

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Energies Renouvelables

OPTION : Energies Renouvelables en
Electrotechnique

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

Par: DAIRA Amdjed & BENZAOUI Mehdi Abdallah

Intitulé

**EFFET DE L'OMBRAJE PARTIEL SUR LES
DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'UN CHAMP
PHOTOVOLTAÏQUE**

Soutenu le ... / 06 / 2023 devant le jury composé de :

Dr. BENSLIMANE Tarak	Université Mohamed Boudiaf - M'SILA	Encadreur
Dr. ZEGHLACHE Samir	Université Mohamed Boudiaf - M'SILA	Président
Dr. ROUABHI Riyadh	Université Mohamed Boudiaf - M'SILA	Examinateur

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années, merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos remerciements à notre encadreur « Dr. BENSLIMANE Tarak ».

Par ailleurs, nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département de Génie Electrique qui ont contribué à notre formation.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.

Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail soient assurées de nos plus sincères remerciements.

Dédicace

Nous dédions ce travail à nos chers parents pour leurs sacrifices

Et leurs encouragements durant toutes nos études

A nos frères et nos sœurs

A toutes nos grandes familles et à tous ceux qui nous connaissent

A tous nos amis

De la promotion du Master

« ENERGIES RENOUVELABLES EN ELT » 2021/2023

*On ne peut trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer
notre affection et nos pensées, vous êtes pour nous des frères,
sœurs et des amis sûr qu'on peut compter.*

*En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les
moments que nous avons passés ensemble,*

*On vous dédie ce travail et on vous souhaite une vie pleine de santé
et de Bonheur.*

AMDJED & MEHDI

ملخص

أدى الطلب المتزايد باستمرار على الطاقة الكهربائية إلى إنتاج الكهرباء من العديد من مصادر الطاقة المتجددة. من بين مصادر الطاقة المتجددة المختلفة، تعتبر الطاقة الشمسية مصدرًا مهمًا لأنها غير محدودة ومتاحة بسهولة وغير ملوثة. الطاقة الشمسية المولدة من الوحدات الكهروضوئية (PV) تعاني من ظروف التظليل الجزئي (PSC)، مما يقلل بشكل كبير من أداء وكفاءة الطاقة التي يتم الحصول عليها من الوحدة الكهروضوئية. يحدث التظليل الجزئي عندما تتلقى وحدات مختلفة في المصفوفة إشعاعات مختلفة. غالبًا ما ينتج التظليل الجزئي عن ظلال المباني والأشجار والسحب. للتخلص من ظروف التظليل الجزئي وتحسين كفاءة الوحدات الكهروضوئية، يتم استخدام تقنيات تكوين مختلفة على نطاق واسع. حلت هذه الدراسة خمس تكوينات مختلفة، وهي السلسلة (S)، والمتسلسلة المتوازية (SP)، والجسر المرتبط (BL)، ومشط العسل (HC) والربط الكامل (TCT)، تحت سيناريوهات مختلفة من التظليل الجزئي. تُستخدم ألواح KYOCERA-KC200GT لمحاكاة تكوينات 25 لوح للحقل الكهروضوئي في برنامج MATLAB / Simulink.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، التكوين الكهروضوئي، التظليل الجزئي، نقطة الطاقة القصوى، ماتلاب.

Résumé

La demande sans cesse croissante d'énergie électrique a conduit à la production d'électricité à partir de nombreuses sources d'énergie renouvelables. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire est une source importante car elle est infinie, facilement disponible et non polluante. L'énergie solaire générée par les modules photovoltaïques (PV) souffre des conditions d'ombrage partiel (PSC) qui réduisent considérablement les performances et l'efficacité de l'énergie obtenue à partir du module PV. L'ombrage partiel se produit lorsque différents modules du réseau reçoivent des irradiations différentes. L'ombrage partiel est souvent causé par l'ombre des bâtiments, des arbres et des nuages. Pour éliminer les conditions d'ombrage partiel et améliorer l'efficacité des modules photovoltaïques, différentes techniques de configuration sont largement utilisées. Cette étude a analysé cinq configurations différentes, à savoir Série (S), Série-Parallèle (SP), Ponts liés (BL), Nid d'abeilles (HC) et Croisement total lié (TCT), sous différents scénarios d'ombrage partiel. Les modules PV KYOCERA-KC200GT sont utilisés pour la simulation des configurations de champ PV de 25 modules dans le logiciel MATLAB/Simulink.

Mots-clés : Photovoltaïque, configuration PV, ombrage partiel, point de puissance maximale, MATLAB.

Abstract

The ever-increasing demand for electrical energy has led to the production of electricity from numerous renewable energy sources. Among the various renewable energy sources, solar energy is an important one because it is infinite, readily available and non-polluting. Solar energy generated by photovoltaic (PV) modules suffers from partial shading conditions (PSC), which considerably reduce the performance and efficiency of the energy obtained from the PV module. Partial shading occurs when different modules in the array receive different irradiances. Partial shading is often caused by the shadows of buildings, trees and clouds. To eliminate partial shading conditions and improve the efficiency of PV modules, different configuration techniques are widely used. This study analyzed five different configurations, namely Series (S), Series-Parallel (SP), Bridge Linked (BL), Honey-Comb (HC) and Total-Cross-Tied (TCT), under different partial shading scenarios. KYOCERA-KC200GT PV modules are used to simulate PV arrays of 25 modules in MATLAB/Simulink software.

Keywords: Photovoltaics, PV configuration, partial shading, maximum power point, MATLAB.

Tables des matières

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Résumé	III
Tables des matières.....	IV
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XII
Abréviations	XIII
Nomenclature.....	XV
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Energie solaire	5
I.3. Rayonnement solaire.....	6
I.3.1. Spectre du rayonnement	6
I.3.2. Type de rayonnement	8
I.3.2.1. Rayonnement direct	8
I.3.2.2. Rayonnement diffus	8
I.3.2.3. Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol	8
I.3.2.4. Rayonnement global.....	8
I.3.3. Durée d'insolation ou d'ensoleillement.....	9
I.4. Energie solaire photovoltaïque	9
I.5. Historique	10
I.6. Système photovoltaïque.....	11
I.6.1. Relation entre la cellule photovoltaïque, le module et le champ photovoltaïques	11
I.6.1.1. Cellule photovoltaïque	12
I.6.1.2. Module photovoltaïque	12
I.6.1.3. Réseau photovoltaïque (champ).....	12

I.6.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	13
I.6.3. Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques	14
I.6.4. Types de systèmes photovoltaïques.....	17
I.6.4.1. Systèmes autonomes	18
I.6.4.2. Systèmes connectés au réseau	18
I.6.4.3. Systèmes hybrides.....	20
I.6.5. Domaines d'application du photovoltaïque.....	21
I.6.6. Avantages et inconvénients du système PV	22
I.6.6.1. Avantages.....	22
I.6.6.2. Inconvénients	22
I.7. Conclusion	23
CHAPITRE II : Modélisation de cellules photovoltaïques	24
II.1. Introduction	25
II.2. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque	25
II.2.1. Modèles à une diode d'une cellule photovoltaïque	25
II.2.1.1. Modèle à 3 paramètres 1E3P	25
II.2.1.2. Modèle à 4 paramètres 1E4P	26
II.2.1.3. Modèle à 5 paramètres 1E5P	27
II.2.2. Modèles à deux diodes d'une cellule photovoltaïque	28
II.2.2.1. Modèle à deux diodes avec cinq paramètres 2E5P	28
II.2.2.2. Modèles à 6 paramètres 2E6P.....	30
II.2.2.3. Modèle à deux diodes avec sept paramètres 2E7P	31
II.2.3. Autres Modèles équivalents d'une cellule photovoltaïque.....	32
II.2.3.1. Modèle de Bishop	32
II.2.3.2. Modèle dynamique à une diode	33
II.3. Paramètres de la cellule photovoltaïque	34
II.3.1. Tension en circuit ouvert (Voc)	35
II.3.2. Courant de court-circuit (Isc)	35
II.3.3. Point de puissance maximale	35

II.3.4. Facteur de forme (FF)	35
II.3.5. Rendement (η).....	36
II.4. Groupement des cellules solaires	36
II.4.1. Connexion en série	36
II.4.2. Connexion en parallèle.....	37
II.4.3. Connexion série-parallèle.....	38
II.5. Assurer le bon fonctionnement et la protection des systèmes photovoltaïques.....	39
II.5.1. Diodes bypass.....	39
II.5.2. Diode anti-retour	41
II.5.3. Encapsulation et encadrement.....	42
II.6. Effet des résistances parasites et du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque.....	42
II.6.1. Effet des résistances parasites	42
II.6.1.1 Influence de la résistance série	43
II.6.1.2 Influence de la résistance shunt	43
II.6.2. Effet du facteur d'idéalité de la diode.....	44
II.7. Effet des conditions climatiques sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque.....	45
II.7.1. Effet de la température	45
II.7.2. Effet de l'ensoleillement	46
II.7.2.1. Ensoleillement uniforme.....	46
II.7.2.2. Ensoleillement non-uniforme.....	47
II.7. Conclusion.....	48
CHAPITRE III : Simulation de l'effet de l'ombrage partiel sur les différentes configurations d'un champ photovoltaïque.....	49
III.1. Introduction	50
III.2. Définition et types d'ombrage.....	50
III.2.1. Ombrage partiel	50
III.2.2. Ombrage total.....	51
III.3. Effet de l'ombrage partiel sur le système photovoltaïque.....	51

III.4. Différentes Configuration d'un champ photovoltaïque	52
III.4.1. Configuration PV série « S »	52
III.4.2. Configuration PV série-parallèle « SP »	53
III.4.3. Configuration PV bridge-linked « BL »	54
III.4.4. Configuration PV honey-comb « HC »	55
III.4.5. Configuration total-cross-tied « TCT »	56
III.5. Simulation des différentes configurations d'un champ PV sous l'effet de plusieurs scénarios d'ombrage	57
III.5.1. Caractéristiques des modules	58
III.5.2. Scénarios d'ombrages partial étudiant	58
III.5.3. Résultats de simulation et discussion	59
III.5.3.1. Configuration PV série « S » sous différents scenarios d'ombrage	60
III.5.3.2. Configuration PV série-parallèle « SP » sous différents scenarios d'ombrage	62
III.5.3.3. Configuration PV bridge-linked « BL » sous différents scenarios d'ombrage	64
III.5.3.4. Configuration PV honey-comb « HC » sous différents scenarios d'ombrage	66
III.5.3.5. Configuration PV total-cross-tied « TCT » sous différents scenarios d'ombrage	68
III.5.4. Simulation de l'association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC(Boost)- source de tension continue constante « TCT » sous ombrage partiel	71
III.6. Conclusion	75
Conclusion générale	77
Références bibliographiques	79
Résumé	87

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 Types d'énergie solaire.	6
Figure I. 2 Analyse spectrale du rayonnement solaire.	7
Figure I. 3 Différents types du rayonnement solaire.	9
Figure I. 4 Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque.	10
Figure I. 5 Relation entre la cellule PV, le module et le champ.	13
Figure I. 6 Principe de fonctionnement de la cellule PV.	14
Figure I. 7 Progrès des rendements de l'énergie solaire et des cellules solaires pour divers dispositifs de recherche ou de laboratoire.	15
Figure I. 8 Structure de base des principales filières photovoltaïques actuelles.	17
Figure I. 9 Représentation schématique (a) d'un système PV CC simple pour alimenter une pompe à eau sans stockage d'énergie et (b) d'un système PV complexe comprenant des batteries, des conditionneurs d'énergie et des charges CC et CA.	18
Figure I. 10 Représentation schématique d'un système photovoltaïque connecté au réseau.	19
Figure I. 11 Parc énergétique de Ain El Melh, d'une puissance de 40 MW _C , situé en Ain El Melh, en Algérie.	20
Figure I. 12 Représentation schématique d'un système photovoltaïque hybride avec un générateur diesel comme source d'électricité alternative.	21

Chapitre II

Figure II. 1 Schéma équivalent d'une cellule PV idéale avec un modèle à trois paramètres.	26
Figure II. 2 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à quatre paramètres 1E4P.	27
Figure II. 3 Schéma équivalent d'une cellule PV réelle avec un modèle à cinq paramètres à une diode.	28
Figure II. 4 Circuit équivalent de la cellule PV idéale avec un modèle à cinq paramètres à deux diodes.	29
Figure II. 5 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à six paramètres à deux diodes 2E6P.	30
Figure II. 6 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à sept paramètres à deux diodes 2E7P.	31
Figure II. 7 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle de Bishop.	32
Figure II. 8 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle dynamique.	33

Figure II. 9 Courbe caractéristique I-V et P-V de cellule solaire. Le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le point de puissance maximale et la tension et le courant au point de puissance maximale sont désignés respectivement par I_{sc} , V_{oc} , PPM, V_{mp} et I_{mp} .	34
Figure II. 10 Caractéristiques I-V et P-V de l'association en série des cellules PV.	36
Figure II. 11 Caractéristiques I-V et P-V de l'association en parallèle des cellules PV.	37
Figure II. 12 Caractéristiques I-V et P-V de l'association mixte des cellules PV.	38
Figure II. 13 Schématisation d'un module PV avec diodes bypass et diode anti-retour.	39
Figure II. 14 Schéma représente le fonctionnement d'une diode bypass.	40
Figure II. 15 Effet de la diode bypass sur les performances de GPV de 3 modules en série.	41
Figure II. 16 Composants d'un panneau solaire.	42
Figure II. 17 Effet de la variation de la résistance série sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.	43
Figure II. 18 Effet de la variation de la résistance shunt sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.	44
Figure II. 19 Influence du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.	44
Figure II. 20 Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.	46
Figure II. 21 Effet de l'ensoleillement uniforme sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.	47
Figure II. 22 Effet de l'ensoleillement non-uniforme sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.	48

Chapitre III

Figure III. 1 Schéma représente l'impact de l'ombrage sur la production d'un panneau PV.	52
Figure III. 2 Configuration d'un champ photovoltaïque en série.	53
Figure III. 3 Configuration d'un champ photovoltaïque en série-parallèle.	54
Figure III. 4 Configuration d'un champ photovoltaïque en bridge-linked.	55
Figure III. 5 Configuration d'un champ photovoltaïque en honey-comb.	56
Figure III. 6 Configuration d'un champ photovoltaïque en TCT.	57
Figure III. 7 Présentation de différents scénarios d'ombrage partiel appliqués au Générateur PV composé de 25 modules pour la configuration de raccordement BL.	59
Figure III. 8 Schéma de la simulation de la configuration PV série.	60

Figure III. 9 Caractéristiques (I-V) de la configuration PV série sous différents scénarios d’ombrage partiel.	60
Figure III. 10 Caractéristiques (P-V) de la configuration PV série sous différents scénarios d’ombrage partiel.	61
Figure III. 11 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV série sous différents scénarios d’ombrage partiel.....	61
Figure III. 12 Schéma de la simulation de la configuration PV série-parallèle.	62
Figure III. 13 Caractéristiques (I-V) de la configuration PV série-parallèle sous différents scénarios d’ombrage partiel.	62
Figure III. 14 Caractéristiques (P-V) de la configuration PV série-parallèle sous différents scénarios d’ombrage partiel.	63
Figure III. 15 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV série-parallèle sous différents scénarios d’ombrage partiel.....	63
Figure III. 16 Schéma de la simulation de la configuration PV bridge-linked	64
Figure III. 17 Caractéristiques (I-V) de la configuration bridge-linked sous différents scénarios d’ombrage partiel.	64
Figure III. 18 Caractéristiques (P-V) de la configuration bridge-linked sous différents scénarios d’ombrage partiel.	65
Figure III. 19 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV bridge-linked sous différents scénarios d’ombrage partiel.....	65
Figure III. 20 Schéma de simulation de la configuration PV honey-comb.....	66
Figure III. 21 Caractéristiques (I-V) de la configuration honey-comb sous différents scénarios d’ombrage partiel.	66
Figure III. 22 Caractéristiques (P-V) de la configuration honey-comb sous différents scénarios d’ombrage partiel.	67
Figure III. 23 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV honey-comb sous différents scénarios d’ombrage partiel.....	67
Figure III. 24 Schéma de la simulation de la configuration PV TCT.	68
Figure III. 25 Caractéristiques (I-V) de la configuration PV TCT sous différents scénarios d’ombrage partiel.	68
Figure III. 26 Caractéristiques (P-V) de la configuration PV TCT sous différents scénarios d’ombrage partiel.	69

Figure III. 27 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV TCT sous différents scénarios d'ombrage partiel.....	69
Figure III. 28 Association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC (Boost) source de tension continue constante).....	73
Figure III. 29 Rapport cyclique appliqué à l'association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.	73
Figure III. 30 Tension du GPV avec association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.	74
Figure III. 31 Courant du GPV avec association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.	74
Figure III. 32 Puissance du GPV avec association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.	75

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 Différentes structures technologiques des cellules photovoltaïques.	16
Tableau I. 2 Différentes générations des cellules photovoltaïques.....	16

Chapitre II

Tableau II. 1 Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque.....	34
---	----

Chapitre III

Tableau III. 1 Caractéristiques électriques des modules KYOCERA-KC200GT.	58
Tableau III. 2 Résultats numériques de la simulation des différentes configurations du GPV sous différents scénario d'ombrage partiel.	70

Abréviations

PV : Photovoltaïque ;

GPV : Générateur photovoltaïque ;

UV : Ultraviolet ;

IR : Infrarouge ;

P-N : Positive-Négative ;

DC : Direct current (courant continue) ;

AC : Alternative current (courant alternatif) ;

CC : Courant continue ;

CA : Courant alternatif

I-V : Courant-Tension ;

P-V : Puissance-Tension ;

Q1 : Premier quadrant ;

Q2 : deuxième quadrant ;

PSC : partial shading conditions (conditions d'ombrage partiel) ;

STC : standard test conditions (conditions de test standard) ;

MPPT : Maximum Power Point Tracking (poursuit de point de puissance maximale) ;

1E3P : Modèle à trois paramètres de la cellule photovoltaïque ;

1E4P : Modèle à quatre paramètres de la cellule photovoltaïque ;

1E5P : Modèle à cinq paramètres de la cellule photovoltaïque ;

2E5P : Modèle à deux diodes avec cinq paramètres de la cellule photovoltaïque ;

2E6P : Modèles à deux diodes avec 6 paramètres de la cellule photovoltaïque ;

2E7P : Modèle à deux diodes avec sept paramètres de la cellule photovoltaïque ;

EVA : Ethylène-acétate de vinyle ;

PVB : Butyral de polyvinyle ;

PPMG : Point de puissance maximale globale ;

PPMLs : Plusieurs points de puissance maximale locale ;

FF : Facteur de forme ;

PPM : Point de puissance maximale ;

MPP : Maximum power point ;

S : Série ;

SP : Série-parallèle ;

BL : Bridge-Linked ;

HC : Honey-Comb ;

TCT : Totale-Cros-Tied ;

Nomenclature

N_p : Nombre de strings branchés en parallèle ;

A : Surface active du générateur (m^2) ;

G : Eclairement dans les conditions *STC* ;

γ : Coefficient de température des cellules ;

T : Température ;

P_{mpp} : Puissance maximale [W] ;

V_{mpp} : Tension à Puissance maximale [V] ;

I_{mpp} : Court à Puissance maximale [A] ;

V_{oc} : Tension en circuit ouvert [V] ;

I_{sc} : Courant de court-circuit [A] ;

λ : Longueur d'onde ;

h : Constante de Planck [$J s^{-1}$] ;

C : Vitesse de propagation [ms^{-1}] ;

I_0 : Courant de saturation de la diode ;

A, n : Facteur d'idéalité de la diode ;

k : Constante de Boltzmann [J/K] ;

q : Charge électrique [coulomb] ;

T : Température [Kelvin] ;

I_{ph}, I_L : Photo-courant [A] ;

A : Facteur d'idéalité de la diode ;

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode [A] ;

R_s : Résistance série de la cellule solaire [Ω] ;

R_p, R_{sh} : Résistance parallèle de la cellule solaire [Ω] ;

A_1, A_2 : Facteur d'idéalité de la diode 1 et de la diode 2 ;

I_{01}, I_{02} : Courant de saturation inverse de la diode 1 et de la diode 2 [A] ;

FF : Facteur de forme ;

P_{PV} : Puissance photovoltaïque [W] ;

P_{max} : Puissance maximale ;

V_{PM} : tension au PPM ;

I_{PM} : courant au PPM ;

I_{PV} : Courant photovoltaïque [A] ;

V_{PV} : Tension photovoltaïque [V] ;

G_{ref} : Eclairement de référence ;

T_{ref} : Température de référence ;

μ_c : Facteur d'influence de la température sur le courant de court-circuit ;

μ_v : Facteur d'influence de l'éclairement sur la tension à vide ;

I_{cc_ref} : Courant de court-circuit de référence ;

V_{co_ref} : tension à vide de référence ;

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'augmentation constante de la demande d'énergie, due à la croissance démographique, au développement technologique et à l'expansion industrielle, a conduit à explorer des sources alternatives de production d'énergie. Les problèmes environnementaux liés au réchauffement de la planète, aux effets de serre, à l'épuisement des réserves naturelles telles que les combustibles fossiles, le gaz naturel, le charbon, etc. incitent la recherche à investir dans des technologies permettant de récolter de l'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables telles que le vent, le soleil, les ondes de marée, etc. Parmi celles-ci, l'énergie solaire, avec des niveaux d'irradiation allant jusqu'à 1kW/m^2 , est abondante et l'énergie photovoltaïque est un candidat de choix pour la production d'énergie électrique. L'énergie photovoltaïque est le processus de conversion directe de la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires. Cependant, une meilleure compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques est nécessaire pour améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie. [1]

La technologie photovoltaïque présente encore quelques inconvénients qui empêchent les systèmes de fournir le rendement maximal possible. L'ombrage partiel est la principale source de réduction de puissance dans les systèmes photovoltaïques, où deux problèmes peuvent se poser. Tout d'abord, la présence d'ombrage partiel (lorsque les spécifications des modules sont différentes ou lorsque les modules connectés en série reçoivent des niveaux différents d'irradiance) peut créer un problème qui réduit la puissance produite est l'inadéquation de puissance entre les modèles PV connectés en série. Les pertes dues à déséquilibre dans le champ peuvent se produire de multiples pics de puissance, dont un seul est le pic global. Cela pose des problèmes aux suiveurs de point de puissance maximale conventionnels (MPPT) qui peuvent être piégés par leurs algorithmes dans le mauvais pic de puissance. Pour minimiser l'effet d'ombrage partiel et améliorer l'efficacité des modules photovoltaïques, multiples approches (approche d'optimisation par commande, approche d'optimisation par structure ou configuration du générateur PV (association des modules PV) sont utilisées [2] [3].

Dans ce sens, le présent projet de fin d'étude a pour objet l'étude en simulation par Matlab/Simulink de l'effet de l'ombrage partiel sur les différentes configurations (S, SP, BL, HC et TCT) du générateur PV (GPV) et la recherche de la configuration optimale donnant la puissance maximale du GPV.

Le présent mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce travail est consacré à la présentation des certaines généralités sur les systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté en détail les modèles mathématiques de la cellule PV (module, panneau et champ) photovoltaïque. Ensuite, nous avons exposé les principales caractéristiques et les paramètres des cellules photovoltaïques et leurs associations dans un générateur photovoltaïque (GPV), tout en présenté des notions sur la protection du système PV pour lui assurer un bon fonctionnement. Enfin, nous avons exposant l'effet de la température et l'éclairement et les facteurs qui affectent leurs performances et les caractéristiques I-V et P-V.

Le dernier chapitre sera consacré à l'étude comparative principalement quantitative par simulation de l'effet de différents scenarios d'ombrage partiel sur les différentes structures architecturales du champ PV.

Vers la fin, on terminera notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

La demande d'énergie augmente de jour en jour avec la croissance de la population mondiale. Alors que la demande d'énergie augmente et que les sources d'énergie conventionnelles sont confrontées à des pénuries et à des impacts environnementaux, l'utilisation des énergies renouvelables fait l'objet d'une plus grande attention. L'énergie solaire a été choisie comme la ressource la plus abondante pour l'énergie future et devient un concurrent sérieux des combustibles fossiles. L'énergie solaire est une méthode importante de production d'énergie propre parce qu'elle est gratuite, abondante, réalisable et respectueuse de l'environnement. Cependant, les combustibles fossiles présentent de nombreux inconvénients, tels que la diminution des réserves et la pollution [4]. Au contraire, les sources d'énergie renouvelables sont reconnues comme étant beaucoup plus propres et produisant de l'énergie sans causer de pollution. La production traditionnelle est l'une des principales causes de pollution de l'environnement et a un impact négatif sur la santé humaine en raison des émissions de gaz à effet de serre [5]. Une méthode alternative de production soutient la production conventionnelle existante pendant les heures de pointe. En particulier, les technologies d'énergie renouvelable sont désormais largement connues comme une contribution vitale à la demande d'un avenir énergétique durable. Par conséquent, il est absolument nécessaire de trouver une méthode de production alternative pour protéger l'environnement et la santé de l'impact de l'énergie conventionnelle.

I.2. Energie solaire

L'énergie solaire est à la pointe de l'énergie propre, et c'est un exemple évident d'énergie renouvelable qui provient purement d'une source naturelle et qui exploite l'énergie du soleil. L'énergie solaire est prédominante partout dans le monde et à tout moment. C'est le moyen le plus direct de convertir le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet des cellules photovoltaïques, 120 000 TW est le niveau de rayonnement qui est déposé par le soleil sur la surface de la Terre, ce qui dépasse de loin les besoins de l'homme. L'énergie solaire peut être exploitée de trois manières principales, à savoir la chaleur capturée, qui peut être utilisée comme énergie thermique solaire, la conversion du rayonnement solaire incident en énergie électrique, qui peut être réalisée avec l'aide de cellules photovoltaïques solaires, et le stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur.[4], [6]

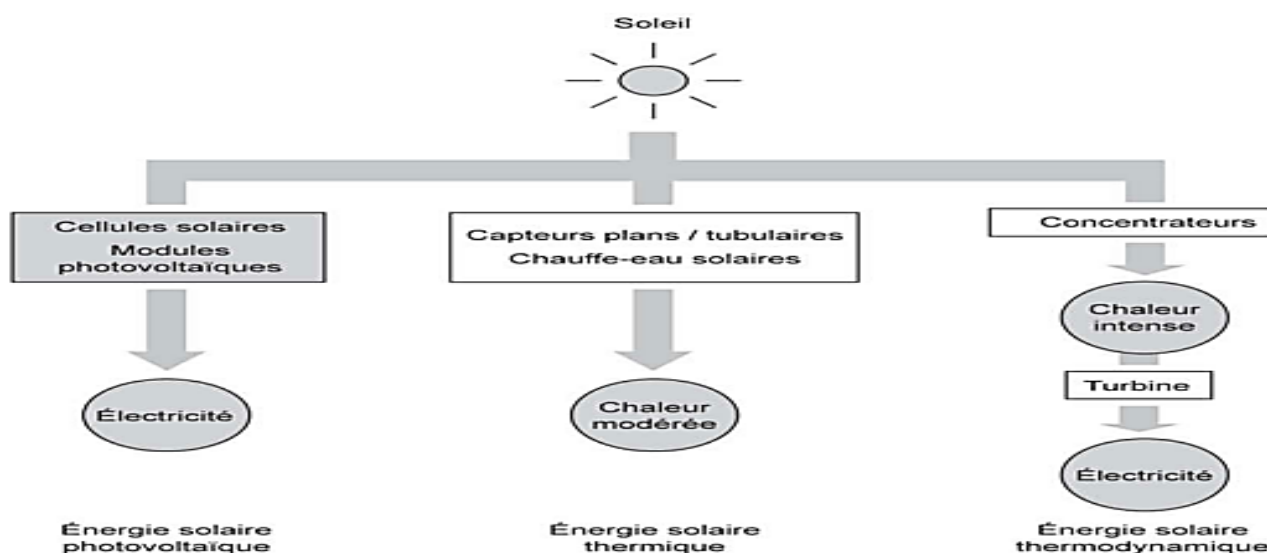


Figure I. 1 Types d'énergie solaire.

I.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le soleil, qui est envoyée dans toutes les directions à travers l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre soit variable et abondamment disponible sur toute la surface de la terre avec une valeur maximale d'environ 1000 W/m^2 (rarement 1200 W/m^2). Lorsqu'il atteint l'atmosphère, sa densité moyenne totale vaut 1367 W/m^2 , à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. [7], [8]. En effet, la rotation et l'inclinaison de la terre rendent le flux solaire reçu au niveau du sol dépendant des facteurs suivants :

- L'heure ou le moment considéré dans la journée,
- La période de l'année (la saison),
- La localisation géographique du site (Latitude et Altitude du lieu).
- La direction, la nature et l'inclinaison de la surface de la Terre.
- Les conditions météorologiques et degré de pollution (nuageuses, nébulosité, poussière, humidité...).

I.3.1. Spectre du rayonnement

Le rayonnement solaire mis par le soleil est un rayonnement électromagnétique composé de «grains» de lumière appelés photons. Ces types de rayonnement diffèrent par leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et l'énergie des photons L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde du rayon solaire λ selon la formule suivante [8] :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où :

h : Constante de Planck égale à $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s

c : Vitesse de propagation des photons (vitesse de lumière) égale à $3 \cdot 10^8$ m/s.

La figure I.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique solaire (analyse spectrale du rayonnement solaire) qui est comprise dans une bande de longueur d'onde variant de $0,2 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [8], [9]:

- Ultraviolet (UV) : rayonnement invisible avec une longueur d'onde ($0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$) ou ($0,20 < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$) qui présente 9 % du rayonnement solaire.
- Visible avec une longueur d'onde ($0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$) ou ($0,4 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$) qui présente 47 % du rayonnement solaire.
- Infrarouge (IR) (invisible) : rayonnement invisible avec une longueur d'onde ($0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$) ou ($0,8 < \lambda < 10 \mu\text{m}$) qui présente 44 % du rayonnement solaire.

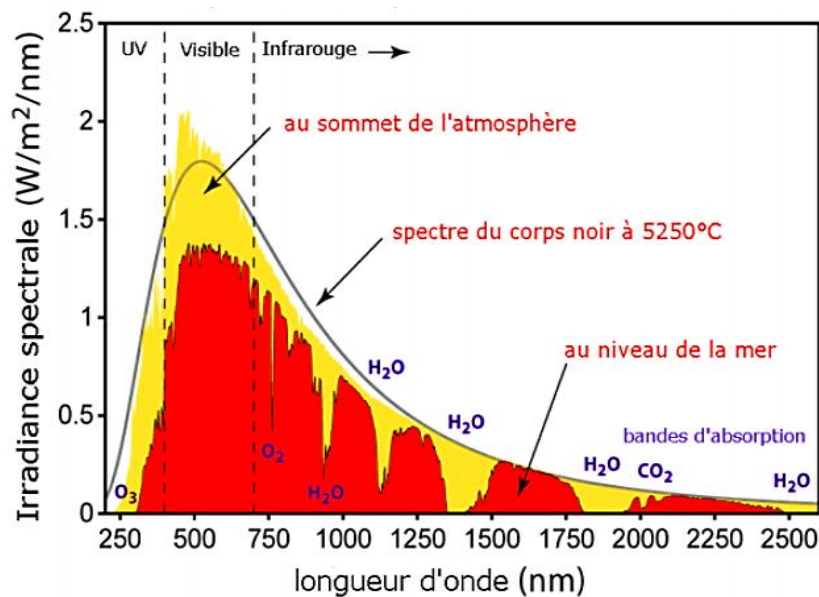
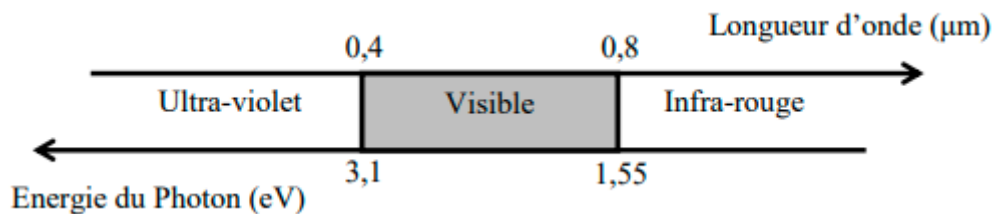


Figure I. 2 Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I.3.2. Type de rayonnement

Il y a quatre types de rayonnement [7]–[10] :

I.3.2.1. Rayonnement direct

C'est un rayonnement reçu directement du soleil sans être diffusé par l'atmosphère. Ses rayons parallèles entre eux peuvent être mesurés avec un pyréliomètre.

I.3.2.2. Rayonnement diffus

La diffusion est le phénomène responsable de l'éclatement et la distribution du faisceau lumineux parallèle provenant directement du soleil en plusieurs faisceaux qui vont dans toutes les directions dans le ciel par l'action des molécules d'air, des gouttelettes d'eau (nuages) et des poussières. Le rayonnement produit par ce phénomène est le rayonnement diffus. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

I.3.2.3. Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol

C'est la partie du rayonnement incident qui est réfléchi par un obstacle (le sol ou par des objets se trouvant à sa surface), tout dépend de la valeur moyenne de sa réluctance vis-à-vis du rayonnement considéré et l'angle d'incidence rayonnement incident. Plus l'obstacle est réfléchissant plus l'albédo est important.

