numérique sous MATLAB, constitue l'approche centrale adoptée dans ce travail pour caractériser le comportement électrique du module Kyocera KC200GT en conditions saines et en présence de défauts. Chaque défaut étudié (circuit ouvert, court-circuit partiel, ombrage partiel, points chauds et dégradation potentielle induite (PID)) imprime une déformation distinctive et reproductible sur ces courbes, formant ainsi une signature électrique caractéristique. L'objectif de ce travail est d'identifier et de quantifier ces signatures afin de constituer une base de connaissances fiable, exploitable par la suite pour le diagnostic automatique des panneaux photovoltaïques.

Dans ce travail, le module photovoltaïque Kyocera KC200GT a été analysé dans des conditions de test standard STC (i.e $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) à l'aide du logiciel MATLAB. Le modèle utilisé divise chaque panneau photovoltaïque en deux groupes de cellules connectées en série. Où chaque sous-groupe de 27 cellules est protégé par une diode de bypass [14].

L'examen des résultats de simulation démontre que chaque anomalie affecte de manière synchrone la géométrie des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), voire la figure II.5.

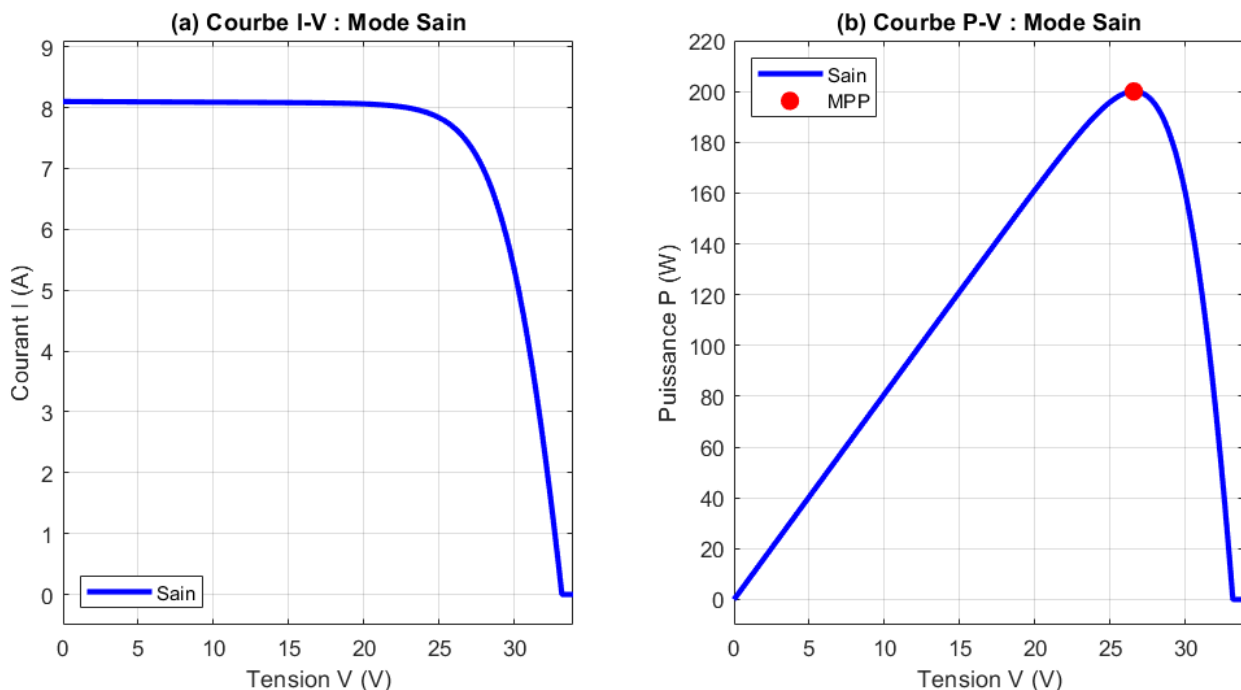


Figure II.5 : Courbes caractéristiques (I-V) et (P-V) du module PV Kyocera KC200GT simulées sous MATLAB en conditions de test standard (STC : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$).

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

Ces altérations morphologiques définissent la "signature électrique" bidimensionnelle du défaut, permettant une identification précise de la panne sur le module de référence Kyocera KC200GT [14].

Lorsque le panneau photovoltaïque fonctionne dans des conditions de STC, sa courbe caractéristique I-V présente un profil lisse et idéal. Physiquement, cette forme s'explique par la génération uniforme des porteurs de charge au sein des cellules, maintenant un courant stable proche de $I_{sc} = 8.1010$ A avant de chuter exponentiellement au niveau du coude de la diode. En corrélation énergétique parfaite, la courbe P-V présente une géométrie parabolique parfaitement asymétrique, aboutissant à un point unique (MPP) qui représente la puissance nominale maximale du panneau PV, $P_{max} = 200$ W, atteinte pour une tension optimale de $V_{mpp} = 26,5703$ V et un courant de fonctionnement de $I_{mpp} = 7,5272$ A.

II.3.1 Effet du défaut de dégradation PID sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :

La figure II.6 représente l'effet du défaut de dégradation PID sur les courbes caractéristiques I-V et P-V pour le panneau KC200GT. Du point de vue électrique, la courbe I-V présente une perte de rectangularité caractérisée par un arrondissement prononcé au niveau du coude.

