

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة باجي مختار عنابة
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



Faculté : Sciences de l'ingénierat
Département : Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique industrielle

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé

Etude et comparaison des différentes configurations des panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage partiel

Présenté par :

AHMED BEHALIL Mohcène

BOUAKKA Khayreddine

Devant le jury :

Président :	M. BAHI Taher	Prof	UBMA
Rapporteur :	Mme BENSIALI Nadia	MCA	UBMA
Examineur :	Mme KELAIAIA Samia	MCB	UBMA
Examineur :	Mme ZERZOURI Noura	MCB	UBMA

Année universitaire : 2018/2019

Remerciements :

Nous remercions en premier lieu Dieu de nous avoir donnés la force et la patience pour accomplir ce travail.

Nous voudrions remercier notre encadrant Mme BENSIALI Nadia pour avoir dirigé notre travail, ainsi pour sa disponibilité et sa sympathie.

Nous tenons à remercier Monsieur BAHY Taher pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire, nous sommes aussi très reconnaissants aux membres du jury, Madame KELAIAIA Samia et Madame ZERZOURI Nadia.

Dédicaces

À ceux que je ne pourrais tous nommer ici.

Mohcène

A la mémoire de mon père, à ma mère, ma grand-mère et toute ma famille.

Khayreddine

Table des matières

Chapitre I :

I.1 Introduction	3
I.2 Le Soleil	4
I.3 L'énergie solaire	5
I.4 Le rayonnement solaire.....	6
I.5 Principe de la conversion photovoltaïque	11
I.6 Les semi-conducteurs	12
I.6.1 Introduction.....	12
I.6.2 Formation de la jonction PN.....	13
I.7 La cellule photovoltaïque.....	14
1.7.1 Définition et structure	14
I.7.2 Le principe de fonctionnement.....	15
I.7.3 Type de cellules photovoltaïques.....	16
I.7.3.1 Cellules inorganiques.....	16
I.7.3.1.1 : Cellules de silicium.....	16
a. Les cellules monocristallines.....	16
b. Les cellules poly cristallines.....	16
c. Les cellules amorphes.....	16
I.7.3.1.2 Cellules en couches minces.....	17

I.7.3.2 Cellules organiques.....	17
I.7.3.3 Cellules hybrides.....	17
I.8 Avantages et inconvénients.....	18
I.9 Conclusion.....	19

Chapitre II :

II.1 Introduction	21
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	21
II.2.1 Modèle à une diode.....	21
II.2.2 Modèle à deux diodes	23
II.3 Caractéristiques électriques d'une cellule PV	25
II.3.1 Caractéristique I(V).....	25
Tension de circuit ouvert	25
Courant de court-circuit	26
Le point de fonctionnement optimal/point de puissance maximale	26
Puissance crête et rendement	26
Le rendement	26
Le facteur de forme FF	27
Le facteur de qualité A	27
II.4 Simulation d'une cellule PV	27
II.4 Influence de l'éclairement	29

II.5 Influence de la température	31
II.6 Influence de la résistance série RS	32
II.7 Influence de la résistance parallèle RP	33
II.8 Module photovoltaïque	34
II.9 Panneau photovoltaïque	35
II.10 Associations des cellules en série	36
II.11 Association des cellules en parallèle	37
II.12 Conclusion	39

Chapitre III :

III.1 Introduction.....	40
III.2 Causes de l'ombrage	42
III.3 Effet de l'ombrage.....	42
III.3.1 Ombrage homogène	43
III.3.2 Ombrage non-homogène (partiel)	44
Test 1	44
Test 2	46
Test 3	47
III.4 Hot-spots et diode by-pass.....	49
Test 4	50

Test 5	53
Test 6	55
III.5 Modélisation et présentation des différentes configurations PV	58
III.5.1 Configuration Série Parallèle	59
III.5.2 Configuration Bridge Linked	60
III.5.3 Configuration Honey Comb	62
III.5.4 Configuration Total-Cross-Tied	64
III.5.5 Configuration Su-Do-Ko	65
III.6 Caractéristiques des ombres	68
III.6.1 Effet de l'ombrage Short Narrow (SN)	69
III.6.2 Effet de l'ombrage Short Wide (SW).....	71
III.6.3 Effet de l'ombrage Long Narrow (LN)	73
III.6.4 Effet de l'ombrage Long Wide (LW)	75
III.7 Conclusion	79

Symboles

β^+ : Rayonnement bêta,

ν_e : neutrino,

γ : photon,

C la célérité de la lumière,

λ la longueur d'onde,

h la constante de Planck,

I : Courant fourni par la cellule,

V : Tension aux bornes de la cellule,

I_d : Courant de diode,

I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation,

I_{sh} : Courant dérivé par la résistance parallèle,

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température,

I_{cc} : Courant de court-circuit,

V_{co} : Tension de circuit ouvert,

V_T : Tension thermique,

I_{CCR} : Courant de court-circuit de référence,

R_{sh} : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant,

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts,

G : Irradiation solaire en W/m^2 ,

q : Charge d'électron $1,602 \cdot 10^{-19}$ C,

k : Constante de Boltzmann $1,3854 \cdot 10^{-23}$ J/K,

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique,

T : Température effective de la cellule en kelvin,

K_1 : le coefficient de température

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 1 ,

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 2,

Abréviations

STC : standard test condition

BV : la bande de valence

BC : la bande de conduction

PV : photovoltaïque

Eg : Energie de gap

Pm : Le point de fonctionnement optimal/point de puissance maximale

FF : Le facteur de forme

A : Le facteur de qualité

GPV : Générateur Photovoltaïque

PS : L'ombrage partiel

SP : Série Parallèle

TCT : Totale-Cross-Tied

HC : Honey Comb

BL : Bridge Linked

E : Eclairiments ou irradiation

SN : Shorts Narrow

SW : Short wide

LN : Long Narrow

LW : Large Wide

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du Soleil	4
Tableau I.2 : Caractéristiques du silicium	12
Tableau II.1 : Paramètres de la cellule PV à 25°C et 1000 W/m ²	28
Tableau III.1 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage SN	71
Tableau III.2 : Comparaison des puissances des différentes configurations sous l'ombrage SW	73
Tableau III.3 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage LN	74
Tableau III.4 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage LW	76
Tableau III.5: Puissances maximales et pertes de puissance des différentes configurations	77

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Cycle du carbone (ou cycle de Bethe)	6
Figure I.2 : Types des rayonnements solaires reçus au sol	7
Figure I.3 : Définition de l'Air Mass : $m = 1/\sin(h)$	9
Figure I.4 : Spectre solaire AM 1,5 normalisé	10
Figure I.5: Génération de la paire électron-trou.....	13
Figure I.6 : Structure basique d'une cellule solaire.....	15
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	16
Figure I.8: Types des cellules photovoltaïques	18

Chapitre II :

Figure II.1 : Le modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode	21
Figure II.2 : Le modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes	23
Figure II.3 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV	25
Figure II.4 : Schéma d'une cellule PV sous Simulink	28
Figure II.5.a : Caractéristique I-V d'une cellule PV dans les conditions standards de fonctionnement	28

Figure II.5.b : Caractéristique P-V d'une cellule PV dans les conditions standards de fonctionnement	29
Figure II.6.a : caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairagements	30
Figure II.6.b : caractéristique P-V d'une cellule PV sous différents éclairagements	30
Figure II.7.a : Influence de la température sur la caractéristique I-V	31
Figure II.7.b : Influence de la température sur la caractéristique P-V	31
Figure II.8.a : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V	32
Figure II.8.b : Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V.....	32
Figure II.9.a : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V....	33
Figure II.9.b : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P-V...34	
Figure II.10 : Module photovoltaïque	35
Figure II.11 : Panneau PV	35
Figure II.12 : Schéma de 3 cellules PV en série sous Simulink	36
Figure II.13 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 3 cellules en série.....	36
Figure II.14 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 3 cellules en série.....	37
Figure II.15 : Schéma de 3 cellules PV en parallèle sous Simulink.....	37
Figure II.16 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 3 cellules en parallèle.....	38

Figure II.17 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 3 cellules en parallèle..... 38

Chapitre III :

Figure III.1 : Causes d'ombrage.....42

Figure III.2 : Caractéristique I-V d'un panneau sous différents éclairements..43

Figure III.3 : Caractéristique P-V d'un panneau sous différents éclairements..44

Figure III.4 : Schéma de 3 cellules en série sous différents éclairements sous Simulink.....44

Figure III.5 : Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.....45

Figure III.6 : Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.....45

Figure III.7: Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules dont l'une des cellules est ombrée à 90%.....46

Figure III.8: Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules dont l'une des cellules est ombrée à 90%.....46

Figure III.9 : Schéma de 3 panneaux PV sans by-pass diode sous Simulink 47

Figure III.10 : Caractéristique I-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) sans diode.....47

Figure III.11 : Caractéristique P-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) sans diode.....48

Figure III.12 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule.....	50
Figure III.13: Schéma de 3 cellules en série avec diode by-pass sous différents éclairagements sous Simulink.....	50
Figure III.14 : Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.....	51
Figure III.15 : Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.....	51
Figure III.16 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I-V d'un module PV.....	52
Figure III.17 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique P-V d'un module PV.....	52
Figure III.18 : Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont l'une des cellules est ombrée à 90%.....	53
Figure III.19 : Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont l'une des cellules est ombrée à 90%.....	53
Figure III.20 : Caractéristique I-V de 3 cellules PV en série sous ombrage partiel (1000, 1000, 100 W/m ²) avec et sans diode.....	54
Figure III.21 : Caractéristique P-V de 3 cellules PV en série sous ombrage partiel (1000, 1000, 100 W/m ²) avec et sans diode.....	54
Figure III.22 : Schéma de 3 panneaux PV avec by-pass diode sous Simulink.....	55

Figure III.23: Caractéristique I-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m ²) avec diode.....	55
Figure III.24 : Caractéristique P-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m ²) avec diode.....	56
Figure III.25 : Caractéristique I-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m ²) avec et sans diode.....	56
Figure III.26 : Caractéristique P-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m ²) avec et sans diode.....	57
Figure III.27 : Configuration SP.....	59
Figure III.28 : Configuration SP sous Simulink.....	59
Figure III.29: Caractéristique I-V pour SP	60
Figure III.30 : Caractéristique P-V pour SP.....	60
Figure III.31 : Configuration BL.....	61
Figure III.32 : Configuration BL sous Simulink.....	61
Figure III.33 : Caractéristique I-V pour BL.....	61
Figure III.34 : Caractéristique P-V pour BL.....	62
Figure III.35 : Configuration HC.....	62
Figure III.36 : Configuration HC sous Simulink.....	63
Figure III.37 : Caractéristique I-V pour HC.....	63
Figure III.38 : Caractéristique P-V pour HC.....	63
Figure III.39 : Configuration TCT.....	64

Figure III.40 : Configuration TCT sous Simulink.....	64
Figure III.41 : Caractéristique I-V pour TCT.....	65
Figure III.42 : Caractéristique P-V pour TCT.....	65
Figure III.43 : Configuration Sudoku	66
Figure III.44 : Configuration Sudoku sous Simulink.....	66
Figure III.45 : Caractéristique I-V pour Sudoku.....	67
Figure III.46 : Caractéristique P-V pour Sudoku.....	67
Figure III.47 : Types des scénarios de l’ombrage partiel.....	68
Figure III.48 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l’ombrage partiel SN.....	70
Figure III.49 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l’ombrage partiel SW.....	72
Figure III.50 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l’ombrage partiel LN.....	74
Figure III.51 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l’ombrage partiel LW.....	75
Figure III.52 : Puissances maximale et pertes de puissance des différentes configurations sous ombrage.....	78

Résumé:

Dans ce travail, nous proposons de modéliser et d'analyser les performances de certaines configurations des panneaux photovoltaïques existantes telles que Série-Parallèle (SP), Bridge Link (BL), Honey Comb (HC), Total-Cross-Tied (TCT) et Su-Do-ku. Les simulations sont basées sur le modèle à une diode d'une cellule PV utilisant les outils MATLAB et Simulink.

Les performances des configurations PV ont été comparées à l'aide de la caractéristique P-V et les pertes de puissance de différents modèles d'ombrage partiel. Des simulations sont effectuées sur ces configurations.

Les performances de la configuration Sudoku dépassent les autres configurations PV pour les mêmes modèles d'ombrage.

Abstract:

In this work, we propose to modelize and analyze the performance of some existing solar photovoltaic array configurations such us Series Parallel (SP), Honey Comb (HC), Total-Cross-Tied (TCT) and Sudoku. Simulations are based on one diode model of PV cell using MATLAB and Simulink tools.

The performances of PV configurations have been compared using P-V characteristics and power loss for different partial shading patterns. Comprehensive simulations are carried out on this configuration.

The performances of Su-Do-ku configuration surpass the other PV configurations for the same shading patterns.

Introduction Générale

« Il est un agent puissant, obéissant, rapide, facile, qui se plie à tous les usages et qui règne en maître à mon bord. Tout se fait par lui. Il m'éclaire, il m'échauffe, il est l'âme de mes appareils mécaniques. Cet agent, c'est l'électricité. »

Jules Verne, *Vingt mille lieues sous les mers*

Introduction générale :

Au cours des dernières années, le monde a connu une croissance importante de la demande en énergie dans tous les domaines de la vie, en particulier l'électricité qui provient malheureusement en grande partie des sources d'énergie fossiles, lesquelles ont un impact très nocif sur l'environnement.

La solution repose sur le recours aux énergies renouvelables. Dans cette optique, plusieurs pays ont engagé des investissements immenses et semblent de ce fait sur la bonne voie pour réussir le challenge d'allier production et consommation d'énergie d'un côté et le maintien de l'équilibre environnemental de la planète de l'autre. Le soleil reste dans ce cas, que ce soit de manière directe ou indirecte, la source d'énergie la plus prometteuse.

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement diminuée par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance) pour des conditions météorologiques données par de nombreux facteurs, tels qu'ombrage, mauvais fonctionnement du MPPT, déséquilibres, etc...

Dans ce mémoire, nous nous sommes focalisés sur les effets de l'ombrage sur la production énergétique et les moyens de limiter son impact sur la production d'énergie PV.

- Dans le premier chapitre, nous donnerons une introduction générale sur la production de l'énergie électrique par les cellules photovoltaïques, ainsi que leurs caractéristiques électriques.
- Le deuxième chapitre est dédié au dimensionnement et la modélisation d'une cellule PV, l'impact de l'éclairement, la température et les résistance R_s et

Rp sur cette dernière ainsi l'association des cellules PV en série et en parallèle.

- Le troisième chapitre étudie l'effet de l'ombrage homogène et l'ombrage partiel sur un module PV, quatre scénarios de l'ombrage partiel seront traités et discutés et une comparaison des pertes de puissance des différentes configurations est ensuite présentée.

Ce mémoire sera conclu en effectuant un rappel sur les travaux réalisés et des perspectives seront proposées.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie photovoltaïque

« Not all those who wander are lost. »
J.R.R. Tolkien, The Fellowship of the Ring

I.1 Introduction :

Le soleil est une source d'énergie quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le mot « photovoltaïque » vient du mot grec « photos » signifiant lumière et du mot « Volta » qui est le nom de famille du physicien italien « Alessandro Volta » qui, en 1800, découvrit la pile électrique. C'est « Alexandre Edmond Becquerel » qui découvrit le principe de la conversion de la lumière en électricité en 1839. Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. De là, il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité.

En 1954, les Bell Telephone Laboratories fabriquent la première pille solaire d'un rendement de 6%. Vient alors la conquête spatiale qui, avec ses satellites artificiels, demande de plus en plus d'énergie électrique. En 1959, le premier satellite artificiel équipé de photopiles est lancé. Il s'agit du satellite Vanguard mis en orbite par la NASA [1].

Une cellule photovoltaïque est donc une machine à produire de l'électricité sans mouvement circulaire, sans vapeur d'eau sous pression, sans turbine, sans refroidissement (sauf dans le cas d'un système à concentration). Dès qu'elle est éclairée par de la lumière, elle se met à fonctionner.

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité

qui reste est encore aussi importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 w/m² lorsque l'atmosphère est légèrement polluée.

Les cellules photovoltaïques ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale. Ainsi l'énergie produite est continue donc elle peut être stockée facilement pour être utilisée une autre fois.

Ce premier chapitre est une description générale sur la production de l'énergie électrique par les photopiles.

I.2 Le Soleil :

Sur le plan cosmologique, le soleil est une étoile quelconque (de type spectral G2 V) dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre [2].

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,9891 \times 10^{30}$ kg
Diamètre	1 392 684 km
Masse volumique moyenne	$1\,408 \text{ kg m}^{-3}$
Magnitude absolue	4,74
Magnitude apparente	-26,832
Puissance rayonnée	$3,826 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5 750 K

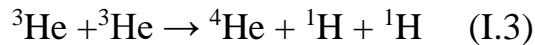
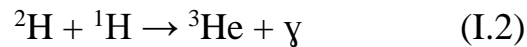
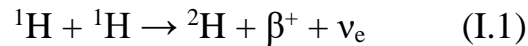
Tableau I.1 : Caractéristiques principales du Soleil

I.3 L'énergie solaire :

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile. Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion :

- Le cycle proton-proton fournit 90% de l'énergie solaire, les réactions nucléaires régissant ce cycle sont données dans 91% des cas, par les équations ci-dessous. La notion ^1H représente le noyau de l'atome d'hydrogène 1, c'est-à-dire un proton.

Il y a émission de β^+ (rayonnement bêta) de neutrinos ν_e et de photons γ (rayonnement électromagnétique).



- Le cycle du carbone (ou cycle de Bethe) fournit les 10% restants. Ce cycle peut être schématisé par le diagramme ci-dessous :

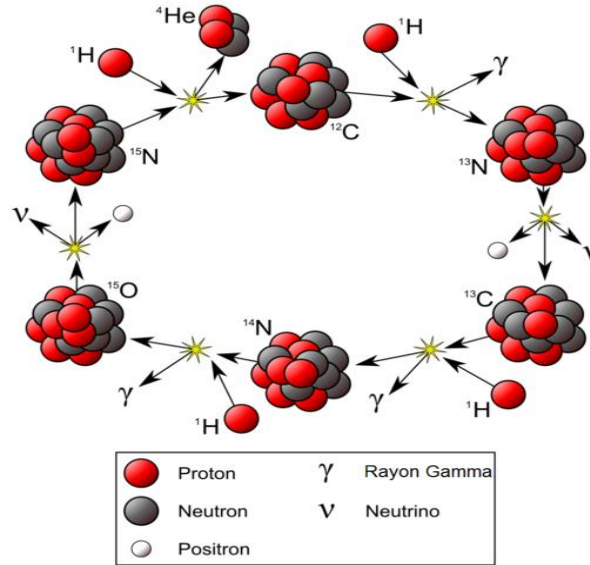


Figure I.1: Cycle du carbone (ou cycle de Bethe)

- On peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en omettant le rayonnement γ) :

$$4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{ } ^4\text{He} + 2 \beta^+ + 2 \nu_e + 26.7 \text{ MeV} \quad (\text{I.4})$$

Quatre protons fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons β^+ , de deux neutrinos ν_e accompagnés d'une énergie égale à 26.7 MeV [3].

I.4 Le rayonnement solaire :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes [4] :

- Le rayonnement direct est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

- Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du Soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du Soleil (composante appelée circum-solaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.
- L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.
- Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure I.2 :

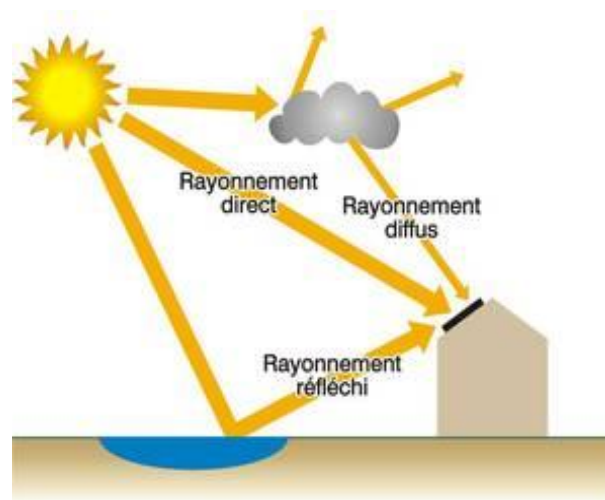


Figure I.2: Types des rayonnements solaires reçus au sol

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s ; les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1 360 W/m² (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil).

Le watt par m² (W/m²) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface. 1 W/m² est aussi égal à 1 Joule par seconde et par m² puisque 1 W = 1 J/s. Ici l'énergie est électromagnétique, mais les unités sont les mêmes que pour une énergie électrique [5].

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1 360 W/m² subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée.

On voit bien sur la figure I.3 que cet angle h détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère et donc les pertes engendrées.

En effet, si l'on fait face au Soleil, on le voit à une certaine hauteur, qu'on appelle hauteur apparente. C'est l'angle h entre le plan horizontal situé sous nos pieds et une droite pointée vers le Soleil.

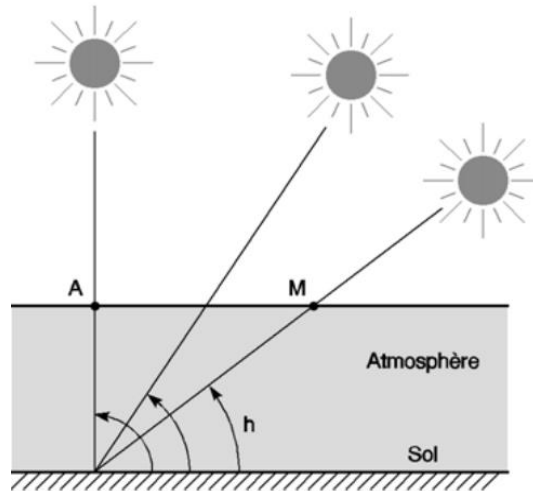


Figure I.3 : Définition de l'Air Mass : $m = 1/\sin(h)$

On appelle m (masse atmosphérique), ou Air Mass, cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure, $m = 1$ si le Soleil entre dans l'atmosphère au point A, et $m = 2$ s'il y entre en M, donc : $m = 1/\sin(h)$

Quant aux conditions normalisées de test des panneaux solaires, elles sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1\,000\text{ W/m}^2$, un spectre solaire AM 1,5 et 25 °C de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions). La figure I.3 montre ce spectre AM 1,5 normalisé : les « trous » que l'on observe correspondent aux absorptions par les gaz de l'atmosphère.