I.3.2.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus par un objet : le rayonnement direct, le rayonnement diffus, le rayonnement réfléchi. Il peut être mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

La figure I.3 représente les différents types du rayonnement solaire.

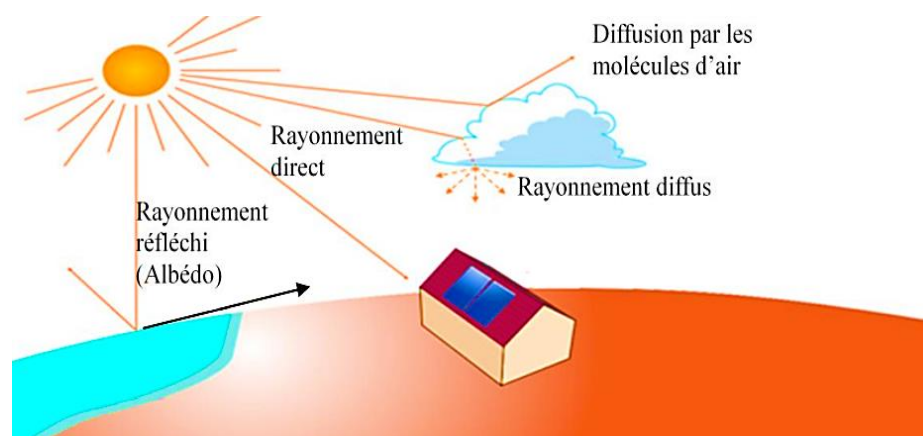


Figure I. 3 Différents types du rayonnement solaire.

I.3.3. Durée d'insolation ou d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement, également connue sous le nom d'insolation, désigne le temps pendant lequel un endroit spécifique de la Terre reçoit la lumière du soleil au cours d'une période donnée, telle qu'un jour ou une année 1. L'insolation est le rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre et se mesure par la quantité d'énergie solaire reçue par centimètre carré et par minute 2. La durée de l'ensoleillement ou de l'insolation varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment la situation géographique, la période de l'année et les conditions atmosphériques. [8], [9], [11]

I.4. Energie solaire photovoltaïque

Au contraire à l'énergie solaire thermique, qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière pour convertir l'énergie des photons atteignant la surface de la terre en électricité. La lumière du soleil (photons) transfère son énergie aux électrons dans les semi-conducteurs (qui constituent les cellules photovoltaïques). Cette conversion (effet photovoltaïque) n'a aucune action mécanique, aucun bruit, aucune pollution et aucun combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Becquerel en 1839. Le mot "photovoltaïque" est dérivé de "photo" (du grec "phos" signifiant "lumière") et "Volt" (le nom de famille du physicien Alessandro Volta, qui a apporté une contribution très importante à l'étude de l'électricité). [12], [13]

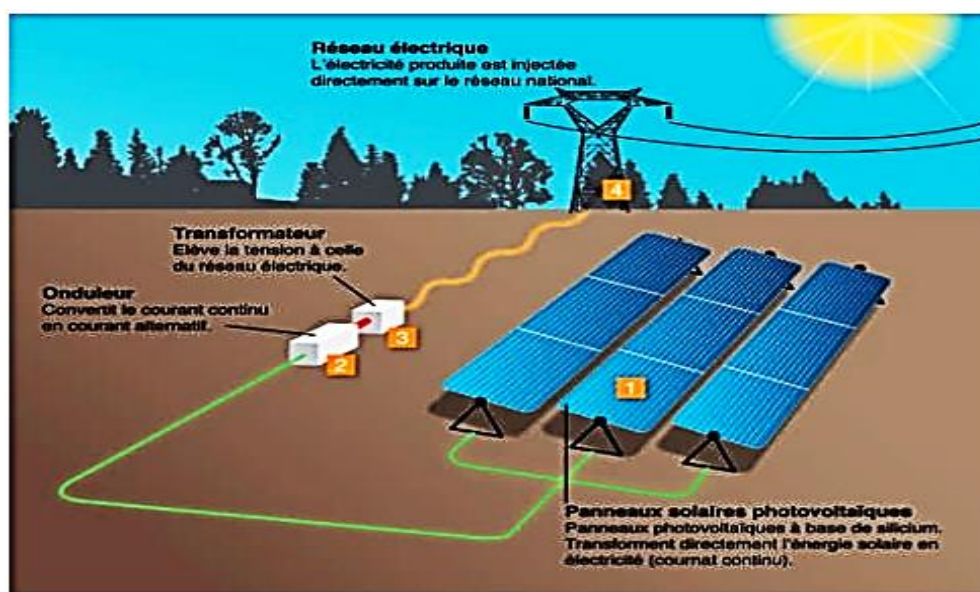


Figure I. 4 Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque [3].

I.5. Historique [7]

L'histoire de la recherche et du développement portant sur l'effet photoélectrique et de ses applications peut être résumé chronologiquement comme suit :

1839 : Découvert par Antoine César Becquerel et son fils Edmond, France

1875 : Werner Von Siemens (1816-1892) expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet PV dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1886 : Etudié par Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894, Allemagne)

1905 : Expliqué par Albert Einstein (1879-1955) ; Il a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules : les photons.

1954 : Trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier module solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série (application pour les satellites).

1958 : Premier satellite artificiel équipé de cellules solaires (Vanguard I), suivi du lancement de plusieurs satellites équipés de systèmes photovoltaïques. Le rendement a connu un progrès très rapide de 8% en 1957 à 14% en 1960.

1960 : Les années 60 voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium. A cause du prix élevé des cellules solaires, la seule application a été dans le domaine spatial et cela jusqu'aux années 70.

1973 : Crise pétrolière. Développement des systèmes solaires (la première maison alimentée par des cellules PV est construite à l'Université de Delaware, Etats-Unis).

1983 : La première voiture alimentée par énergie solaire PV parcourt une distance de 4000km en Australie.

1985 : Université de Nouvelle-Galles du Sud (Australie) : Piles de rendement 20%

1994: National Renewable Energy Laboratory (NREL): Pile de rendement 30%.

Fin 2014 : Empire Valley Project, avec une puissance de 890 mégawatts (Amérique).

Aujourd'hui :

- Gros travail de recherche partout dans le monde.
- Plusieurs stations solaires PV (1MWc et plus) à injection au réseau sont implantées à l'échelle nationale.
- Technologie qui commence à approcher de la viabilité économique.
- Les prix en descente pour le Watt produit par l'énergie photovoltaïque.

I.6. Système photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (PV) constituent une source d'électricité respectueuse de l'environnement en tant qu'énergie renouvelable. Un système solaire photovoltaïque se compose de modules ou de panneaux solaires qui absorbent et convertissent la lumière du soleil en électricité. Les applications des systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont principalement composées de cinq éléments : un PV (module ou champ) qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique, un convertisseur DC-DC qui convertit les faibles tensions générées par les modules photovoltaïques en une tension continue élevée, un onduleur qui convertit la tension continue élevée en tension alternative, un contrôleur numérique MPPT qui contrôle le fonctionnement du convertisseur, un filtre AC qui absorbe les harmoniques de tension et de courant générées par l'onduleur. [14]

I.6.1. Relation entre la cellule photovoltaïque, le module et le champ photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont les éléments de base de la construction des systèmes d'alimentation PV. Généralement, la puissance délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à quelques watts en raison de la surface limitée. Cette faible puissance n'est pas suffisante pour atteindre des centaines de watts. Les cellules photovoltaïques sont donc connectées en série ou en parallèle pour former un module photovoltaïque. De la même manière, il est possible de relier un groupe de modules PV (en série, en parallèle ou les deux) pour produire le courant et la tension souhaités, appelés réseaux PV (champ), dont la gamme de puissance s'étend des kilowatts aux mégawatts. [6]

I.6.1.1. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une jonction semi-conductrice p-n, et le type de cellule le plus courant est fabriqué à partir de silicium. Une fine couche de semi-conducteur est spécialement traitée pour former un champ électrique, positif d'un côté et négatif de l'autre. Lorsque l'énergie lumineuse du soleil frappe la cellule solaire, ce champ électrique produit un flux de courant alors que la cellule solaire est reliée à une charge électrique. Cette conversion du rayonnement solaire en électricité se produit par effet photoélectrique. En raison de la faible tension générée dans une cellule PV, qui est d'environ 0,5 V, de nombreuses cellules PV sont connectées électriquement en parallèle pour un courant élevé et en série pour une tension élevée. [15]

I.6.1.2. Module photovoltaïque

La combinaison de cellules photovoltaïques scellées dans un laminé de protection environnementale, appelé module photovoltaïque, produit une quantité appréciable d'énergie électrique. Un module photovoltaïque, également appelé panneau, est un regroupement de cellules. Le principal avantage des modules photovoltaïques est qu'ils ne comportent pas de pièces mobiles, donc pas de bruit ni d'émissions. En principe, les cellules photovoltaïques sont connectées en parallèle ou en série pour former un module photovoltaïque ayant la puissance souhaitée, comme le montre la figure I.5. En fait, la puissance d'un seul module n'est pas suffisante pour répondre à la demande d'électricité d'une maison ou d'une entreprise. Il existe deux méthodes pour connecter les modules d'un réseau PV : en série pour obtenir les tensions souhaitées ou en parallèle pour permettre au système de produire plus de courant. [16]

I.6.1.3. Réseau photovoltaïque (champ)

Un champ photovoltaïque est une corrélation de modules, composés de nombreuses cellules photovoltaïques en série ou en parallèle. Un seul module photovoltaïque est rarement suffisant pour une utilisation commerciale. Par conséquent, le réseau photovoltaïque se compose de nombreux modules dans un système. En outre, ces modules peuvent être connectés en série pour augmenter la tension ou en parallèle pour augmenter le courant sur un seul ou plusieurs racks. Par conséquent, le réseau photovoltaïque répond aux exigences de la charge électrique. [17]

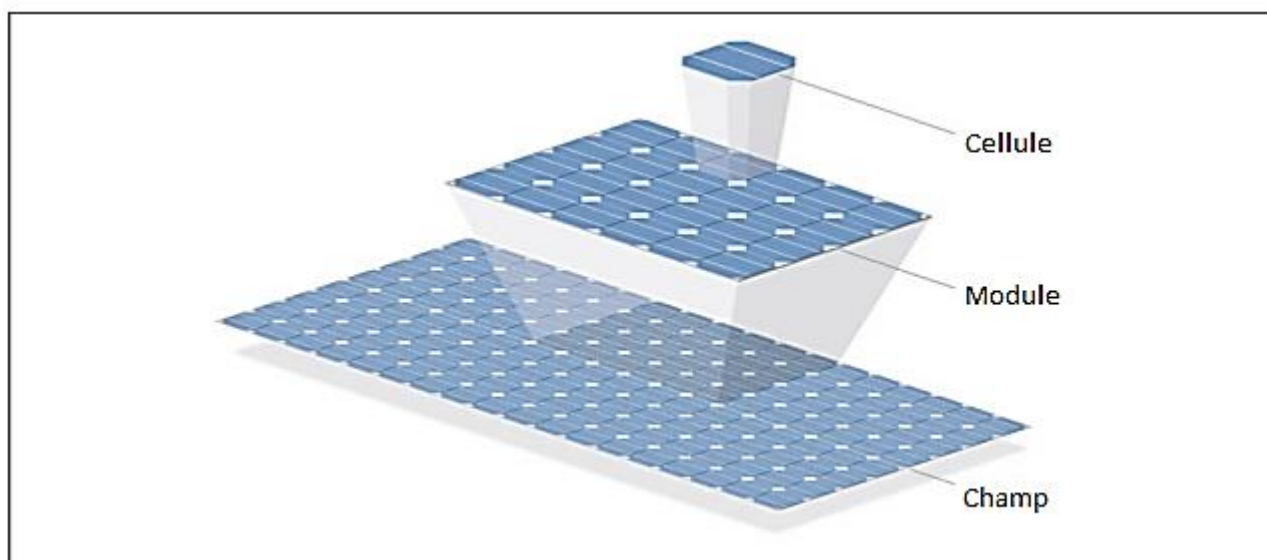


Figure I. 5 Relation entre la cellule PV, le module et le champ. [17]

I.6.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire la conversion du rayonnement solaire en électricité. Un impact photoélectrique peut être défini comme un phénomène dans lequel un électron est forcé de sortir de la bande de conduction à la suite de l'absorption de la lumière du soleil. L'absorption de la lumière solaire génère une paire d'électrons et de trous. Les paires d'électrons et de trous sont ensuite divisées par la structure du dispositif. Les électrons vont vers la borne négative et les trous vers la borne positive. C'est ainsi que l'énergie électrique est générée. Ce processus est illustré à la figure I.6, qui présente les principales caractéristiques des cellules solaires typiques utilisées aujourd'hui [18]. Les cellules photovoltaïques sont composées de divers matériaux semi-conducteurs. Au cours des dernières décennies, le silicium a été le seul matériau utilisé pour la fabrication des cellules solaires. Bien que d'autres matériaux et techniques aient été développés, le silicium est encore utilisé dans plus de 80 % des productions. Si le silicium est si répandu, c'est parce qu'il est l'un des matériaux les plus abondants de la croûte terrestre, sous la forme de dioxyde de silicium. Il existe trois principaux types de cellules solaires au silicium : les cellules solaires monocristallines, les cellules solaires polycristallines et les cellules solaires au silicium amorphe. Les cellules monocristallines et polycristallines sont les plus utilisées. Le silicium amorphe est moins utilisé et son efficacité est très faible. Les cellules solaires modernes sont composées de séléniure de cuivre, d'indium et de gallium (di) (CIGS) ou de tellure de cadmium (CdTe). [19], [20]

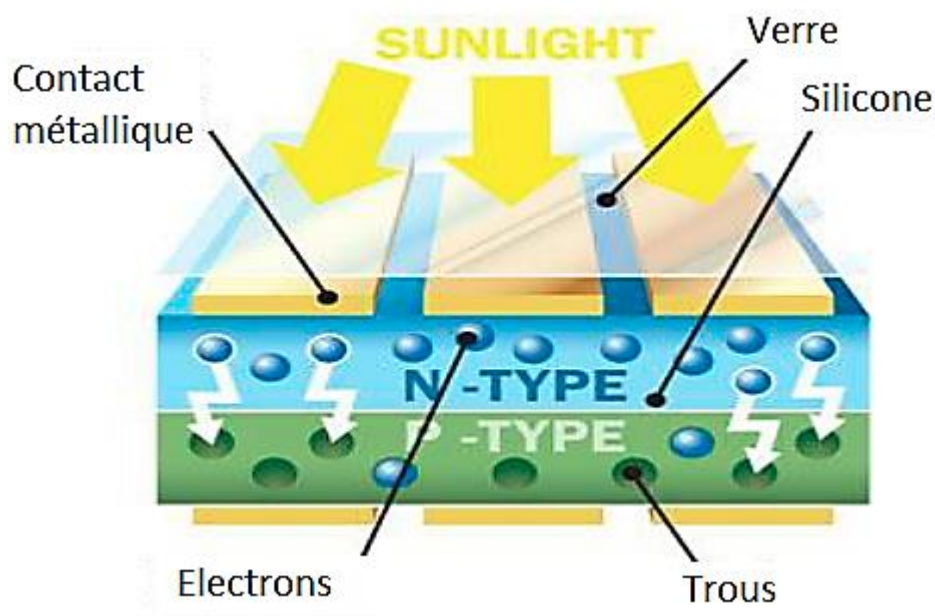


Figure I. 6 Principe de fonctionnement de la cellule PV. [20]

I.6.3. Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques

Beaucoup de recherches ont été effectuées sur la technologie des cellules photovoltaïques pour améliorer le rendement et diminuer les coûts. Pour augmenter les rendements, la tendance doit comporter des couches minces en tandem silicium amorphe, silicium microcristallin et aux cellules à multicouches associant des semi-conducteurs de sensibilités complémentaires. La figure I.7 montre l'évolution des rendements records pour les filières photovoltaïques principales et actuelles (jusqu'en 2016). On y trouve les cellules au silicium monocristallin et poly-cristallin, les cellules au silicium amorphe, les cellules au diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), au tellurure de cadmium (CdTe) mais, aussi les cellules à base de composés appelés III-V et leurs alliages, qui appartiennent à la catégorie des cellules à multijonction. À côté de ces filières bien établies, sont apparues de nouvelles filières, basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, qui n'en sont donc qu'à leurs balbutiements. Les filières Si, CIS et CdTe sont actuellement les seules utilisées de façon importante. Les chercheurs se focalisent particulièrement sur l'augmentation des rendements. Le graphique de la figure I.7 montre que toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis quarante ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes. Les records en laboratoire le rappellent régulièrement, tel celui de 46 % récemment obtenu aux USA grâce à des cellules hélas trop complexes

pour une utilisation commune. Mais, le challenge est là et il constitue une motivation essentielle de la recherche. [19]

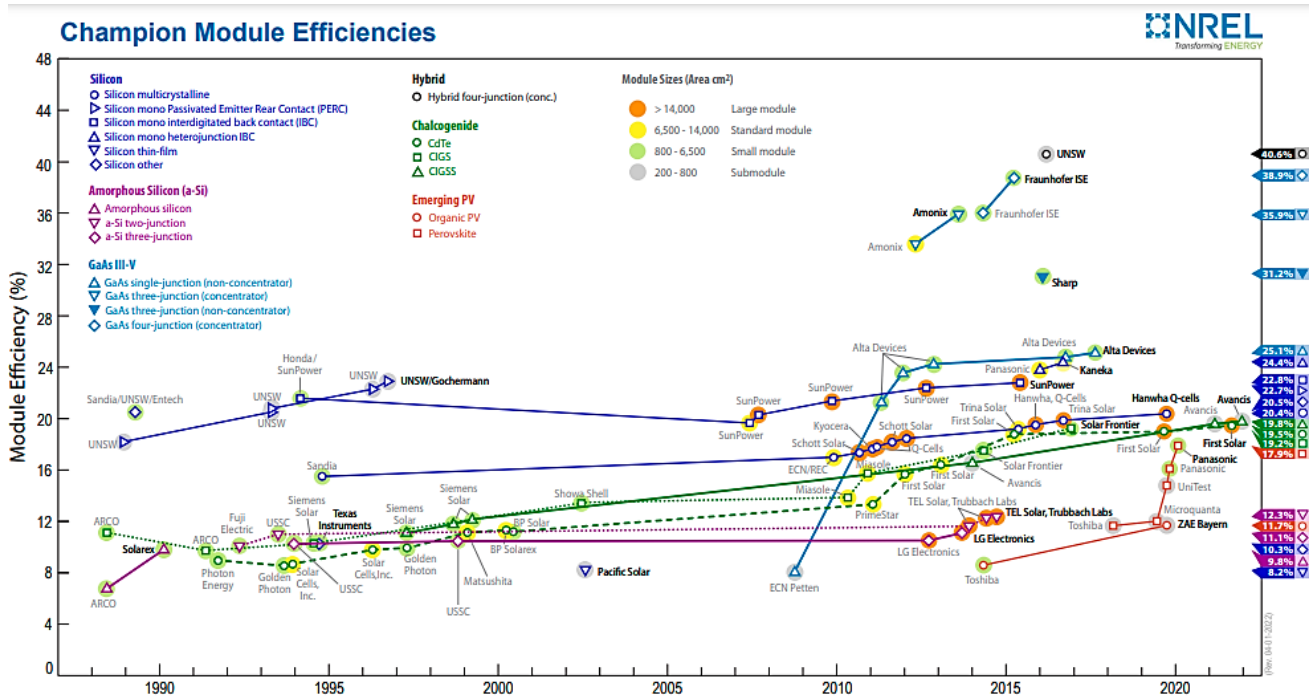


Figure I. 7 Progrès des rendements de l'énergie solaire et des cellules solaires pour divers dispositifs de recherche ou de laboratoire. [NREL]

On peut classifier les différentes structures et filières des cellules solaires selon la technologie d'élaboration et la génération sous les tableaux I.1 et I.2.

Les Structures des Cellules	
Structure homojonction	<p>Un seul matériau à modifier de sorte qu'un côté est de type p et l'autre côté est le type n.</p> <p>Une jonction PN est située de telle sorte que la quantité maximale de la lumière soit absorbée près de lui.</p>
Structure hétérojonction	<p>La jonction est formée avec le contact entre deux semi-conducteurs différents.</p> <p>Couche supérieure - avec une bande interdite élevée (haute), sélectionnée pour sa transparence à la lumière.</p> <p>Couche inférieure - avec une faible largeur de bande interdite qui absorbe facilement la lumière.</p>
Structure p-i-n et n-i-p	<p>Un sandwich à trois couches est créé.</p> <p>Il contient une couche intrinsèque dans le milieu entre la couche de type n et la couche de type p.</p> <p>La lumière génère des électrons et des trous libres dans la région intrinsèque.</p>

Tableau I. 1 Différentes structures technologiques des cellules photovoltaïques. [19]

Matériaux utilisés	
La première génération	Les wafers de silicium monocristal (c-Si) ou bien multicristallin (mc-Si).
La deuxième génération Couches minces	<p>Le silicium amorphe (a-Si).</p> <p>Le silicium microcristallin (μc-Si).</p> <p>Le tellurure de cadmium (CdTe).</p> <p>Le Cuivre-gallium-indium-diséléniure (CIGS) et leurs alliages.</p>
La troisième génération	<p>Cellules solaires à base des nano-cristaux. Cellules solaires à base des concentrateurs (CPV).</p> <p>Cellules photo-électrochimiques (PEC) Cellules solaires organiques.</p> <p>Cellules solaires à base de colorant sensibilisé (Dye-sensitized) DSSC</p>
La quatrième génération	Hybride - cristaux inorganiques dans une matrice de polymère.

Tableau I. 2 Différentes générations des cellules photovoltaïques. [19]

En outre, la figure I.8 montre quelques structures de base des principales filières photovoltaïques actuelles.

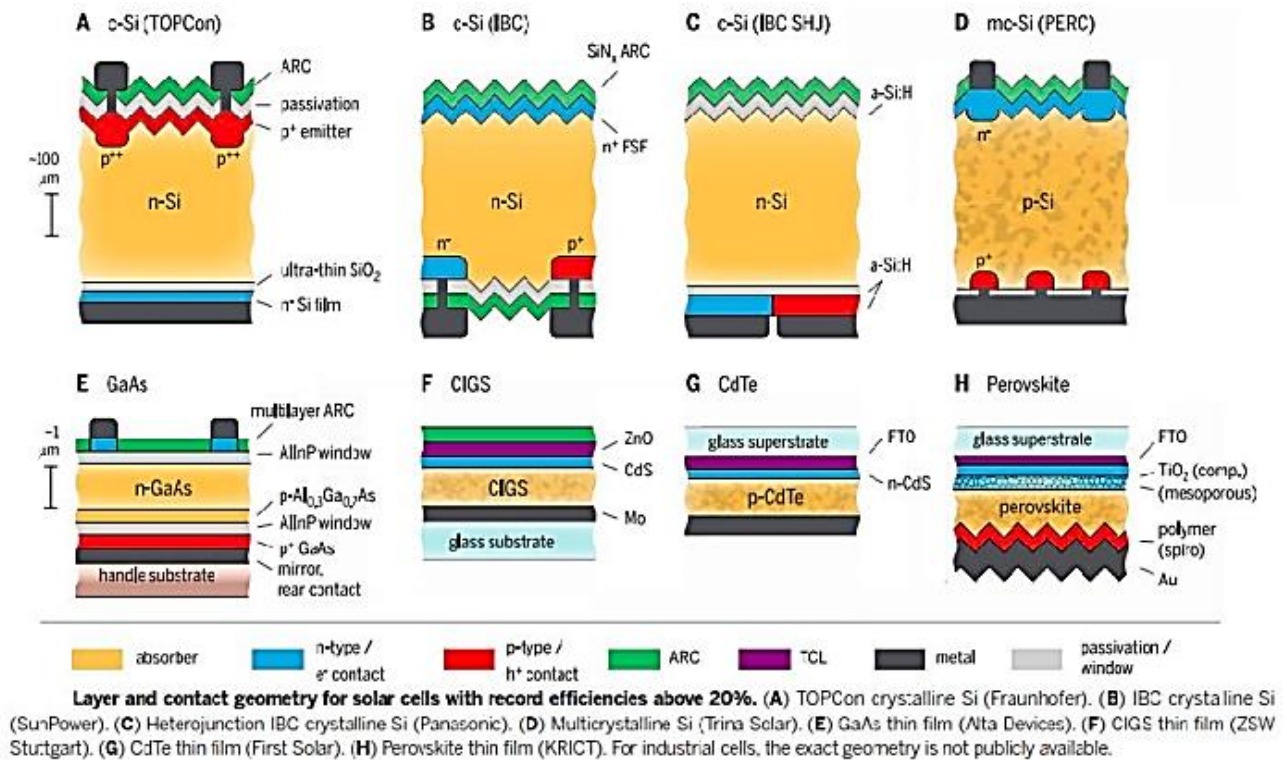


Figure I. 8 Structure de base des principales filières photovoltaïques actuelles. [19]

I.6.4. Types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques peuvent être très simples, composés uniquement d'un module photovoltaïque et d'une charge, comme dans le cas de l'alimentation directe du moteur d'une pompe à eau, qui n'a besoin de fonctionner que lorsque le soleil brille. Cependant, lorsqu'il s'agit par exemple d'alimenter une maison entière, le système doit être opérationnel jour et nuit. Il peut également devoir alimenter des charges en courant alternatif et en courant continu, disposer d'une puissance de réserve et même inclure un générateur de secours. En fonction de la configuration du système, on peut distinguer trois grands types de systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes, les systèmes raccordés au réseau et les systèmes hybrides. Les principes et les éléments de base des systèmes photovoltaïques restent les mêmes. Les systèmes sont adaptés pour répondre à des besoins particuliers en variant le type et la quantité des éléments de base. La conception modulaire du système permet de l'étendre facilement lorsque les besoins en énergie changent. [4], [7]

I.6.4.1. Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes reposent uniquement sur l'énergie solaire. Ces systèmes peuvent être constitués uniquement de modules photovoltaïques et d'une charge, ou ils peuvent inclure des batteries pour le stockage de l'énergie. Lorsque des batteries sont utilisées, des régulateurs de charge sont inclus, qui éteignent les modules photovoltaïques lorsque les batteries sont complètement chargées, et peuvent éteindre la charge pour éviter que les batteries ne se déchargent en dessous d'une certaine limite. Les batteries doivent avoir une capacité suffisante pour stocker l'énergie produite pendant la journée afin de l'utiliser la nuit et pendant les périodes de mauvais temps [4], [7]. La figure I.9 présente schématiquement des exemples de systèmes autonomes : (a) un simple système photovoltaïque à courant continu sans batterie et (b) un grand système photovoltaïque avec des charges à courant continu et à courant alternatif.

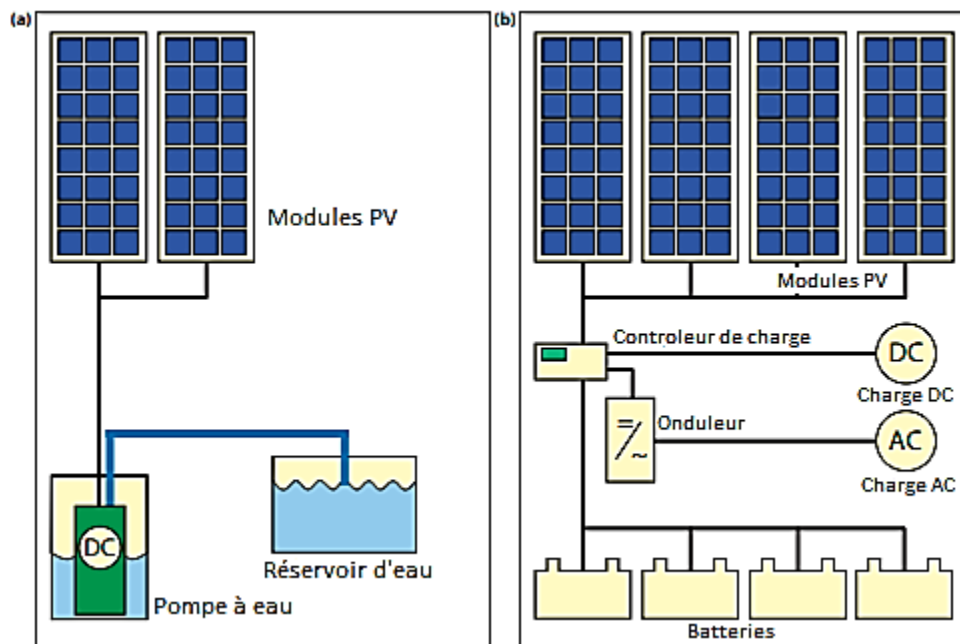


Figure I. 9 Représentation schématique (a) d'un système PV CC simple pour alimenter une pompe à eau sans stockage d'énergie et (b) d'un système PV complexe comprenant des batteries, des conditionneurs d'énergie et des charges CC et CA. [4]

I.6.4.2. Systèmes connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont de plus en plus populaires pour les applications intégrées aux bâtiments. Comme l'illustre la figure I.10, ils sont connectés au réseau par l'intermédiaire d'onduleurs, qui convertissent l'électricité en courant continu en électricité en courant alternatif. Dans les petits systèmes tels qu'ils sont installés dans les maisons résidentielles, l'onduleur est connecté au tableau de distribution, d'où l'énergie produite par le système photovoltaïque est transférée au réseau

électrique ou aux appareils à courant alternatif de la maison. Ces systèmes ne nécessitent pas de batteries, puisqu'ils sont connectés au réseau, qui joue le rôle de tampon en transportant une offre excédentaire d'électricité photovoltaïque, tandis que le réseau alimente également la maison en électricité lorsque la production d'électricité photovoltaïque est insuffisante. [4], [7]

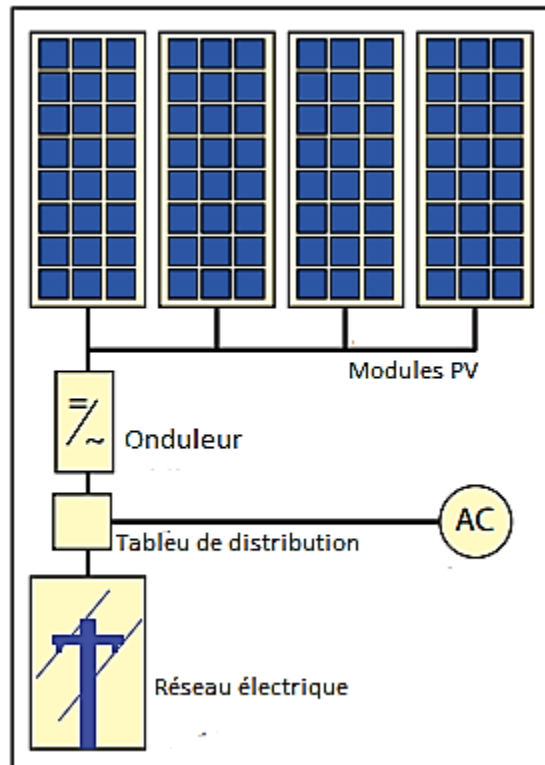


Figure I. 10 Représentation schématique d'un système photovoltaïque connecté au réseau. [4]

Les grands champs photovoltaïques agissent comme des centrales électriques à partir desquelles toute l'électricité photovoltaïque générée est directement acheminée vers le réseau électrique. Ils peuvent atteindre des puissances de pointe de plusieurs centaines de 40 MW_C . La figure I.11 montre un système de 40 MW_C installé en Algérie.



Figure I. 11 Parc énergétique de Ain El Melh, d'une puissance de 40 MW_C, situé en Ain El Melh, en Algérie.

