



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM

MEMOIRE

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique énergétique et énergie renouvelable

Présenté par :

**Mr
SEMMOUD ABDELLAH**

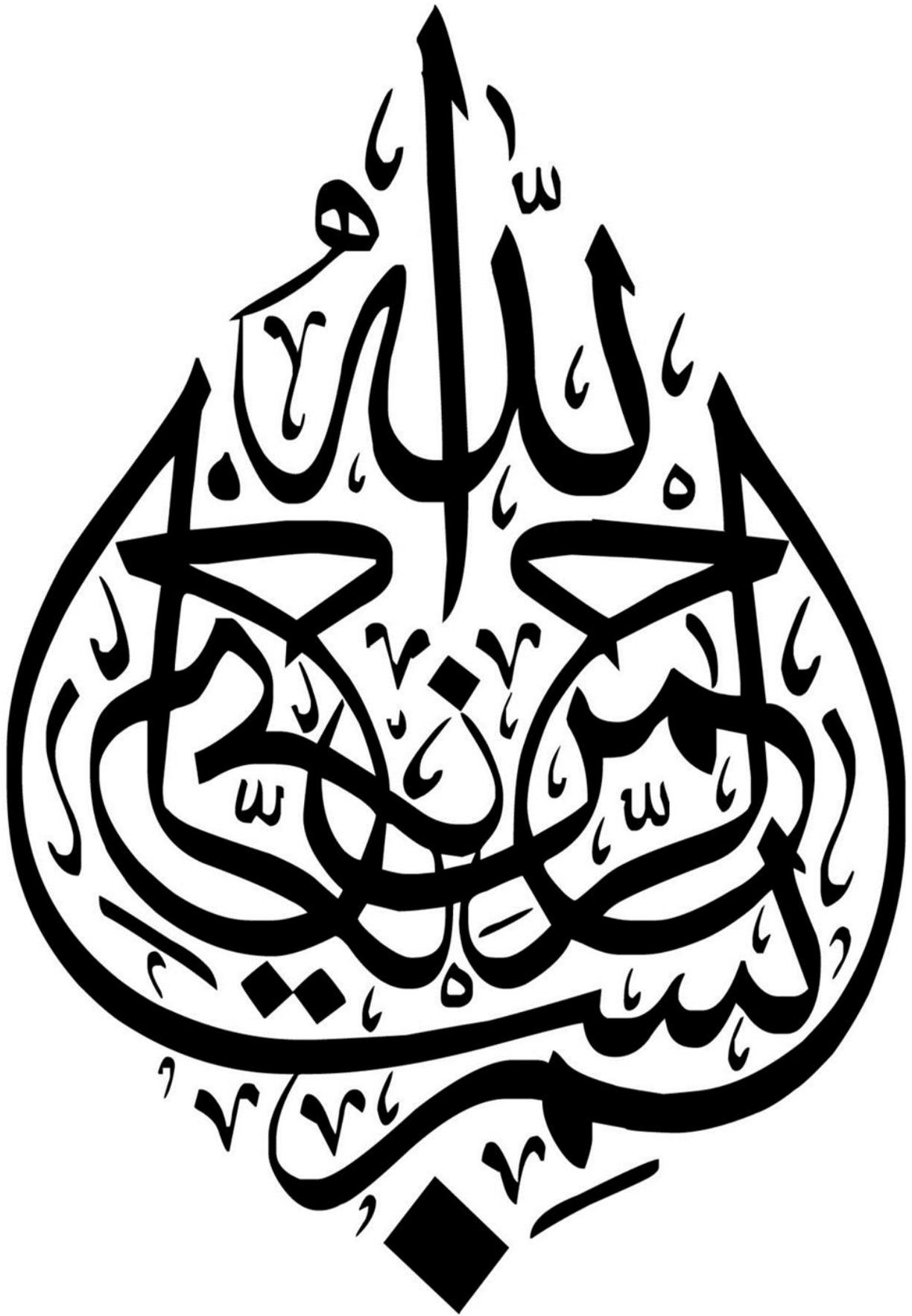
Sur le thème

Effet de l'ombrage partiel sur les paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

Soutenu publiquement le 6 juillet 2021 devant le jury composé de :

Dr BAGHDADLI Tewfik	MCA	Université de Tlemcen	Président(e)
Dr SARI-ALI Inchirah	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant(e)
Dr BOURICHE Amina	MCB	Université de Tlemcen	Examineur (trice)
Dr KAZI-TANI Wassila	MCB	Université de Tlemcen	Examineur (trice)

Année Universitaire : 2020 ~ 2021



Remerciements

J'adresse mon plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon Dieu, le clément et le miséricordieux, lequel j'ai accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je veux exprimer mon gratitude à mon encadreur Mme CHIKH-BLED Inchirah pour l'encadrement qu'elle m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'elle n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur BAGHDADLI

Tewfik qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mémoire.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin mon remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.

Merci à tous !

Dédicace

Je dédie ce travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant.
- Une spéciale dédicace à mon beau-frère le doctorant Botoub mohamed lamine.
- A mes chères sœurs khadidja, Fatiha, Fatima-zohra.
- A mon neveu Anes.
- A mon grand-père **Dr Semmoud Ghouti** et mon grand-père **el hadj Abdelkader Addou**.
- A mes oncles, mes tantes paternelles et mon oncle et mes tantes maternelles.
- A mes cousins et cousines paternelles et mes cousins et cousines maternelles.
- A ma chère tante Nadia et son mari Khaled **Didi** et leur fils Youcef et Mohamed.
- A tous mes amis qui me sont chère : **RAHMOUN** Imad Eddine, Moussa Mohammed racim **Boudjemaa**, ghada **khebichat**, **Brikci** Amine, **Meziane** Amine, **Baba Ahmed** Sido, Youcef **Chekroun**, Youssouf **Tahir**, **Boualem** Habib, **Mred** hikmet Adil, **Bey-zekkoub** islem.
- A tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu durant mon cursus.

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Table de matières.....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des notations.....	xii
Introduction général.....	1
 Chapitre I : L'état de l'art sur les modules photovoltaïques	
I.1 Introduction.....	7
I.2 L'énergie solaire.....	7
I.2.1 Le soleil.....	7
I.2.2 Rayonnement solaire.....	8
I.2.3 Caractéristique du rayonnement solaire.....	9
I.2.4 Différents types de rayonnement.....	11
I.3 Principe de la physique de semi-conducteur.....	12
I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques.....	12
I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques.....	13
I.3.2.1 Semi-conducteurs de type P (accepteur).....	14
I.3.2.2 Semi-conducteurs de type N (donneur).....	16
I.3.3 Semi-conducteur compensé.....	18
I.4 Formation de la jonction PN.....	18
I.5 La cellule photovoltaïque.....	22
I.5.1 Définition.....	22
I.5.2 La structure de la cellule photovoltaïque.....	22
I.6 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	23
I.7 Type de cellules photovoltaïques.....	24

I.7.1 La filière silicium.....	24
I.7.1.1 Les cellules à silicium monocristallin	24
I.7.1.2 Les cellules à silicium polycristallin.....	25
I.7.1.3 Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe.....	26
I.7.1.4 Silicium en ruban	26
I.7.2 La filières CIS et CdTe (les chalcogénures)	27
I.7.3 Les cellules III-V multi jonctions.....	27
I.7.4 La filière organique.....	28
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques.....	28
I.8.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque.....	28
I.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	29
I.9 Conclusion.....	29
I.10 Bibliographie.....	30

Chapitre II : Modélisation du module photovoltaïque

II.1 Introduction.....	33
II.2 Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	33
II.2.1 La modélisation d'une cellule PV une diode.....	34
II.2.1.1 Modèle précis.....	35
II.2.1.2 Modèle Idéal.....	36
II.2.2 La modélisation d'une cellule PV deux diodes.....	38
II.2.3 Comparaison entre les deux modélisations.....	39
II.3 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule PV.....	40
II.3.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})	40
II.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{co})	40
II.3.3 Facteur de forme (FF)	41
II.3.4 Le rendement de la conversion PV.....	41
II.4 Les paramètre influant sur la caractéristique I-V.....	42
II.4.1 Influence de la température.....	42
II.4.2 Influence de l'éclairement.....	43
II.4.3 Influence des résistances série et shunt.....	44

II.5 Association des cellules photovoltaïques.....	46
II.5.1 Association en série.....	46
II.5.2 Association en parallèle.....	47
II.5.3 Association mixte (parallèle et série)	48
II.5.4 L'effet des diodes en séries et parallèles dans un groupement de modules.....	49
II.6 Conclusion	50
II.7 Bibliographie.....	51

Chapitre III : Étude et comparaison des modules photovoltaïques sous l'effet d'ombrage partiel

III.1 Introduction.....	54
III.2 Définition de l'ombrage.....	54
III.2.1 Ombrage aléatoire à court terme.....	54
III.2.2 Ombrage périodique à moyen terme	56
III.2.3 Ombrage continu à long terme.....	57
III.3 L'ombrage partiel du module PV.....	58
III.4 Phénomène d'ombrage sur les caractéristiques I-V.....	59
III.5 les problèmes d'ombrage sur une installation photovoltaïque.....	60
III.5.1. Endommagement des modules par effet "point chaud".....	61
III.6 Protections classique d'un GPV.....	62
III.6.1 Diode de by-pass.....	62
III.6.2 Diode anti-retour.....	63
III.6.3 Effet ombrage sur les caractéristiques I-V et P-V pour un GPV avec diode Bypass et anti retour	64
III.7 Conclusion.....	66
III.8 Bibliographie.....	67

Chapitre IV : Simulation et Résultats

IV.1 Introduction.....	70
IV.2 Présentation du logiciel PVsyst.....	70
IV.2.1 Pré dimensionnement.....	71

IV.2.2 Conception/Dimensionnement du système.....	72
IV.3 Influence de l'éclairement et la température.....	73
IV.4 L'influence d'ombrage partiel sur un panneau PV.....	76
IV.5 L'effet de la diode By-pass sur les caractéristique P-V dans un panneau photovoltaïque.....	83
IV.6 Application de l'effet d'ombrage au site de Tamanrasset.....	87
IV.6.1 Désignation du projet.....	87
IV.6.2 Les paramètre du site.....	88
IV.6.3 Orientation des panneaux.....	89
IV.6.4 Simulation d'ombrage partiel relatif au site de Tamanrasset pour un panneau Photovoltaïque.....	90
IV.6.5 étude d'effet de l'ombre d'une maison avec cheminé et d'arbre sur un champ Photovoltaïque à Tamanrasset.....	91
IV.7 Conclusion.....	99
IV.8 Bibliographie.....	100
Conclusion générale.....	102
Résumé.....	104

Liste des figures

Chapitre I : L'état de l'art sur les modules photovoltaïques

Figure I.1 : Mouvement de la terre.	8
Figure I.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère (AM0). b) A l'incidence 41.8° (AM1,5).	9
Figure I.3 : Définition de l'Air Mass : $M = 1/\sin(h)$	10
Figure I.4 : Différents composantes du rayonnement.	11
Figure I.5 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (si).	14
Figure I.6 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur Silicium (si) dopé p.	15
Figure I.7 : les niveaux énergétiques dans un matériau semi-conducteur type p.	16
Figure I.8 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (si) dopé N.	17
Figure I.9 : les niveaux énergétiques dans un matériau semi-conducteur type N.	17
Figure I.10 : Diagramme de bandes d'un semi-conducteur de type n en partie compensé ($N_a < N_d$). a. $T_0 = 0K$. b. $T_1 > 50K$: Le dopage équivalent (à température ambiante) est $(N_d - N_a) = n_0$	18
Figure I.11 : Génération de la paire electron-trou.	19
Figure I.12a : Phénomène transitoire ; Figure I.12b : Phénomène permanent.	19
Figure I.13 : Origine des courants opposés circulant dans la jonction PN en court-circuit.	21
Figure I.14 : Représentation schématique de la composition d'une cellule photovoltaïque.	22
Figure I.15 : L'effet photovoltaïque (lumière, cellule photovoltaïque, courant continu)	24
Figure I.16 : Schéma de la cellule PERL de haut rendement.	25
Figure I.17 : Four de silicium polycristallin.	26
Figure I.18 : cellule solaire organique.	28
Chapitre II : Modélisation du module photovoltaïque	
Figure II.1 : schéma électrique d'une cellule PV.	33
Figure II.2 : Le schéma équivalent d'une cellule PV idéal.	36
Figure II.3 : La caractéristique courant-tension de la cellule PV.	37

Figure II.4 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule PV à deux diodes.	38
Figure II.5 : caractéristique ($I_{pv}-V_{pv}$) à une et deux diodes.....	39
Figure II.6 : Densité de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination.....	40
Figure II.7 : Tracé de la courbe $I_p = f(P_v)$ pour différents types de cellules PV.....	42
Figure II.8 : Caractéristique I/V pour différentes températures.....	43
Figure II.9 : La caractéristique I (V) sous différents éclairagements.....	44
Figure II.10 : L'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)	45
Figure II.11 : L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique I(V)	46
Figure II.12 : Cellule-Module-Panneau.....	46
Figure II.13 : Caractéristique I-V résultante d'association de Ns cellules en série.....	47
Figure II.14 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de Ns cellules en parallèle.....	47
Figure II.15 : Groupement de modules en série- parallèle.	49
Figure II.16 : remplacement des diodes en séries et parallèles dans un groupement de modules.....	50

Chapitre III : Étude et comparaison des modules photovoltaïques sous l'effet d'ombrage partiel

Figure III.1 : Exemples de court terme, ombrage aléatoire.....	55
Figure III.2 : Système photovoltaïque installé sur le bord d'une autoroute en Floride.....	56
Figure III.3 : Ombrages périodiques (a) et (c) des structures de montage, (b) en raison de modules adjacents, (d) en raison de l'arbre.....	56
Figure III.4 : Exemples d'ombrage continu.....	57
Figure III.5 : (a) ombrage des panneaux par une cheminée de la maison, (b) fonctionnement de la cellule dans le 3ème quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre.....	58
Figure III.6 : Schéma équivalent d'un système solaire ombragé.....	59
Figure III.7 : Module photovoltaïque avec une cellule touché par l'ombre.	59
Figure III.8 : Effet de l'ombrage d'une seule cellule ombrée sur le module.....	60
Figure III.9 : diodes by-pass associées à un sous-réseau de cellules.	60
Figure III.10 : Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass.....	61
Figure III.11 : diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion des autres strings.....	63
Figure III.12 : Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque et effet d'ombrage d'une cellule.	64

Figure III.13 : Effet d'ombrage sur la caractéristique P-V d'un module PV65

Chapitre IV : Simulation et Résultats

Figure IV.1 : menu principal de logiciel PVsyst.....71

Figure IV.2 : Influence de l'éclairement pour le module polycristallin sur les caractéristiques (P-V et I-V)73

Figure IV.3 : Influence de la température sur la caractéristique (P-V et I-V).74

Figure IV.4 : Influence de la résistance série sur la caractéristique (P-V et I-V)74

Figure IV.5 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique (P-V et I-V). 75

Figure IV.6 : Module Poly 250 WP 60 cells sans ombrage.76

Figure IV.7 : Caractéristique (P-V) pour deux submodule à 20%76

Figure IV.8 : Caractéristique (P-V) pour trois submodule à 20%76

Figure IV.9 : Caractéristique (I-V) pour deux submodule à 20%77

Figure IV.10 : Caractéristique (I-V) pour trois submodule à 20%77

Figure IV.11 : Caractéristique (P-V) pour deux submodule à 50%78

Figure IV.12 : Caractéristique (P-V) pour trois submodule à 50%81

Figure IV.13 : Caractéristique (P-V) pour deux submodule à 70%82

Figure IV.14 : Caractéristique (P-V) pour trois submodule à 70%82

Figure IV.15 : placement de 3 diodes by-pass (D1, D2, D3) dans un panneau PV83

Figure IV.16 : Caractéristique P-V sans diode By-pass.....84

Figure IV.17 : Caractéristique P-V avec deux diodes By-pass.84

Figure IV.18 : Caractéristique P-V avec trois diodes By-pass.....84

Figure IV.19 : Désignation du projet dans PVsyst.....86

Figure IV.20 : Coordonnées géographiques du site de Tamanrasset.88

Figure IV.21 : Diagramme de la trajectoire du soleil.88

Figure IV.22 : Orientation des panneaux dans le site de Tamanrasset.89

Figure IV.23 : Orientation des panneaux dans le site de Tamanrasset dans le cas d'ombrage partiel.....90

Figure IV.24 : Trajectoire du soleil au site de Tamanrasset ombragée partiellement.90

Figure IV.25 : Caractéristique P-V du site de Tamanrasset.....92

Figure IV.26 : Caractéristique de champ photovoltaïque.....93

Figure IV.27 : Caractéristique de l'arbre.....94

Figure IV.28 : caractéristique de la base de maison (Parallélepède)94

Figure IV.29 : caractéristique de toiture de la maison (Toiture + pignons).	95
Figure IV.30 : caractéristique de la cheminée de la maison (Prisme)	95
Figure IV.31 : l'effet l'ombrage la maison et l'arbre sur un champ des panneaux photovoltaïque.	96
Figure IV.32 : Diagramme de facteurs d'ombrage sur le champ PV à Tamanrasset.	96
Figure IV.33 : Diagramme d'énergie incidente au cours de l'année.	97
Figure IV.34 : Diagramme des pertes d'énergie au cours de l'année.	97

Liste des tableaux

Chapitre I : L'état de l'art sur les modules photovoltaïques

Tableau I.1 : Caractéristiques du Silicium.....13

Chapitre II : Modélisation du module photovoltaïque

Tableau II.1 : les différentes conditions d'un module photovoltaïque.36

Chapitre IV : Simulation et Résultats

Tableau IV.1 : Données météorologiques mensuelles de Tamanrasset.....89

Tableau IV.2 : Valeurs des flux solaires relatives au site de Tamanrasset.....92

Liste des Notations

C	Vitesse de la lumière
E	Quantité d'énergie
h	Constante de Planck
ν	Fréquence de l'onde lumineuse
λ	Longueur d'onde
λ_0	Longitude de lieu
φ	Latitude du lieu
Φ	Flux lumineux
H	Angle horaire du soleil
a	Azimut du soleil
h	Hauteur du soleil
γ	La hauteur du capteur
β	Angle d'inclinaison
α	Azimut du capteur
i	Angle d'incidence
N_c	Les densités d'états effectifs respectifs des électrons dans la bande de conduction
N_v	Les densités d'états effectifs respectifs des trous dans la bande de valence
n	Les concentrations d'électrons
p	Les concentrations de trous
n_i	Les concentrations de semi-conducteur intrinsèque
N_d	La densité de dopant de type donneur
N_a	La densité de dopant de type accepteur
E_c	Energie de la bande de conduction
E_v	Energie de la bande de valence
E_g	Energie de gap

E_f	Energie de fermi
I	Rayonnement direct
G	Rayonnement globale
STC	Conditions de Test standard
GPV	Générateur photovoltaïque
MPP	Le point de puissance maximum
N_s	Nombre des cellules en série
N_p	Nombre des cellules en parallèle
K_b	Constante de Boltzmann
FF	Facteur de forme
η	Le rendement des cellules
$T_{a,nom}$	Température ambiante nominale
R_{load}	Résistance de la charge
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance shunt

Introduction générale

Introduction générale

A la suite de la crise pétrolière, une croissance de la demande énergétique dans le monde a largement stimulé la recherche des nouvelles sources de remplacement tel que l'énergie solaire. Cette source est, inépuisable, non polluante, propre, d'une haute fiabilité, et offre une grande sécurité d'utilisation.

L'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [1, 2]. Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, facile à procéder, non toxique). Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient aux environs de 50%. De nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation du substrat, qui est un matériau prédominant pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Son application nécessite l'utilisation de silicium de haute qualité électronique. Le coût du substrat de silicium multi-cristallin (mc-Si) représente plus de 40% du prix total du module.

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable. C'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

En effet, le développement des systèmes de conversion rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système à leur tête le panneau solaire. Ce dernier est composé de plusieurs cellules solaires qui nécessitent étude et compréhension. Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature pour étudier le comportement d'une cellule solaire et déterminer ses caractéristiques en particulier la caractéristique courant- tension et la caractéristique puissance - tension. Ces modèles peuvent être classés en deux groupes : le modèle à deux diodes et le modèle à une diode. De plus, le point donnant la puissance maximale a suscité un intérêt supplémentaire car l'obtention de modèles simplifiés modélisant le comportement de la phot cellule en fonction des conditions climatiques s'avère nécessaire surtout lors de l'étape de dimensionnement. Deux modèles établis dans la littérature ont été revus et leurs résultats comparés.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'influence de l'effet d'ombrage partiel sur la production énergétique et les moyens de limiter son impact sur le point de puissance maximale afin d'améliorer le rendement des systèmes solaires photovoltaïques.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous allons introduire la notion de l'énergie solaire, le principe de la physique des semi-conducteurs, le fonctionnement des cellules solaires, les différents types de ces derniers et enfin les avantages et les inconvénients de la technologie photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation d'une cellule PV, l'influence de l'éclairement, de la température et des résistances séries et parallèle sur cette dernière ainsi l'association des cellules PV en série et en parallèle.
- Le troisième chapitre traite les différents types d'ombrage influant sur la cellule et le panneau photovoltaïque, nous abordons ensuite l'impact de l'ombrage sur la caractéristique I-V en développant l'effet de la diode by-pass dans le module photovoltaïque.

Dans le quatrième chapitre nous consacrons notre étude à la simulation numérique :

Introduction générale

- nous présentons le logiciel que nous avons utilisé PVsyst qui nous permet d'étudier l'effet de l'ombrage partiel sur un panneau PV, trois cas d'ombrage partiel seront traités et discutés. Ensuite nous représentons les résultats obtenus de l'effet de l'ombrage d'une installation PV dans le site de Tamanrasset.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Bibliographie

[1]Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[2]Cabal. Cédric « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

Chapitre I

*L'état de l'art sur les
modules photovoltaïques*



I.1 Introduction

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kwc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année. Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol [1].

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque. Dans un premier temps, nous décrivons le soleil et son rayonnement. Nous présentons ensuite le principe de la physique des semi-conducteurs avec ses différents types ainsi que le fonctionnement de la cellule solaire. À la fin du chapitre, les différents types des cellules photovoltaïques seront décrites.

I.2 L'énergie solaire

I.2.1 Le soleil

Le Soleil est une étoile de 1391960 km (soit environ 109 fois la Terre) de diamètre. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le système solaire, ce qui a permis la vie sur terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température est $15.57 \times 10^6^\circ\text{C}$ et la pression (340 milliards de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer) est si intense que des réactions thermonucléaires ont lieu. Ces réactions provoquent la fusion de quatre protons (noyaux d'hydrogène) pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La masse de la particule alpha est environ 70 % de la masse des quatre protons. La

différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en hélium. Dans le processus, cinq millions de tonnes d'énergie pure sont libérées [2].

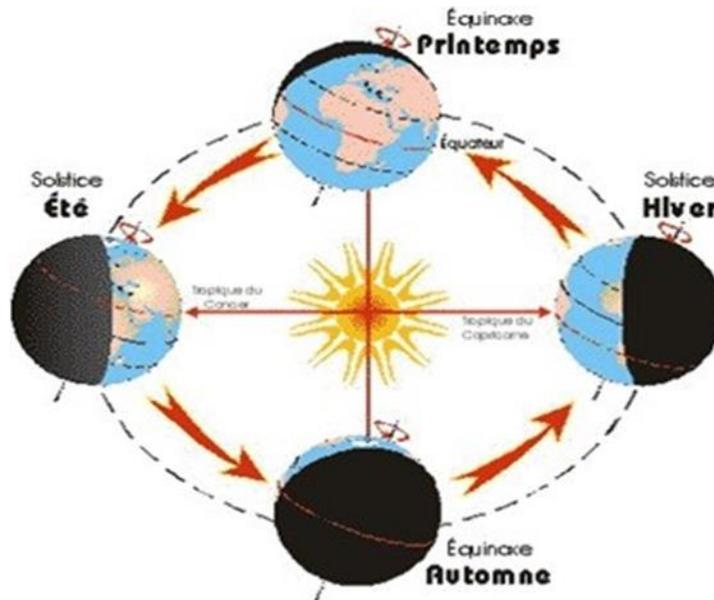


Figure I.1 : Mouvement de la terre [3].

I.2.2 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$ [4], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

La figure (I.2), montre aussi, l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5 (on la définit ci-dessous), soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° « $h=41.8^\circ$ » au niveau de la mer (altitude nulle).

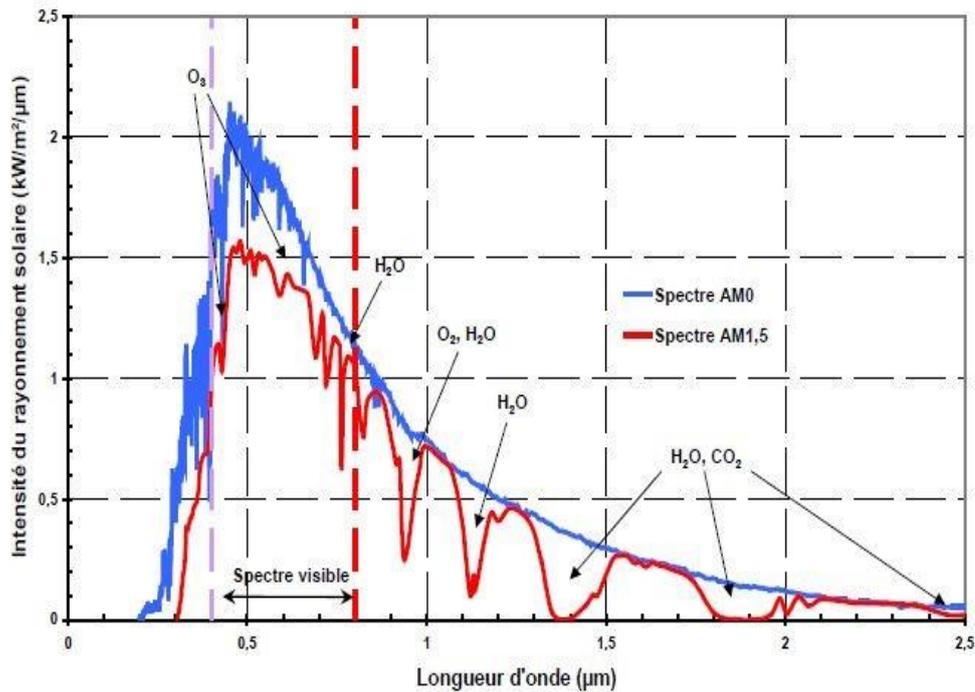


Figure I.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère (AM0).
b) A l'incidence 41.8° (AM1,5) [4].

La distribution des radiations lumineuses émises par le soleil est déterminée par la température de la surface de ce dernier, à savoir 5800 K environ. On considère que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir.

I.2.3 Caractéristique du rayonnement solaire

a) L'atmosphère

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire qui subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelettes, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10 μm .). Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [5].

b) Masse d'air

Chapitre I : L'état de l'art sur les modules photovoltaïques

La masse d'air est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu [6].

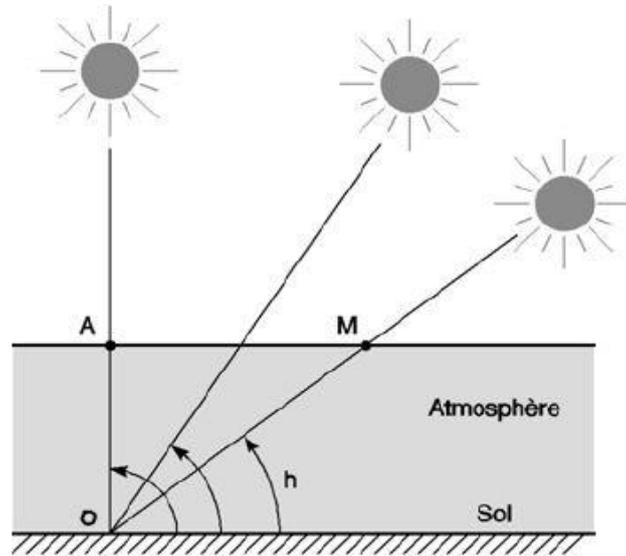


Figure I.3 : Définition de l'Air Mass : $M = 1/\sin(h)$ [6].

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 : $M = 1/\sin(h)$

À l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure (I.3), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.1})$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.2})$$

La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension AM_x , x étant [7] :

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.3})$$

Citons, à titre d'exemple :

- AM_1 : position du Soleil au zénith ; $h=90^\circ$, (au niveau de la mer).
- AM_2 : le Soleil à 30° .
- $AM_{1.5}$: le Soleil à 41.8° .

Et par convention, AM_0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales).

I.2.4 Différents types de rayonnement

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau. L'énergie émise par le soleil est sous forme d'onde électromagnétique dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue :

a- Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est l'éclairement énergétique provenant directement du disque solaire (ciel clair) et reçu par une surface réceptrice normale aux rayons solaires.

b- Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est l'éclairement énergétique provenant de toute la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégiée. Il peut être mesuré par un pyromètre avec un écran masquant le soleil.

c- L'albédo

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réluctance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul [7].

d- Le rayonnement global

Le rayonnement global G est égal à la superposition de ces trois composantes (direct, diffus et réfléchi) : C'est l'éclairement énergétique d'une surface inclinée.

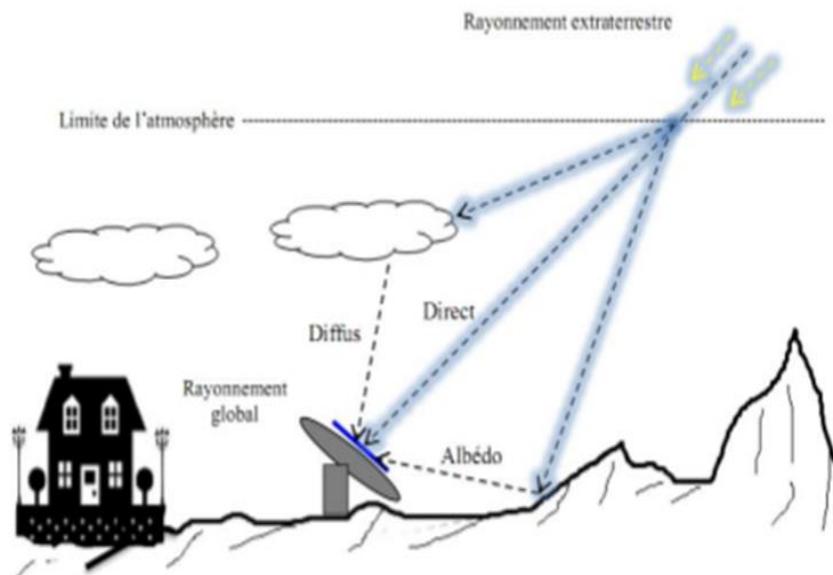


Figure I.4 : Différents composantes du rayonnement [8].

I.3 Principe de la physique de semi-conducteur

Un semi-conducteur est un isolant pour une température de 0 Kelvin. Cependant ce type de matériau ayant une énergie de gap plus faible que l'isolant ($\sim 1\text{eV}$), aura de par l'agitation thermique ($T=300\text{K}$), une bande de conduction légèrement peuplée d'électrons et une bande de valence légèrement dépeuplée. Sachant que la conduction est proportionnelle au nombre d'électrons pour une bande d'énergie presque vide et qu'elle est proportionnelle au nombre de trous pour une bande presque pleine, on déduit que la conduction d'un semi-conducteur peut être qualifiée de «mauvaise».

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 (SiO_2) 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 :

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.1 : Caractéristiques du Silicium [9]

I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est-à-dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, les électrons de la bande de conduction sont générés en laissant un trou dans la bande de valence ; en conséquence, les concentrations d'électrons (n) et de trous (p) sont égales et valent n_i contrairement à un semi-conducteur extrinsèque.

Sachant que :

$$n = N_c * e^{(E_f - E_c)/kT} \quad (I.4)$$

Et :

$$p = N_v * e^{(E_v - E_f)/kt} \quad (I.5)$$

En posant $E_g = E_c - E_v$, largeur de la bande interdite, on peut facilement déduire n_i :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (I.6)$$

Dans un semi-conducteur intrinsèque :

- n_i n'est pas constant

n_i Est d'autant plus grand que :

- E_g est petit
- T Température élevée

Ainsi que le niveau de Fermi :

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3KT}{4} \ln\left(\frac{m_v}{m_c}\right) \quad (I.7)$$

Soit environ à la moitié de la bande interdite, le second terme étant souvent négligeable.