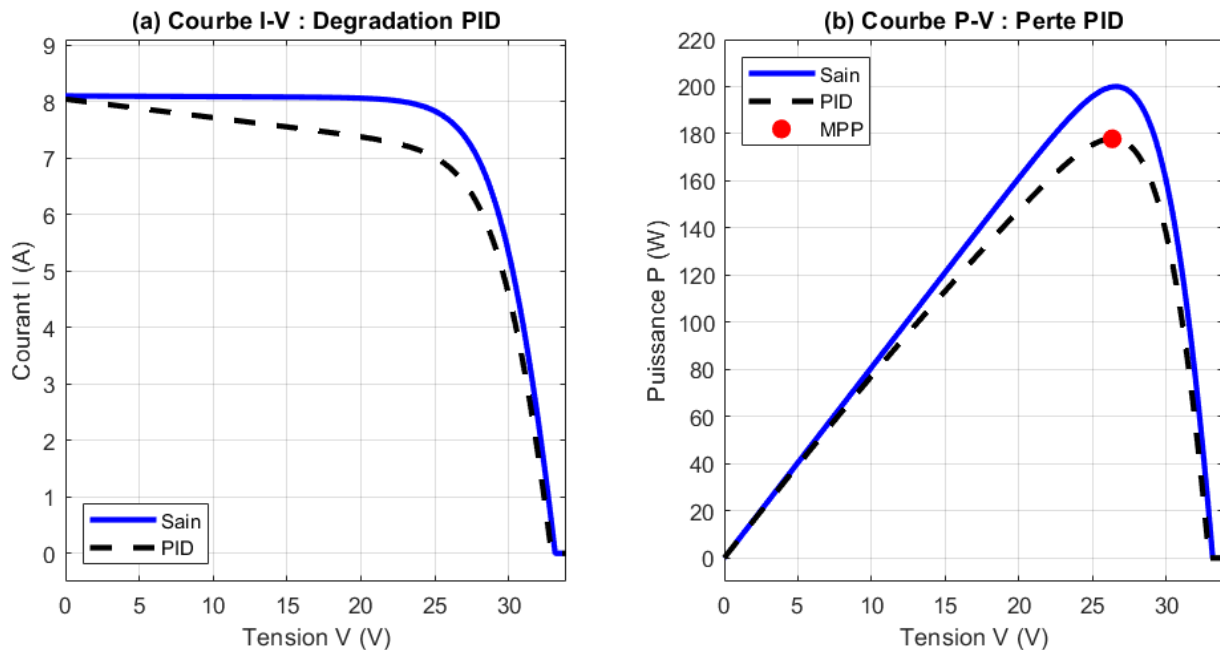


Figure II.6 : Effet du défaut de dégradation PID sur les courbes caractéristiques I-V et P-V pour le panneau KC200GT

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

Ce phénomène est dû physiquement à la diminution de la résistance shunt, qui crée des chemins de fuite électriques supplémentaires à travers la jonction P-N, réduisant ainsi la capacité du panneau à maintenir son courant à un niveau élevé aux tensions intermédiaires ($I_{mpp} = 6,7545A$) au lieu de (7,5272 A) en mode sain).

Sur le plan énergétique, cette détérioration se traduit sur la courbe P-V par une chute verticale et un aplatissement marqué de la courbure au pic du point de puissance maximale (MPP)

Les résultats de la simulation numérique indiquent que la puissance maximale résiduelle s'établit à $P_{max} = 177,8646 W$ (pour une tension optimale $V_{mpp} = 26,3327 V$), ce qui correspond à une perte d'énergie de 11,0677 % par rapport à l'état initial, sans toutefois altérer fondamentalement la géométrie parabolique globale de la caractéristique [19].

III.3.2 Effet du défaut de point chaud sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :

La figure II.7 représente l'effet du défaut de point chaud sur les courbes caractéristiques I-V et P-V pour le panneau Kyocera KC200GT. La caractéristique courant-tension I-V présente une baisse graduelle et quasi linéaire du courant dès les basses tensions.