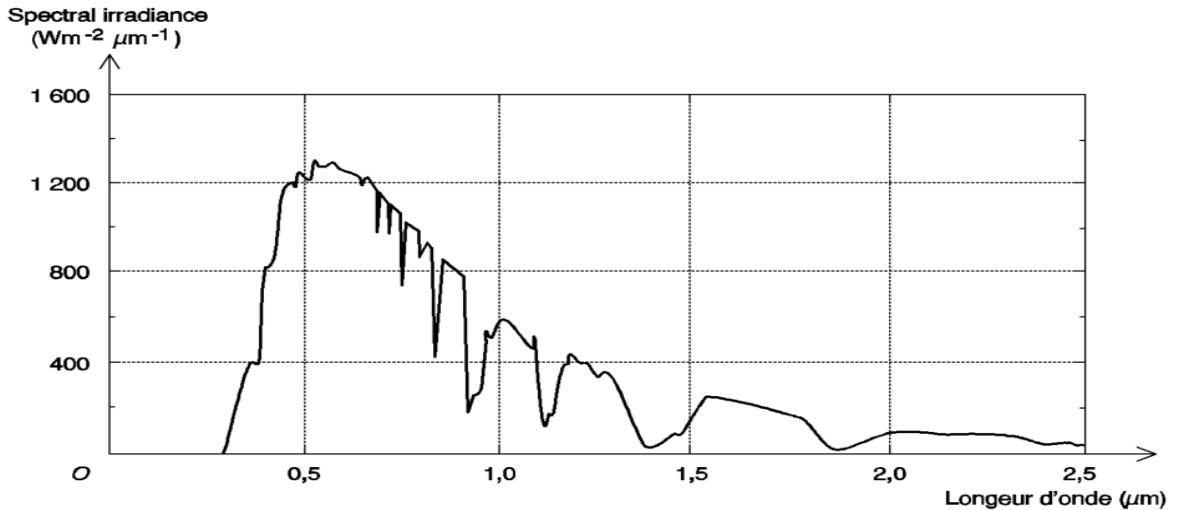


Figure I.4 : Spectre solaire AM 1,5 normalisé

Cela correspond à un ensoleillement assez fort, soleil au Zénith (au plus haut de sa course), ciel parfaitement dégagé (sur la plage à Nice, au printemps).

Remarque sur la norme STC : ce graphe montre bien que cette norme impose des conditions de mesure des panneaux qui ne sont pas du tout réalistes, car l'ensoleillement est presque toujours inférieur à 1 000 W/m². Et l'imperfection de cette norme va plus loin puisque le panneau doit être mesuré également à 25 °C, ce qui est carrément incompatible avec l'ensoleillement élevé de 1 000 W/m² dans la réalité. Sous un tel ensoleillement, le panneau s'échauffe forcément, jusqu'à 40-60 °C et parfois plus (selon la manière dont il est construit, et ventilé).

Malheureusement, c'est bien à 1 000 W/m² et 25 °C que sont comparées les technologies, ce qui déprécie celles qui sont performantes à éclaircissement moyen ou qui sont moins sensibles aux élévations de température. Le silicium en couche mince notamment, toujours mal considéré, est meilleur aux éclaircissements faibles et diffus, et il baisse moins que le cristallin quand la température augmente. Aujourd'hui, il est prouvé qu'en Europe en tout cas, et, semble-t-il, aussi sous climat très chaud, l'énergie totale annuelle produite par des panneaux au silicium

amorphe est supérieure à celle des panneaux au silicium cristallin, pour une même puissance installée. Tout simplement parce que l'ensoleillement est en moyenne bien inférieur à 1 000 W/m² et la température du panneau supérieure à 25 °C.

Lieu géographique, orientation, saison, heure de la journée, etc. jouent directement sur le rayonnement instantané. C'est ce qui déroute bien souvent les utilisateurs pour définir leurs systèmes solaires. L'énergie délivrée par un panneau solaire est hautement variable !

L'éclairement instantané n'est d'ailleurs pas très utile, on se servira plutôt de valeurs globales intégrées sur une journée pour chiffrer l'énergie récupérable.

I.5 Principe de la conversion photovoltaïque :

Le rayonnement émis par le soleil est porteur de photons qui transportent une énergie E_{ph} . Ces photons sont absorbés dans un matériau semi-conducteur, qui va en réponse générer une tension électrique. Cette énergie dépend de trois caractéristiques :

- la célérité de la lumière C ;
- la longueur d'onde λ ;
- la constante de Planck h .

h et C étant des constantes, on peut affirmer que l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnel à sa longueur d'onde. Comme le montre la relation :

$$E_{ph} = h \frac{C}{\lambda} \quad (I.5)$$

Les matériaux semi-conducteurs, en absorbant les photons, produisent des électrons ainsi que des trous, tous deux étant porteur de charge. Le rayonnement solaire doit alors provoquer un déplacement d'électron d'un conducteur à l'autre. Pour que le phénomène opère, une différence de potentiel doit apparaitre aux deux bornes du dispositif. Cela a pour effet de constituer l'équivalent d'une pile. Le matériau devient donc photoconducteur. Il est un dipôle passif puisque, si on applique une tension aux bornes du matériau, le courant va circuler.

I.6 Les semi-conducteurs :

I.6.1 : Introduction :

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. En fait on le trouve surtout sous la forme de dioxyde de silicium (SiO₂) qui est le constituant principal du sable. Il est donc très abondant et peu coûteux.

Quelques-unes de ses propriétés sont données au tableau ci-dessous [6] :

Symbole	Propriété	Valeur
Si	Nombre atomique	14
	Masse atomique	28,086
	Masse volumique	2330 kg/ m ³
	Température de fusion	1683 K
	Température d'ébullition	2628 K

Tableau I.2 : Caractéristiques du Silicium

I.6.2 Formation de la jonction PN :

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure I.5.

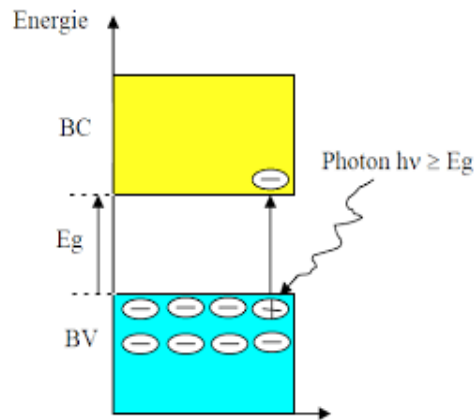


Figure I.5: Génération de la paire électron-trou

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo-générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de silicium de type N et P. Le composant créé ainsi est appelé diode.

I.7 La cellule photovoltaïque :

1.7.1 Définition et structure :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

Une cellule photovoltaïque est composée de :

- **A** Verre
- **B** Revêtement antireflet
- **C** Grille conductrice
- **D** Semi-conducteur dopé N
- **E** Semi-conducteur dopé P
- **F** Conducteur

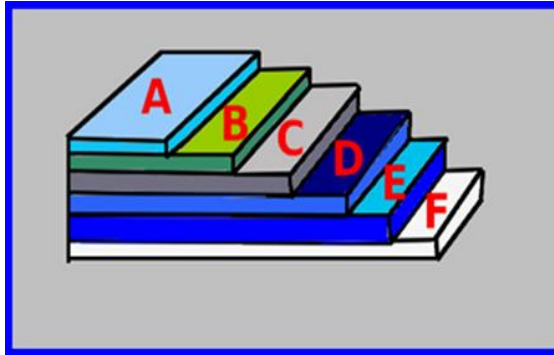


Figure I.6 : Structure basique d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [7].

I.7.2 Le principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est le suivant : les « grains » de lumière qu'on appelle photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal. Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant [8].

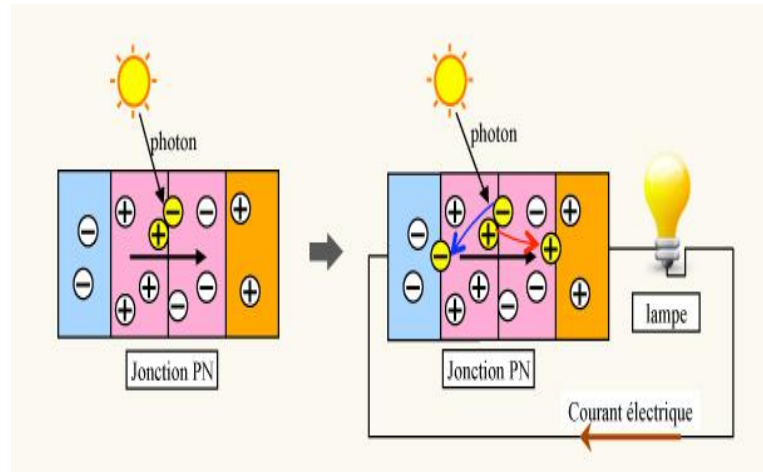


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

I.7.3 Type de cellules photovoltaïques :

I.7.3.1 Cellules inorganiques :

I.7.3.1.1 : Cellules de silicium :

a. Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire)
Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

b. Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important.
Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire).

c. Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

I.7.3.1.2 Cellules en couches minces :

Les matériaux photo actifs les plus utilisés en couches minces sont le silicium amorphe (a-Si), le di sélénium de cuivre indium (SIC), le tellure de cadmium (CdTe). L'avantage principal est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais.

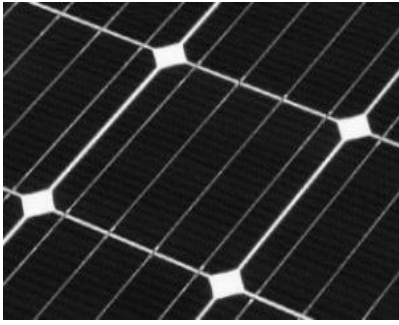
I.7.3.2 Cellules organiques :

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Elles connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion a franchi récemment la barre des 8%.

I.7.3.3 Cellules hybrides :

Elles sont composées d'un semi-conducteur organique et d'un semi-conducteur inorganique comme l'oxyde de titane (TiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO) ou le séléniure de cadmium (CdSe).

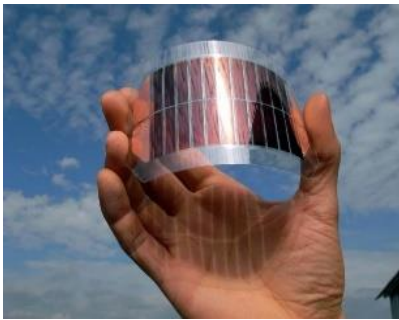
Ces cellules bénéficient des qualités des matériaux organiques comme la souplesse et la facilité de mise en forme et des qualités des matériaux inorganiques comme les mobilités élevées des charges électriques.



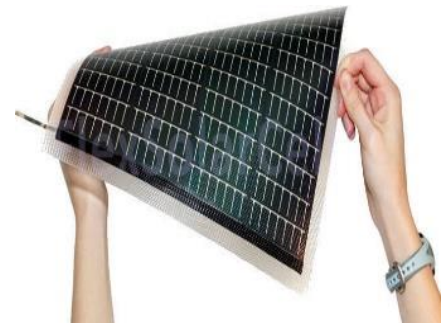
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure I.8: Types des cellules photovoltaïques

- (a) Cellule monocristalline.
- (b) Cellule polycristalline.
- (c) Cellule amorphe.
- (d) Cellule à couches minces.

I.8 Avantages et inconvénients :

Comme avantages on peut citer :

- Absence de pièces mobiles, sources de pannes potentielles.
- Possibilité de moduler très facilement la puissance installée en faisant varier le nombre de panneaux PV interconnectés.
- Coût de fonctionnement négligeable dû en grande partie au premier point signalé plus haut ; il faut simplement prendre soin à maintenir propre la surface des panneaux, l'inclinaison de ceux-ci limitant cette contrainte.
- Absence de pollution : il n'y a aucune émission de gaz à effet de serre, aucun bruit ou risque majeur.
- Energie gratuite et renouvelable.

Les inconvénients sont les suivants :

- Une technologie de fabrication délicate et complexe qui est loin d'être exempte de pollution.
- Sous nos latitudes, l'obligation de prévoir une autre source d'énergie pour pallier à la pénurie lors des périodes peu ensoleillées.
- L'obligation de prévoir des batteries de stockage pour subvenir aux besoins lors des périodes nocturnes.
- Inadaptation de la plupart des appareils électroménagers qui sont prévus pour fonctionner en courant alternatif et donc obligation de prévoir un onduleur [9].

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, ainsi que les types des cellules photovoltaïques existantes, ensuite on a fini par les avantages et les inconvénients de cette énergie.

Chapitre II

Dimensionnement et modélisation d'une cellule photovoltaïque

« Le soleil ne se lève que pour celui qui va à sa rencontre. »

Henri Le Saux

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement et les différents modèles d'une cellule PV, l'association de plusieurs cellules en série et en parallèle, ainsi l'influence de la température, l'irradiation, la résistance série et la résistance shunt sur les différentes caractéristiques.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Le modèle à une diode est le plus répandu pour représenter une cellule PV grâce à sa simplicité et sa précision [10]. L'évolution de ce modèle a conduit à des modèles plus précis, tels que le modèle à deux diodes [11].

II.2.1 Modèle à une diode :

Une cellule photovoltaïque peut être assimilée au circuit électrique équivalent :

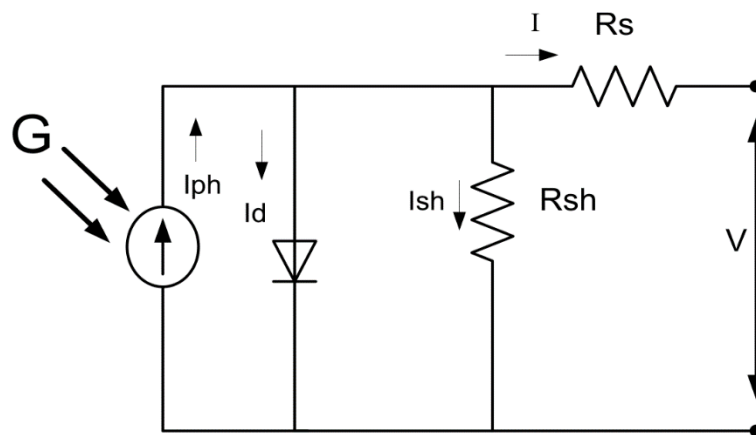


Figure II.1 : Le modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode

$$\text{En notant que :} \quad I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec} \quad I_d = I_0 \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_s}{V_T} \quad (\text{II.3})$$

$$I_0 = I_{cc} / \left[e^{\left(\frac{V_{co}}{nV_T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

$$I_{cc} = I_{CCR} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (\text{II.5})$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.6})$$

Où :

I : Courant fourni par la cellule,

V : Tension aux bornes de la cellule,

I_d : Courant de diode,

I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation,

I_{sh} : Courant dérivé par la résistance parallèle,

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température,

I_{cc} : Courant de court-circuit,

V_{co} : Tension de circuit ouvert,

V_T : Tension thermique,

I_{CCR} : Courant de court-circuit de référence,

R_{sh} : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant,

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts,

G : Irradiation solaire en W/m^2 ,

q : Charge d'électron $1,602.10^{-9}$ C,

k : Constante de Boltzmann $1,3854.10^{-23}$ J/K,

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique,

T : Température effective de la cellule en kelvin,

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nVT} \right)} - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

La résistance parallèle (R_p) est très grande par rapport à la résistance série (R_s), son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger.

II.2.2 Modèle à deux diodes :

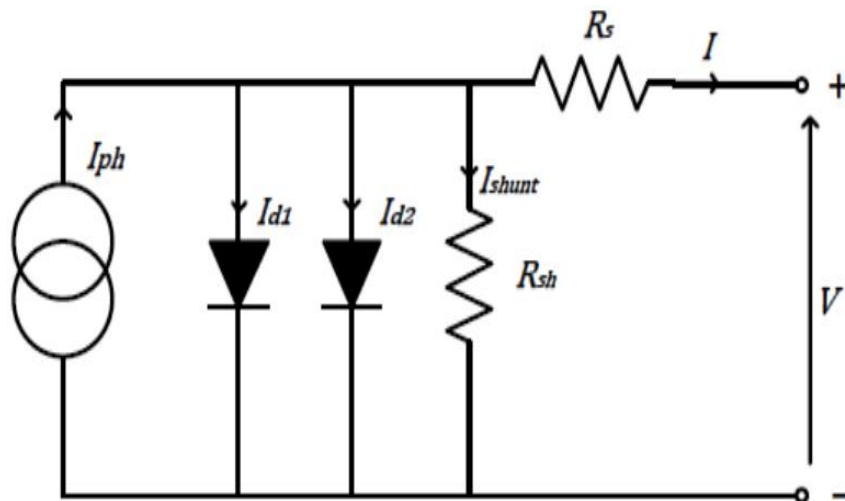


Figure II.2 : Le modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

La caractéristique courant-tension est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\left(e^{\frac{q(V+(I.Rs))}{n_1VT_1}} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\left(e^{\frac{q(V+(I.Rs))}{n_2VT_2}} \right) - 1 \right] - \frac{V+(I.Rs)}{R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

Où l'expression mathématique du courant I_{ph} , le photo-courant, est la suivante :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_1 (T - T_{ref})) \cdot \frac{G}{1000} \quad (\text{II.9})$$

K_1 : le coefficient de température de I_{cc} en (%/°C), donnée par la fiche technique du constructeur.

T_{ref} : la température de référence, donnée par la fiche technique du constructeur (mesurée sous un ensoleillement de 1Kw/m²), en Kelvin (°K), généralement 298°K (25°C).

Et $I_{s1,2}$ sont respectivement les courants de saturation de la diode 1 et la diode 2 et leur expression est comme suit :

$$I_{d1,2} = I_{rs1,2} \left(\left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 * \left(e^{\frac{qE_g}{n_{1,2}k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \right) \right) \quad (\text{II.10})$$

E_g : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV)

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 1 ,

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 2 ,

Et $I_{rs1,2}$ sont les courants inverses de saturation :

$$I_{rs1,2} = \frac{I_{sc}}{e^{K.Ns.T_{ref}.n_{1,2}}} \quad (\text{II.11})$$

II.3 Caractéristiques électriques d'une cellule PV :

II.3.1 Caractéristique I(V) :

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

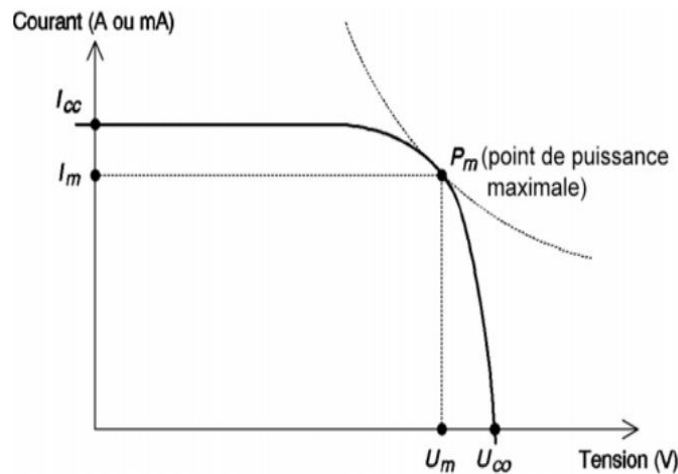


Figure II.3: Caractéristique courant-tension d'une cellule PV

A partir de la caractéristique sous éclairage de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule :

- **U_{co} : Tension de circuit ouvert :**

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert U_{co} ou tension à vide.

Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement), (obtenue pour $I=0$).

- **I_{cc} : Courant de court-circuit :**

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photo-générateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre. On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit. (Obtenu pour $V=0$).

- **P_m : Le point de fonctionnement optimal/point de puissance maximale :**

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P = UI$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m . On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point $P_m = U_m \cdot I_m$.

- **Puissance crête et rendement :**

La puissance maximale est fonction de l'éclairement. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m², 25 °C, spectre solaire AM 1,5, on parle alors de watts-crête (W_c) ou de puissance-crête.

- **Le rendement :**

Le rendement d'un photogénérateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photogénérateur.

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad (\text{II.12})$$

Ou S est la surface du photogénérateur.

- On peut calculer ce rendement pour différents éclairagements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc avec la puissance crête :

$$\eta = \frac{P_c}{1000.S} \quad (\text{II.13})$$

Exemple de calcul :

Prenons un panneau en silicium polycristallin de 40 Wc (2,35 A/17 V) d'une surface de 360 cm² :

$$\eta = \frac{40}{1000.0.36} = \frac{2.35 \times 1.7}{0,36 \times 1000} = 0,11$$

Ce panneau a un rendement (surface totale) de 11 % sous 1 000 W/m². Rappelons que ce rendement est indicatif et ne permet pas de rendre compte des performances du panneau par temps couvert [12]

- Le facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{II.14})$$

- **Le facteur de qualité A** : est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace (compris entre 1 et 2)

II.4 Simulation d'une cellule PV :

Pour la simulation, nous avons utilisé le Matlab et les outils du Simulink.

Les paramètres de la cellule PV sont donnés par le tableau suivant :

Isc	7.34 A
Vco	0.6 V
Facteur de qualité A	1.5
Rs	0 Ohm

Tableau II.1 : Paramètres de la cellule PV à 25°C et 1000 W/m²

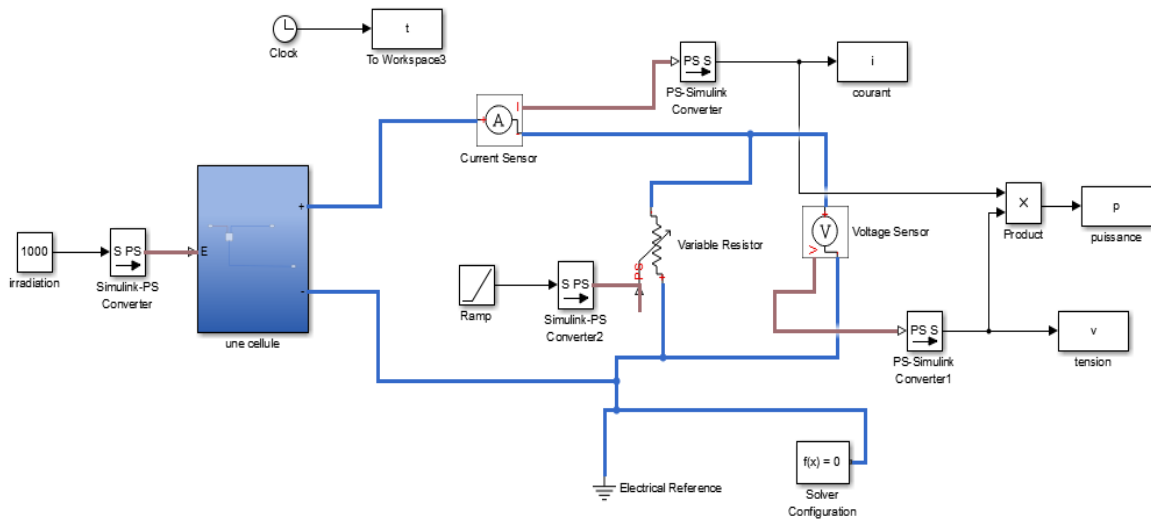


Figure II.4 : Schéma d'une cellule PV sous Simulink

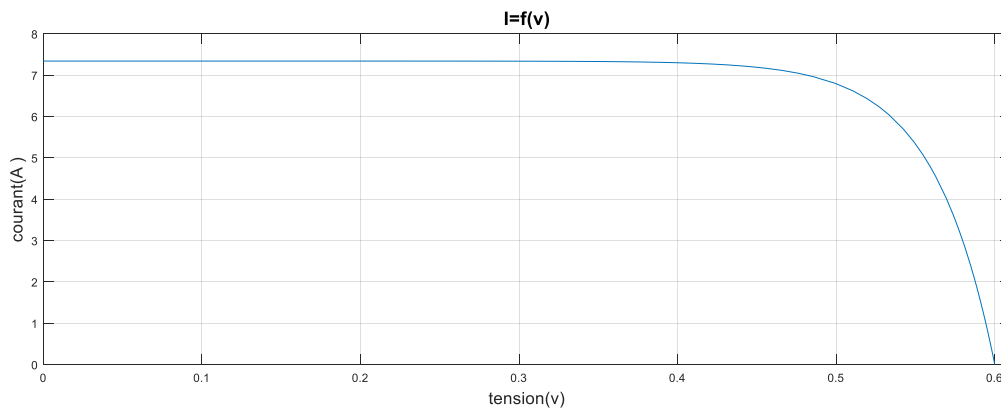


Figure II.5.a : Caractéristique I-V d'une cellule PV dans les conditions standards de fonctionnement

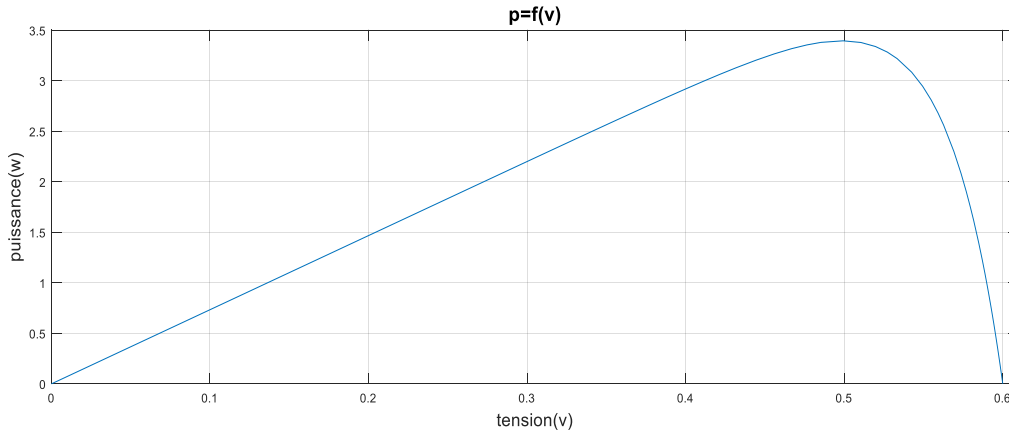


Figure II.5.b : Caractéristique P-V d'une cellule PV dans les conditions standards de fonctionnement

II.4 Influence de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 400 W/m^2 et 1000 W/m^2 avec un pas de 200 W/m^2 , les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ sont respectivement données sur les figures II.6 (a, b).