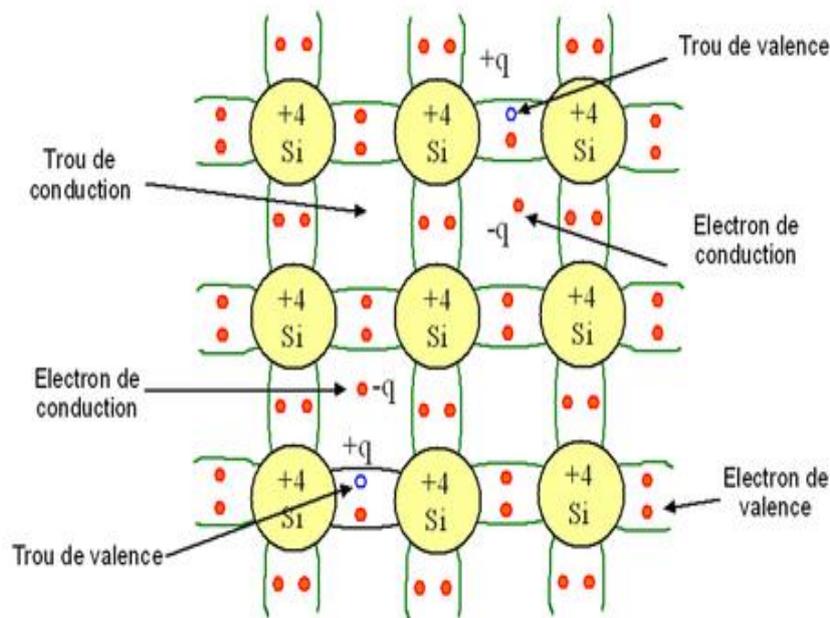


Figure I.5 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (si) [10].

I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...).

I.3.2.1 Semi-conducteurs de type P (accepteur)

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex : Bohr B). Ces impuretés acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

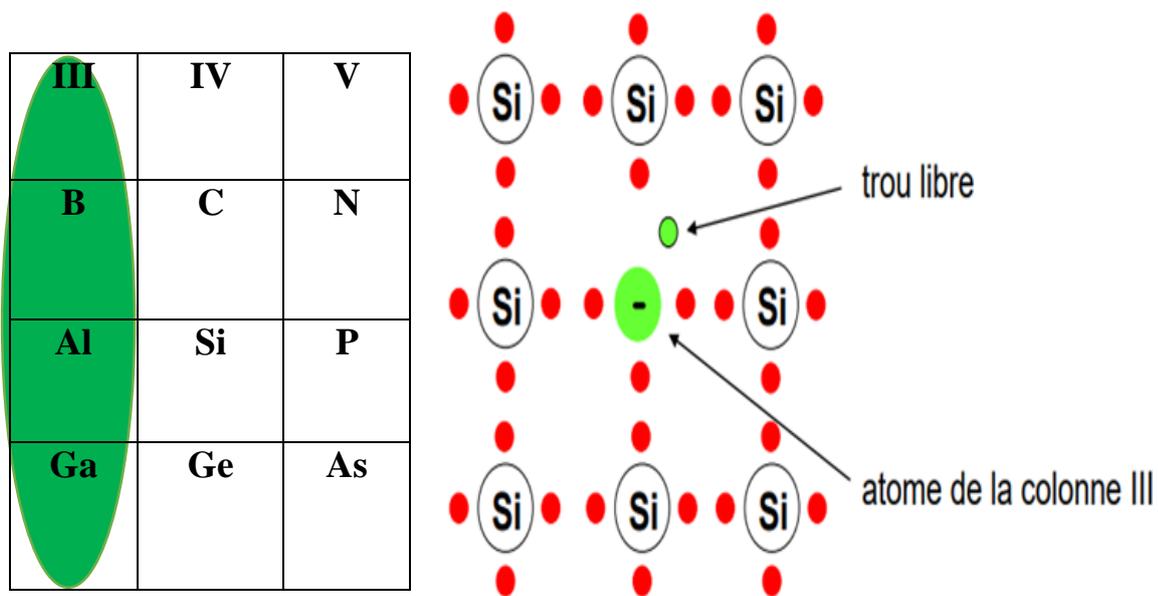


Figure I.6 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur Silicium (si) dopé p

Après l'injection des atomes possédant 3 électrons de valence (colonne III) :

La figure (I.6) met en évidence qu'un semi-conducteur dopé P à une densité d'électrons n plus faible et une densité de trous p plus élevée que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. Donc les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires.

Pour les semi-conducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques $N_a \gg n_i$. Dans le cas d'un type P, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur. Donc l'atome trivalent crée un trou libre dans le cristal de silicium, et reste sous forme ionisée dans le cristal.

Sachant que :

N_a atomes accepteurs libèrent $p = N_a$ trous libres :

$$n \times p = n_i^2 \quad (I.8)$$

Si $N_a = p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, alors $n = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300^\circ\text{K}$

Et donc :

$$\Delta E_p = K_b T \ln \frac{N_a}{n_i} \quad (I.9)$$

Cette énergie est la différence entre l'énergie de fermi intrinsèque et l'énergie des impuretés ajoutées de type p (énergies de fermi vers la bande de valence).

➔ Trous = porteurs majoritaires, électrons = porteurs minoritaires

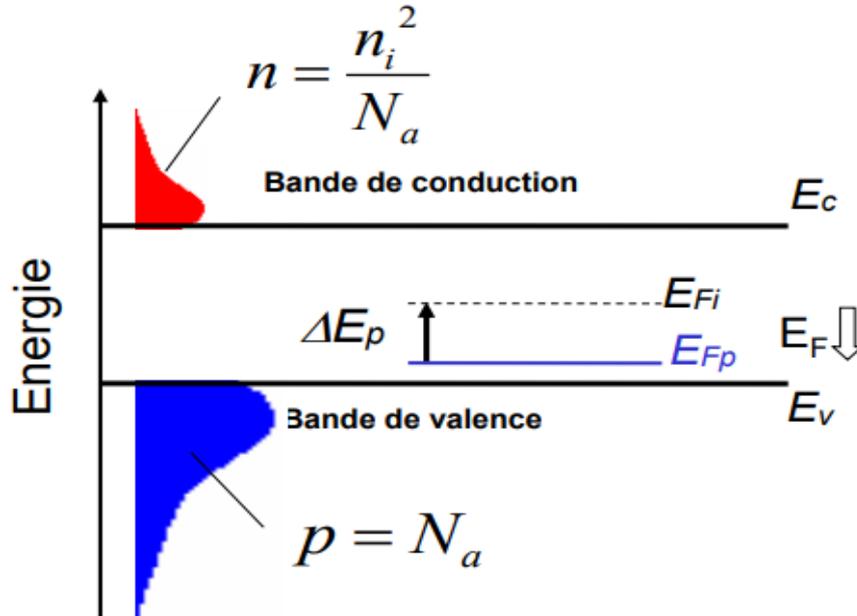


Figure I.7 : les niveaux énergétiques dans un matériau semi-conducteur type p

I.3.2.2 Semi-conducteurs de type N (donneur)

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : arsenic As). Ces impuretés donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

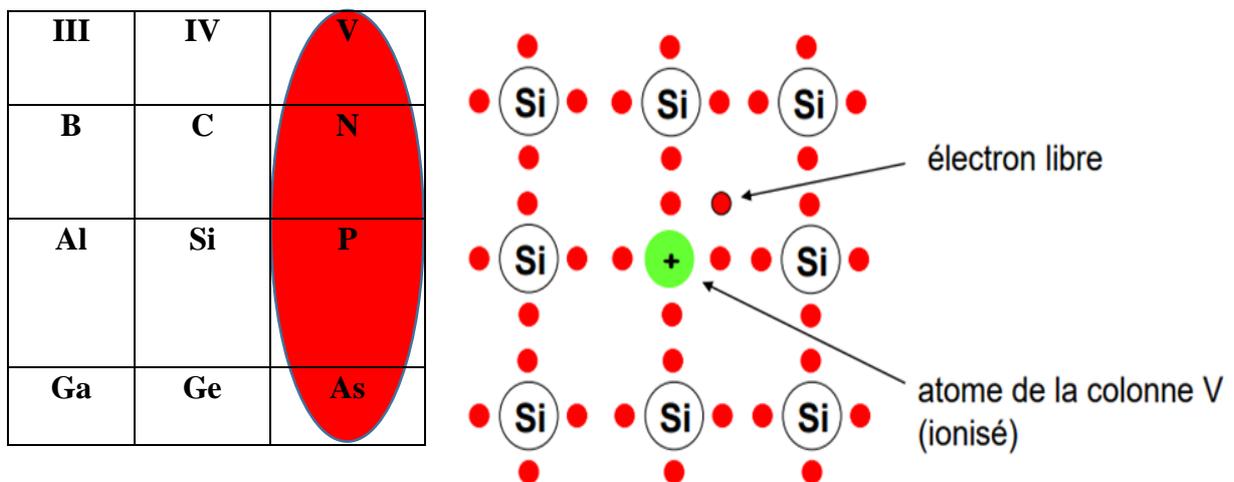


Figure I.8 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (si) dopé N.

Après l'injection des atomes possédant 5 électrons de valence (colonne V) :

La figure (I.8) met en évidence qu'un semi-conducteur dopé N a une densité d'électrons n plus élevée et une densité de trous p plus faible que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. Donc les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.

Sachant que :

N_d Atomes donneurs libèrent $n = N_d$ électrons libres :

$$n \times p = n_i^2 \quad (I.10)$$

Si : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$N_d = n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, alors $p = 100 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300^\circ\text{K}$

Et donc :

$$\Delta E_n = k_b T \ln \frac{N_d}{n_i} \quad (I.11)$$

Cette énergie est la différence entre énergie de fermi intrinsèque et l'énergie des impuretés ajoutées de type N (énergies de fermi vers la bande de conduction) [10].

➡ Electrons = porteurs majoritaires, trous = porteurs minoritaires

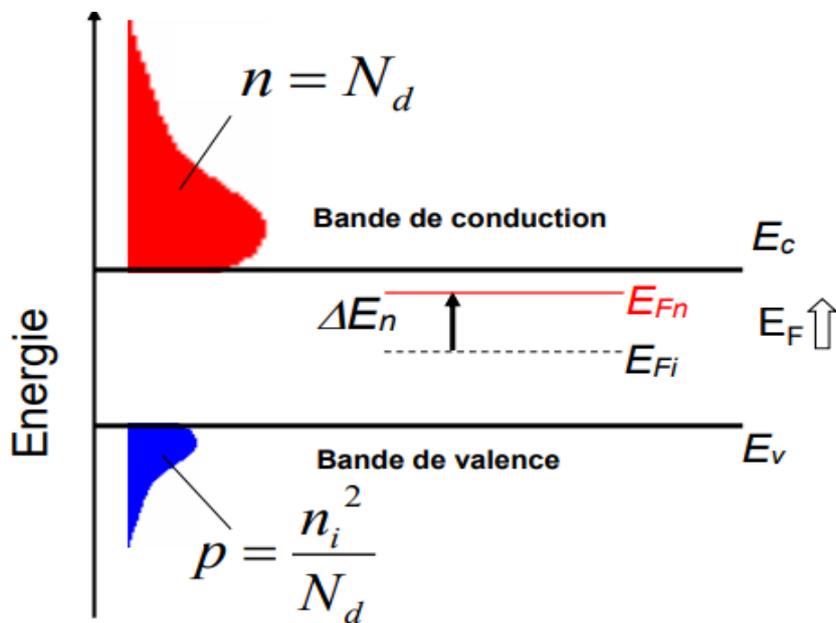


Figure I.9 : les niveaux énergétiques dans un matériau semi-conducteur type N.

I.3.3 Semi-conducteur compensé

Les impuretés qui restent dans un semi-conducteur sont appelées les impuretés résiduelles. Elles peuvent jouer le rôle de donneurs ou accepteurs. Si un semi-conducteur contient des impuretés d'un type donné, on peut le doper avec des impuretés de type opposé afin de compenser l'effet des impuretés résiduelles. Dans une telle situation, on a $N_a=N_d$ et $n=p=n_i$ et le semi-conducteur est dit compensé. Le comportement d'un semi-conducteur compensé est similaire à celui d'un semi-conducteur intrinsèque (E_F est au voisinage du milieu du gap, sa conductivité est faible).

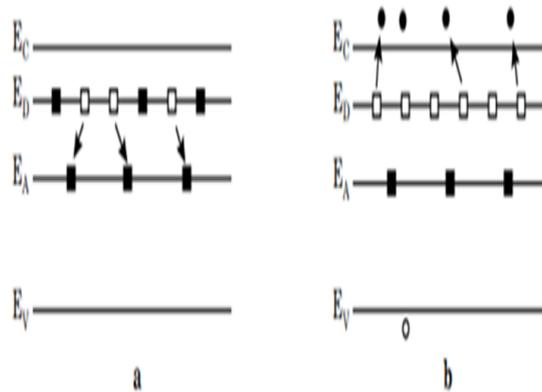


Figure I.10 : Diagramme de bandes d'un semi-conducteur de type n en partie compensé ($N_a < N_d$). a. $T_0 = 0K$. b. $T_1 > 50K$: Le dopage équivalent (à température ambiante) est $(N_d - N_a) = n_0$.

C'est-à-dire les impuretés dopantes (ou même profondes) de type différente peuvent se compenser, partiellement ou totalement. Les semi-conducteurs auront le type de l'impureté dominante. Si on arrive à compenser parfaitement ($N_a = N_d$) on obtient alors un semi-conducteur intrinsèque par compensation (bien qu'il contienne des impuretés dopantes).

I.4 Formation de la jonction PN

Comme tous les semi-conducteurs, le silicium a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Cependant, en entrant suffisamment d'énergie, les électrons peuvent être déplacés de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), générant ainsi des électrons libres.

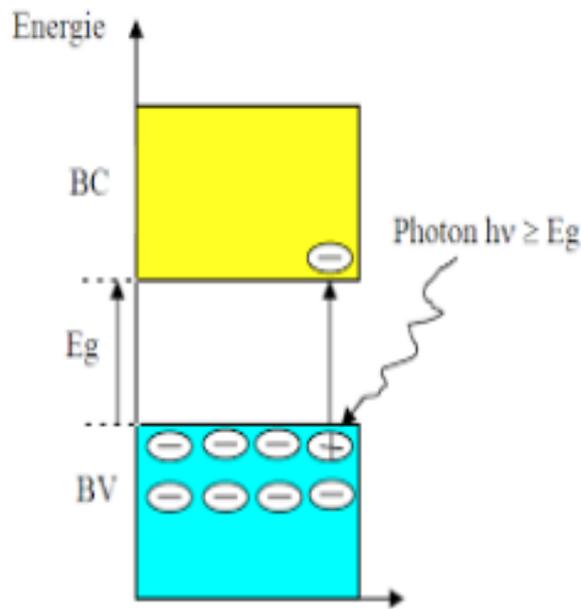


Figure I.11 : Génération de la paire electron-trou

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 de la photo générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Grâce au traitement par dopage, un champ électrique est créé à l'intérieur de la jonction. On rapproche les deux semi-conducteurs de manière à réaliser leur contact physique au niveau de la jonction ; il en résulte deux phénomènes se manifestant de part et d'autre de l'interface P-N [11] :

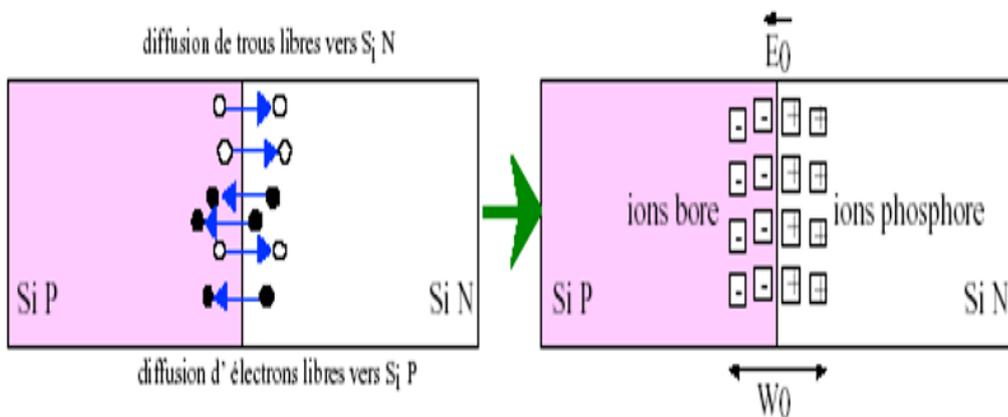


Figure I.12a : Phénomène transitoire

Figure I.12b : Phénomène permanent

- Le premier phénomène est transitoire de durée très brève (figure I-12 a) à savoir la diffusion des trous de la région P vers la région N, puisque le nombre de trous est plus élevé dans P que dans N, donc ils vont avoir tendance à diffuser pour rétablir l'équilibre.
- Le deuxième phénomène, permanent (figure I-12b), les trous qui ont envahi la région N (où ils ont disparu par recombinaison avec les électrons majoritaires dans cette région), ont laissé derrière eux des ions fixes de bore ionisés négativement. De même, les électrons de la région N qui sont passés du côté P ont laissé derrière eux des ions fixes de phosphore ionisés positivement.

Ces ions fixes de bore et de phosphore chargés positivement et négativement respectivement, forment de part et d'autre de la jonction métallurgique, une barrière de potentiel V_ϕ qui provoque l'apparition d'un champ électrique interne E_0 dans une zone de charge d'espace (Z.C.E) d'épaisseur W_0 .

La hauteur de barrière de potentiel V_ϕ et la largeur W_0 de la Z.C.E sont données par les équations suivantes [11] :

$$V_\phi = U_T \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{I.12})$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right) V_\phi}$$

Avec :

$$N_a = N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3},$$

$$W_0 = 0,96 \text{ } \mu\text{m},$$

$$V_\phi = 0,75 \text{ V}$$

$$E_{0max} = 1,56 \text{ } 10^4 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \text{ } 10^{-14} \text{ F/cm},$$

$$\varepsilon_{si} = 12 \text{ (permittivité du silicium).}$$

L'anode et la cathode étant à la masse, la jonction est en court-circuit et son courant doit être nul. En effet la jonction qui est représentée par la figure I.13 est traversée par deux courants opposés qui s'annulent :

- Le courant de saturation I_s correspondant aux porteurs minoritaires des zones N (les trous) et les zones P (les électrons) qui se présentent en bordure de la zone de charge d'espace (Z.C.E) et qui sont alors entraînés par le champ électrique E_0 respectivement dans les zones P et N.
- Le courant ayant pour origine les porteurs libres majoritaires de N et P, très voisins de la Z.C.E, et dont l'énergie est suffisante pour franchir la hauteur de barrière $V\phi$.

La population de ces porteurs, proportionnelle à la fonction $\exp(-V\phi/U_T)$ conduit à un courant donné par l'expression suivante :

$$I_s = I_0 \exp(V\phi/U_T) \quad (I.13)$$

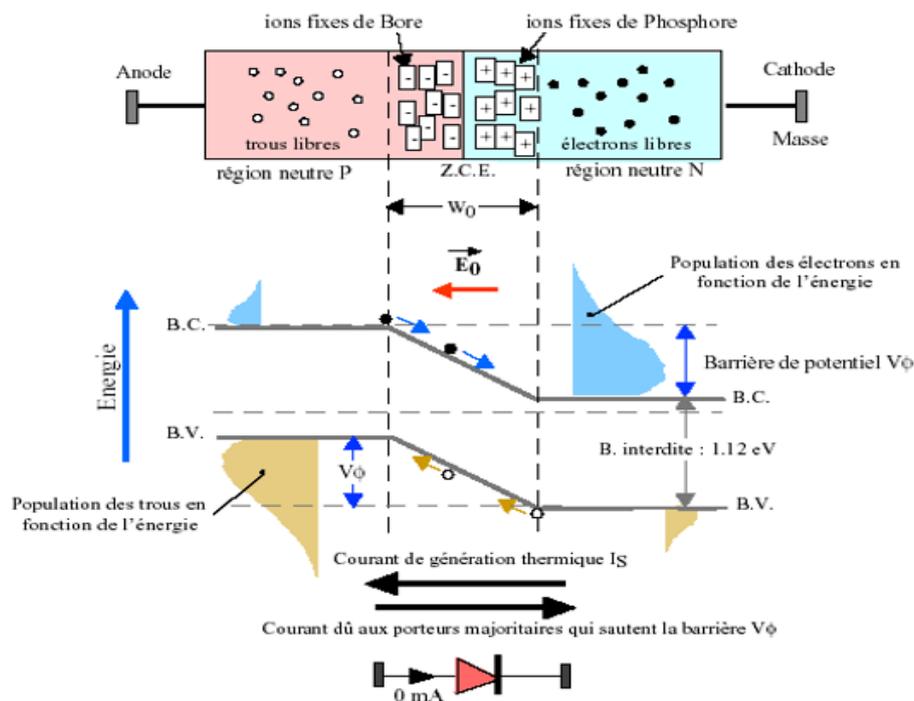


Figure I.13 : Origine des courants opposés circulant dans la jonction PN en court-circuit

I.5 La cellule photovoltaïque

I.5.1 Définition

La cellule solaire est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque.

I.5.2 La structure de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée d'une plaque mince de 125 mm² ou 156 mm² à l'avant et de deux conducteurs métalliques pour former un contact électrique. Son épaisseur est d'environ un millimètre. Le plus souvent, les cellules photovoltaïques sont en silicium. 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

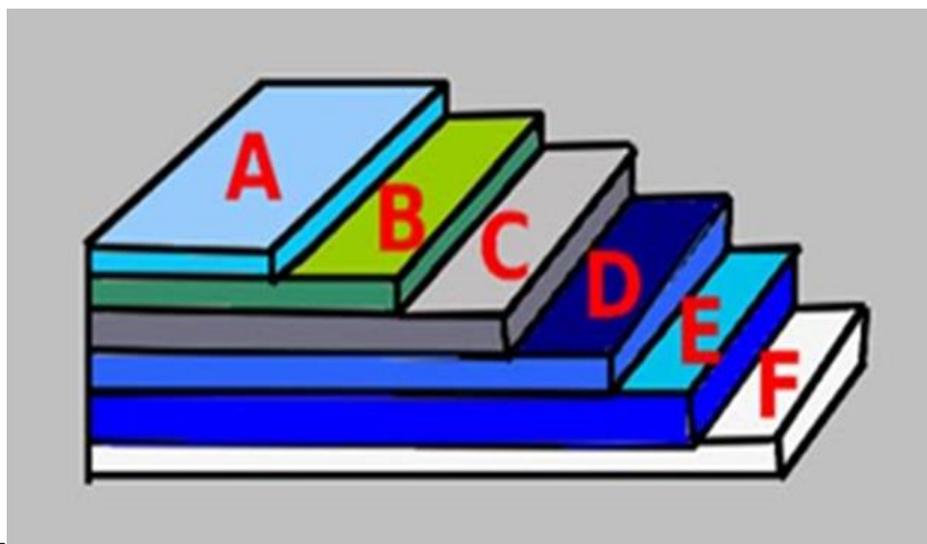


Figure I.14 : Représentation schématique de la composition d'une cellule photovoltaïque.

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 [12].

I.6 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable. L'élément de base dans cette conversion est la cellule solaire [13] et elle est assurée par un matériau (le silicium est le plus utilisé) qui présente des propriétés optiques et électriques spécifiques. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Dès que la lumière pénètre dans le matériau, la conversion d'énergie fait intervenir trois phénomènes physiques :

- L'absorption de la lumière dans le matériau
- Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques
- La collecte des charges.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron- trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule [14].

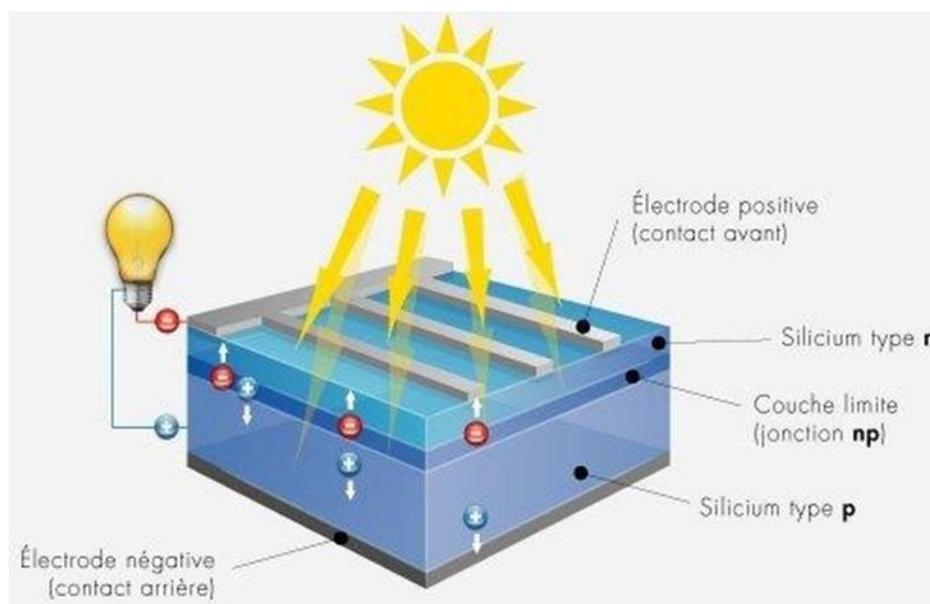


Figure I.15 : L'effet photovoltaïque (lumière, cellule photovoltaïque, courant continu) [13].

I.7 Type de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe), de germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature [15]. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivants.

I.7.1 La filière silicium

La filière silicium représente actuellement 99% de la production photovoltaïque. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

I.7.1.1 Les cellules à silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [16]. Le silicium obtenu est appelé Cz (méthode de Czochralski) et Fz (Float zone), et permet d'obtenir de meilleurs rendements de conversion en laboratoire, de l'ordre de 25% pour des cellules de 4cm^2 (Université de New South Wales, Australie) [17]. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût excessif de production des matériaux.

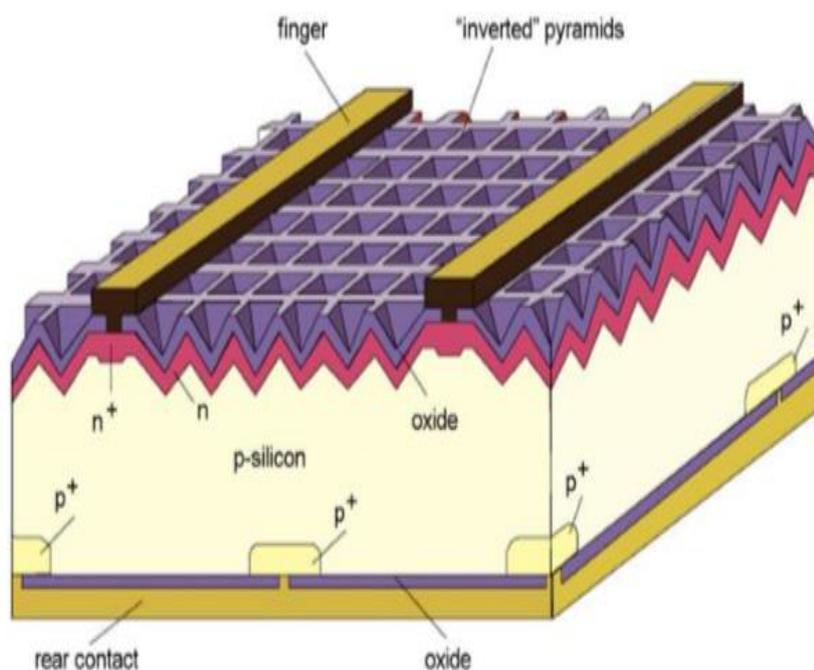


Figure I.16 : Schéma de la cellule PERL de haut rendement [18].

I.7.1.2 Les cellules à silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les joints de grains dans le silicium polycristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. Les rendements de conversion industriels sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 1000cm^2 [19]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures ; voir figure (I.17). On obtient au final des lingots cubique. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.

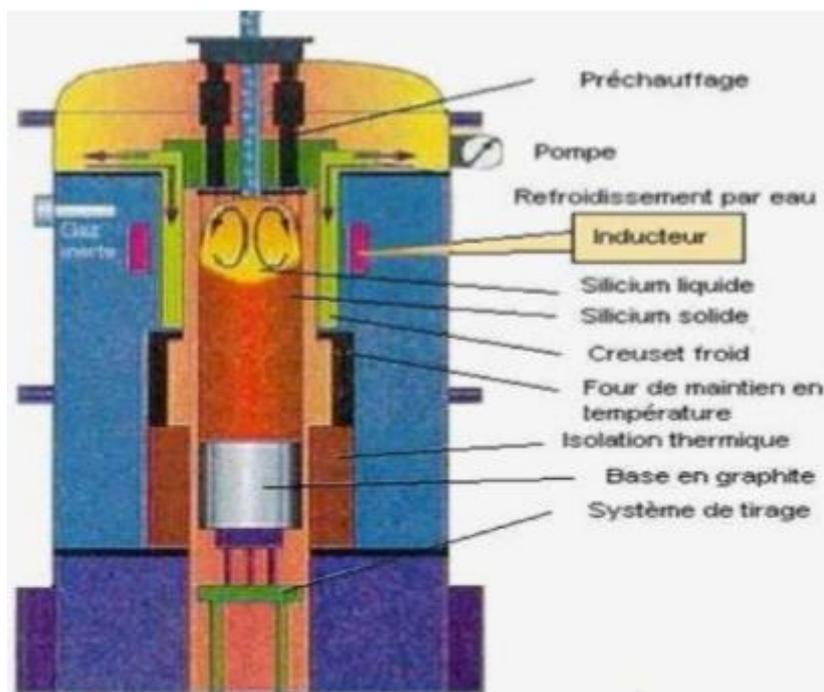


Figure I.17 : Four de silicium polycristallin [20]

I.7.1.3 Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe

Ce sont les cellules qui équipent les petits dispositifs électroniques (calculatrices, montres, ...). Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairément contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces. Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin.

I.7.1.4 Silicium en ruban

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans ont été très séduisantes sur le plan technologique. La méthode a été expérimentée pour produire des plaquettes directement à partir du silicium fondu ; la plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [21].

I.7.2 La filière CIS et CdTe (les chalcogénures)

Les recherches se sont aussi portées vers d'autres matériaux que le silicium, mieux adapté à une utilisation en couches minces tout en délivrant de hauts rendements. Deux filières se sont imposées progressivement, l'une base de tellure de cadmium (CdTe), et l'autre sur les alliages Cu (In, Ga) Se₂ (Cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelée filière CIS. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 μm [22].

Les résultats de rendement de conversion sont près de 11 % sur une surface de 4900 cm² par Solarex. Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière. Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires de type Cu (Ga, In) (Se, S)₂ ont récemment atteint des rendements de conversion record de 19.4% en laboratoire.

I.7.3 Les cellules III-V multi jonctions

Des améliorations peuvent être apportées en empilant les cellules les unes sur les autres. Il s'agit d'absorber la plus grande partie du spectre solaire tout en limitant les pertes par thermalisation. Ainsi, la filière des dispositifs multi jonctions, dite de « troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie PV, mais se cantonne pour le moment aux applications spatiales. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des structures basées sur des empilements de composés III-V en épitaxie. Ces dispositifs permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec le système triple-jonction GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard, et plus de 40 % sous concentration [19].

I.7.4 La filière organique

Cette nouvelle technologie permet la production des cellules solaires organiques légères, fines, flexibles, sur de grandes surfaces, pour des coûts de productions très bas grâce aux techniques d'impression grande-surface bien connues. La société Konarka Technologies basée dans le Massachusetts, leader industriel de cette technologie, espère rendre l'utilisation de l'énergie solaire plus accessible et plus simple d'emploi. Konarka a déclaré qu'ils avaient obtenu un rendement de 6%, contre 15% à 20% pour les cellules solaires en silicium. Même avec un rendement nettement inférieur, ces premiers produits montrent l'intérêt de la technologie photovoltaïque à base de polymères et la nécessité d'augmenter les efforts de recherche dans ce domaine [23].

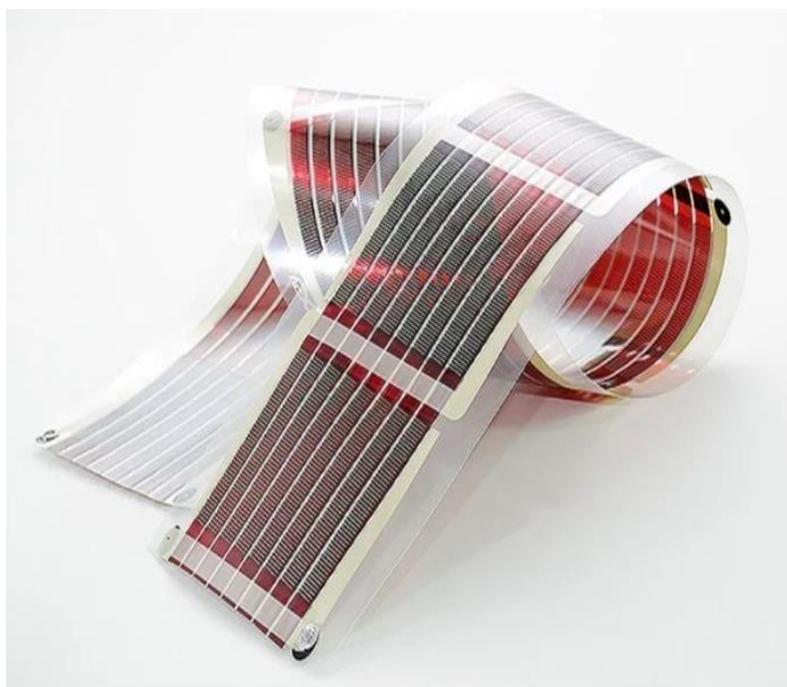


Figure I.18 : Cellule solaire organique [24].