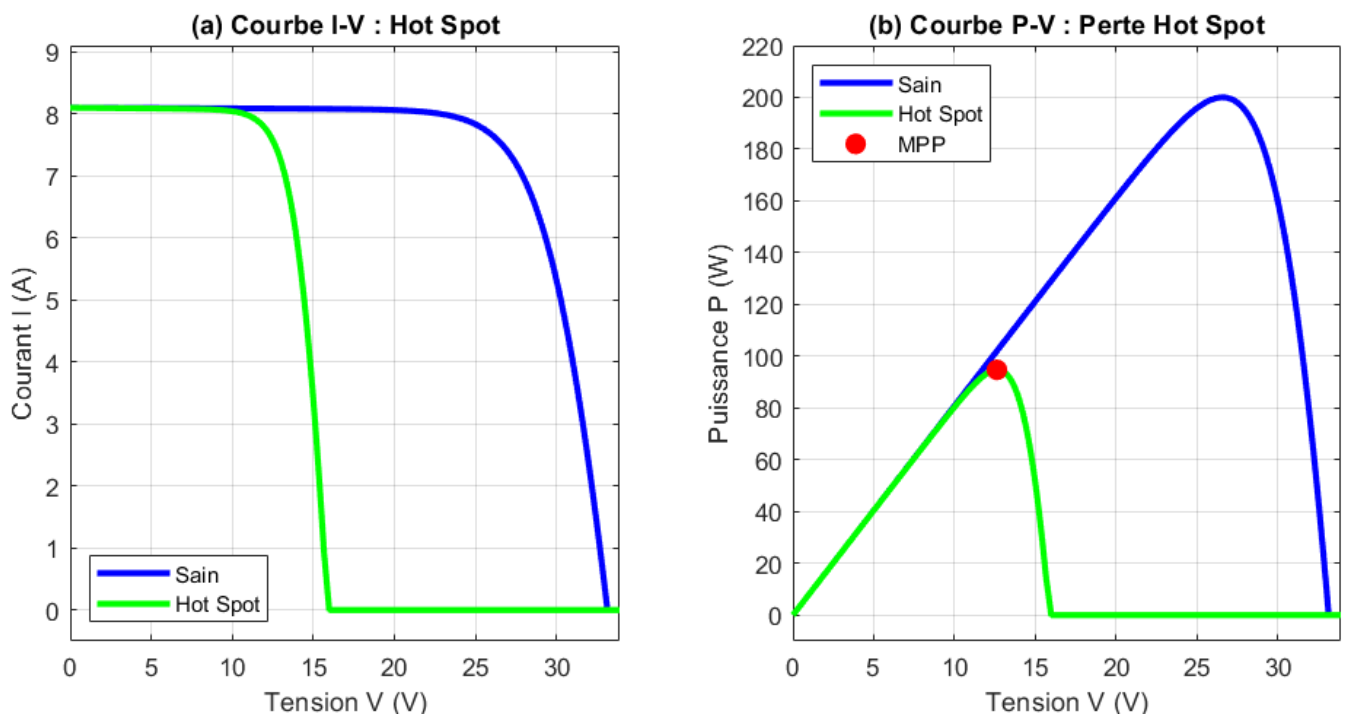


Figure II.7 Effet du défaut de point chaud sur les courbes caractéristiques I-V et P-V pour le panneau KC200GT.

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

Ce comportement est attribuable à la polarisation inverse d'une cellule défailante au sein du module ($I_{ph} = 0$ A), qui se comporte non plus comme un générateur d'énergie mais comme une charge réceptrice passive, dissipant la puissance produite par les cellules saines sous forme de chaleur par effet Joule.

La chute de la tension en circuit ouvert à $V_{oc} = 15,9829$ V, soit environ la moitié de la valeur nominale du mode sain, confirme physiquement l'activation de la diode de bypass qui protège le groupe de cellules défailant en court-circuitant le demi-module affecté (27 cellules sur 54). Simultanément, la parabole de la courbe puissance-tension P-V subit une distorsion asymétrique majeure, marquée par un écrasement sévère de sa pente ascendante et un décalage du sommet vers les basses tensions. Les données numériques de la simulation indiquent que le point de puissance maximale se stabilise à $P_{max} = 94,7423$ W, pour une tension de fonctionnement de $V_{mpp} = 12,6234$ V et un courant de $I_{mpp} = 7,5053$ A, ce qui engendre un déficit énergétique critique de 52,6289 %

II.3.3 Effet du défaut de l'ombrage partiel sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :

La figure II.8 illustre l'effet d'un ombrage partiel sur le panneau photovoltaïque Kyocera KC200GT. La courbe courant-tension (I-V) montre une déformation en forme de "marche d'escalier", qui divise la courbe en deux segments distincts. Ce phénomène vient du fait que les deux groupes de cellules sont connectés en série : le premier groupe reçoit l'éclairement nominal s'établissant à un courant de ($I_{sc} = 8,1010$ A, tandis que le second sous-module est ombragé et produit moins de courant. Quand le circuit demande plus de courant que le groupe ombragé peut fournir, sa diode bypass s'active à -0,7 V.

Elle court-circuite la partie ombragée pour laisser passer le courant de la partie saine, ce qui crée cette rupture géométrique visible.

Sur la courbe puissance-tension P-V, cette activation des diodes donne deux pics de puissance au lieu d'un seul. C'est la seule anomalie qui fait ça :

- Le point de puissance maximale globale (GMPP), situé aux basses tensions, s'établit à ($P = 94,7423$ W) pour une tension de fonctionnement de $V_{mpp} = 12,6234$ V et un courant de $I_{mpp} = 7,5053$ A, induisant un taux de perte de 52,6289 %.
- Le point de puissance maximale locale LMPP, formant un pic secondaire aux hautes tensions, se stabilise à $P = 65,3318$ W pour une tension de fonctionnement de

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

$V_{mpp} = 28,0973V$ et un courant associé de $I_{mpp} = 2,3252A$, ce qui représente un déficit énergétique de 67,3341 %.

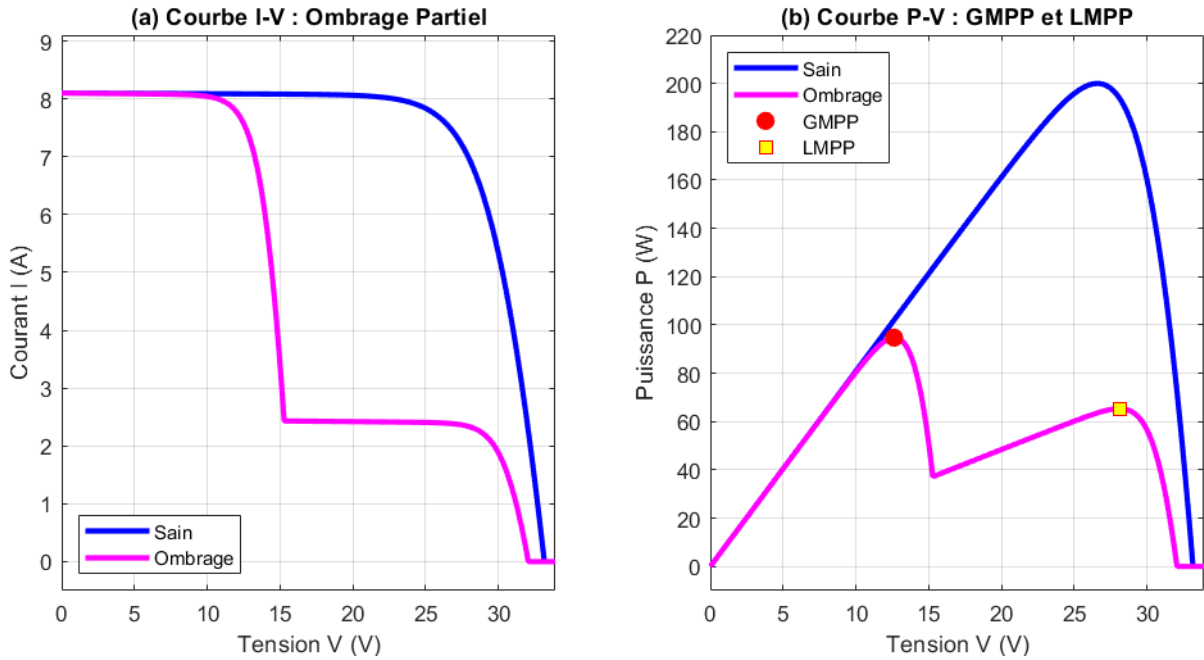


Figure II.8 : Effet d'un ombrage partiel de 30% sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.