I.6.4.3. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides consistent en une combinaison de modules photovoltaïques et d'une méthode complémentaire de production d'électricité telle qu'un générateur diesel, à gaz ou éolien. Le schéma d'un système hybride est présenté à la figure I.12. Afin d'optimiser les différentes méthodes de production d'électricité, les systèmes hybrides nécessitent généralement des commandes plus sophistiquées que les systèmes photovoltaïques autonomes ou connectés au réseau. Par exemple, dans le cas d'un système PV/diesel, le moteur diesel doit être démarré lorsque la batterie atteint un niveau de décharge donné et arrêté à nouveau lorsque la batterie atteint un état de charge adéquat. Le générateur de secours peut être utilisé pour recharger les batteries uniquement ou pour alimenter la charge également. [4], [7]

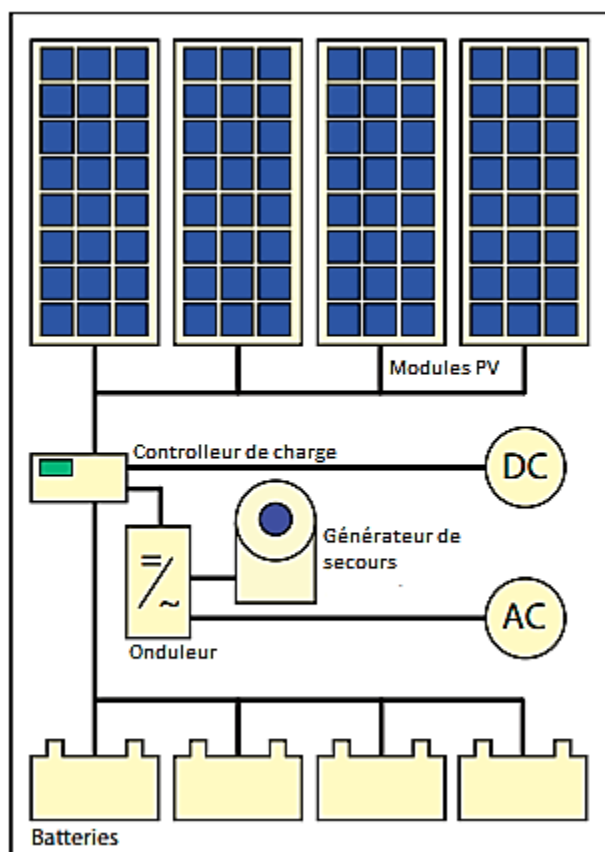


Figure I. 12 Représentation schématique d'un système photovoltaïque hybride avec un générateur diesel comme source d'électricité alternative. [4]

I.6.5. Domaines d'application du photovoltaïque

Les technologies solaires sont généralement considérées comme passives ou actives en fonction de la manière dont elles captent, transforment et distribuent la lumière du soleil. Les systèmes photovoltaïques ont été utilisés dans un grand nombre d'applications. L'énergie solaire est utilisée dans les montres, les calculatrices, les lanternes, les ventilateurs, les radios et les éclairages extérieurs. Les systèmes autonomes sont une application utile des systèmes photovoltaïques car ils utilisent l'énergie au fur et à mesure qu'elle est produite. [21]

- L'éclairage : La disponibilité d'un courant continu de faible puissance a fait des systèmes photovoltaïques une source idéale d'éclairage dans les endroits isolés, tels que les lampadaires, les panneaux d'information, les parkings et les habitations.
- Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans les systèmes de communication : émetteurs, téléphones cellulaires, ordinateurs portables, satellites, systèmes de radio mobile, etc.
- Les panneaux d'information tels que les avertisseurs routiers, les panneaux ferroviaires, les balises de navigation, les balises aéronautiques ne peuvent pas être connectés aux réseaux de distribution d'électricité.

- Les pompes à eau peuvent être actionnées directement pour fournir de l'eau pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau des villages ou pour le bétail.
- Véhicules : L'énergie solaire peut être utilisée pour charger les batteries des véhicules.

I.6.6. Avantages et inconvénients du système PV

Toute pièce de monnaie a deux faces, le système solaire photovoltaïque présente également des avantages et des inconvénients. Mais en un mot, le système solaire photovoltaïque est tout à fait favorable au développement de l'humanité.

I.6.6.1. Avantages

- L'énergie solaire est inépuisable, le rayonnement solaire reçu par la surface de la terre est capable de répondre 10 000 fois à la demande mondiale d'énergie. Tant que l'installation de systèmes photovoltaïques solaires est réalisée dans les 4 % de déserts du monde, l'électricité produite répond aux besoins mondiaux. L'énergie solaire est sûre, fiable, ne souffre pas de la crise énergétique ni de l'impact de l'instabilité du marché des combustibles ;
- L'énergie solaire existe partout. Elle peut fournir de l'électricité à proximité du lieu de production de l'énergie, sans transport sur de longues distances et en évitant les pertes liées aux lignes de transmission à longue distance ;
- L'énergie solaire ne nécessite pas de combustible et son coût de fonctionnement est faible ;
- Pas de pièces mobiles, pas de risque de rupture, entretien facile, particulièrement adapté à une utilisation sans surveillance ;
- Le système solaire photovoltaïque ne produit aucun déchet, aucune pollution, aucune nuisance de bruit, aucun effet négatif sur l'environnement. Il s'agit d'une énergie propre idéale ;
- Le système solaire photovoltaïque a une courte période de construction, est pratique et flexible, et peut augmenter ou diminuer arbitrairement la capacité solaire locale en fonction de l'augmentation ou de la diminution de la charge, évitant ainsi le gaspillage.

I.6.6.2. Inconvénients

- Intermittentes et aléatoires, la production d'électricité et les conditions météorologiques ne produisent pas ou rarement d'épandage la nuit ou sous la pluie ;
- Le taux de conversion est faible, le système devant fonctionner dans des conditions standard, et l'intensité des radiations solaires reçues par le sol étant de 1000W/m^2 , il doit occuper une large surface ;
- Les prix sont encore plus élevés. Ils sont plus élevés que ceux de la production d'électricité conventionnelle de 3 à 15 fois et l'investissement initial est élevé. [22]

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu sur l'énergie solaire, et nous avons rappelé quelques généralités sur le rayonnement solaire, Ensuite, nous avons exposé l'énergie solaire photovoltaïque et son historique, puis des généralités sur le système photovoltaïque et le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ainsi, on a vu les matériaux et technologies des cellules PV existe, les types de systèmes PV et les domaines d'application, enfin on a cité les avantages et les inconvénients des systèmes PV.

CHAPITRE II

Modélisation de cellules photovoltaïques

II.1. Introduction

Afin d'étudier le système photovoltaïque (PV), Comme tout système physique, le système PV peut être modélisé mathématiquement et étudié à travers son modèle mathématique équivalent. Le générateur photovoltaïque (cellule PV, module PV, panneau PV, champ PV), étant le cœur de toute application PV, et le premier élément à étudier, modéliser et simuler dans un système PV. Dans ce contexte, ce chapitre porte sur l'étude par modélisation et par simulation des caractéristiques du générateur photovoltaïque (cellule PV) pour différentes conditions climatiques (irradiation solaire et température) ainsi que les facteurs et les paramètres qui affectent leurs performances.

II.2. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque égale à une jonction semi-conductrice PN, c'est-à-dire à une diode. La conversion de l'énergie photovoltaïque (lumière) en énergie électrique s'accompagne de multiples phénomènes physiques inhérents, et la prise en compte ou l'ignorance de ces phénomènes détermine la précision du modèle mathématique équivalent. Il existe donc nombreux modèles mathématiques équivalents aux cellules photovoltaïques.

II.2.1. Modèles à une diode d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement des modules photovoltaïques est représenté par le modèle "standard" monodiode établi par Schottky pour une seule cellule photovoltaïque. Il a été généralisé aux modules PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques connectées en série ou en parallèle .

Une représentation plus simple est réussie à partir du modèle exponentiel unique. Comparé au modèle double exponentiel, ce modèle a une diode de moins, ce qui signifie que le modèle a un exposant de moins dans l'équation caractéristique courant-tension. [23], [24]

II.2.1.1. Modèle à 3 paramètres 1E3P

Le schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN idéale comprend une source de courant I_{ph} , qui modélise le courant photoélectrique, associée à une diode en parallèle qui modélise la jonction PN dont la polarisation détermine la tension. Le modèle à une diode est le modèle le plus répandu. Il est utilisé pour les cellules PV et les modules PV en raison de sa simplicité et sa bonne précision dans le quadrant de production d'énergie. Son circuit équivalent à base d'un modèle à une diode à trois paramètres est illustré dans la figure II.1 [9], [10] :

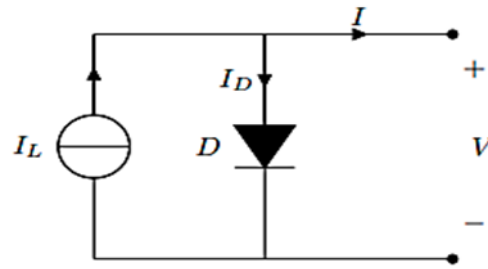


Figure II. 1 Schéma équivalent d'une cellule PV idéale avec un modèle à trois paramètres.

Les trois paramètres de ce circuit sont : Le Photo-courant ($I_L(A)$ ou $I_{ph}(A)$), Le Facteur d'idéalité (A) et Le courant de saturation inverse de la diode (I_D ou $I_0(A)$). Grâce au schéma équivalent (figure II.1) et en appliquant les lois de Kirchhoff, on obtient les équations suivantes [9], [10] :

$$I = I_L - I_D \quad (\text{II.1})$$

Le courant de la diode idéale à l'obscurité est donné par la relation suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

En combinant les deux équations précédentes, on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I_{ph} (I_L) : Photo-courant.

I_D : courant de recombinaison dans la zone de déplétion (zone de la jonction).

I_0 : Courant de saturation de la diode

A : Facteur d'idéalité de la diode

k : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

q : Charge électrique (d'électron) (en coulomb)

T : Température en Kelvin

II.2.1.2. Modèle à 4 paramètres 1E4P

Le modèle photovoltaïque à quatre paramètres se compose en une source de courant idéale connectée en parallèle avec une diode, le tout en série avec une résistance série R_s . Par rapport au modèle précédent, ce modèle possède un quatrième paramètre, la résistance R_s , qui représente la résistance (du matériau semi-conducteur, résistance du matériau de l'électrode) qui entrave le cycle électronique

et fait chuter la tension de sortie. La figure II.2 montre le circuit équivalent à quatre paramètres d'une cellule photovoltaïque. [8], [10]

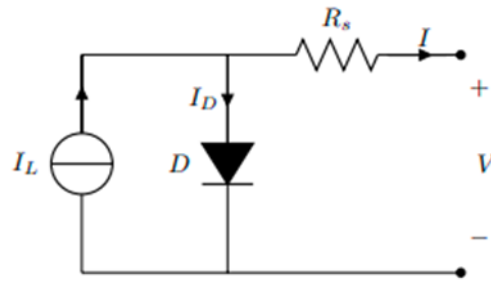


Figure II. 2 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à quatre paramètres 1E4P.

L'équation caractéristique est dérivée directement des lois de Kirchhoff.

$$I = I_L - I_D \quad (\text{II.4})$$

Le courant de diode est donné par la formule suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

On remplace l'équation (II.5) dans l'équation (II.1) et on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.6})$$

II.2.1.3. Modèle à 5 paramètres 1E5P

Ce modèle est le plus connu dans la littérature. Il est composé d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance parallèle (shunt) R_p qui est la conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, d'une résistance série R_s qui représente les résistances des différents contacts et connexions, et d'une diode qui modélise la jonction PN. [25]–[27]

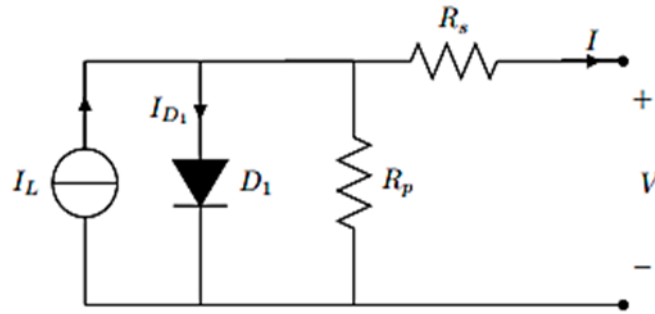


Figure II. 3 Schéma équivalent d'une cellule PV réelle avec un modèle à cinq paramètres à une diode.

Grâce au schéma équivalent de la figure II.3 et en utilisant les lois de Kirchhoff, on aura les équations suivantes :

$$I = I_L - I_{sh} - I_D \quad (\text{II.7})$$

Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.8})$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II.9})$$

On remplace les équations (II.8) et (II.9) dans l'équation (II.7) et on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II.10})$$

II.2.2. Modèles à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

II.2.2.1. Modèle à deux diodes avec cinq paramètres 2E5P

Le modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque est une représentation plus précise du comportement de la cellule que le modèle à une seule diode, car il tient compte des effets de recombinaison dans le dispositif [28]. Dans ce modèle, une cellule photovoltaïque idéale est caractérisée par la connexion en parallèle de la source de courant idéale (photo-courant) avec deux diodes comme indiqué sur la figure II.4 [29]

Les cinq paramètres 2E5P utilisés dans le modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque sont les suivants :

1. Le Photo-courant ($I_{ph}(A)$) : Il s'agit du courant généré par la cellule photovoltaïque en raison de l'absorption de photons et de la création de paires électron-trou.
2. Le courant de saturation inverse de la diode 1 ($I_{D1}(A_I)$ ou $I_{01}(A_I)$) : Ce paramètre représente le courant de saturation inverse de la première diode, qui est associé à la recombinaison dans les régions de masse et de surface de la cellule.
3. Le courant de saturation inverse de la diode 2 ($I_{D2}(A_2)$ ou $I_{02}(A_2)$) : Ce paramètre représente le courant de saturation inverse de la deuxième diode, qui est associé à la recombinaison dans la région de déplétion de la cellule.
4. Le facteur d'idéalité de diode 1 (A_1) : Ce facteur représente le degré auquel le comportement courant-tension de la première diode s'écarte de l'équation de la diode idéale. Il est lié aux mécanismes de recombinaison dans les régions de masse et de surface de la cellule.
5. Le facteur d'idéalité de diode 2 (A_2) : Ce facteur représente le degré auquel le comportement courant-tension de la seconde diode s'écarte de l'équation de la diode idéale. Il est lié aux mécanismes de recombinaison dans la région de déplétion de la cellule.

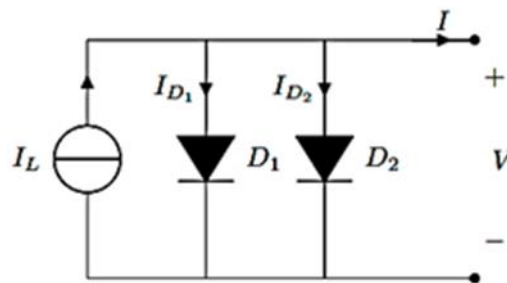


Figure II. 4 Circuit équivalent de la cellule PV idéale avec un modèle à cinq paramètres à deux diodes.

Ces paramètres sont essentiels pour modéliser avec précision les performances d'une cellule photovoltaïque et prédire son comportement dans diverses conditions de fonctionnement [28], [30]. En tenant compte de ces paramètres, le modèle à deux diodes peut fournir une représentation plus précise des performances de la cellule, en particulier dans les cas où les effets de recombinaison jouent un rôle important [28]

Grâce au schéma équivalent (figure II.4) et en utilisant les lois de Kirchhoff on obtient les équations suivantes :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{II.11})$$

Les diodes étant des éléments du modèle, leurs caractéristiques I - V sont données par les relations suivantes :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp\left(\frac{q}{A_1 kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.12})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp\left(\frac{q}{A_2 kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

I_{D1} : courant de recombinaison dans la zone de déplétion (zone de la jonction).

I_{D2} : courant de recombinaison dans la zone quasi-neutre.

En remplaçant les équations (II.12) et (II.13) dans l'équation (II.11), on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q}{A_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q}{A_2 kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.14})$$

II.2.2.2. Modèles à 6 paramètres 2E6P

Les six paramètres de ce circuit sont : Le Photo-courant ($I_{ph}(A)$), le courant de saturation inverse de la diode 1 ($I_{D1}(A_1)$ ou $I_{01}(A_1)$), le courant de saturation inverse de la diode 2 ($I_{D2}(A_2)$ ou $I_{02}(A_2)$), le facteur d'idéalité de diode 1 (A_1), le facteur d'idéalité de diode 2 (A_2), et la résistance série (R_s).

Le modèle à six paramètres à double diode d'une cellule photovoltaïque comprend une source de courant dépendant du soleil connectée en parallèle à deux diodes ; une résistance R_s est connectée en série dans son ensemble, et la Figure II.5 montre le circuit équivalent à six paramètres d'une cellule photovoltaïque [7], [10].

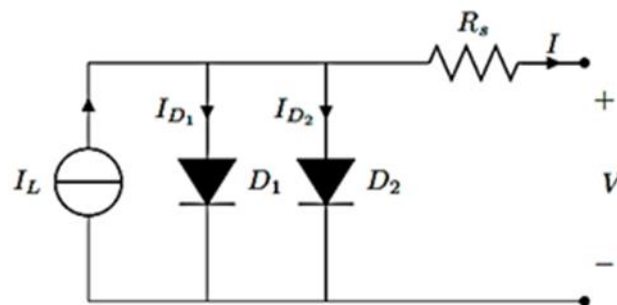


Figure II. 5 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à six paramètres à deux diodes 2E6P
L'équation liant les différents courants du circuit équivalent se déduit des lois de Kirchhoff :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{II.15})$$

Les diodes étant des éléments de ce modèle, leurs caractéristiques I - V sont données par les relations suivantes :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] \quad (II.16)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] \quad (II.17)$$

On remplace les équations (II.16) et (II.17) dans l'équation (II.15) pour obtenir l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] \quad (II.18)$$

II.2.2.3. Modèle à deux diodes avec sept paramètres 2E7P

Le modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque peut avoir sept paramètres, qui sont les suivants: Le Photo-courant ($I_{ph}(A)$), le courant de saturation inverse de la diode 1 ($I_{D1}(A_1)$ ou $I_{01}(A_1)$), le courant de saturation inverse de la diode 2 ($I_{D2}(A_2)$ ou $I_{02}(A_2)$), le facteur d'idéalité de diode 1 (A_1), le facteur d'idéalité de diode 2 (A_2), la résistance série (R_s) et la résistance shunt R_p .

Ces paramètres sont utilisés pour décrire le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Le modèle à deux diodes est plus précis que le modèle à une seule diode et tient compte de la recombinaison des électrons et des trous dans la cellule. Il augmente l'efficacité et la fiabilité du système, en particulier lorsqu'il est intégré à des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Le schéma électrique équivalent de ce modèle est le suivant [7], [31] :

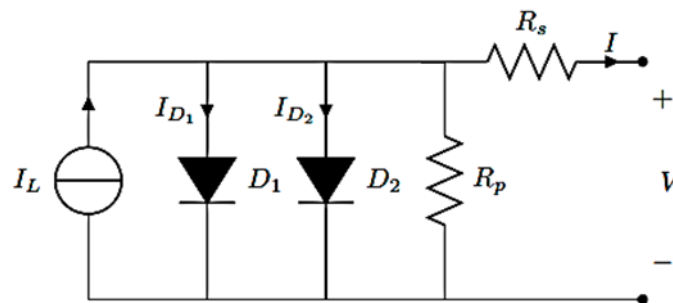


Figure II. 6 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle à sept paramètres à deux diodes 2E7P.

Les courants du circuit équivalent sont liés par l'équation suivante :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (II.19)$$

Où les courants I_{D1} et I_{D2} sont donnés par :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] \quad (II.20)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] \quad (II.21)$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation suivante:

$$I_{sh} = \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (II.22)$$

En remplaçant les équations (II.20), (II.21) et (II.22) dans l'équation (II.19), on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q}{A_1 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q}{A_2 kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (II.23)$$

II.2.3. Autres modèles équivalents d'une cellule photovoltaïque

II.2.3.1. Modèle de Bishop

Le modèle de Bishop est un modèle de circuit équivalent pour les cellules photovoltaïques (PV) qui est couramment utilisé pour représenter le comportement d'une cellule photovoltaïque en Q1 et Q2, la cellule consommant au lieu de produire de l'énergie en Q2, où la tension est négative et le courant positif [32], [33]. Ce modèle est particulièrement utile pour analyser les cellules photovoltaïques dans des conditions d'ombrage partiel, car les cellules ombragées peuvent consommer l'énergie générée par d'autres cellules du panneau, ce qui entraîne des pertes de puissance et d'autres effets négatifs [32], [33].

Le modèle de Bishop introduit une variation dans le modèle à diode unique en affectant le courant de la résistance shunt R_{sh} (R_P) par le biais d'un terme ohmique et d'un facteur de multiplication $M(V)$ non linéaire [32], [33], comme le montre l'équation (II.24) et la figure II.7

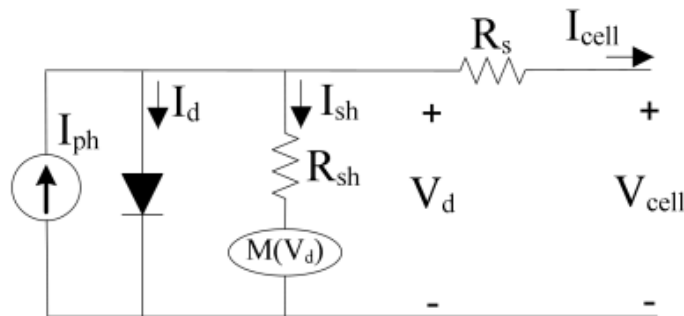


Figure II. 7 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle de Bishop.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{A kT} (V + IR_S) \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} * M(V) \quad (II.24)$$

$$M(V) = 1 + a \left(1 - \frac{V + IR_S}{R_P}\right)^n \tag{II.25}$$

Avec :

V_b : la tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

a et n : des valeurs constantes données dans le modèle de Bishop a est compris entre 3,4 et 4, et $n \approx 0.1$.

Pour représenter le modèle de Bishop, 8 paramètres (R_s , R_p , I_L , I_0 , A , V_b , m , a) doivent être estimés.

II.2.3.2. Modèle dynamique à une diode

De plus, des modèles dynamiques ont été proposés en introduisant un condensateur pour modéliser le comportement dynamique de la cellule photovoltaïque [34].

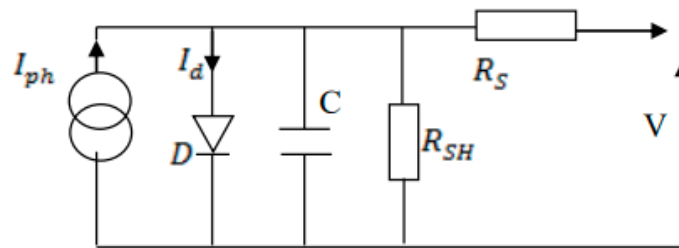


Figure II. 8 Circuit équivalent d'une cellule PV avec un modèle dynamique.

Le tableau suivant présente les différents modèles électriques de cellule photovoltaïque :

Modèle	Schéma	Nombre paramètres	Précision
Idéal		3	Faible
Une diode		5	Bien
Bishop		8	Bien, avec la représentation en régime inverse

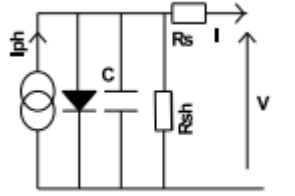
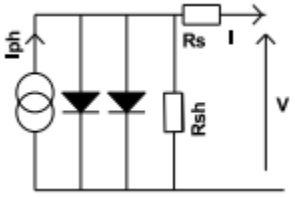
Dynamique à une diode		6	Bien, avec la représentation en régime dynamique
Deux diodes		7	Très Bien

Tableau II. 1 Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque. [35]

II.3. Paramètres de la cellule photovoltaïque

Une cellule solaire est un dispositif électronique qui convertit la lumière du soleil en électricité. Les performances d'une cellule solaire sont caractérisées par plusieurs paramètres, généralement, cinq paramètres sont utilisés pour caractériser la sortie de la cellule solaire, notamment la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{sc}), point de puissance maximale (PPM), le facteur de forme (FF) et le rendement (η).

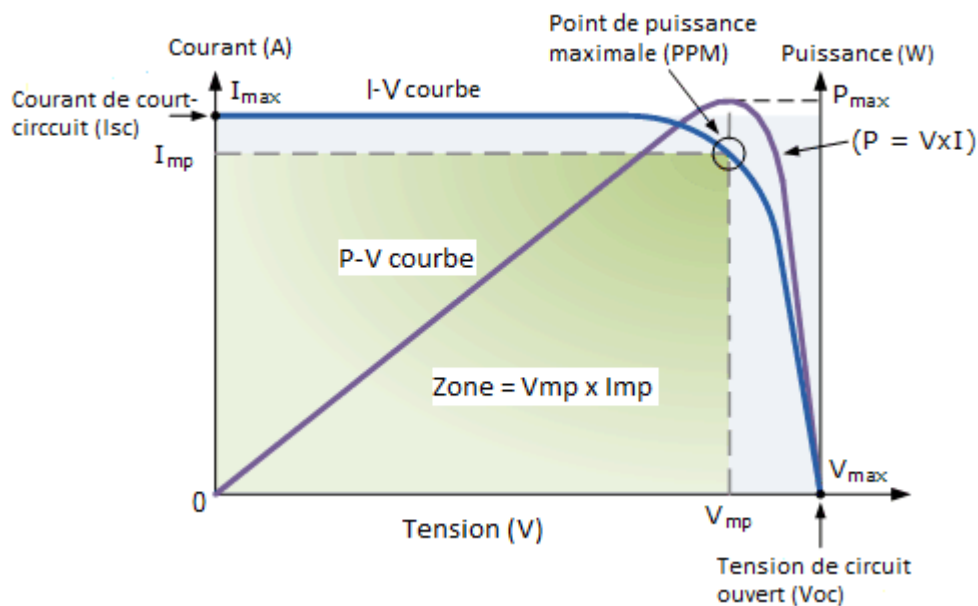


Figure II. 9 Courbe caractéristique I-V et P-V de cellule solaire. Le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le point de puissance maximale et la tension et le courant au point de puissance maximale sont désignés respectivement par I_{sc} , V_{oc} , PPM, V_{mp} et I_{mp} . [36]

II.3.1. Tension en circuit ouvert (Voc)

Tension en circuit ouvert (Voc) s'agit de la tension maximale que la cellule solaire peut fournir lorsque les bornes ne sont pas connectées à une charge. La tension en circuit ouvert est un paramètre important car elle détermine la puissance maximale que la cellule solaire peut produire. Plus le Voc est élevé, plus la puissance maximale produite par la cellule solaire est importante. [37], [38]

II.3.2. Courant de court-circuit (Isc)

Courant de court-circuit (Isc) s'agit du courant maximal que la cellule solaire peut fournir lorsque les bornes sont court-circuitées. Isc est un paramètre important car il détermine le courant maximal que la cellule solaire peut produire. Plus l'Isc est élevé, plus la puissance maximale de la cellule solaire est élevée. [38], [39]

II.3.3. Point de puissance maximale

Le point de puissance maximale (PPM / MPP) est le point de la courbe courant-tension (I-V) de la cellule solaire où le produit du courant et de la tension est maximal. Le point de puissance maximale est un paramètre important car il détermine la puissance maximale (P_{max}) que la cellule solaire peut produire. Plus le point de puissance maximale est élevé, plus la puissance maximale de la cellule solaire est élevée. [28], [39]

$$P_{max} = V_{PM} * I_{PM} \quad (II.26)$$

P_{max} est la puissance maximale.

V_{PM} est tension au PPM.

I_{PM} est courant au PPM.

II.3.4. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme est une mesure de l'efficacité d'une cellule solaire. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximale (MPP) et le produit du courant de court-circuit (Isc) et de la tension en circuit ouvert (Voc). FF est un paramètre important car il détermine l'efficacité de la cellule solaire. Plus le FF est élevé, plus l'efficacité de la cellule solaire est importante. [39], [40]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (II.27)$$

Avec :

FF : facteur de forme.

V_{oc} : Tension de circuit-ouvert.

I_{sc} : Courant de court-circuit.

II.3.5. Rendement (η)

Le rendement d'une cellule solaire est le pourcentage de l'énergie solaire que la cellule peut convertir en énergie électrique. Il est un critère important pour la sélection d'une cellule solaire. Il permet de comparer les performances d'une cellule solaire. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et l'énergie qu'elle reçoit du soleil. L'efficacité des panneaux solaires dépend de l'efficacité de la cellule solaire. Plus le rendement est élevé, plus la cellule solaire peut produire d'énergie. [39], [41]

$$\eta = \frac{V_m I_m}{EA} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{EA} \quad (II.28)$$

Où

A est la surface génératrice (ensoleillée) de la cellule PV en m^2 ,

E est l'ensoleillement en W/m^2 .

II.4. Groupement des cellules solaires

Le regroupement de cellules solaires, également connu sous le nom d'interconnexion de cellules solaires, est une méthode utilisée pour connecter plusieurs cellules solaires individuelles afin de former une unité ou un module plus grand. Ce regroupement améliore la performance et l'efficacité globales du système de panneaux solaires. Les trois principaux types de regroupement de cellules solaires sont la connexion en série, la connexion en parallèle et la connexion en série-parallèle. [42], [43]

II.4.1. Connexion en série

Dans le cas d'une connexion en série, la borne positive d'une cellule solaire est connectée à la borne négative de la cellule adjacente, et ainsi de suite. Cette configuration augmente la tension de sortie des cellules solaires tout en maintenant le même courant. La tension totale des cellules connectées en série est la somme des tensions individuelles des cellules. La connexion en série permet une augmentation cumulative de la tension, ce qui est particulièrement avantageux lors de la conception de systèmes nécessitant une tension plus élevée comme indiqué dans la figure II.10.

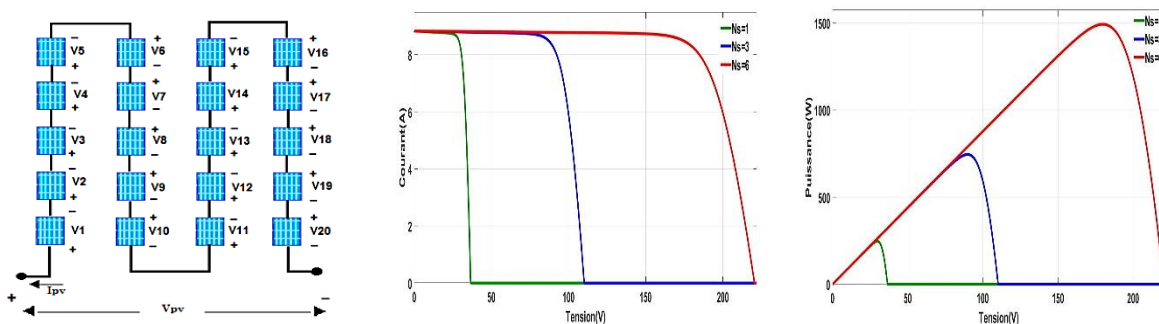


Figure II. 10 Caractéristiques I-V et P-V de l'association en série des cellules PV.

Les équations (II.29) et (II.30) résument les caractéristiques électriques d'une association en série de N_s cellules.

$$I_{pv} = I_c \tag{II.29}$$

$$V_{pv} = N_s V_c \tag{II.30}$$

Où:

N_s : Nombres de cellules (modules, panneaux) PV mises en séries dans une seule branche.

I_c : Courant de la cellule PV,

I_{pv} : Courant du générateur PV résultant de l'association de certaine nombre de cellules PV,

V_c : Tension au bornes de la cellule PV,

V_{pv} : Tension au bornes du générateur PV résultant de l'association de certaine nombre de cellules PV.

II.4.2. Connexion en parallèle

Dans le cas d'une connexion en parallèle, les bornes positives de toutes les cellules solaires sont connectées ensemble, et les bornes négatives sont connectées ensemble. Cette configuration augmente l'intensité du courant tout en maintenant la même tension. Le courant total des cellules connectées en parallèle est la somme des courants des cellules individuelles. La connexion en parallèle est utilisée pour obtenir une augmentation cumulative du courant, ce qui est bénéfique pour les systèmes nécessitant des capacités de courant plus élevées comme illustré dans la figure II.11.

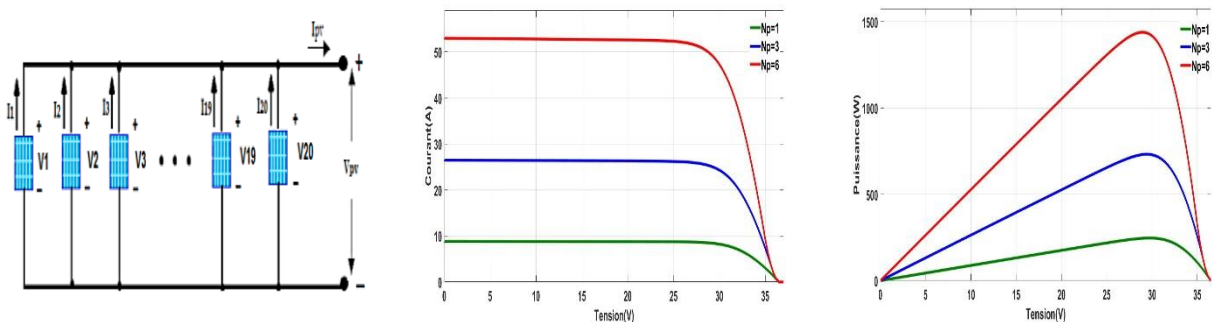


Figure II. 11 Caractéristiques I-V et P-V de l'association en parallèle des cellules PV.

Les équations (II.31) et (II.32) résument les caractéristiques électriques d'une association en parallèle de N_p cellules (modules, panneaux).

$$I_{pv} = N_p I_c \tag{II.31}$$

$$V_{pv} = V_c \tag{II.32}$$

Où:

N_p : Nombres de cellules (modules, panneaux) PV mises en parallèle (nombre de branches en parallèle).

I_c : Courant de la cellule PV (courant d'une branche),

I_{pv} : Courant du générateur PV résultant de l'association de certaine nombre de cellules PV,

V_c : Tension au bornes d'une cellule PV,

V_{pv} : Tension au bornes du générateur PV résultant de l'association de certaine nombre de cellules PV.