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques

I.8.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité
- Le montage des installations photovoltaïques est simple.
- L'installation PV ne produit aucun bruit.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.

- Le coût de maintenance est bas.
- Elle n'engendre aucune pollution.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante.

I.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïques

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Le Coût élevé des investissements
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités sur le rayonnement solaire et le rôle qu'il peut jouer dans la mise en évidence de l'effet photovoltaïque et nous avons aussi exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées. Dans la dernière partie, nous avons décrit les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la modélisation du module photovoltaïque.

I.10 Bibliographie

- [1] Soltane Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [2] J P. Rivet, Introduction à l'astronomie, CNRS, 2009.
- [3] P. Bessmoulin et J. Olivieri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » (3e édition), Paris, (2000).
- [4] B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [5] A. LAUGER., J.A.ROGER « Les photopiles solaire» technique et documentation ,1981.
- [6] A. Labrouet et M. Viloz, « Energie Solaire Photovoltaïque » (3e édition), Paris, (2006).
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM) Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation, ASTM G173-03 Tables : Extraterrestrial Spectrum, Terrestrial Global 37 deg South Facing Tilt & Direct Normal + Circumsolar .Disponible sur : <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>.
- [8] A. ADJATI, « Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage », Université Abderrahmane MIRA, Bejaïa, Décembre 2012.
- [9] J. Bernard, Energie solaire calcul ET optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004, page204.
- [10] www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_04
- [11] Mme CHIKH-BLED Inchirah née SARI-ALI, « Caractérisation, modélisation et simulation de la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïques: Effet d'ombrage», Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Alegria, 2020.
- [12] M. Belhadj« Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. » Mémoire de magister Centre universitaire de Bechar 2007-2008.

[13] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque (volume 1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.

[14] G. Vériot ET M. Firon, « Les cellules photovoltaïques organiques: vers le tout polymère », Belgique, (2005).

[15] J. Bernard, Energie solaire calcul ET optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004, page 19.

[16] R. Hill, Clean electricity from photovoltaics, Series on Photo conversion of Solar Energy, Vol 1, London, 2001.

[17] Y. Kawazoe, Crystal Growth of Si for Solar Cells, Tohoku University, Japan, 2009.

[18] R. Hezel, A. Goetzberger, High-Efficient Low-Cost Photovoltaics, William T Rhodes, Atlanta USA, 2009.

[19] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, Solar cell efficiency tables (version 36), Prog Photovolt. Res. Appl, 2010; 18: 346–352.

[20] M. Madani, Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces, thèse de magister, Université de Tlemcen, 2006.

[21] A. Goetzberger, V U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy generation, Atlanta, 2005.

[22] A. Ricaud, Modules photovoltaïques « Filières technologies. » Techniques de l'Ingénieur. D3940.

[23] M T. Dang, Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymers conjugués, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2009.

[24] <https://mrmondialisation.org/le-photovoltaïque-organique-fait-un-bon-de-geant-grace-a-une-decouver>

Chapitre II
Modélisation du module
photovoltaïque

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre est consacré à la modélisation et à la présentation des équations caractérisant le fonctionnement et les différents modèles d'une cellule PV. Ensuite nous présentons l'influence des paramètres métrologique (température et éclairement) sur le comportement électrique d'une cellule solaire. Ainsi nous ferons appel à l'étude de la caractéristique I-V pour les différents regroupements entre les cellules photovoltaïque que soit en série ou en parallèle ou mixte qui feront l'objet de notre travail.

II.2 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. En fait une cellule PV est un composant électronique bien connu que l'on appelle "DIODE", composant qui Laisse passer le courant électrique dans un sens (avec une chute de tension de l'ordre de 0,6 volt) et qui bloque son passage dans l'autre sens. Dans le cas de la cellule PV, on s'arrange pour que la surface de la jonction soit la plus grand possible pour collecter le maximum d'énergie solaire.

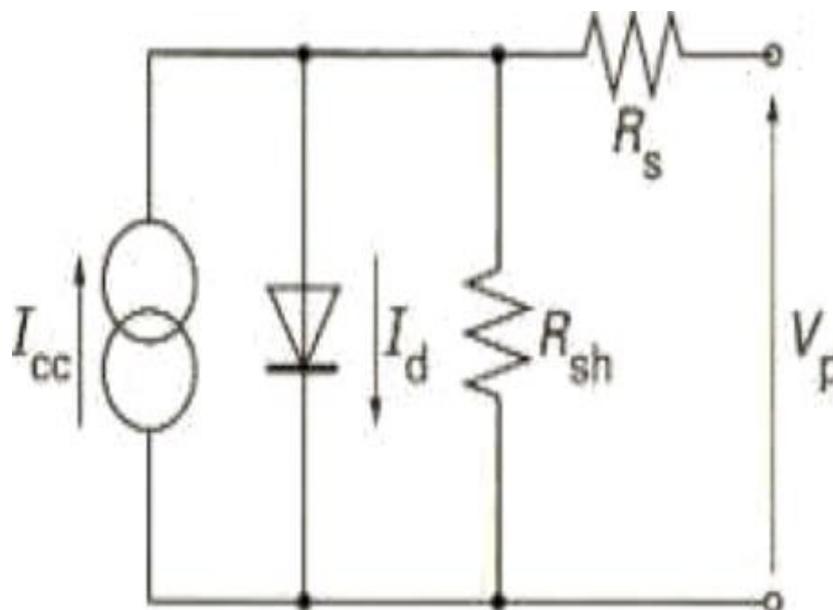


Figure II.1 : schéma électrique d'une cellule PV

On reconnaît le symbole de la diode (traversé par le courant I_d), en parallèle se trouve le générateur de courant I_{cc} qui correspond au flux d'électrons généré par le flux de photons de la lumière (solaire ou autre) au sein de la jonction de la diode. En parallèle à la diode, se trouve la résistance R_{sh} (Résistance shunt) qui correspond aux pertes directes à travers la jonction et en

série vers l'utilisation V_p et I_p , se trouve la résistance R_S (Résistance série) correspondant entre autre aux pertes joules dans les conducteurs.

Aux deux bornes de la photopile PV, l'énergie électrique se récupère sous forme d'une tension V_p et d'un courant I_p .

II.2.1 La modélisation d'une cellule PV une diode

II.2.1.1 Modèle précis

Rappelons tout d'abord que la cellule solaire est la mise en contact de deux tranche de silicium dopé P d'un côté et silicium dopé N de l'autre côté, à laquelle on ajoute des contacts électriques pour collecter le courant. Cette jonction dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu : la diode.

Pour une cellule solaire réelle, on ajoute deux résistance pour tenir compte des pertes internes ; R_S résistance série tient en comptent des pertes ohmiques du matériau, et R_{Sh} résistance parallèle tient en comptent les courants de fuites.

R_S Présente une valeur faible $R_S \ll R_{Sh}$, le modèle de la cellule devient [1] [2] [3] [4] :

En appliquant la loi de Kirchoff on obtient :

$$I_{Pv} = I_{Ph} - I_D - I_{RSh} \quad (\text{II.1})$$

Le courant passant par la résistance R_{Sh} est donné par :

$$I_{RSh} = \frac{V_D}{R_{Sh}} \quad (\text{II.2})$$

Le courant de la jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

La tension V_D est donnée par :

$$V_D = V_{PV} + R_S I_{PV} \quad (\text{II.4})$$

Remplaçons dans l'équation (II.1) les équations (II.2), (II.3) et (II.4) l'équation deviendra :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{Sh}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$V_{th} = \frac{nKT_c}{q}$$

Le photo-courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température, son expression est donné par :

$$I_{ph} = [I_s + K_i(T_c - T_0)] \frac{G}{G_0} \quad (\text{II.6})$$

K_i : Coefficient de la température de I_{ph} donné aussi par le fabricant sur le DATA-sheet,

T_0 : est donné sur le catalogue en STC (Standard Test Conditions).

La température du fonctionnement de la cellule T_c dépend de l'éclairement G et de la température ambiante T_a , selon l'équation empirique suivante [4] [5] [6] :

$$T_c = T_a + C_2 G \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$C_2 = \frac{T_{noct} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad (\text{II.8})$$

Le courant de saturation dépend de la température selon l'expression suivante [1] [7] :

$$I_s = I_{s,0} \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{\frac{qE_g}{nK} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$I_{s,0} = \frac{I_{SC,0}}{e^{\frac{V_{CO,S}}{V_{th,0}} - 1}} \quad (\text{II.10})$$

E_g : L'énergie du band gap.

En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant [6] :

Conditions Nominales	Conditions de Test Standard
Eclairement $G_{nom} = 800s/m^2$	Eclairement $1000s/m^2$
Température ambiante $T_a, nom = 20^\circ C$	Température de la cellule $T_0 = 25^\circ C$
Vitesse du vent : lm/s	

Tableau II.1 : les diffèrent condition d'un module photovoltaïque

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- Le courant de court-circuit $I_{sc}, 0$
- La tension de circuit ouvert $V_{co}, 0$
- La puissance maximale P_{max}

II.2.1.2 Modèle Idéal

Le schéma équivalent d'une cellule PV idéal est représenté sur la figure (II.2). Ce circuit est composé d'une diode et d'une source de courant constant et ($R_s = 0$ et R_{sh} infini) [8] [9], lorsque la cellule est illuminée, un photo-courant apparait dans cette diode, qui dépend de l'intensité de rayonnement.

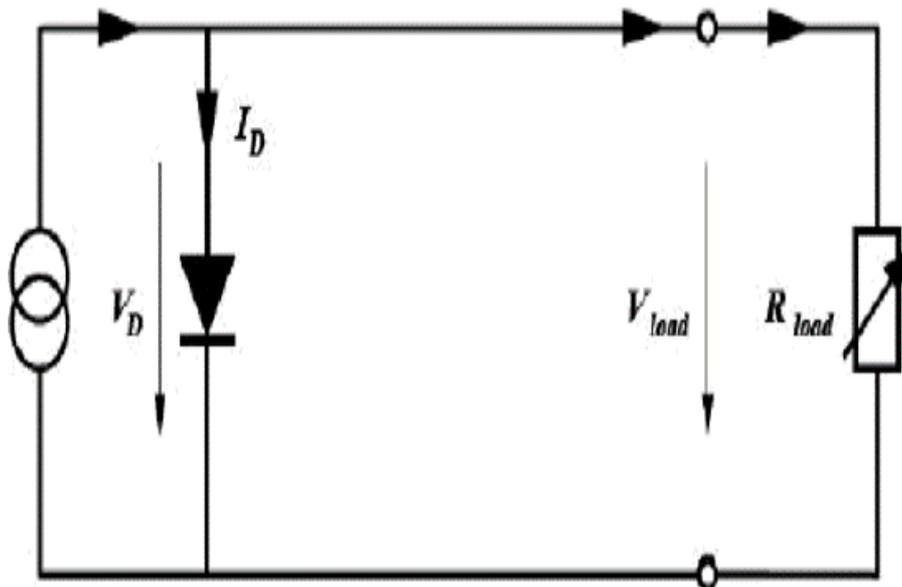


Figure II.2 : Le schéma équivalent d'une cellule PV idéal

Chapitre II : Modélisation du module photovoltaïque

Avec :

I_{Ph} : Photo-courant

I_{Pv} : courant délivré par la cellule

I_D : Courant de diode

V_{Pv} : tension aux bornes de la cellule

I_{Load} : Courant à travers la charge

V_{Load} : tension aux bornes de la charge

D'après la loi de Kirchhoff nous obtenons le modèle mathématique d'une cellule PV idéale suivant [1] [10] [11] :

$$I_{Pv} = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{q \cdot V_{Pv}}{nKT_c}} - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

Où :

- I_{Pv} : Courant délivré par la cellule [A]
- V_{Pv} : Tension aux bornes de la cellule [V]
- q : charge électrique élémentaire [$1, 6 \cdot 10^{-19}$ As]
- K : constante de Boltzmann [$1.381 \cdot 10^{-23}$ s / N]
- T_c : Température absolue de la cellule [N]
- I_S : Courant de saturation de la jonction [A]
- n : Facteur d'idéalité ($1 \leq 2$)

La représentation graphique de cette caractéristique est schématisée sur la figure (II.3).

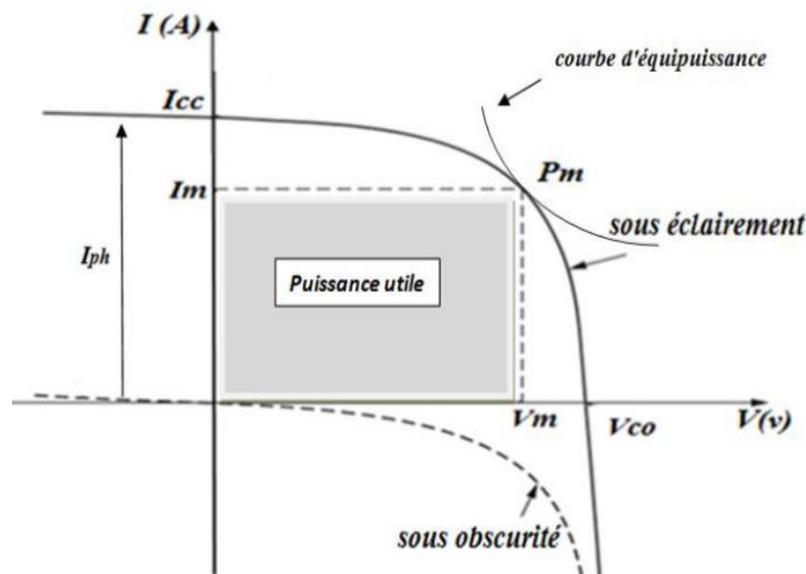


Figure II.3 : La caractéristique courant-tension de la cellule PV.

Si on place une charge non nulle et non infinie aux bornes de la cellule PV sous éclairage, cette dernière fonctionne dans le cas intermédiaire entre le court-circuit (générateur de courant), et le circuit ouvert (générateur de tension). Le point de fonctionnement optimal de

la cellule est celui qui donne une puissance maximale ; c'est-à-dire un courant et une tension maximums.

II.2.2 La modélisation d'une cellule PV deux diodes

Nous avons cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes des porteurs de la jonction P-N. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface de matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma de la cellule devient comme suite [1] [4] [12] :

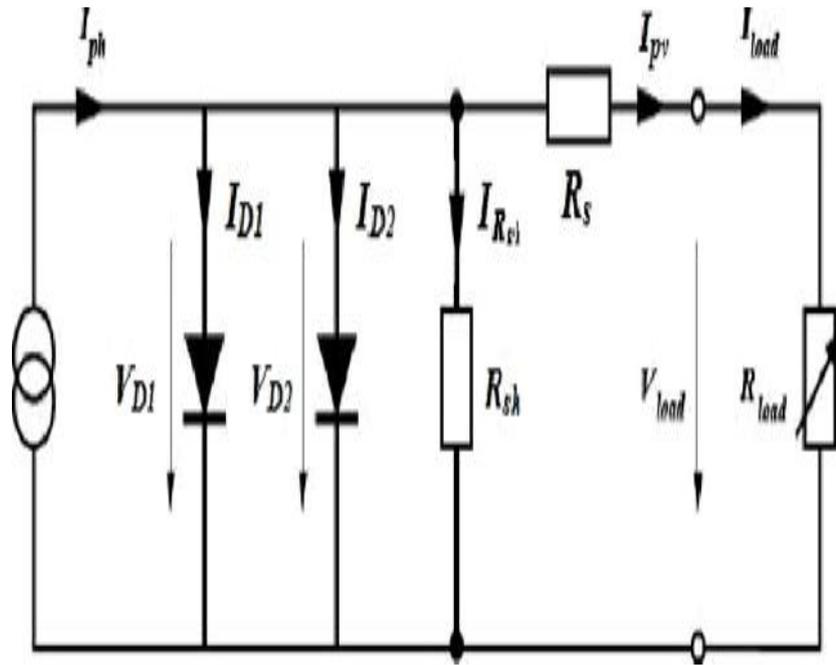


Figure II.4 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule PV à deux diodes

En appliquant toujours la loi de Kirchoff [1] [4] [12] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (\text{II.12})$$

Avec : I_{ph} et I_{sh} qui gardent les mêmes expressions que précédemment.

Les courants de diodes sont donnés par [1] [4] :

$$I_{D1} = I_{S1} \left[e^{\left(\frac{qV_{pv} + R_s I_{pv}}{nKT_c} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II.13})$$

$$I_{D2} = I_{S2} \left[e^{\left(\frac{qV_{pv} + R_s I_{pv}}{2nKT_c} \right)} - 1 \right] \quad (\text{II.14})$$

Les courants de saturation I_{S1} et I_{S2} sont donnés par les relations suivantes [13] :

$$I_{S1} = C_{01}(T_c)^{3n} e^{\left(\frac{-E_g \cdot q}{nKT_c}\right)} \quad (\text{II.15})$$

$$I_{S2} = C_{02}(T_c)^{5/2n} e^{\left(\frac{-E_g \cdot q}{2nKT_c}\right)} \quad (\text{II.16})$$

Les constantes C_{01} et C_{02} sont généralement comprise respectivement entre 150-180 $A \cdot K^{-3}$ et $1.3 - [1.7 \cdot (x) \cdot 10^{-2}] AK^{-5/2}$ pour une cellule de 100cm^2 [1].

En remplaçant les expressions de I_{Ph} , I_{D1} , I_{D2} et I_{Sh} nous obtenons l'équation finale :

$$I_{Pv} = [I_{Sc} + K_i(T_c + T_0)] \left(\frac{G}{G_0}\right) - C_{01}(T_c)^{3n} e^{\left(\frac{-E_g \cdot q}{nKT_c}\right)} \left[e^{\left(\frac{qV_{Pv} + R_S I_{Pv}}{nKT_c}\right)} - 1 \right] - C_{02}(T_c)^{\frac{5}{2n}} e^{\left(\frac{-E_g \cdot q}{2nKT_c}\right)} \left[e^{\left(\frac{qV_{Pv} + R_S I_{Pv}}{2nKT_c}\right)} - 1 \right] - \frac{V_{Pv} + R_S I_{Pv}}{R_{Sh}} \quad (\text{II.17})$$

II.2.3 Comparaison entre les deux modélisations

Afin de mettre en évidence la différence entre les deux modélisations, le doctorant « Mohammed el amine Botoub » a étudié les caractéristique I(V) des deux modélisations pour un ensoleillement et une température donnés.

Les résultats sont donnés sur la figure (II.5).

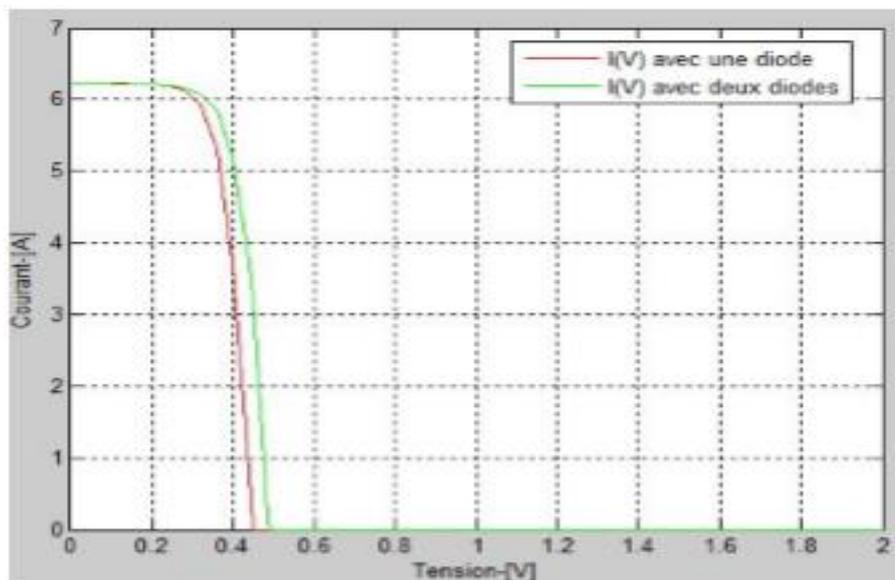


Figure II.5 : caractéristique (I_{Pv} - V_{Pv}) à une et deux diodes [14]

D'après les résultats obtenus, on dit que le modèle à deux diodes à un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires grâce à la deuxième diode.

II.3 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule PV

II.3.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant dans le circuit quand la charge est nulle. Il peut être réalisé en reliant les bornes positives et négatives par le fil de cuivre. En pratique ($I_{CC} = I_{ph}$) Il varie linéairement en fonction de l'éclairement (figure II.6) [15].

II.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{co})

C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal à la photo courant. Elle est obtenue en plaçant ($I = 0$) dans l'expression du courant (II.11).

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.18})$$

Donc la variation V_{CO} d'est logarithmique en fonction de l'éclairement (figure II.4) [15].

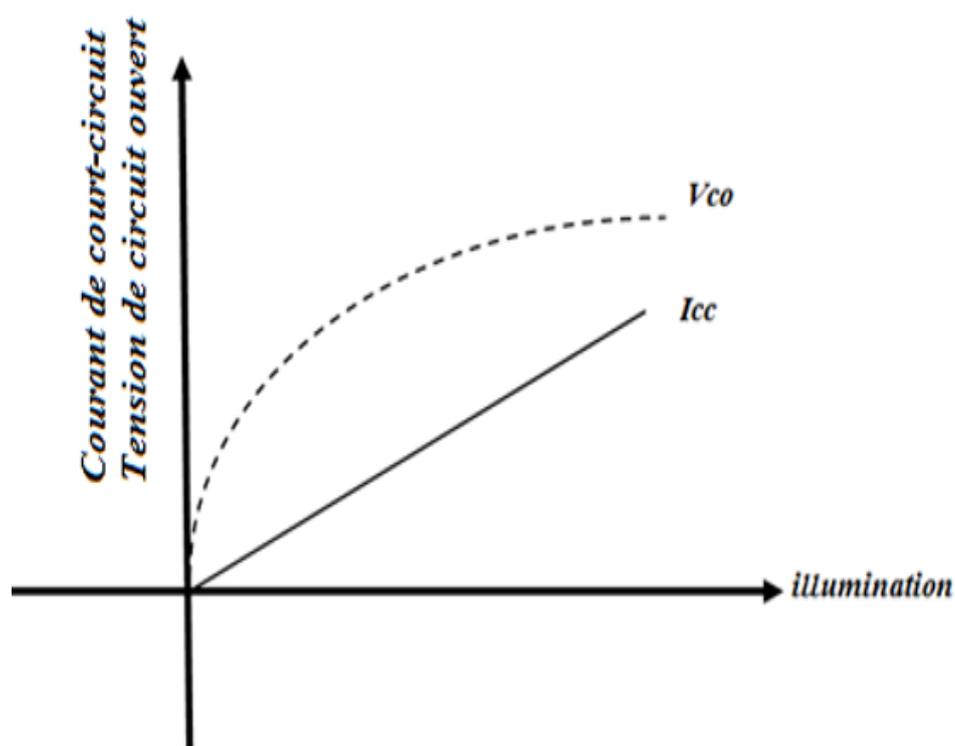


Figure II.6 : Densité de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination.

II.3.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique courant-tension, donc c'est le rapport entre la puissance de sortie maximale $P_m = I_m \times V_m$ et la puissance idéale $V_{co}I_{CC}$ [15].

$$FF = \frac{V_{Pm} \cdot I_{Pm}}{V_{CC} \cdot I_{CC}} \quad (\text{II.19})$$

Les facteurs de forme typiques pour différentes technologies photovoltaïques sont les suivant :

1. Technologie silicium cristallin (m-Si) : FF= 0,83
2. Technologie silicium Amorphe (A-Si) : FF= 0,7
3. Technologie Tellure de Cadmium (CdTe) : FF= 0,76
4. Technologie Cuivre Indium Sélénium (CIS) : FF = 0,78

II.3.4 Le rendement de la conversion PV

Le rendement de la conversion est la propriété la plus importante d'une cellule PV. Il est défini comme rapport entre la puissance générée par la cellule et la puissance radiative incidente sur la surface de cette dernière [15].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{CO} I_{CC}}{P_{in}} \quad \text{ET} \quad R_{CELL} = \frac{P_{Max} \left(\frac{W}{Sm^2} \right)}{I_{rrad} \left(\frac{W}{m^2} \right)} \quad (\text{II.20})$$

Voici le rendement de conversion typique pour différentes technologies photovoltaïques :

1. Technologie silicium cristallin (m-Si) : de 15 à 17 %
2. Technologie silicium Amorphe (A-Si) : 6 à 8 %
3. Technologie Tellure de Cadmium (CdTe) : 11 à 12 %
4. Technologie Cuivre Indium Sélénium (CIS) : 12 à 13 %
5. Technologie cellule organique (à l'état de la recherche) : 5 % (record à 11 %)

Suivant les technologies de cellules photovoltaïques, le tracé de l'équation $I_p = f(V_p)$ garde la même forme mais les valeurs de tension à vide sont légèrement différentes et surtout, pour une même surface, les courants de court-circuit sont différents pour la raison que les rendements conversion sont différents pour chaque technologie.

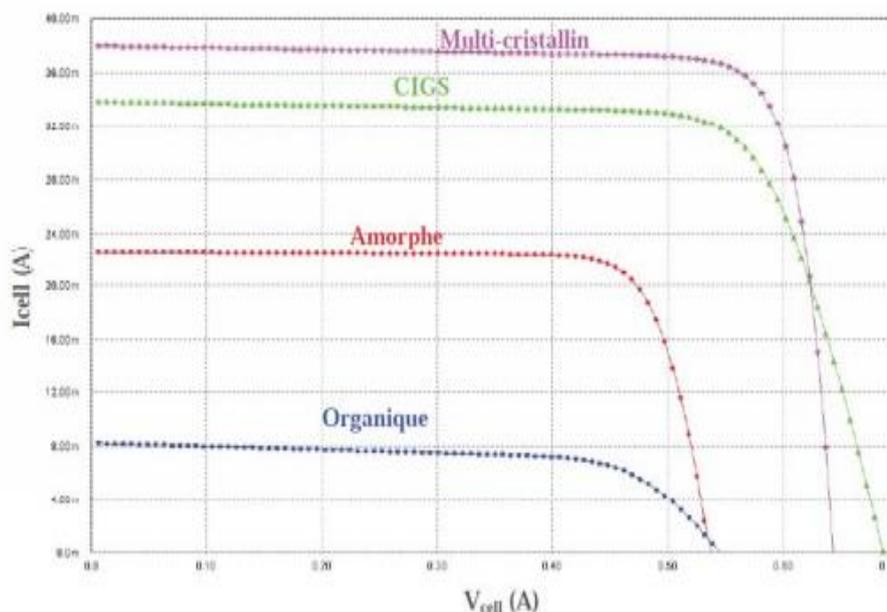


Figure II.7 : Tracé de la courbe $I_p = f(V_{pv})$ pour différents types de cellules PV [19]

II.4 Les paramètres influant sur la caractéristique I-V

Le capteur PV est décrit par ces caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$. La modélisation précédente est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur (Courant- Tension) en fonction de quatre entrées qui sont la température, la résistance série, la résistance shunt et l'éclairement.

II.4.1 Influence de la température

Une cellule photovoltaïque convertit une énergie radiative (rayonnement) en énergie électrique avec un rendement compris en 5 % et 20 % selon la technologie. Le reste du rayonnement est convertit en grande partie sous forme de chaleur, la fraction résiduelle étant réfléchi. Ainsi, une cellule photovoltaïque mal ventilée voit sa température monter très rapidement.

Il apparaît que plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance : plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue. Donc La température a une grande influence sur la tension du circuit ouvert et une influence légèrement sur le courant (figure (II.8)).

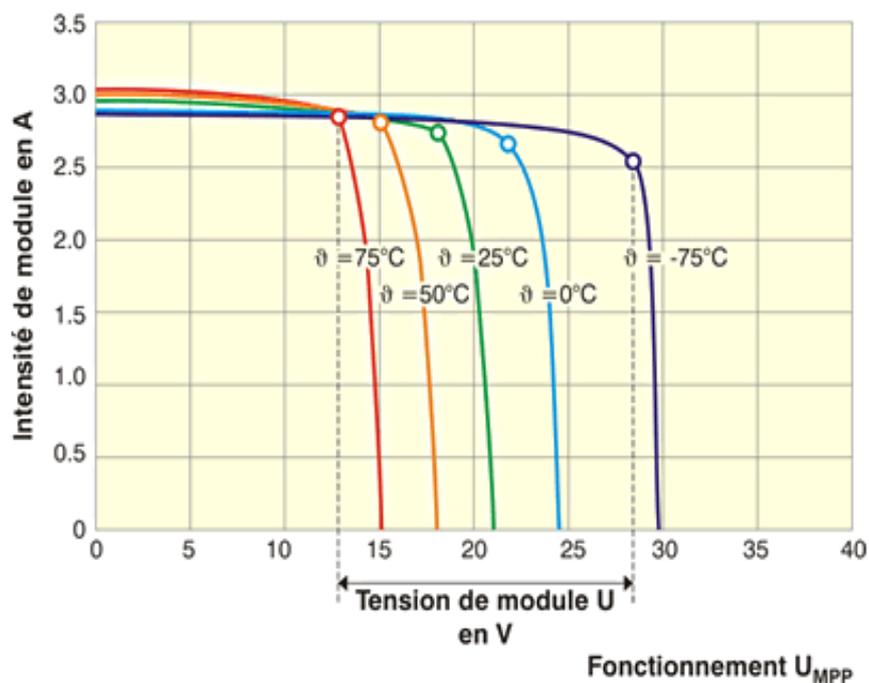


Figure II.8 : Caractéristique I/V pour différentes températures [16].

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante :

$$U(T^\circ) = U(25^\circ\text{C}) + (\Delta T^\circ * a) \quad (\text{II.21})$$

Avec :

- ΔT : augmentation de température par rapport aux conditions STC (25°C)
- a : coefficient de température V_{co} [mV/K], valeur fournie par le fabricant

Lorsque la température augmente, le courant augmente. I_{sc} augmente environ 0.07%/°K [16].

II.4.2 Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend fortement de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (II.9) représente la caractéristique $I(V)$ d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température constante. Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension de circuit ouvert qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [17].

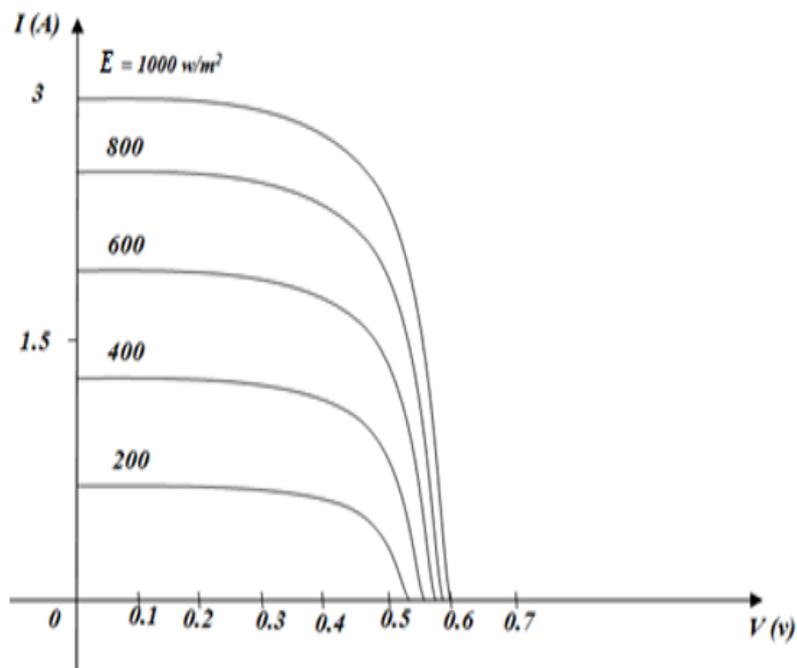


Figure II.9 : La caractéristique I (V) sous différents éclairagements [18].

II.4.3 Influence des résistances série et shunt

La résistance série caractérise les pertes de tension dans le semi-conducteur et à travers les contacts ohmiques de la cellule.

La résistance shunt caractérise les fuites de courant. Elle est provoquée par les défauts du cristal et les impuretés étrangères dans la région de la jonction PN.

L'influence de ces résistances parasites sur la caractéristique I(V) de la cellule PV sont représentée sur les figures (II.10), (II.11) pour un éclairagement $E=1000$ (W/m²) et une température $T=25$ (°C).