Cette configuration multimodale représente un défi technologique majeur pour les algorithmes d'analyse MPPT conventionnels (tels que la méthode Perturb and Observe), car ces derniers risquent de se retrouver bloqués sur le LMPP sous-optimal au lieu de converger vers le sommet réel du système [16].

II.3.4 Effet du défaut du court-circuit sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :

La figure II.9 présente l'effet du défaut de court-circuit partiel sur les courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau Kyocera KC200GT. Sur la courbe I-V montre que le court-circuit partiel possède une signature électrique bidimensionnelle très spécifique. Le courant de court-circuit ne change pas. Il reste à sa valeur nominale $I_{sc} = 8,1010$ A. Cela s'explique par le fait que les 40 cellules restantes fonctionnent normalement et produisent tout le courant. Par contre, la plage de tension utile est réduite directement, provoquant la chute de la tension en circuit ouvert à $V_{oc} = 24,5682$ V (par application du facteur d'échelle α_{cc} sur la courbe interpolée). La courbe I-V garde sa forme rectangulaire globale, mais se trouve contractée et translatée vers la gauche sur l'axe des tensions.

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

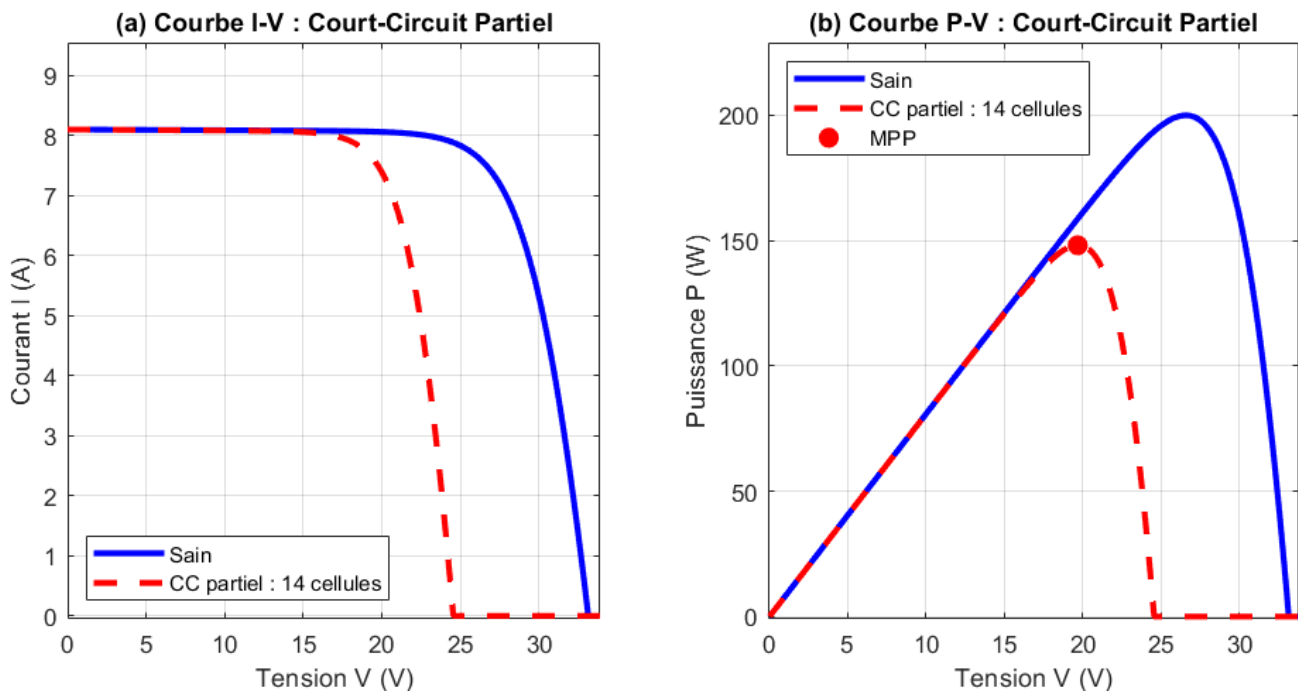


Figure II.9 : Effet de défaut du court-circuit sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque KC200GT

Sur le plan énergétique, cette dégradation de la tension réduit directement la courbe P-V. La parabole de puissance est tout à coup coupée sur sa partie droite, ce qui déplace le point de puissance maximale (MPP) vers les tensions basses. On obtient une $P_{max} = 148,1481$ W, pour une tension à $V_{mpp} = 19,6817$ V et $I_{mpp} = 7,5272$ A. Ce comportement engendre une perte de puissance stable et linéaire de 25,9259 %, exclusivement dictée par l'effondrement de la tension utile du panneau [14].

II.3.5 Effet du défaut du circuit-ouvert sur les courbes caractéristiques pour le panneau KC200GT :

La figure II.10 représente l'effet du défaut de circuit ouvert sur les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque Kyocera KC200GT. Traduisant l'annulation totale des flux de porteurs de charge, la courbe I-V se résume à une ligne droite horizontale entièrement confondue avec l'axe des abscisses $I_{sc} = 0,0000$ A, s'arrêtant net à la valeur de tension $V_{oc} = 32,9000$ V. Ce comportement est physiquement dû à une rupture ou une interruption complète du chemin électrique conducteur, empêchant toute circulation de courant vers la charge extérieure, quelle que soit la tension appliquée.