II.4.3. Connexion série-parallèle

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Si toutes les cellules solaires d'un module ont des caractéristiques électriques identiques et qu'elles subissent la même insolation et la même température, toutes les cellules fonctionneront exactement à la même intensité et à la même tension. Dans ce cas, la courbe I-V du module PV a la même forme que celle des cellules individuelles, sauf que la tension et le courant sont augmentés. L'équation du circuit devient alors [44] :

$$I = N_p I_L - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{A k T} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) - 1 \right) - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) \right] \quad (II.33)$$

La courbe I-V globale d'un ensemble de cellules solaires connectées de manière identique est illustrée dans la figure II.12 ci-dessous. Le courant total est simplement le courant d'une cellule individuelle multiplié par le nombre de cellules en parallèle. Ainsi : $I_{SC \text{ total}} = I_{SC} \times N_p$. La tension totale est la tension d'une cellule individuelle multipliée par le nombre de cellules en série. Ainsi :

$$I_{SC}(\text{totale}) = I_{SC} \times N_p \quad (II.34)$$

$$I_{pv}(\text{totale}) = I_c \times N_p \quad (II.35)$$

$$V_{OC}(\text{totale}) = V_{OC} \times N_s \quad (II.36)$$

$$V_{pv}(\text{totale}) = V_c \times N_s \quad (II.37)$$

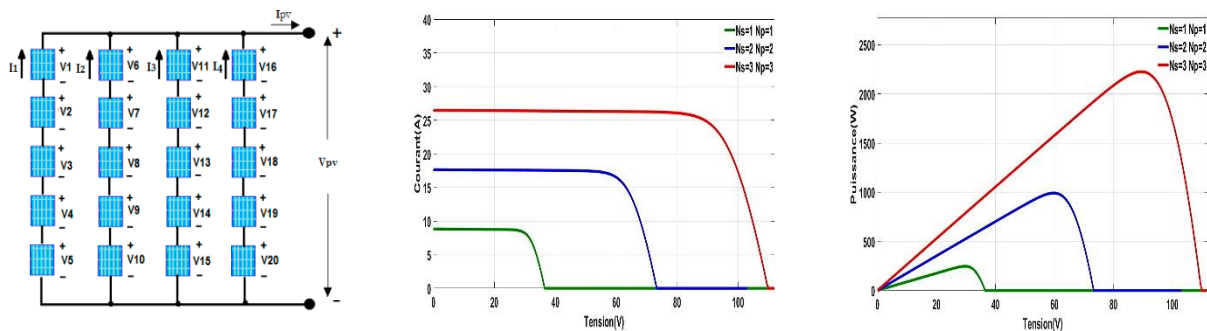


Figure II. 12 Caractéristiques I-V et P-V de l'association mixte des cellules PV.

II.5. Assurer le bon fonctionnement et la protection des systèmes photovoltaïques

Dans un système photovoltaïque (PV), les diodes de dérivation (bypass) et les diodes de blocage (anti-retour) servent à améliorer les performances et a protégé les composants du système.

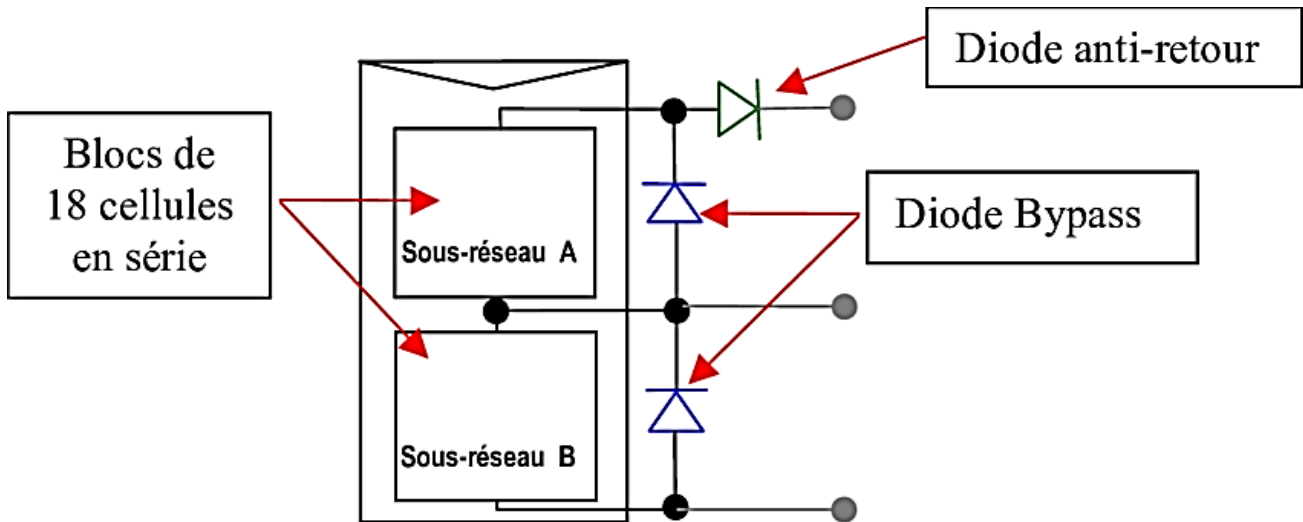


Figure II. 13 Schématisation d'un module PV avec diodes bypass et diode anti-retour. [45]

II.5.1. Diodes bypass

Les diodes bypass sont des composants essentiels des systèmes photovoltaïques (PV), car elles permettent d'empêcher le flux inverse de courant et de limiter les problèmes tels que la consommation d'énergie, l'inadéquation et la formation de points chauds dans les modules PV. Lorsqu'un module photovoltaïque est partiellement ombragé, les cellules ombragées peuvent agir comme une charge, provoquant un courant inverse. Ce courant inverse peut entraîner une surchauffe, connue sous le nom de "points chauds", qui peut endommager le module PV et réduire son efficacité. Les diodes de dérivation sont connectées en parallèle avec les cellules photovoltaïques, ce qui permet au courant de contourner les cellules ombragées, évitant ainsi les points chauds et maintenant la performance globale du système photovoltaïque. [46]–[48]

Pour supprimer ces problèmes et protéger les cellules, on place des diodes bypass en anti-parallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes bypass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass). En cas d'ombrage :

- 1 diode : 100 % du module est en bypass,
- 2 diodes : 50 % du module est en bypass,
- 3 diodes : 33 % du module est en bypass.

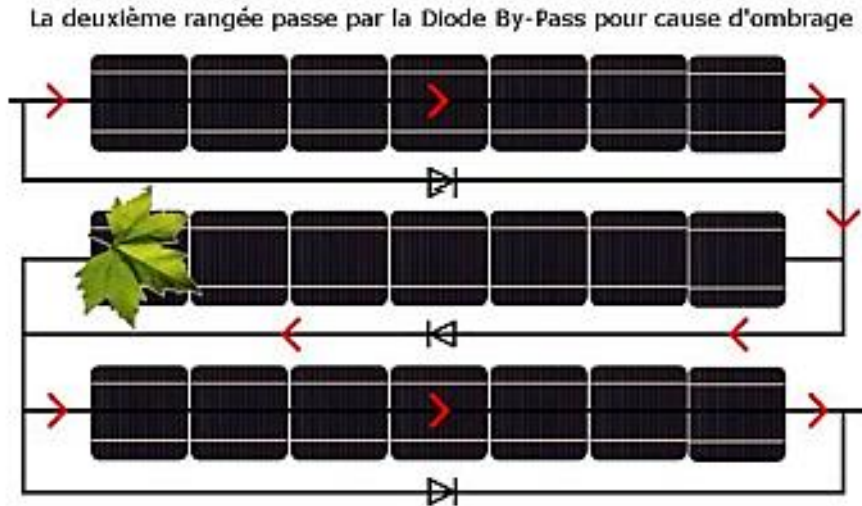


Figure II. 14 Schéma représente le fonctionnement d'une diode bypass.

Au niveau de la 2ème rangée, le courant passe par la diode bypass pour cause d'ombrage.

La figure II.15 représente l'effet de la diode bypass sur les performances de GPV de 3 modules en série.

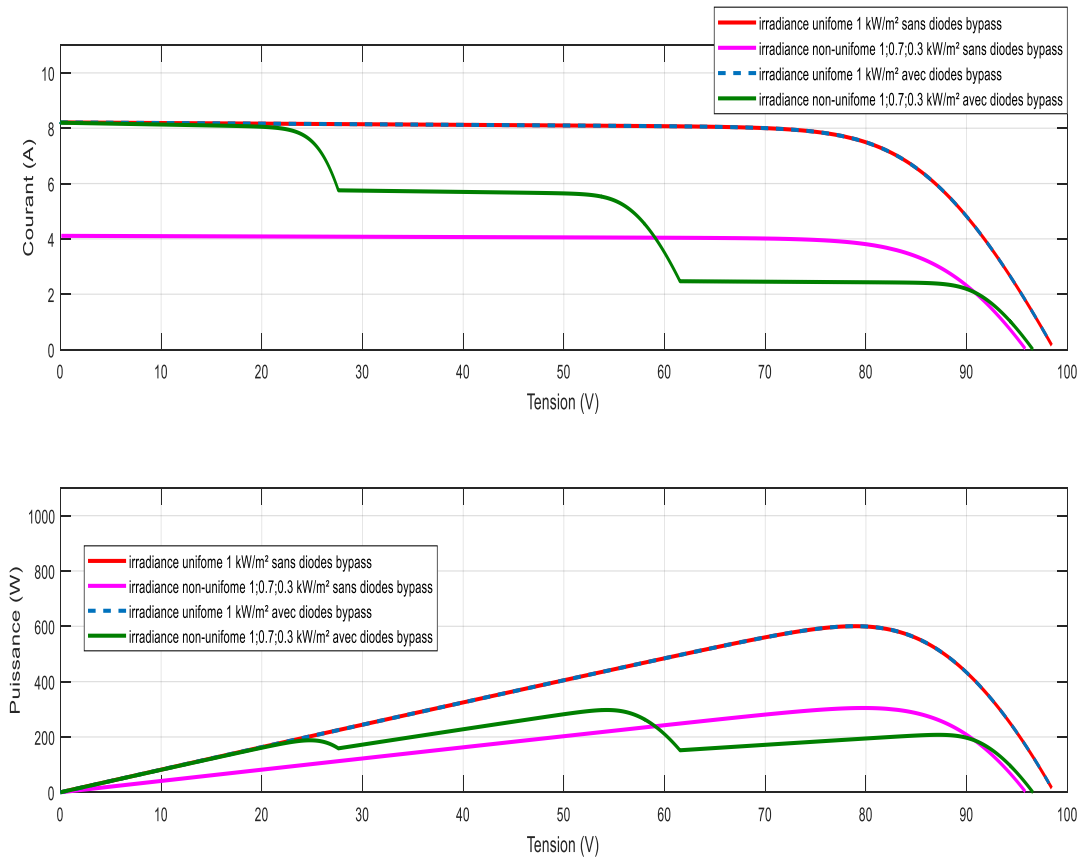


Figure II. 15 Effet de la diode bypass sur les performances de GPV de 3 modules en série.

II.5.2. Diode anti-retour

Les diodes de blocage sont utilisées dans les systèmes de production d'énergie photovoltaïque pour empêcher l'inversion du flux de courant. Elles sont généralement installées à la sortie d'un module ou d'une branche PV (figure II.11) pour éviter le retour du courant du reste du système dans le module ou la branche pendant les périodes de faible ou d'absence de production d'énergie, comme la nuit ou lorsque le module est ombragé. Cela permet d'éviter les pertes d'énergie et de protéger les modules photovoltaïques des dommages potentiels causés par les courants inverses [49], [50]

Une étude analysant le courant de chaîne et les pertes de puissance sur les diodes de blocage dans un système PV de 10 kW a révélé que des inégalités entre les courants de chaîne se produisent, en particulier pendant les périodes de lever et de coucher du soleil. La tension inverse est imposée aux diodes de blocage lorsque l'inégalité des courants se produit, ce qui entraîne des pertes de puissance. L'utilisation de diodes de blocage peut contribuer à minimiser ces pertes et à améliorer l'efficacité globale du système photovoltaïque [49].

II.5.3. Encapsulation et encadrement

L'encapsulation et l'encadrement jouent un rôle crucial dans la protection des cellules et des modules photovoltaïques, en assurant leur performance à long terme et en les protégeant contre les facteurs et les charges environnementaux, des dommages physiques et les contraintes mécaniques. Il permet également de maintenir les connexions électriques à l'intérieur du module. Les cellules photovoltaïques sont généralement encapsulées dans un matériau transparent et résistant aux intempéries, tel que l'éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou le butyral de polyvinyle (PVB). Cette encapsulation protège les cellules de l'humidité, de la poussière et des contraintes mécaniques. La plupart des modules photovoltaïques sont recouverts d'une couche de verre trempé qui les protège contre les facteurs environnementaux tels que la pluie, la grêle et la neige. Le verre trempé est plus résistant à la casse que le verre ordinaire. Les modules PV sont souvent équipés d'un cadre en aluminium ou en acier qui fournit un support structurel et protège le module des contraintes mécaniques. Le cadre permet également de monter et de fixer les modules. Ces mesures contribuent à la durabilité et à la fiabilité du système photovoltaïque. [51], [52]

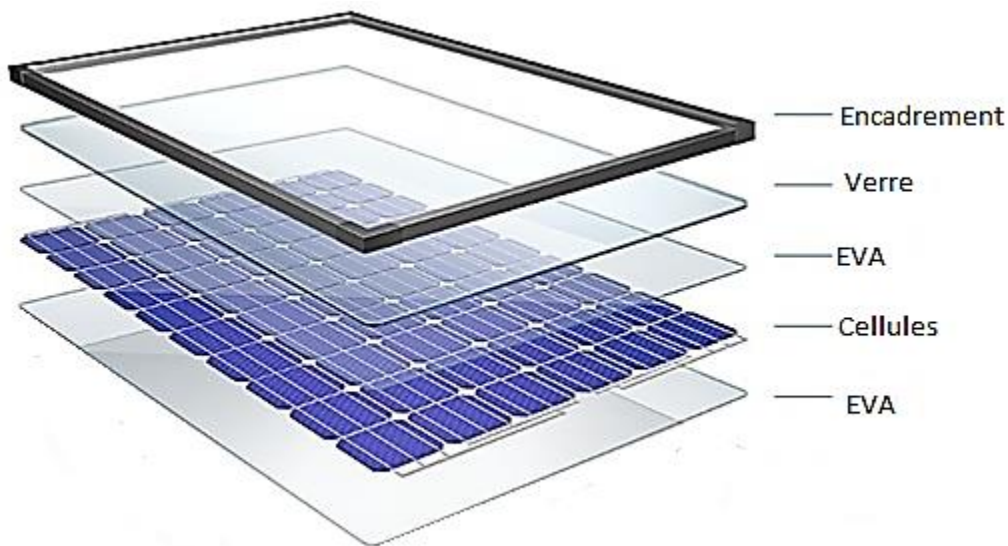


Figure II. 16 Composants d'un panneau solaire. [53]

II.6. Effet des résistances parasites et du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

II.6.1. Effet des résistances parasites

La résistance parasite d'une cellule solaire (modules, panneaux et champs) peut avoir un impact significatif sur ses caractéristiques et ses performances. La résistance parasite peut se référer à la

résistance en série, à la résistance en shunt ou au courant de fuite, et peut affecter des paramètres tels que la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, le courant de court-circuit et le rendement de conversion d'énergie de la cellule solaire (modules, panneaux et champs). [54], [55]

II.6.1.1 Influence de la résistance série

La résistance série est un paramètre important qui affecte les performances des cellules (modules, panneaux et champs) PV. Elle correspond à la somme des résistances de tous les composants sur le trajet du courant de la cellule (modules, panneaux et champs) PV., y inclut les contacts métalliques, le matériau semi-conducteur et les interconnexions. Lorsque la résistance en série d'une cellule (modules, panneaux et champs) PV. augmente, les courbes I-V et P-V se déplacent vers l'origine, ce qui entraîne une diminution de la puissance de sortie maximale (figure II.17).

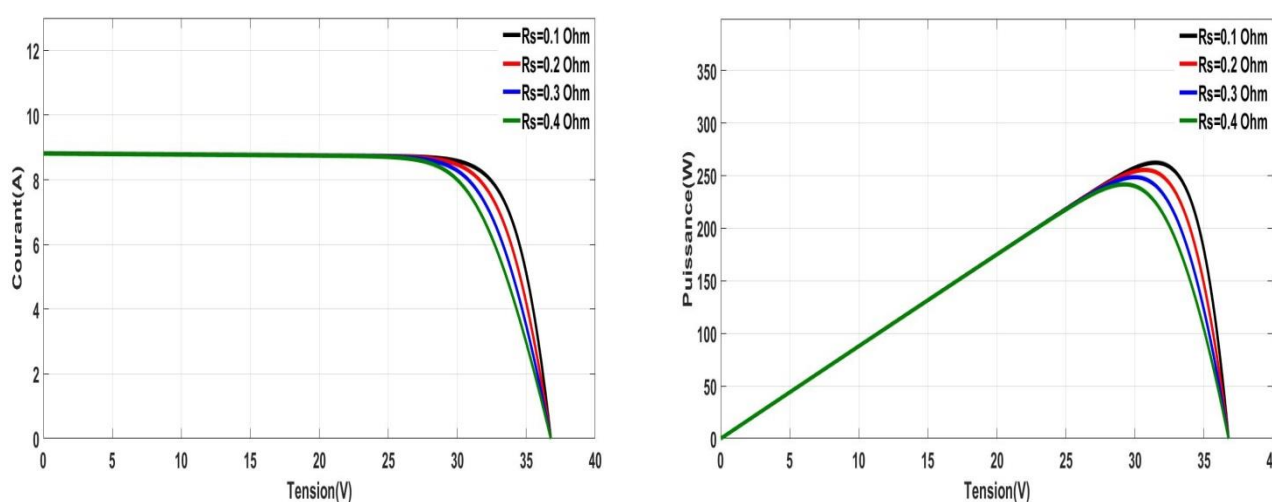


Figure II. 17 Effet de la variation de la résistance série sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.

II.6.1.2 Influence de la résistance shunt

l'effet de la résistance shunt R_{SH} est plus marqué en circuit ouvert qu'en court-circuit. En outre, la résistance shunt mesure la capacité d'une cellule PV à éviter les courants de fuite. Une bonne cellule PV aura une résistance shunt élevée, ce qui signifie qu'elle permettra un flux de courant minimal lorsque soumise à une tension inverse. Cela garantit que le courant généré par l'éclairage solaire est capturé et acheminé vers la charge externe, plutôt que de se perdre dans les courants de fuite. Les courbes I-V se dégradent progressivement avec une diminution de la résistance shunt R_p (figure II.18).

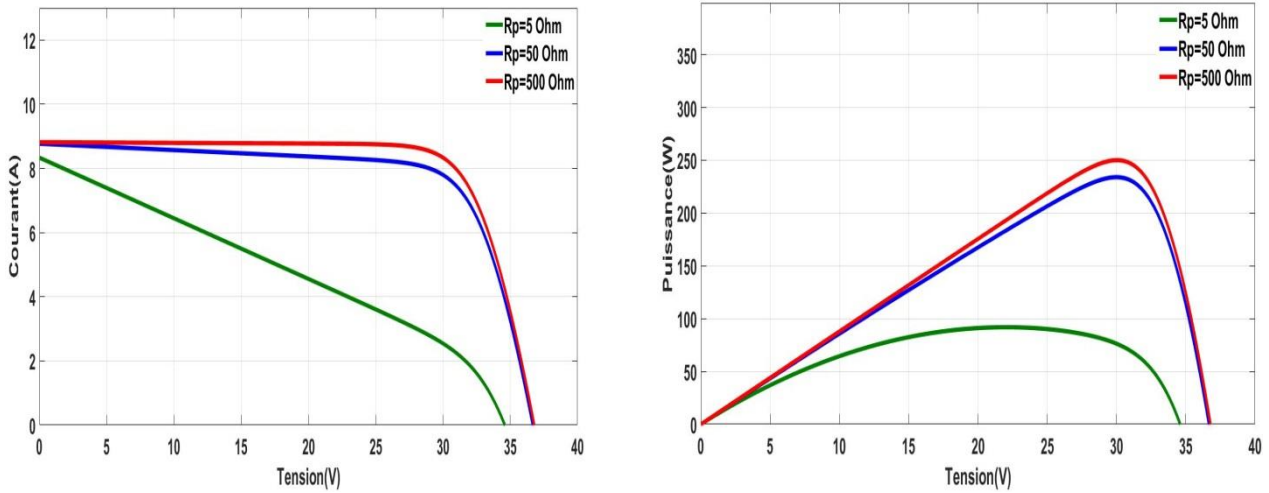


Figure II. 18 Effet de la variation de la résistance shunt sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.

II.6.2. Effet du facteur d'idéalité de la diode

Le facteur d'idéalité de la diode (A , n) joue un rôle important dans la performance des cellules photovoltaïques (PV). Il influence diverses caractéristiques de la cellule photovoltaïque, telles que la puissance de sortie maximale (P_{\max}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF) et le courant de court-circuit (I_{sc}). Le facteur d'idéalité est lié aux mécanismes de recombinaison dans la cellule solaire et est généralement supérieur à 1. Un facteur d'idéalité élevé indique un taux de recombinaison plus important, ce qui peut entraîner une réduction de l'efficacité (figure II.19). [56]

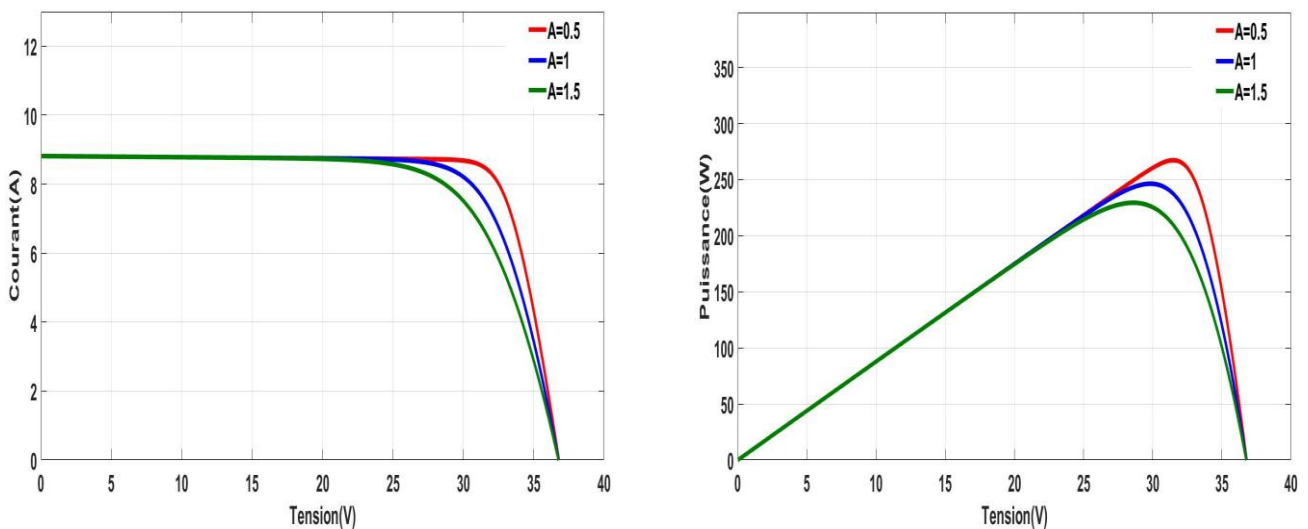


Figure II. 19 Influence du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.

II.7. Effet des conditions climatiques sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Afin de généraliser les équations des modèles de cellules photovoltaïques précédents et d'assurer leur validité dans différentes conditions météorologiques (ensoleillement et température), l'expression du courant de court-circuit (I_{sc}) est généralement considérée comme le photocourant I_{ph} (I_{sc} est presque égale au I_{ph} (IL)) et la tension à vide de la cellule photovoltaïque sont exprimées par [7], [8], [10] :

$$I_{sc} = (G/G_{ref}) (I_{sc_{ref}} - \mu_c (T_c - T_{ref})) \quad (II.38)$$

$$V_{oc} = V_{oc_{ref}} - \mu_v (T_c - T_{ref}) \quad (II.39)$$

Où :

$I_{sc_{ref}}$: Courant de court-circuit de la cellule PV dans les conditions climatiques standards (G_{ref} (ensoleillement de 1000 W/ m²) et (T_{ref} (température de 25°C))) ;

V_{oc} : Tension à vide (circuit ouvert) de la cellule PV dans les conditions climatiques standards (ensoleillement de 1000 W/ m² et température de 25°C) ;

I_{sc} : Courant de court-circuit dans les conditions climatiques instantanées données (G et T) ;

V_{oc} : Tension à vide dans les conditions climatiques instantanées données (G et T) ;

G : Eclairement instantané ;

T : Température instantanée ;

G_{ref} : Eclairement de référence ;

T_{ref} : Température de référence ;

μ_c : Facteur d'influence de la température sur le courant de court-circuit ;

μ_v : Facteur d'influence de l'éclairement sur la tension à vide.

II.7.1. Effet de la température

l'augmentation de la température de la cellule PV (modules, panneaux et champs) entraîne une réduction de la tension de sortie du PV (figure II.20). On peut en conclure qu'une cellule PV (modules, panneaux et champs) génère la plus grande quantité d'énergie à l'endroit le plus froid. [57]

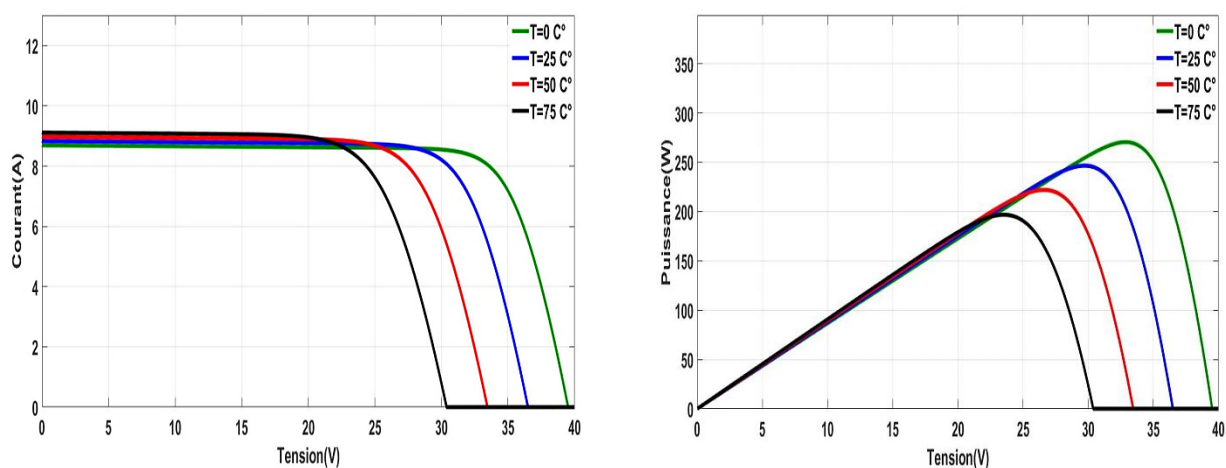


Figure II. 20 Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.

II.7.2. Effet de l'ensoleillement

Le niveau d'irradiance, qu'il soit uniforme ou non, peut avoir un impact significatif sur les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un générateur photovoltaïque (PV). [8]–[10], [57]

II.7.2.1. Ensoleillement uniforme

Lorsque le niveau d'irradiation est uniforme pour toutes les cellules PV d'un générateur, cela signifie que chaque cellule reçoit la même quantité de lumière solaire. Dans ce cas, les caractéristiques I-V et P-V du générateur PV présentent un caractère régulier.

Caractéristiques I-V : La courbe I-V représente la relation entre le courant (I) et la tension (V) de sortie du générateur PV. Sous une irradiation uniforme, la courbe I-V présente généralement une forme bien définie avec un seul point de puissance maximale (MPP). Le MPP correspond à la combinaison de tension et de courant qui maximise la puissance de sortie du générateur PV. Ce point est essentiel pour déterminer la puissance maximale que le générateur PV peut fournir.

Caractéristiques P-V : La courbe P-V représente la relation entre la puissance (P) produite et la tension (V) aux bornes du générateur PV. Sous une irradiation uniforme, la courbe P-V présente un seul pic, qui correspond au MPP sur la courbe I-V. Ce pic représente la puissance maximale que le générateur PV peut atteindre. Ce pic représente la puissance de sortie maximale que le générateur PV peut atteindre.

l'augmentation du niveau d'irradiance entraîne une augmentation du courant et une légère augmentation de la tension de sortie. On peut en conclure qu'une cellule PV (modules, panneaux et champs) génère la plus grande quantité d'énergie à l'endroit avec le niveau d'irradiation solaire le plus élevé.

La figure II.21 représente l'allure des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'un générateur photovoltaïque soumis à un ensoleillement uniforme.

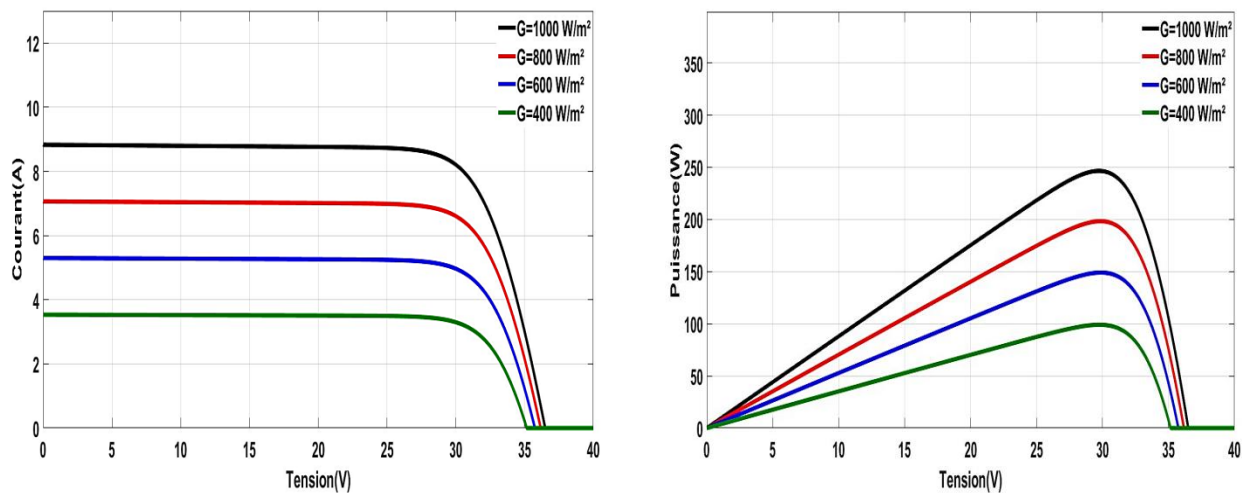


Figure II. 21 Effet de l'ensoleillement uniforme sur les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'un générateur PV.

II.7.2.2. Ensoleillement non-uniforme

Lorsque le niveau d'irradiance n'est pas uniforme, les différentes cellules photovoltaïques du générateur reçoivent des quantités variables de lumière solaire. Cela peut être dû à l'ombrage, à la couverture nuageuse ou à d'autres facteurs. L'irradiance non uniforme peut avoir un impact significatif sur les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ du générateur PV.

Caractéristiques $I-V$: En cas d'irradiance non uniforme, la courbe $I-V$ présente généralement plusieurs points de puissance maximale locale, voire plusieurs branches. Ces points de puissance maximale locale sont dus à l'inadéquation de la génération de courant entre les différentes cellules photovoltaïques. La présence d'ombrage ou de niveaux d'irradiance variables réduit la puissance globale du générateur photovoltaïque.

Caractéristiques $P-V$: De même, la courbe $P-V$ sous une irradiance non uniforme présentera des pics multiples ou une forme plus complexe par rapport à une irradiance uniforme. La présence de points de puissance maximale locale dans la courbe $I-V$ entraîne des pics multiples dans la courbe $P-V$. La puissance globale de sortie est réduite en raison de l'inadéquation et de l'ombrage partiel.

La figure II.22 représente l'allure des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'un générateur photovoltaïque soumis à un ensoleillement non-uniforme.

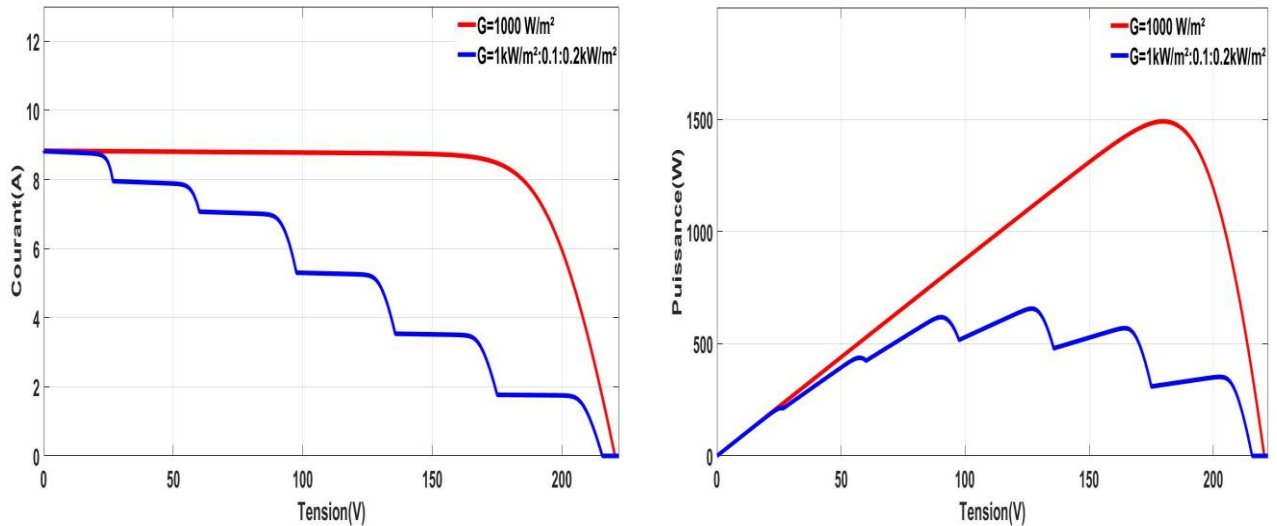


Figure II. 22 Effet de l'ensoleillement non-uniforme sur les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les différents modèles équivalents de la cellule (module, panneau et champ) photovoltaïque. Ensuite, nous avons exposé les principales caractéristiques et les paramètres des cellules photovoltaïques et leurs groupements dans le GPV. Puis, nous avons donné des notions sur la protection du système PV pour lui assurer un bon fonctionnement. tout en exposant l'effet des facteurs, de température et l'éclairement qui affectent leurs performances et les caractéristiques I-V et P-V. Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à la simulation de l'effet de l'ombrage partiel (ensoleillement non-uniforme) sur les différentes configurations de GPV.

