

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique

Spécialité : Électrotechnique.

Option : Machines Electriques.

Modélisation d'un panneau photovoltaïque et Etude comparative

Proposé et dirigé par : Pr. N.BENAMROUCHE

Présenté par :

M^{elle} : AKLI YAMINA

M^{elle} : RAHALI DJAMILA

2012/2013

Remerciements

Ce travail a été effectué au laboratoire LATAGE de la faculté de Génie Electrique et d'informatique de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.

Nous remercions dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

En premier lieu, nous tenons à remercier Mr **Nacereddine BENAMROUCHE** Professeur à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ces conseils et ses encouragements continuels.

Par ailleurs, nous tenons à remercier Mr Salah HADDAD Professeur à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour leurs conseils et son aide dans l'élaboration de ce travail.

Que Monsieur DENOUN Hakim, maître de conférences à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour avoir accepté de juger ce travail en tant qu'examineur.

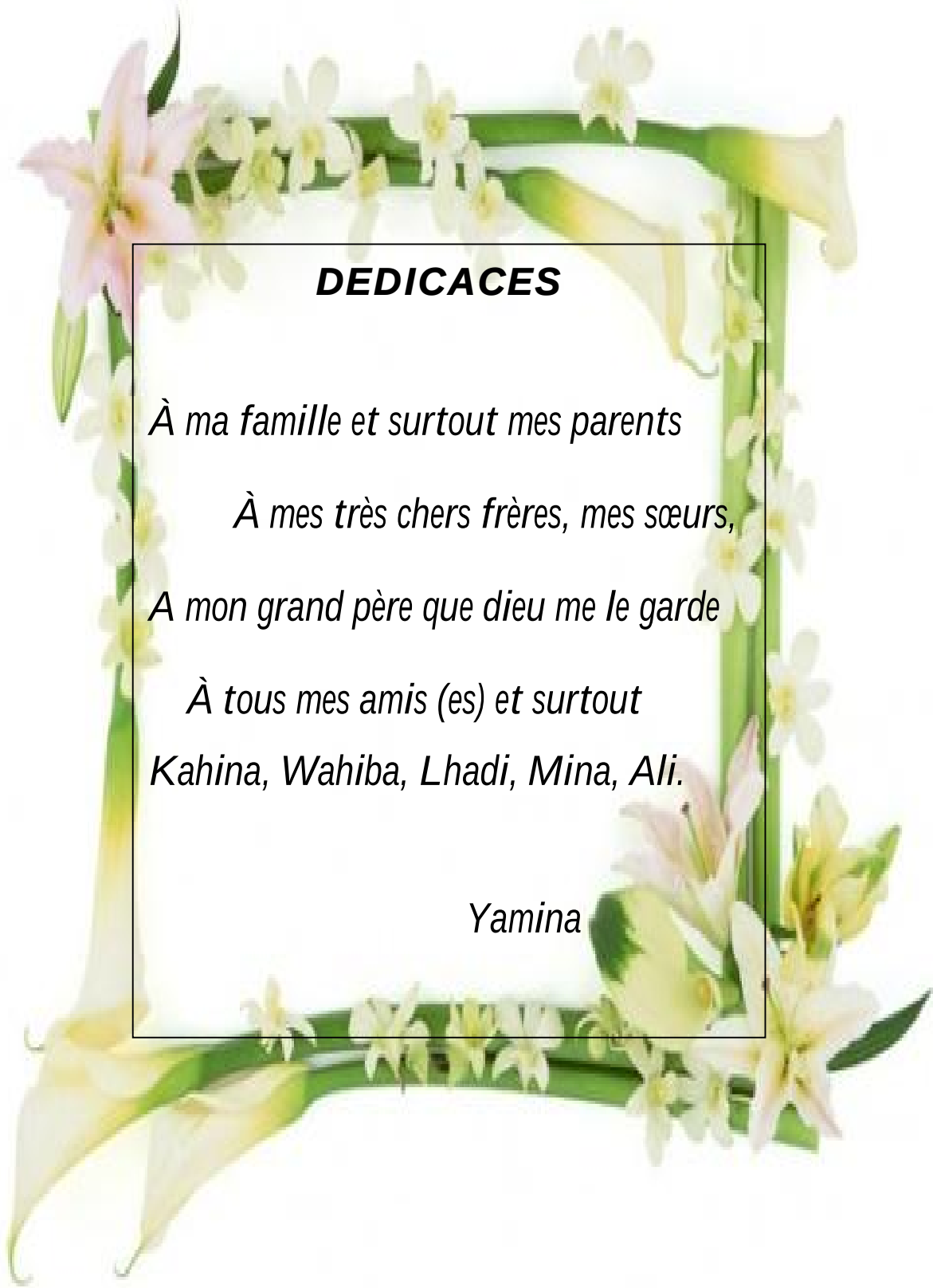
Mes remerciements s'adressent également à Monsieur BENYAHIA Nabil, Maître assistant à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, pour sa disponibilité et pour avoir accepté d'être membre du jury.