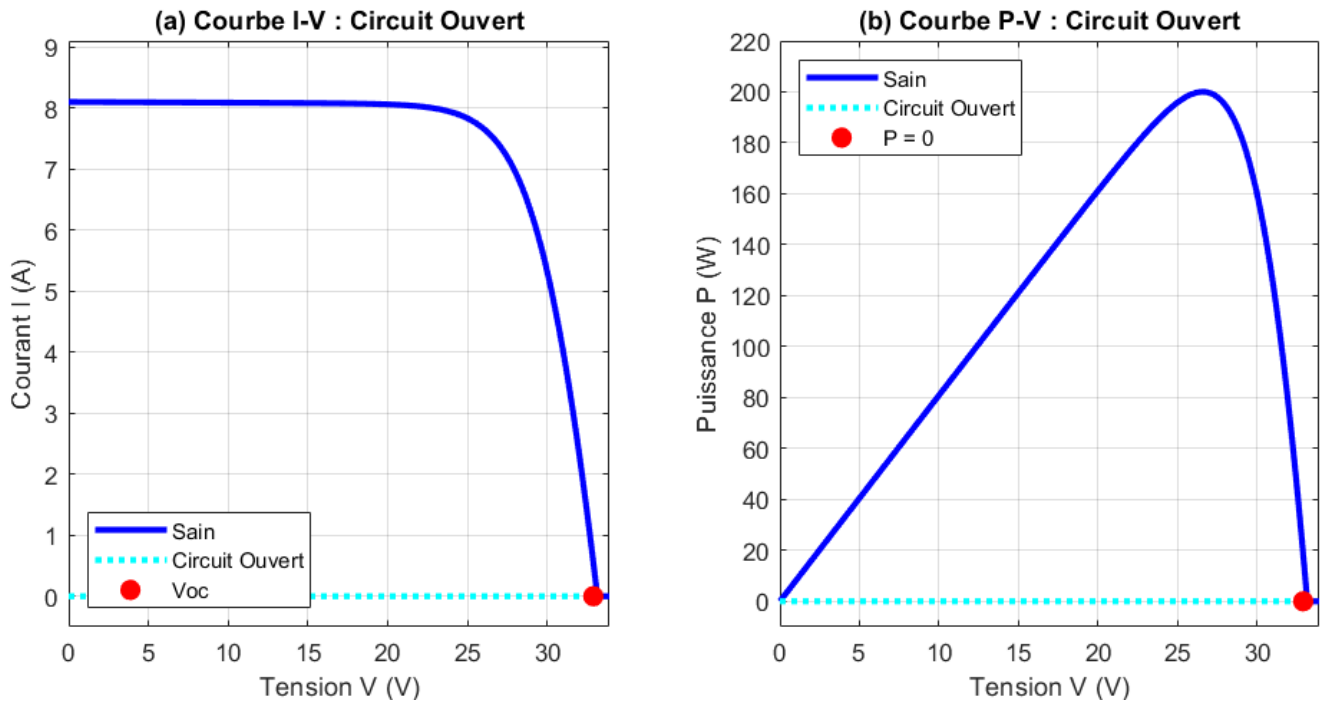


Figure II.10 : Effet de défaut du circuit-ouvert sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque KC200GT : Annulation totale du courant ($I = 0$ A, $P_{\max} = 0$ W)

Il est important de noter que la tension en circuit ouvert reste pleinement mesurable aux bornes du module malgré l'absence de courant. Cette persistance confirme le maintien du potentiel thermodynamique au sein de la jonction P-N des cellules saines. Conséquence mathématique et énergétique directe de l'annulation du courant $P = V$ times 0, la caractéristique puissance-tension P-V affiche une puissance nulle sur toute la plage de tension, fixant le point optimal à $P_{\max} = 0,0000$ W, soit un taux de perte absolu de 100 % [15].

II.4 Diminution de la puissance maximale ($P_{\max}$) dans un panneau photovoltaïque :

Le changement de la forme des courbes I-V affecte directement le déplacement énergétique, se manifestant sur une échelle macroscopique par une dégradation des courbes P-V et une diminution de la puissance maximale récupérable ($P_{\max}$) [14]. En conditions STC, le modèle Kyocera KC200GT atteint un point de puissance maximale (PPM) nominal de 200 W, qui est utilisé comme référence comparative pour mesurer les pertes causées par chaque défaut. L'impact énergétique de chaque anomalie, calculé de manière rigoureuse par l'algorithme de simulation, est synthétisé dans le tableau II.1.

Pour comparer l'effet de chaque défaut sur le rendement du module Kyocera KC200G, on calcule un taux de perte en pourcentage, noté Perte (%). Il est calculé de manière

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

systematique. Cet indicateur exprime le ratio de puissance maximale $P_{\max}$ perdue par le module défectueux par rapport à la puissance maximale nominale du panneau en mode sain, prise comme référence absolue ($P_{\max\text{Sain}} = 200 \text{ W}$). La formule mathématique utilisée dans l'algorithme est définie par l'équation suivante :

$$\text{Perte}(\%) = \frac{P_{\max\text{-sain}} - P_{\max\text{-défaut}}}{P_{\max\text{-sain}}} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

Le rôle de cette variable au sein du processus d'analyse est le suivant :

- 1) On peut comparer un défaut PID à 11 % avec un circuit ouvert à 100 %. Ce classement devient simple.
- 2) Au lieu d'analyser des courbes I-V compliquées, on a un seul chiffre qui indique le type de défaut.
- 3) Sur site, ce pourcentage aide à calculer l'argent perdu et à choisir quel panneau réparer en premier.