CHAPITRE III

Simulation de l'effet de l'ombrage partiel sur les différentes configurations d'un champ photovoltaïque

III.1. Introduction

L'efficacité énergétique des systèmes de production d'électricité photovoltaïques (PV) constitue un défi majeur pour l'évolution de ces systèmes. Les systèmes photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage, celui-ci peut entraîner une perte significative de production. Ces pertes varient en fonction de la taille et l'opacité de l'obstacle, il est donc nécessaire de prendre en considération ces perturbations en terme quantitatif et qualitatif avant d'entreprendre la conception d'un système photovoltaïque. Les conditions d'ombrage partiel (PSC) sont l'un des facteurs les plus importants contribuant à la réduction de la puissance de sortie en raison des pertes de puissance par déséquilibre entre les modules PV. Ces pertes dépendent des structures du système PV, des configurations des modules PV, des types d'ombrage, de l'emplacement physique des modules ombragés et de la position de l'angle d'inclinaison [58], [59]. Ce chapitre présente la simulation et la comparaison des performances de 5 configurations de champ PV en série, série-parallèle, bridge-linked, honey-comb et total-cross-tied sous des types d'irradiance uniforme (STC) et non-uniforme "ombrage partiel" (rangées inégales, colonnes inégales, diagonale, aléatoire, court et étroit, court et large, long et étroit et long et large). Les performances des configurations sont évaluées en comparant la tension de circuit ouvert (Voc), le courant de court-circuit (Isc), et principalement le point de puissance maximale globale (PPMG) et les tensions et les courants correspondant au PPMG. Les modules PV KYOCERA-KC200GT sont utilisés pour la simulation des configurations de champ PV de 5x5 (cinq modules en séries avec cinq branches en parallèles) dans le logiciel MATLAB/Simulink.

III.2. Définition et types d'ombrage

Dans le contexte de l'énergie photovoltaïque, l'ombrage fait référence au phénomène qui consiste à obstruer le flux de lumière du soleil sur un panneau solaire, ce qui peut réduire considérablement la puissance de sortie du panneau. L'ombrage sur une seule cellule photovoltaïque, peut perturber le fonctionnement de l'ensemble du module photovoltaïque. L'ombrage peut être causé par divers facteurs, tels que des arbres à proximité, des bâtiments ou d'autres objets qui projettent des ombres sur le panneau. [60]–[63]

Il existe deux types d'ombrage qui peuvent se produire sur un panneau solaire :

III.2.1. Ombrage partiel

Cela se produit lorsque seule une partie du panneau est ombragée, tandis que le reste de la surface reçoit encore de la lumière du soleil. L'ombrage partiel peut avoir un impact significatif sur les performances du panneau car il peut créer un effet de "point chaud", où les cellules ombragées

deviennent un goulot d'étranglement pour le courant de l'ensemble du panneau, entraînant une surchauffe et potentiellement des dommages sur le panneau. [60]–[63]

III.2.2. Ombrage total

Cela se produit lorsque l'ensemble du panneau est complètement ombragé, soit par un objet ou en raison de conditions météorologiques telles que des nuages. L'ombrage total entraînera une perte totale de puissance de sortie du panneau jusqu'à ce que l'ombrage soit retiré. [60]–[63]

III.3. Effet de l'ombrage partiel sur le système photovoltaïque

Comme mentionné dans le chapitre précédent :

Les parties ombragées d'un système photovoltaïque subissent une polarisation inverse des cellules et se transforment en un récepteur électrique, qui est un élément résistif. Cette situation conduit à une dissipation d'énergie sous forme de chaleur, ce qui peut causer l'effet « hot-spot » pouvant entraîner des dommages irréversibles aux cellules. Afin de prévenir ce phénomène, des diodes de contournement (diodes bypass), sont connectées en parallèle pour chaque sous-réseau de cellules. [46]–[48]

En règle générale, les cellules d'un module photovoltaïque sont regroupées en sous-réseaux et associées à une diode de contournement en parallèle. En fonctionnement normal (sans ombrage), la tension aux bornes de la diode de contournement est positive, ce qui permet au sous-réseau de fonctionner en mode générateur et la diode en parallèle de se comporter comme un interrupteur ouvert. Toutefois, lorsque le sous-réseau est ombragé, les cellules deviennent des récepteurs (résistances) et la tension aux bornes de la diode de contournement devient négative. Dans ce cas, la diode se comporte comme un interrupteur fermé et le sous-réseau concerné ne fournit plus d'énergie. [46]–[48]

Certains fabricants produisent des panneaux photovoltaïques composés de 36 cellules photovoltaïques, réparties en deux groupes de 18 cellules chacun, avec une diode de contournement. Si une seule cellule est ombragée, elle court-circuite automatiquement le groupe de 18 cellules auquel elle appartient, le mettant ainsi hors service, ce qui entraîne une perte d'énergie du panneau photovoltaïque de 50%. [46]–[48]

Le schéma ci-dessous représente pour un panneau constitué de 3 rangées parallèles, dont chacune des rangées est composée de 9 cellules en série, l'impact que l'ombrage (cellules grisées) peut avoir sur la production totale de ce même panneau

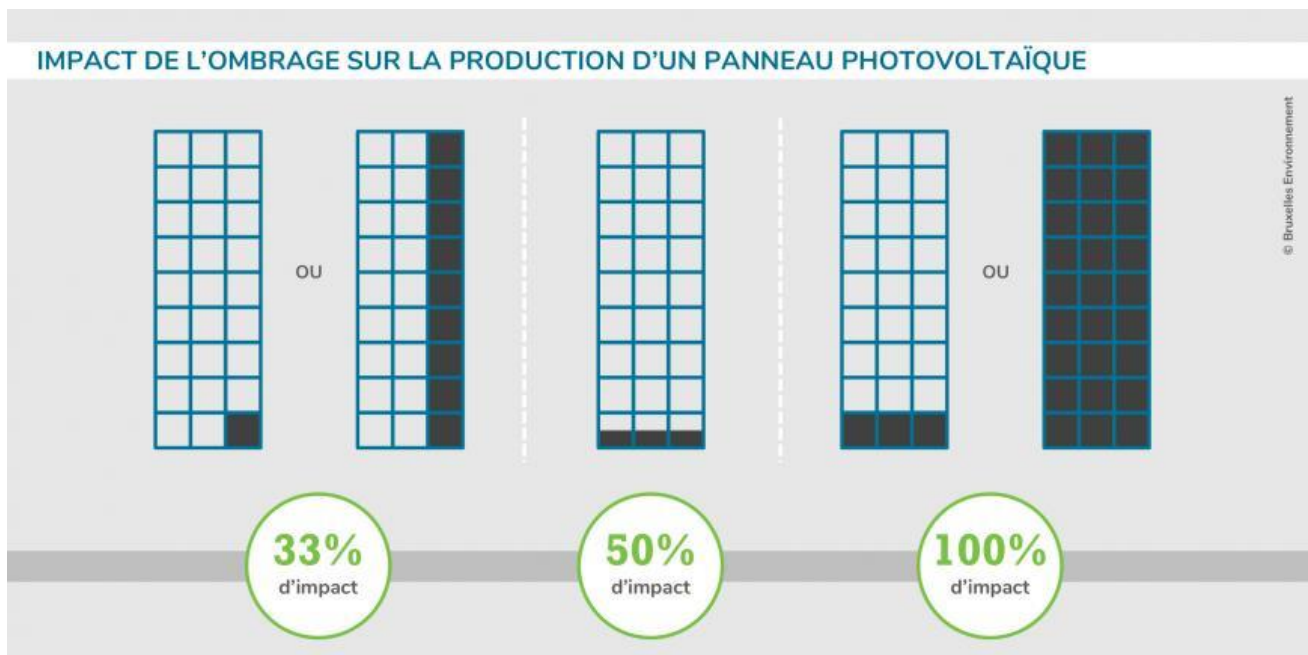


Figure III. 1 Schéma représente l'impact de l'ombrage sur la production d'un panneau PV.

III.4. Différentes Configuration d'un champ photovoltaïque

Les cinq configurations on va étudier sont : série (S), série-parallèle (SP), bridge-linked (BL), honey-comb (HC) et totale-cross-tied (TCT).

III.4.1. Configuration PV série « S »

La configuration S est présentée dans la figure III.2, tous les 25 modules PV sont connectés en série et forment une seule branche. Par conséquent, le courant de l'ensemble du GPV est identique au courant de module et la tension du GPV est équivalente à la somme des tensions individuelles des modules PV.

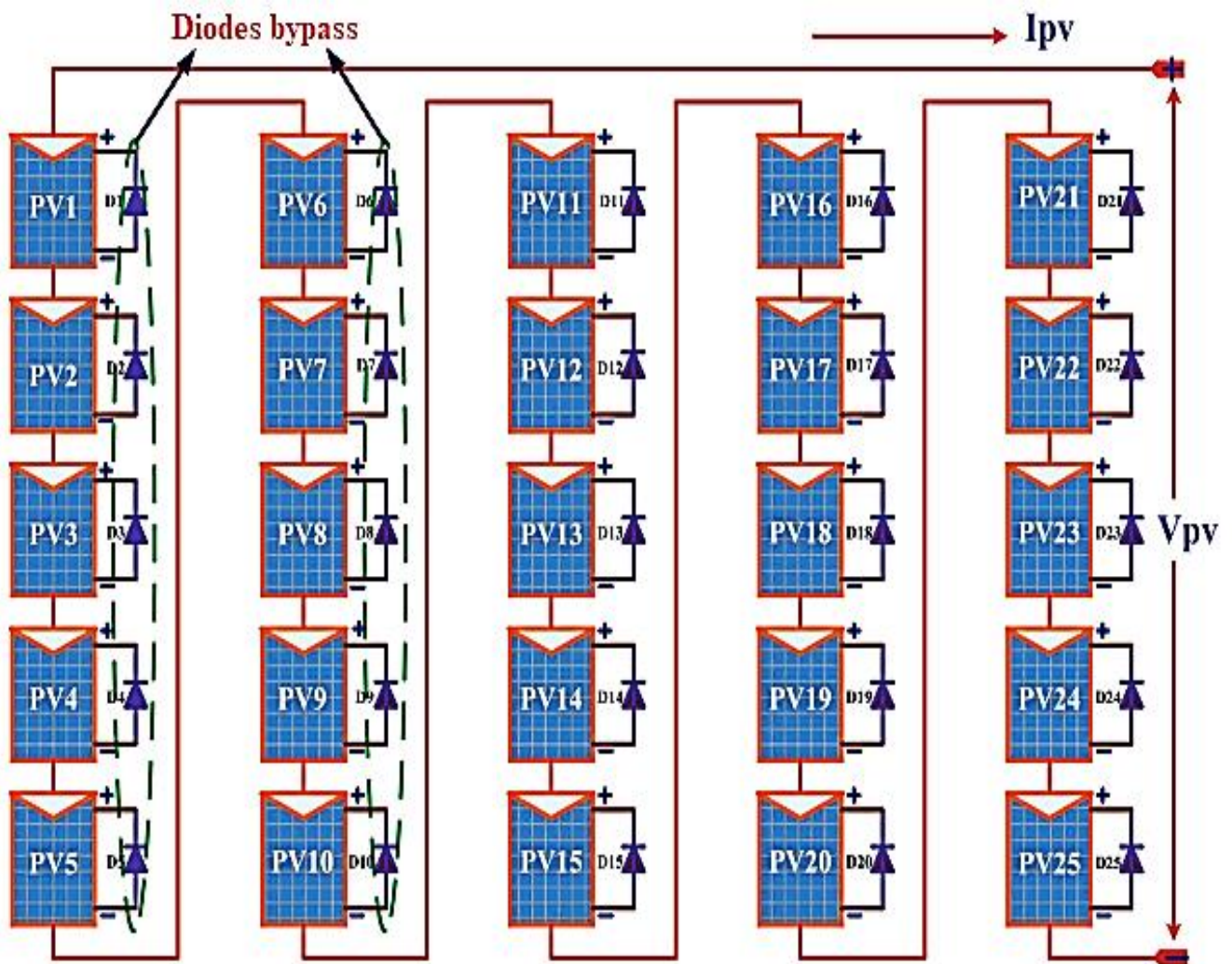


Figure III. 2 Configuration d'un champ photovoltaïque en série.

III.4.2. Configuration PV série-parallèle « SP »

Le modèle de configuration de panneaux photovoltaïques série-parallèle est illustré à la figure III.3. Cette configuration comprend cinq branches connectées en parallèle et chaque branche est constituée de cinq modules connectés en série. Dans cette configuration, le courant du générateur PV est la somme des cinq courants individuels des branches et la tension du générateur est égale à la somme des tensions des modules individuels d'une branche et les tensions à travers toutes les branches sont les mêmes.

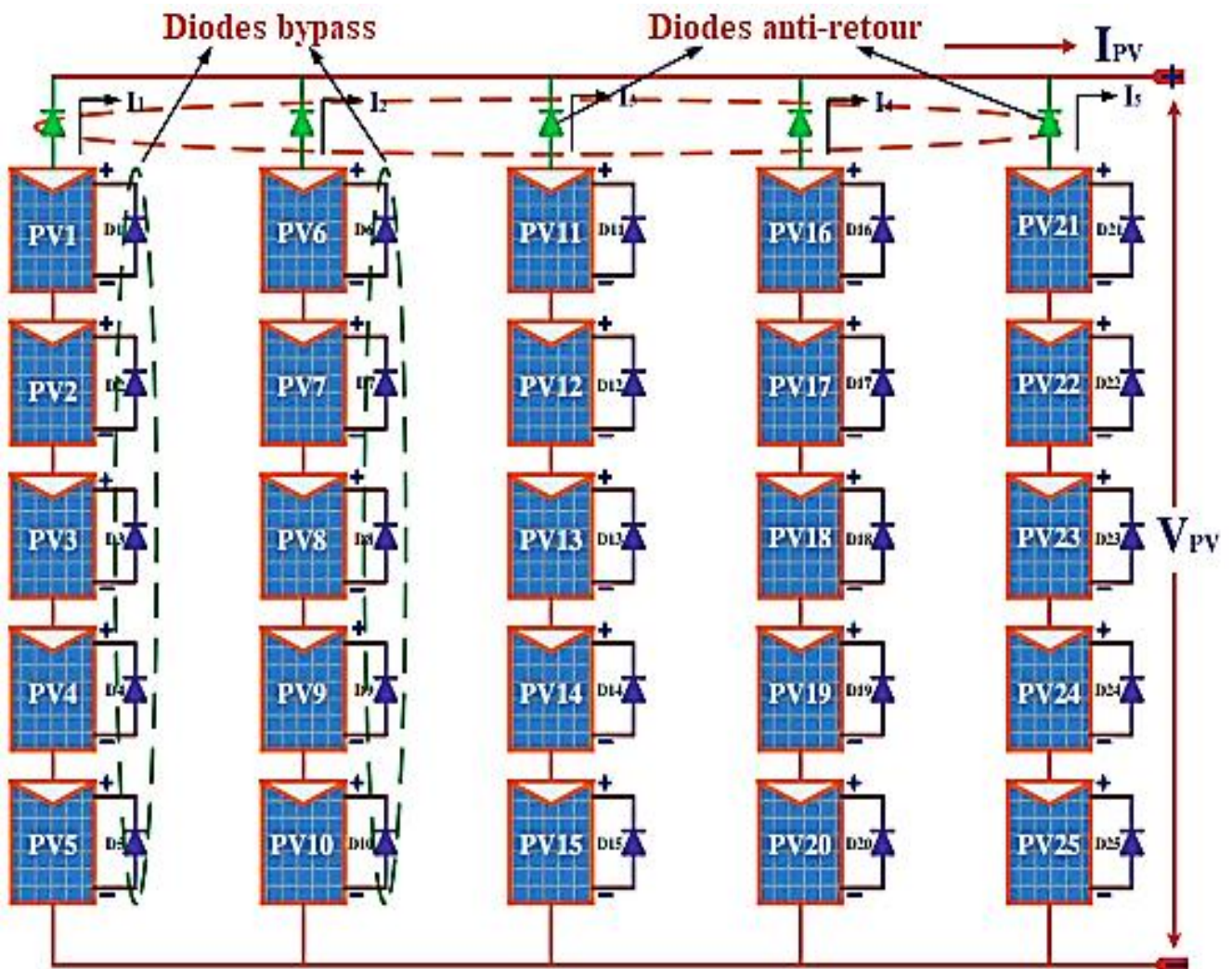


Figure III. 3 Configuration d'un champ photovoltaïque en série-parallèle.

III.4.3. Configuration PV bridge-linked « BL »

Dans la configuration BL, tous les modules sont disposés dans une architecture à pont redresseur, comme le montre la figure III.4, On voit que chaque pont est constitué de quatre modules PV ; deux modules du pont sont connectés en série et ils sont connectés en parallèle avec deux autres modules connectés en série.

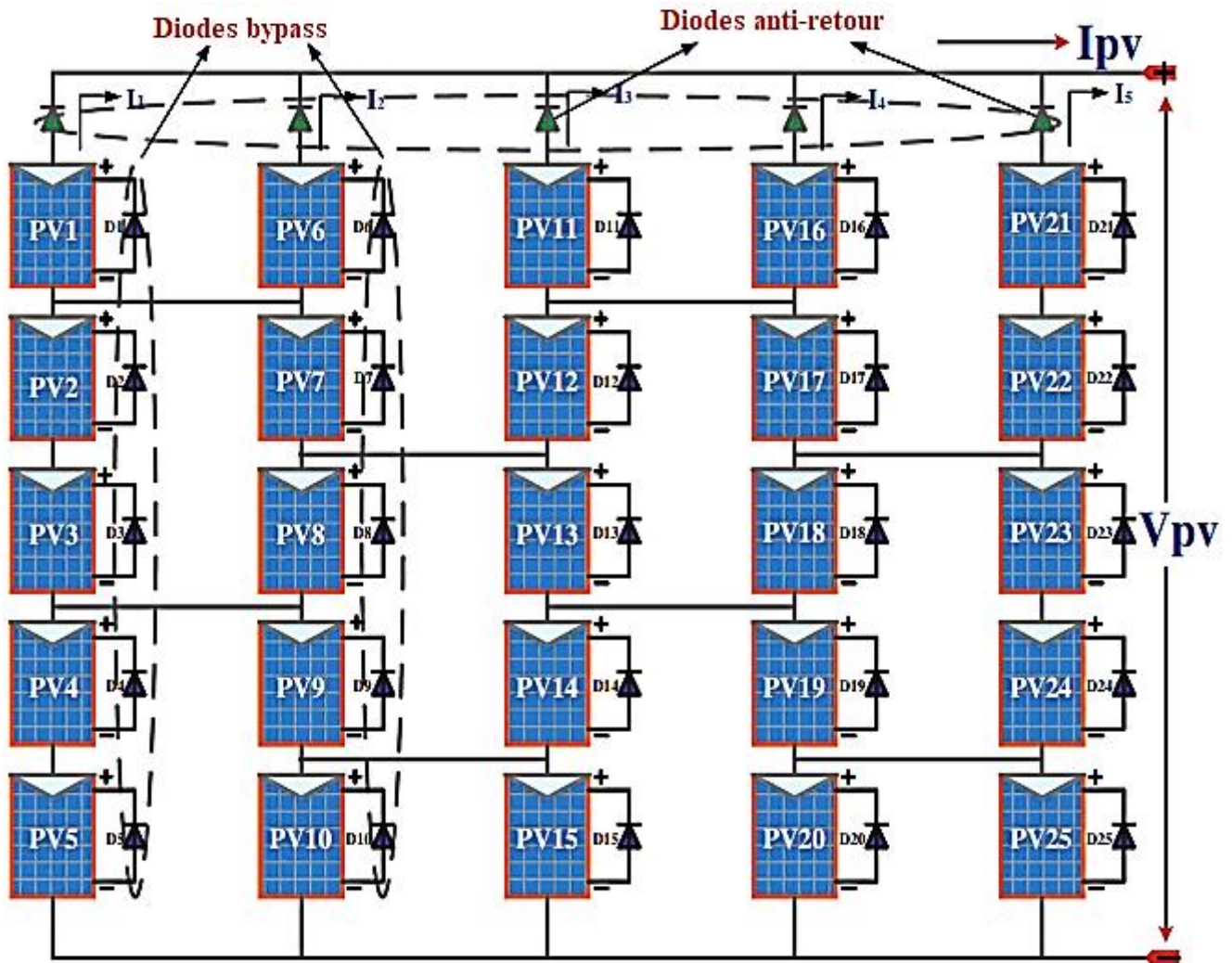


Figure III. 4 Configuration d'un champ photovoltaïque en bridge-linked.

III.4.4. Configuration PV honey-comb « HC »

La figure III.5 suivante représente la configuration honey-comb. Dans cette configuration, les modules sont connectés de façon similaire à la forme hexagonale du nid d'abeille. L'architecture HC se compose de six modules photovoltaïques ; trois modules sont connectés en série et ils sont connectés en parallèle avec trois autres modules connectés en série.

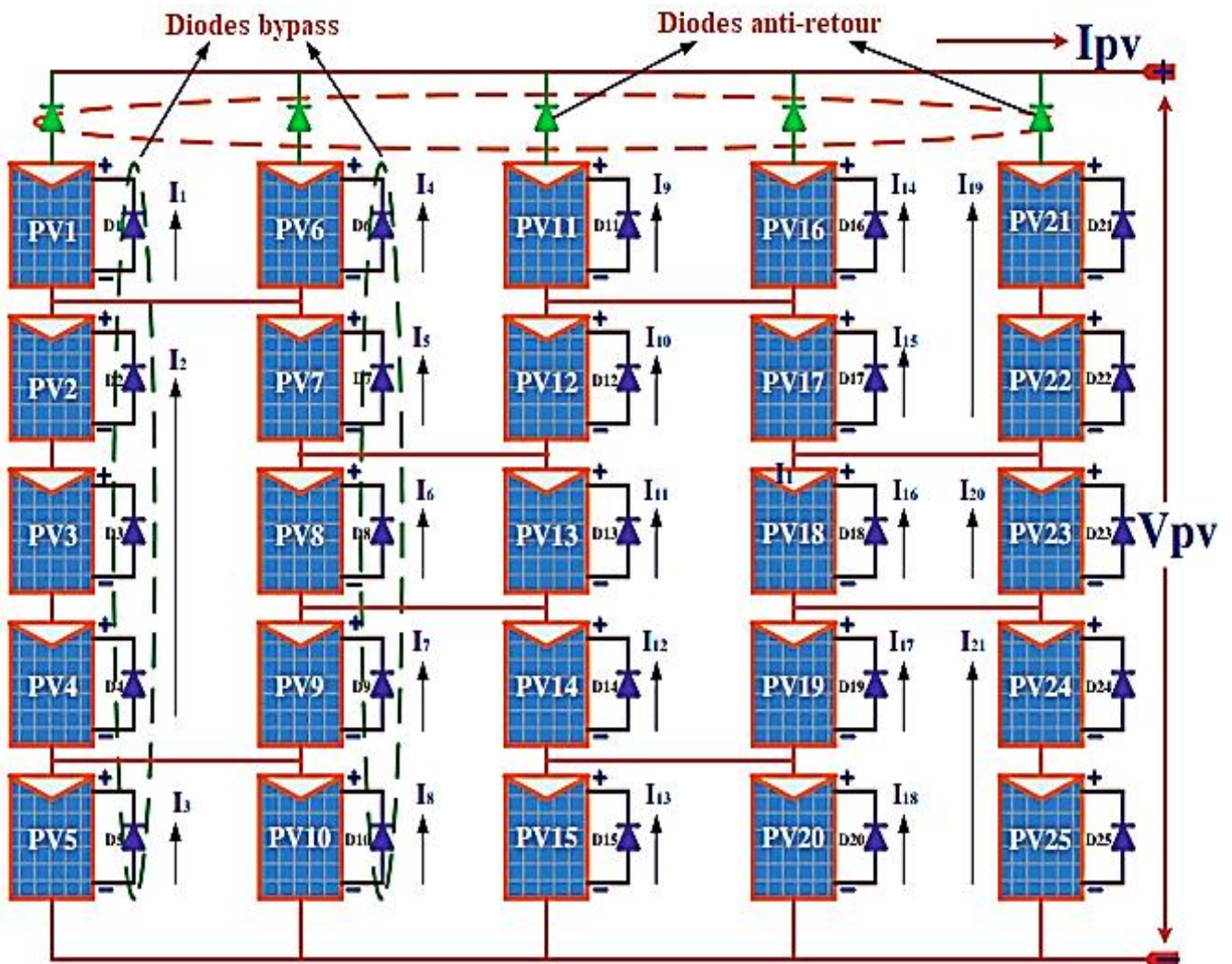


Figure III. 5 Configuration d'un champ photovoltaïque en honey-comb.

III.4.5. Configuration total-cross-tied « TCT »

La figure III.6 représente la configuration TCT. Dans cette configuration, tous les modules PV sont connectés en série et en parallèle à l'aide d'un circuit d'interconnexion complet, chaque panneau est connecté à son voisin.

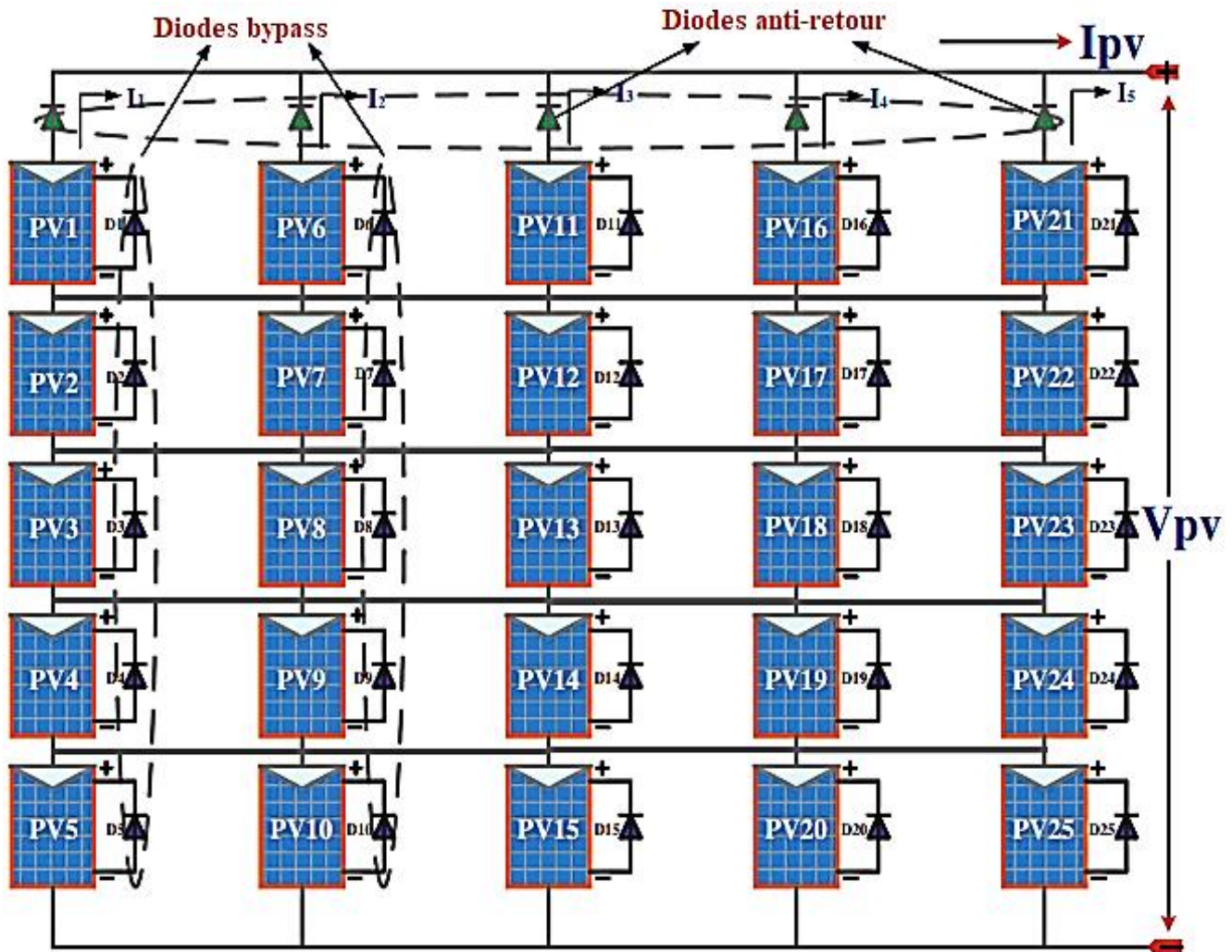


Figure III. 6 Configuration d'un champ photovoltaïque en TCT.

III.5. Simulation des différentes configurations d'un champ PV sous l'effet de plusieurs scénarios d'ombrage

Dans ce contexte on va étudier les caractéristiques I-V et P-V pour différentes configurations et sous différents scénarios d'irradiance uniforme dans STC et non-uniforme (ombrage partiel) pour extraire la configuration qui offre le maximum de puissance. Nous simulons les cinq configurations, série (S), série-parallèle (SP), Bridge-Linked (BL), Honey-Comb (HC) et Totale-Cross-Tied (TCT) sous l'effet de 9 scénarios d'ombrage partiel, chaque configuration composée de 25 modules PV de type KYOCERA-KC200GT. tous les modules PV sont protégés par des diodes de contournement (bypass) en parallèle à chaque module photovoltaïque pour éviter le phénomène de hot-spot (point chaud) dû à l'ombrage partiel et les branches sont protégées par des diodes de blocage (anti-retour) connectées

en série bloquent l'inversion du courant de la branche dans une autre branche en raison de la différence de potentiel [46]–[50]. Ces modules PV sous différents scénarios d'irradiance fonctionnent à une température constante de 25 °C.

III.5.1. Caractéristiques des modules

Module : KYOCERA-KC200GT	
Puissance maximale (Pmax)	200.143 W
Tension à circuit ouvert (Voc)	32.9 V
Courant de court-circuit de référence (Isc)	8.21 A
Tension à Pmax	26.3 W
Courant à P max	7.61 A
Coefficient de température à Voc	-0.35502 %/C°
Coefficient de température à Isc	0.06 %/C°
Nombre des cellules par module	54

Tableau III. 1 Caractéristiques électriques des modules KYOCERA-KC200GT.

III.5.2. Scénarios d'ombrages partiel étudiés

Les différents scénarios d'ombrage partiel étudiés pour différentes configurations associant 25 modules PV (S, SP, BL (présenté dans la figure), HC et TCT) sont illustrés dans la Figure III.7. Dans un générateur photovoltaïque, en fonction du nombre de modules ombragés par chaîne (branche ou colonne) et du nombre de chaînes ombragées, les scénarios d'ombrage sont classés en : ombrage irrégulier en ligne (a), ombrage irrégulier en colonne (b), ombrage diagonal (c), ombrage aléatoire (d), ombrage court et étroit (e), ombrage court et large (f), ombrage long et étroit (g), ombrage long et large (h).