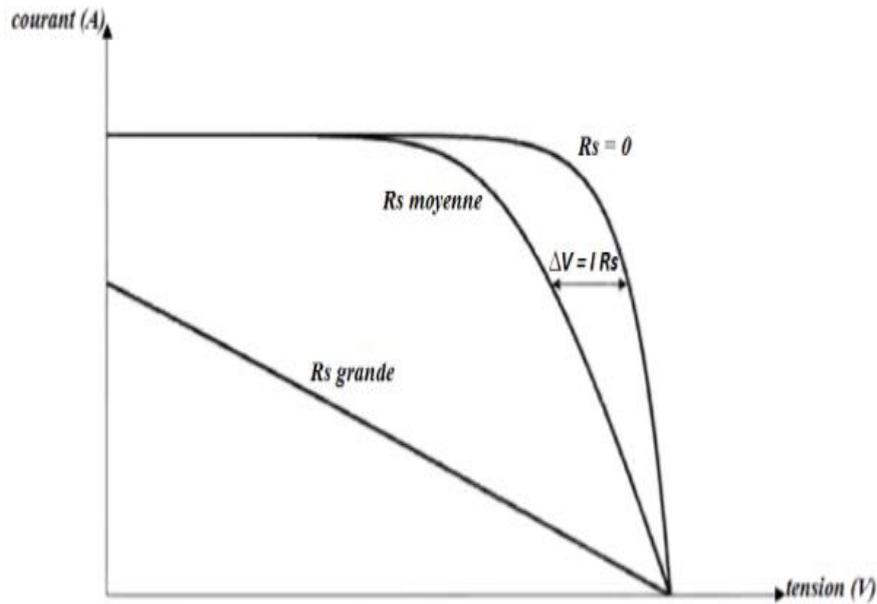


Figure II.10 : L'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V).

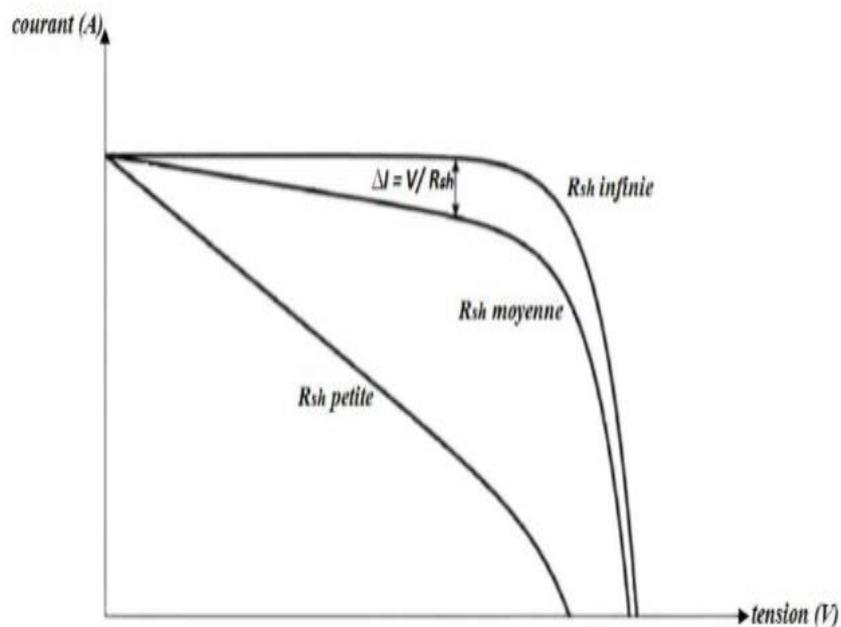


Figure II.11 : L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique I(V).

L'influence de la résistance série R_s s'exprime par une variation de la pente I(V) dans la zone où la cellule PV est assimilable à un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer la valeur du courant de court-circuit. Par contre, l'impact de la résistance shunt R_{sh} se manifeste surtout au

sein de la région où la cellule PV se comporte comme un générateur de courant par une modification de la pente. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile ; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairément [18].

II.5 Association des cellules photovoltaïques

La cellule solaire est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble des cellules forment un module solaire (GPV pratique), dans ce dernier les cellules sont reliées et connectées électriquement (en série/ en parallèle) entre elles et encapsulées, pour la simple raison que la puissance fournie par une seule cellule est très faible pour n'importe quelle application. Un système ou un champ solaire sont constitués de plusieurs panneaux solaires aux quelles des protections, des régulateurs, et des unités de stockages sont ajoutés, ces panneaux solaires sont formés de plusieurs modules.

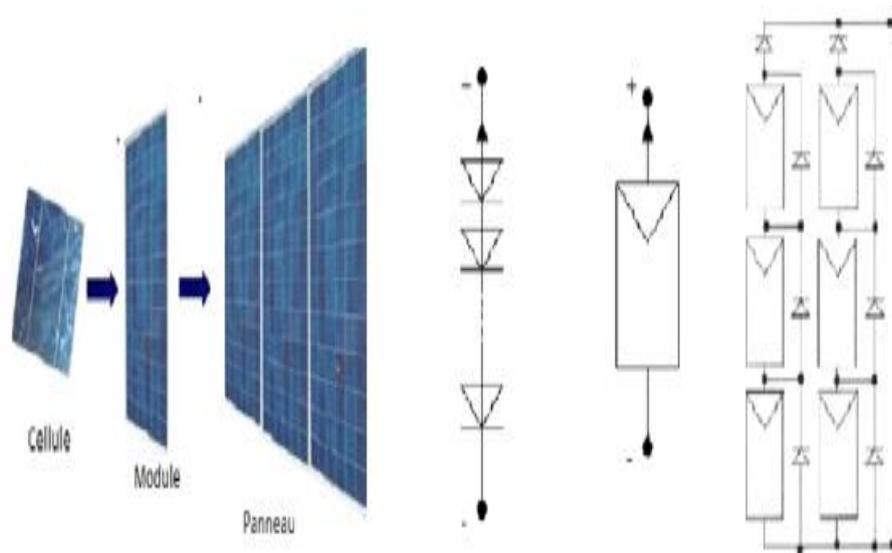


Figure II.12 : Cellule-Module-Panneau

II.5.1 Association en série

La caractéristique courant-tension d'une cellule reste valable pour un groupement de cellules. Le courant généré par N_s générateurs en série étant le même dans toute la branche, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules identiques ayant même densité de courant. La Figure (II.13) présente la courbe $I(V)$ du groupement ainsi réalisé. La caractéristique résultante est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle V_i par N_s [18].

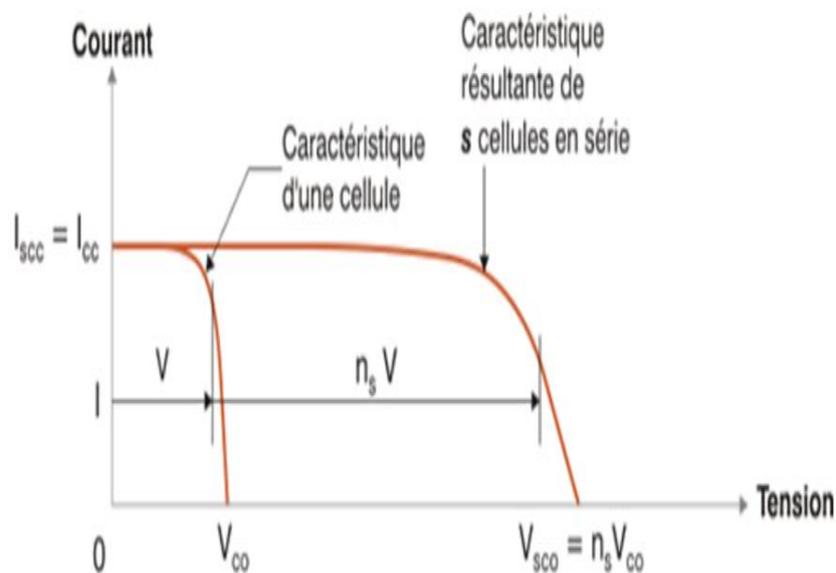


Figure II.13 : Caractéristique I-V résultante d'association de N_s cellules en série. [17]

II.5.2 Association en parallèle

Pour augmenter le courant fourni à une charge on connecte les cellules en parallèle. La figure (II.14) présente la courbe $I(V)$ d'un groupement de N_p cellules en parallèle. On ne monte que des cellules ayant la même tension de fonctionnement, les courants s'ajoutent, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant I_i de la cellule élémentaire par N_p [18].

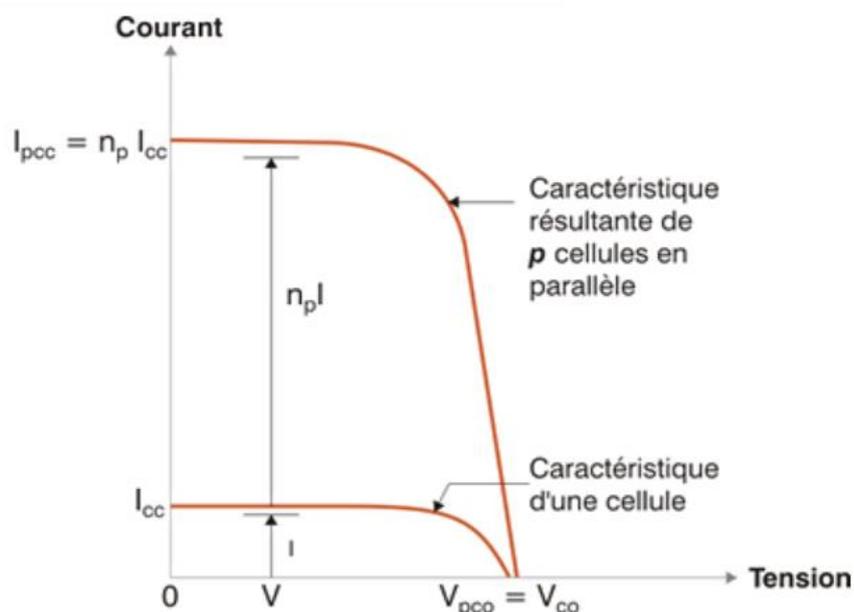


Figure II.14 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement de N_s cellules en parallèle [17]

II.5.3 Association mixte (parallèle et série)

Pour élever la tension, les cellules sont associées généralement en séries sous forme de modules, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de modules en fonctionnement. La figure (II.15) présente un tel groupement de N_{ms} modules en série dans une branche, et N_{bp} branches en parallèle. Si P_m est la puissance crête disponible sur un module, la caractéristique électrique globale courant-tension du panneau PV sera N_{ms} , N_{bp} , P_m dans le cas idéal, où tous les modules ont des caractéristiques électriques identiques. L'influence de l'éclairement et de la température sur le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert reste la même que pour la cellule élémentaire [18].

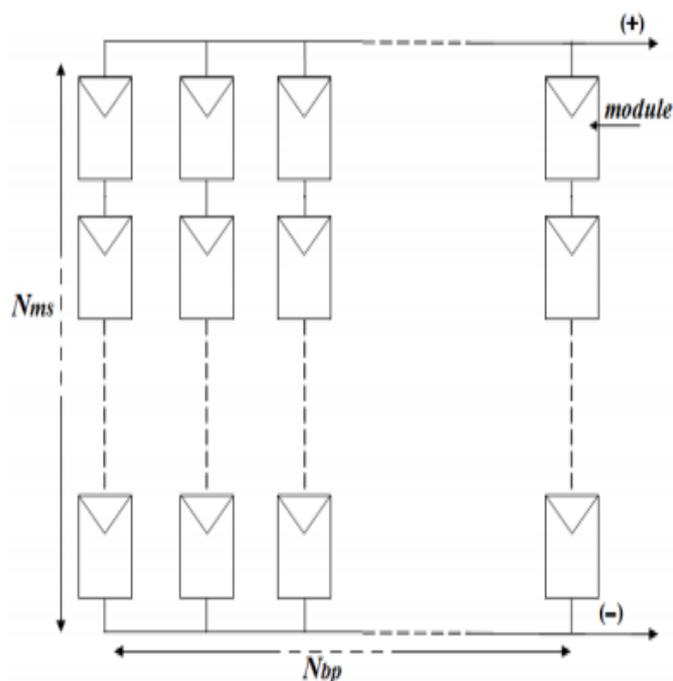


Figure II.15 : Groupement de modules en série- parallèle.

II.5.4 L'effet des diodes en séries et parallèles dans un groupement de modules

Une cellule occultée dans une branche de N_s cellules en série est polarisée en inverse dans le cas de circuit ouvert, par une tension $V = N_s V_i$ (V_i : la tension d'une seule cellule) qui peut dépasser la tension de claquage.

Si l'on monte une diode en parallèle tête-bêche (Figure II.16), sur un module, la cellule occultée ne peut alors être polarisée que par un nombre bien défini de cellules. En cas de déséquilibre, il faut bien sûr que la diode puisse laisser passer le courant des modules qui se trouvent dans la branche. En fonctionnement normal la diode de protection doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module. Moyennant ces précautions dans le choix de la diode de "by-pass", on peut être assuré que les modules ainsi protégés ne subiront pas de "hot-spot" (point chaud) à cause d'un déséquilibre d'éclairement ou de réseau.

Par contre, dans le cas de N_p branches en parallèles et pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres branches connectées en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes anti retour de puissance adéquate en sortie de chaque série de module, comme indiqué dans la Figure (II.16).

En fonctionnement normal, ces diodes séries devront induire une chute de tension dans la branche [17 - 18].

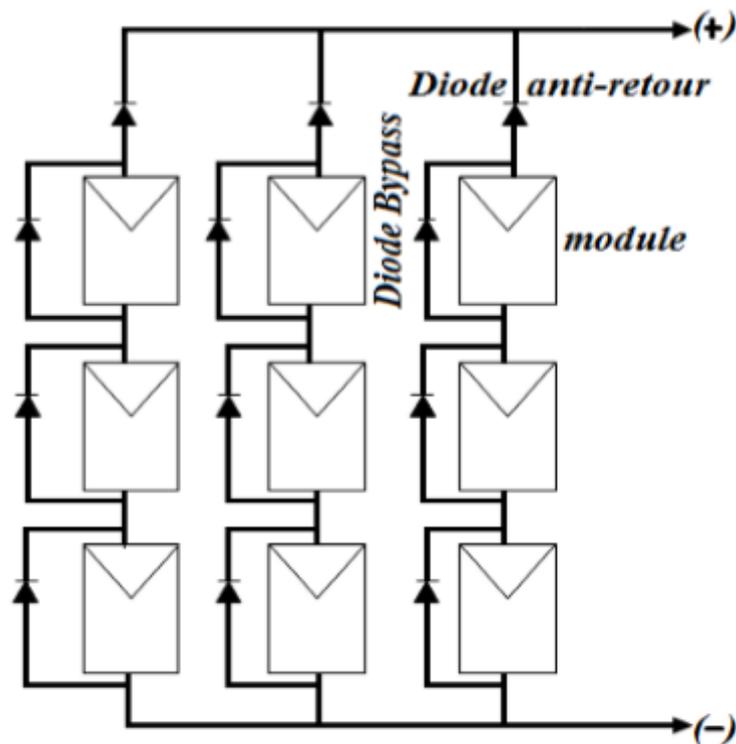


Figure II.16 : remplacement des diodes en séries et parallèles dans un groupement de modules.

Conclusion

Ce chapitre servira de base théorique pour la suite de notre travail. Nous nous sommes intéressés à l'étude des modèles à une et à deux diodes d'une cellule photovoltaïque avec son schéma équivalent. Ensuite nous avons observés les différents paramètres du circuit équivalent qui permet de tracer la caractéristique $I(V)$. Nous avons remarqué que les performances d'une cellule PV sont fortement influencées par des conditions météorologiques telles que l'éclairement et la température ainsi que les paramètres internes tels que la résistance série et parallèle.

Bibliographie

- [1] D.Rekioual, E.Matagne «Optimization of Photovoltaic Power Systems», London, (2012).
- [2] A.T. SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Université Henri Poincaré, Nancy-I, (2010).
- [3] M. Demirtas « Design and Implementation of PLC Controlled Solar Tracking System, » (e-Journal of New World Sciences Academy), (2009).
- [4] U.Eickerl, « Solar technologies for buildings», WILEY (one edition), Stuttgart, (2003).
- [5] S.Odeh ET M. Behnia, «Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling. Heat Transfer Engineering», Taylor & Francis, (2010).
- [6] A.D. Halmsen et al, «Models for a Stand-Alone PV System», University of Denmark, (2000).
- [7] N. Pongratananukul, «Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems», University of Central Florida, (2005).
- [8] A. Labrouet et M. Viloz, «Energie Solaire Photovoltaïque» (3e édition), Paris, (2006).
- [9] A. Luque et S. Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons (10) Ltd, (2003).
- [10] A.T. SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Université Henri Poincaré, Nancy-I, (2010).
- [11] M. Demirtas« Design and Implementation of PLC Controlled Solar Tracking System», (e-Journal of New World Sciences Academy), (2009).
- [12] K.Ishaque, Z.Salam, H.Taheri, « Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model », University Technology Malaysia, (2011).

- [13] U.Eickerl, «Solar technologies for buildings», WILEY (one edition), Stuttgart, (2003).
- [14] Botoub Mohammed Amine "Mémoire de fin d'étude master, «étude d'un (GPV) avec un suiveur du point de puissance maximal (MPPT) », université de Tlemcen 2012.
- [15] G. N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their applications, Cambridge, 2010.
- [16] H. Schmidt, «from the solar to the PV generator», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems: Course book for the seminar: Photovoltaic Systems, Freiburg, (1995).
- [17] B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïques, Ellipses, Paris, 1993
- [18] A. Ricaud, Photo piles solaires, 1ère édition, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 1997.
- [19] Zokay Mustapha ET Moufassih Mustapha, conception ET implementation intelligente d'une commande MPPT de la puissance maximal des modules PV, Université IBN ZOHR,Maroc,2018.

Chapitre III

*Étude et comparaison des
modules photovoltaïques
sous l'effet d'ombrage partie*

III.1 Introduction

Les cellules sont très minces et donc fragiles, il est nécessaire de les protéger des intempéries, des U.V. et I.R. qui provoquent, soit un rapide vieillissement ou une détérioration définitive [1]. En régime d'exploitation normal, il n'y a pas de courants de retour sur l'installation, du fait des tolérances fabricants.

Dans ce chapitre on définit les différents types d'ombrages ayant des conséquences très importantes sur la quantité d'énergie produite par une installation photovoltaïque. Une des solutions permettant de réduire l'impact de ces ombrages est d'introduire les diodes by passe et anti-retour au sein du module photovoltaïque pour empêcher la destruction de la cellule.

III.2 Définition de l'ombrage

Un ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques. Les différents types d'ombrage sont les suivants :

III.2.1 Ombrage aléatoire à court terme

Les événements d'ombrage aléatoire à court terme sont déclenchés par des événements tels que le personnel marchant à proximité de modules, l'oiseau assis sur les modules, la feuille placée sur le module en train de voler, etc. Ils sont généralement causés par des objets proches ou sur le module lui-même et peuvent couvrir une grande partie de la cellule déclencher un changement important. La figure III.1 montre des exemples d'événements d'ombrage aléatoire à court terme. Le caractère aléatoire est mis en évidence par le fait qu'un événement d'ombrage identique ou similaire peut ou non se produire immédiatement [2].

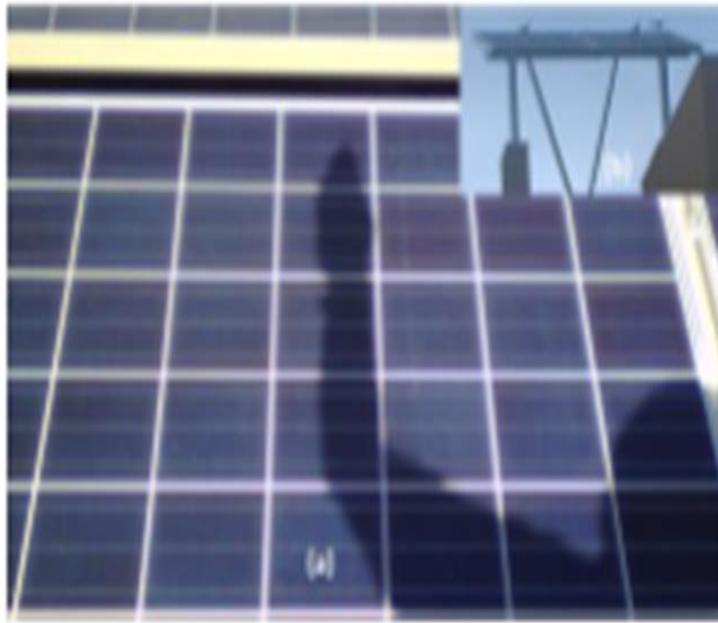


Figure III.1 : Exemples de court terme, ombrage aléatoire [2].

III.2.2 Ombrage périodique à moyen terme

Les événements d'ombrage périodiques, à moyen terme, sont généralement déclenchés par les objets entourant le module photovoltaïque qui présentent un ombrage à certains moments de la journée ou à certains moments de l'année. La figure III.2 montre un système photovoltaïque installé sur le bord d'une autoroute en Floride. Étant donné que les modules font face aux arbres, ils sont ombragés quotidiennement au début et en fin de journée. Les figures III.3 (a) et (c) sont des exemples de cas où le module a eu de l'ombre du montage de structures pendant les heures de pointe de l'après-midi. Cet ombrage se déplacera le long du module afin que différentes sous-chaînes soient ombrées à des moments différents. La figure III.3 (b) est un exemple où des clips de module et même des modules adjacents pourraient contribuer à l'ombrage tôt le matin ou tard en après-midi. Dans ce cas, seules certaines cellules des modules photovoltaïques seraient ombragées. La figure III.3 (d) montre l'ombrage par un arbre à proximité. De nouveau, dans ce cas, l'ombre se déplacerait le long du module tout au long de la journée, de sorte que différentes sous-chaînes de cellules seraient ombrées [2].



Figure III.2 : Système photovoltaïque installé sur le bord d'une autoroute en Floride [2].

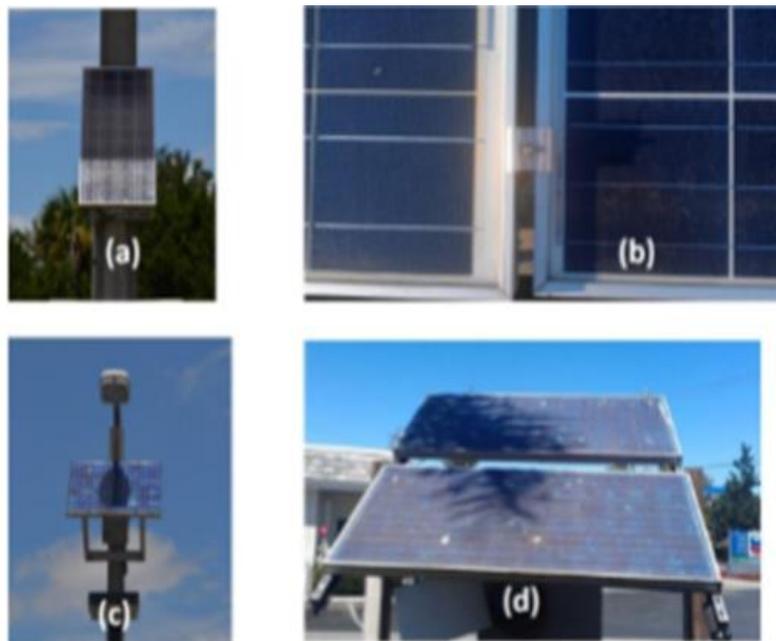


Figure III.3 : Ombrages périodiques (a) et (c) des structures de montage, (b) en raison de modules adjacents, (d) en raison de l'arbre [2].

III.2.3 Ombrage continu à long terme

L'ombrage à long terme résulte généralement d'objets collés à la surface du module. Cela peut être dû à des saletés irrégulières, à des excréments d'oiseaux, à des feuilles coincées sous

le châssis, etc. La figure III.4 (a) montre un exemple d'excréments d'oiseau, la figure III.4 (b) montre un ombrage inégal des eaux grains de pollen collés sur la face avant du module. Dans les deux cas, les objets collés à la surface du module ne seraient pas emportés par la pluie. Par conséquent, le module sera ombré jusqu'à ce qu'il soit nettoyé manuellement. La figure III.4 (c) montre une feuille collée sur la surface du module ombrageant une petite zone de la cellule, tandis que la figure III.4 (d) montre un ombrage dû à un encrassement inégal. En cas d'encrassement inégal, l'ombrage peut être supprimé si la surface du module est lavée par la pluie. Puisque dans ce cas, l'ombre reste en permanence sur le module, la diode de dérivation reste à l'état activé durant la journée [2].

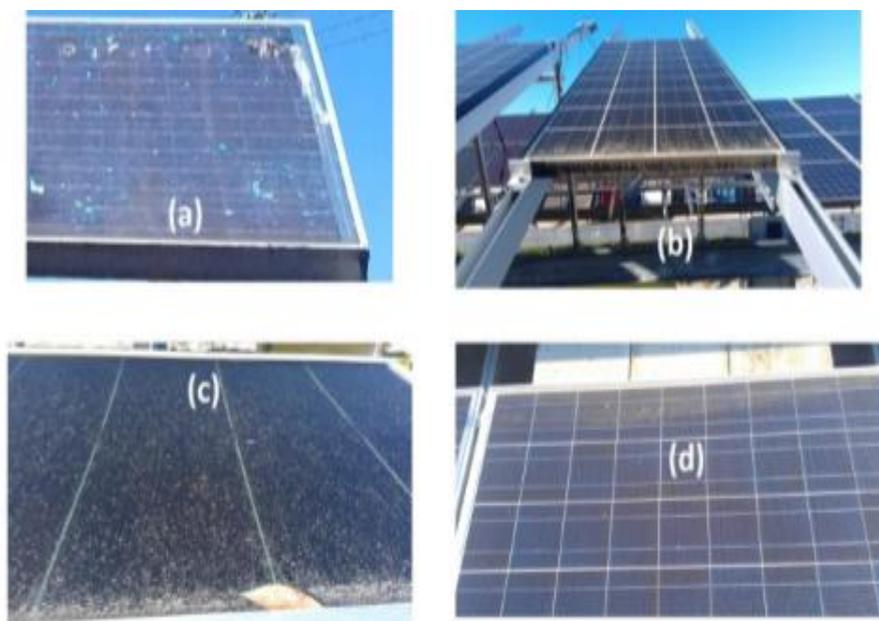


Figure III.4 : Exemples d'ombrage continu [2].

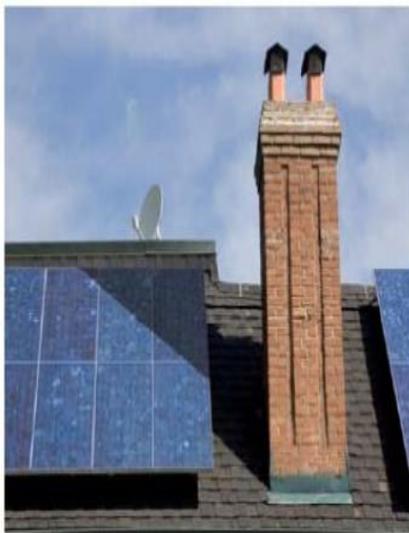
Dans ce cas d'étude, on s'intéresse au type de l'ombrage partiel qu'on va simuler dans le chapitre suivant pour voir le comportement des courbe I-V d'un module PV et les pertes de production photovoltaïque dues à ce derniers.

III.3 L'ombrage partiel du module PV

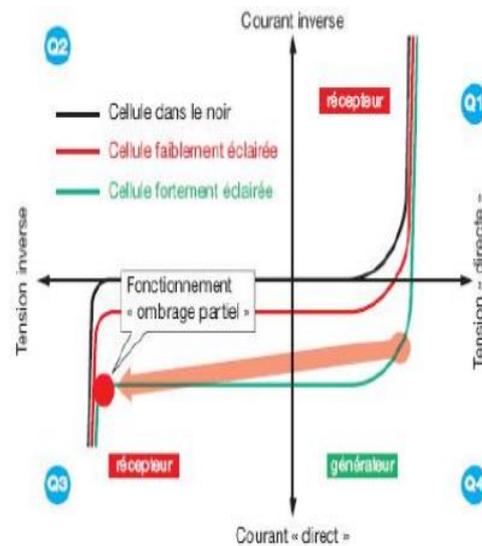
Les cellules sous ombrage partiel d'un panneau PV peuvent être polarisées en inverse, agissant en tant que charges, drainant la puissance des cellules entièrement éclairées. Si le système n'est pas correctement protégé, le problème du point chaud [3], peut survenir et, dans plusieurs cas, le système peut être irréversiblement endommagé. Dans la plupart des études [4-5], l'effet de l'ombrage partiel dans la réduction de la puissance de sortie de la configuration

Chapitre III : Étude et comparaison des modules photovoltaïques sous l'effet d'ombrage partiel

d'un champ photovoltaïque a été discuté. L'utilisation courante de diodes de dérivation en antiparallèle avec les modules photovoltaïques en série peut atténuer partiellement la réduction de puissance due à l'ombrage partiel [6]. Dans de tels cas, un algorithme plus approprié pour le suivi du MPPT et capable de faire abstraction des maximums locaux de puissance est requis [7,8]. Il est intéressant d'obtenir des informations sur les systèmes photovoltaïques fonctionnant en présence d'ombrage partiel surtout si cette installation est ombragée durant toute la journée. Les pertes à cause des interconnexions des modules photovoltaïques sont presque toujours présentes dans la production électrique d'un champ photovoltaïque.



(a)



(b)

Figure III.5 : (a) ombrage des panneaux par une cheminée de la maison, (b) fonctionnement de la cellule dans le 3ème quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre [9].

Pour une meilleure compréhension envisagez d'étudier les panneaux comme un seul tuyau, et l'énergie solaire est comme l'eau qui coule à travers ce tube. Des cordes solaires funky, l'ombre est quelque chose qui bloque ce flux. Par exemple, si l'ombre d'un arbre ou d'une cheminée tombe sur l'un de tous les panneaux de la chaîne, le rendement total du fil tombe à presque zéro tant que l'ombre y reste. S'il y a une chaîne non ombrée séparée, cette chaîne peut passer à une force externe comme d'habitude.

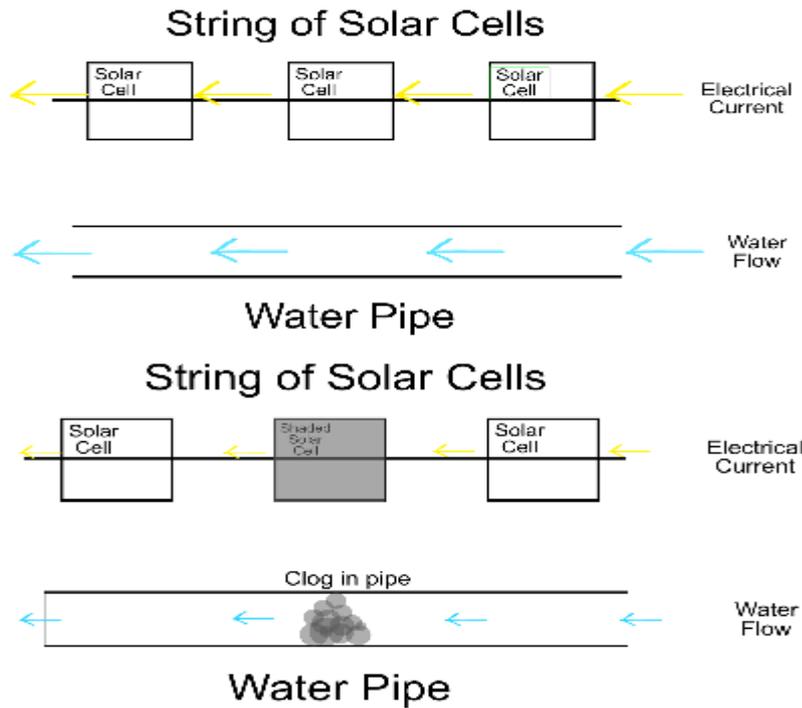


Figure III.6 : Schéma équivalent d'un système solaire ombragé.

III.4 Phénomène d'ombrage sur les caractéristique I-V

Figure III.7 illustre un module photovoltaïque avec une cellule touché par l'ombre.