A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement ; car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [13]

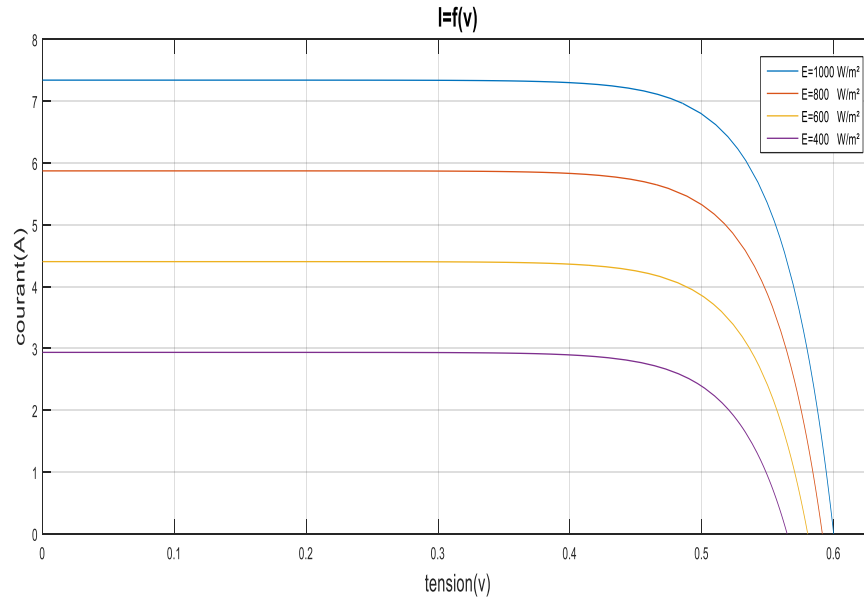


Figure II.6.a : caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairagements

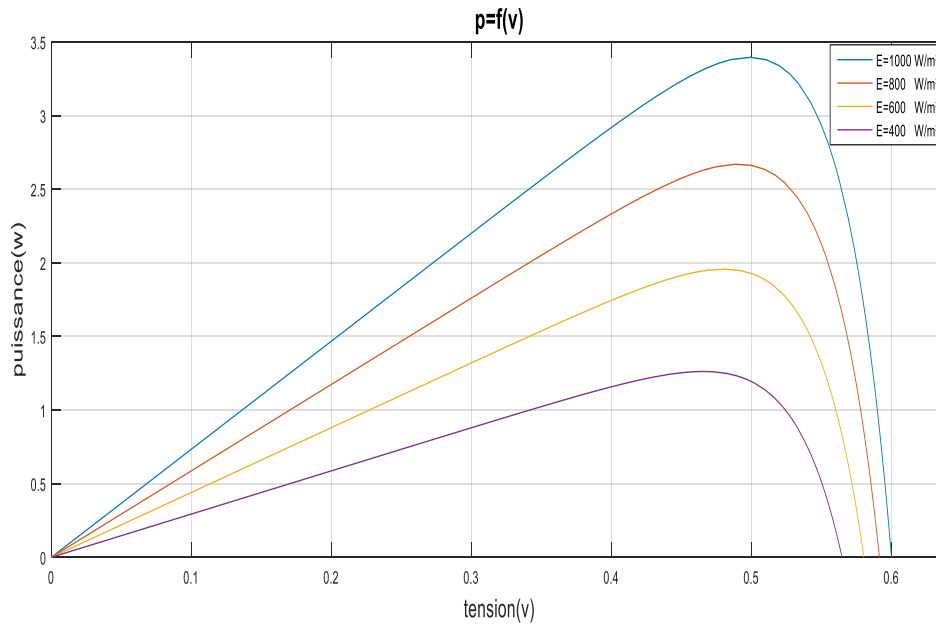


Figure II.6.b : caractéristique P-V d'une cellule PV sous différents éclairagements

II.5 Influence de la température :

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. La figure II.7 (a, b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de 1000W/m^2 et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit I_{sc} reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert V_{oc} diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

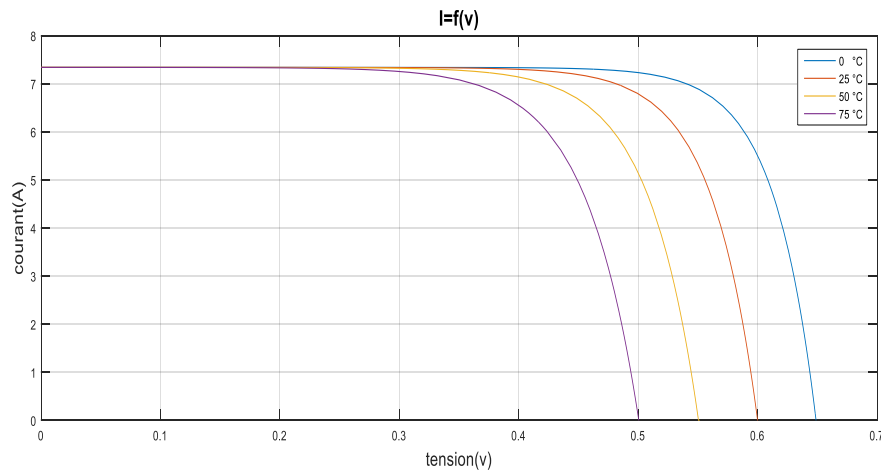


Figure II.7.a : Influence de la température sur la caractéristique I-V

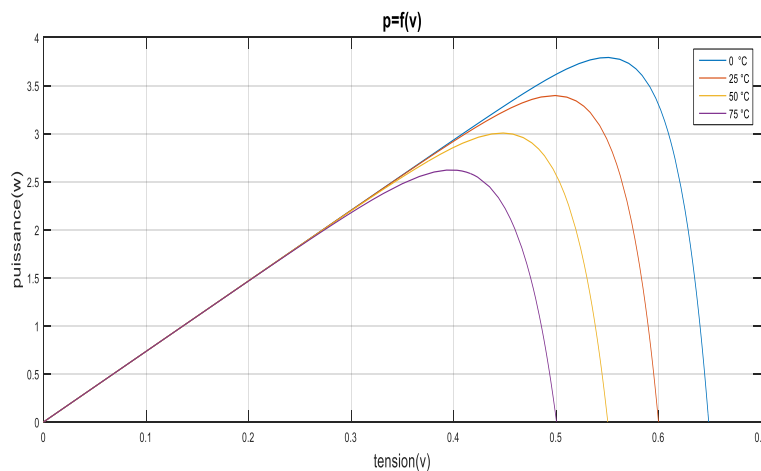


Figure II.7.b: Influence de la température sur la caractéristique P-V

II.6 Influence de la résistance série R_S :

La résistance série est une résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. Les courbes $I(V)$, $P(V)$ sont respectivement illustrées dans la figure II.8 (a, b)

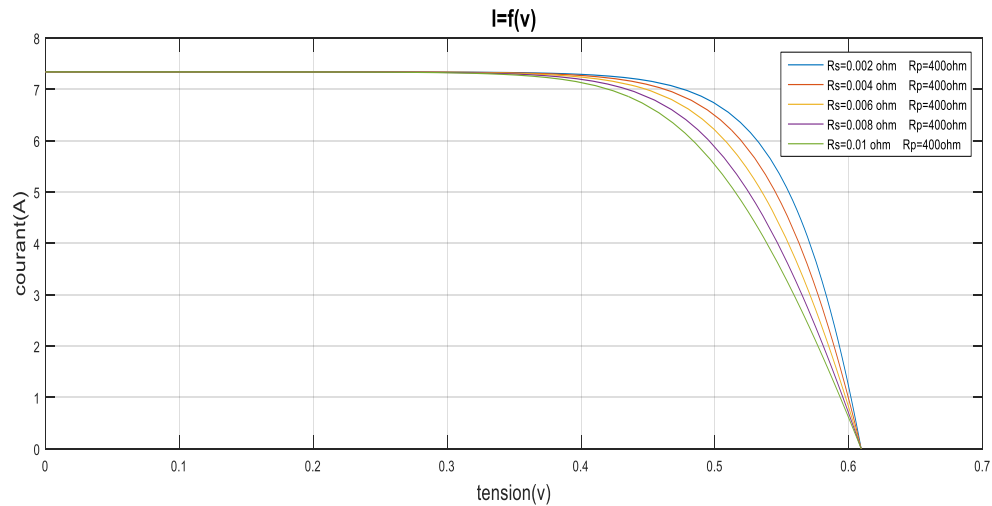


Figure II.8.a : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V

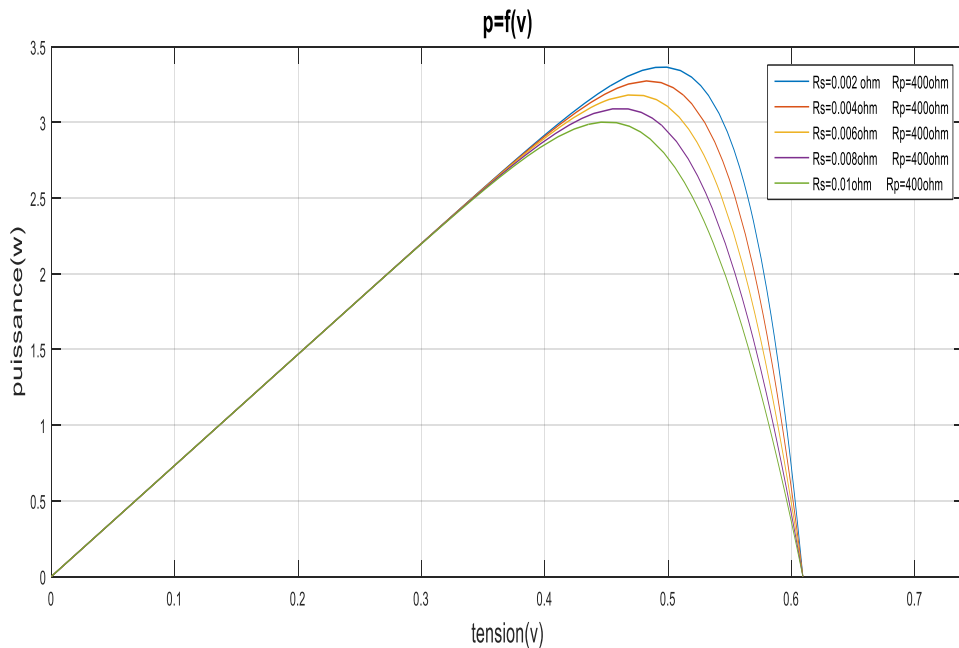


Figure II.8.b : Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V

La résistance série peut modifier la forme de la courbe. Plus la résistance série augmente, plus le facteur de forme diminue. Ceci entraîne un rendement plus faible de la cellule. Par contre, on peut bien remarquer que cette résistance n'a pas d'influence sur la tension de circuit ouvert.

II.7 Influence de la résistance parallèle R_P :

La résistance shunt/ parallèle est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant (courant de fuite entre des cellules, courant de fuite entre la cellule et le bord du module etc.). En général, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

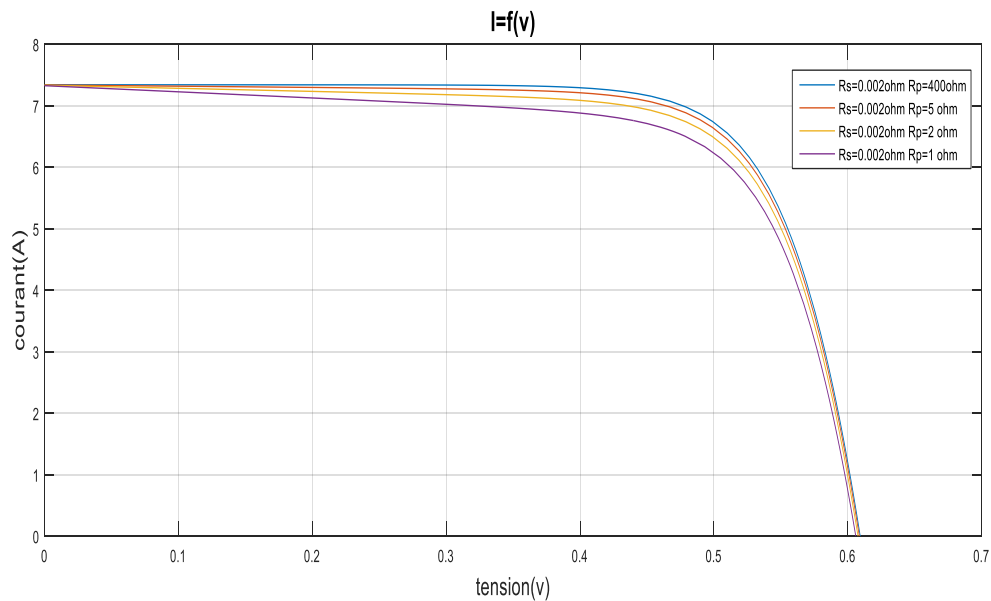


Figure II.9.a : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V

Pour de grandes valeurs de R_p , on ne voit pas de modification notable dans la zone de tension positive. Au contraire, il y a des modifications très remarquables dans la zone de la tension négative (fonctionnement inverse de la cellule). Dans le cas de réduction importante de la résistance parallèle, on remarque qu'il y a une chute en tension de circuit ouvert et en courant de court-circuit

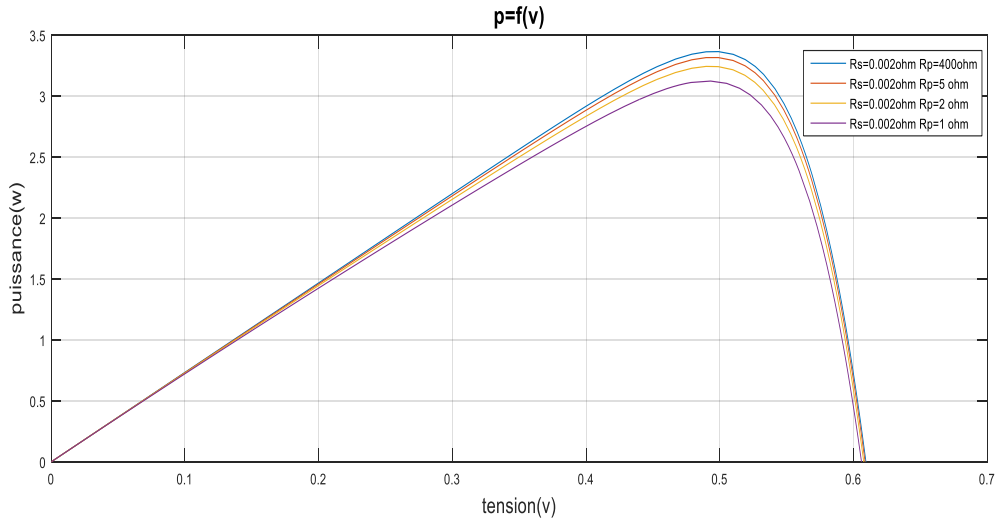


Figure II.9.b : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P-V

II.8 Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques et industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière de soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et en parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.



Figure II.10: Module photovoltaïque

- a- Raccordement en série : même que celui des cellules.
- b- Raccordement en parallèle : même que celui des cellules.
- c- Raccordement mixte : c'est le branchement qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte.

II.9 Panneau photovoltaïque :

Un panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise.



Figure II.11: Panneau PV

II.10 Associations des cellules en série :

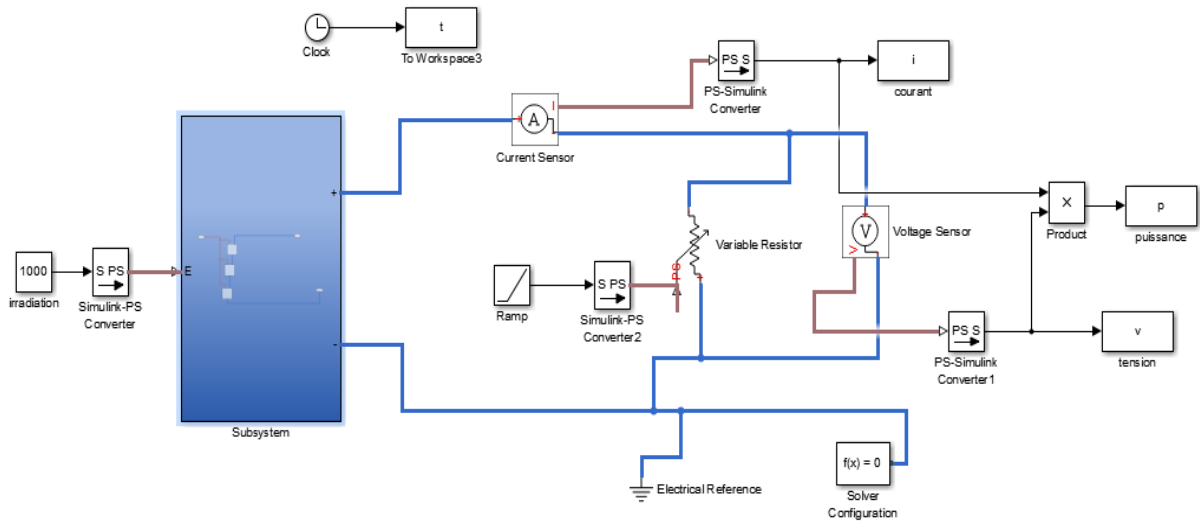


Figure II.12 : Schéma de 3 cellules PV en série sous Simulink

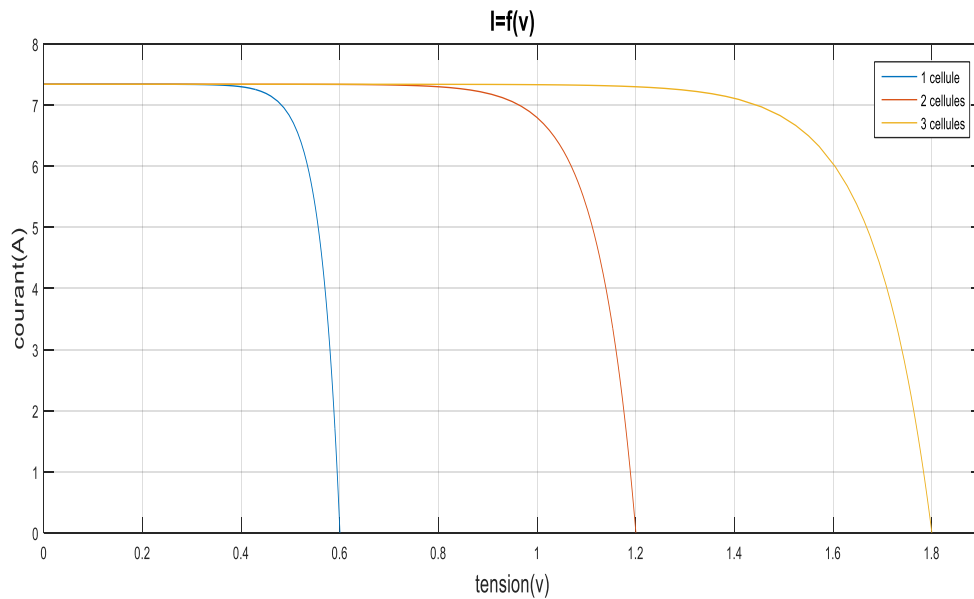


Figure II.13 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 3 cellules en série

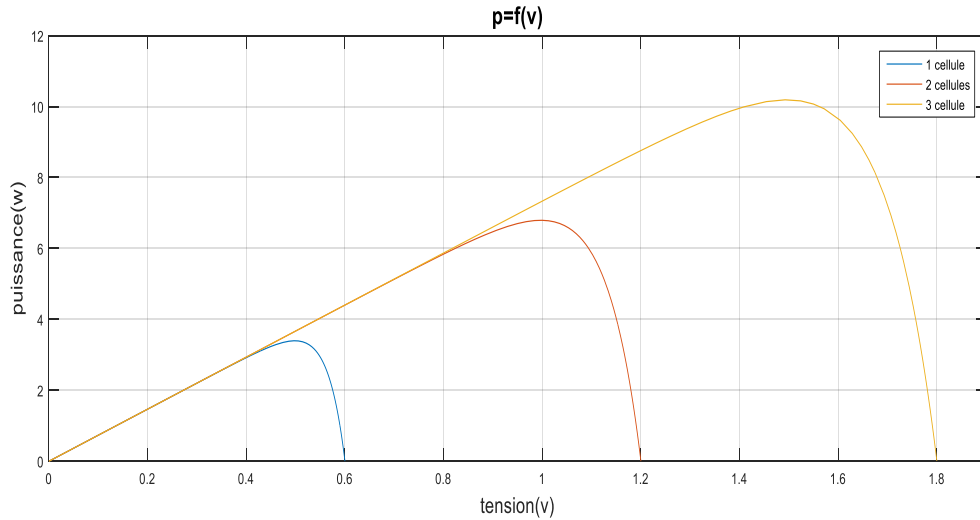


Figure II.14 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 3 cellules en série

Dans un groupement de n cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même.