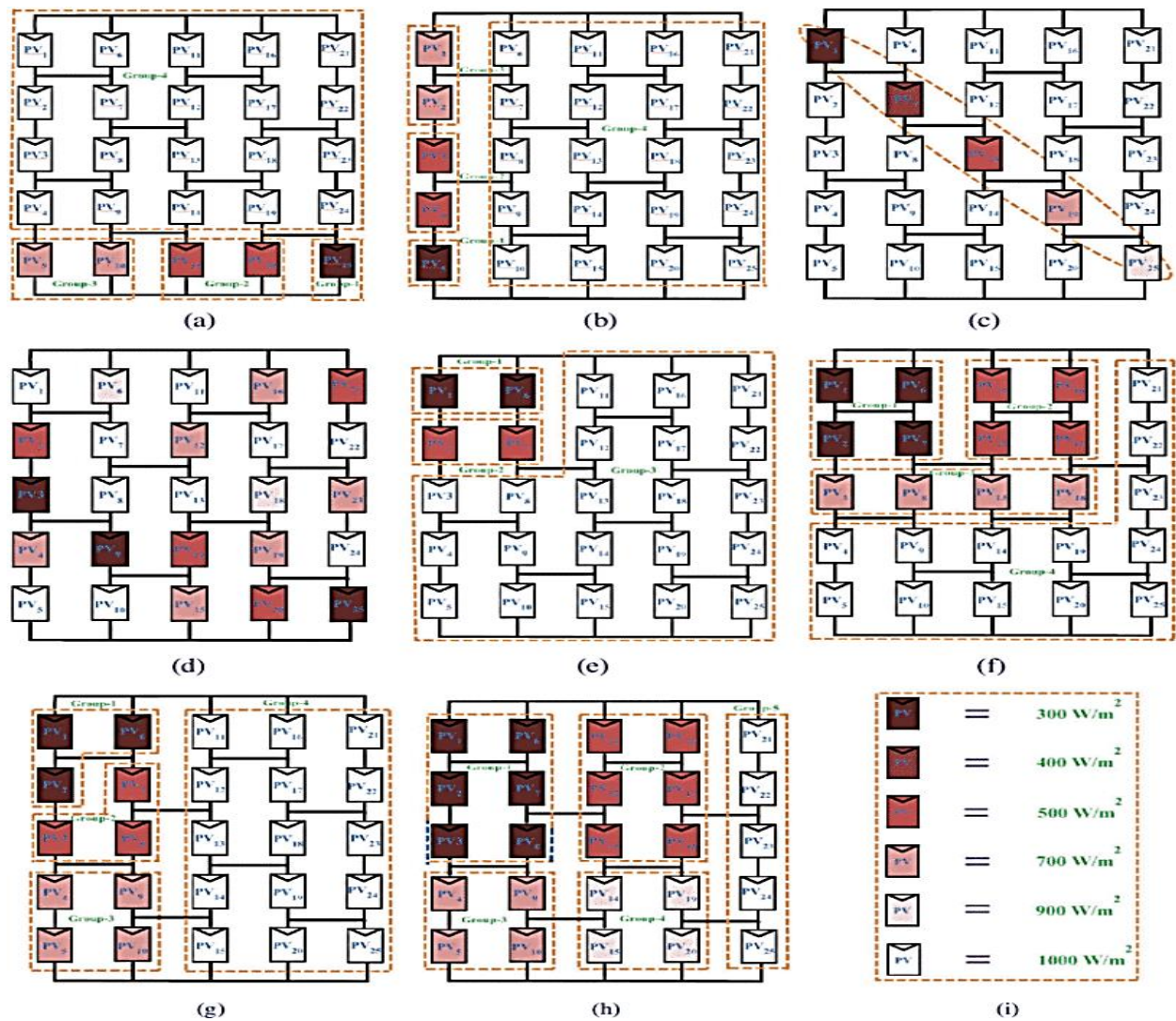


Figure III. 7 Présentation de différents scénarios d'ombrage partiel appliqués au Générateur PV composé de 25 modules pour la configuration de raccordement BL. [64]

III.5.3. Résultats de simulation et discussion

Les différentes configurations du générateur PV à 25 modules sont simulées dans l'environnement Matlab/Simulink avec sous les mêmes conditions climatiques de température, de niveau d'irradiation et de type d'ombrage partiel (Figure III.7).

III.5.3.1. Configuration PV série « S » sous différents scénarios d'ombrage

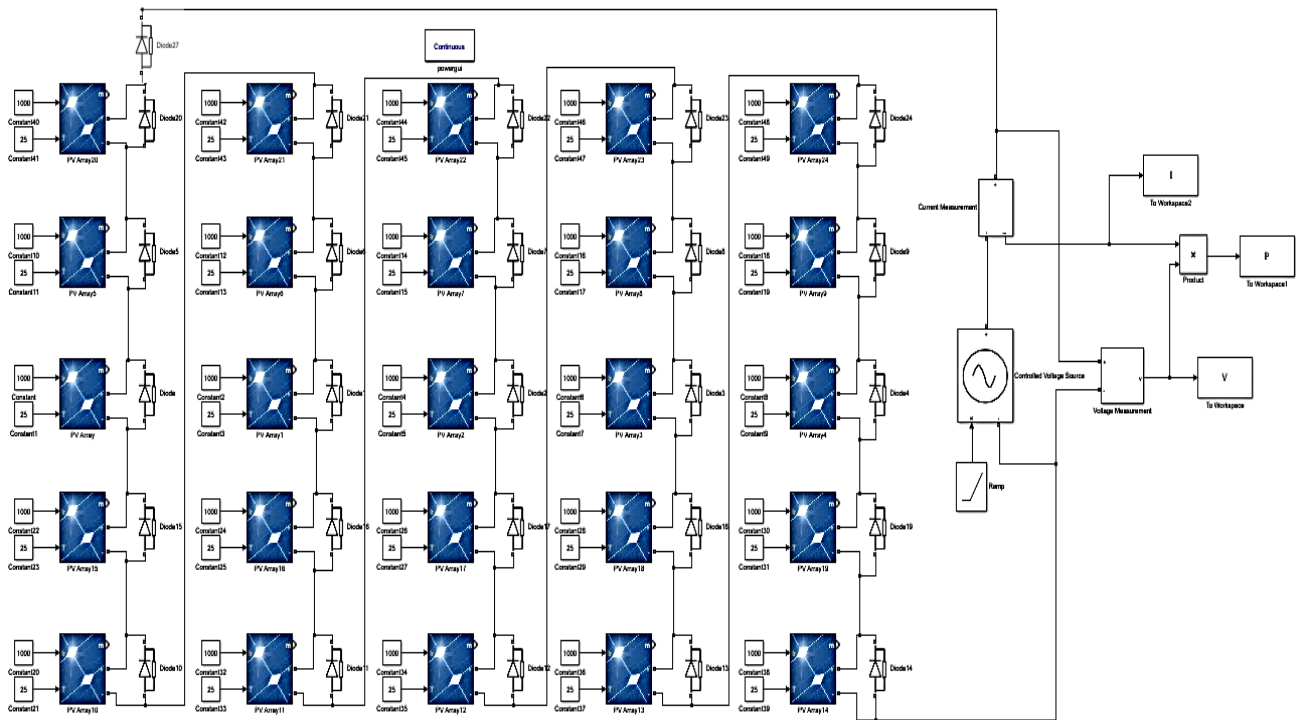


Figure III. 8 Schéma de la simulation de la configuration PV série.

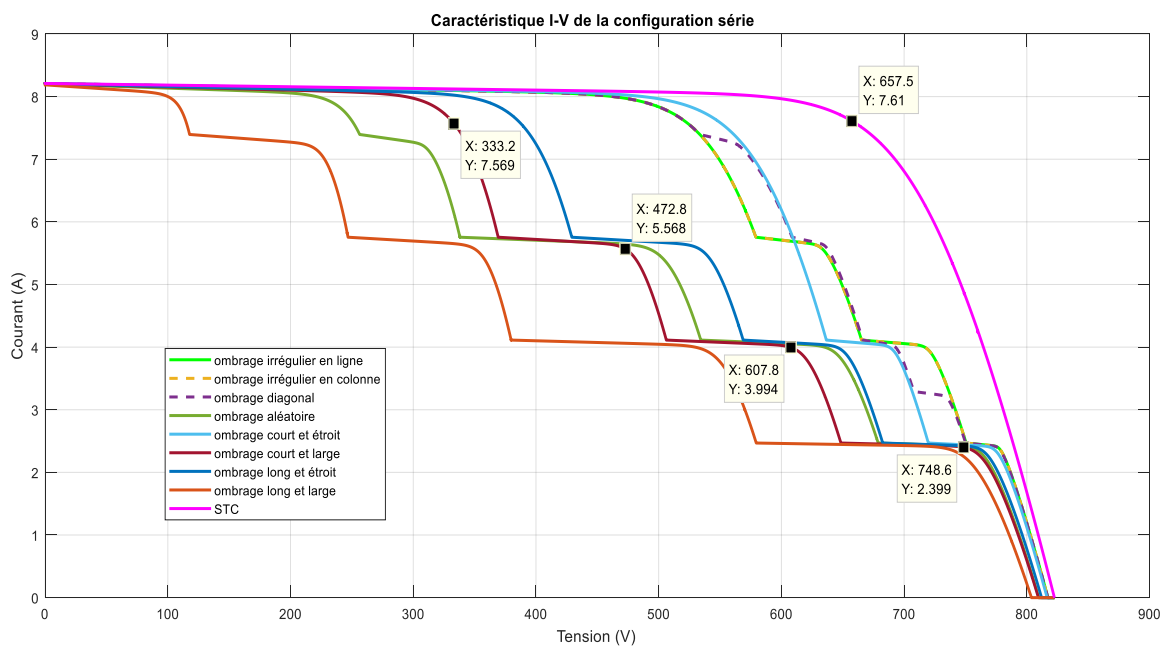


Figure III. 9 Caractéristiques (I-V) de la configuration PV série sous différents scénarios d'ombrage partiel.

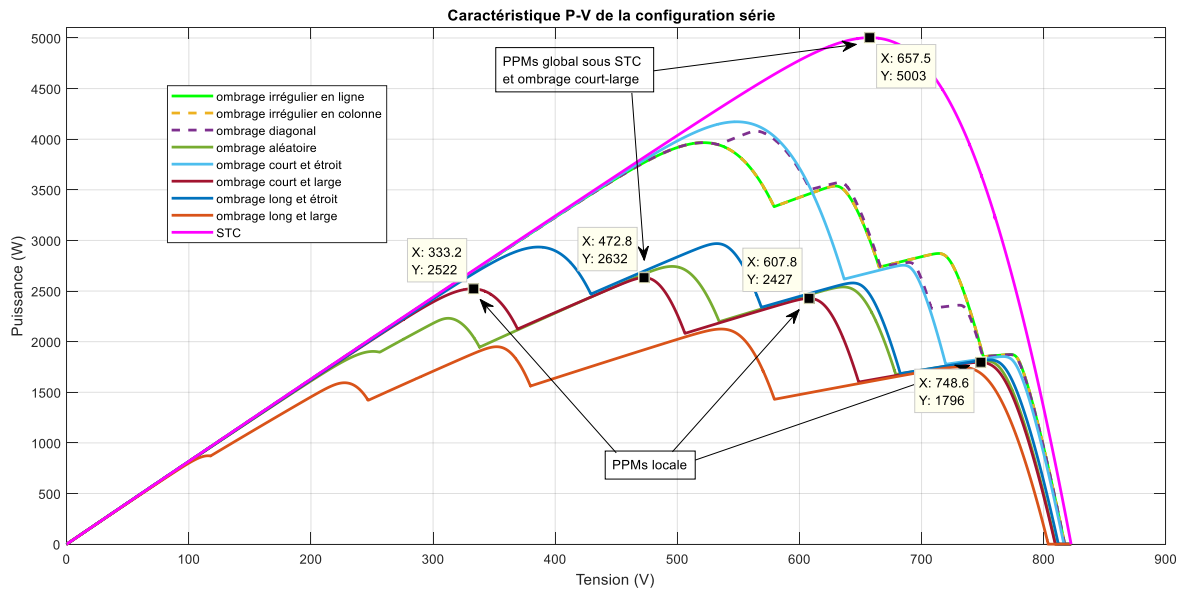


Figure III. 10 Caractéristiques (P-V) de la configuration PV série sous différents scénarios d'ombrage partiel.

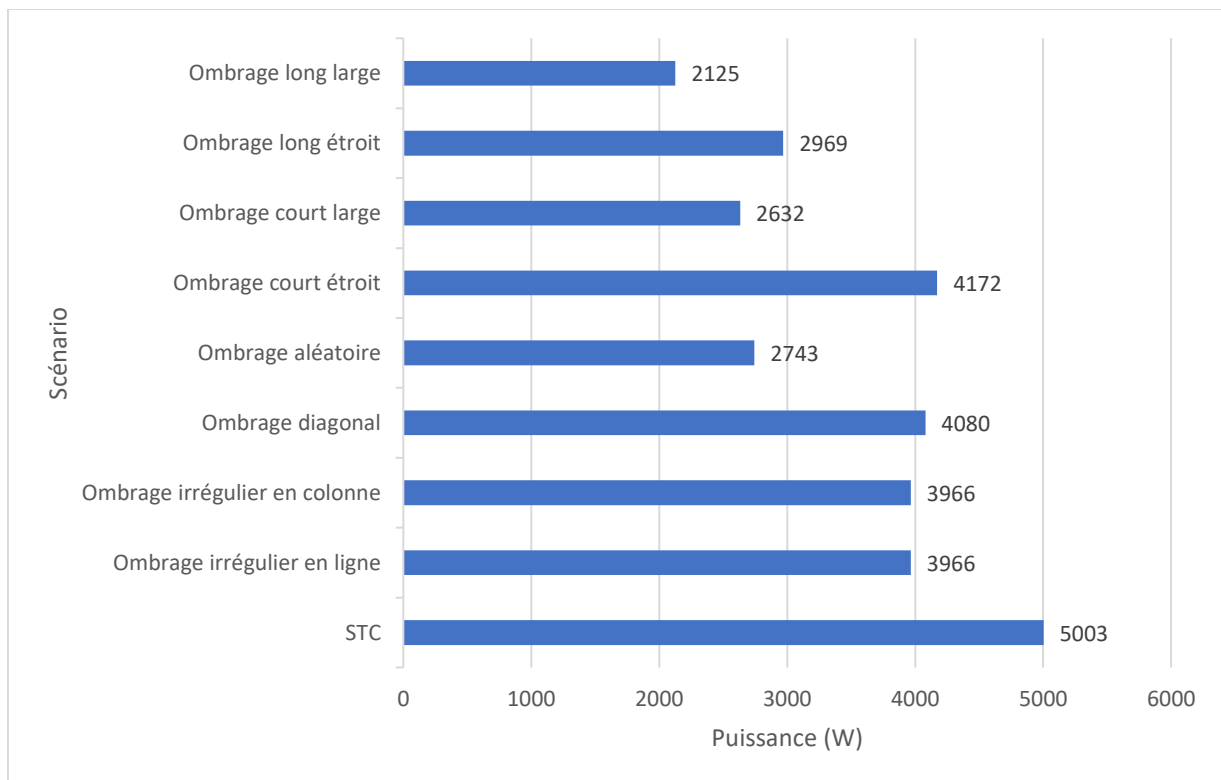


Figure III. 11 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV série sous différents scénarios d'ombrage partiel.

III.5.3.2. Configuration PV série-parallèle « SP » sous différents scénarios d'ombrage

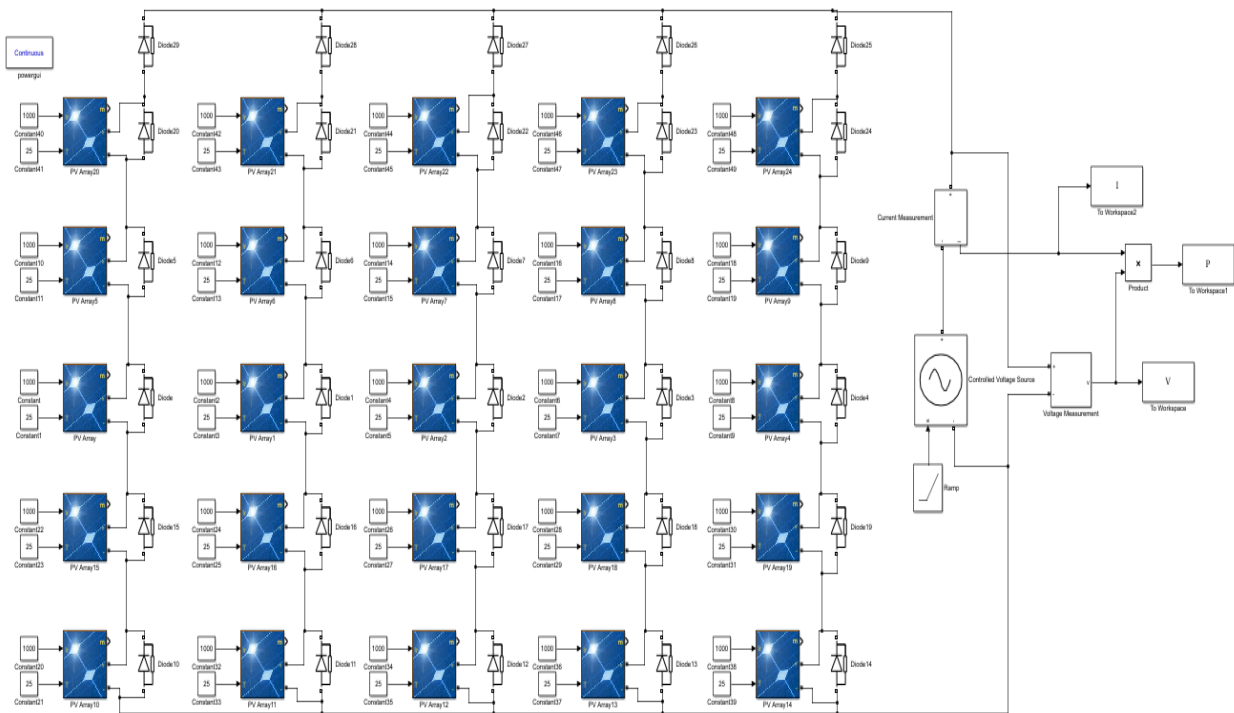


Figure III. 12 Schéma de la simulation de la configuration PV série-parallèle.

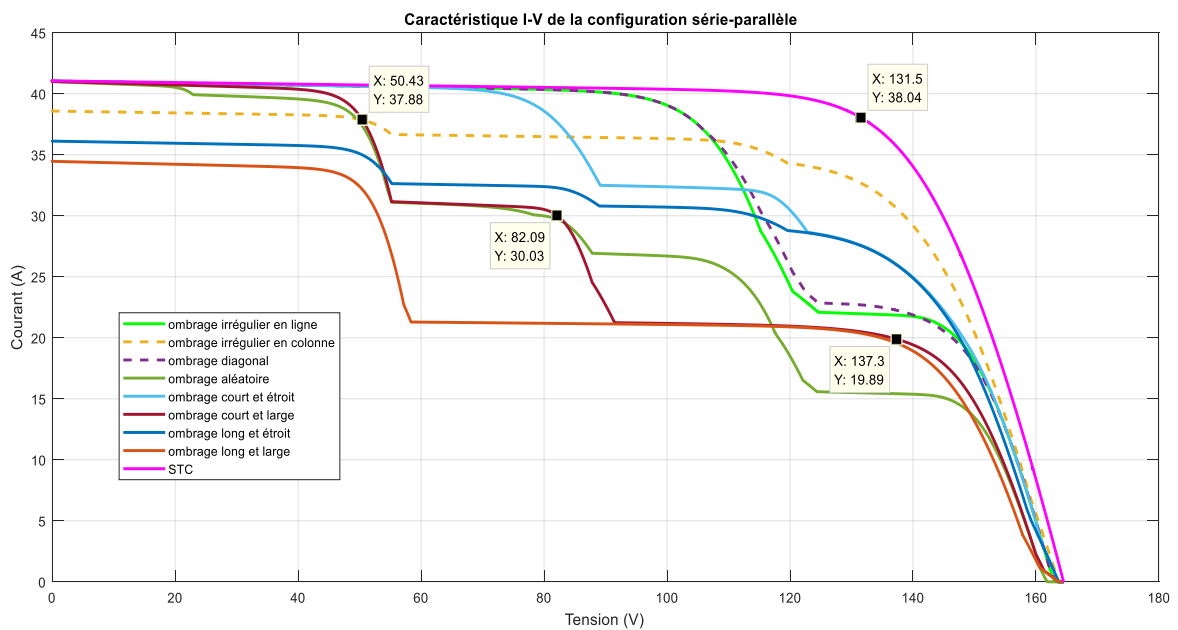


Figure III. 13 Caractéristiques (I-V) de la configuration PV série-parallèle sous différents scénarios d'ombrage partiel.

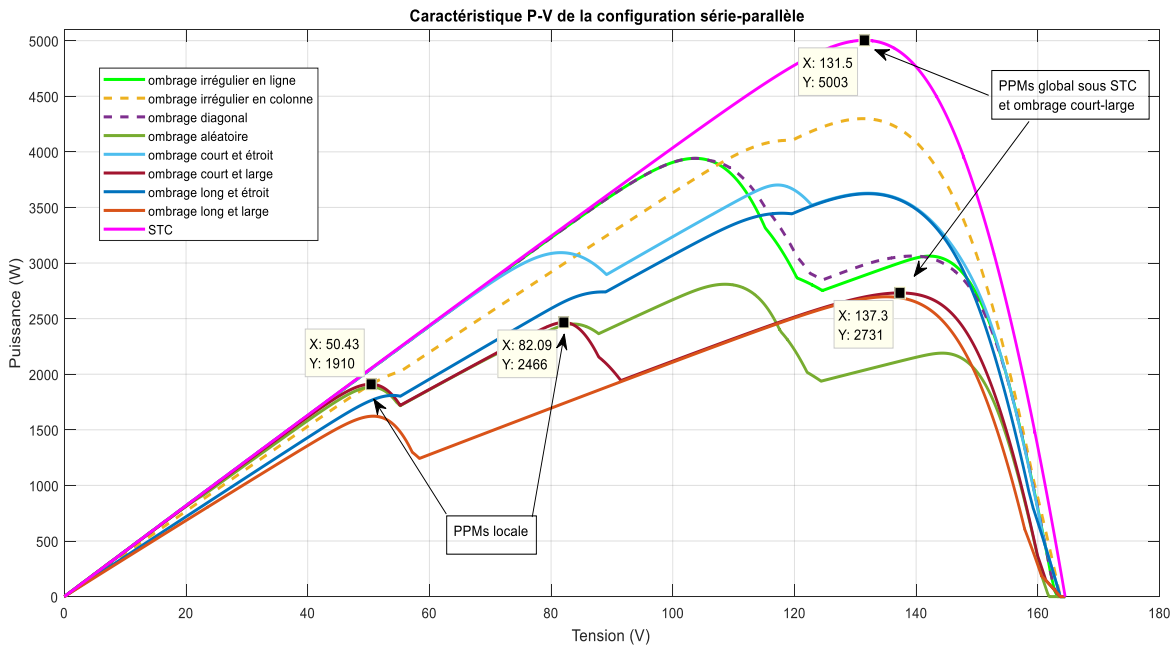


Figure III. 14 Caractéristiques (P-V) de la configuration PV série-parallèle sous différents scénarios d'ombrage partiel.

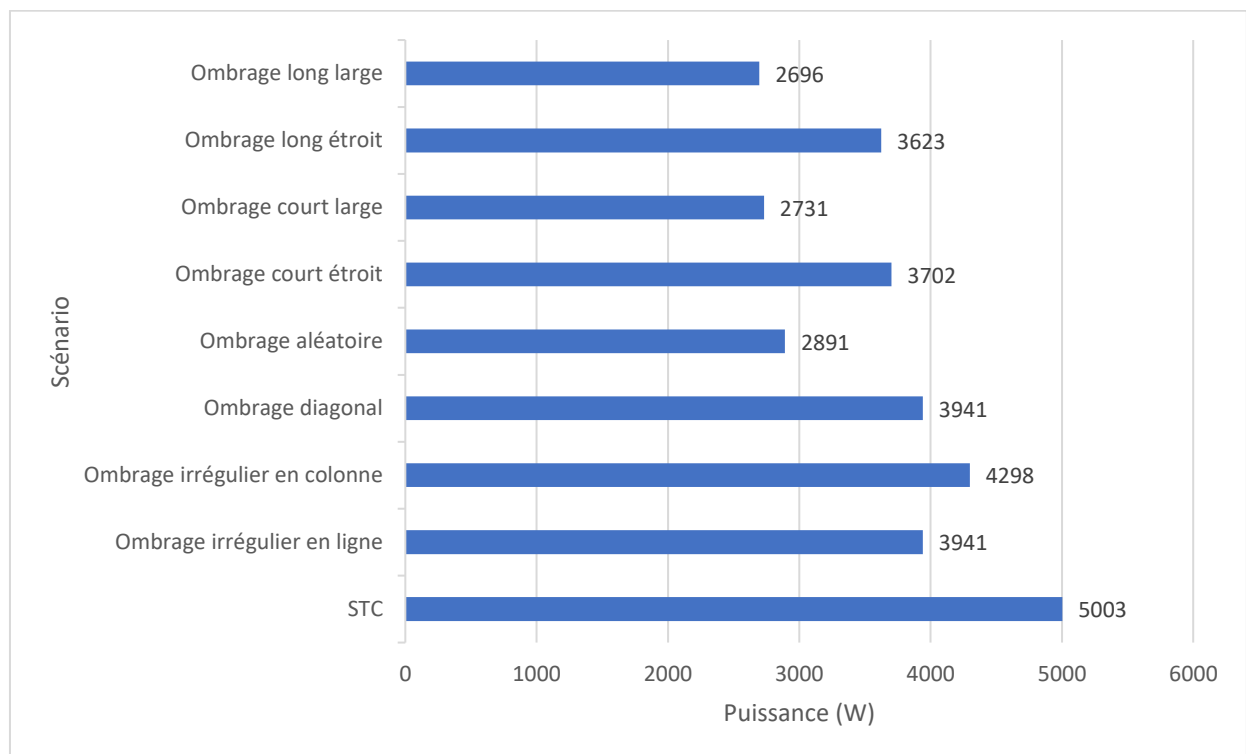


Figure III. 15 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV série-parallèle sous différents scénarios d'ombrage partiel.

III.5.3.3. Configuration PV bridge-linked « BL » sous différents scénarios d'ombrage

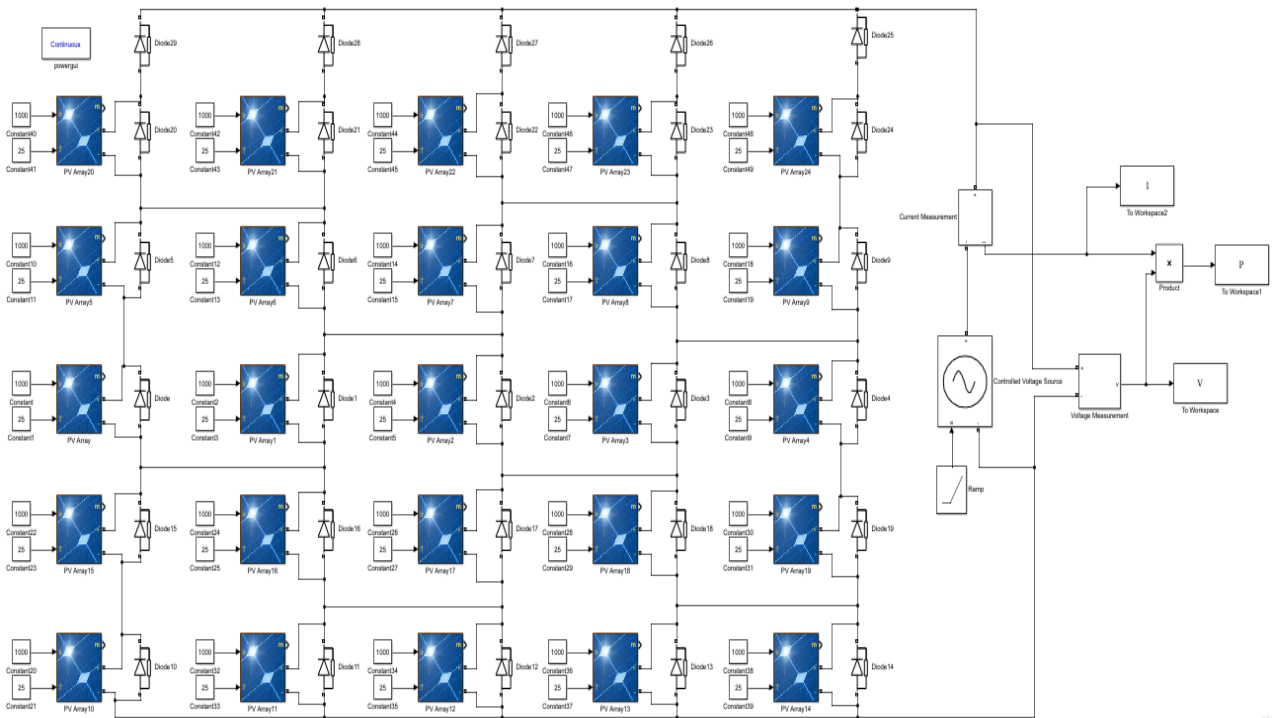


Figure III. 16 Schéma de la simulation de la configuration PV bridge-linked

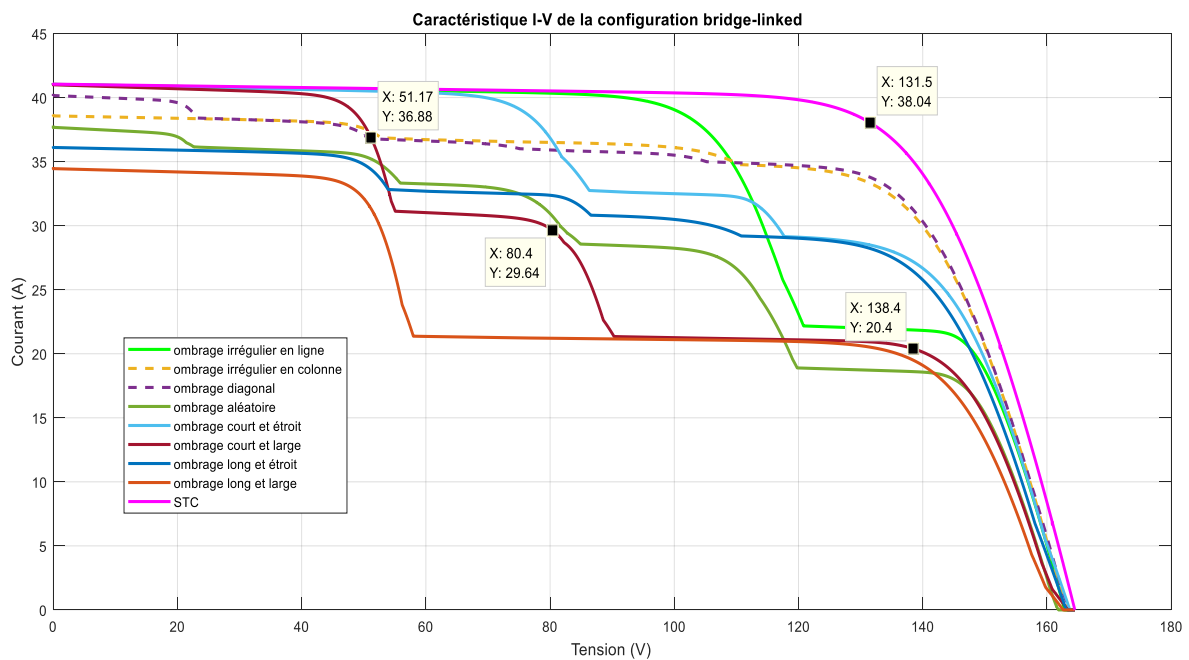


Figure III. 17 Caractéristiques (I-V) de la configuration bridge-linked sous différents scénarios d'ombrage partiel.

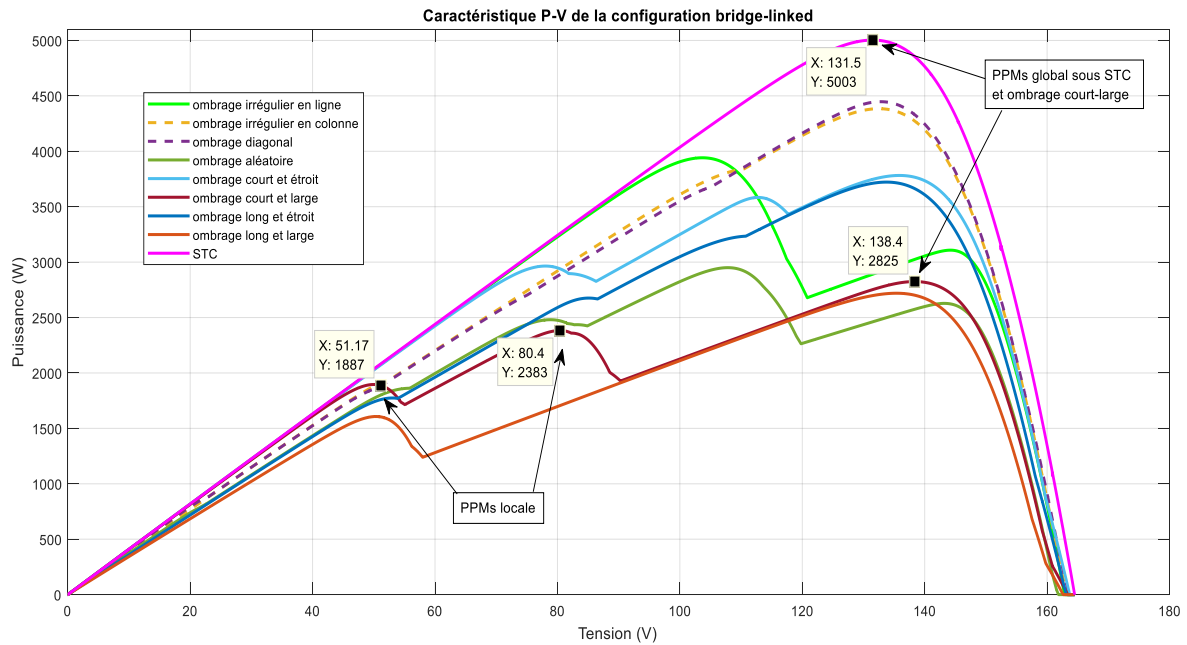


Figure III. 18 Caractéristiques (P-V) de la configuration bridge-linked sous différents scénarios d'ombrage partiel.