Le tableau II.1 résume de manière synthétique l'impact énergétique de chaque défaut, soigneusement calculé par l'algorithme de simulation MATLAB.

Tableau II.1 Effet de chaque défaut dans un panneau photovoltaïque calculé à l'aide de MATLAB.

Configuration simulée	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	P _{max} (W)	Perte relative (%)	Cause physique principale
Normal (Sain)	8.1010	32.1535	200	0.0 %	Fonctionnement nominal de référence
Dégradation PID	8.0439	32.9159	177.8646	11.0677	Courants de fuite par la jonction
Défaut du point chaud	8.0994	15.9829	94.7423	52.6289 %	Dissipation thermique par effet Joule
Court-circuit dans les 14 cellule PV	8.1010	24.5682	148.1481	25.9259%	Élimination physique de 14 cellules
Ombrage partie (GMPP)	8.0994	32.0676	94.7423	52.6289 %	Pic Global (Diode bypass activée)
Ombrage partie (LMPP)	8.0994	32.0676	148.1481	67.3341%	Pic Local (Courant limité par l'ombre)
Circuit ouvert	0.00	32.90	0.0	100 %	Interruption totale de la ligne

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

L'analyse quantitative de ces résultats permet de hiérarchiser la sévérité des défauts selon leur impact énergétique :

- 1) Dégradation PID : Elle affiche l'impact le plus modéré avec une perte limitée à 11,0677 %, réduisant la puissance maximale à 177,8646 W. Cette baisse s'explique par l'augmentation des courants de fuite à travers la jonction P-N, conséquence directe de la diminution de la résistance shunt. L'arrondissement du coude de la courbe I-V, caractéristique de ce défaut, réduit l'efficacité au sommet de la parabole énergétique, comme illustré sur la figure II.3 (a).
- 2) Défaut du point chaud (Hot Spot) : Il engendre une perte de 52,6289 %, abaissant la puissance maximale à 94,7423 W. La chute de la tension V_{oc} à 15,9829 V, soit environ la moitié de la valeur nominale, confirme physiquement l'activation de la diode de bypass sur le groupe de cellules affecté, qui court-circuite le demi-module défaillant (27 cellules sur 54). Ce phénomène est attribuable à la polarisation inverse d'une cellule défaillante $I_{ph} = 0,0000$ A, qui se comporte comme une charge réceptrice dissipant l'énergie des cellules saines par effet Joule.
- 3) Ombrage partiel : Il provoque également une perte de 52,6289 % au point global, avec un maximum global de puissance (GMPP) de 94,7423 W à une tension de fonctionnement de 12,6234 V, et un maximum local de puissance (LMPP) secondaire de 65,3318 W situé à 28,0973 V (avec un taux de perte de 67,3341 %). Contrairement aux autres défauts qui conservent une structure monomodale, l'ombrage partiel génère une topologie multimodale unique sur la courbe P-V, analysée en détail à la section II.3.3.
- 4) Court-circuit partiel (14 cellules) : Il constitue une anomalie électrique intermédiaire majeure avec une perte stable de 25,9259 %, réduisant la puissance maximale à 148,1481 W. L'élimination physique ou le pontage de ces 14 cellules ampute directement le potentiel électrique utile du panneau, ce qui se traduit par une chute de la tension en circuit ouvert à 24,5682 V et une tension au MPP réduite à 19,6817 V, tout en maintenant le courant de court-circuit parfaitement intact à 8,1010 A, comme observable sur la figure II.3 (d).
- 5) Circuit ouvert : Il représente la défaillance totale du module avec une perte absolue de 100,0000 %. En circuit ouvert, le courant s'annule complètement $I_{sc} = 0,0000$ A, ce qui annule instantanément le transfert énergétique. Néanmoins, la tension reste présente aux bornes du module $V_{oc} = 32,9000$ V confirmant l'interruption complète du chemin électrique sans disparition du potentiel de jonction des cellules.

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

II.4.2 Discussion comparative approfondie des résultats de simulation

L'analyse comparative des signatures électriques obtenues sous MATLAB pour le module Kyocera KC200GT met en évidence des comportements distincts selon la nature du défaut. Alors que le défaut de circuit ouvert annule complètement la production ($P_{\max} = 0$ W), les autres anomalies provoquent des dégradations partielles quantifiables qui altèrent l'allure des courbes caractéristiques :

- Le défaut de court-circuit partiel se traduit par une réduction par paliers de la tension de circuit ouvert (V_{oc}), tandis que le courant global reste initialement proche du courant de court-circuit (I_{sc}) nominal.
- L'ombrage partiel sans diode de dérivation agit comme un goulot d'étranglement, limitant le courant de toute la chaîne. L'activation des diodes de dérivation (bypass) permet de récupérer une partie de la puissance, mais introduit une distorsion sous forme de marches d'escalier sur la courbe I-V et des pics multiples (LMPP et GMPP) sur la courbe P-V. Cette caractéristique est cruciale car elle peut induire en erreur les algorithmes de suivi MPPT conventionnels.
- La dégradation induite par le potentiel (PID) se distingue par une diminution sévère de la pente de la courbe I-V dans la zone de transition (knee point), ce qui est mathématiquement corrélé à une chute drastique de la résistance shunt (R_{sh}) du modèle à une diode.

Le tableau suivant résume l'impact quantitatif de chaque type de défaut simulé sous MATLAB sur les paramètres électriques clés du module Kyocera KC200GT (Pour des conditions STC : 1000 W/m², 25°C) :

Tableau II.2 : Synthèse comparative de l'impact des différents défauts sur les paramètres électriques du module Kyocera KC200GT.