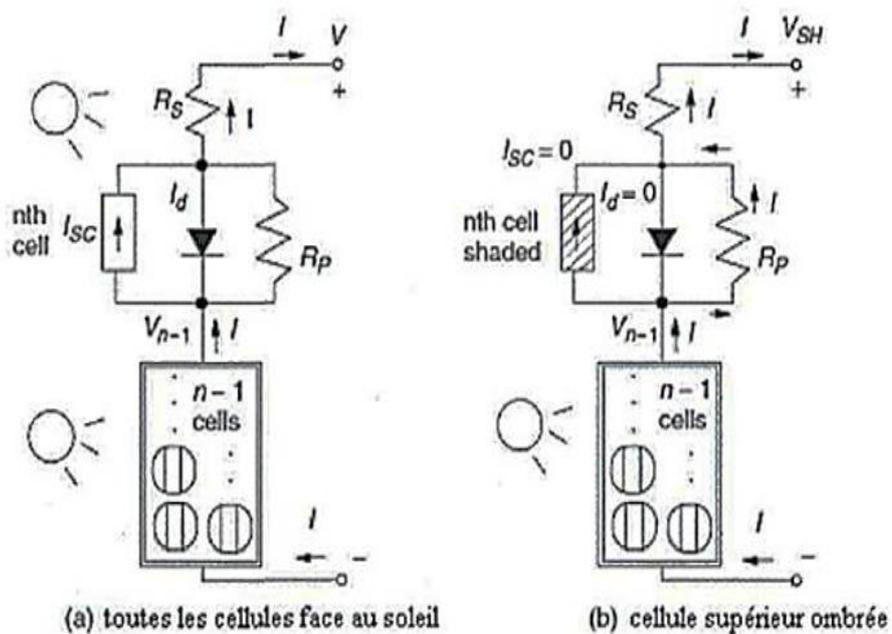


Figure III.7 : Module photovoltaïque avec une cellule touché par l'ombre.

Considérons la figure III.7a qui représente un module photovoltaïque avec une cellule séparée des autres. Dans cette figure, toutes les cellules sont exposées au soleil et le même

Chapitre III : Étude et comparaison des modules photovoltaïques sous l'effet d'ombrage partiel

courant traverse chacune d'elles. Cependant, dans la figure III.7b, la cellule en haut est touchée par l'ombre et son courant I_{sc} est réduit à zéro, ce qui signifie que le courant total qui circule dans le module doit passer à travers les deux résistances R_p et R_s de la cellule touchée par l'ombre. Ceci provoque une chute de la tension de sortie ΔV qui est donnée par la relation suivante :

$$\Delta V = V/n + R_p * I \quad (III.1)$$

- n : nombre de cellules ;
- I : courant total dans le module

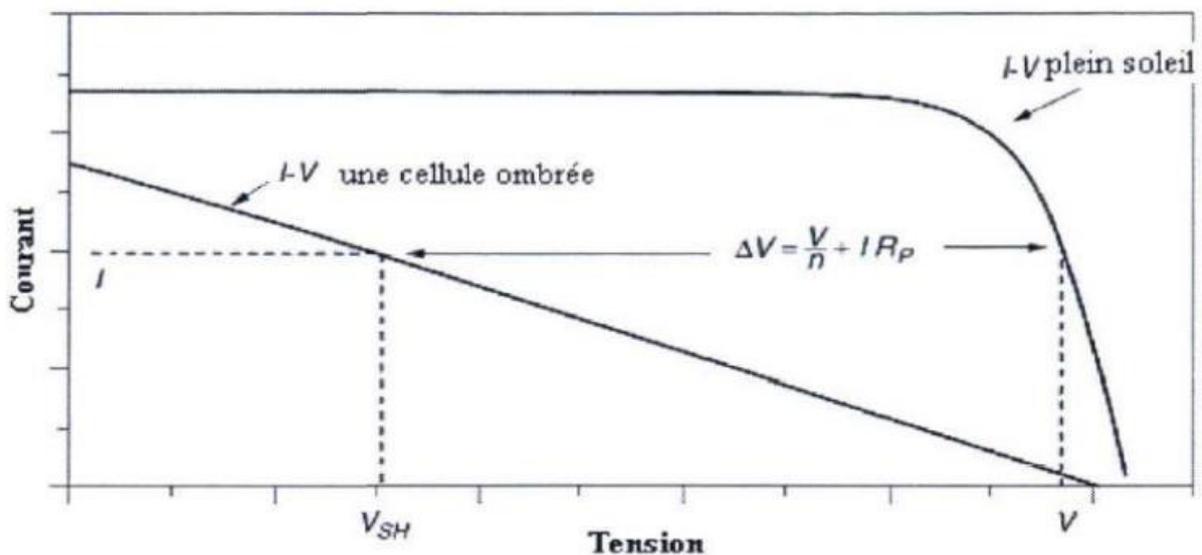


Figure III.8 : Effet de l'ombrage d'une seule cellule ombrée sur le module [10].

Remarque : L'impact de l'ombre sur la courbe I-V c'est que les variables de sortie d'un panneau photovoltaïque peuvent être réduites considérablement quand une petite portion du panneau est touchée par l'ombre. Des solutions particulières seront donc nécessaires pour compenser ce problème de l'ombrage.

III.5 les problèmes d'ombrage sur une installation photovoltaïque

Bien que l'intérêt soit croissant dans la recherche pour améliorer les performances de systèmes photovoltaïques (PV), il y a peu de travaux effectués jusqu'à présent sur la détection des pannes de systèmes photovoltaïques. L'ombrage est parmi les causes des pannes en niveau des modules PV. En effet, l'ombrage de la surface de la cellule par des infrastructures ou à

cause du relief naturel (un fil électrique, cheminées, des arbres ou à d'autres parties de construction) [11].

Le module peut devenir polarisé en inverse, fonctionnant comme charges au lieu de générateur. Cela produit la réduction de la puissance de sortie et des points chauds (hot spot) [12]. Ce hot spot provoque l'apparition d'un circuit ouvert et risque de détruire ce module.

III.5.1 Endommagement des modules par effet "point chaud"

Quand une partie d'un groupe photovoltaïque est ombrée, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse. Cela signifie concrètement que la partie sous-irradiée ne se comporte plus comme un générateur électrique mais comme un récepteur (résistance). Alors qu'un générateur délivre de l'énergie, un récepteur la dissipe. La partie sous-irradiée va donc se comporter en récepteur en dissipant une certaine puissance sous forme de chaleur, ce qui va provoquer un échauffement de la zone sous-irradiée.

Cet échauffement local peut donner lieu à des points chauds qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module photovoltaïque. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées à un sous-réseau de cellules, comme illustré sur le schéma ci-dessous [13] :

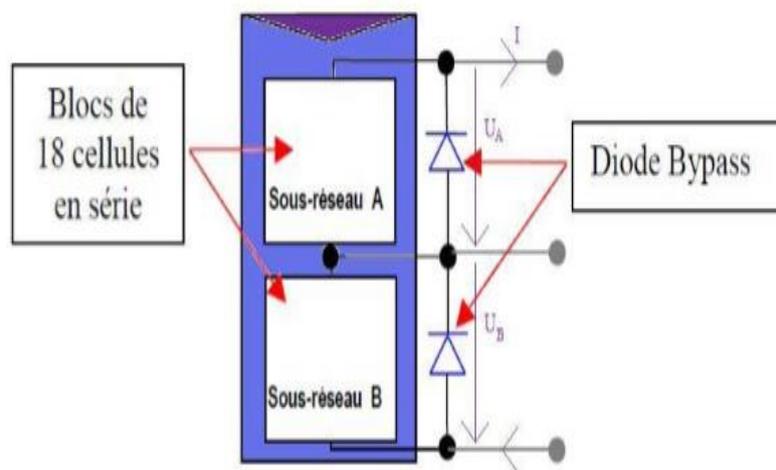


Figure III.9 : diodes by-pass associées à un sous-réseau de cellules

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules photovoltaïques. Afin d'éviter les phénomènes de point chauds, les cellules photovoltaïques sont associées par groupe

de 18 à une diode by-pass. En mode normal, la tension aux bornes de la diode by-pass est positive (ce qui signifie que le groupe de 18 cellules fonctionnent en mode générateur) ; la diode se comporte alors comme un interrupteur ouvert. Lorsque le groupe de 18 cellules se comportent en récepteur, la tension aux bornes de la diode est négative (inversement de polarité) ; la diode se comporte alors comme un interrupteur fermé et elle court-circuite le groupe de 18 cellules.

III.6 Protections classique d'un GPV

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [14, 15] :

- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.
- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).

III.6.1 Diode de by-pass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse.

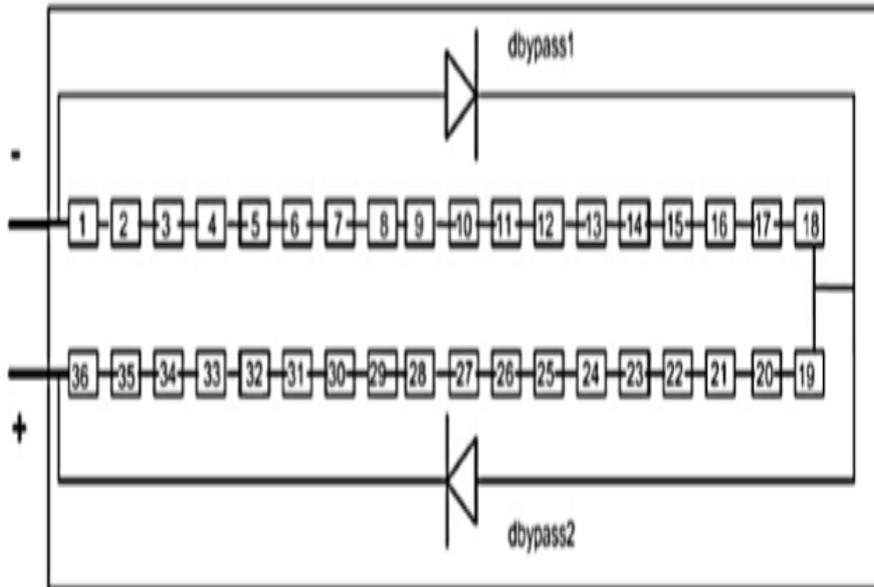


Figure III.10 : Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass [16].

Les diodes by-pass jouent un rôle clé face à l'effet de l'ombrage. Comme l'illustre le dessin ci-dessous, il faut toujours chercher à orienter les panneaux afin qu'un seul panneau à la fois ne soit soumis à l'ombrage.

III.6.2 Diode anti-retour

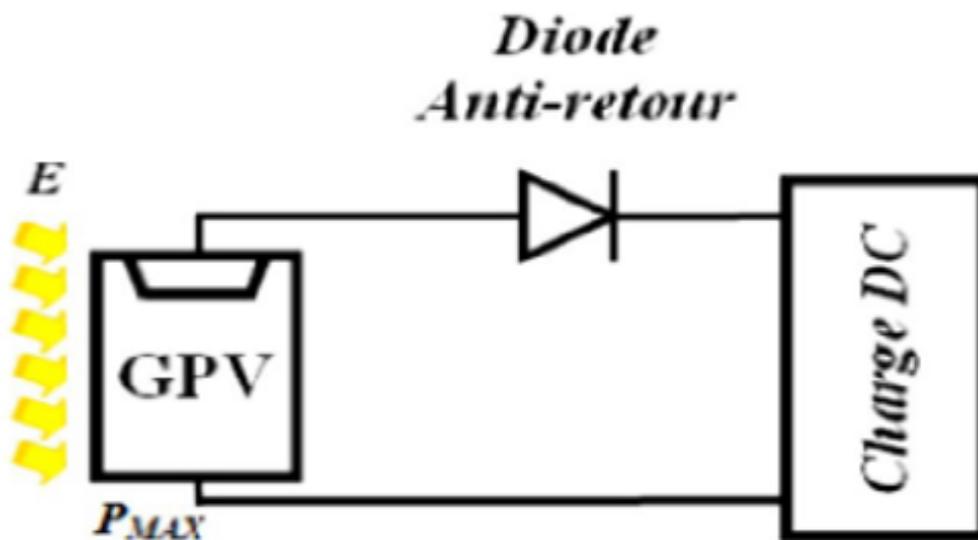


Figure III.11 : diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion des autres strings.

Dans le cas de couplage en parallèle, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices, de fait que la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode en série dite « diode anti-retour », laquelle empêche, également, de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement.

III.6.3 Effet d'ombrage sur les caractéristiques I-V et P-V pour un GPV avec diode bypass et anti retour

Pour remédier à ce phénomène, « S. Petibon et al. » ont équipé les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives [17]. Des mesures réalisées sur un module photovoltaïque commercial de 85 WC sur lequel ils ont occulté volontairement (à différents niveaux d'ombrage), les résultats sont représentés par la figure (III.12) [17]. Ces auteurs ont observé la déformation de la caractéristique I-V liée à un effet d'ombrage partiel du module photovoltaïque. Cette diode by-pass court-circuite alors une partie du module lorsqu'elle se met à fonctionner, et évitant ainsi la circulation de courants inverses dans les cellules défectueuses. Bien que cette solution soit efficace, elle réduit la puissance délivrée et la tension aux bornes du module. Lorsqu'une seule cellule est dégradée, toutes les cellules qui lui associées deviennent défectueuses ; et par conséquent cette cellule ne produit pas de puissance [18] [19].

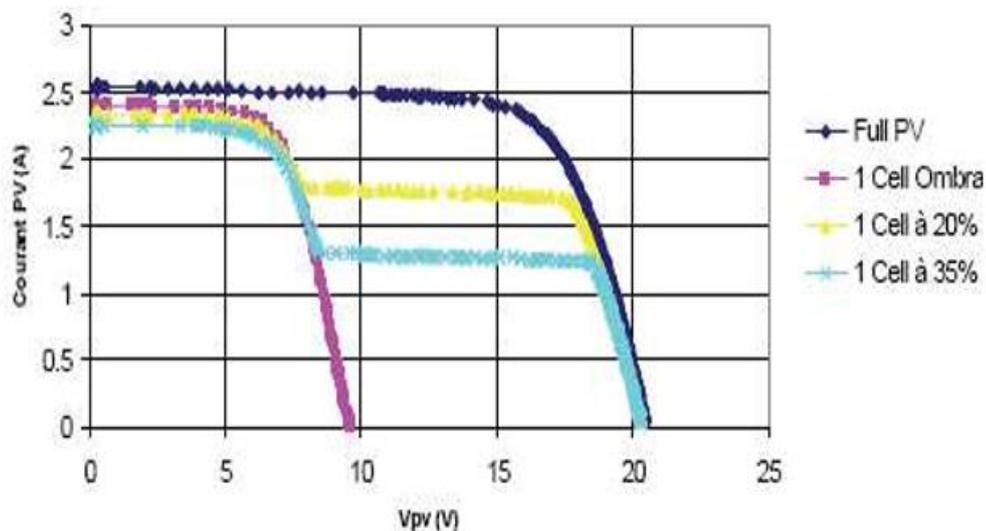


Figure III.12 : Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque et effet d'ombrage d'une cellule [17]

Chapitre III : Étude et comparaison des modules photovoltaïques sous l'effet d'ombrage partiel

La caractéristique illustrée par la figure III.13 montre l'impact de l'ombrage sur une seule cellule photovoltaïque, parmi les 36 qui composent le module photovoltaïque [17].

Des mesures ont été effectuées sur un module photovoltaïque (référence BP 585) constitué de deux fois 18 cellules en séries, leur fonctionnement comprend la connexion de deux diodes by-pass et d'une diode anti-retour. En fonctionnement normal, on observe bien la caractéristique P-V classique du module avec un MPP au point 1 (Point de Puissance Maximal) représentée par la courbe noire.

Lorsqu'une cellule d'un module est entièrement ombragée, la diode by-pass joue le rôle d'isoler la partie défectueuse du panneau, et la moitié de la puissance maximale est récupérée en fonctionnement normal avec MPP au point 4 (courbe mauve).

Dans le cas où une ou plusieurs cellules ne sont pas bien éclairées par rapport aux autres, on trouve deux points de MPP distinctes sur la caractéristique P-V du module (les points 2 et 3 correspondant aux courbes jaune et bleue).

Cette anomalie de la courbe de puissance perturbe les PPM (points de puissance maximaux), et par conséquent le module photovoltaïque ne peut fonctionner à son optimum.

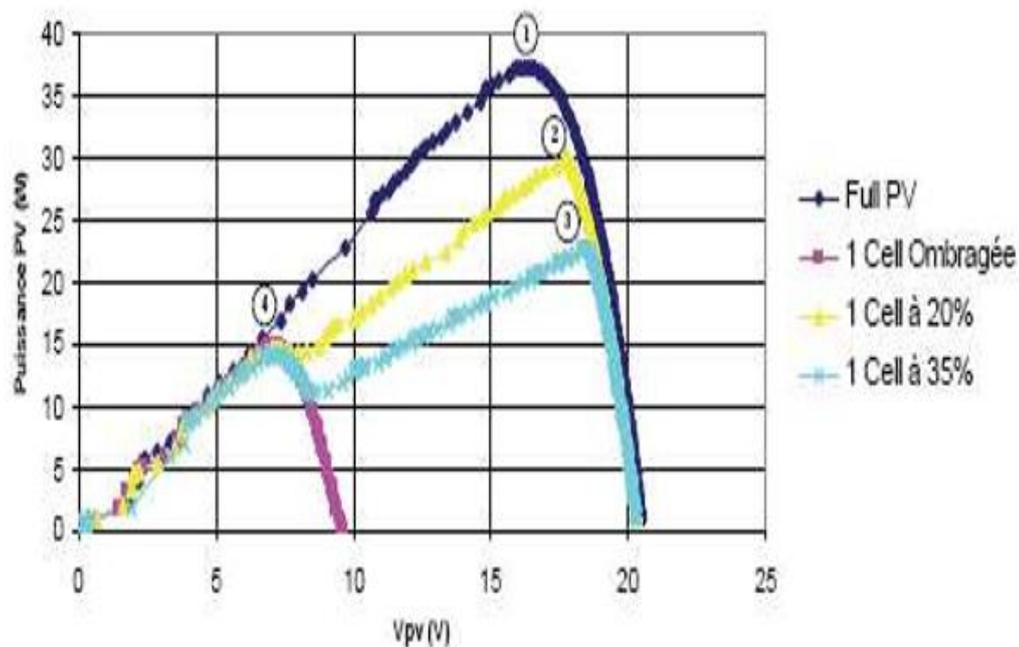


Figure III.13 : Effet d'ombrage sur la caractéristique P-V d'un module PV[17]

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a illustré les points importants de ce mémoire tels que l'Influence de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques et les différents types d'ombrage subi. Ensuite on a présenté l'influence de l'ombrage sur la caractéristique I-V suivi d'une intégration de la diode By-pass et la diode anti-retour s'avèrent importantes dans les modules photovoltaïques où les cellules sont ombragées, ces deux diodes permettent d'éviter la dégradation des cellules ; et d'améliorer les caractéristiques I-V et P-V. Pour le chapitre suivant nous allons présenter la simulation de l'effet d'ombrage partiel par le logiciel PV système.

III.8 Bibliographie

- [1] MARC Van Damme et SYLVIE Sautrot, « Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques », Rapport de stage, Université Paris VII, Mai-Juillet 2006.
- [2] N. Shiradkar, « Predictive modeling for assessing the reliability of bypass diodes in photovoltaic modules », Thèse de Doctorat, Université de Floride centrale, USA, 2015.
- [3] Yahia. Miloud, « Etude de l'estimation de la résistance robotique dans la commande vectorielle d'un moteur asynchrone en utilisant la logique floue », Thèse de Doctorat, U.S.T.Oran, Algérie, Février 2006.
- [4] W. Xiao, N. Ozog, and W. G. Dunford, « Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 3, pp. 1696–1704, Jun. 2007.
- [5] V. Quaschnig and R. Hanitsch, « Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells, » Solar Energy, vol. 56, no. 6, pp. 513–520, 1996.
- [6] Anssi Mäki, « Effects of Partial Shading Conditions on Maximum Power Points and Mismatch Losses in Silicon-Based Photovoltaic Power Generators » Thesis of Science in Technology, University of Technology, November, 1st 2013.
- [7] B. Robyns, F. Berthereau, J.-P. Hautier et H. Buyse, « A fuzzy-logic based multimodel field orientation in an indirect foc of an induction motor », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, pp. 380-388, 2000.
- [8] M. C. Alonso-Garcia, J. M. Ruiz, and W. Herrmann, « Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays, » Renewable Energy, vol. 31, no. 12, pp. 1986–1993, 2006.
- [9] J. Birkl, P. Zahlmann, « protection contre des installations photovoltaïques : Exigences, procédures de test et applications pratiques », L'Artisan Electricien Electronicien N° 439 - Avril/Mai 2010.

- [10] H. Oldenkamp, « Detailed Analysis of Currents in PV-Shunts », 2002 available at www.okeservices.com.
- [11] R.P.Mukund, « Wind and solar power system », Ph.D, Université Merchant marine, 1999.
- [12] G. Notton, I. Caluianu, I. Colda et S. Caluianu, « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13, 2010.
- [13] <http://www.photovoltaique.guidenr.fr>.
- [14] [http://pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass diodes](http://pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass%20diodes).
- [15] CABREL CEDRIC, « Optimisation énergétique de l'étage adaptation électrique dédiée à la conversion photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.
- [16] M. ANGEL CID PASTOR, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques Electronique », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2006.
- [17] Mme CHIKH-BLED Inchirah née SARI-ALI, « Caractérisation, modélisation et simulation de la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïques : Effet d'ombrage », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Alegria, 2020.
- [18] A. Kajihara, T. Harakawa « Model of photovoltaic cell circuits under partial shading » Indus, pp. 866-870, 2005.
- [19] A. B. Rabii, M. Jraidi and A. S. Bouazzi « Investigation of degradation in field-aged photovoltaic modules », third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11- 18, 2003.

Chapitre IV

Simulation et Résultats



IV.1 Introduction

Lors d'une installation d'un système photovoltaïque, il arrive parfois que l'emplacement du module photovoltaïque soit affecté par l'environnement. Ceci est très courant dans les systèmes photovoltaïques intégrés à la construction.

L'objectif de ce chapitre est la simulation d'un générateur PV sur le toit d'une maison avec l'effet d'ombrage partiel ; dans une première étape nous présentons en détail le logiciel PV System (logiciel de simulation d'un module photovoltaïque), ce dernier va nous permettre d'analyser les pertes de système PV (optimisation de l'orientation des modules PV, comportement électrique de champs PV avec ombrage partiel).

Dans la deuxième partie on a étudié l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques I-V et P-V, tout en montrant l'effet d'ombrages partiels sur ces derniers.

Dans la dernière partie nous avons appliqué cette simulation sur un champ photovoltaïque avec l'ombrage d'une cheminé et un arbre au site de Tamanrasset.

IV.2 Présentation du logiciel PVsyst

Nous avons utilisé le logiciel PVsyst (Système Photovoltaïque) pour notre simulation, il permet de modéliser une installation photovoltaïque complète avec des panneaux, et de modéliser l'onduleur lorsqu'il y a une ombre (totale, partielle ...). Ce logiciel permet de visualiser les ombres après modélisation du système photovoltaïque. Il prend en compte les changements de position du soleil avec la longitude et la latitude de la position, puis la position du soleil peut être déterminée à tout moment de l'année, il génère les ombres basées sur le modèle créé. Cette méthode peut être utilisée pour les bâtiments neufs ou existants et peut quantifier le pourcentage de perte due aux ombres. Il présente un rapport détaillé sur ces pertes, y compris la perte fictive totale exprimée en pourcentage.

PVSYST est conçu pour être utilisé par des architectes, des ingénieurs et des chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail les processus et les modèles utilisés, proposition une approche rentable et fournit des conseils pour le développement de projets. PVSYST permet d'importer des données météorologiques provenant de plus d'une douzaine de sources et de données personnelles différentes [1].

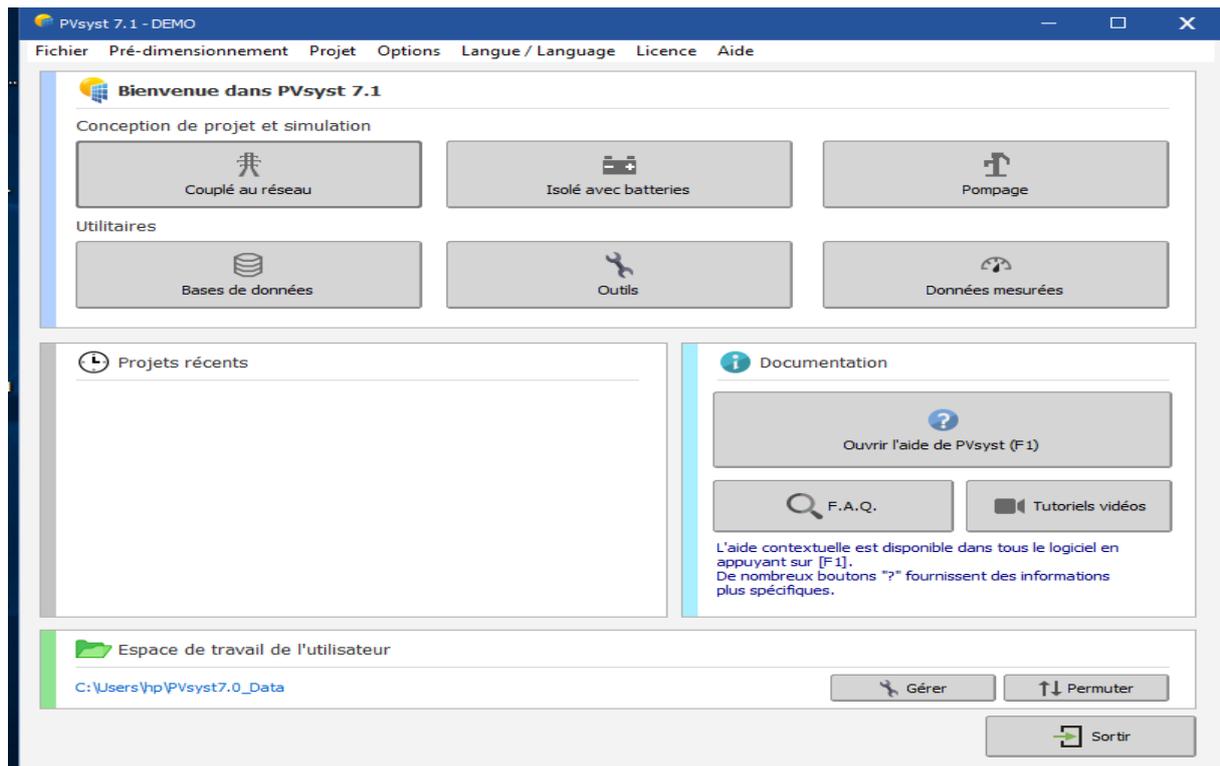


Figure IV.1 : menu principal de logiciel PVsyst

Le logiciel (PVSYST) permet de :

- Pré-dimensionnement
- Estimation rapide de la production pour une première étude de vos installations
- Conception de projet
- Etude détaillée, dimensionnement et simulation horaire, résultats dans un rapport complet imprimable.
- Données météo (importation de diverses sources, génération synthétique,...).
- Base de données de composante (module PV, onduleur, batteries, pompes, etc.).
- Outils didactiques, (géométrie solaire, optimisation de l'orientation, comportement électrique de champs PV avec ombrage).
- Analyse de données réelles mesurées (avancé) [2].

Il existe deux types qui caractérisent le logiciel PVSYST :

IV.2.1 Pré dimensionnement

Le logiciel PVSYST permet le pré dimensionnement d'un projet, en quelques clics, sans composant réels, première évaluation des dimensions du système et de son composant. Le pré dimensionnement concerne trois systèmes :

- Couplé au réseau
- Isolé avec batteries
- Pompage [2].

IV.2.2 Conception/Dimensionnement du système

La conception du système est basée sur une procédure rapide et simple :

1. Spécifier la puissance désirée ou la surface disponible.
2. Choisir les modules PV dans la base de données interne.
3. Choisir l'onduleur dans la base de données interne et PVSYST propose une configuration de système, qui de réaliser une première simulation /évaluation [2].

Dans notre travail nous avons utilisé le panneau photovoltaïque polycristallin silicium de type Generic Poly 250 WP 60 cells ayant les caractéristiques (dans les conditions standards $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ C}^\circ$) sont données dans le tableau suivant :

Technologie : **Silicium polycristallin**

Eclairement de référence : $\Phi_{Ref}= 1000\text{W/m}^2$
Température de référence : $T_{Ref}= 25^\circ\text{C}$
Puissance maximale : $P_{mpp}=250 \text{ W}$
Tension de circuit-ouvert : $V_{oc}=37,70 \text{ V}$
Courant de court-circuit : $I_{sc}=8,630 \text{ A}$
Tension de puissance max : $V_{pmax}=30,0 \text{ V}$
Courant de puissance max : $I_{pmax}= 8,330 \text{ A}$
Résistance parallèle : $R_p=500 \Omega$
Résistance série : $R_s=0.48\Omega$
Nombre de cellules : 60 cellules en série

IV.3 Influence de l'éclairement et de la température

Nous allons étudier ces influences y compris externes et internes, cet étude sera réalisé sur le module polycristallin (Poly 250 WP 60 cells) en utilisant le logiciel PVsyst.