II.11 Association des cellules en parallèle :

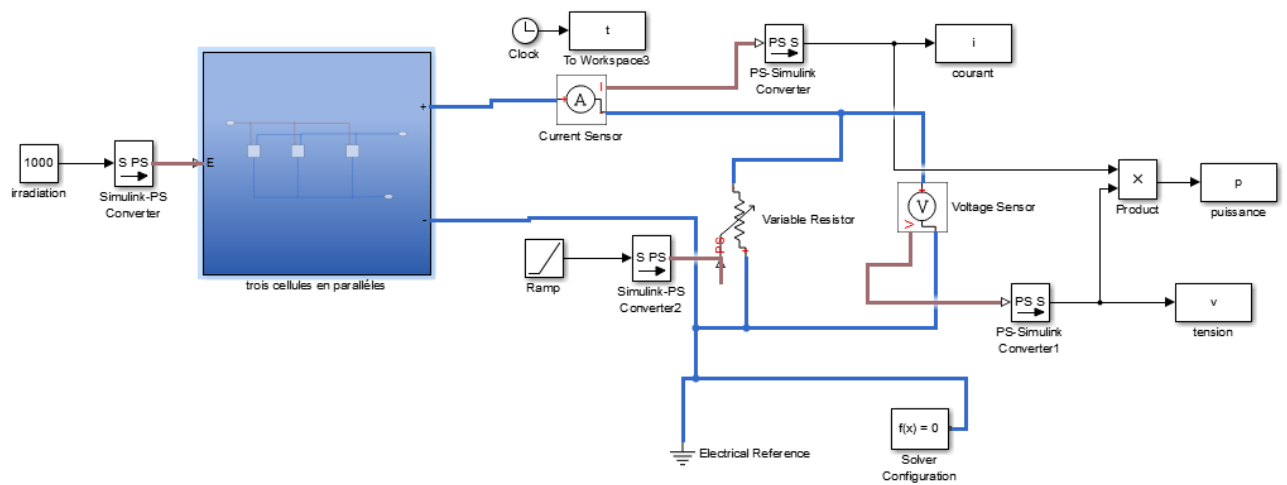


Figure II.15 : Schéma de 3 cellules PV en parallèle sous Simulink

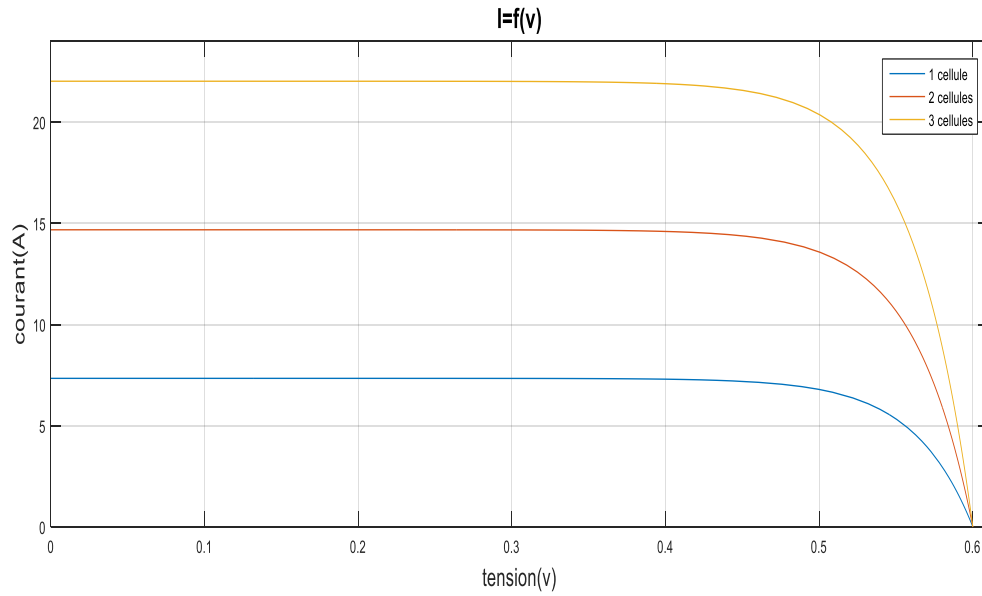


Figure II.16 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de 3 cellules en parallèle

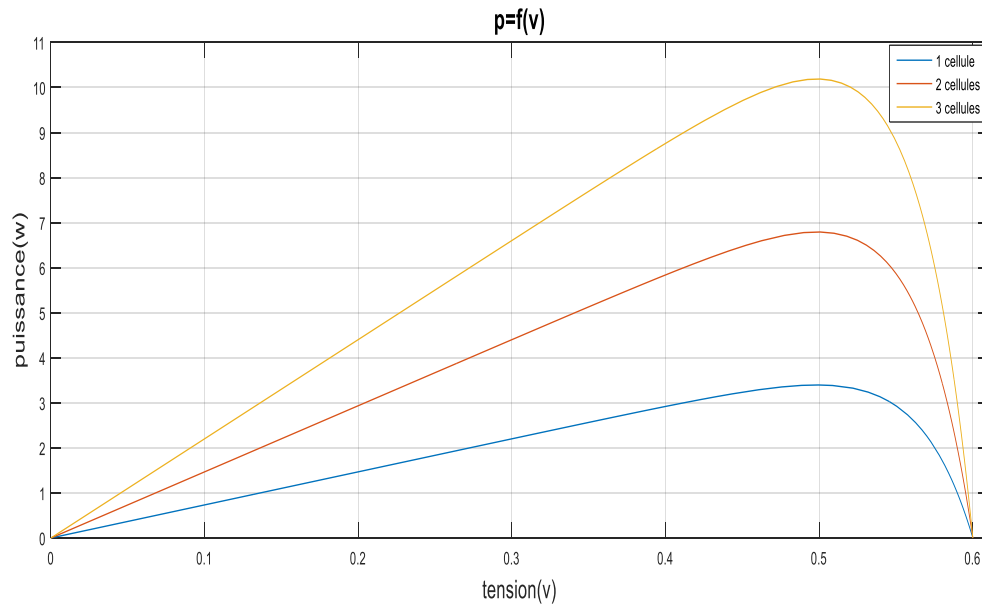


Figure II.17 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement de 3 cellules en parallèle

Dans le cas d'un groupement de n cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants.

II.12 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la production de l'énergie électrique à partir d'un générateur photovoltaïque. Nous nous sommes intéressés à l'étude d'un modèle d'une cellule photovoltaïque avec son schéma équivalent.

Ensuite nous avons considérés les différents paramètres du circuit équivalent qui permet de tracer la caractéristique $I(V)$. Nous avons remarqué que les performances d'un GPV sont fortement influencées par des conditions météorologiques tel que l'éclairement et la température ainsi par des paramètres internes tel que la résistance série et parallèle.

Chapitre III

Etude et comparaison des différentes configurations des panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage partiel

« All we have to decide is what to do with the time that is given us. »

Gandalf

III.1 Introduction :

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque (PV) peut être considérablement réduite par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance). Mais aussi par rapport aux conditions météorologiques. En effet, de nombreux facteurs, tels que l'ombrage, ou la température, peuvent agir considérablement sur la production électrique d'un panneau photovoltaïque (PV). L'ombrage partiel (PS) est un problème qui est souvent rencontré lors de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque, il peut être dû à des nuages, des poteaux électriques, à l'ombre de bâtiments, etc. Les impacts liés à l'ombrage peuvent être réduits en utilisant plusieurs stratégies : surveiller le maximum Power Point produit par le système PV, également avec l'adoption des topologies de convertisseurs et aussi avec le meilleur choix de la configuration des modules PV. Lorsqu'une partie d'un champ photovoltaïque est ombrée, les modules ombrés ne peuvent pas produire autant de courant comme ceux non ombrés étant donné que tous les modules sont connectés en série et/ou en parallèle. En effet, les modules ombrés obligeront les modules non ombrés à opérer dans la région de tension négative. Cela entraîne une perte nette de tension dans le système. Les modules ombrés absorbent la puissance et commencent à agir comme une charge. En d'autres termes, les modules ombrés dissipent la puissance sous forme de chaleur et provoquent des points chauds. Actuellement, de nombreuses études sur les effets d'ombrage partiel sur les différents systèmes PV sont réalisées, elles ont pour objectif de tenter d'améliorer les performances électriques de ces systèmes. En général, les systèmes PV utilisent différentes configurations pour atteindre la tension et les courants désirés. Parmi ces configurations, on trouve

série parallèle (SP), Totale-Cross-Tied (TCT), Honey Comb (HC), Bridge Linked (BL) et Su-Do-Ku.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons particulièrement à l'effet de l'ombrage partiel sur la production énergétique des PV des différentes configurations citées au-dessus. Nous utiliserons pour cela le modèle à une diode pour la simulation des caractéristiques puissance-tension. Quatre scénarios de l'ombrage partiel seront traités et discutés et une comparaison des pertes de puissance des différentes configurations est ensuite présentée.

L'objectif est de pouvoir sélectionner la configuration la plus appropriée du champ photovoltaïque qui fournit les meilleures performances à savoir celle qui présente les pertes les plus faibles sous les mêmes conditions d'ombrage partiel.

III.2 Causes de l'ombrage :

Plusieurs facteurs peuvent causer l'ombrage partiel, tel que les arbres, les nuages, la neige, le sable, la poussière, les poteaux électriques et les bâtiments.



Figure III.1 : Causes d'ombrage

III.3 Effet de l'ombrage :

Nous pouvons dans cette partie définir deux types d'ombrage agissant pour le premier à l'échelle de la cellule et pour le second à l'échelle du module. Nous les retrouvons dans la littérature sous la dénomination ombrage partiel n'affectant qu'une cellule et ombrage homogène affectant le module.

III.3.1 Ombrage homogène :

Dans ce cas la répartition de l'éclairement incitant est homogène sur toute la surface de la cellule ou le module photovoltaïque.

Nous avons réalisé sur un panneau de 18 cellules un test en faisant varier l'éclairement de 1000 W/m^2 à 400 W/m^2 avec un pas de 200 W/m^2 . La Figure III.2 représente la variation de la caractéristique I-V lorsque les 18 cellules sont occultées de manière homogène. La chaîne se comporte comme si l'éclairement global était diminué.

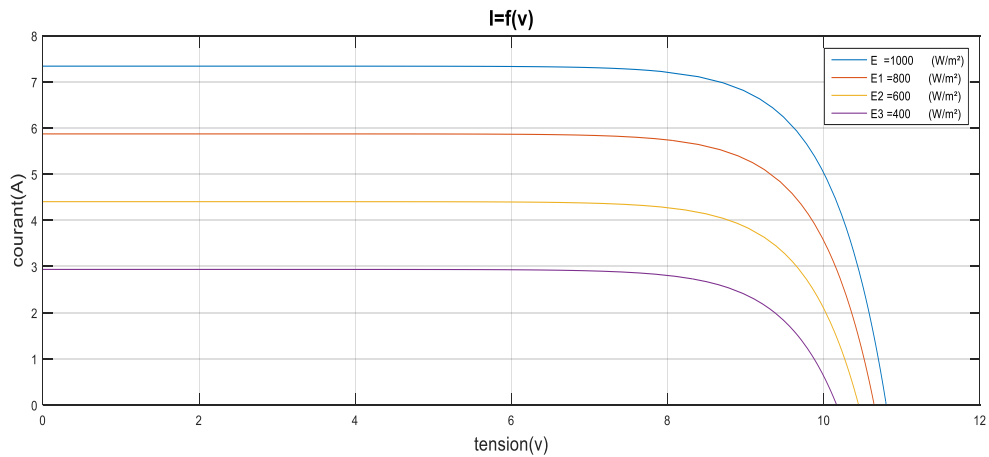


Figure III.2 : Caractéristique I-V d'un panneau sous différents éclairements

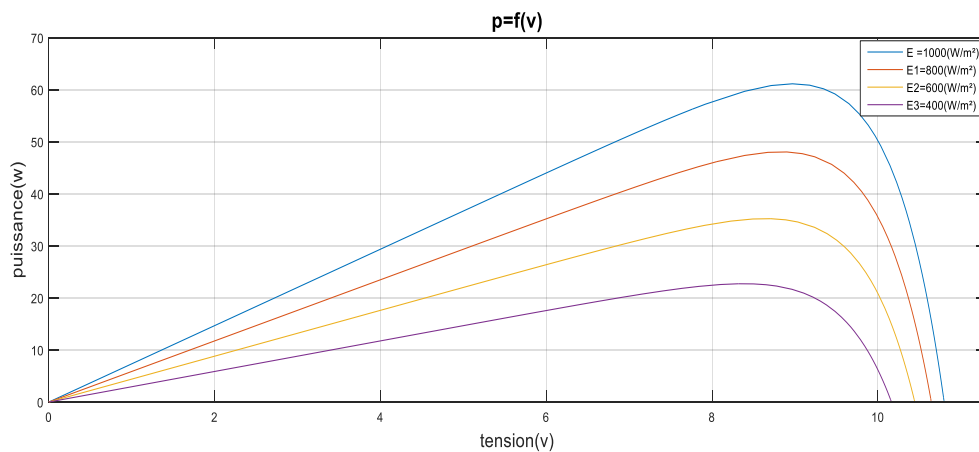


Figure III.3 : Caractéristique P-V d'un panneau sous différents éclairements

III.3.2 Ombrage non-homogène (partiel) :

Dans ce cas la répartition de l'éclairement incitant n'est pas homogène sur toute la surface de la cellule ou le module photovoltaïque, les cellules reçoivent différents éclairagements inférieurs à 1000 W/m^2 .

Test 1 :

Pour réaliser ce test, nous avons mis 3 cellules en série sous différents éclairagements, pour la première cellule $E_1= 1000 \text{ W/m}^2$, pour la deuxième cellule $E_2= 800 \text{ W/m}^2$ et pour la troisième cellule $E_3= 500 \text{ W/m}^2$.

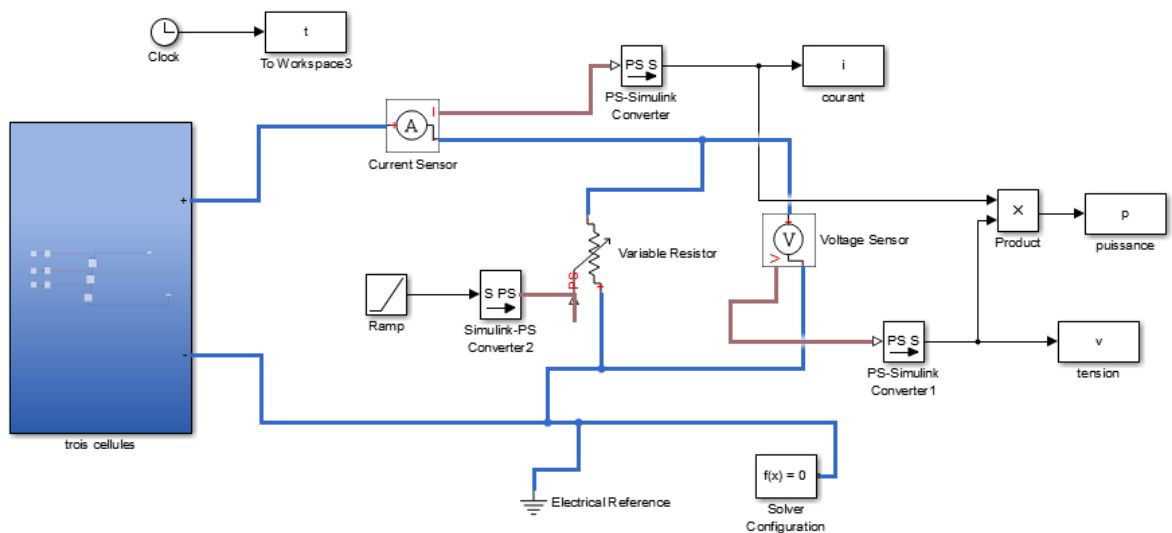


Figure III.4 : Schéma de 3 cellules en série sous différents éclairagements sous Simulink

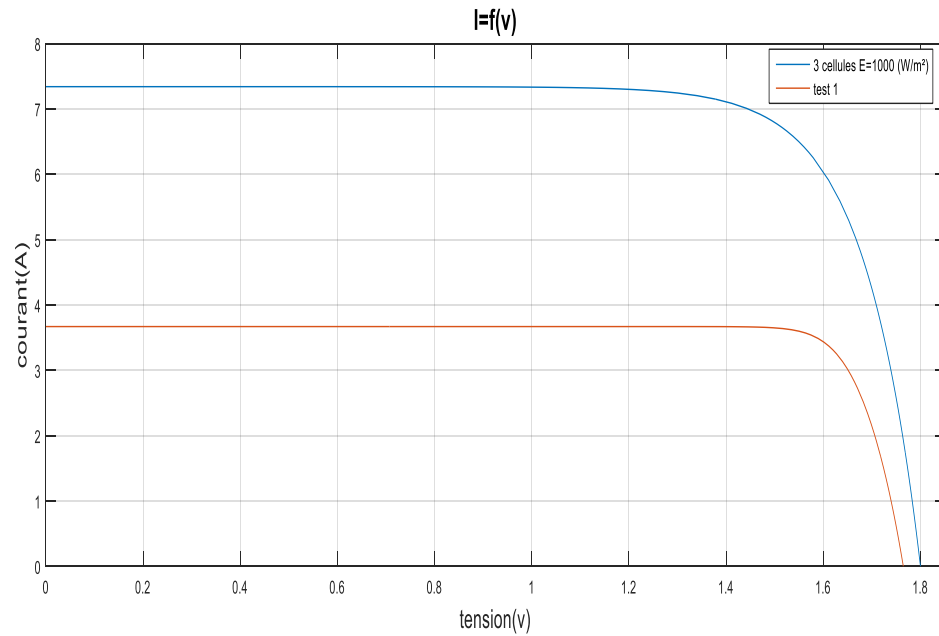


Figure III.5 : Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.

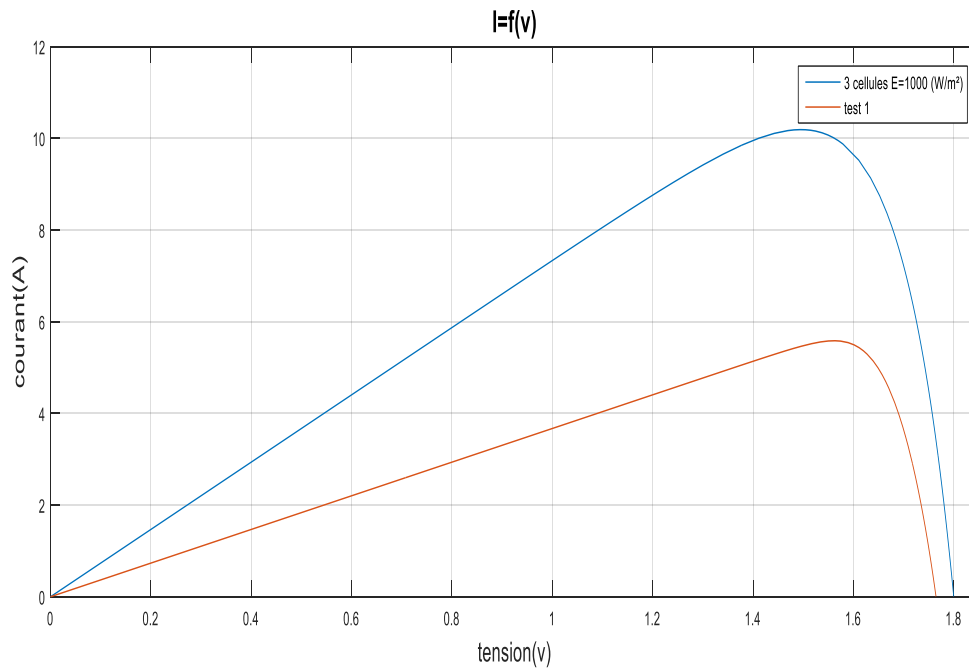


Figure III.6 : Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.

Test 2 :

Pour réaliser ce test, on met 3 cellules en série, pour la première et la deuxième cellule $E= 1000 \text{ W/m}^2$ et pour la troisième cellule $E= 100 \text{ W/m}^2$.

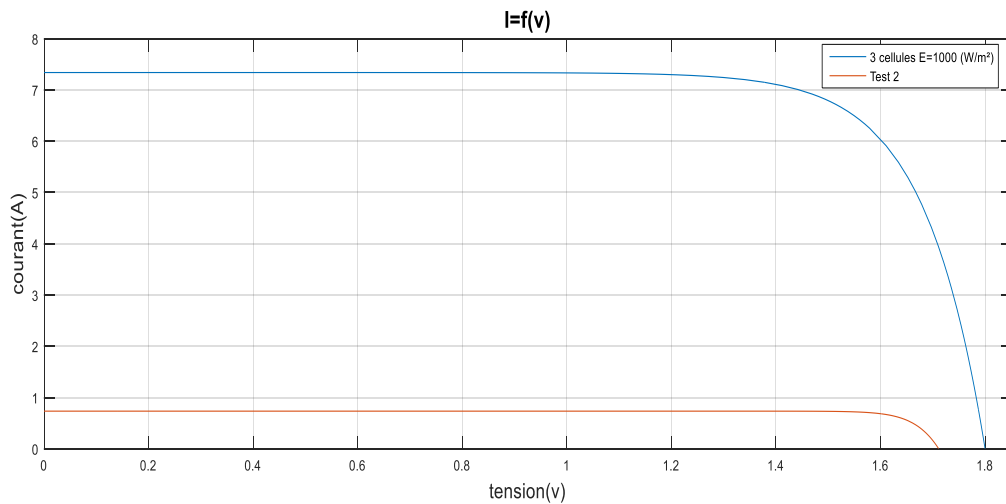


Figure III.7: Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules dont l'une des cellules est ombrée à 90%

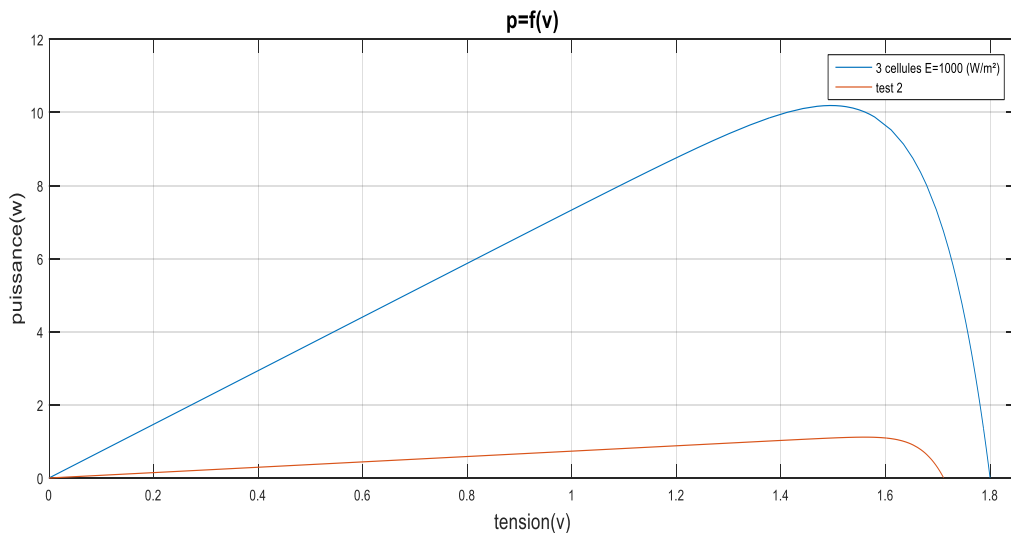


Figure III.8: Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules dont l'une des cellules est ombrée à 90%

Test 3 :

Pour réaliser ce test, on met 3 panneaux en série. Pour le premier panneau $E1= 1000 \text{ W/m}^2$, pour le deuxième panneau $E2= 800\text{W/m}^2$ et pour le troisième panneau $E3= 500\text{W/m}^2$.