État du Module	$P_{\max}$ (W)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	Chute de Puissance (%)
Sans défaut (Sain)	200 W	32.9 V	8.21 A	0 % (Référence)
Court-circuit partiel	150 W	24.6 V	8.21 A	- 25 %
Ombrage partiel (Bypass)	115 W	31.2 V	4.10 A	- 42.5 %

Chapitre II : Analyse des défauts dans les panneaux photovoltaïques

Effet PID Sévère	85 W	29.5 V	7.95 A	- 57.5 %
------------------	------	--------	--------	----------

- Ces valeurs numériques confirment que l'effet PID et l'ombrage partiel sans optimisation sont les anomalies les plus critiques, provoquant une détérioration majeure du facteur de forme (Fill Factor) du système.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a analysé les principaux défauts des panneaux photovoltaïques et leur effet sur les courbes électriques. D'abord, nous avons classé les défauts principaux en deux types : les défauts électriques et physiques. Ensuite, nous avons étudié l'effet de chaque défaut sur les courbes I-V et P-V. Les simulations sur le panneau Kyocera KC200GT 200 W ont montré les signatures électriques suivantes : la déformation des courbes, la diminution de la puissance maximale P_{max} et l'apparition de pics multiples.



Conclusion générale



Conclusion générale

Ce mémoire a pour objectif d'étudier la détection des défauts des panneaux photovoltaïques basée sur la surveillance des courbes caractéristiques, en prenant comme module de référence le panneau Kyocera KC200GT.

Dans le premier chapitre, la modélisation électrique du panneau photovoltaïque à l'aide du modèle à une diode a permis de reproduire fidèlement ses caractéristiques électriques sous MATLAB, avec un facteur de forme de 74,13 %, conforme aux données du constructeur. L'étude de l'influence des paramètres externes a montré que l'irradiance agit principalement sur le courant de court-circuit (I_{sc}), tandis que la température affecte essentiellement la tension de circuit ouvert (V_{oc}). Par ailleurs, l'ombrage partiel introduit des paliers sur la courbe I-V et des maxima multiples sur la courbe P-V en raison de l'activation des diodes de dérivation. Ce comportement préfigure les signatures de défauts analysées dans le chapitre suivant.

Dans le deuxième chapitre, cette base de modélisation a été exploitée pour analyser cinq types de défauts, classés en défauts électriques (circuit ouvert et court-circuit partiel) et défauts physiques (ombrage partiel, points chauds et dégradation induite par le potentiel – PID). Pour chaque défaut, les simulations réalisées sous MATLAB ont mis en évidence une signature électrique distinctive et reproductible sur les courbes I-V et P-V. La quantification des pertes de puissance a permis d'établir une hiérarchie de sévérité allant de 11,07 % pour la dégradation PID, défaut le plus discret, jusqu'à 100 % pour le circuit ouvert, défaut le plus sévère, en passant par 25,93 % pour le court-circuit partiel et 52,63 % pour l'ombrage partiel et les points chauds. L'ombrage partiel se distingue notamment par l'apparition de deux points de puissance maximale : un point de puissance maximale global (GMPP) de 94,74 W et un point de puissance maximale local (LMPP) de 65,33 W, ce qui constitue un défi particulier pour les algorithmes MPPT conventionnels. Ces signatures électriques constituent ainsi une base de connaissances fiable et exploitable pour le développement de systèmes de diagnostic automatique.

En conclusion, ce travail démontre que la combinaison d'une modélisation électrique rigoureuse et d'une analyse systématique des courbes I-V et P-V permet d'identifier des signatures de défauts fiables et distinctives. Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche, notamment l'extension de la modélisation au modèle à deux diodes afin d'améliorer la précision des simulations, l'étude de défauts combinés pour mieux représenter les conditions réelles d'exploitation, l'entraînement d'algorithmes de diagnostic à partir de

données expérimentales issues du terrain, ainsi que l'intégration d'une inspection thermographique périodique. Cette approche permettrait de développer un système de surveillance complet associant détection à distance, localisation précise des défauts et amélioration de la fiabilité des installations photovoltaïques.



Bibliographes et références



Bibliographies et références

- [1] A. A. W. Sayigh, *Renewable Energy, Global Progress and Examples in Renewable Energy*. Wren, 2001.
- [2] REN21, *Renewables 2021 Global Status Report*. Paris, France: REN21 Secretariat, 2021.
- [3] O. Inganäs and V. Sundström, "Solar energy for electricity and fuels," *Ambio*, vol. 45, no. 1, pp. S15–S23, 2016.
- [4] S. J. Yacoob and A. A. Obed, "Modeling, simulation and implementation of photovoltaic panel model by proteus software based on high accuracy two-diode model," *J. Tech.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–51, 2019.
- [5] M. K. S. Al-Ghezi, R. T. Ahmed, and M. T. Chaichan, "The influence of temperature and irradiance on performance of the photovoltaic panel in the middle of Iraq," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 501–513, 2022.
- [6] R. Mahto and R. John, "Modeling of photovoltaic module," in *Photovoltaic Solar Energy*, London, U.K.: IntechOpen, 2021, pp. 1–12.
- [7] E. S. Ward, N. Gad, M. Lotfy Rabeh, and A. Yahia, "Effects of solar irradiance and temperature on photovoltaic module characteristics using a capacitive load method," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 12, no. 2, pp. 301–313, 2023.
- [8] T. N. Olayiwola, S.-H. Hyun, and S.-J. Choi, "Photovoltaic modeling: A comprehensive analysis of the I-V characteristic curve," *Sustainability*, vol. 16, no. 1, p. 432, 2024.
- [9] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
- [10] C. S. Toure, P. L. T. Sow, and S. Mbodji, "New experimental analytical approach to study the effects of temperature and irradiance on the physical parameters of the solar photovoltaic module in sunny and temperate zones," *Int. J. Mater. Eng. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 23–42, 2023.