Nous tenons à remercier aussi toute l'équipe de recherche de Laboratoire LATAGE en particulier Mr Zaouïa Mostapha et Ounnadi Mohammed pour leurs générosités et leurs aides.

Nous n'oublierons pas de remercier M^{lle} Hellali Kamilia pour son aide, ses précieux conseils et sa gentillesse.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département d'électrotechnique pour leurs conseils et surtout leur amitié.

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à tous étudiants de promotion 2013.



DEDICACES

À ma famille et surtout mes parents

À mes très chers frères, mes sœurs,

A mon grand père que dieu me le garde

À tous mes amis (es) et surtout

Kahina, Wahiba, Lhadi, Mina, Ali.

Yamina

Dédicaces

*Avec l'aide de Dieu, tout puissant, j'ai pu achever ce
modeste travail que je dédie à:*

*Mes très chers parents pour leurs soutiens et leurs
encouragements tout au long de mon cursus, que dieu me les
garde.*

*Mes très chères sœurs : Zakia, Souhila, Yasmine et Kahina.
Mon cher frère : Chafaa.*

Mes fidèles amis : Samia, Wahiba, Badji et Lhadi.

A tous ceux-qui me sont très chers.

*Pour toute personne que j'ai connue lors de mon
bref passage à l'université.*

DJAMILA

Liste des figures

Figure I.1. Image du soleil.....	04
Figure I.2. Les différents types de rayonnements solaires	05
Figure I.3. Schéma indiquant le nombre de la masse d'air (AM) en fonction de la position	08
Figure I.4. Répartition spectrale du rayonnement solaire : hors atmosphère AM0, au niveau de la mer avec le soleil à l'aplomb AM1 et avec le soleil 48,19 AM1.5	09
Figure I.5. Structure de la cellule photovoltaïque	11
Figure I.6. Dopage de type P	12
Figure I.7. Dopage de type N.....	12
Figure I.8. Cellule en silicium poly cristallin	13
Figure I.9. Cellule en silicium monocristallin	13
Figure I.10. Le schéma suivant décrit les différentes étapes de la production d'un système Photovoltaïque	16
Figure I.11. Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous éclairnement	17
Figure I.12. Architecteur classique d'un module PV de type '80M-12'(Laboratoire LATAGE, UMMTO).....	18
Figure I-13 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en série	19
Figure I.14. Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle.....	20
Figure I.15. Regroupement série et parallèle.....	21
Figure I.16. Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque	21
Figure I.17. Les différentes zones de la caractéristique I (V).....	22
Figure I.18. La caractéristique I-V et les différents paramètres de la cellule PV	22
Figure II.1. Installation photovoltaïque avec alimentation directe	28
Figure II.2. Système photovoltaïque avec stockage.....	29
Figure II.3. Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque groupe électrogène.....	30
Figure II.4. Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	30
Figure II.5. Fonctions principales d'un système photovoltaïque.....	31
Figure II .6. Régulateur série	35
Figure II.7. Schéma du système photovoltaïque avec la commande MPPT	38
Figure II.8. Système utilisé au niveau du Laboratoire des Technologies Avancées en Génie	38
Figure II.9. Installation photovoltaïque au niveau du laboratoire LATAGE	39
Figure III.1. Modèle à une diode.....	42
Figure III.2. Modèle à deux diodes	42