Les résultats de la simulation du module PV sont représentés par les figures suivantes :

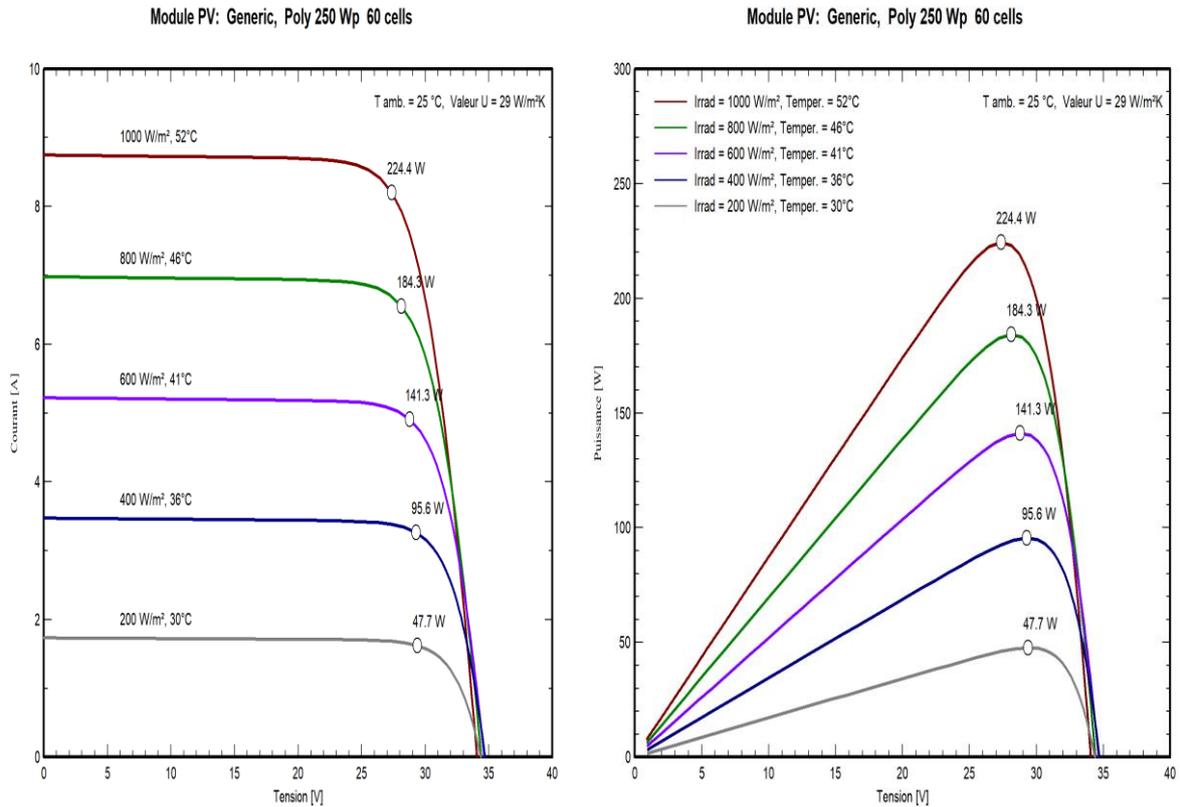


Figure IV.2 : Influence de l'éclairement pour le module polycristallin sur les caractéristiques (P-V et I-V)

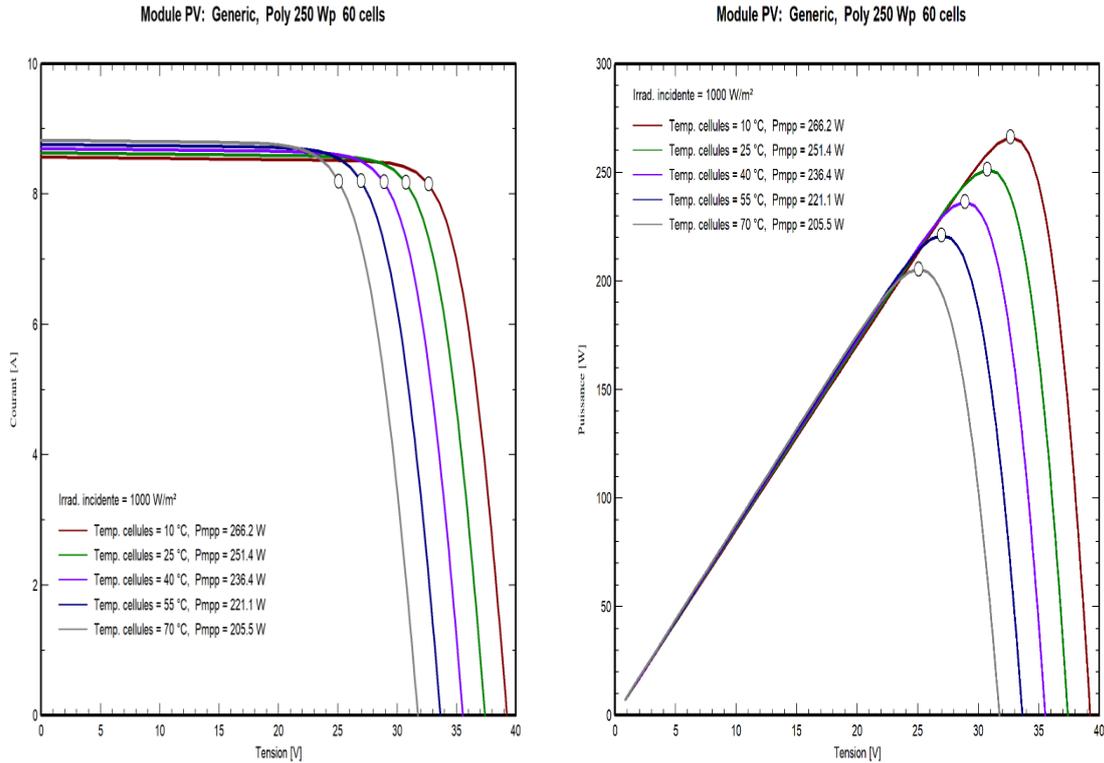


Figure IV.3 : Influence de la température sur la caractéristique (P-V et I-V)

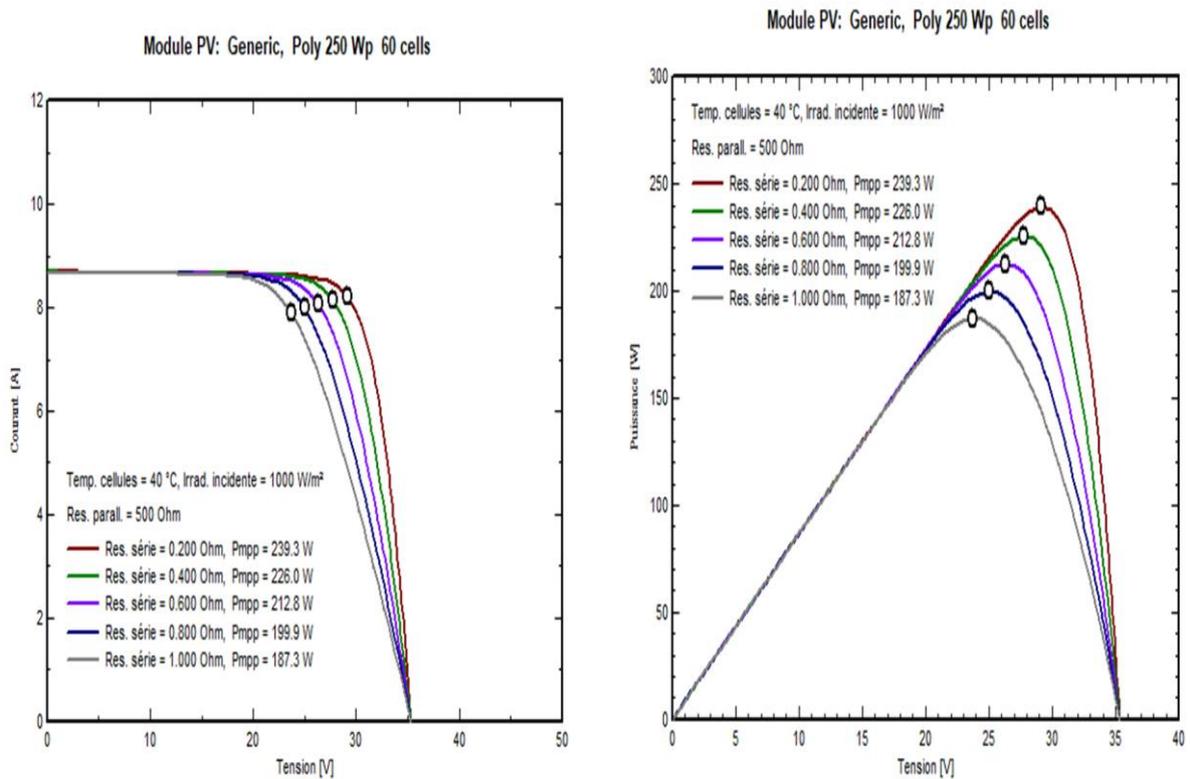


Figure IV.4 : Influence de la résistance série sur la caractéristique (P-V et I-V)

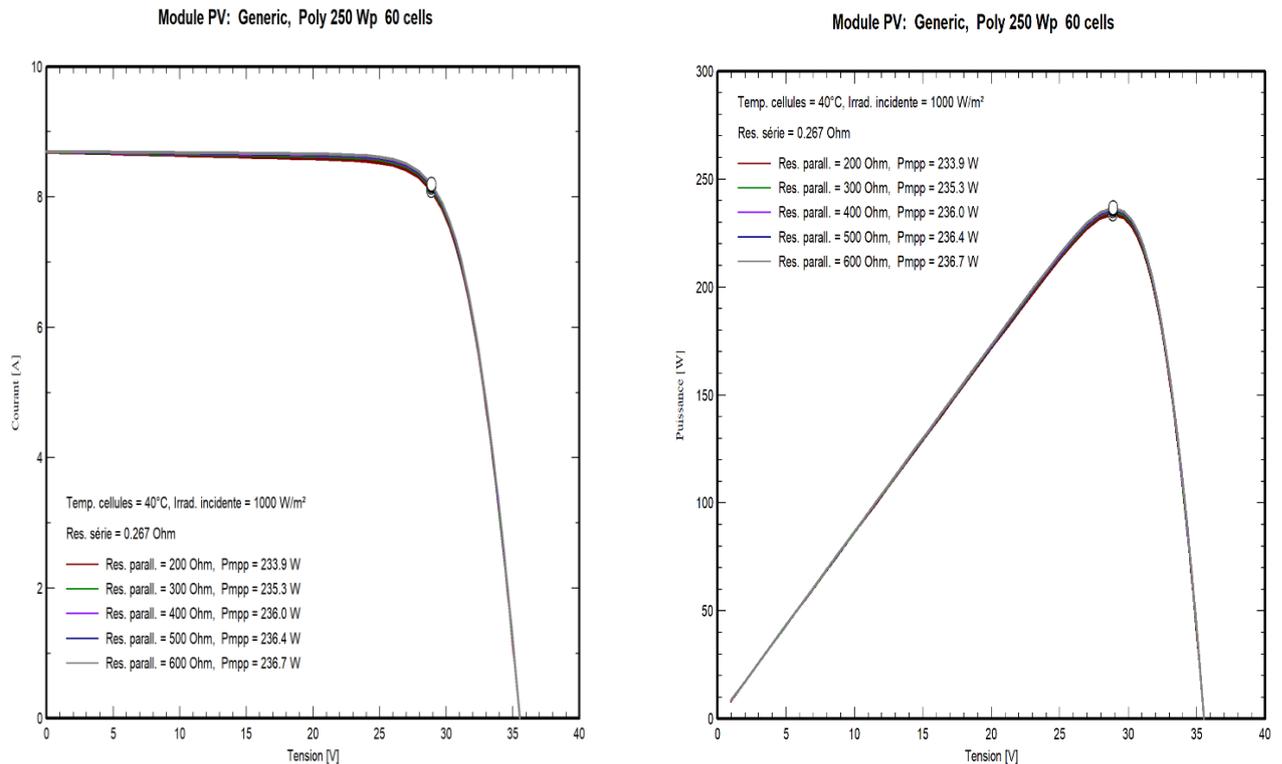


Figure IV.5 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique (P-V et I-V)

Nous avons effectué une simulation où une température constante de 25°C a été maintenue pour différents éclairagements. Les résultats sont représentés par les figures (IV.2).

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement solaire. D'autre part, la tension en circuit ouvert ne change pas dans la même proportion et reste presque identique même sous un faible éclairage. Pour les mêmes conditions météorologiques, les caractéristiques puissance-tension montrent que la puissance optimale du module photovoltaïque varie en fonction de l'éclairage reçu.

A partir de la figure IV.3, on peut observer l'effet de la température sur la puissance produite par le module photovoltaïque ; si la valeur de la température augmente alors le point de puissance maximal et la tension de circuit ouvert du module diminuent. Mais on peut dire que ce type de module polycristallin a une performance de résistance dans les régions chaudes ; car on a vu malgré des températures très élevées il y a une production d'énergie. Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus le V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV.

Ensuite, la figure IV.4 représente l'influence de la résistance série sur le fonctionnement du module photovoltaïque pour un ensoleillement de 1000 w /m^2 et une température constante de 40°C . Nous constatons que si la résistance série augmente la valeur de la puissance maximale diminue alors que la tension V_{co} varie légèrement.

Par contre, la figure IV.5 représente l'impact de la résistance parallèle se manifeste surtout au sein de la région où la cellule PV se comporte comme un générateur de courant par une modification de la pente. Une résistance parallèle trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile.

IV.4 L'influence d'ombrage partiel sur un panneau PV

Afin d'augmenter le point de la puissance maximale (MPP) et d'améliorer le rendement, nous avons associé quatre modules (Poly 250 WP 60 cells) en série et trois en parallèle. Pour cela nous avons effectué l'ombrage partiel sur les caractéristique P-V et I-V pour différents taux d'ombrage.

On a envisagé de réaliser des cas (a, b, c) respectivement présenté comme le suivant :

- a) : trois cellules ombragées de 20% du taux sur le panneau pour deux et trois submodules.
- b) : trois cellules ombragées de 50% du taux sur le panneau pour deux et trois submodules.
- c) : trois cellules ombragées de 70% du taux sur le panneau pour deux et trois submodules.

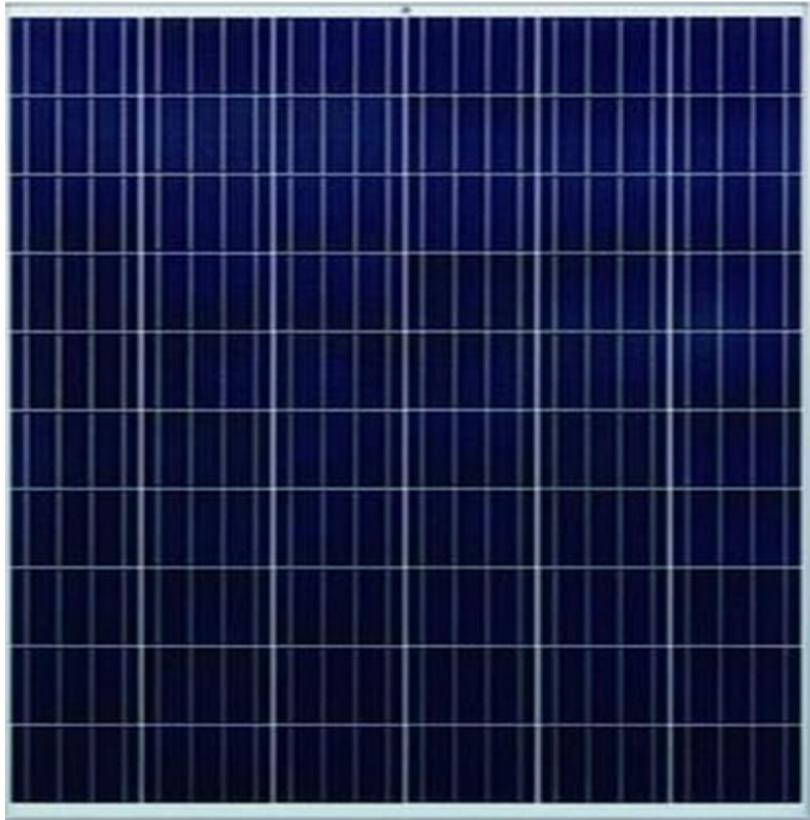


Figure IV.6 : Module Poly 250 WP 60 cells sans ombrage.

Les résultats obtenus des caractéristiques I-V et P-V par notre simulation sont regroupés dans les figures suivantes :

a) L'ombrage partiel de trois cellules à 20% sur le panneau pour deux et trois submodules :

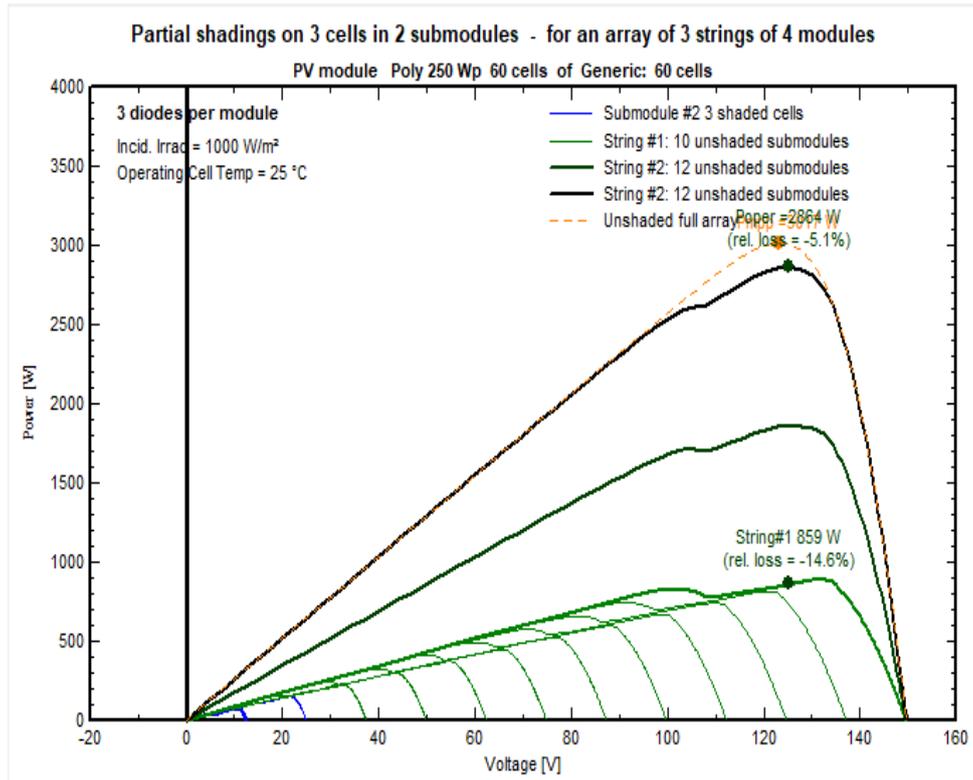


Figure IV.7 : Caractéristique (P-V) pour deux submodules à 20%.

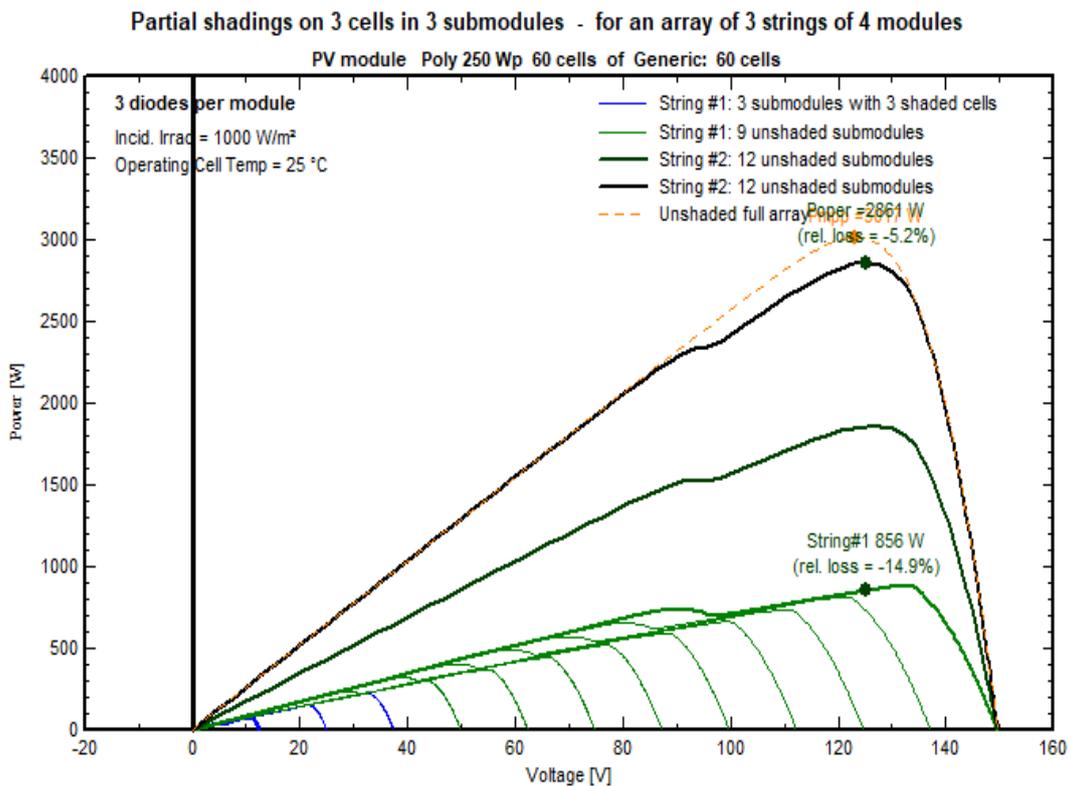


Figure IV.8 : Caractéristique (P-V) pour trois submodules à 20%.

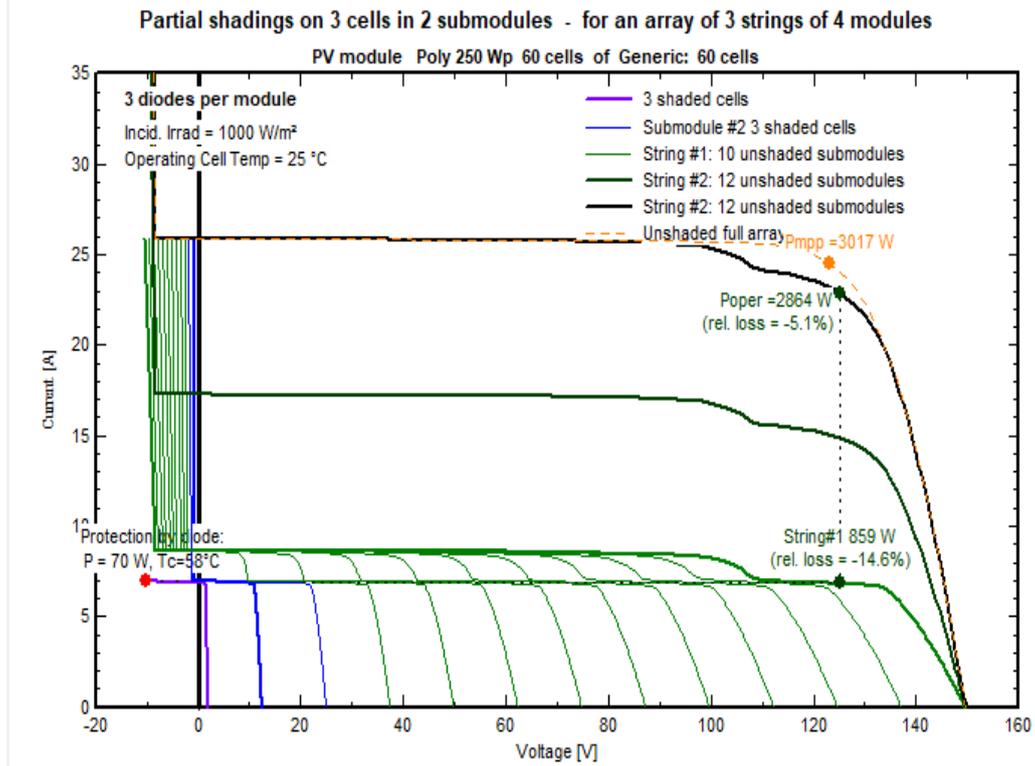


Figure IV.9 : Caractéristique (I-V) pour deux submodules à 20%.

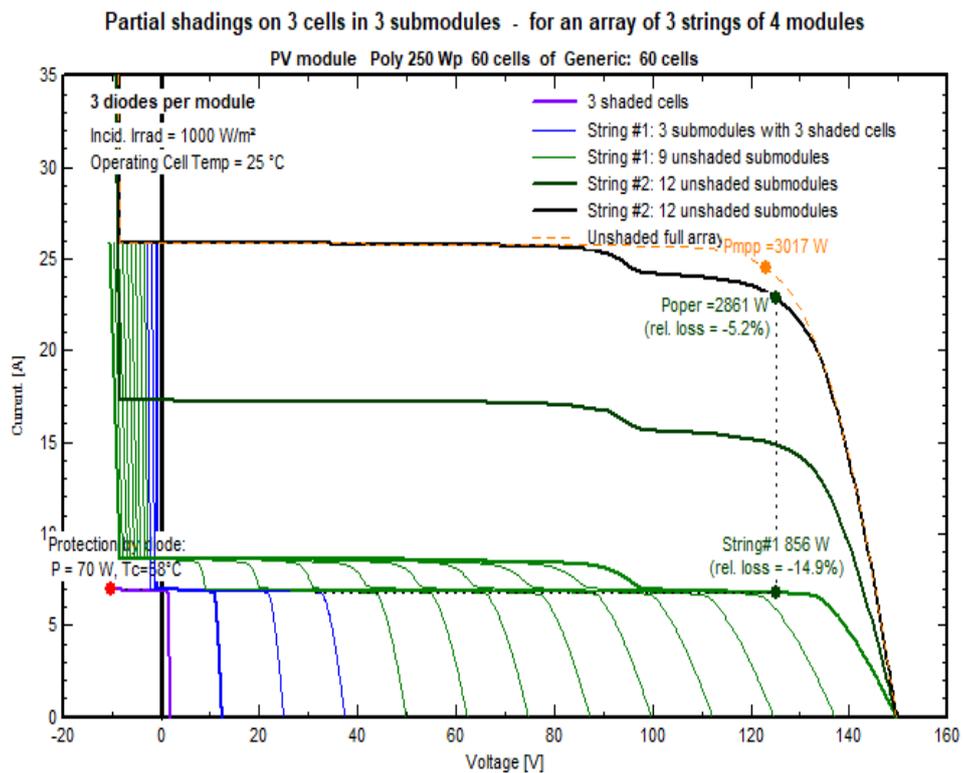


Figure IV.10 : Caractéristique (I-V) pour trois submodules à 20%.

Nous avons remarqué pour la figure ci-dessus que l'ombrage à 20% n'a pas d'effet significatif sur la puissance générée par le panneau photovoltaïque, car sa perte est d'environ 5,1%, ce qui est un faible pourcentage.

b) L'ombrage partiel de trois cellules à 50% sur le panneau pour les deux cas :

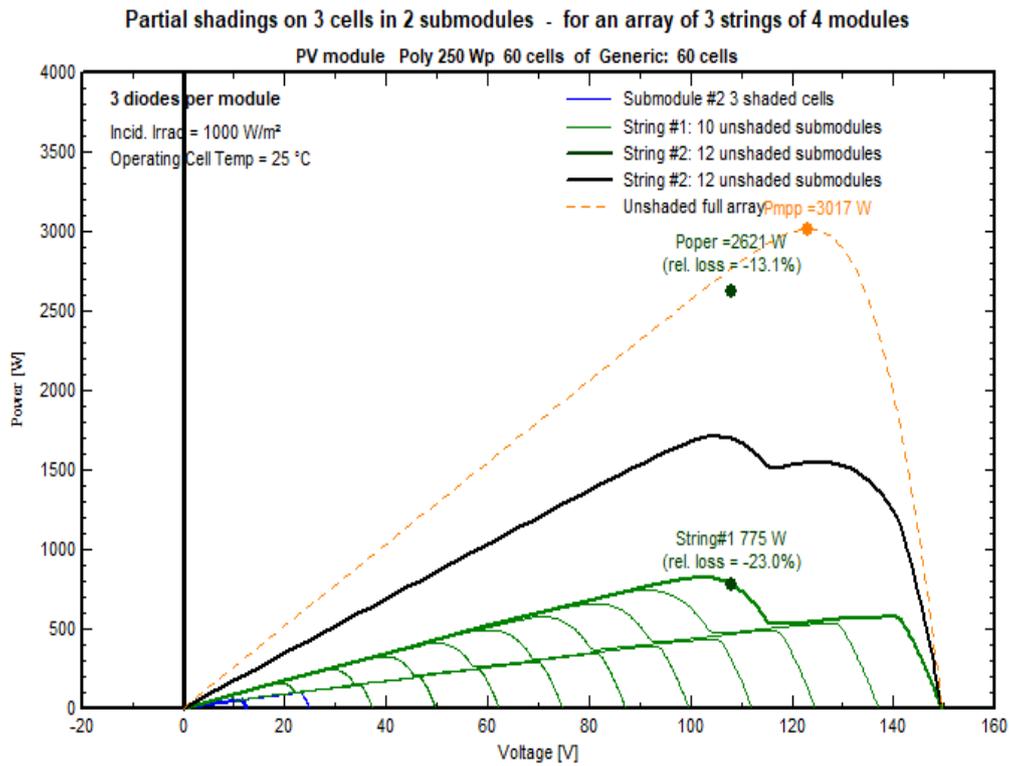


Figure IV.11 : Caractéristique (P-V) pour deux submodule à 50%.

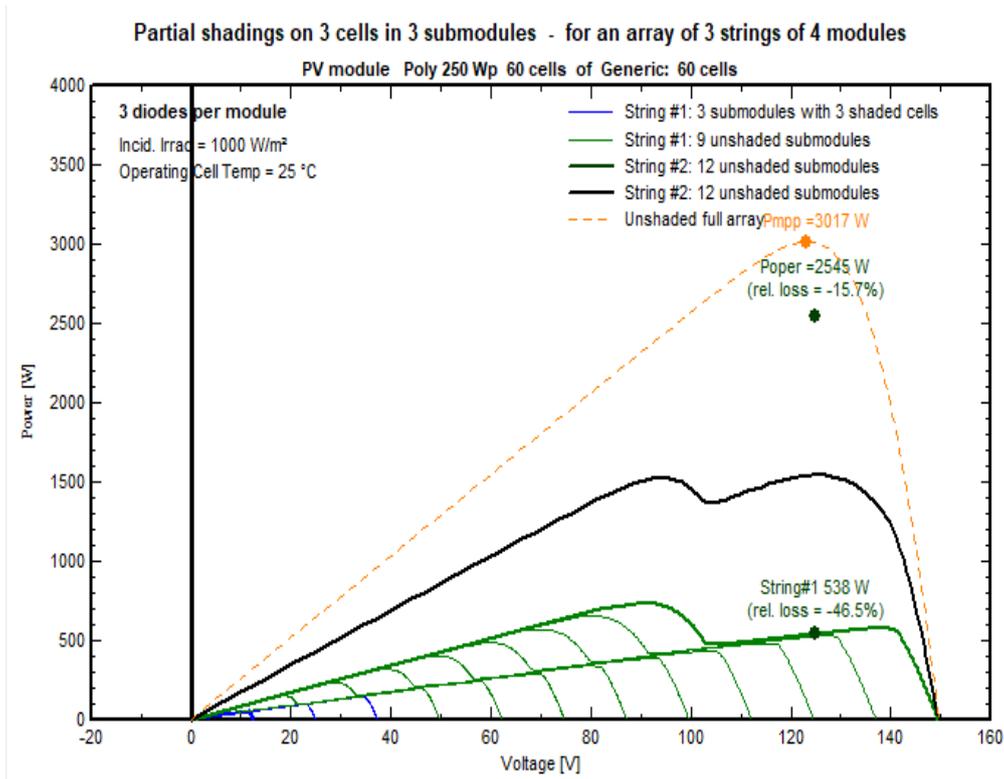


Figure IV.12 : Caractéristique (P-V) pour trois submodules à 50%.

Nous remarquons pour les figure IV.12 et IV.13 quand il n'a pas l'ombrage, le point de puissance maximale est de l'ordre 3017 W ; Pour un taux d'ombrages de 50%, nous avons constaté pour le premier cas la puissance maximale est de l'ordre de 2621 W, donc la perte de puissance est d'environ 13,1%, tandis que la puissance maximale dans le deuxième cas est de 2545 W, la perte de puissance est d'environ 15,7%. Cela indique que l'augmentation de l'ombre affecte négativement l'énergie produite par les panneaux solaires.

c) : L'ombrage partiel de trois cellules à 70% sur le panneau pour les deux cas :

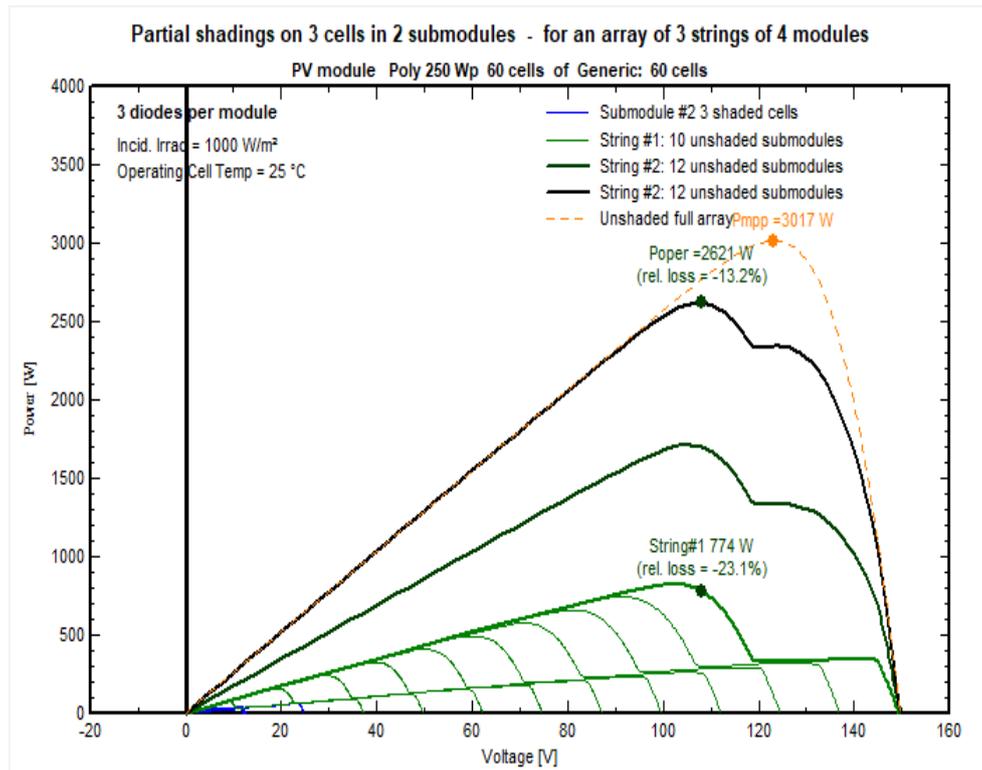


Figure IV.13 : Caractéristique (P-V) pour deux submodules à 70%.

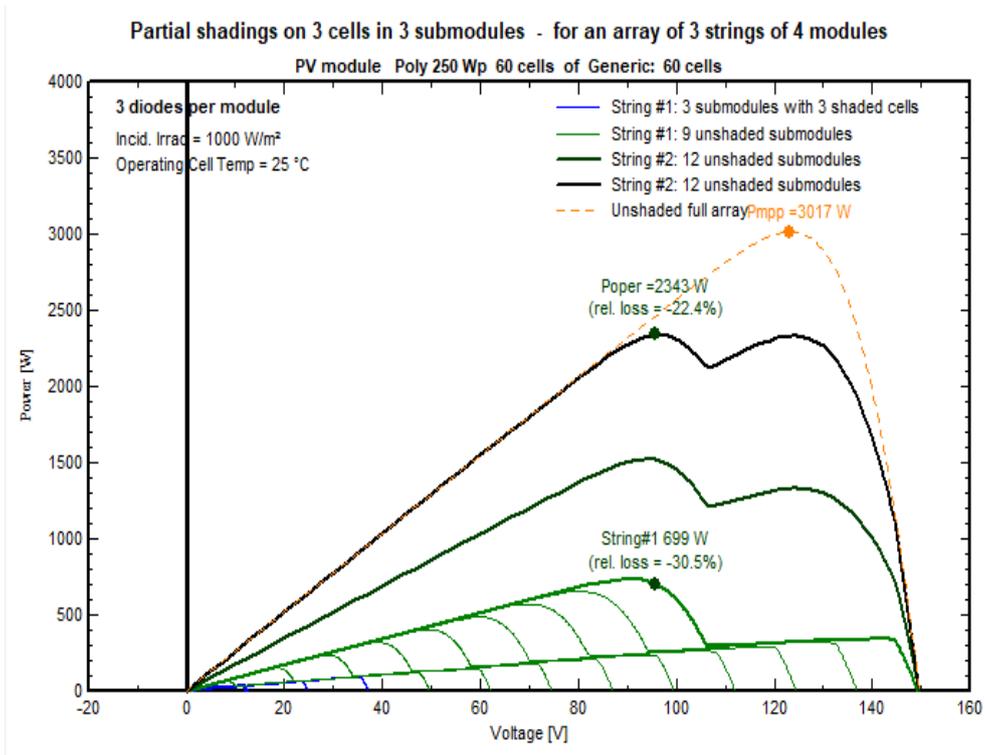


Figure IV.14 : Caractéristique (P-V) pour trois submodules à 70%.