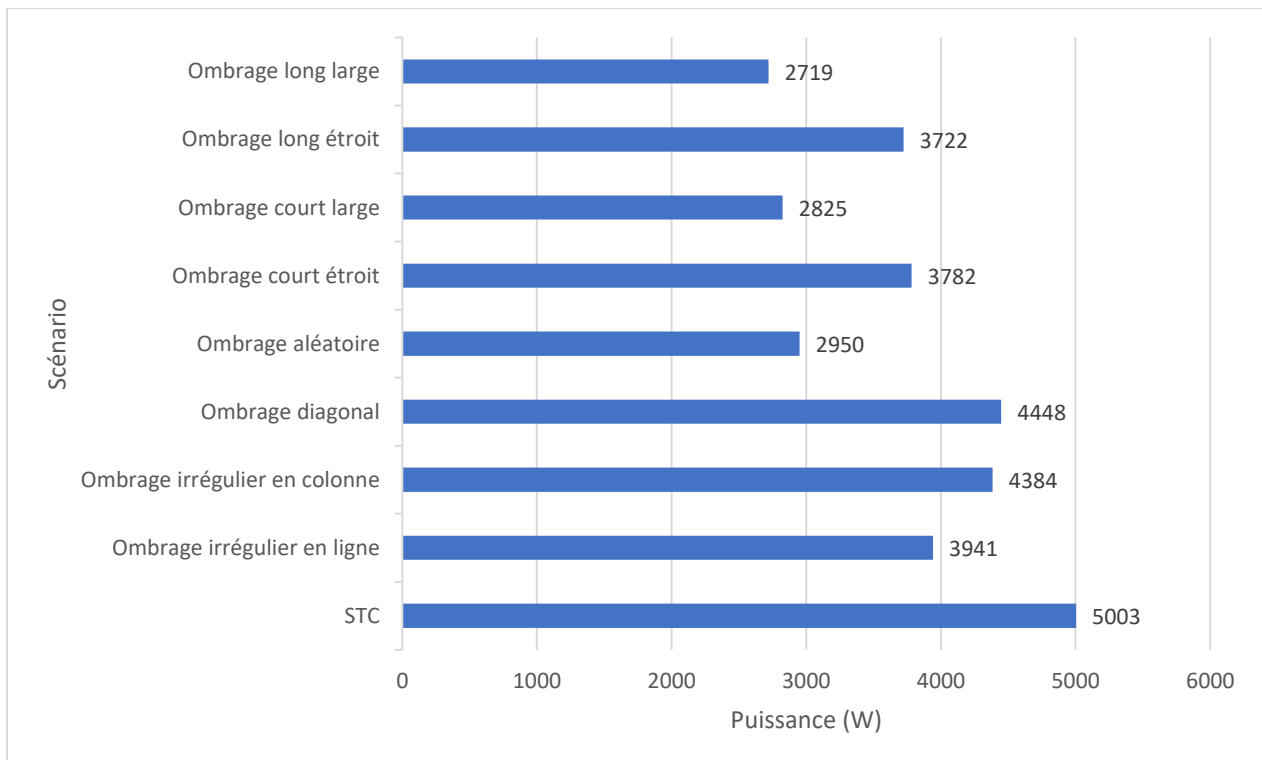


Figure III. 19 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV bridge-linked sous différents scénarios d'ombrage partiel.

III.5.3.4. Configuration PV honey-comb « HC » sous différents scénarios d'ombrage

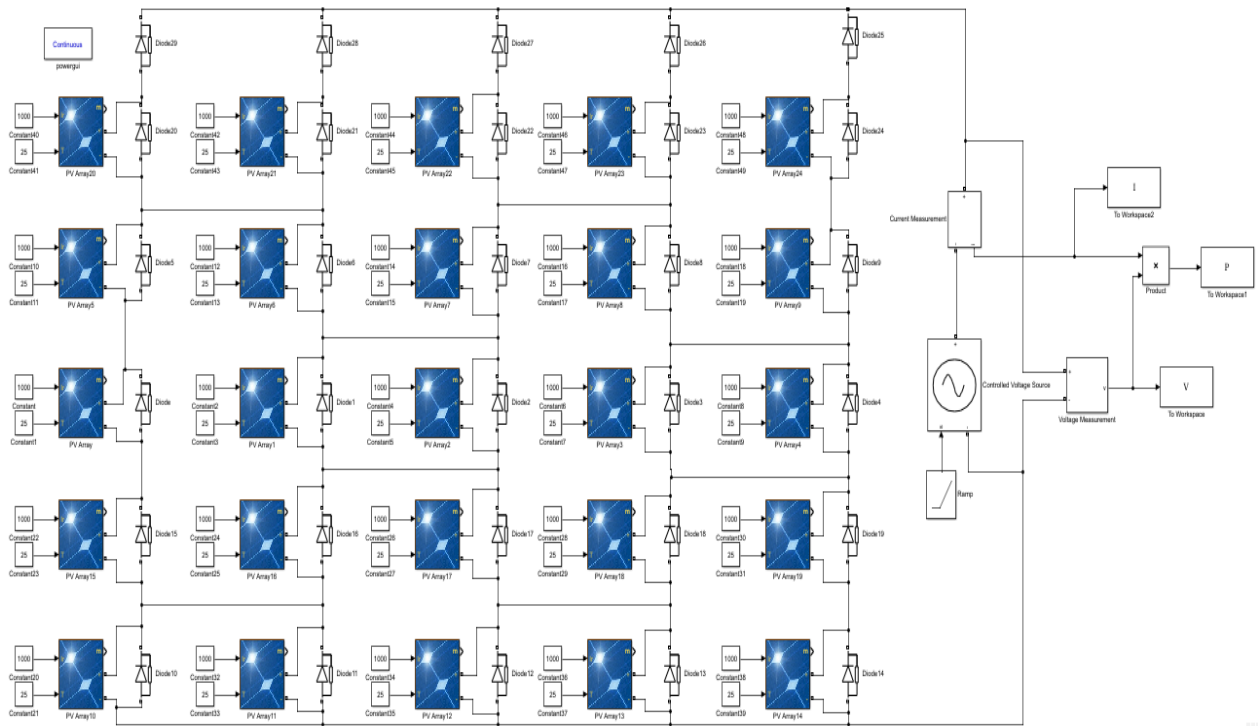


Figure III. 20 Schéma de simulation de la configuration PV honey-comb.

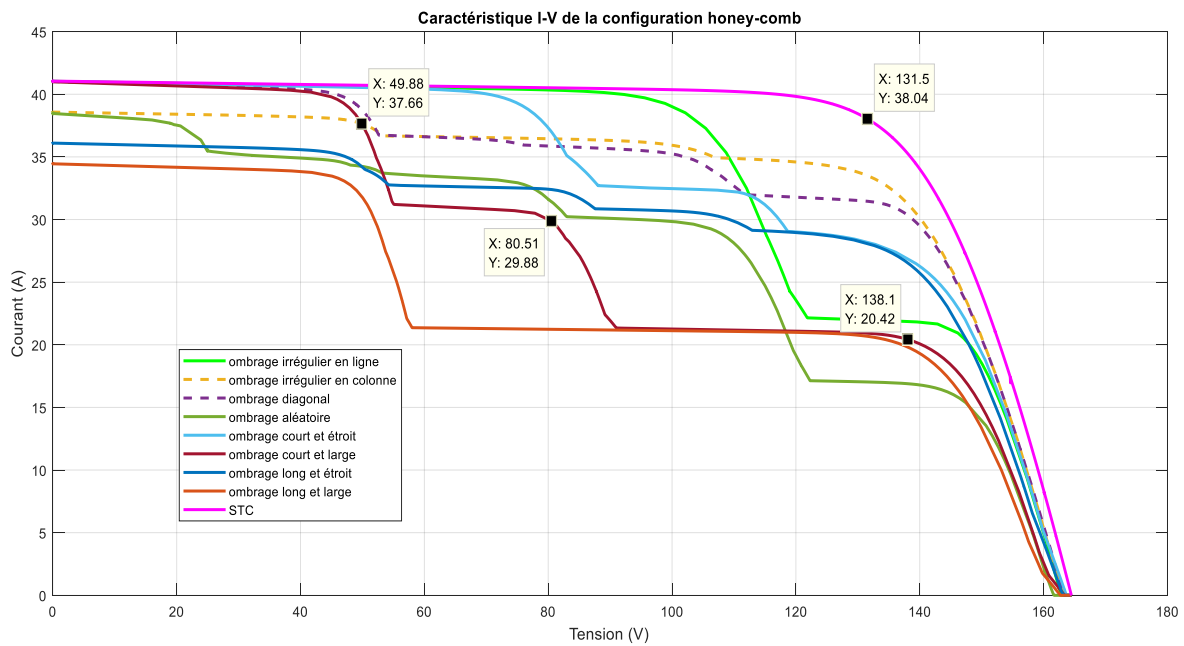


Figure III. 21 Caractéristiques (I-V) de la configuration honey-comb sous différents scénarios d'ombrage partiel.

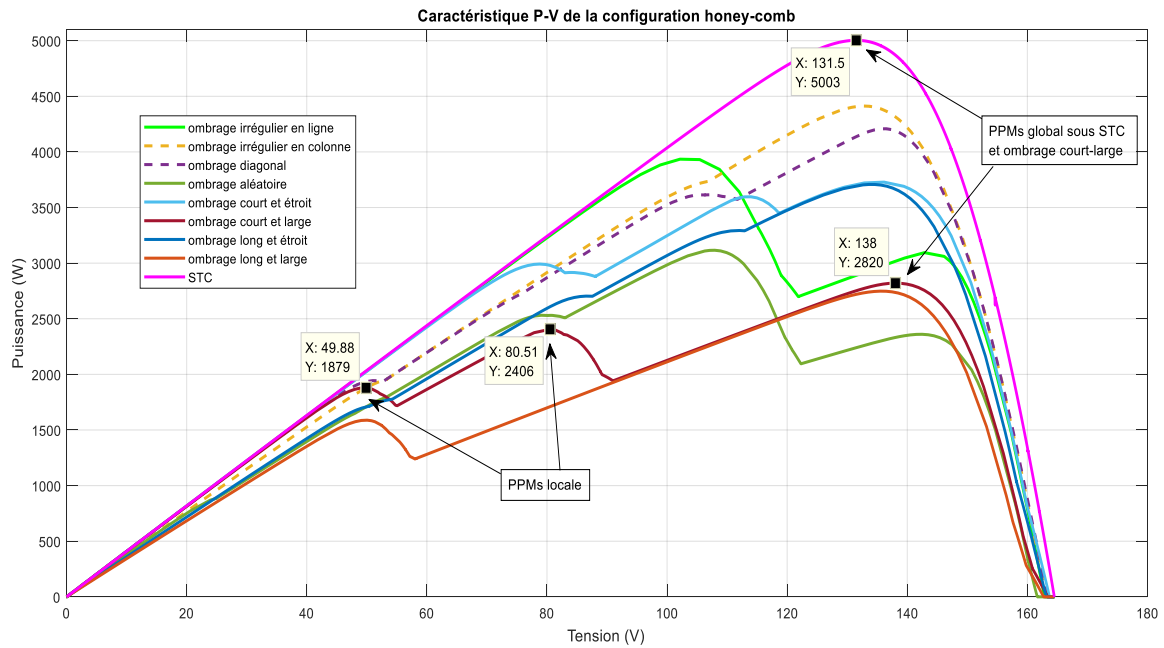


Figure III. 22 Caractéristiques (P-V) de la configuration honey-comb sous différents scénarios d'ombrage partiel.

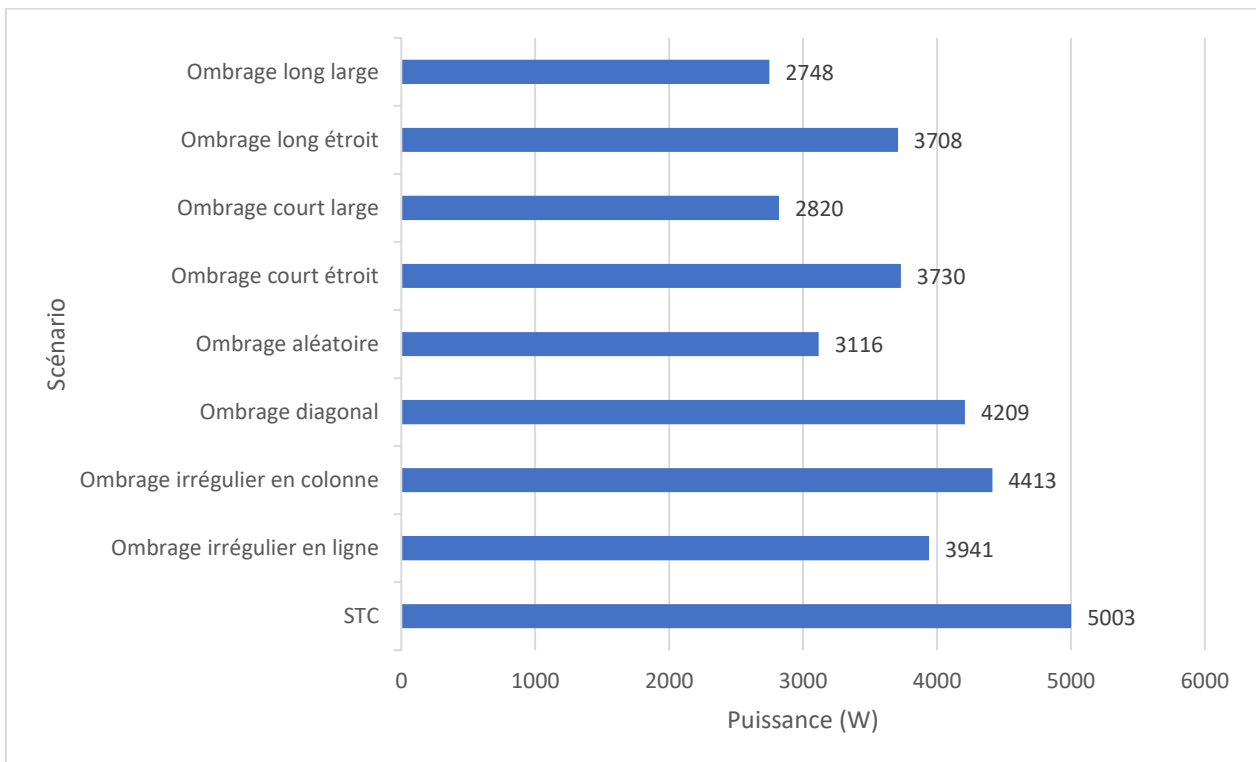


Figure III. 23 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV honey-comb sous différents scénarios d'ombrage partiel.

III.5.3.5. Configuration PV total-cross-tied « TCT » sous différents scénarios d'ombrage

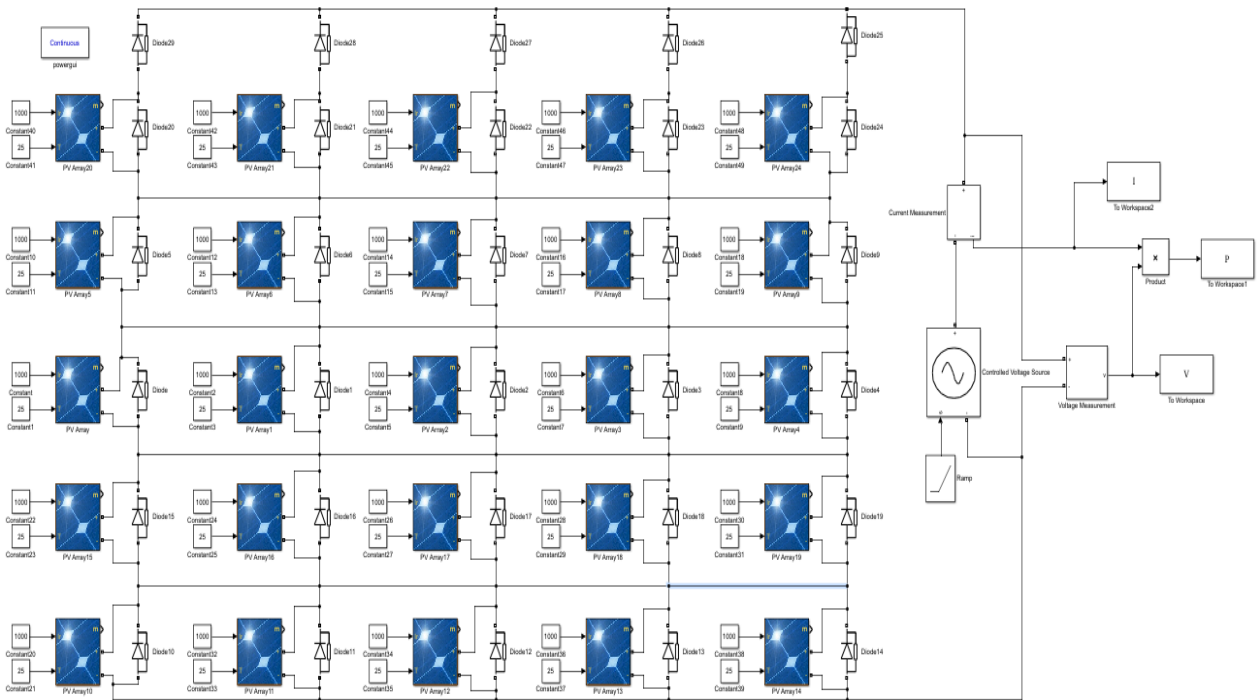


Figure III. 24 Schéma de la simulation de la configuration PV TCT.

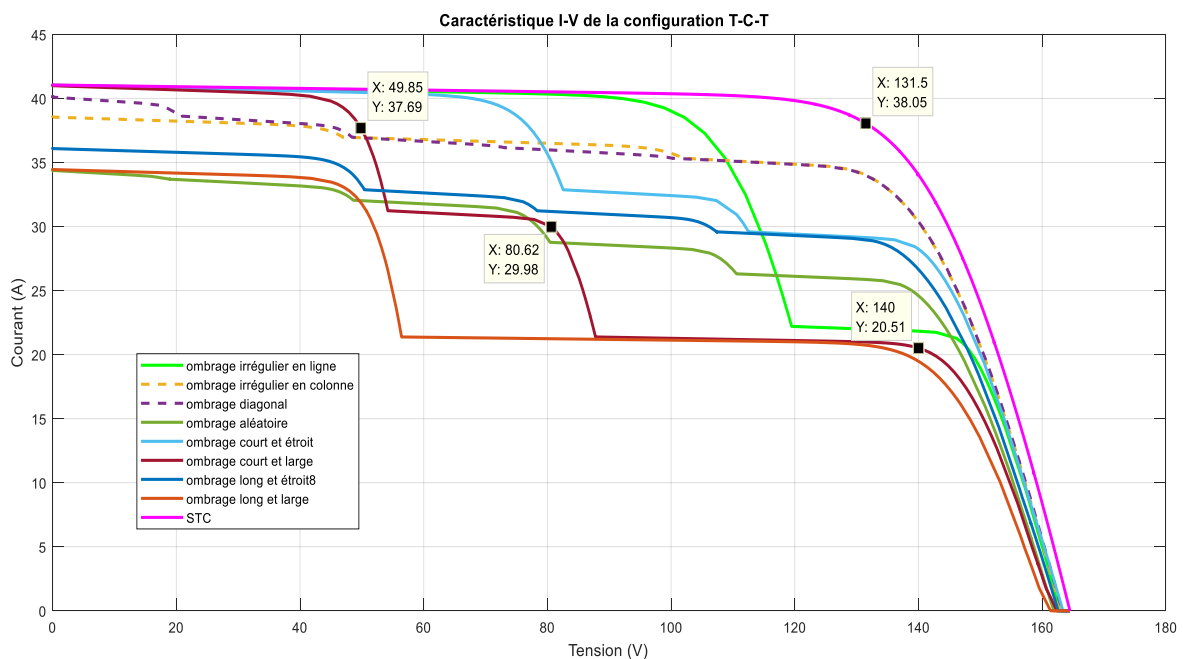


Figure III. 25 Caractéristiques (I-V) de la configuration PV TCT sous différents scénarios d'ombrage partiel.

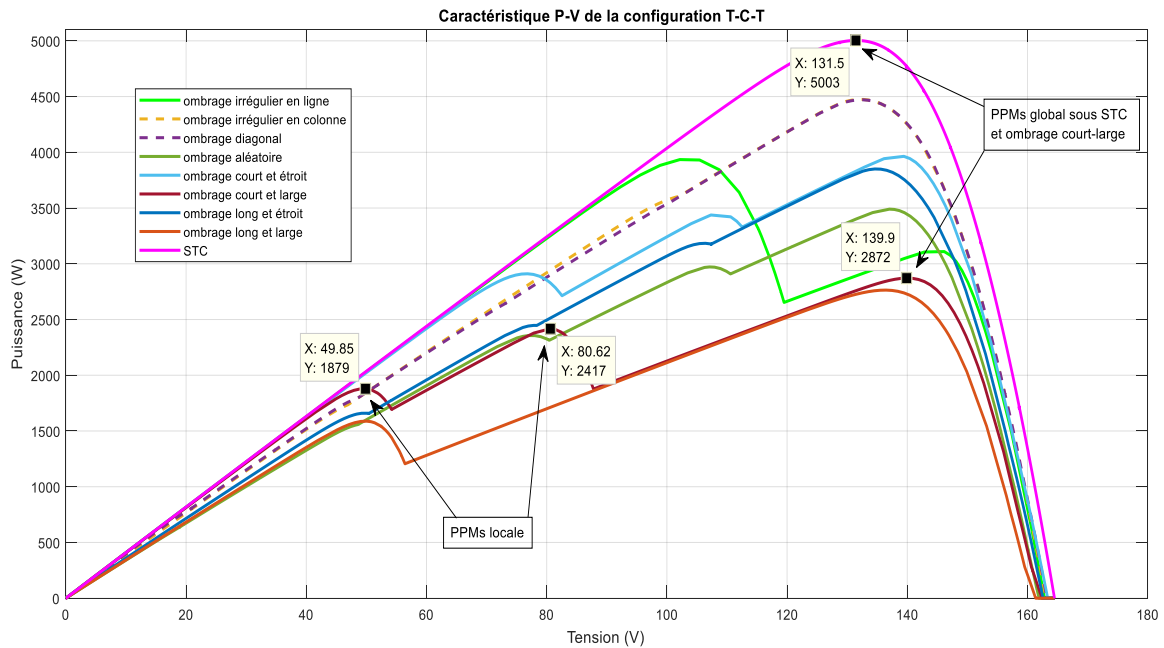


Figure III. 26 Caractéristiques (P-V) de la configuration PV TCT sous différents scénarios d'ombrage partiel.

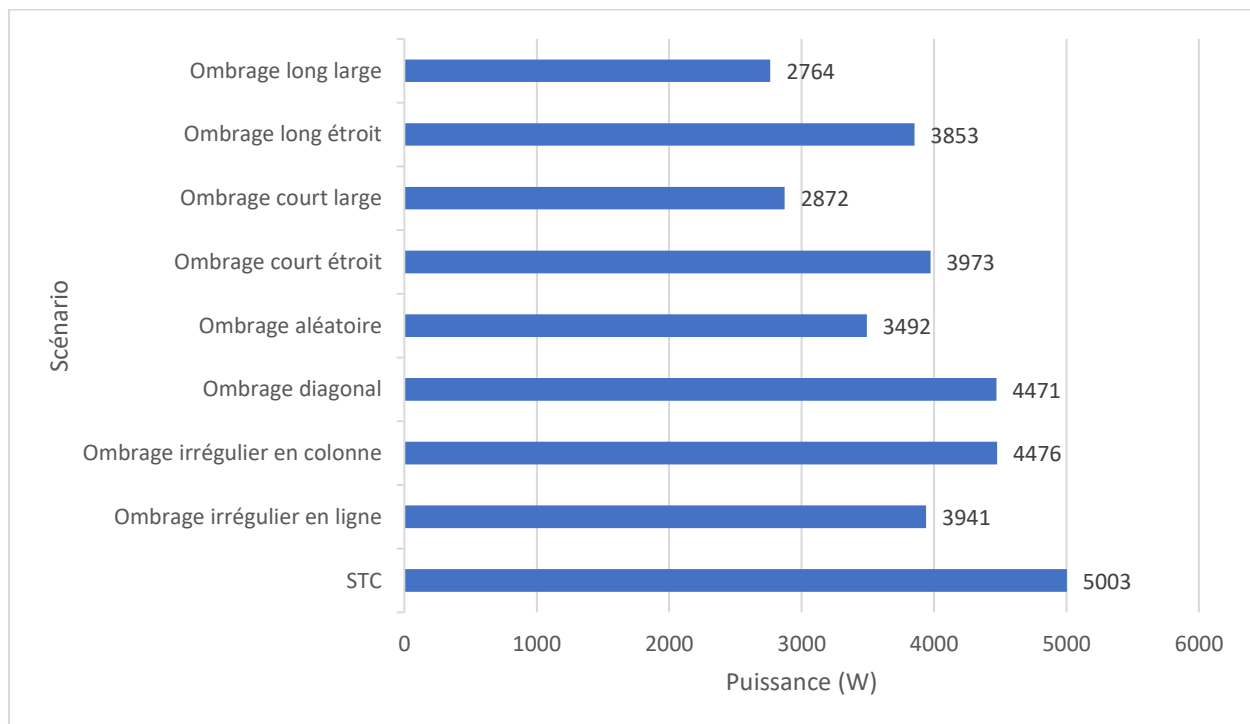


Figure III. 27 Représentation de la puissance maximale de sortie de la configuration PV TCT sous différents scénarios d'ombrage partiel.

Les résultats de simulations peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Type de l'irradiance	Configuration	V _{CO}	I _{SC}	P _{PM}	V _{PM}	I _{PM}
STC	S	822.4511	8.2279	5003	657.5485	7.6092
	SP	164.5	41.1393	5003	131.5036	38.0476
	BL	164.4787	41.0621	5003	131.5089	38.0460
	HC	164.4840	41.0645	5003	131.5092	38.0459
	TCT	164.4861	41.0330	5003	131.4908	38.0512
Ombrage irrégulier en ligne	S	817.1662	8.2204	3966	521.5510	7.6043
	SP	163.2031	41.0293	3941	103.6752	38.0173
	BL	162.8792	41.1346	3941	103.6751	38.0173
	HC	162.9126	41.1346	3941	103.6737	38.0178
	TCT	162.3899	41.0985	3941	103.6817	38.0149
Ombrage irrégulier en colonne	S	817.1104	8.2204	3966	521.3105	7.6078
	SP	163.6859	38.5727	4298	131.2571	32.7491
	BL	163.3426	38.6626	4384	132.5110	33.0869
	HC	163.3933	38.4642	4413	132.8474	33.2155
	TCT	163.0486	38.6482	4476	132.5308	33.7617
Ombrage diagonal	S	817.2323	8.2204	4080	564.3192	7.2300
	SP	163.5375	41.0324	3941	103.6903	38.0117
	BL	163.6288	40.2906	4448	132.8005	33.4902
	HC	163.4916	41.1268	4209	136.1488	30.9138
	TCT	163.2136	40.2332	4471	132.3989	33.7705
Ombrage aléatoire	S	809.8184	8.2173	2743	495.7330	5.5340
	SP	161.9183	41.0902	2891	108.6075	25.8646
	BL	161.8464	37.8126	2950	107.8424	27.3548
	HC	161.6788	38.5897	3116	107.7003	28.9327
	TCT	161.9117	34.4804	3492	137.1112	25.4542
Ombrage court et étroit	S	816.5263	8.2206	4172	548.1394	7.6116
	SP	163.6920	41.0981	3702	117.2614	31.5693
	BL	163.6815	41.1319	3782	135.8664	26.3667
	HC	163.6922	41.1321	3730	135.1642	27.5965
	TCT	163.3554	41.0898	3973	138.8380	28.6033
Ombrage court et large	S	809.4493	8.2180	2632	472.8561	5.5773
	SP	163.6839	41.0891	2731	137.3142	19.8898
	BL	163.3760	41.1221	2825	138.4424	20.4024
	HC	163.3858	41.1205	2820	138.0708	20.4272
	TCT	162.3768	41.0863	2872	139.9621	20.5174
Ombrage long et étroit	S	811.7416	8.2188	2969	532.2920	5.5773
	SP	163.6917	36.1706	3623	132.1041	27.4304
	BL	163.2171	36.1910	3722	133.7545	27.8269
	HC	163.2811	36.1658	3708	134.0582	27.6584
	TCT	162.5853	36.1536	3853	134.7293	28.5817
Ombrage long et large	S	803.7416	8.2126	2125	536.0207	3.9639
	SP	163.6784	34.5159	2696	135.1430	19.9520
	BL	162.6152	34.5399	2719	135.3949	20.0840
	HC	162.7190	34.5102	2748	135.7662	20.2431
	TCT	161.3513	34.5104	2764	136.3210	20.2749

Tableau III. 2 Résultats numériques de la simulation des différentes configurations du GPV sous différents scénario d'ombrage partiel.

- On remarque que dans les conditions de test standard « STC » (1000 w/m²; 25 C°) :

-la courbe P-V présente une forme de cloche renversée avec un seul point maximal de valeur 5003 W pour les différentes configurations (S, SP, BL, HC, TCT).

-on remarque que la tension et le courant (131.5 V, 38.05 A) correspondants au PPMG sont être les mêmes pour configurations (SP, BL, HC, TCT) alors que ceux de la configuration S, ces valeurs sont différentes (657.54 V, 7.6 A).

-on constate aussi que les valeurs de la tension Voc (164.5 V) et le courant Icc (41.1 A) sont presque identiques pour les configurations (SP, BL, HC, TCT) alors que celles de la configuration S, ces valeurs sont différentes (822.05 V, 8.23 A).

- On remarque que dans les conditions d'ombrage partiel :

-les courbes P-V et I-V sont déformées et mettent plusieurs points de puissance maximale avec un seul point maximale globale PPMG et plusieurs points de puissance maximale locale PPMLs, ces points maximaux varient selon le type d'ombrage et selon le type de la configuration, par exemple :

-pour la configuration SP dans le cas de l'ombrage court-large le PPMG est caractérisée par (2731 W, 137.31 V, 19.89 A) et les PPMLs sont caractérisées successivement (2466 W, 82.09 V, 30.03 A) ET (1910 W, 50.43 V, 37.88 A).

-pour le même ombrage court-large et pour la configuration TCT le PPMG est caractérisée par (2872 W, 139.96 V, 20.51 A), et PPMLs sont caractérisées successivement par (2417 W, 80.62 V, 29.98 A) et (1879 W, 49.85 V, 37.69 A).

III.5.4. Simulation de l'association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC(Boost)- source de tension continue constante sous ombrage partiel

Dans cette partie, on a simulé l'association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC (Boost) source de tension continue constante) sous l'ombrage aléatoire adopté en appliquant une commande par balayage à pas constant au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique. L'hacheur Boost est modélisé en tension comme suit :

$$V_s = V_{dc\text{-charge}} = \frac{1}{1-D} V_e = \frac{1}{1-D} V_{pv} \quad (\text{III.1})$$

Avec

$V_{dc\text{-charge}}$ est la tension aux bornes de la charge à la sortie de l'hacheur (V_s).

V_{pv} est la tension aux bornes du GPV à l'entrée de l'hacheur (V_e).

D est le rapport cyclique pour la commande de l'hacheur Boost.