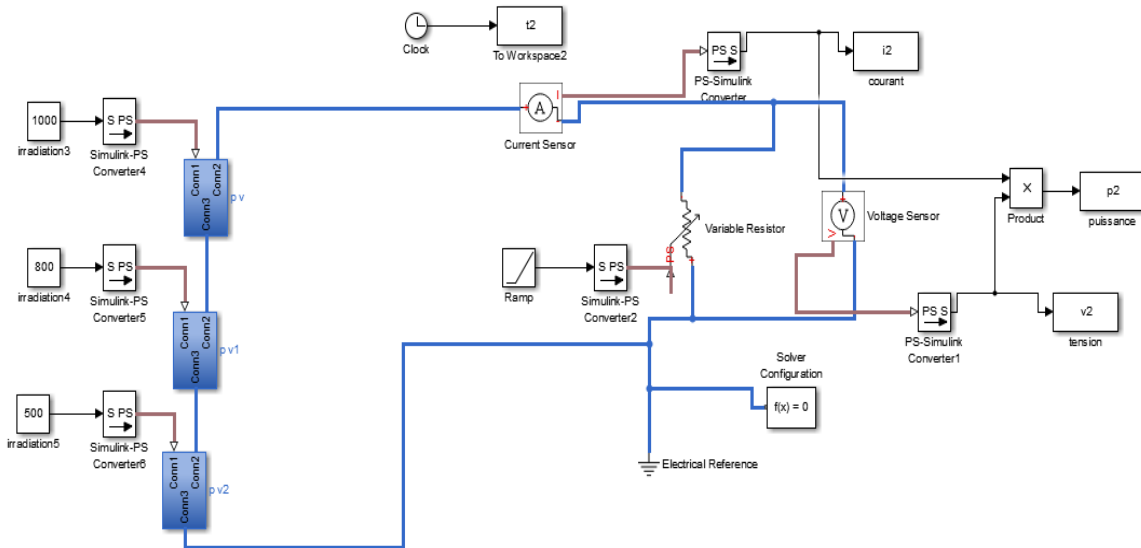


Figure III.9 : Schéma de 3 panneaux PV sans by-pass diode sous Simulink

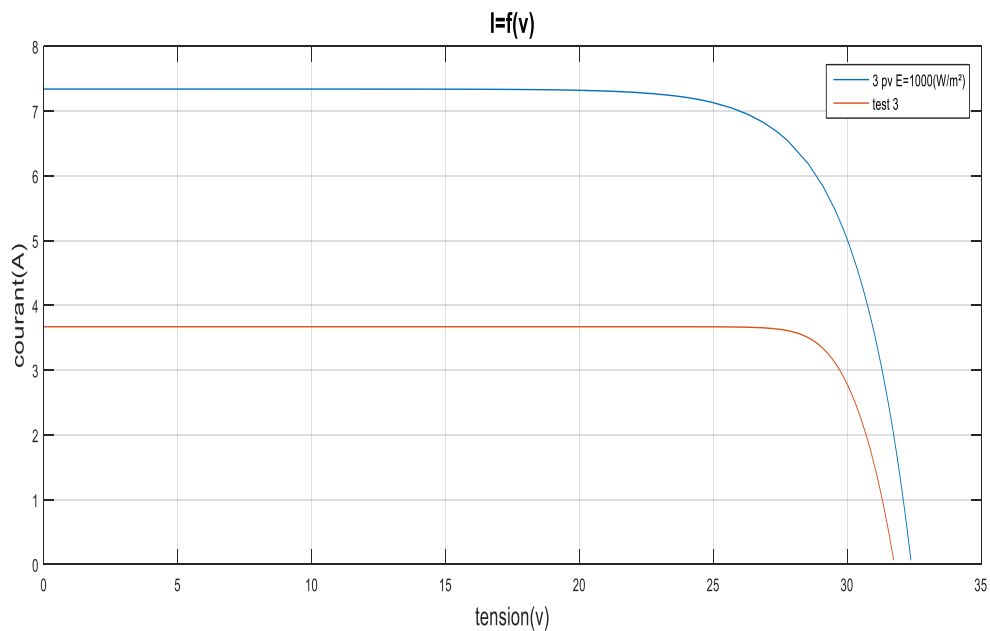


Figure III.10 : Caractéristique I-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m^2) sans diode

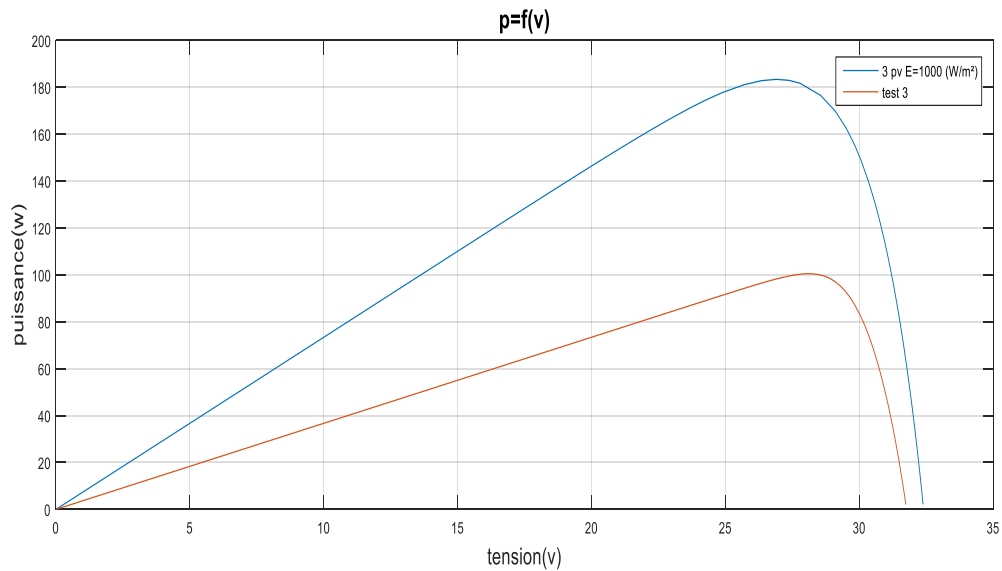


Figure III.11 : Caractéristique P-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) sans diode

En analysant les caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque sous différentes conditions d'ombrage (Figure III.5 à figure III.11), on constate qu'il y a une très forte diminution du courant et de la puissance délivrée par le panneau.

Par conséquent, pour ne pas risquer de compromettre la rentabilité d'une installation photovoltaïque, il faut, dès la phase de planification, minimiser les pertes de rendement dues aux conditions d'ombrage. L'une des solutions est l'utilisation des diodes bypass qui sont des diodes qui sont placées en anti parallèle avec chaque cellule ou un groupe de cellules.

III.4 Hot-spots et diode by-pass:

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années. Donc, le module lui-même doit être protégé afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

La dégradation d'une cellule solaire mise en série provoque une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque et lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur ce qui implique une dissipation d'une quantité importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction. Ce phénomène est dit de hot spot ou « point chaud ».

- La protection par diodes parallèles (ou by-pass) : a pour but de protéger un ensemble de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défektivité d'une ou plusieurs cellules de cet ensemble ou d'un ombrage sur certaines cellules. Elles servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. Cette solution est efficace, mais elle réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne le groupe de cellules qui lui est associé. Ainsi ce groupe shunté par la diode by-pass ne produit plus de puissance.
- La diode série : placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée

encore diode anti-retour. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit.

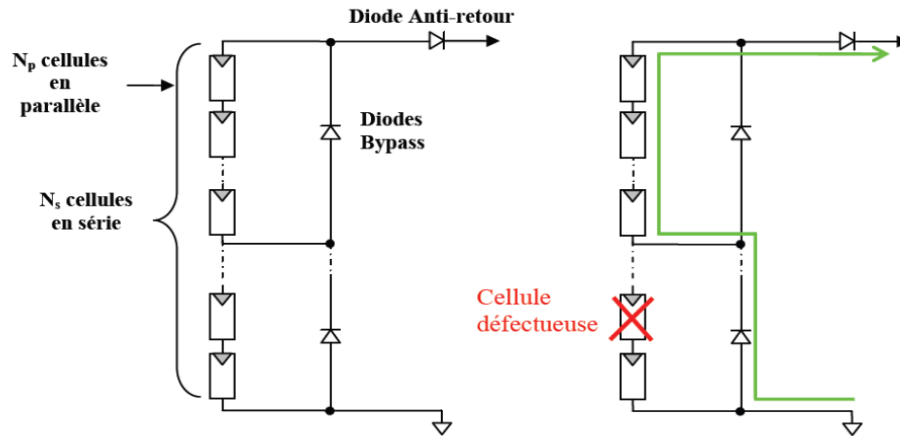


Figure III.12 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule

Test 4 :

Pour réaliser ce test, nous avons refait le test 1 mais en plaçant des diodes by-pass en parallèle avec 3 cellules en série sous différents éclairagements.

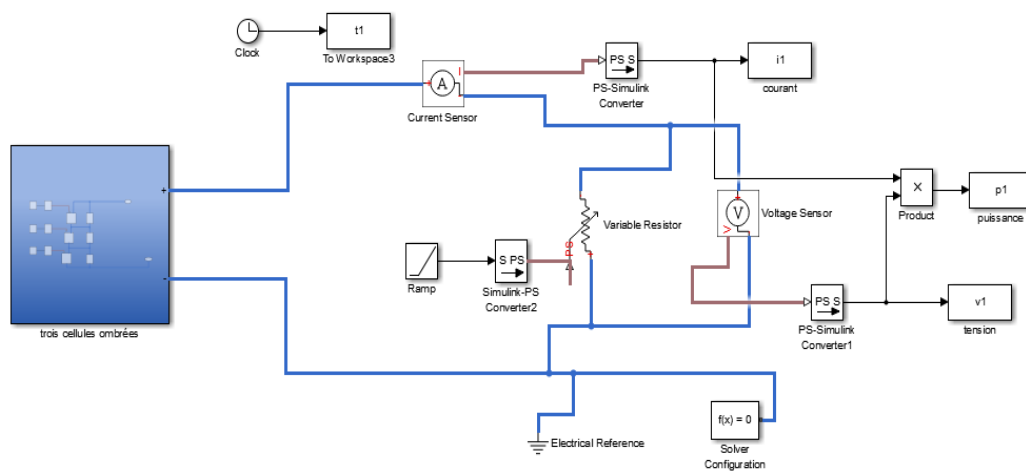


Figure III.13: Schéma de 3 cellules en série avec diode by-pass sous différents éclairagements sous Simulink

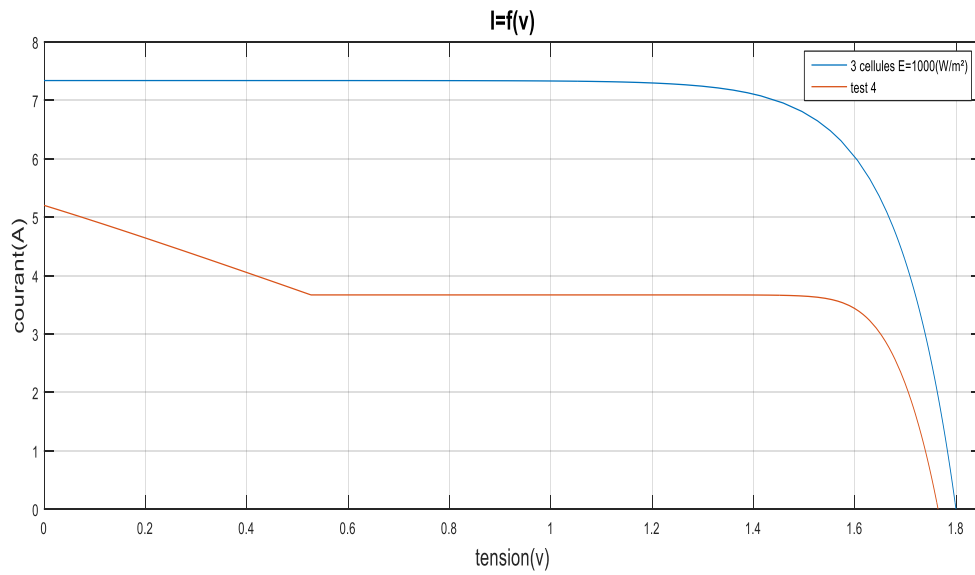


Figure III.14: Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.

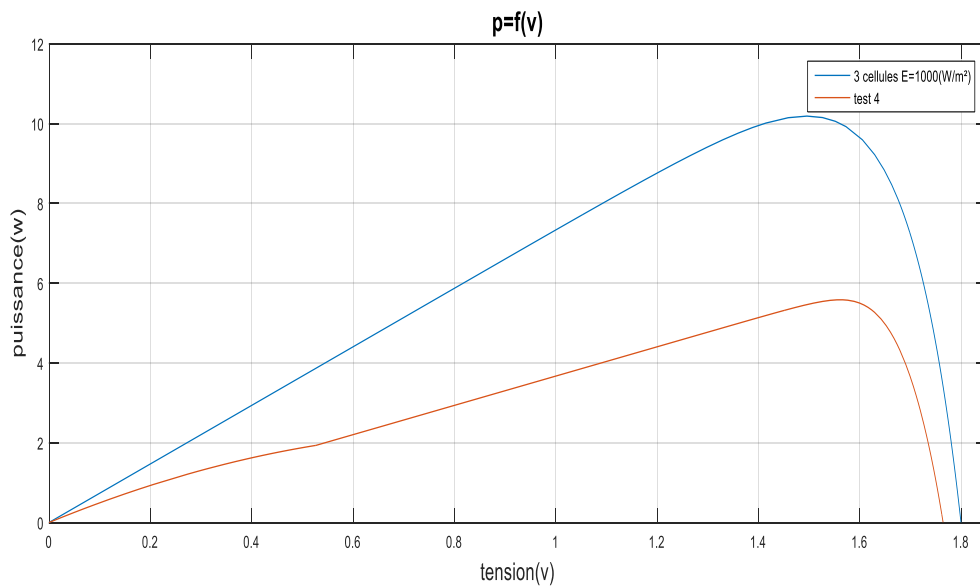


Figure III.15 : Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont une cellule est ombrée à 20% et une à 50%.

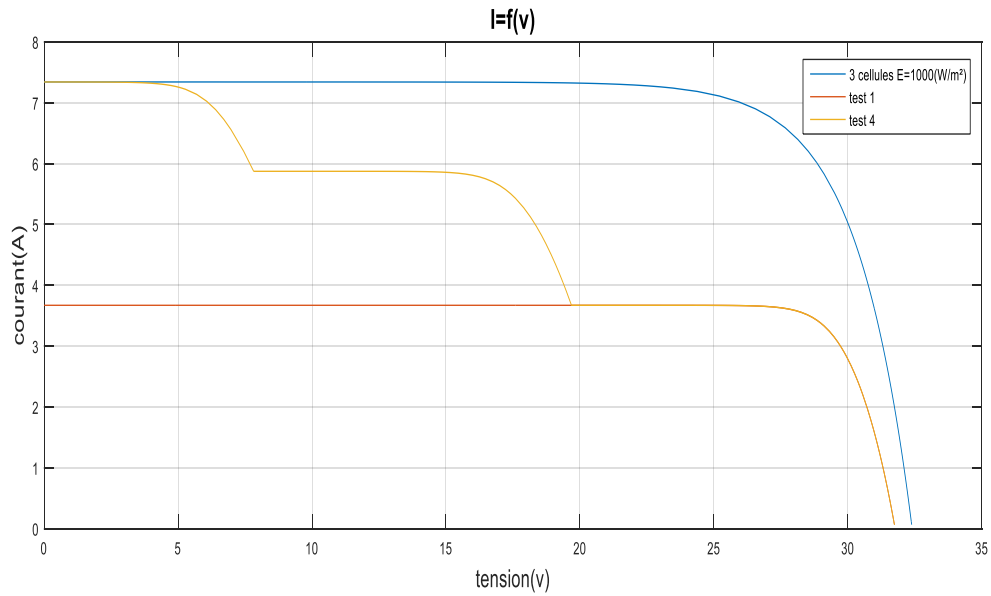


Figure III.16: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I-V d'un module PV

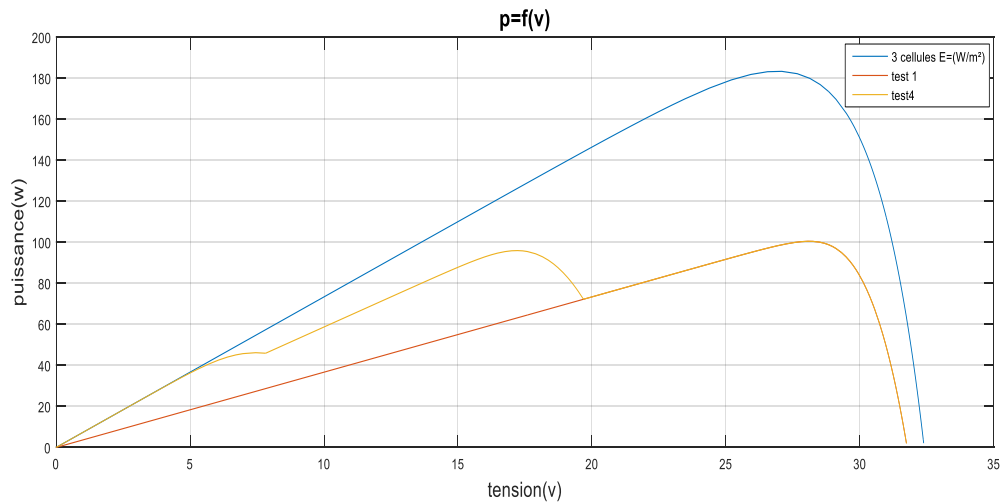


Figure III.17: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique P-V d'un module PV

Test 5 :

Ce test est réalisé pour une chaine de 3 cellules dont l'une est ombrée à 90% avec diode by-pass.

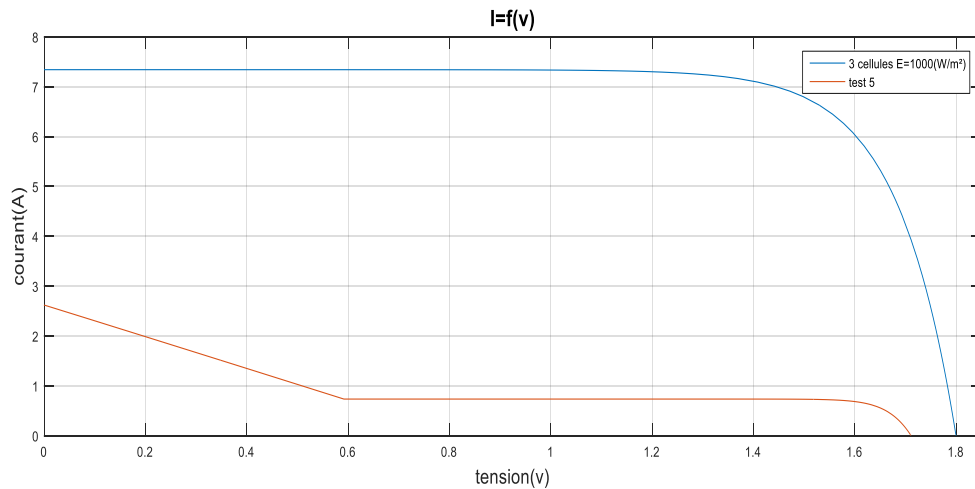


Figure III.18: Caractéristique I-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont l'une des cellules est ombrée à 90%

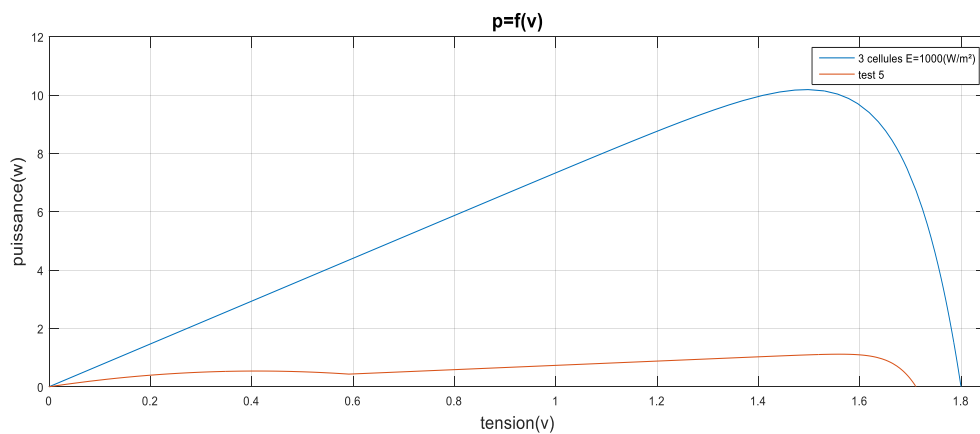


Figure III.19 : Caractéristique P-V d'une chaîne de 3 cellules avec la diode by-pass dont l'une des cellules est ombrée à 90%

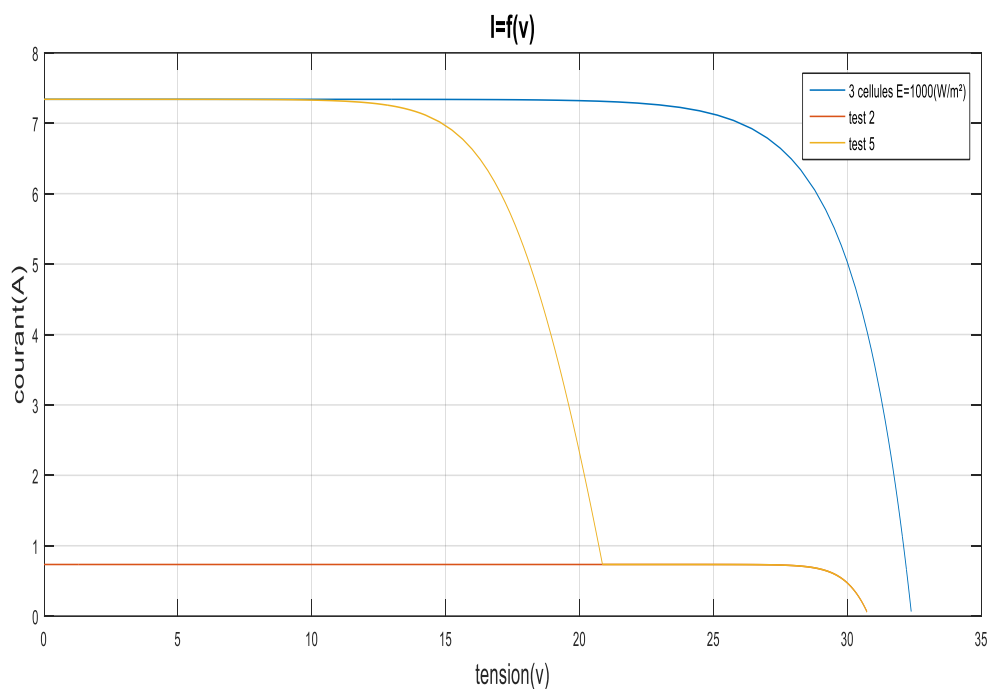


Figure III.20 : Caractéristique I-V de 3 cellules PV en série sous ombrage partiel (1000, 1000, 100 W/m²) avec et sans diode

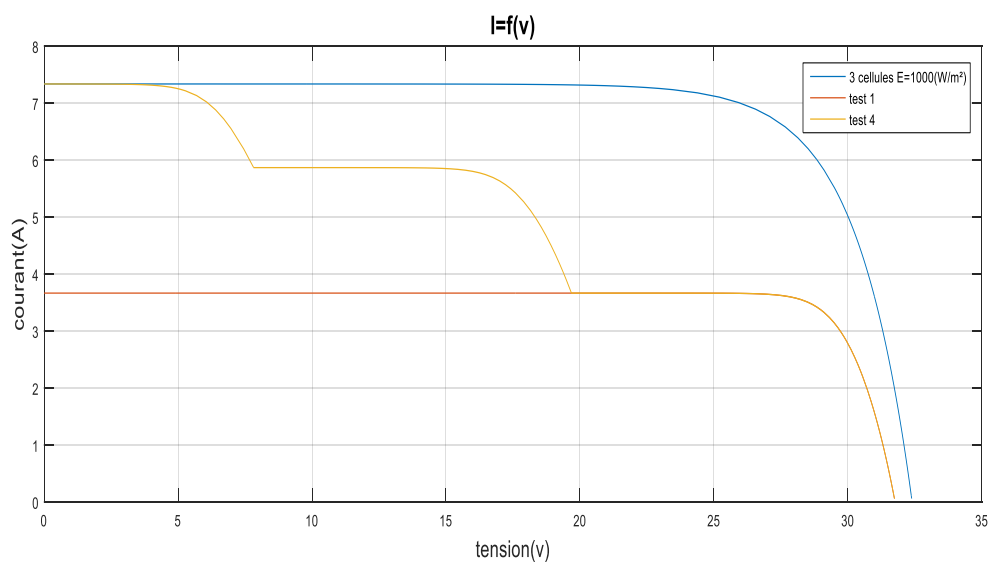


Figure III.21 : Caractéristique P-V de 3 cellules PV en série sous ombrage partiel (1000, 1000, 100 W/m²) avec et sans diode

Test 6 :

Pour ce test une diode by-pass est placée en parallèle avec un groupe de cellules équivalent à un module. Dans ce cas 3 modules reçoivent respectivement $E_1= 1000 \text{ W/m}^2$, $E_2= 800\text{W/m}^2$ et pour le $E_3= 500\text{W/m}^2$.