A partir des figures précédentes, il a été constaté que l'allure des caractéristiques (I-V) du panneau photovoltaïque provoque des déformations importantes avec l'augmentation du taux d'ombrage. Nous avons remarqué d'après la figure IV (9,10) que l'effet de l'ombrage sur le panneau solaire réduit la tension de circuit ouvert mais le courant court-circuit n'est pas influencé.

En absence d'ombrage, le point de puissance maximale est de l'ordre 3017 W ; Pour un taux d'ombrages de 70%, nous avons remarqué pour le premier cas la puissance maximale est de l'ordre de 2620 W, donc la perte de puissance est d'environ 13,2%, tandis que la puissance maximale dans le deuxième cas est de 2343 W, la perte de puissance est d'environ 22,4%.

IV.5 L'effet de la diode By-pass sur les caractéristique P-V dans un panneau photovoltaïque

Les diodes by-pass sont des composants électroniques permettant d'éviter les problèmes liés à l'ombrage. Elles s'associent à des réseaux de cellules photovoltaïques au sein d'un même panneau permettant au courant de circuler en isolant la cellule ombragée afin d'éviter les baisses de production. Aussi les diodes by-pass sont utilisées à l'intérieur d'un module pour compenser l'effet d'auto polarisation inverse, le même phénomène peut être observé, entre les modules eux-mêmes, lorsqu'un champ est constitué de modules en strings parallèles. Pour bien comprendre le rôle de la diode by-pass nous allons fait une simulation sur un panneau photovoltaïque construit par 3 modules en parallèle et 4 en sérié et associer par deux et trois diodes sous l'effet d'ombrage environ 80%.

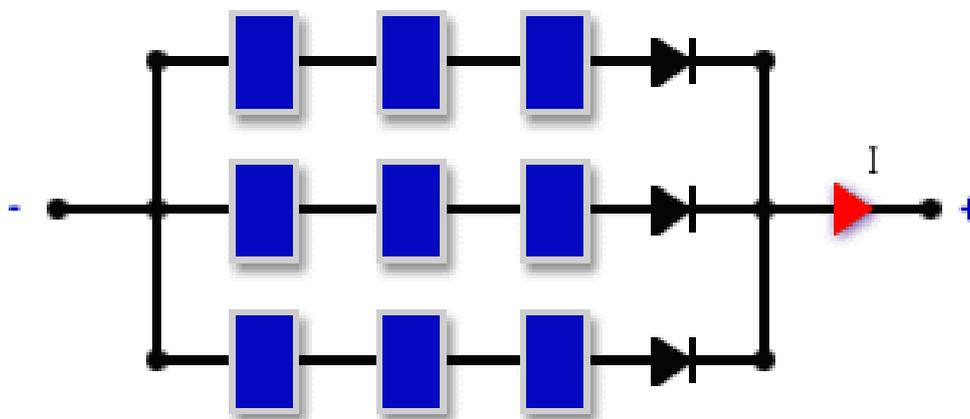


Figure IV.15 : placement de 3 diodes by-pass (D1, D2, D3) dans un panneau PV [3].

Les résultats de simulation de l'effet de la diode By-pass sur la caractéristique P-V du panneau PV (l'ombrage à 80%) sont représentés par les figures suivantes :

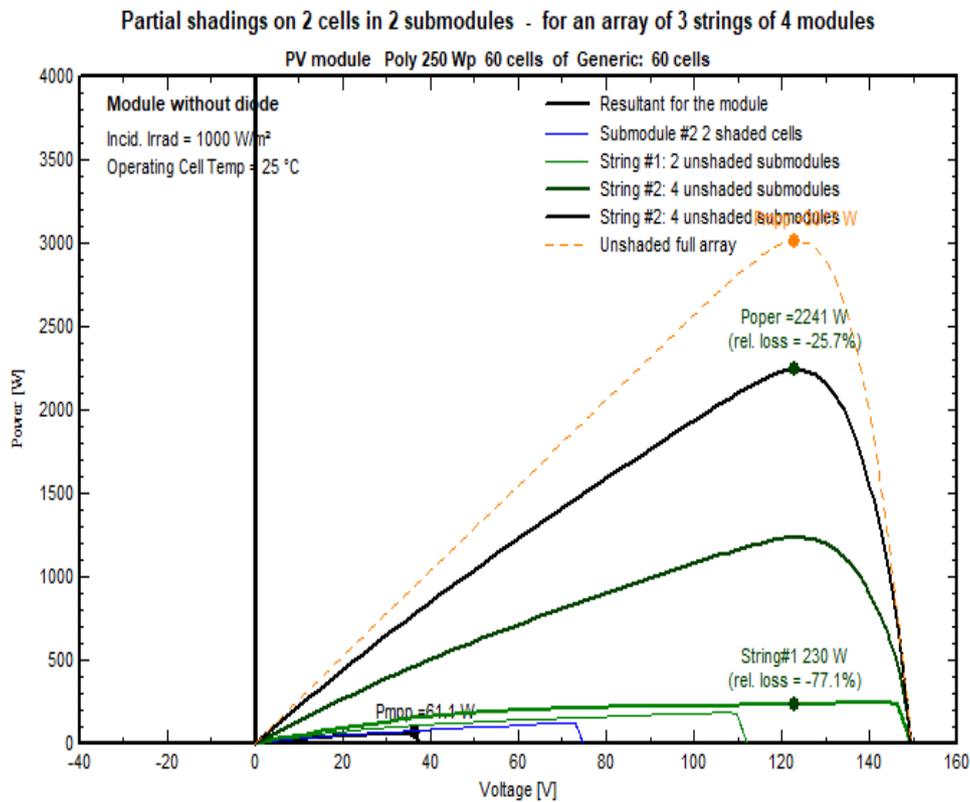


Figure IV.16 : Caractéristique P-V sans diode By-pass

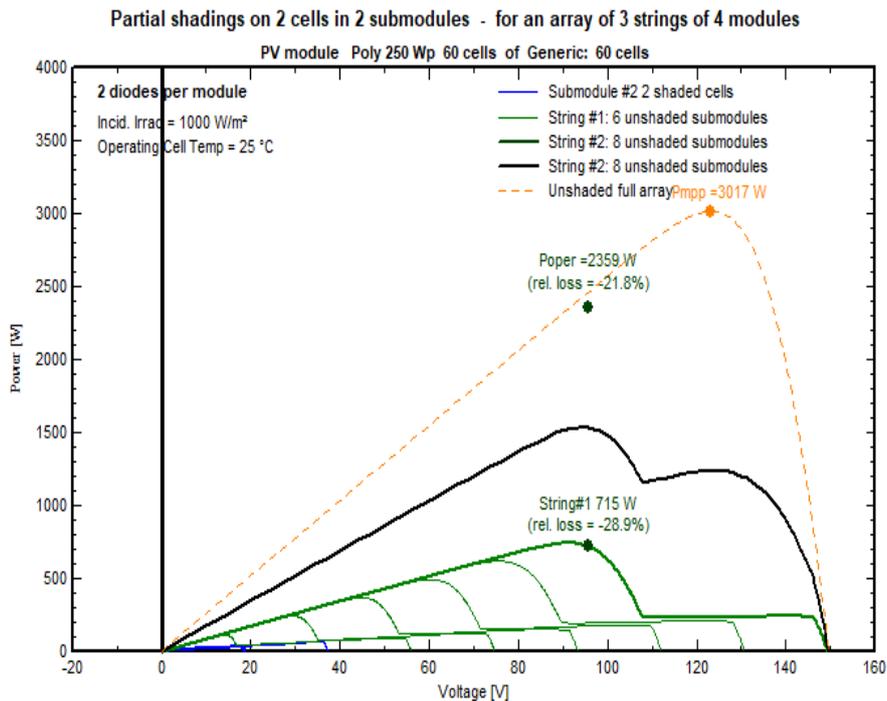


Figure IV.17 : Caractéristique P-V avec deux diodes By-pass

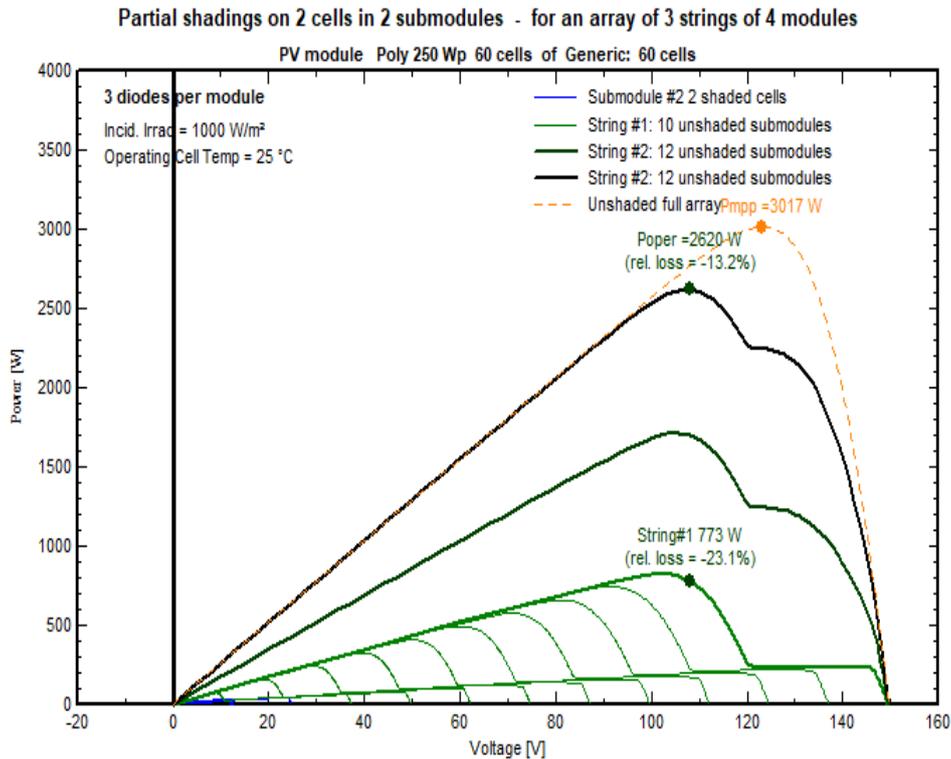


Figure IV.18 : Caractéristique P-V avec trois diodes By-pass

Les figures IV.17 et IV.18 montrent les caractéristiques puissance-tension après intégration de la diode by-pass dans le panneau photovoltaïque. Nous remarquons que cette caractéristique du panneau ombragé a été améliorée. On a également constaté que, par rapport à chaque diode, l'ajout de trois diodes par module peut atteindre des caractéristiques idéales. Lorsqu'on a étudié le système sans diodes on a constaté une perte de puissance d'environ 25,7% tandis deux diodes on a trouvé une baisse de puissance de l'ordre de 21.8% et après l'ajoute de trois diodes on a vu une baisse de puissances d'environ 13.2%.

On peut conclure que les diodes bypass servent alors à protéger les cellules à l'ombre en dérivant l'intensité "normale" pour l'empêcher de passer dans la cellule "ombragée". Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes bypass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass). Donc le rôle de la diode bypass Lorsqu'une des cellules du sous-réseau est ombragée, la diode by-pass devient passante, c'est-à-dire que le courant circule dans la diode en isolant ainsi du circuit électrique le sous-réseau de cellule associé.

VI.6 Application de l'effet d'ombrage au site de Tamanrasset

Dans cette partie, on va présenter les résultats de la simulation d'ombre à l'aide du logiciel PV système. Cette simulation a été appliquée au site de Tamanrasset car il a un climat désertique et beaucoup de soleil tout au long de l'année. En nous concentrant sur la présentation de la simulation, nous déterminerons les étapes que nous avons vécues comme suit :

IV.6.1 Désignation du projet

Le projet comprend principalement la définition de site géographique et des documents météorologiques horaires. De plus, on peut construire plusieurs variantes du système à étudier.

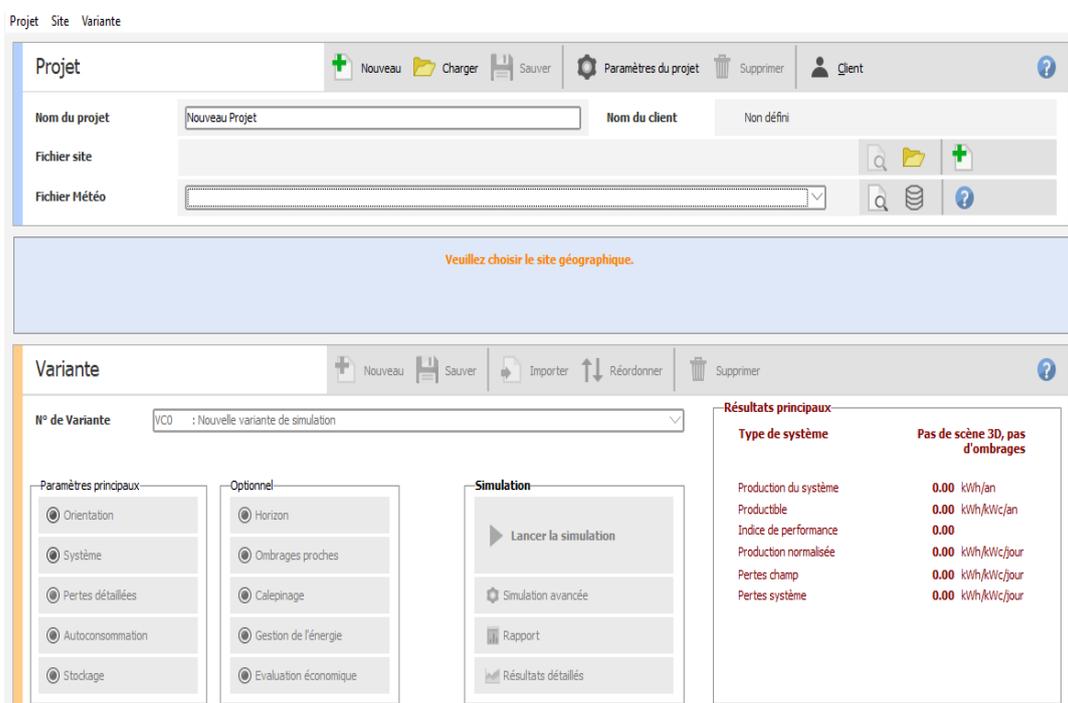


Figure IV.19 : Désignation du projet dans PVsyst

IV.6.2 Les paramètres du site

Une fois la simulation du système à l'étude démarrée, la fenêtre indiquée sur la Figure IV.20 s'affiche. Par conséquent, l'utilisateur saisit les coordonnées géographiques liées au site pertinent, cela permet d'avoir toutes les informations nécessaires sur le gisement solaire.

The screenshot shows a web application interface with the following elements:

- Navigation tabs:** Coordonnées Géographiques (selected), Météo mensuelle, Carte interactive.
- Lieu (Location):**
 - Nom du site:
 - Pays:
 - Région:
 - Buttons: "Obtenir depuis les coordonnées", "Voir carte"
- Coordonnées Géographiques (Geographical Coordinates):**
 - Section: "Trajectoires du soleil"
 - Latitude: [°] (+ = Nord, - = Hémisph. Sud)
 - Longitude: [°] (+ = Est, - = Ouest de Greenwich)
 - Altitude: M au-dessus du niv. de la mer
 - Fus. horaire: Correspondant à une différence moyenne Temps Légal - Temps Solaire = 0h 38m
 - Button: "Obtenir depuis le nom"
- Importation météo (Weather Import):**
 - Options: Meteonorm 8.0, NASA-SSE, PVGIS TMY, NREL / NSRDB TMY, Solcast TMY
 - Button: "Importer"
- Bottom Bar:** , , , , ,

Figure IV.20 : Coordonnées géographiques du site de Tamanrasset

Les caractéristiques du site de Tamanrasset sont données par les grandeurs météorologiques suivantes :

- Latitude : $22,78^{\circ}$ nord
- Longitude : $5,52^{\circ}$ ouest
- Altitude : 1377 m
- Température moyenne annuelle : $22,8^{\circ}\text{C}$

Le tableau ci-dessous donne les moyennes mensuelles des irradiations globales et diffuse ainsi que celles des températures pour le site de Tamanrasset.

Mois	Température moyenne (°C)	Flux global horizontal (KWh /m².jour)	Flux global diffuse (KWh /m².jour)
Janvier	12.9	5.19	1.00
Février	15.3	6.01	1.03
Mars	20.1	7.05	1.19
Avril	24.4	7.59	1.88
Mai	28.3	7.50	2.62
Juin	29.7	7.26	2.78
Juillet	30.3	7.63	2.42
Août	29.5	6.98	2.50
Septembre	27.7	6.48	2.00
Octobre	23.8	5.93	1.48
Novembre	18.1	5.20	1.05
Décembre	13.9	4.45	1.03

Tableau IV.1 : Données Météorologiques mensuelles de Tamanrasset

Nous avons remarqué que la température moyenne en juillet est de 30,3 ° C, le mois le plus chaud de l'année, tandis que la température moyenne en janvier est de 12,9 ° C, le mois le plus froid de l'année et pour le flux est plus important en mois juillet.

Par ailleurs, la Figure IV.21 montre la trajectoire du soleil à chaque heure de la journée pendant les mois de l'année selon les deux coordonnées : l'azimut (angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'Est) et la hauteur du soleil (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu).

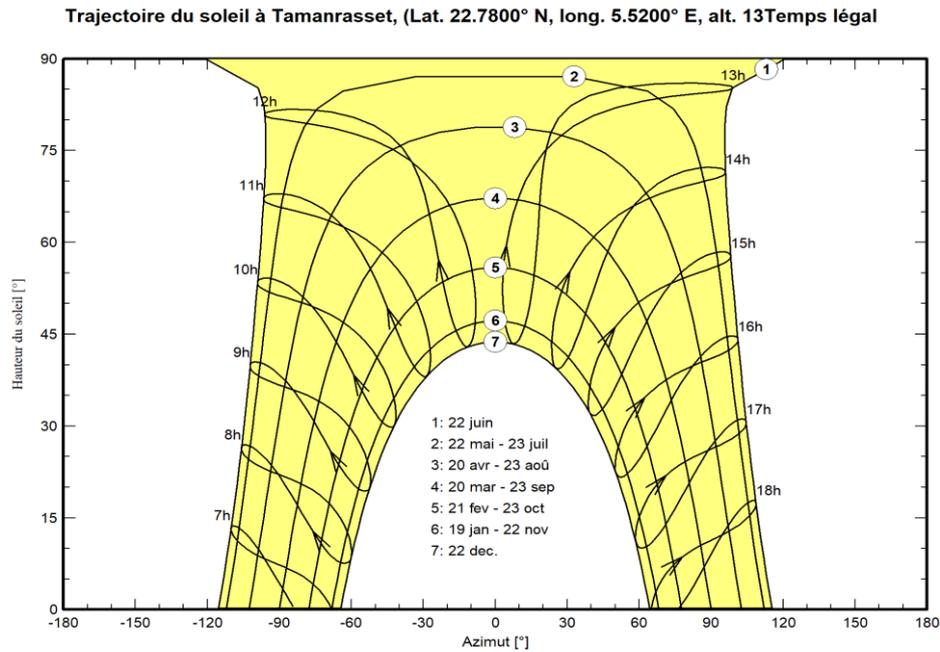


Figure IV.21 : Diagramme de la trajectoire du soleil

IV.6.3 Orientation des panneaux

Vu le prix élevé des modules PV, il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie.

Pour notre installation photovoltaïque sur un site de Tamanrasset, nous avons choisi un plan incliné fixe d'une inclinaison 30° et Azimut 20° (par rapport à l'horizontale) comme l'illustre la figure (IV.22) c'est l'inclinaison optimale donnée par le logiciel PVSYST, en dehors de cette dernière le rendement diminue.

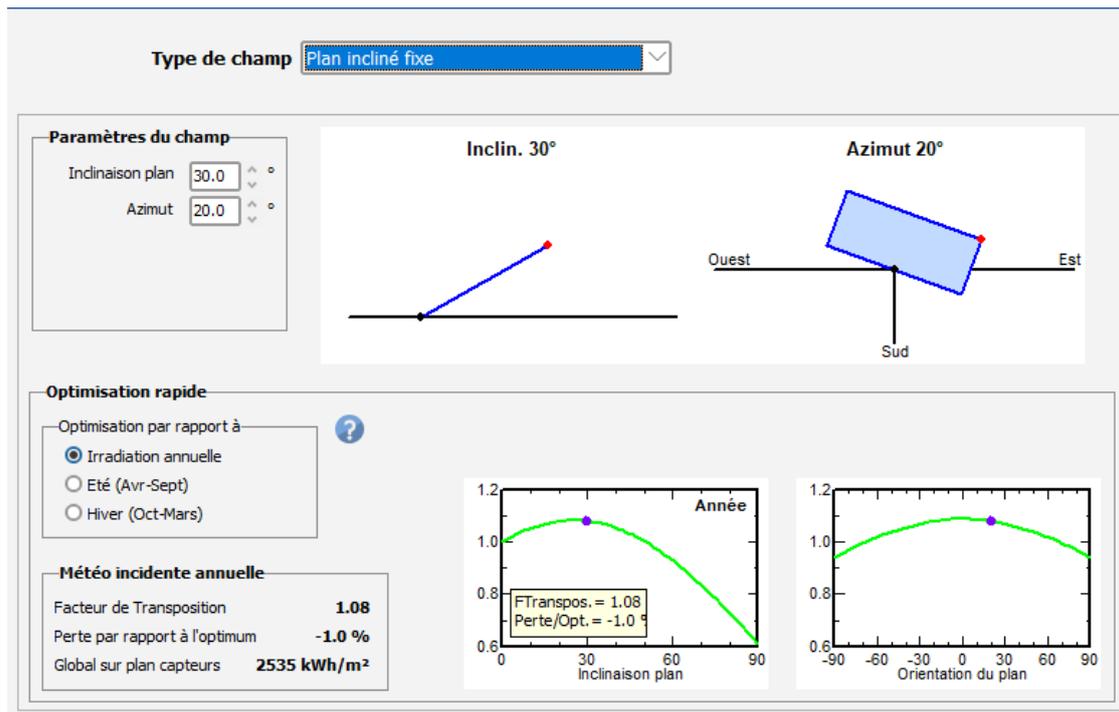


Figure IV.22 : Orientation des panneaux dans le site de Tamanrasset

IV.6.4 Simulation d'ombrage partiel relatif au site de Tamanrasset pour un panneau photovoltaïque

Les résultats de simulation de l'ombrage partiel relatif au site de Tamanrasset sont donnés par les figures suivantes :

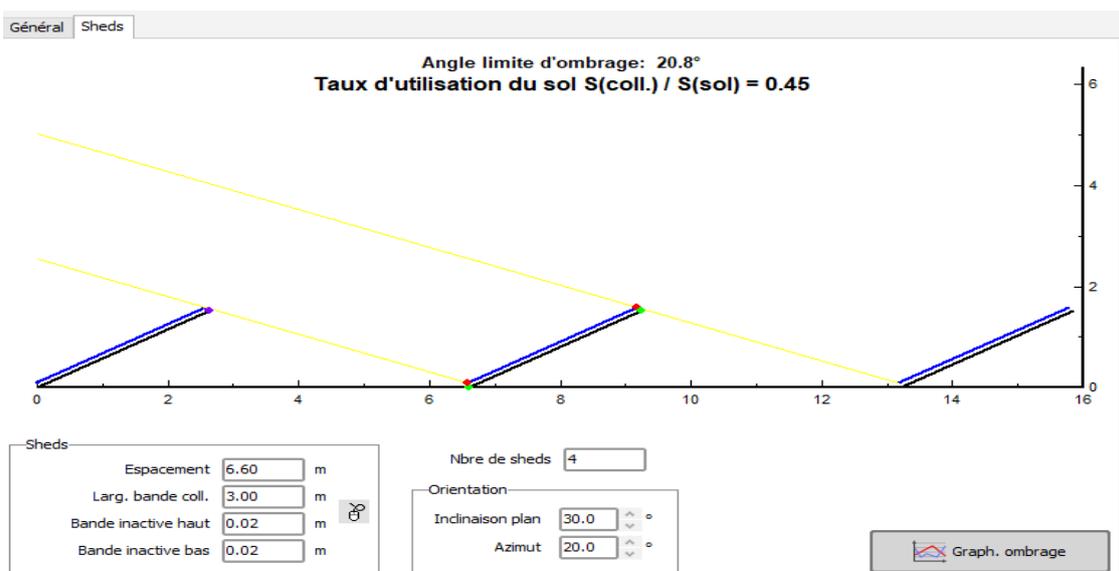


Figure IV.23 : Orientation des panneaux dans le site de Tamanrasset dans le cas d'ombrage partiel.

Ombrage mutuels des sheds à Tamanrasset, (Lat. 22.7800° N, long. 5.5200° E, alt. 1377 m Temps légal

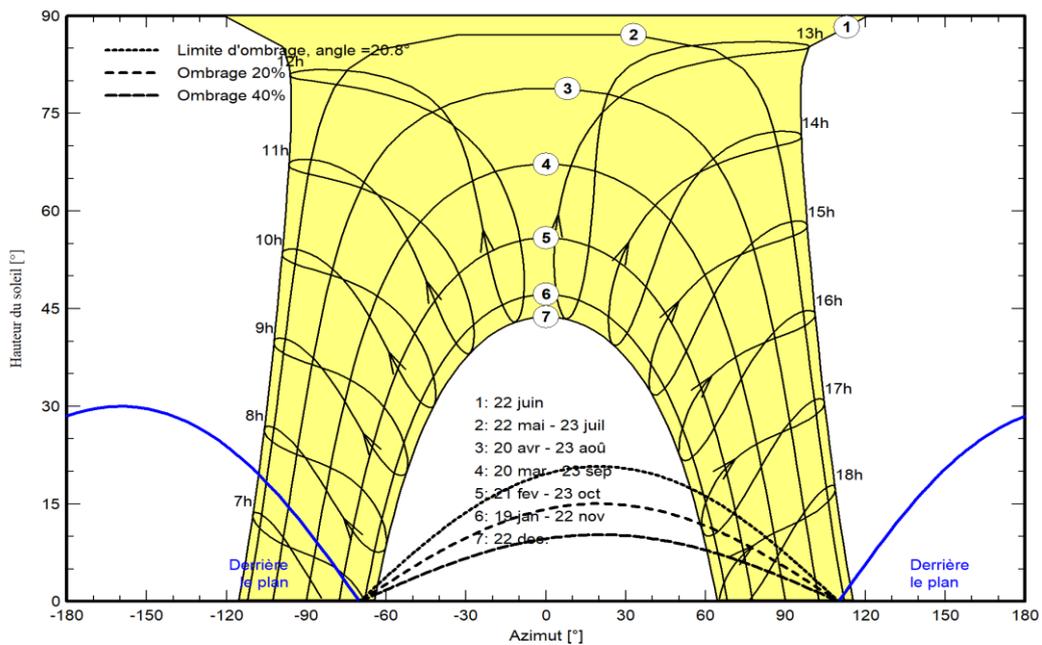


Figure IV.24 : Trajectoire du soleil au site de Tamanrasset ombragée partiellement

Cette figure représente la hauteur du soleil d'une année d'ombrage partiel du module photovoltaïque.

Le tableau suivant représente les valeurs du flux global horizontal, incliné, et avec ombrage partiel.

Mois	Flux global horizontal (KWh/m ² .jour)	Flux global incliné (KWh/m ² .jour)	Flux global avec ombrage partiel (KWh/m ² .jour)
Janvier	5.19	6.88	6,84
Février	6.01	7.33	7,30
Mars	7.05	7.77	7,70
Avril	7.59	7.84	7,62
Mai	7.50	7.08	7,02
Juin	7.26	6.63	6.58
Juillet	7.63	7.04	6,99
Août	6.98	6.83	6.78
Septembre	6.48	6.91	6,87
Octobre	5.93	6.95	6,92
Novembre	5.20	6.70	6,67
Décembre	4.45	6.03	5,99
Année	6.44	6.99	6.94

Tableau IV.2 : Valeurs des flux solaires relatives au site de Tamanrasset

D'après les résultats du tableau IV.2 nous constatons que les quatre mois (Mars, Avril, Mai et juillet) ont la plus grande d'énergie par rapport aux autres mois.

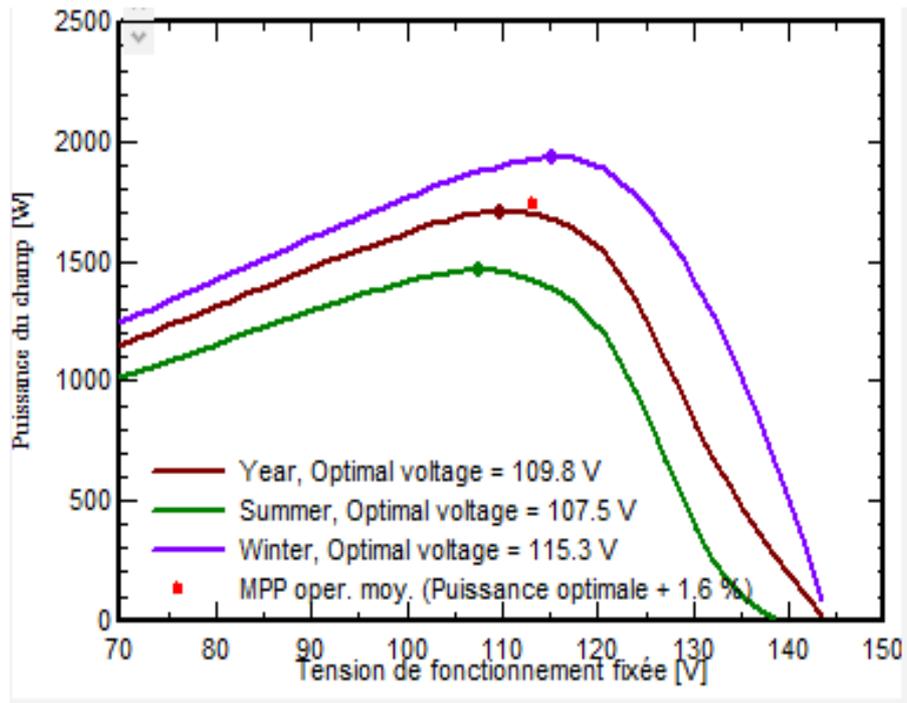


Figure IV.25 : Caractéristique P-V du site de Tamanrasset

La figure IV.25 représente la puissance de panneaux solaire composée de quatre modules poly cristallin en série et trois en parallèle en fonction de la tension. On a remarqué que la puissance optimale pour l'hiver est égale à 1900 W pour une tension de 115,3 V, mais la valeur en l'été est à 1450 W pour une tension de 107.5 V. Au total, la puissance optimale au cours de l'année est égale à 1700 W pour une tension de 109,8V.

Nous avons conclu que les panneaux photovoltaïques orientés vers le sud (angle d'azimut est de 20 °) avec l'angle d'inclinaison est de 30 ° (par rapport à l'horizontale), et malgré l'influence d'ombrages, ils produisent un maximum d'énergie au cours de l'année.

IV.6.5 étude d'effet de l'ombre d'une maison avec cheminé et d'arbre sur un champ photovoltaïque à Tamanrasset

Après avoir étudié l'effet de l'ombre partiel sur les panneaux solaires dans une région avec le logiciel PVsyst, il est passé par quelques étapes comme le suivant : la connaissance des coordonnées géographiques et météorologiques et la quantité de rayonnement (flux) et l'orientation du panneau et avant tout ça il faut connaître le type de module photovoltaïque utilisé pour l'installation du champ Pv. En plus de ces étapes liées au site et aux panneaux utilisés et son orientation, on doit connaître les caractéristiques de la maison, ainsi que l'arbre accolé au champ photovoltaïque.

Les étapes sont comme le suivant :

The screenshot displays a software interface for configuring a photovoltaic system. It is divided into several sections:

- Sous-champ:** Includes fields for 'Nom' (Champ PV), 'Inclinaison' (30°), 'Azimut' (20°), and 'Aide au dimensionnement' with a target power of 25.0 kWc and a surface of 163 m².
- Sélection du module PV:** Shows 'Generic' modules (250 Wp, 25V, Si-poly) with a 'Typical' configuration. It indicates approximately 100 modules are needed and provides Vmpp (60°C) of 26.3 V and Vco (-10°C) of 41.7 V.
- Sélection de l'onduleur:** Shows a 'Generic' inverter (12 kW, 350-600 V, TL, 50/60 Hz, 12 kWac inverter) with 2 inverters. It specifies a global power of 24.0 kWac and a maximum input voltage of 800 V.
- Dimensionnement du champ:** Shows 19 modules in series and 6 chains, resulting in 114 modules and 185 m² of surface. It lists operating conditions: Vmpp (60°C) 500 V, Vmpp (20°C) 596 V, Vco (-10°C) 792 V, and Irradiance plan of 1000 W/m². Key results include: Impp (STC) 49.2 A, Isc (STC) 51.8 A, and a nominal field power (STC) of 28.5 kWc.