L'hacheur Boost a deux rôles :

- Assure une tension de sortie ($V_s = V_{dc-charge}$) plus élevée à partir d'une tension d'entrée moins élevée ($V_e = V_{pv}$) (élévation de tension),
- Permet le contrôle et la variation de la tension d'entrée ($V_e = V_{pv}$) à partir d'une tension de sortie relativement constante ou qui subit des variations très lente ($V_s = V_{dc-charge}$) pour permettre la maximisation de la puissance extraite du GPV. La variation de la tension d'entrée se fait comme suit :

Selon l'équation suivante :

$$V_{pv} = V_e = (1 - D)V_s = (1 - D)V_{dc-charge} \quad (III.2)$$

Pour

($V_{dc-charge} = \text{Constante}$) : Si (D augmente) \rightarrow (V_{pv} diminue)

Si (D diminue) \rightarrow (V_{pv} augmente)

L'association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC (Boost) source de tension continue constante) sous l'ombrage aléatoire adopté en appliquant une commande par balayage est illustrée dans la figure suivante :

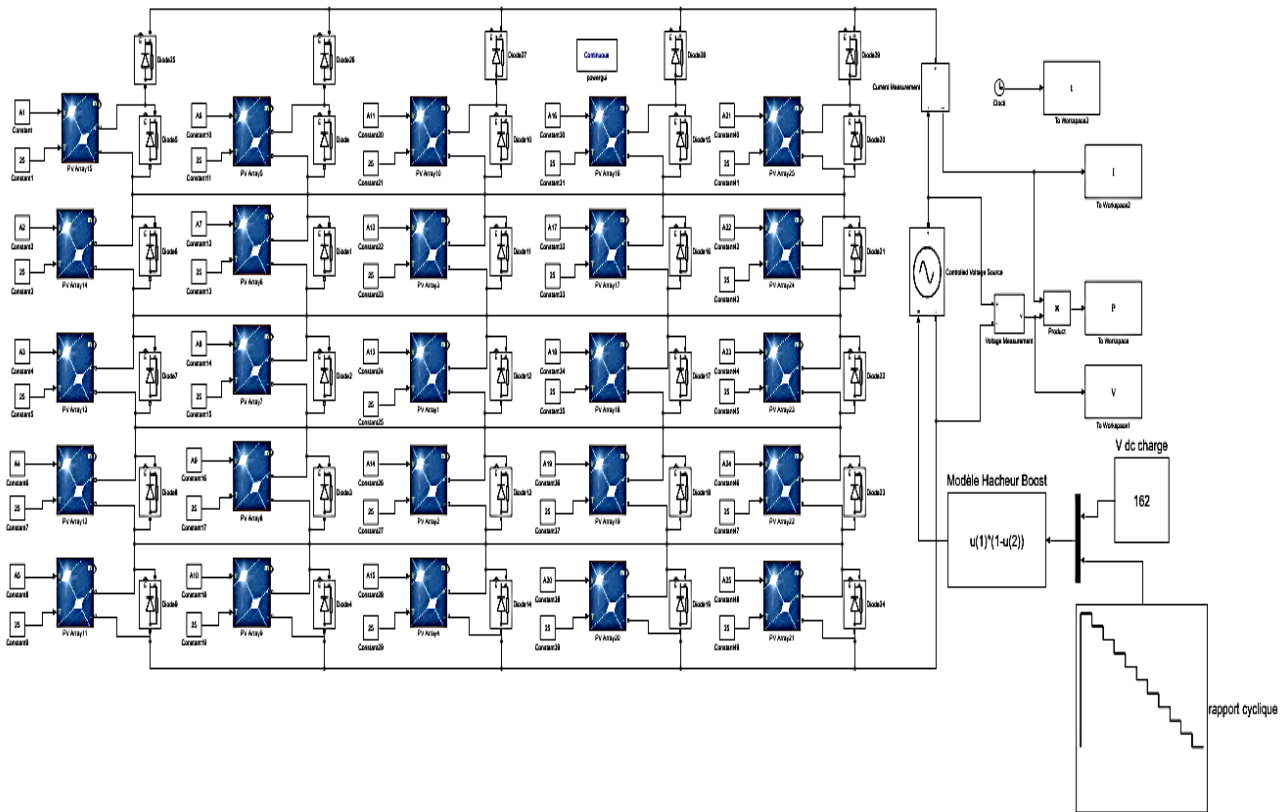


Figure III. 28 Association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC (Boost) source de tension continue constante)

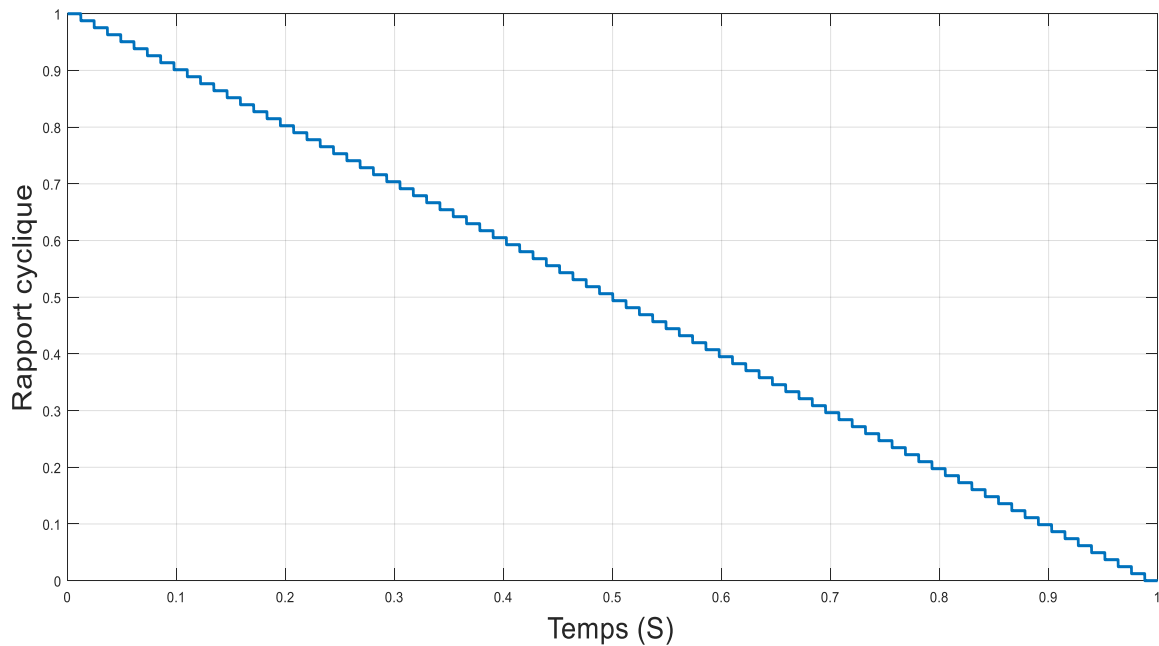


Figure III. 29 Rapport cyclique appliqué à l'association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.

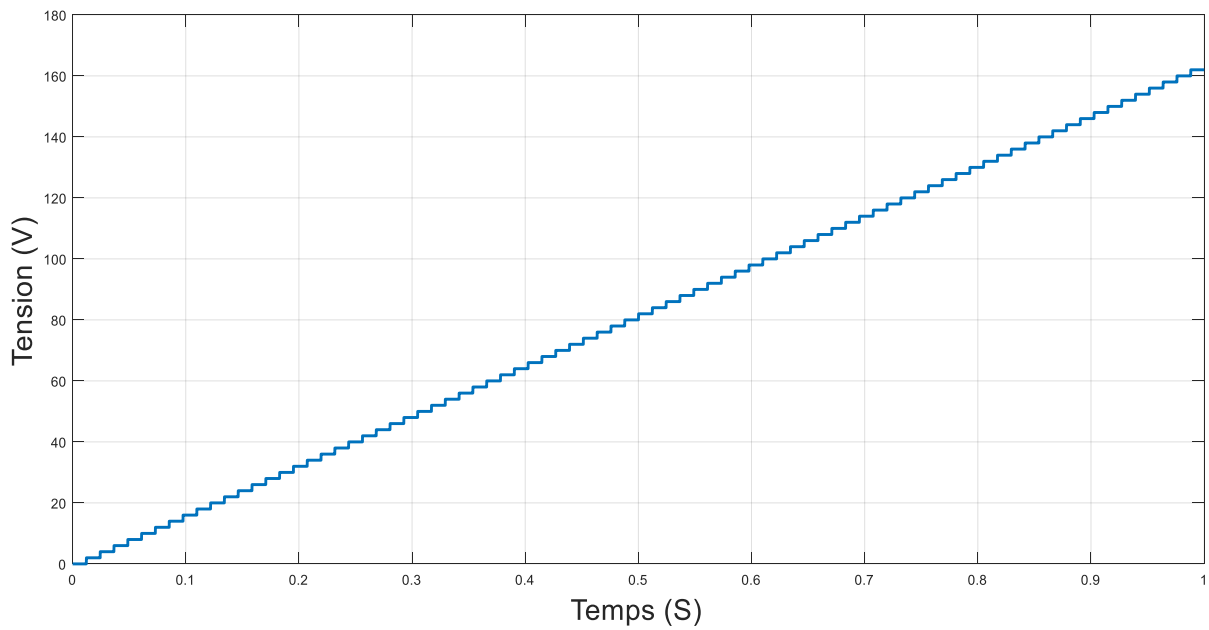


Figure III. 30 Tension du GPV avec association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.

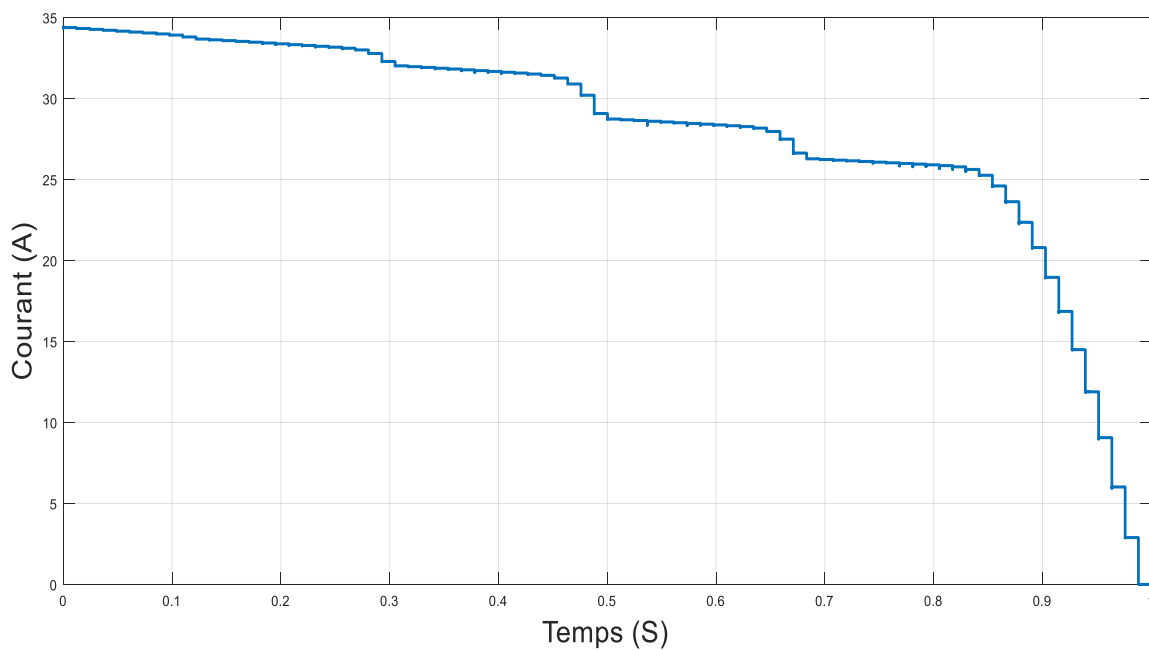


Figure III. 31 Courant du GPV avec association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.

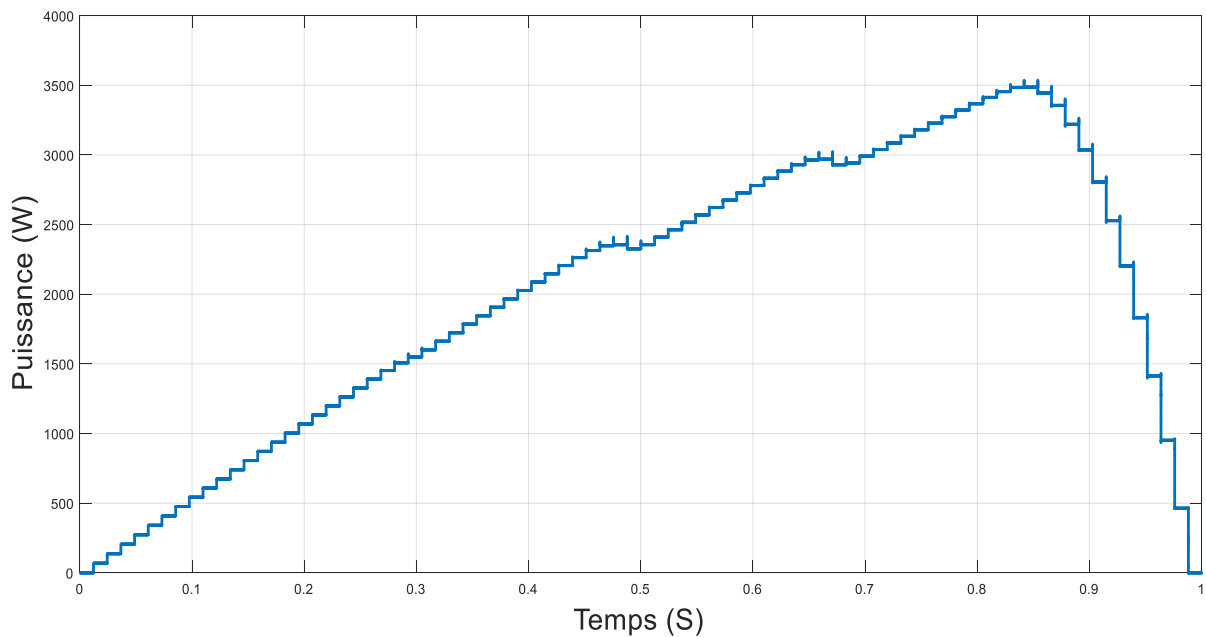


Figure III. 32 Puissance du GPV avec association (GPV-convertisseur DC-DC- source de tension continue constante) contrôlée par balayage au sens décroissant de la totalité de l'intervalle du rapport cyclique.

On remarque qu'en appliquant un rapport cycle décroissant sous forme de palier à pas constant (pas de 0.0124) et pendant une période de temps constante (0.0122 seconds) pour chaque valeur du rapport cyclique (Figure III.29), la tension du GPV prend une forme croissante sous forme de paliers à pas constant (Figure III.30) avec un pic en régime transitoire . Le courant et la puissance du GPV présentent respectivement des courbes (I-t) et (P-t) similaires aux caractéristiques (I-V) (P-V) du GPV (Figure III. 31 et Figure III. 32). On constate que la puissance maximale atteint une valeur de 3486 W ce qui est très proche de la valeur du point de puissance maximale correspondant à cette configuration et à ce type d'ombrage (3492 W dans le tableau III.2). Cela indique que la configuration TCT du GPV associée à un convertisseur DC-DC commandé en MPPT permet d'atteindre parfaitement la puissance du point maximal de sa caractéristique P-V. Le rapport cyclique correspondant est d'environ 0.148.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons constaté que la puissance maximale de GPV était significativement réduite sous l'influence de l'ombrage partiel par rapport à les conditions standard STC. Nous avons également constaté que l'ombrage partiel provoque des déformations dans les caractéristiques P-V, qui

sont reflétées sur les courbes par l'apparence de plusieurs points locaux de puissance maximale (PPML) et un point de puissance maximale globale (PPMG), ce qui complique le mécanisme de recherche de points de puissance maximale pour certaines techniques MPPT.

Les résultats de simulation obtenus des différentes configurations sous l'effet de plusieurs scénarios d'ombrage partiel montrent que la configuration TCT est la plus performante dans la majorité des scénarios d'ombrage. Elle a fourni le maximum de puissances par rapport aux autres configurations. Conformément aux résultats de classement obtenus par ordre décroissant on peut sélectionner les trois meilleures configurations TCT, HC et BL grâce à leurs efficacités dans la plupart des scénarios d'ombrage.

Pour mettre en test les performances de la configuration TCT, on a simulé l'association (GPV(TCT)-convertisseur DC-DC (Boost) source de tension continue constante) sous l'ombrage aléatoire adopté en appliquant une commande par balayage. Les résultats de simulation ont montré que la configuration TCT du GPV associée à un convertisseur DC-DC commandé en MPPT permet d'atteindre parfaitement la puissance du point maximal de sa caractéristique P-V.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Malgré le développement technologique dans le domaine des matériaux semi-conducteurs, le rendement énergétique des générateurs photovoltaïques reste toujours faible. En plus l'efficacité énergétique des GPV varie en fonction des conditions climatiques variables et imprédictibles (température et ensoleillement). Lorsque ces conditions climatiques varient d'une manière non-uniforme (température et notamment ensoleillement) vue par les différents composants (modules, panneaux) d'un GPV, les caractéristiques électriques (P-V) présentent des formes spécifiques (plusieurs points maximums de puissance avec un seul point maximal global) qui compliquent l'optimisation et l'exploitation maximale des générateurs PV. Cela peut dégrader en plus leur rendement énergétique s'ils sont exploités pour fonctionner à l'un point de puissance maximal local. En effet, plusieurs approches de maximisation (approches commandes MPPT) sont adoptées pour maximiser la puissance extraite d'un GPV lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques uniforme et non uniforme. Dans le cadre de l'optimisation, on a adopté une autre approche concernant l'optimisation de la configuration du GPV, en étudiant l'effet des conditions climatiques non-uniforme (ombrage partiel de différents types) sur les caractéristiques (P-V) des GPV de différentes configurations.

Les résultats de simulation obtenus ont montré que la configuration TCT est la plus performante en offrant le maximum de puissance par rapport aux autres configurations (S, SP, BL, HC).

Espérant que ce travail soit une porte ouverte pour d'autres travaux dans ce contexte d'optimisation des systèmes PV, on propose en perspectives :

- Etude d'autres types d'ombrage partiel sur les caractéristiques électriques du générateur PV ;
- Etude de l'effet de la température non-uniforme sur les caractéristiques électriques du générateur PV ;
- Etude des configurations variables du GPV pour maximisation de sa puissance maximale lorsqu'il est soumis à un ombrage partiel ;
- L'utilisation de la configuration TCT dans les différentes applications des systèmes photovoltaïques (systèmes PV autonome (pompage photovoltaïque), systèmes PV couplé au réseau, ... etc.).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] M. G. Simoes and N. N. Franceschetti, “Fuzzy optimisation-based control of a solar array system,” *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 146, no. 5, pp. 552–558, 1999.
- [2] Y. Mahmoud and E. F. El-Saadany, “Enhanced reconfiguration method for reducing mismatch losses in PV systems,” *IEEE J Photovolt*, vol. 7, no. 6, pp. 1746–1754, 2017.
- [3] G. Spagnuolo, G. Petrone, B. Lehman, C. A. R. Paja, Y. Zhao, and M. L. O. Gutierrez, “Control of photovoltaic arrays: Dynamical reconfiguration for fighting mismatched conditions and meeting load requests,” *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 62–76, 2015.
- [4] Klaus-Dieter Jäger, Olindo Isabella, Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. van Swaaij, and Miro Zeman, *Solar energy : fundamentals, technology and systems*. Cambridge: UIT Cambridge, Cambridge, 2016.
- [5] C. Deline, B. Marion, J. Granata, and S. Gonzalez, “Performance and economic analysis of distributed power electronics in photovoltaic systems,” National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2011.
- [6] Arjav Harjai, Abhishek Bhardwaj, and Mrutyunjaya Sandhibigraha, “Study of maximum power point tracking (MPPT) techniques in a solar photovoltaic array,” National Institute of Technology Rourkela-769008, Orissa.
- [7] S. Hegedus and A. Luque, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [8] BENTATA.K, “Contribution à l’amélioration des performances d’un système de pompage photovoltaïque,” Thèse de Doctorat, Université AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA, 2022.
- [9] J. Royer, and E. J. Schiller, *Le pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens*. Institut de l’énergie des pays ayant en commun l’usage du français.
- [10] Tarak Benslimane, “Systèmes de conversion de l’énergie Photovoltaïque,” *Cour de master en Energies Renouvelables en Electrotechnique*. Université de M’sila, 2020.
- [11] M. Hussain, “Improved estimation of solar irradiation from sunshine duration using meteorological constraints,” in *Energy Developments: New Forms, Renewables, Conservation*,

- F. A. Curtis, Ed., Pergamon, 1984, pp. 393–396. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025407-4.50073-9>.
- [12] M. L. de Schoulepnikoff and Gymnase Auguste Piccard, “Quelle source d’énergie pour les vingt prochaines années? ,” *Travail de maturité Alexandra Catana*, 3M7, 2009.
- [13] T. N. E.-G. Slimane, “Modélisation et Simulation d’un Système Photovoltaïque,” Thèse de Doctorat, Université Echahid Hama Lakhder d’El-Oued, El-Oued, 2015.
- [14] Liu, C., B. Wu, and R. Cheung. "Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems." *Canadian Solar Buildings Conference, Montreal*. Vol. 8. No. 2004.
- [15] Y.-H. Ji, D.-Y. Jung, J.-G. Kim, J.-H. Kim, T.-W. Lee, and C.-Y. Won, “A Real Maximum Power Point Tracking Method for Mismatching Compensation in PV Array Under Partially Shaded Conditions,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, no. 4, pp. 1001–1009, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2089537.
- [16] M. Miyatake, M. Veerachary, F. Toriumi, N. Fujii, and H. Ko, “Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: A PSO approach,” *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 47, no. 1, pp. 367–380, 2011.
- [17] Dwivedi, Aniket, Ajay Bari, and Gaurav Dwivedi, “Scope and Application of Solar Thermal Energy in India,” *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 315–322, 2013.
- [18] King, D. L., Kratochvil, J. A., & Boyson, W. E. (2004). *Photovoltaic array performance model* (Vol. 8, pp. 1-19). United States. Department of Energy.
- [19] Hamza BENNACER, “Matériaux photovoltaïques,” *Cour de master en Energies Renouvelables en Electrotechnique*. Université de M’sila, 2022.
- [20] Sushen Narkhede and Rajpritam, “Modeling of Photovoltaic Array,” Thèse de doctorat, National Institute of Technology Rourkela-769008, Orissa, Orissa.
- [21] MISHRA, Bibek et KAR, Bibhu Prasanna. *Matlab based modeling of photovoltaic array characteristics*. 2012. Thèse de doctorat.
- [22] Dino Green, “Advantages and disadvantages of Solar Photovoltaic – Quick Pros and Cons of Solar PV,” <https://www.renewableenergyworld.com/ugc/blogs/2012/12/advantages-and-disadvantages-of-solar-photovoltaic-quick-pros-and-cons-of-solar-pv.html>.

- [23] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Colak, “Neural network based solar cell model,” *Energy Convers Manag*, vol. 47, no. 9–10, pp. 1159–1178, 2006.
- [24] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance,” *Solar energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, 2006.
- [25] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, and A. Masmoudi, “Matlab/simulink based modeling of photovoltaic cell,” *International journal of renewable energy research*, vol. 2, no. 2, pp. 213–218, 2012.
- [26] R. Khezzar, M. Zereg, and A. Khezzar, “Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique IV d’un module photovoltaïque,” *Journal of Renewable Energies*, vol. 13, no. 3, pp. 379–388, 2010.
- [27] K. Ishaque and Z. Salam, “An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE),” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2349–2359, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.025>.
- [28] S. G. Bowden and C. B. Honsberg, “Photovoltaics Education Website,” *Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvc/drom/characterisation/introduction>*, 2019.
- [29] KOLSI, Sami, SAMET, Hekmet, et AMAR, Mohamed Ben. POLYSILICON PHOTOVOLTAIC MODULE USING A 2-DAnalytical AND A TWO-DIODE IV MODEL FOR AN ILLUMINATED SOLAR CELL. *Lebanese Science Journal*, 2010, vol. 11, no 2, p. 87.
- [30] S. J. Yaqoob, A. L. Saleh, S. Motahhir, E. B. Agyekum, A. Nayyar, and B. Qureshi, “Comparative study with practical validation of photovoltaic monocrystalline module for single and double diode models,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 19153, Sep. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-98593-6.
- [31] S. B. Prakash, G. Singh, and S. Singh, “Modeling and Performance Analysis of Simplified Two-Diode Model of Photovoltaic Cells,” in *Frontiers of Physics*, 2021.
- [32] J. W. Bishop, “Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits,” *Solar Cells*, vol. 25, no. 1, pp. 73–89, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90059-2](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90059-2).

- [33] B. J. Restrepo-Cuestas, J. Montano, C. A. Ramos-Paja, L. A. Trejos-Grisales, and M. L. Orozco-Gutierrez, "Parameter Estimation of the Bishop Photovoltaic Model Using a Genetic Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/app12062927.
- [34] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. Aguilera, and J. de La Casa, "Changing photovoltaic array interconnections to reduce mismatch losses: a case study," in *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, IEEE, 2010, pp. 37–40.
- [35] Mohammed Telidjane, "Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic ," Thèse de Doctorat, Université de Jean Monnet Saint-Etienne, LYON , 2017.
- [36] S. A. Afghan, H. Almusawi, and G. Husi, "Simulating the electrical characteristics of a photovoltaic cell based on a single-diode equivalent circuit model," *MATEC Web of Conferences*, vol. 126, p. 3002, Jun. 2017, doi: 10.1051/mateconf/201712603002.
- [37] A. M. Veissid N. and de Andrade, "The I–V Silicon Solar Cell Characteristic Parameters Temperature Dependence. An Experimental Study using the Standard Deviation Method," in *Tenth E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, G. and P. W. and D. S. G. and H. P. Luque A. and Sala, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, pp. 43–47.
- [38] M. Bencherif and N. Brahmi, "Solar cell parameter identification using the three main points of the current–voltage characteristic," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 3064–3084, Dec. 2022, doi: 10.1080/01430750.2020.1789739.
- [39] T. Dittrich, *Materials concepts for solar cells*. World Scientific, 2015.
- [40] M. S. Rasheed and M. A. Sarhan, "Measuring the Solar Cell Parameters Using Fuzzy Set Technique," *Insight - Electronic*, 2019.
- [41] S. J. Patel, A. K. Panchal, and V. Kheraj, "Extraction of solar cell parameters from a single current–voltage characteristic using teaching learning based optimization algorithm," *Appl Energy*, vol. 119, pp. 384–393, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.027>.
- [42] Meier, D. L., and A. G. Milnes. "Enhancement of solar array performance by selective grouping of individual cell parameters." *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.:(United States)* 3.CONF-800604-P3 (1980).

- [43] A. Halal, A. I. Alnahhal, and B. Plesz, “Performance Analysis of Perovskite Solar Cell by Considering Temperature Effect on Physical Parameters of the Absorber Layer,” in *2022 28th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/THERMINIC57263.2022.9950644.
- [44] M. Errouha, A. Derouich, B. Nahid-Mobarakeh, S. Motahhir, and A. El Ghzizal, “Improvement control of photovoltaic based water pumping system without energy storage,” *solar energy*, vol. 190, pp. 319–328, 2019.
- [45] PASTOR, Angel Cid. *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*. 2006. Thèse de doctorat. INSA de Toulouse.
- [46] Sinapis, K., Rooijackers, T. T. H., Tzikas, C., Litjens, G. B. M. A., van den Donker, M., Folkerts, W., ... & Helm, P. (2016). Annual Yield Comparison of Module Level Power Electronics and String Level PV Systems with Standard and Advanced Module Design. *EU PVSEC 2016*, 2011-2015.
- [47] S. Prajapati and E. Fernandez, “Effect of the Positioning of Single and Double Bypass Diodes in a PV String on its Reliability,” in *2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE)*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCECE48148.2020.9223091.
- [48] M. Perný, V. Šály, J. Packa, F. Janíček, J. Kurcz, and L. Valášek, “Investigation of the Effect of Different Shading Scale on the Operating of Photovoltaic Modules Using Numerical Simulations,” in *2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814102.
- [49] Y. Kanesaka, K. Iida, and J. Kondoh, “Analyses of string current and loss in blocking diodes in PV power system,” *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1–4, 2016.
- [50] C. V. Nayar, S. M. Islam, H. Dehbonei, K. Tan, and H. Sharma, “Power Electronics for Renewable Energy Sources,” *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications, Third Edition*, pp. 723–766, Jan. 2010, doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00028-8.
- [51] C. Peike, I. Hädrich, K.-A. Weiß, I. Dürr, and F. Ise, “Overview of PV module encapsulation materials,” *Photovoltaics International*, vol. 19, pp. 85–92, 2013.

- [52] M. Kempe, "Evaluation of encapsulant materials for PV applications," *Photovoltaics International*, vol. 9, no. NREL/JA-520-48926, 2010.
- [53] Y. Hassan *et al.*, "Improvement of Extracted Power of Pole Mounted Solar Panels by Effective Cooling Using Aluminum Heat Sink under Hot Weather and Variable Wind Speed Conditions," *Energies (Basel)*, vol. 13, p. 3159, Jun. 2020, doi: 10.3390/en13123159.
- [54] T. A. Chandel, M. Y. Yasin, and M. A. Mallick, "Impact of Parasitic Resistance on Modelling and Performance of Solar Photovoltaic Module," *2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies, (DICCT)*, pp. 22–27, 2023.
- [55] R. KHEZZAR, "Optimisation de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique," Thèse de doctorat, Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1, 2017.
- [56] Gong, Gui-tian and Chen, Hai-feng. "Study of the Influence of the Diode Ideality Factor on the Si Solar Cell". *Current Trends in Computer Science and Mechanical Automation Vol.2: Selected Papers from CSMA2016*, edited by Shawn X. Wang, Warsaw, Poland: De Gruyter Open Poland, 2022, pp. 598-604. <https://doi.org/10.1515/9783110584998-061>
- [57] Akeyo, Oluwaseun M., "ANALYSIS AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INCORPORATING BATTERY ENERGY STORAGE" (2017). *Theses and Dissertations--Electrical and Computer Engineering*. 107. https://uknowledge.uky.edu/ece_etds/107
- [58] F. Belhachat and C. Larbes, "Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions," *Solar Energy*, vol. 120, pp. 399–418, 2015.
- [59] R. Ramaprabha and B. L. Mathur, "A Comprehensive Review and Analysis of Solar Photovoltaic Array Configurations under Partial Shaded Conditions," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, p. 120214, 2012, doi: 10.1155/2012/120214.
- [60] E. Lorenzo, R. Faranda, and M. Mussetta, "Partial shading in photovoltaic arrays," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 576–586, Apr. 2014.
- [61] F. Meinhardt, G. Morling, and R. W. De Doncker, "Total Shading Losses in PV Systems," *IEEE J Photovolt*, vol. 4, no. 4, pp. 1076–1082, Jul. 2014.
- [62] A. D. Richardson and D. J. Sailor, "Shading Losses in PV Systems: Quantifying the Impact of Module Row Orientation," *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1803–1815, Aug. 2011.

- [63] A. Mellit, “Shading Analysis for PV Systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1412–1426, Feb. 2012.
- [64] Gustav Cruz, “Solar panels and tree shading (why they don’t work together),” <https://climatebiz.com/solar-panels-and-tree-shading/>.

ملخص

أدى الطلب المتزايد باستمرار على الطاقة الكهربائية إلى إنتاج الكهرباء من العديد من مصادر الطاقة المتجددة. من بين مصادر الطاقة المتجددة المختلفة، تعتبر الطاقة الشمسية مصدرًا مهمًا لأنها غير محدودة ومتاحة بسهولة وغير ملوثة. الطاقة الشمسية المولدة من الوحدات الكهروضوئية (PV) تعاني من ظروف التظليل الجزئي (PSC)، مما يقلل بشكل كبير من أداء وكفاءة الطاقة التي يتم الحصول عليها من الوحدة الكهروضوئية. يحدث التظليل الجزئي عندما تتلقى وحدات مختلفة في المصفوفة إشعاعات مختلفة. غالبًا ما ينتج التظليل الجزئي عن ظلال المباني والأشجار والسحب. للتخلص من ظروف التظليل الجزئي وتحسين كفاءة الوحدات الكهروضوئية، يتم استخدام تقنيات تكوين مختلفة على نطاق واسع. حلت هذه الدراسة خمس تكوينات مختلفة، وهي السلسلة (S)، والمتسلسلة المتوازية (SP)، والجسر المرتبط (BL)، ومشط العسل (HC) والربط الكامل (TCT)، تحت سيناريوهات مختلفة من التظليل الجزئي. تُستخدم ألواح KYOCERA-KC200GT لمحاكاة تكوينات 25 لوح للحقل الكهروضوئي في برنامج MATLAB / Simulink.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، التكوين الكهروضوئي، التظليل الجزئي، نقطة الطاقة القصوى، ماتلاب.

Résumé

La demande sans cesse croissante d'énergie électrique a conduit à la production d'électricité à partir de nombreuses sources d'énergie renouvelables. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire est une source importante car elle est infinie, facilement disponible et non polluante. L'énergie solaire générée par les modules photovoltaïques (PV) souffre des conditions d'ombrage partiel (PSC) qui réduisent considérablement les performances et l'efficacité de l'énergie obtenue à partir du module PV. L'ombrage partiel se produit lorsque différents modules du réseau reçoivent des irradiations différentes. L'ombrage partiel est souvent causé par l'ombre des bâtiments, des arbres et des nuages. Pour éliminer les conditions d'ombrage partiel et améliorer l'efficacité des modules photovoltaïques, différentes techniques de configuration sont largement utilisées. Cette étude a analysé cinq configurations différentes, à savoir Série (S), Série-Parallèle (SP), Ponts liés (BL), Nid d'abeilles (HC) et Croisement total lié (TCT), sous différents scénarios d'ombrage partiel. Les modules PV KYOCERA-KC200GT sont utilisés pour la simulation des configurations de champ PV de 25 modules dans le logiciel MATLAB/Simulink.

Mots-clés : Photovoltaïque, configuration PV, ombrage partiel, point de puissance maximale, MATLAB.

Abstract

The ever-increasing demand for electrical energy has led to the production of electricity from numerous renewable energy sources. Among the various renewable energy sources, solar energy is an important one because it is infinite, readily available and non-polluting. Solar energy generated by photovoltaic (PV) modules suffers from partial shading conditions (PSC), which considerably reduce the performance and efficiency of the energy obtained from the PV module. Partial shading occurs when different modules in the array receive different irradiances. Partial shading is often caused by the shadows of buildings, trees and clouds. To eliminate partial shading conditions and improve the efficiency of PV modules, different configuration techniques are widely used. This study analyzed five different configurations, namely Series (S), Series-Parallel (SP), Bridge Linked (BL), Honey-Comb (HC) and Total-Cross-Tied (TCT), under different partial shading scenarios. KYOCERA-KC200GT PV modules are used to simulate PV arrays of 25 modules in MATLAB/Simulink software.

Keywords: Photovoltaics, PV configuration, partial shading, maximum power point, MATLAB.