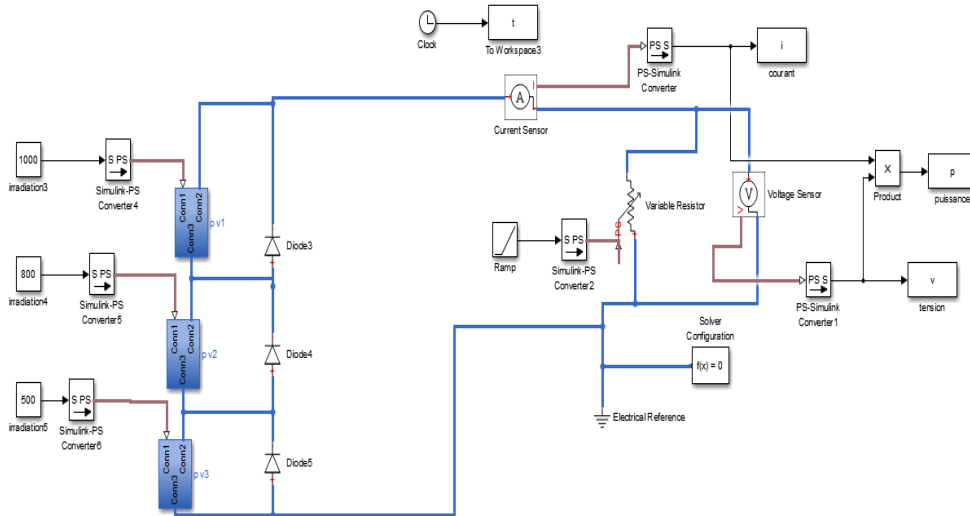


Figure III.22 : Schéma de 3 panneaux PV avec by-pass diode sous Simulink

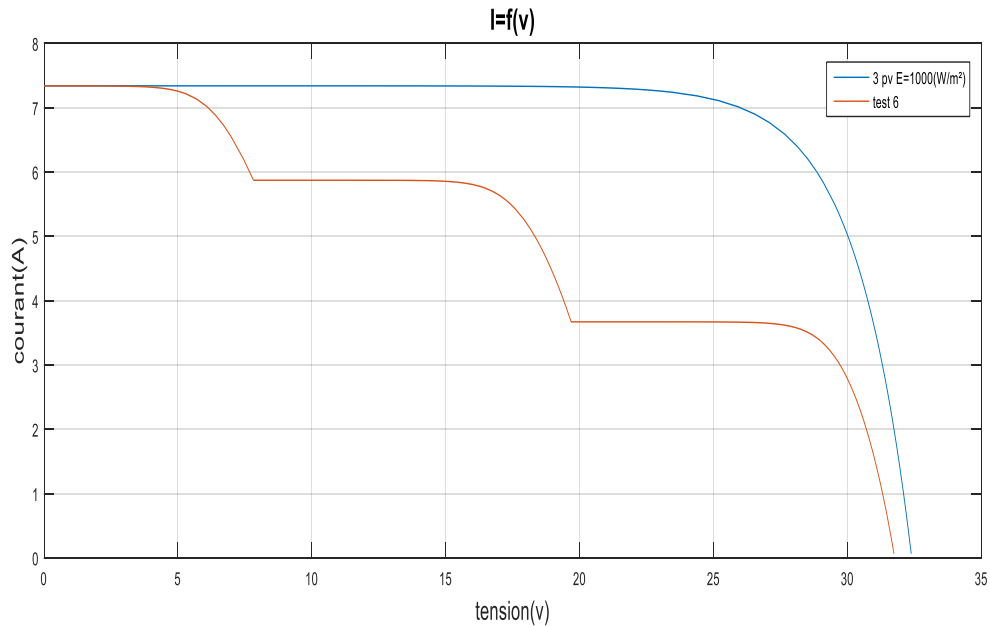


Figure III.23: Caractéristique I-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) avec diode

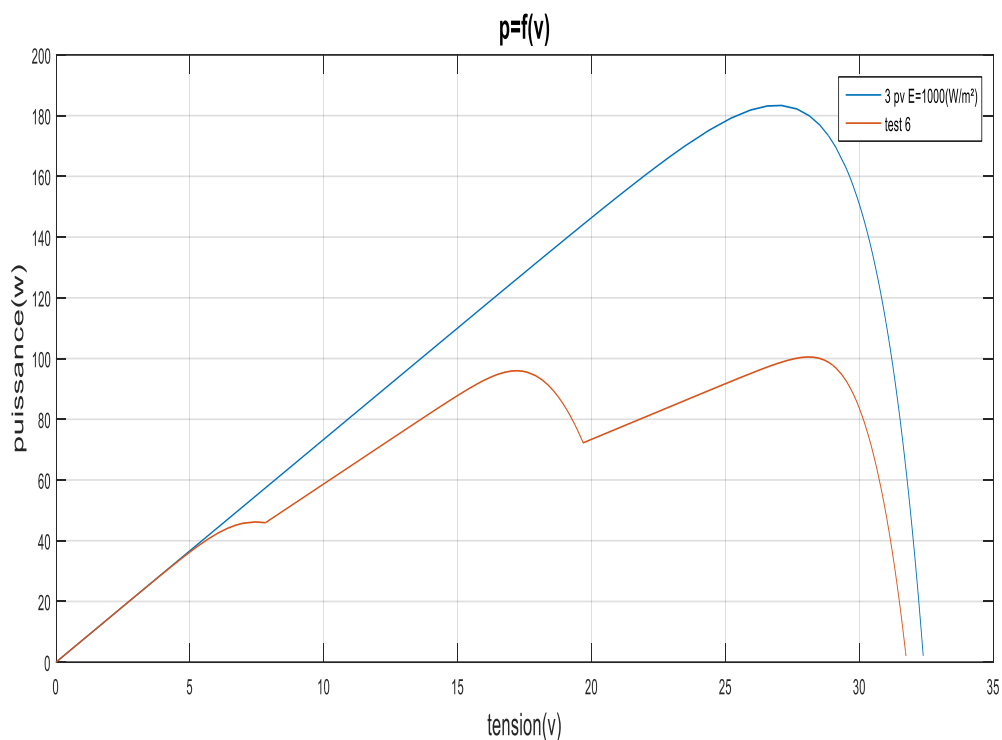


Figure III.24 : Caractéristique P-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) avec diode

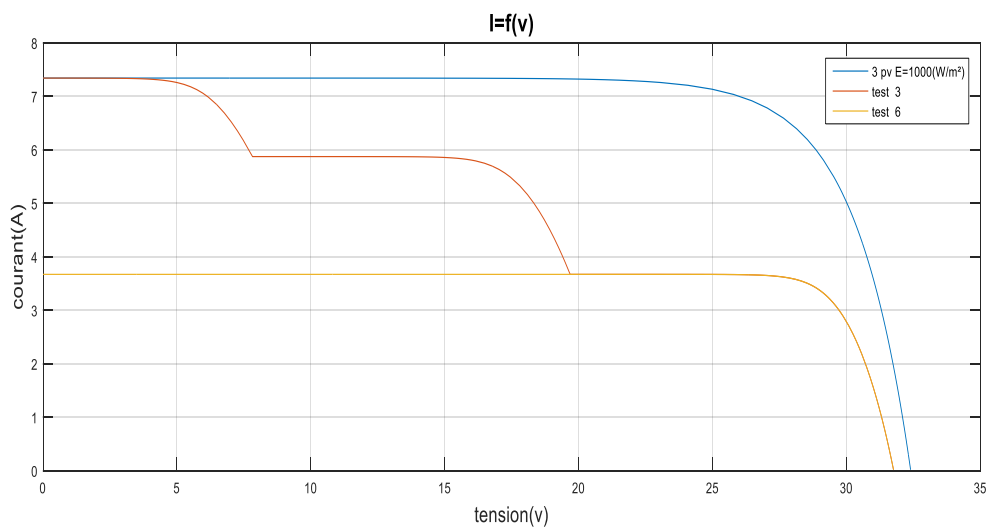


Figure III.25 : Caractéristique I-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) avec et sans diode

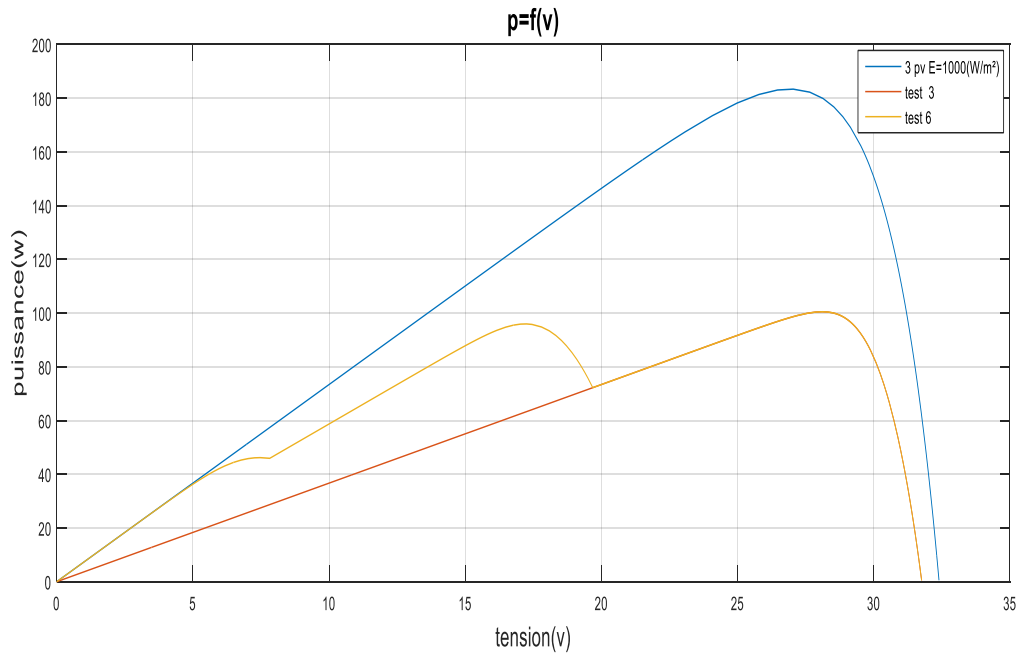


Figure III.26 : Caractéristique P-V de 3 panneaux PV en série sous ombrage partiel (1000, 800, 500 W/m²) avec et sans diode

D'après les résultats obtenus par simulation on peut conclure que ombrager une partie d'un module PV a de dramatiques conséquences sur sa courbe puissance-tension (P –V) et ce, même si une très faible partie du module ou de la cellule est à l'ombre, une diminution importante de la puissance produite en est alors la conséquence.

Chaque générateur photovoltaïque présente un point de travail unique au niveau duquel il peut fournir la puissance électrique maximale possible, appelé le point de puissance maximal (MPP, Maximum Power Point). Cette puissance dépend principalement de l'intensité de l'irradiation. Si différents modules d'un « String » au sein d'un générateur photovoltaïque se trouvent à l'ombre, ses propriétés électriques se voient nettement modifiées. En utilisant les diodes by-pass on peut atténuer les pertes de puissance et garantir une meilleure rentabilité mais le générateur photovoltaïque présente maintenant différents

points de travail et donc de multiples pics sont obtenus sur les caractéristiques I-V et P-V.

Pour améliorer les performances du générateur PV une autre solution est adoptée par différents chercheurs, cette solution consiste à changer les connexions des différentes cellules ou modules pour pouvoir trouver une configuration rentable et efficace.

III.5 Modélisation et présentation des différentes configurations PV :

Afin d'obtenir une puissance de quelques kW à quelques MW sous une tension appropriée, il est nécessaire de connecter les modules sur la forme la plus diverse appelée configuration PV. Dans cette partie, nous visons à exposer toutes les configurations PV utilisées dans cette étude. Néanmoins, pour toutes les analyses de simulation et pour tous les résultats de configuration, nous avons utilisé des modules PV 6x4. Chaque module comprend 36 cellules basées sur le modèle à une diode. De plus, nous avons analysé cinq configurations PV, illustrées aux figures 5 et 6. Les lettres en haut de la configuration correspondent à l'acronyme de leur nom, par exemple SP (série-parallèle). BL (Bridge Linked) inspiré par une connexion Bridge en pierre de blé. HC (Honey Comb) similaire à la forme hexagonale du Honey Comb. Toutes ces configurations PV ont quatre chaînes parallèles et chaque chaîne contient six modules connectés en série.

III.5.1 Configuration Série Parallèle :

Le circuit de la configuration SP est représenté sur la figure III.27. Le champ comporte quatre strings (branches) en parallèles, chacun contient six modules connectés en série [14].

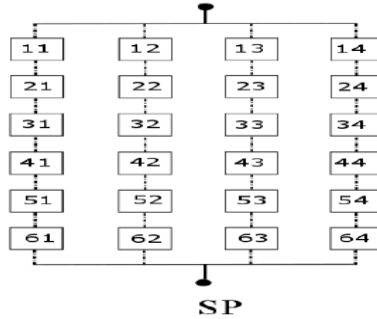


Figure III.27 : Configuration SP

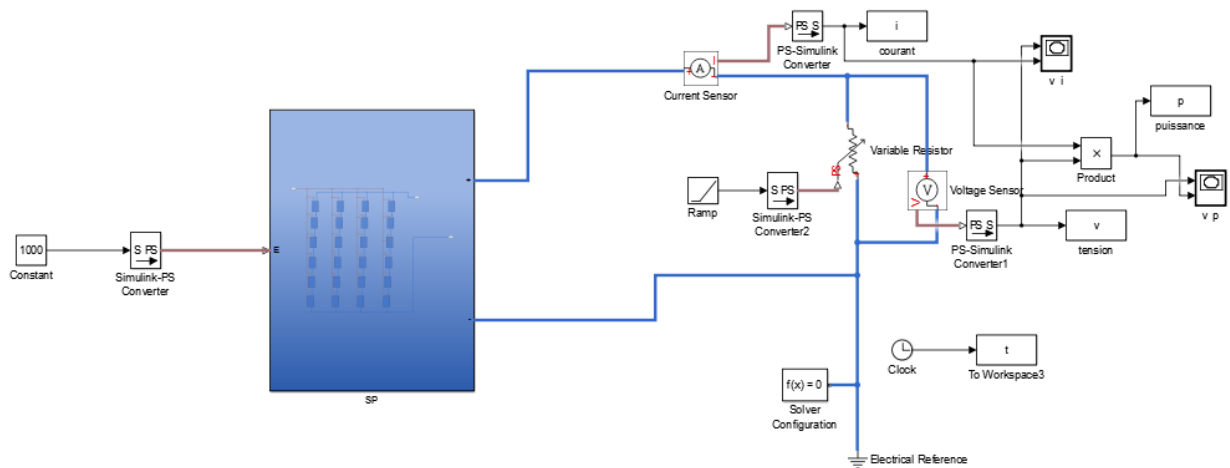


Figure III.28 : Configuration SP sous Simulink

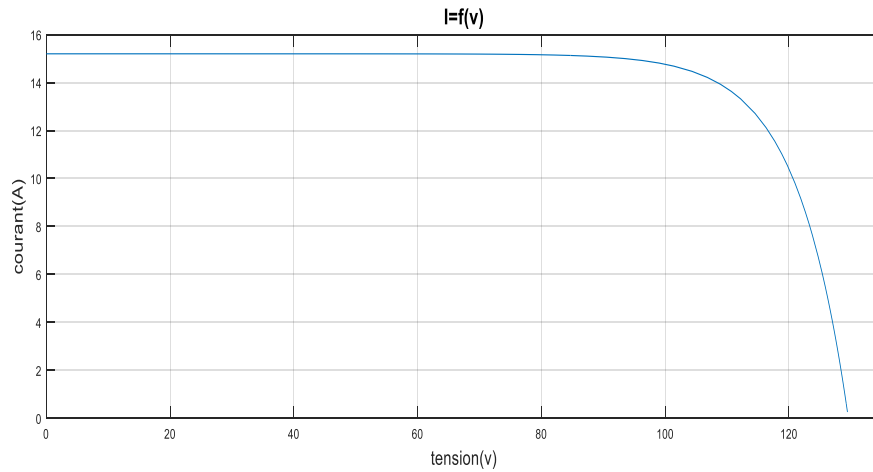


Figure III.29: Caractéristique I-V pour SP

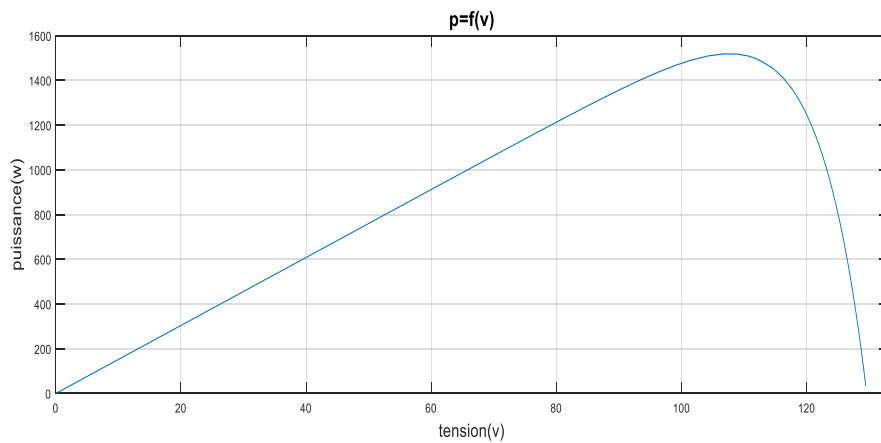


Figure III.30: Caractéristique P-V pour SP

III.5.2 Configuration Bridge Linked:

La configuration (BL) est représentée sur la figure III.31 ci-dessous composée de plusieurs mailles répétitives. Chaque maille est constituée de quatre modules de deux strings adjacents, reliés entre eux par des connexions.