Figure IV.26 : Caractéristique de champ photovoltaïque.

Résumé du système global :

- Nombre de modules 114 (19 en série et 6 en parallèle)
- Surface modules 185 m²
- Nombre d'onduleurs 2
- Puissance PV nominale 28.5 kwc
- Puissance PV maximale 29.1 kW DC
- Puissance AC nominale 24 kW AC
- Rapport pnom 1.188

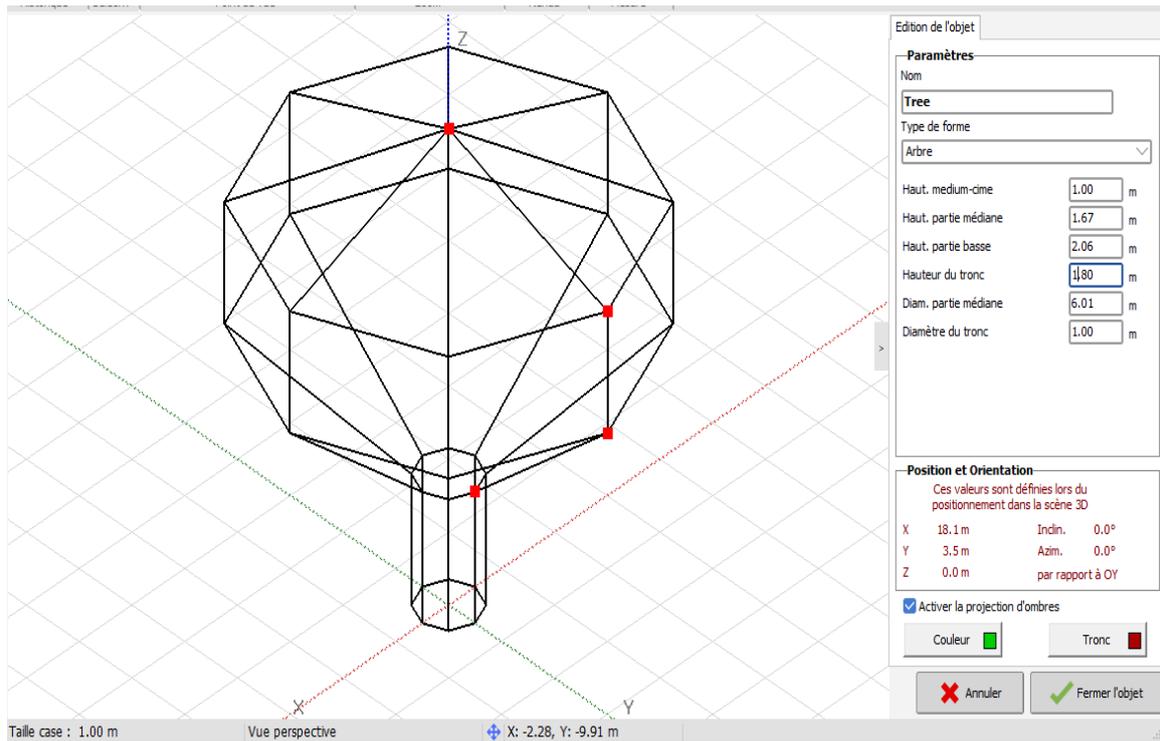


Figure IV.27 : Caractéristique de l'arbre.

Les étapes pour construire une maison avec cheminé sont :

1^{er} étapes : les paramètres de la base sous forme Parallélépipède

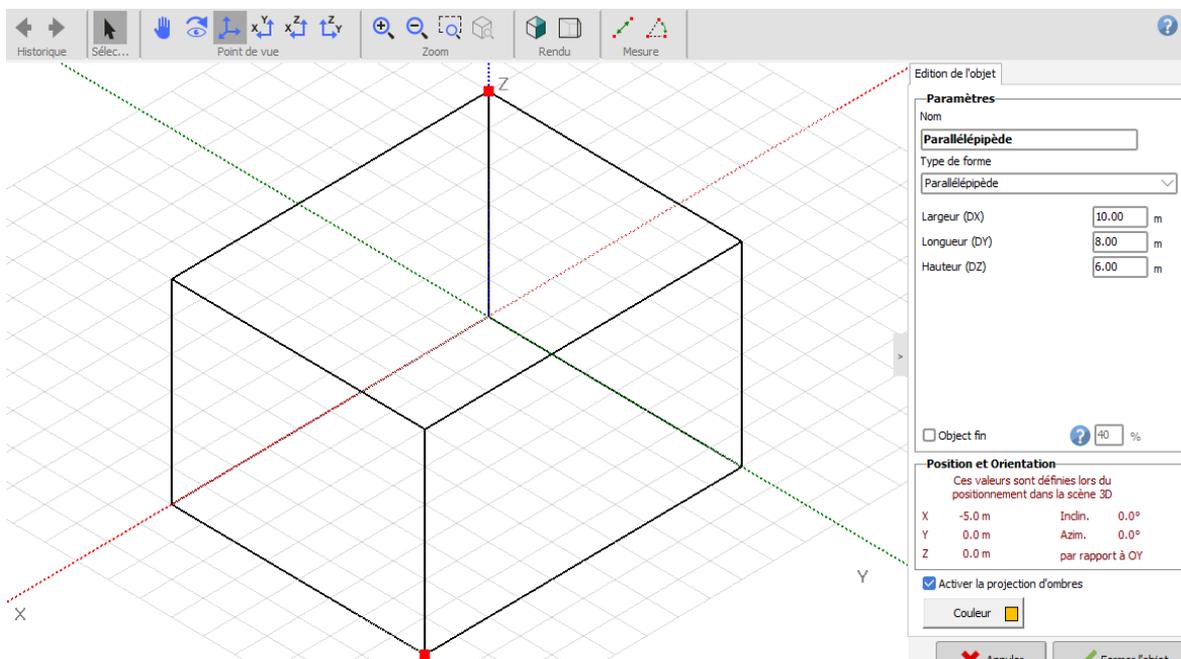


Figure IV.28 : caractéristique de la base de maison (Parallélépipède).

2^{ème} étapes : les paramètres de toiture de la maison

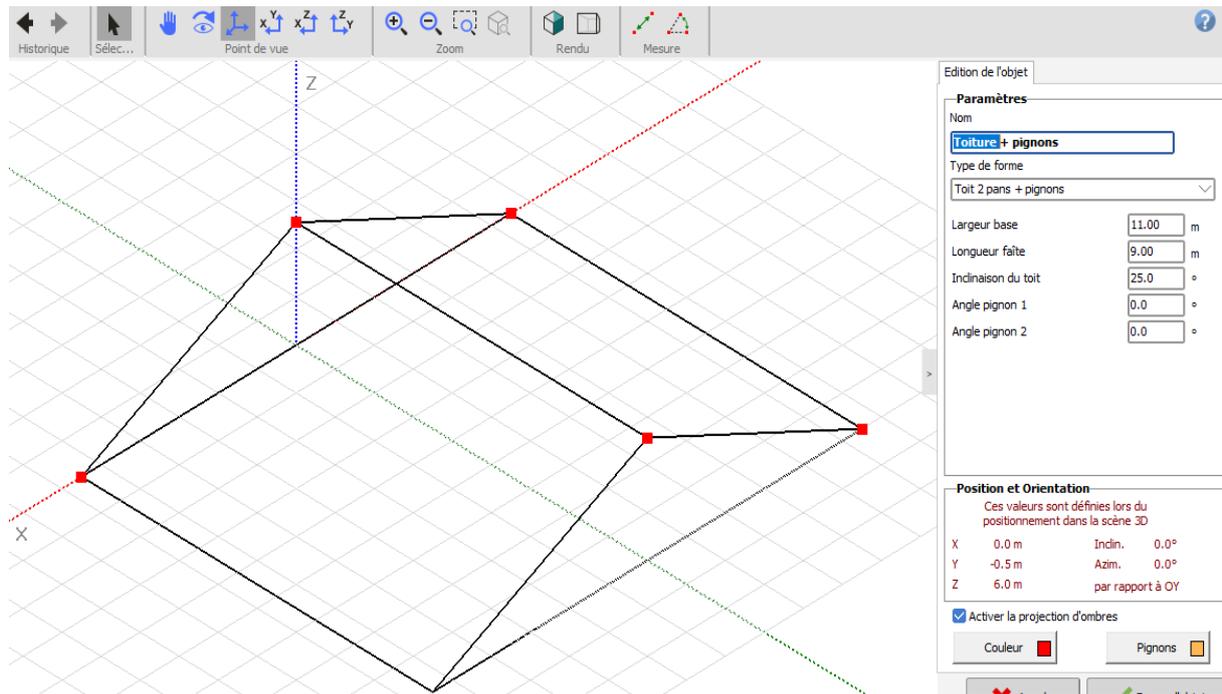


Figure IV.29 : caractéristique de toiture de la maison (Toiture + pignons).

3^{ème} étapes : les paramètres de la cheminée

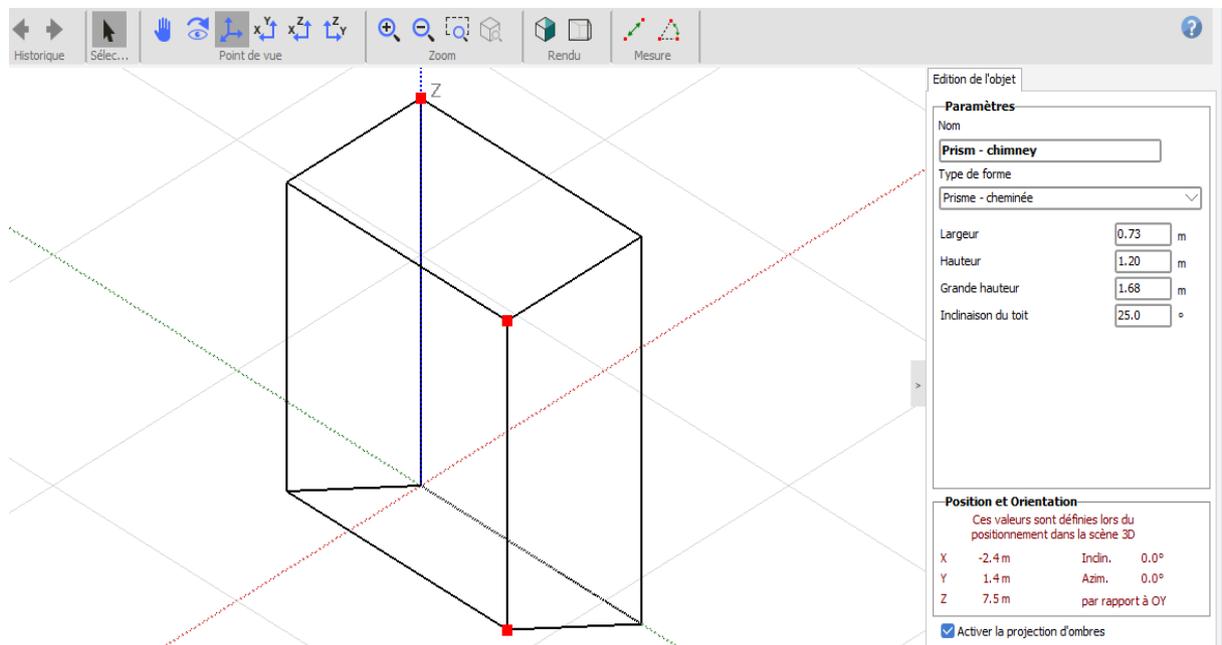


Figure IV.30 : caractéristique de la cheminée de la maison (Prism).

Le dessin de planification final sur lequel l'étude sera menée est bien illustré sur la figure suivante :

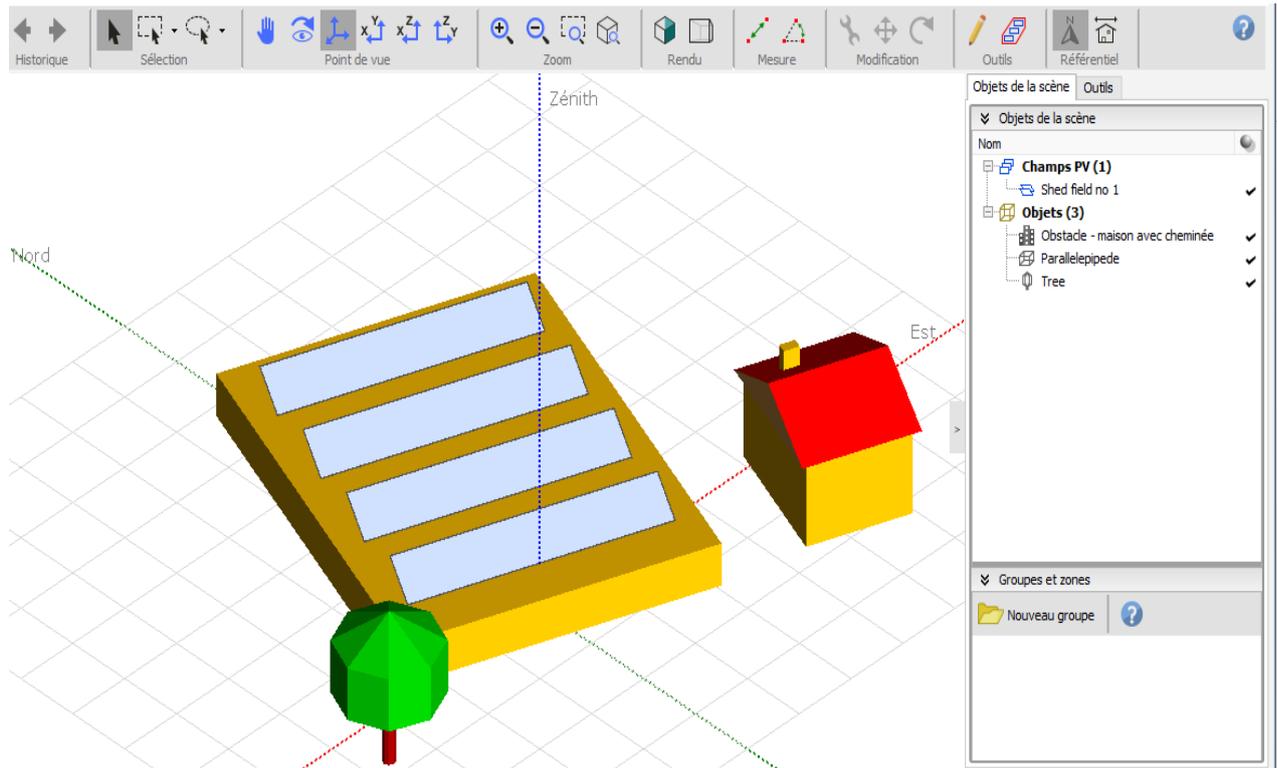


Figure IV.31 : l'effet l'ombrage la maison et l'arbre sur un champ des panneaux photovoltaïque.

Après simulation de notre projet les résultats obtenus sont présentés par les figures suivantes :

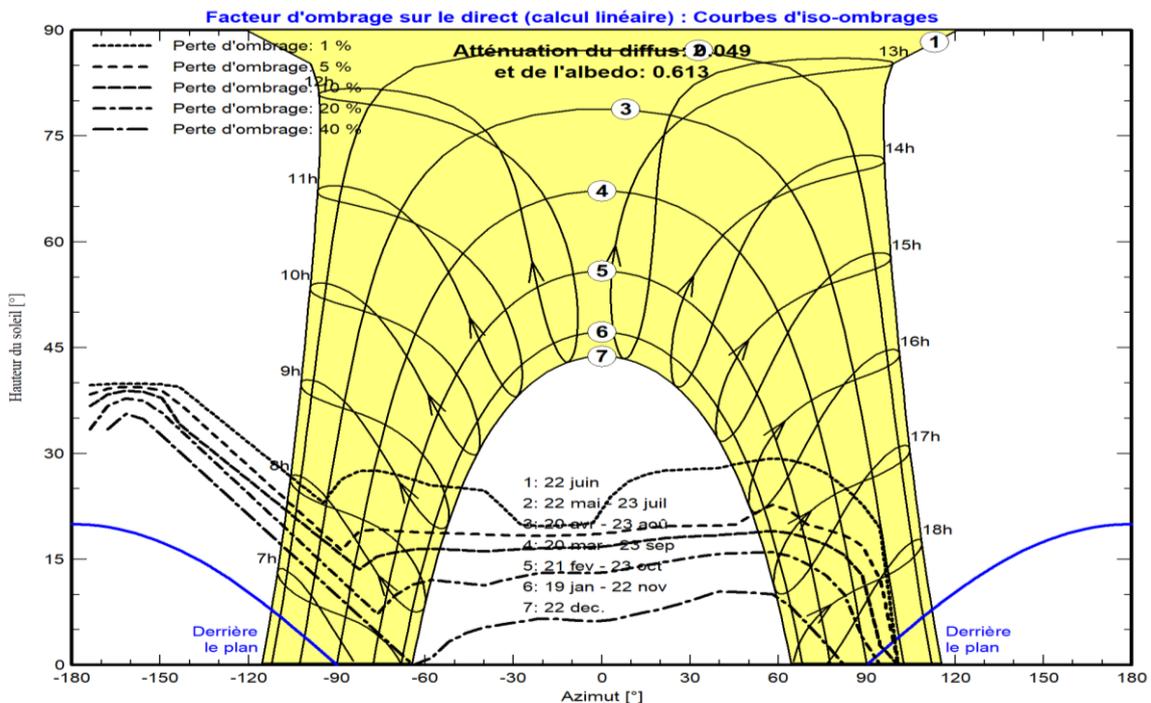


Figure IV.32 : Diagramme de facteurs d'ombrage sur le champ PV à Tamanrasset.

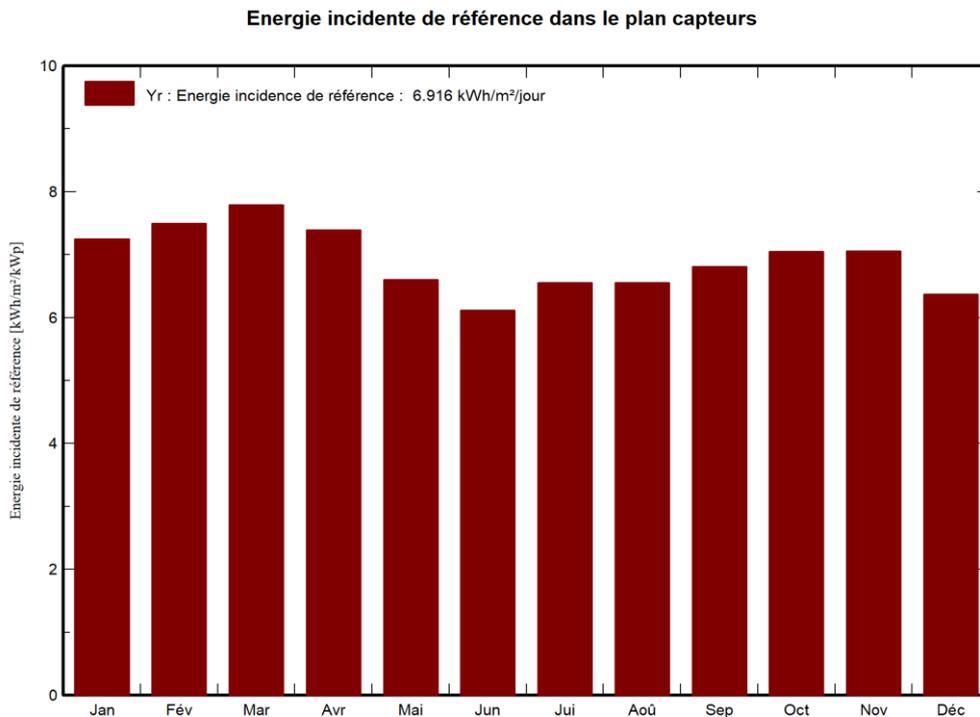


Figure IV.33 : Diagramme d'énergie incidente au cours de l'année

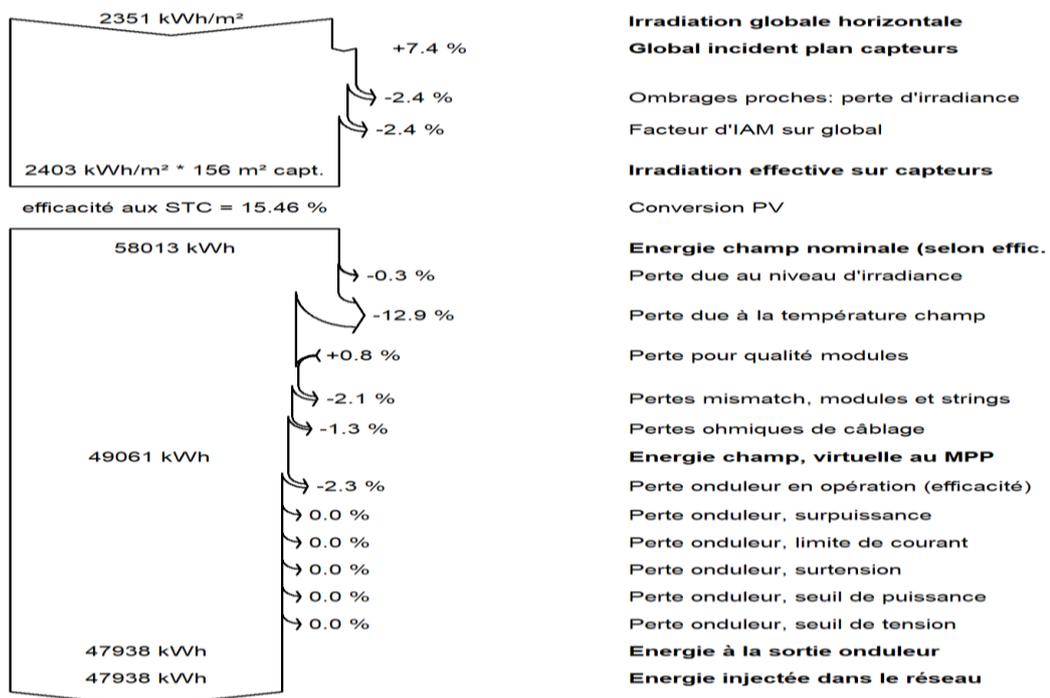


Figure IV.34 : Diagramme des pertes d'énergie au cours de l'année.

La figure IV.32 montre les facteurs d'ombrage sur le champ étudié, nous avons aperçu qu'entre le 20 mai à 23 septembre la perte d'ombrage environ 40% et entre le 23 février à 23 octobre la perte d'ombrage environ 20% et Après avoir analysé la Figure IV.33, on a constaté que pendant les trois mois de l'année (février, mars et avril respectivement), l'énergie incidente du champ PV ombragé par la maison et l'arbre sur le site de Tamanrasset est importante. L'énergie incidente est égale à $6,916\text{kWh/m}^2/\text{jour}$ durant toute l'année.

La figure IV.34 résume les pertes de la production d'énergie de système PV à savoir : les pertes ohmiques du câblage, effet d'incidence, pertes dues à la température du champ, pertes dues à la qualité des modules,...etc. En effet, nous avons l'énergie produit par le champ PV (énergie sortie du champ) estimée à 58013 KWh et réduite à 47938 KWh à la sortie pour utilisateur.

Ensuite, nous conclut que l'ombrage affecte grandement l'irradiation cela conduit à une perte d'énergie, quant à la température à un effet direct sur les pertes d'énergie massives.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis au point un logiciel de simulation permettant d'étudier l'effet d'ombrage partiel d'un panneau PV. En effet, l'intégration de la diode bypass dans ce système a amélioré la valeur du point de puissance maximale dans les caractéristiques I-V et P-V.

À la fin nous avons fait une étude détaillée sur l'effet de l'ombre d'un arbre et d'une maison sur un champ photovoltaïque dans la région de Tamanrasset et on a obtenu des résultats très satisfaisant, toute cette étude nous pousse à choisir un bon endroit pour installer des panneaux solaires, loin de l'ombre et à surveiller les panneaux et à les protéger des facteurs extérieurs pour obtenir un bon rendement énergétique.

IV.8 Bibliographie

[1] Merabti Yousef 'Mémoire de fin d'étude master, « Etude et réalisation d'un système photovoltaïque hybride à trois sources », université de Biskra 2016.

[2] Elkeim Lalla Moulati et Abdellah Lahcen' Mémoire de fin d'étude master, «Etude et simulation d'un parking solaire connecté au réseau électrique publique», université de Adrar 2019.

[3]<http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/images/module-pv-sans-diode-by-pass-fontionnement-normal.jpg>.

Conclusion générale



Conclusion générale

Pour la conception de systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile sur l'énergie solaire est la valeur mensuelle du rayonnement global reçu par les panneaux solaires, qui est incliné par rapport au plan horizontal d'un angle correspondant à la latitude locale pour faciliter la capture de l'énergie solaire. Le fonctionnement de la cellule solaire est contrôlé par un modèle dérivé du circuit équivalent, qui produit une équation courant-tension $I(V)$ non linéaire. Pour un éclairage donné à température ambiante, la caractéristique courant-tension $I(V)$ nous renseigne sur le comportement de la cellule solaire. Cette dernière est comme un générateur, et sa tension aux bornes et le courant qu'elle fournit représentent la caractéristique $I(V)$. Cette caractéristique est affectée par de nombreux facteurs, tels que : la température, le flux lumineux, la résistance shunt, la résistance série.

La cellule occultée peut subir une tension inverse trop élevée ou être traversée par un courant trop important, il peut résulter des dégradations irréversibles pouvant entraîner la destruction de toute une station. Donc l'occultation est un phénomène aléatoire, la puissance dissipée représente l'inconvénient majeur.

Ce travail est basé sur la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque, L'objectif principal de notre contribution est d'optimiser la production des systèmes photovoltaïques afin d'atténuer les pertes de puissances dues aux phénomènes d'ombrages partiels.

Après une introduction générale, dans le premier chapitre, nous avons présenté en détail le fonctionnement de la technologie photovoltaïque ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la cellule photovoltaïque, les différents facteurs qui influent sur les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ tout en améliorant leurs rendements.

Le troisième chapitre on a illustré les points importants de ce mémoire tels que l'Influence de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques et les différents types d'ombrage subi. Ensuite on a présenté l'influence de l'ombrage sur la caractéristique $I-V$ suivi d'une intégration de la diode By-pass et la diode anti-retour s'avèrent importantes dans les modules photovoltaïques où les cellules sont ombragées, ces deux diodes permettent d'éviter la dégradation des cellules ; et d'améliorer les caractéristiques $I-V$ et $P-V$.

Dans le quatrième chapitre, nous avons mis en évidence à l'aide du logiciel PV System, que l'ombrage partiel d'une cellule sur un module nécessite l'utilisation d'une diode By-pass

Conclusion générale

pour obtenir une caractéristique idéale. Ainsi nous avons montré l'influence du taux d'ombrage sur la puissance maximale et le rendement, il en résulte que le module polycristallin sous ombrage perd leur caractéristique I-V et P-V. Et à la fin on a fait une simulation sur l'effet de l'ombrage d'un arbre et une cheminé sur un champ photovoltaïque dans la région de Tamanrasset et on a obtenu des résultats très satisfaisant, toute cette étude nous pousse à choisir un bon endroit pour installer des panneaux solaires, loin de l'ombre et à surveiller les panneaux et à les protéger des facteurs extérieurs pour obtenir un bon rendement énergétique.

Perspectives :

Comme perspectives de ce travail, nous envisageons de réaliser une simulation sur une installation photovoltaïque connectée au réseau électrique.

- Réduction des pertes optiques : utilisation des matériaux constituant le module photovoltaïque, très transparents dans l'encapsulation
- Application de cette simulation aux modules PV avec d'autre technologie 3^{ème} génération sera envisagé

Résumé

Puisque nous vivons dans un monde de vitesse et de technologie, il n'est pas surprenant de voir que la science a atteint la découverte des énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire, que toutes les lumières ont été allumées récemment, car toutes les études et recherches visent toujours à augmenter le pourcentage d'énergie produite par les panneaux solaires. Le Sahara de l'Algérie reçoit une énergie de rayonnement solaire importante pendant toute l'année avec un taux très élevé à sa surface. Nous avons modélisé un générateur photovoltaïque en se basant sur les équations électriques et mathématiques qui régissent son comportement ainsi que la dégradation des caractéristiques de ce générateur en fonction des conditions météorologiques (température et éclairage). L'objectif principal de notre travail est l'étude de l'influence du taux d'ombrage sur les performances d'un panneau photovoltaïque à base de Silicium Polycristallin. Les résultats obtenus montrent que, le comportement du module est dégradé lorsqu'il fonctionne dans des conditions d'ombrage. L'augmentation du taux d'ombrage sur une cellule produit plus de déformation de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du module. Le point de puissance maximale MPP se déplace vers les valeurs plus basses de la tension. La perte de puissance peut atteindre 13.2% pour l'ombrage de 70% de deux submodules et 22.4% de trois submodules. La simulation par logiciel PV système a été élaborée permettant d'établir l'effet de l'ombrage d'une maison et l'arbre sur un champ photovoltaïque dans la région de Tamanrasset, les résultats obtenus seront présentés et discutés pour améliorer le point de puissance maximale et le rendement énergétique.

Mots-clés : Simulation, Point de puissance maximum MPP, Module photovoltaïque, Polycristallin, Diode by-pass, ombrage partiel.

Abstract

Since we live in a world of speed and technology, it is not surprising to see that science has reached the discovery of renewable energies, including solar energy that all the lights have been on recently, because all the studies and research always aim to increase the percentage of energy produced by solar panels. The Sahara of Algeria receives significant solar radiation energy throughout the year with a very high rate at its surface. We have modeled a photovoltaic generator based on the electrical and mathematical equations, which govern its behavior as well as the degradation of the characteristics of this generator according to meteorological conditions (temperature and lighting). The main objective of our work is the study of the influence of the shading rate on the performance of a photovoltaic panel based on Polycrystalline Silicon. The results obtained show that the behavior of the module is degraded when it operates in shaded conditions. Increasing the shading rate on a cell produces more distortion of the $I(V)$ and $P(V)$ characteristic of the modulus. The point of maximum power MPP shifts to lower voltage values. The power loss can reach 13.2% for the shading of 70% of 2 submodules and 22.4% of 3 submodules. The PV system software simulation has been developed to establish a photovoltaic field on the roof of a house in the Tamanrasset region; the results obtained will be presented and discussed to improve the point of maximum power and energy efficiency.

Keywords: Simulation, Maximum MPP power point, Photovoltaic module, Polycrystalline, Bypass diode, partial shading.

ملخص

كوننا نعيش في عالم السرعة والتكنولوجيا ليس من المستغرب أن نرى بان العلم وصل الى اكتشاف طاقات متجددة ومن بينها الطاقة الشمسية التي صبت عليها كل الأضواء في الأونة الأخيرة حيث كل الدراسات والأبحاث تهدف دائما الى زيادة نسبة الطاقة المنتجة من طرف الألواح الشمسية تتلقى صحراء الجزائر طاقة إشعاعية شمسية كبيرة على مدار العام بمعدل مرتفع للغاية على سطحها. لقد قمنا بنمذجة المولد الكهروضوئي بناء على المعادلات الكهربائية والرياضية التي تحكم سلوكه وكذلك تدهور خصائص هذا المولد وفقاً لظروف الأرصاد الجوية (درجة الحرارة والإضاءة). الهدف الرئيسي من عملنا هو دراسة تأثير معدل التظليل على أداء الألواح الكهروضوئية القائمة على السليكون متعدد الكريستال. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن سلوك الوحدة النمطية يتدهور عندما تعمل في ظروف مظلمة. تؤدي زيادة معدل التظليل في الخلية الى حدوث مزيد من إلى قيم جهد أقل. يمكن أن يصل فقد الطاقة إلى 13.2% MPP الخاصة بالمعامل. تتحول نقطة القوة القصوى $P(V)$ و $I(V)$ التشويه في الخاصية لتظليل 70% من وحدتين فرعيتين و 22.4% من ثلاث وحدات فرعية. تم تطوير محاكاة برمجيات النظام الكهروضوئي لإنشاء حقل ضوئي على سطح منزل في منطقة تمنراست، وسيتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها لتحسين نقطة الحد الأقصى للطاقة وكفاءة الطاقة.

الكلمات الرئيسية:

المحاكاة، الحد الأقصى لنقطة الطاقة، الوحدة الكهروضوئية، متعدد الكريستال، الصمام الثنائي الالتفافي، التظليل الجزئي