Figure III.3. Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P	43
Figure III.4. Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P	46
Figure III. 5. Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P	47
Figure III.6. Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.....	48
Figure III.7. Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.....	50
Figure III.8. Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.....	51
Figure IV.1: Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, L5P (T=25°C et G=1000W/m ²)	54
Figure IV.2. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, L4P (T=25°C et G=1000W/m ²)	54
Figure IV.3. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, L3P (T=25°C et G=1000W/m ²)	55
FigureIV.4.Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, 2M5P (T=25°C et G=1000W/m ²)	55
Figure IV.5. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, 2M6P (T=25°C et G=1000W/m ²)	56
Figure IV.13.Caractéristiques I(V) du modèle à deux diodes pour G=1000W/m ² et T=25°C(2M5P, 2M6P et 2M7P).....	61
Figure IV.14. Caractéristiques P(V) du modèle à deux diodes pour G=1000W/m ² et T=25°C(2M5P, 2M6P et 2M7P).....	61
Figure IV.15. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour G=1000W/m ² et T=25°C	62
Figure IV.16. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour G=1000W/m ² et T=25°C(L3P,L4P et L5P).....	62
Figure IV.17. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour G=750W/m ² et T=25°C(L3P, L4P et L5P).....	63
Figure IV.18. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour G=750W/m ² et T=25°C(L3P, L4P et L5P).....	64
Figure IV.19. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour G=750W/m ² et T=25°C(2M5P, 2M6P et 2M7P).....	64
Figure IV.20.Caractéristique I-V du modèle à deux diodes pour G=750W/m ² etT=25°C(2M5P, 2M6P et 2M7P)	65
Figure IV.21. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour G=500W/m ² et T=25°C(L3P, L4P et L5P).....	65
Figure IV.22. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour G=500W/m ² et T=25°C (L3P, L4P et L5P)	66
Figure IV.23. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour G=500W/m ² et T=25°C (2M5P, 2M6P et 2M7P)	66
Figure IV.24. Caractéristique P-V du modèle à deux diode pour G=500W/m ² et T=25°C (2M5P, 2M6P et 2M7P)	67

Figure IV.25. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P).....	67
Figure IV-26 : Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P)	68
Figure IV.27. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P)	68
Figure IV.28. Caractéristique I-V du modèle à deux diode pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P)	69
Figure IV. 29. Schéma réalisé au niveau du laboratoire LATAGE	70
Figure IV.30. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=350\text{W/m}^2$, $T_a=22^\circ\text{C}$ et $T_c=37^\circ\text{C}$	71
Figure IV.31. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=350\text{W/m}^2$, $T_a=22^\circ\text{C}$ et $T_c=37^\circ\text{C}$	72
Figure IV-32 : caractéristique I-V du modèle à deux diodes pour $G=350\text{W/m}^2$ et $T_a=22^\circ\text{C}$ $T_c=37^\circ\text{C}$	72
Figure IV.33. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour $G=350\text{W/m}^2$ et $T_a=22^\circ\text{C}$	73
Figure IV.34. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$	73
Figure IV.35. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$	74
Figure IV.36. Caractéristiques I-V du modèle à deux diodes pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$	74
Figure IV.37. Caractéristiques P-V du modèle à deux diodes pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$	75
Figure IV.38. Caractéristiques I-V du modèle à une diode pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$	75
Figure IV.39. Caractéristiques P-V du modèle à une diode pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$	76
Figure IV.40. Caractéristiques I-V du modèle à deux diodes pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$	76
Figure IV.41. Caractéristiques P-V du modèle à deux diodes pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$	76

Liste des tableaux

Tableau I.5. Comparaison des différentes technologies.....	15
Tableau I.4. Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire	08
Tableau I.3.Irradiation solaire et la température moyenne au site de Tizi Ouzou 2000 à 2010	07
Tableau I.2. Irradiation solaire et température moyenne à Tizi Ouzou 1990 à 1999.....	07
Tableau I.1. Irradiation et température mensuelle moyenne à Alger en 2007.....	06
Tableau II.1. Les plus grandes centrales photovoltaïques dans le monde.....	40
Tableau IV.1. Caractéristiques du générateur PV du module de type 80M-12 choisi pour la modélisation.....	52

Nomenclature

Symbole	Unité	Définition
AM		Masse d'air
λ	μm	La longueur d'onde
h	$j.s^{-1}$	Constante de Planck
ν	Hz	Fréquence de l'onde lumineuse
E_{ph}	eV	Quantité d'énergie
c	$m.s^{-1}$	Vitesse de la lumière
E		Eclairement
FF		Facteur de forme
η		Rendement
PV		Photovoltaïque
STC		Conditions test standard
GPV		Générateur photovoltaïque
MPPT		maximum power point Tracking
T_c	K	Température de la cellule
T_{ref}	(298K)	Température de référence
T_a	K	Température ambiante
N_s		Nombre des cellules série
N_p		Nombre des cellules parallèle
I_{ph}		Courant de la cellule PV (Photo-Courant)
K	J/K	La constante de Boltzmann
Q	C	La charge de l'électron
Pmax	W	La puissance maximum
N		Le facteur de qualité de la jonction
μ_{vco}	V/°C	Coefficient de la température de tension de circuit ouvert
R_s	ohm	Résistance série
R_{sh}	ohm	Résistance shunt
I_s		courant de saturation
G_{ref}	W/m^2	L'éclairement de référence
I_{cc}	A	Courant de court circuit
V_{co}	V	Tension de circuit ouvert
E_g	eV	Energie de Gap du matériau
V_{pv}	V	La tension fournie par la cellule
I_{pv}	A	Le courant fourni par la cellule
I_d	A	Le courant de la diode