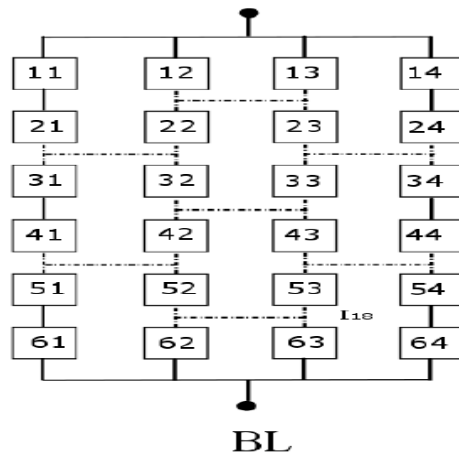


Figure III.31 : Configuration BL

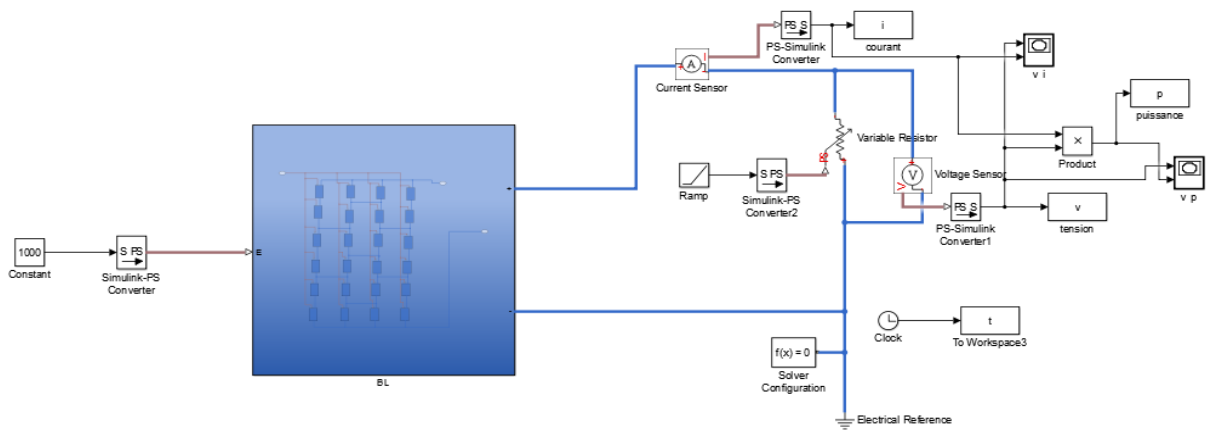


Figure III.32 : Configuration BL sous Simulink

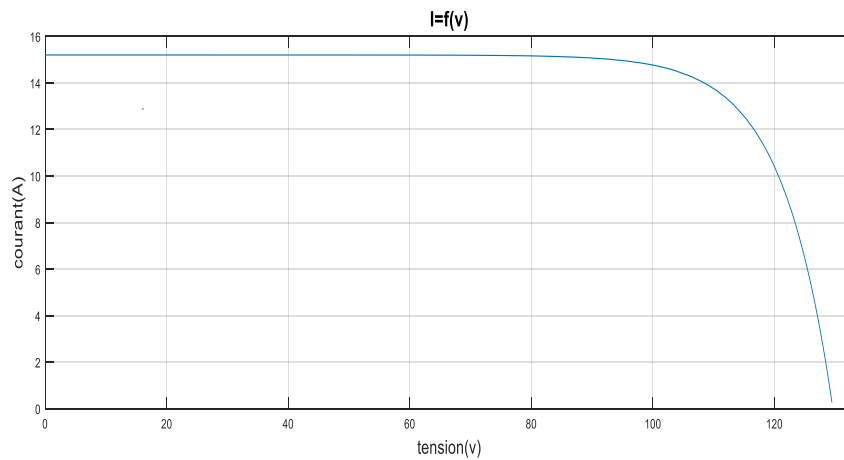


Figure III.33 : Caractéristique I-V pour BL

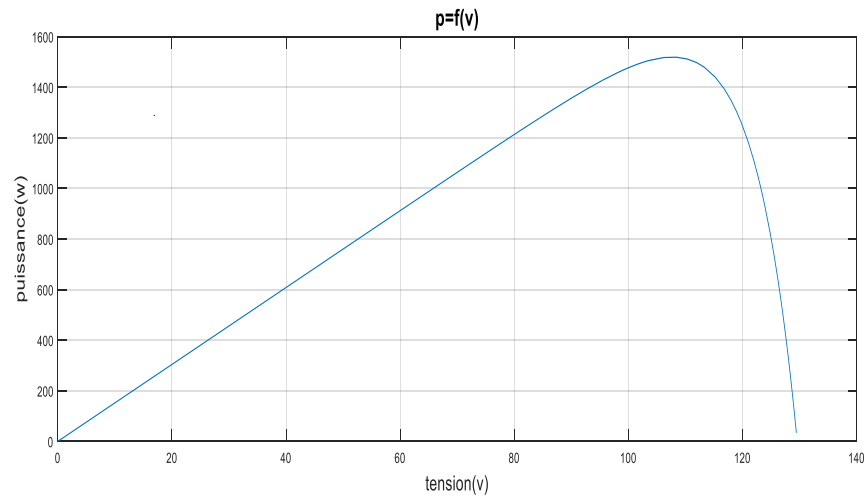


Figure III.34 : Caractéristique P-V pour BL

III.5.3 Configuration Honey Comb :

Le circuit du système Honey Comb (HC) est inspiré de la forme hexagonale du nid d'abeilles comme le montre la figure III.35.

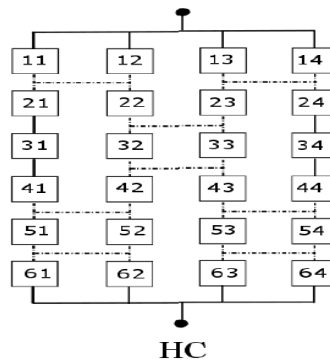


Figure III.35: Configuration HC

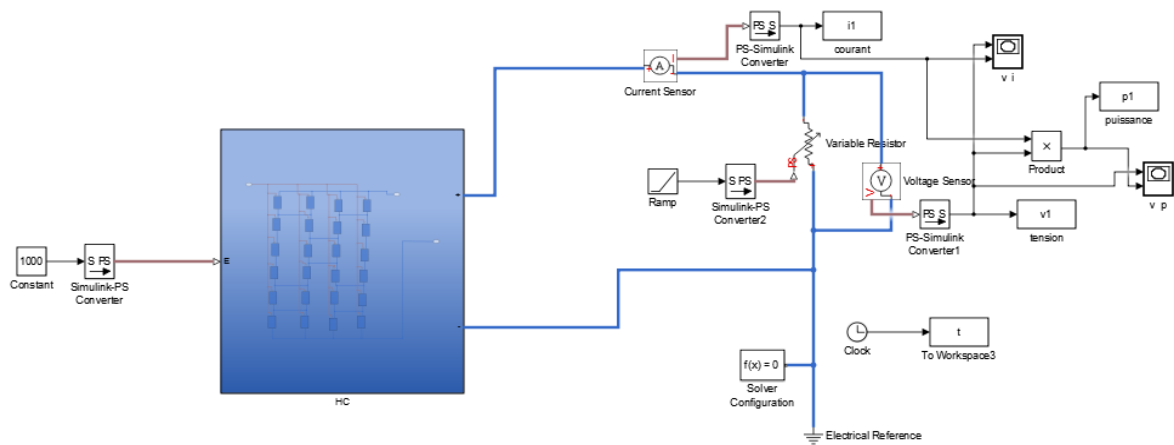


Figure III.36 : Configuration HC sous Simulink

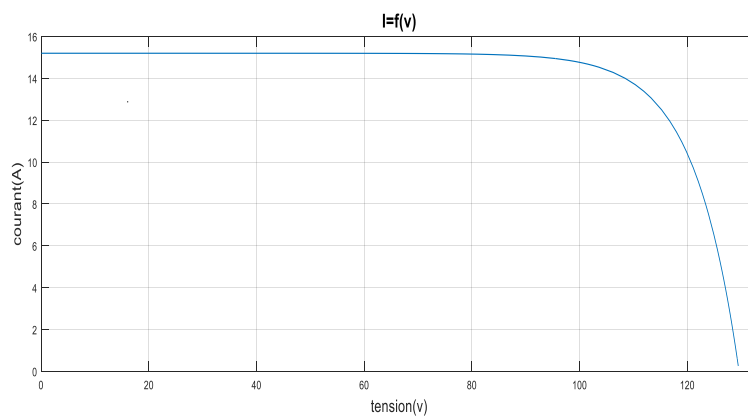


Figure III.37 : Caractéristique I-V pour HC

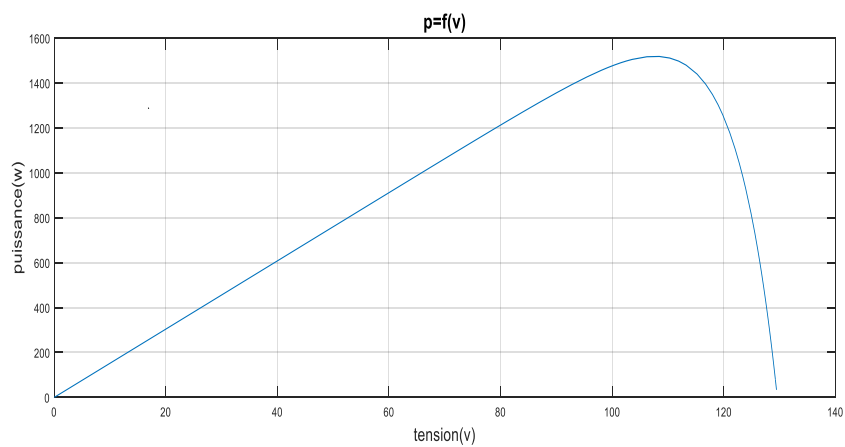


Figure III.38 : Caractéristique P-V pour HC

III.5.4 Configuration Total-Cross-Tied:

Dans cette configuration, tous les modules sont connectés comme représenté sur la figure III.39.

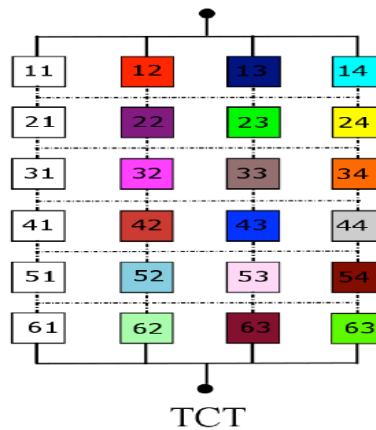


Figure III.39 : Configuration TCT

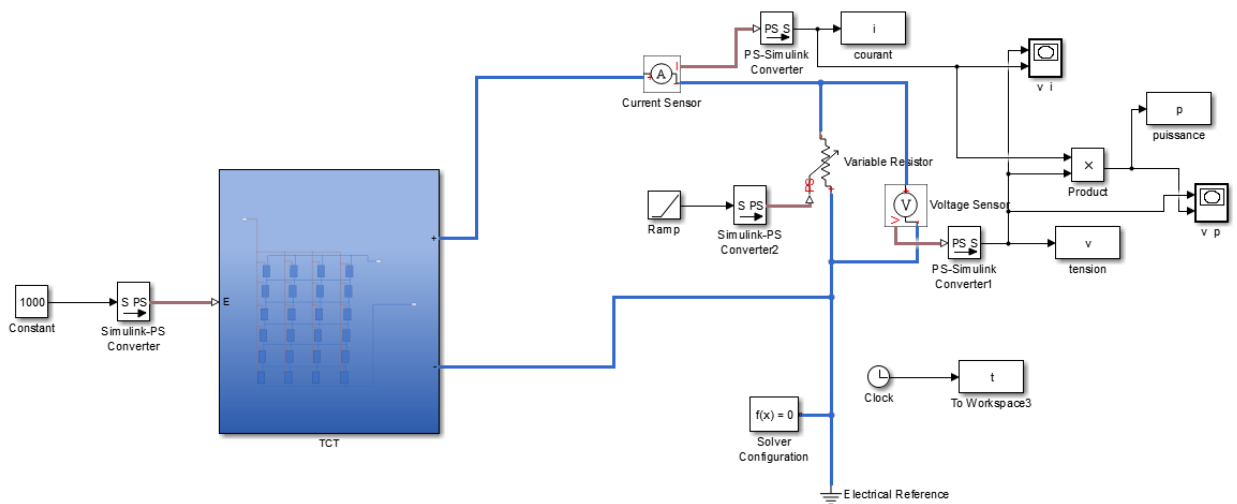


Figure III.40 : Configuration TCT sous Simulink

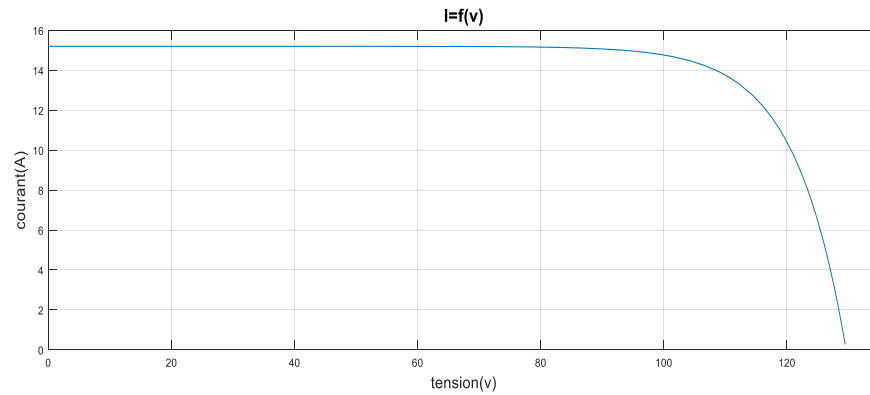


Figure III.41 : Caractéristique I-V pour TCT

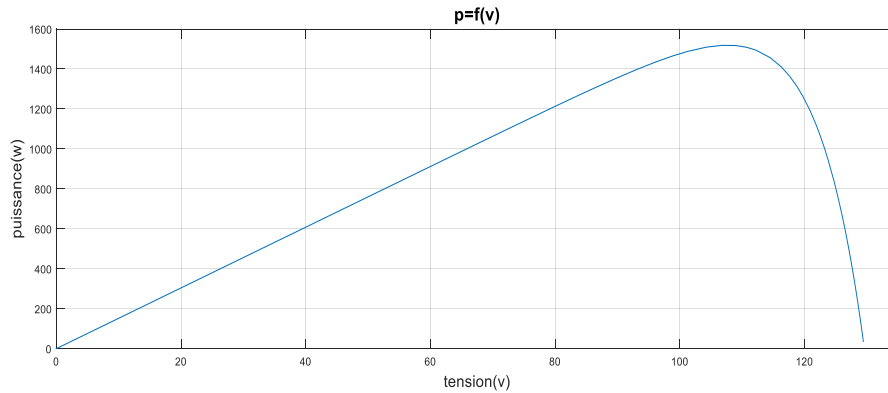


Figure III.42 : Caractéristique P-V pour TCT

III.5.5 Configuration Su-Do-Ko :

Le nom de cette configuration est inspiré par le jeu Sudoku. Cette configuration est une amélioration de celle de TCT, elle consiste à faire la dispersion de l'ombrage sur les différentes lignes et colonnes pour que les lignes de la configuration TCT reçoivent les mêmes quantités de puissance.

Dans la configuration Sudoku, la position physique des modules PV est modifiée sans modifier le raccordement électrique des modules.

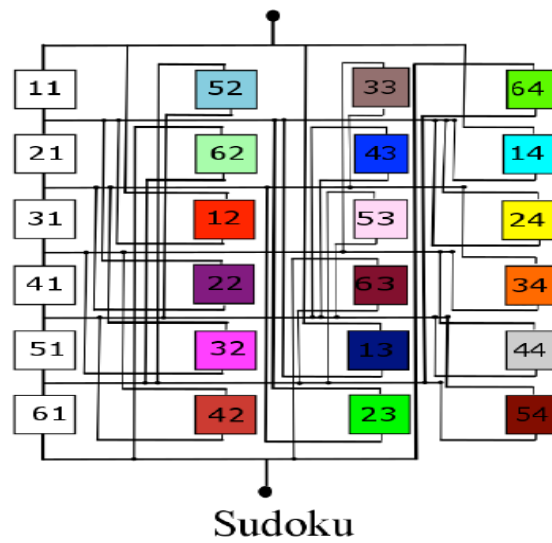


Figure III.43 : Configuration Sudoku

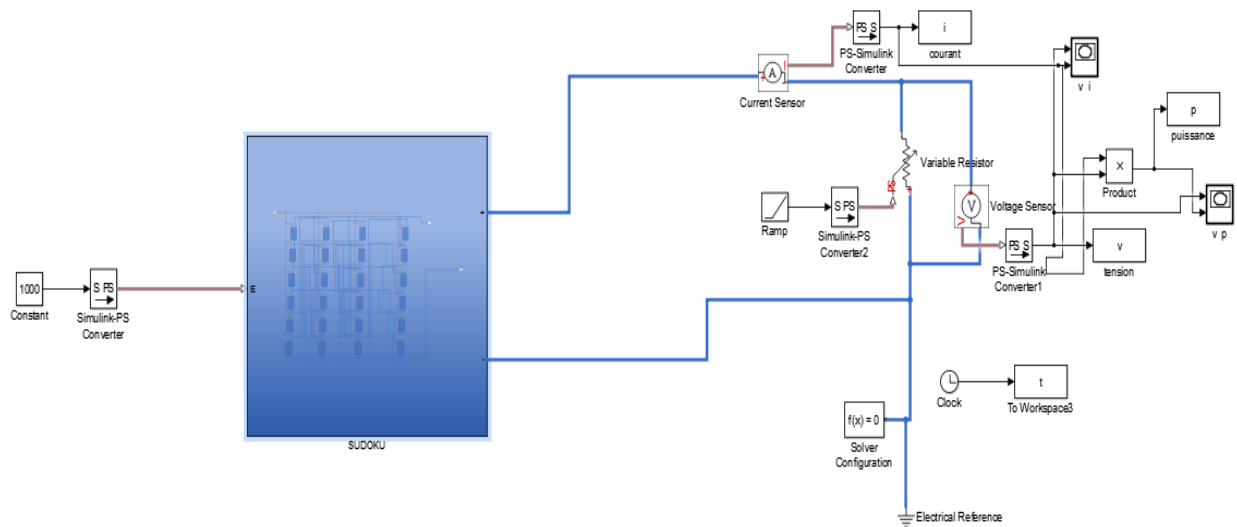


Figure III.44 : Configuration Sudoku sous Simulink

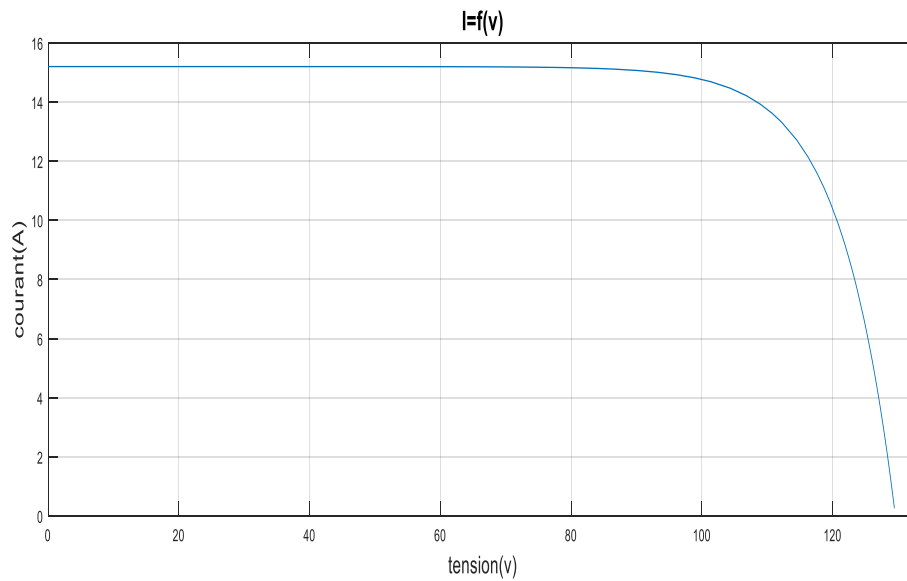


Figure III.45: Caractéristique I-V pour Sudoku

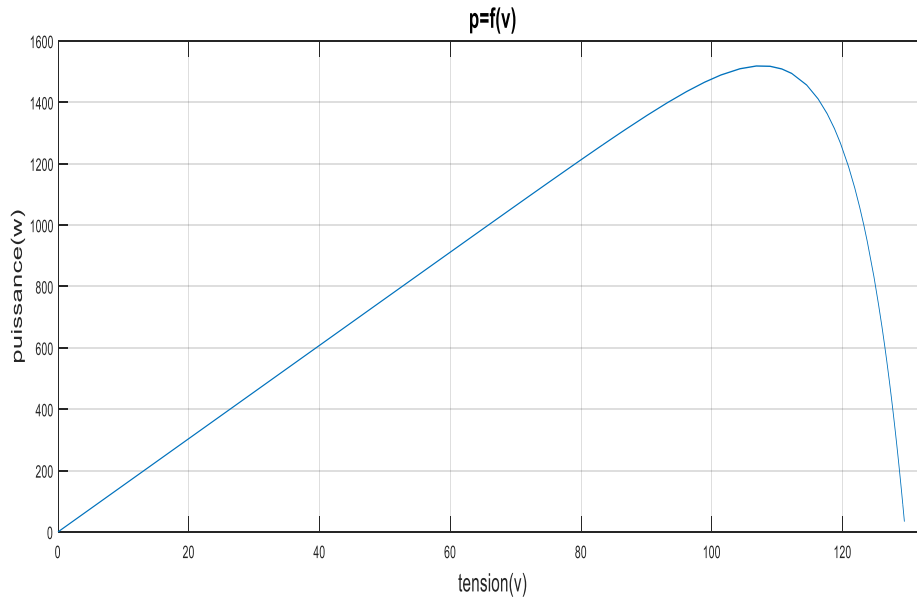


Figure III.46 : Caractéristique P-V pour Sudoku

- Pour les différentes configurations, avec le même nombre de cellules identiques et sous le même éclairage on obtient la même puissance maximale $P_{max} = 1519 \text{ W}$.

III.6 Caractéristiques des ombres :

L'objectif principal de ce travail est de choisir une topologie de configuration de générateur photovoltaïque offrant les meilleures performances lors de l'ombre partielle. Ceci est fait grâce à l'utilisation des caractéristiques de la forme de l'ombre. L'intensité d'une ombre décrit à quel point elle peut filtrer la puissance qui brille sur le générateur photovoltaïque. Cette puissance s'appelle irradiation et se mesure en watts par mètre carré. Le motif d'ombre peut être vertical, horizontal et diagonal. Mais les chercheurs ont également divisé ces types en quatre autres types dépendant de l'existence de l'ombre dans le champ photovoltaïque, comme illustré à la figure : Short Narrow (SN) ; Short large (SW) ; Long Narrow (LN) ; Large Wide (LW). Par exemple, lorsque l'ombre recouvre plus de 50% des modules verticalement et moins de 50% horizontalement, elle s'appelle SW. Si l'ombre est protégée à moins de 50% des modules verticalement et à moins de 50% horizontalement, on l'appelle SN. Cependant, dans ce travail, nous n'avons étudié qu'un seul cas pour chaque type d'ombre afin de choisir la configuration du générateur photovoltaïque qui offre les meilleures performances de puissance. Il est important de noter que dans ce travail, une ombre partielle est considérée comme projetée sur toutes les cellules d'un module PV avec une intensité identique. [15], [16].

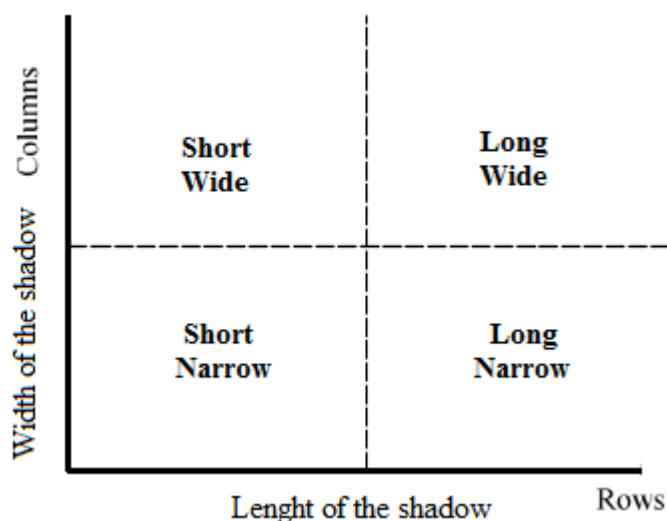


Figure III.47 : Types des scénarios de l'ombrage partiel

Les irradiations choisies pour étudier ces types d'ombre sont respectivement 1000 W / m^2 , 500 W / m^2 et 200 W / m^2 . Les 1000 W / m^2 considérés comme une origine, STC, où le module PV peut donner le maximum de puissance. Les deux autres sont choisis pour représenter une irradiation extrême et moyenne.

Notre objectif est de prévoir la configuration du champ photovoltaïque qui, sous les mêmes conditions d'ombrage partiel, donne les meilleures performances ou présente le minimum de pertes.