- [11] R. Araneo, U. Grasselli, and S. Celozzi, "Assessment of a practical model to estimate the cell temperature of a photovoltaic module," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 2014.
- [12] G. Alvarez-Tey, J. A. Clavijo-Blanco, A. Gil-Garcia, R. Jimenez-Castaneda, and C. Garcia-Lopez, "Electrical and thermal behaviour of crystalline photovoltaic solar modules in shading conditions," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 15, p. 3038, 2019.
- [13] A. Ul-Haq, H. F. Sindi, S. Gul, and M. Jalal, "Modeling and fault categorization in thin-film and crystalline PV arrays," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26676–26700, 2020.
- [14] N. Khatir and S. Nait-Bahloul, "Evidential multi-model CNN integration for visual fault detection in solar panels," *Next Energy*, vol. 11, 2026.
- [15] P. Shinde and S. R. Deore, "Solar PV fault classification using back propagation neural network," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, 2020.
- [16] S. B. Bashir et al., "Innovative dust detection and efficient cleaning of PV panels," *Results Eng.*, vol. 25, 2025.
- [17] S. B. Bashir et al., "Innovative dust detection and efficient cleaning of PV panels: A CNN-RF approach using I-V curve data transformed into RGB mosaics," *Results Eng.*, vol. 25, 2025.
- [18] A. H. Numan, H. A. Hussein, and Z. S. Dawood, "Hot spot analysis of PV module under partial shading by IR-imaging," Univ. Technol.-Iraq, Tech. Rep.
- [19] G. Maugeri, D. Bombelli, A. Lavelli, S. Arrigoni, A. Rossetti, M. Restelli, and S. Guastella, "Enhancing fault diagnosis in photovoltaic plants," *EPJ Photovoltaics*, vol. 16, 2025.
- [20] K. Tifidat and N. Maouhoub, "An efficient method for predicting PV modules performance based on the two-diode model and adaptable to the single-diode model," *Renew. Energy*, vol. 216, p. 119102, 2023.
- [21] G. Tanda and M. Migliazzi, "Infrared thermography monitoring of solar PV systems: UAV vs aircraft," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 48, p. 102379, 2024.
- [22] A. K. V. de Oliveira, M. Aghaei, and R. Rütther, "Automatic inspection of PV power plants using aerial infrared thermography: A review," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2055, 2022.

- [23] B. Li, C. Delpha, A. Migan-Dubois, and D. Diallo, "Fault diagnosis of PV panels using full I-V characteristics and ML techniques," 2025.
- [24] A. F. Amiri, S. Kichou, H. Oudira, A. Chouder, and S. Silvestre, "Fault detection and diagnosis of a photovoltaic system based on deep learning using the combination of CNN and Bi-GRU," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1012, 2024.
- [25] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, M. C. Alonso-García, J. Muñoz-Cruzado-Alba, and J. Ballestín-Fuertes, "Infrared thermography in photovoltaic systems: Analysis of outdoor (dark) and outdoor (illuminated) inspections with a bidirectional inverter," *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4091, 2020.
- [26] HT Instruments, "SOLAR I-Vw & I-V400w: Multi-function instruments for testing and verifying single-phase PV systems and I-V curve tracing," HT Instruments S.r.l., Milan, Italy, Tech. Manual, 2021.
- [27] A. F. Amiri, S. Kichou, H. Oudira, A. Chouder, and S. Silvestre, "Fault detection and diagnosis of a photovoltaic system based on deep learning using the combination of CNN and Bi-GRU," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1012, 2024.
- [28] S. Boubaker, S. Kamel, N. Ghazouani, and A. Mellit, "Assessment of machine and deep learning approaches for fault diagnosis in photovoltaic systems using infrared thermography," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 6, p. 1686, 2023.
- [29] K. Himavarshini et al., "TinyTripleNet: A lightweight architecture for solar photovoltaic fault detection optimized for edge tensor processing unit hardware deployment," *Results Eng.*, vol. 29, 2026.
- [30] J. L. da Silva, D. Z. Naupari Huatuco, and Y. P. Molina Rodriguez, "Fault classification in photovoltaic power plants using machine learning," *Energies*, vol. 18, no. 17, p. 4681, 2025.
- [31] International Energy Agency (IEA), "Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030," IEA Paris, Tech. Rep., 2024.
- [32] A. Jäger-Waldau, "PV Status Report 2023," European Commission, Joint Research Centre, EUR 31671 EN, 2023.

- [33] M. A. Green, "Photovoltaic physics and devices," Oxford Research Encyclopedia of Materials Science, 2022.
- [34] S. Ravi and M. S. Bhaskar, "A comprehensive review on fault diagnosis in photovoltaic systems: Techniques and applications," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 34521-34544, 2023.
- [35] Y. Chaibi, M. Allouhi, and A. Malek, "Solar PV modules degradation and failure analysis: A review," *Solar Energy*, vol. 241, pp. 110-129, 2022.
- [36] B. Mellit, A. M. Pavan, and V. Lughi, "Deep learning applications in photovoltaic systems: Fault detection and monitoring," *Applied Energy*, vol. 322, p. 119430, 2022.
- [37] H. J. Kim et al., "Impact of Potential Induced Degradation (PID) on PV module performance parameters," *Progress in Photovoltaics*, vol. 31, no. 4, pp. 411-423, 2023.
- [38] T. Kerekes, R. Teodorescu, and M. Liserre, "Common-mode voltage in photovoltaic inverter topologies," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 184-191, 2021.
- [39] J. A. Tsanakas et al., "Faults and damages in operating PV modules: A review of advanced diagnostic techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 417-437, 2021.
- [40] M. Dhimish, "Fault detection and evaluation of photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 184, pp. 171-182, 2022.
- [41] J. Kapischke, M. Dhimish, and S. Madi, "Electroluminescence (EL) imaging analysis for potential-induced degradation (PID) in crystalline silicon PV modules," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 22, no. 3, pp. 312-320, 2022.