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque	
1. Introduction	3
2. L'énergie solaire.....	4
2.1. Définition	4
2.2. Le rayonnement solaire.....	4
2.3. Les différents types de rayonnements solaires.....	4
2.3.1. Le rayonnement diffus	4
2.3.2. Le rayonnement direct	5
2.3.3. Le rayonnement dû à L'albédo ou réfléchi.....	5
2.3.4. Le rayonnement global.....	5
2.4. Irradiation solaire	6
2.5. Spectre solaire et la masse d'air	7
3. L'énergie solaire photovoltaïque.....	9
3.1. Cellule solaire photovoltaïque.....	10
3.1.1 Description de la cellule.....	10
3.1.2. Structure d'une cellule PV	10
3.2. Le silicium comme matériau de base	11
4. Principaux types de cellules photovoltaïques	12
4.1. La cellule au silicium monocristallin.....	12
4.2. La cellule au Silicium polycristallin	12
4.3. Les couches minces.....	13
5. L'effet photovoltaïque	16
5.1 L'effet photoélectrique et la jonction PN	16
5.2 Les différentes étapes de fonctionnement d'une cellule PV.....	17
6. Module photovoltaïque (PV)	18
6.1. Regroupement en série.....	19
6.2. Regroupement en parallèle.....	19
6.3. Regroupement série et parallèle	20
7. Caractéristique physique et électrique d'une cellule photovoltaïque	21
7.1 Caractéristique I(V)	21
7.2. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	22

8. Paramètre d'une cellule photovoltaïque	22
8.1. Courant de court-circuit (I_{CC})	23
8.2. Tension de circuit ouvert, V_{CO}	23
8.3. Facteur de forme, ff	24
8.4 Rendement de la cellule, η	24
9. Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire photovoltaïque	25
9.1 Les avantages	25
9.2 Les inconvénients	25
9.3 Conclusion	26
Chapitre II : Système photovoltaïque, composition et fonctionnement	
1. Introduction	27
2. les différents types des systèmes photovoltaïques	28
2.1. Systèmes autonomes	28
2.1.1. Alimentation directe sans stockage	28
2.1.2. Système autonome avec stockage	29
2.2. Système autonome hybride	29
2.3. Photovoltaïque connecté au réseau	30
3. Définition d'un système de conversion photovoltaïque	31
3.1. Le système de captage photovoltaïque	32
3.1.1. La cellule photovoltaïque	32
3.1.2. Le module photovoltaïque	32
3.1.3. Le panneau photovoltaïque	32
3.2. Le système de stockage	32
3.2.1. Les différents types de batteries	33
3.2.1.1. Les batteries au plomb	32
3.2.1.2. Les batteries en Cadmium-Nickel	32
3.2.1.3. Les batteries en Nickel-Zinc	33
3.2.1.4. Les batteries au Lithium	33
3.2.2. Les caractéristiques principales d'un accumulateur	34
3.3 Les systèmes de régulation	35
3.3.1. Différents types de régulateurs	35
3.3.1.1 Régulation de la décharge	35
3.3.1.2. Régulateur de charge	35
3.3.1.2.1 Régulateur de charge série	35
3.3.1.2.2 Régulateur de charge à coupure	36