Afin d'illustrer chaque scénario, nous avons défini notre système photovoltaïque comme matrice à dimensions finies $L_n \times p$, où $n \in \mathbb{N}^*$ désigne le nombre de modules par lignes et le $p \in \mathbb{N}^*$ représente le nombre de modules par colonnes. Les n lignes sont horizontales et les p colonnes sont verticales. Chaque élément $a_{i,j}$ $\{i = 1 \text{ à } 6 \text{ et } j = 1 \text{ à } 4\}$ d'une matrice représente un module. Par exemple, $a_{4,1}$ représente le module à la quatrième ligne et à la première colonne de la matrice L . Les modules sont placés comme suit :

$$L_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} \end{bmatrix}$$

III.6.1 Effet de l'ombrage Short Narrow (SN) :

Dans ce type de scénarios, le champ photovoltaïque est divisé en trois groupes de modules différents, chaque groupe recevant une irradiation différente. Le premier groupe reçoit une irradiation de 1000 W/m^2 , tandis que le deuxième et le troisième groupe reçoivent respectivement une irradiation de 500 W/m^2 et

200W/m². Les différentes valeurs d'irradiation pour ce scénario sont présentées dans la matrice suivante :

$$L_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} 200 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 500 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \end{bmatrix} \text{W/m}^2 \text{ à } T = 25^\circ\text{C}$$

Sur la figure, nous avons tracé les caractéristiques Puissance-Tension (P-V) des différentes configurations sous l'effet de l'ombrage partiel de type SN.

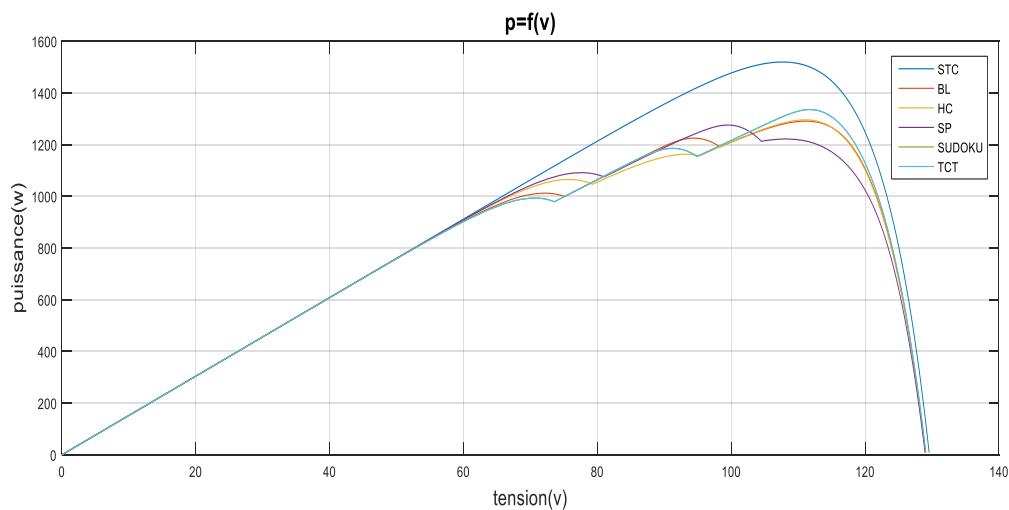


Figure III.48 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l'ombrage partiel SN

De cette figure, nous remarquons que pour toutes les configurations, la position des pics est déplacée vers la droite. Aussi, nous obtenons une légère diminution de puissance entre les configurations SP et Su-Do-Ku. Ces pertes de puissance entre les différentes configurations sont groupées sur le tableau III.1 :

Configuration	PS max (W)	P max (W)	Pertes
BL	1290	1519	15 %
HC	1295	1519	14 %
SP	1275	1519	16 %
SUDOKU	1335	1519	12 %
TCT	1335	1519	12 %

Tableau III.1 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage SN

Les résultats résumés dans le tableau montrent clairement que les pertes de puissance entre les configurations SP, BL et HC sont presque les mêmes. Cependant, la configuration TCT et Su-Do-Ku présentent moins de pertes et fournissent des puissances identiques car la position des modules n'a pas été configurée dans la configuration TCT pour atteindre celle du TCT amélioré ou (Su-Do-Ku).

III.6.2 Effet de l'ombrage Short Wide (SW) :

Dans ce cas, trois irradiances différentes sont considérées pour le calcul de la puissance du système PV.

$$L_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 200 & 500 & 500 & 500 \\ 200 & 500 & 500 & 500 \end{bmatrix} W/m^2 \text{ à } T = 25^\circ C$$

Dans ce scénario, l'ombrage dépasse le nombre moyen de modules en série pour la même colonne et le nombre moyen de modules connectés en parallèle.

En outre, la répartition de l'ombrage doit dépasser un nombre moyen de modules connectés en parallèle.

Les résultats de simulation sont présentés sur la figure III.43:

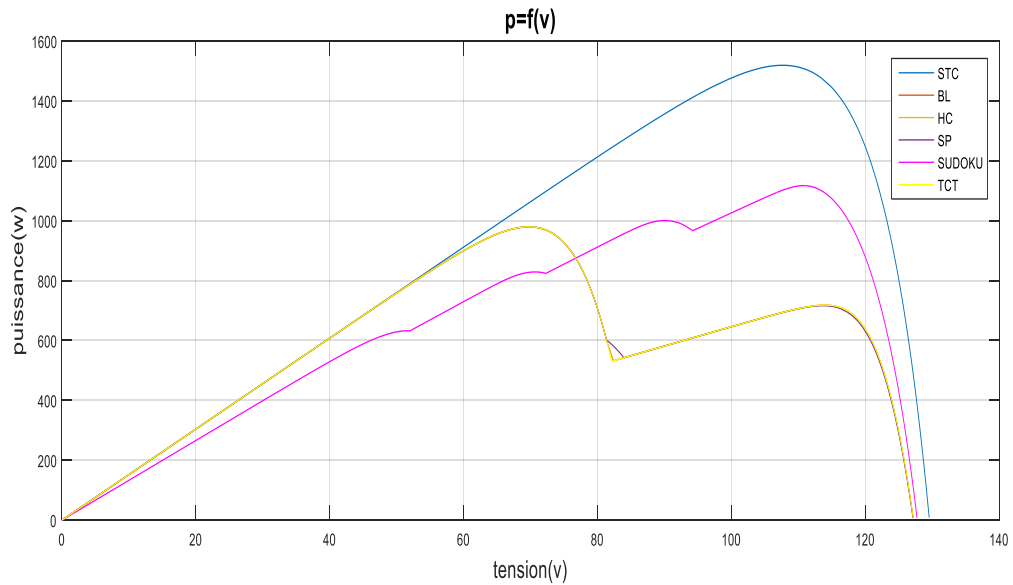


Figure III.49 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l'ombrage partiel SW

Ces caractéristiques montrent l'apparition de pics locaux dans les configurations SP, BL, HC et TCT qui correspondent à la quantité d'ombrage causé par ce scénario SW. Tandis que la configuration Su-Do-Ku ne fournit qu'un pic maximal et ne montre pas des changements importants. Elle sera donc considérée comme la meilleure solution pour résoudre le problème des multiples pics. Les performances des différentes configurations, en termes de pertes de puissance, sont résumées dans le tableau suivant :

Configuration	PS max (W)	P max (W)	Pertes
BL	979	1519	35%
HC	979	1519	35%
SP	979	1519	35 %
SUDOKU	1117	1519	26 %
TCT	979	1519	35 %

Tableau III.2 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage SW

Ce tableau montre que la puissance maximale des configurations SP, BL, HC et TCT est la même. En revanche, la configuration Su-Do-Ku présente moins de pertes et fournit une puissance avec une augmentation de 14 % par rapport aux autres. Cette augmentation est due à la dispersion de l'ombrage sur les différentes rangées.

III.6.3 Effet de l'ombrage Long Narrow (LN) :

Pour ce scénario, deux modules en série reçoivent une irradiation de $200\text{W} / \text{m}^2$ et deux autres connectés au premier reçoivent une irradiation de $500\text{W} / \text{m}^2$, comme indique dans la matrice ci-dessous :

$$L_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} 1000 & 1000 & 1000 & 200 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 200 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 500 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 500 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \end{bmatrix} \text{W}/\text{m}^2 \text{ à } T = 25^\circ\text{C}$$

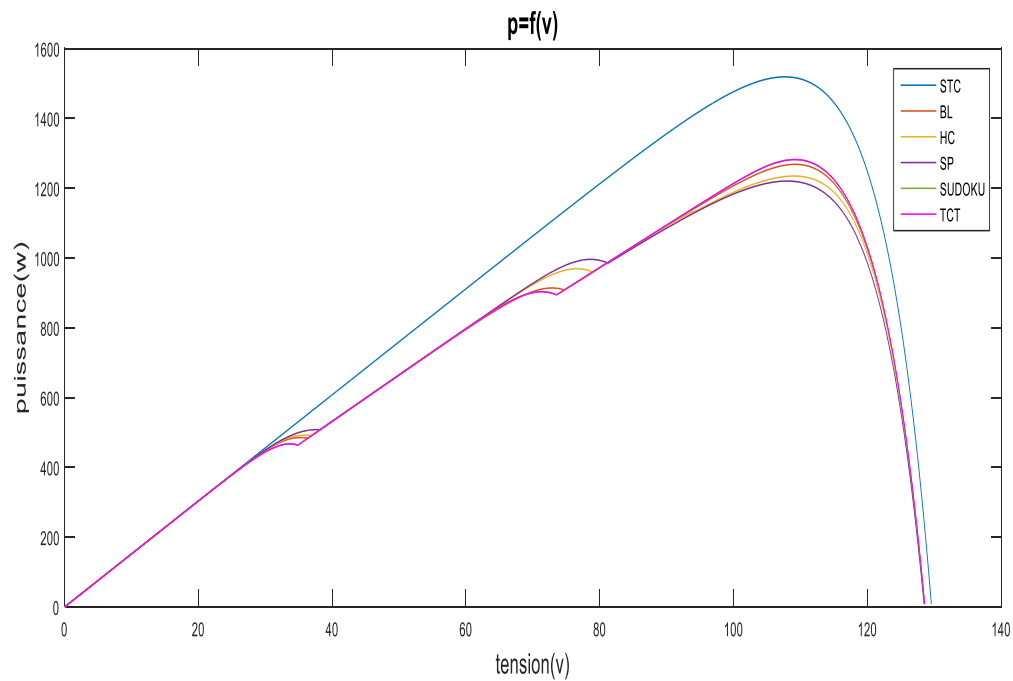


Figure III.50 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l'ombrage partiel LN

L'effet de l'ombrage est le même pour les différentes configurations pour ce type de scénario (LN)

Configuration	PS max (W)	P max (W)	Pertes
BL	1268	1519	16 %
HC	1235	1519	18 %
SP	1220	1519	19 %
SUDOKU	1282	1519	15 %
TCT	1282	1519	15 %

Tableau III.3 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage LN

III.6.4 Effet de l'ombrage Long Wide (LW) :

La matrice ci-dessous expose le modèle d'ombrage LW. L'ombrage pour la même colonne dépasse la moitié des modules en série et dépasse également la moitié du nombre moyen de modules connectés horizontalement.

$$L_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} 1000 & 1000 & 1000 & 200 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 200 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 200 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 200 \\ 500 & 500 & 500 & 500 \\ 500 & 500 & 500 & 500 \end{bmatrix} \text{W/m}^2 \text{ à } T = 25^\circ\text{C}$$

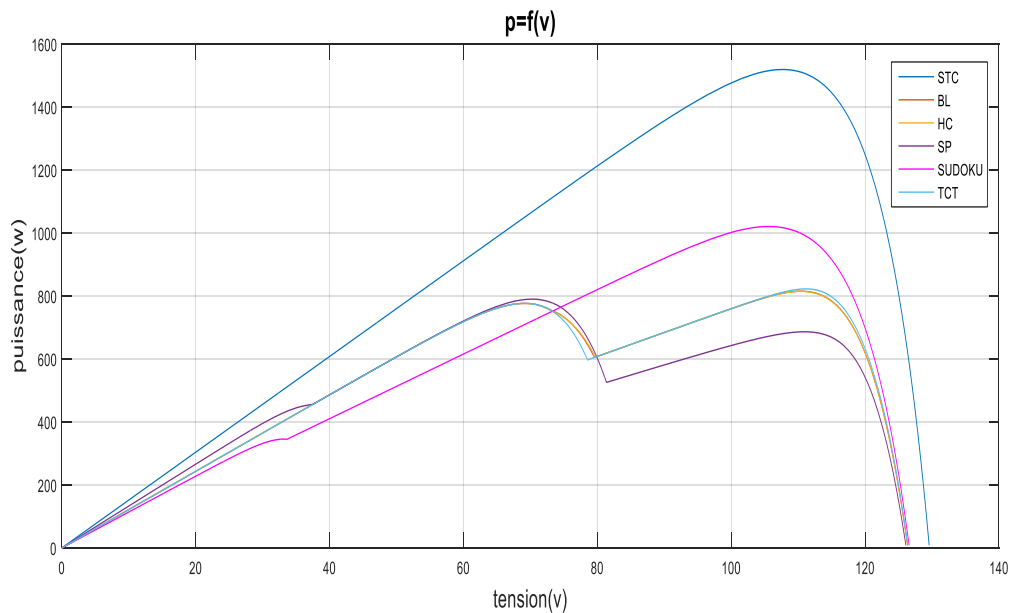


Figure III.51 : Caractéristiques P-V de différentes configurations sous l'ombrage partiel LW

La comparaison des puissances pour différentes configurations sous le modèle LW est résumée dans le tableau III.4 :

Configuration	PS max (W)	P max (W)	Pertes
BL	815	1519	46%
HC	814	1519	46%
SP	789	1519	48%
SUDOKU	1020	1519	32%
TCT	822	1519	45%

Tableau III.4 : Comparaison des puissances de différentes configurations sous l'ombrage LW

La configuration Sudoku fournit la meilleure puissance et de faibles pertes par rapport aux autres configurations SP, BL, HC et TCT. Cependant, les pertes des configurations SP, BL, HC et TCT peuvent atteindre 48%. Les résultats précédents pour les configurations PV de différents modèles sont présentés dans le tableau 6. Il servira à comparer les puissances et les pertes de puissance pour différentes configurations sous différentes ombres. On peut supposer que :

- Les configurations SP, BL, HC et TCT fournissent les mêmes puissances maximales sous le scénario SW.

Configuration	SN		SW		LN		LW	
	PS max	Pertes	PS max	Pertes	PS max	Pertes	PS max	Pertes
SP	1275	16%	979	35%	1220	19%	789	48%
BL	1290	15%	979	35%	1268	16%	815	46%
HC	1295	14%	979	35%	1235	18%	814	46%
TCT	1335	12%	979	35%	1282	15%	822	45%
Su-Do-Ku	1335	12%	1117	26%	1282	15%	1020	32%

Tableau III.5: Puissances maximales et pertes de puissance des différentes configurations

- La configuration du TCT a les mêmes performances que Sudoku sous le modèle d'ombre SN et le modèle LN.
- La configuration Sudoku présente les meilleures performances, c'est-à-dire la perte de puissance la plus faible et donc la puissance maximale la plus élevée dans les conditions étudiées.
- Les pertes pour différentes configurations sont si importantes dans le modèle LW suivi de SW, puis LN et SN représentent les pertes les plus faibles.
- Les configurations SP, BL, HC fournissent la même perte de puissance sous tous les modèles

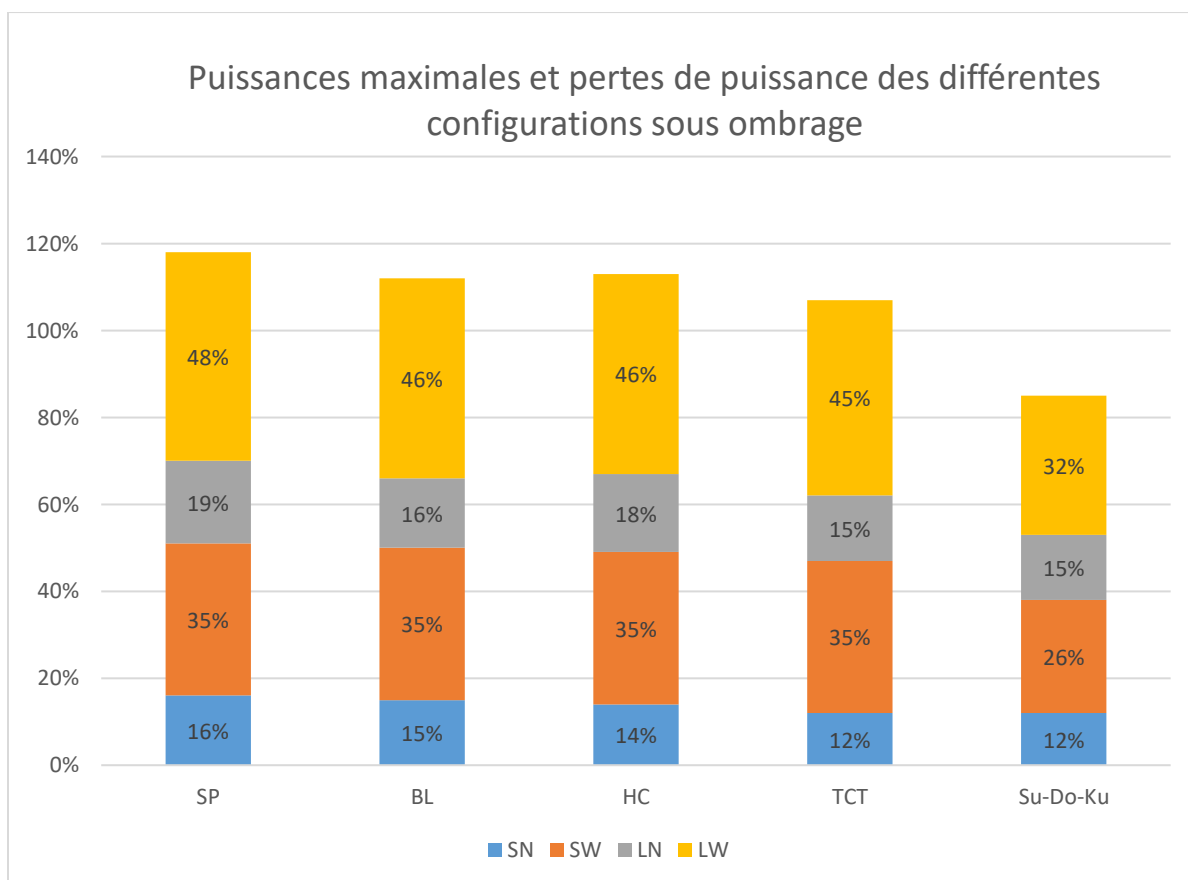


Figure III.52: Puissances maximale et pertes de puissance des différentes configurations sous ombrage

- Pendant l'ombrage partiel, la configuration Sudoku assure les meilleures performances en termes de pertes de puissance les plus faibles et de puissances maximales les plus élevées.
- Le modèle SN représente des pertes plus faibles par rapport aux autres modèles.

III.7 Conclusion :

Les performances des configurations de panneaux photovoltaïques SP, BL, HC, TCT et Sudoku dans des conditions d'ombrage sont étudiées et analysées à l'aide d'un modèle à une diode sous MATLAB / Simulink. Nous avons présenté différentes configurations et quatre modèles d'ombres sont traités dans ce travail. Les résultats obtenus montrent les performances de la configuration de Sudoku qui est formée sur la base de la dispersion des ombres pour améliorer les performances PV globales dans différentes conditions d'ombrage.

L'analyse complète et les études des configurations révèlent que le choix de la configuration optimale et appropriée dépend fortement de la nature et de la position du motif d'ombrage. Globalement, il est supposé que la configuration Sudoku proposée améliore fortement les performances des panneaux photovoltaïques par rapport aux autres configurations PV. De plus, les résultats prouvent que cette approche permet d'assurer une amélioration considérable des performances électriques des panneaux PV.

Conclusion Générale

« The obvious can sometimes be illuminating when perceived in an unhabitual way. »
Daniel Quinn, *Ishmael: An Adventure of the Mind and Spirit*

Conclusion générale :

Le but de ce projet est l'étude, la modélisation et la simulation des différentes configurations des panneaux PV sous l'ombrage partiel.

Dans un premier temps, on a donné des notions sur l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire, l'effet PV, la cellule PV et son principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre était consacré pour la modélisation de la cellule photovoltaïque, les différents facteurs qui influent les caractéristiques I-V et P-V.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les différentes configurations existantes, nous avons utilisé le modèle à une diode pour étudier et modéliser l'effet de l'ombrage partiel sur les configurations des panneaux PV série-parallèle (SP), Bridge-Linked (BL), Honey-Comb (HC), Total-Cross-Tied (TCT) et Su-Do-Ku.

D'après les résultats des simulations obtenues, on peut dire que :

La configuration Sudoku présente les meilleures performances, c'est-à-dire la perte de puissance la plus faible et donc la puissance maximale la plus élevée dans les conditions étudiées.

Les travaux futurs visent à :

- Améliorer la configuration Sudoku.
- Développer de nouvelles configurations des panneaux PV.
- Utiliser les résultats obtenus dans un algorithme intelligent pour le suivi du point maximum global de puissance (GMPP) dans le cas d'ombrage partiel.

Références :

- [1] Energie solaire, calculs et optimisation, Jaques BERNARD, page 207.
- [2] Energie solaire, calculs et optimisation, Jaques BERNARD, page 19.
- [3] Energie solaire, calculs et optimisation, Jaques BERNARD, page 24.
- [4] Energie solaire photovoltaïque, 2^e édition, A. LABOURET, M. VILLOZ, page 25.
- [5] Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque 5^e édition, A. LABOURET, P. CUMUNEL, JP. BRAUN, B. FERAGGI, page 19.
- [6] Energie solaire, calculs et optimisation, Jaques BERNARD, page 207.
- [7] M. Belhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. » Mémoire de magister Centre universitaire de Bechar 2007-2008.
- [8] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaique/fonctionnement-cellule-photovoltaique/>
- [9] Energie solaire, calculs et optimisation, Jacques BERNARD, page 223.
- [10] Y.J Wang and P.C Hsu "An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells."
- [11] L. Ishaque, Z. Salama, H. Taheri and Syafaruddin "Modeling and simulation of PV system during partial shading based on two-diode model." Simul. Model. Pract. Theory, vol.19, no.7, pages 1613, 1626. Aug. 2011.
- [12] Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque 5^e édition, A. LABOURET, P. CUMUNEL, JP. BRAUN, B. FERAGGI, page 38.

[13] M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[14] Y.J Wang and P.C Hsu “An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells.”

[15] N. Rakesh and T. V. Madhavaram, ‘Performance enhancement of partially shaded solar PV array using novel shade dispersion technique’, *Front. Energy*, vol. 10, no. 2, pages. 227–239, Jun. 2016.

[16] L. F. L. Villa, D. Picault, B. Raison, S. Bacha, and A. Labonne, ‘Maximizing the Power Output of Partially Shaded Photovoltaic Plants Through Optimization of the Interconnections Among Its Modules’, *IEEE J. Photovolt.*, vol. 2, no. 2, pp. 154–163, Apr. 2012.