3.3.1.2.3 Régulateur shunt	36
3.4. La conversion	36
3.4.1. Convertisseur continu-continu	36
3.4.1.1 Définition de la commande MPPT	37
3.4.1.2 Différents types de MPPT	37
3.4.1.2.1 Les méthodes directes	37
3.4.1.2.2 Les méthodes indirectes	37
3.4.2. Convertisseur continu- alternatif	38
4. Exemples de centrales solaires photovoltaïques dans le monde	39
5. Conclusion	41
Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque	
1. Introduction	42
2. Modèle à deux diodes	43
2.1. Modèle à sept paramètres (2M7P)	43
2.2. Modèle à six paramètres (2M6P)	46
2.3. Modèle à cinq paramètres (2M5P)	47
3. Modèle à une diode	48
3.1. Modèle à trois paramètres (L3P)	48
3.2. Modèle à quatre paramètres (L4P)	49
3.3. Modèle à cinq paramètres (L5P)	50
4. Conclusion	51
Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats	
1. Introduction	52
2. Définition du site	52
2.1. Module photovoltaïque utilisé	52
3. Résultats de simulation	53
3.1. Résultats de simulation pour une cellule photovoltaïque	54
3.1.1. Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque selon les modèles à une diode	54
3.1.2. Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque selon les modèles à deux diodes	55
4. Caractéristiques d'un module photovoltaïque	57
4.1. Résultats de simulation pour un module photovoltaïque	57
4.1.1. Caractéristique I-V et P-V d'un module PV selon les modèles à une diode	57

4.1.2. Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV selon les modèles à deux diodes.....	59
5. Comparaison entre les caractéristique I-V et P-V selon les modèle à une et à deux diodes du module PV dans les conditions STC	61
5.1. Effet de l'éclairement	63
6. Réalisation expérimentale.....	70
6.1. Validation expérimentale pour différentes valeurs de l'éclairement et de la température	70
6.1.1. Comparaison des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour un $G=350W/m^2$, $T_c=37^\circ C$ et $T=22^\circ C$	70
ü Modèle à une diode	
ü Modèle à deux diodes	
6.1.2. Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour $G=770W/m^2$ et $T=28^\circ C$	73
ü Modèle à une diode	
ü Modèle à deux diodes	
6.1.3. Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour $G=1091W/m^2$ et $T=37^\circ C$ et $T_c=43^\circ C$	75
ü Modèle à une diode	
ü Modèle à deux diodes	
7. Conclusion	78
Conclusion générale	79
Bibliographique	

Introduction générale

Introduction générale

L'avenir énergétique mondial est l'une des questions majeures et d'actualité qui se pose sur la scène internationale. En effet les problèmes liés à la gestion de l'énergie dans le monde sont multiples. Il y a en premier lieu le danger de l'environnement engendré par la difficulté de l'élimination des déchets nucléaires et les rejets des gaz du dioxyde de carbone CO₂ causé par l'utilisation des énergies fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. Par ailleurs, les réserves des énergies fossiles ne sont pas inépuisables.

Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre l'énorme quantité de courant électrique nécessaire à une population de 10 milliards d'êtres humains, sans qu'aucun changement du modèle actuel de production, de transport et de distribution de l'électricité ne soit nécessaire. Aussi et face aux multiples crises économiques et pétrolières, la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de la recherche et du développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables ; l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire en particulier photovoltaïque, qui fera l'objet de notre mémoire. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et qu'elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la planète.

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui a atteint la maturité technologique, son exploitation technique est relativement non polluante pour l'environnement, elle représente une source inépuisable, surabondante et gratuite. Elle semble très prometteuse, disponible dans tous les pays et chaque jour elle est solution potentielle aux problèmes écologiques. Mais cette énergie doit être transformée en d'autres formes d'énergie parmi elles l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à un capteur photovoltaïque, constitué de plusieurs cellules série /parallèle.

Une bonne compréhension des différentes technologies des cellules et des modules photovoltaïques est cruciale pour continuer à réduire les coûts, augmenter les performances et améliorer l'impact sur l'environnement, en trouvant par exemple des solutions de recyclage dès la conception de nouveaux modules PV. De nombreuses technologies sont aujourd'hui opérationnelles mais beaucoup d'entre elles exigent encore des travaux de recherche et de développement spécifiques pour atteindre le degré de maturité nécessaire à une forte production [20].

L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites due à son grand secteur, limités par la mer au nord et par le Sahara au sud. Malgré cette diversité, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement qui permet leur disponibilité. L'obstacle que rencontre la production de l'électricité solaire est dû au prix de revient de la fabrication des cellules solaires qui constituent ces panneaux, et au problème d'alimentation électrique des zones isolées et montagneuses [16].

Le travail qui nous a été confié concerne la modélisation d'une cellule photovoltaïque et l'objectif assigné est d'identifier un modèle fiable et efficace et ce en comparant ses résultats à ceux qui sont issus de l'expérience.

A cet effet, nous avons organisé notre mémoire comme suit :

- Nous allons présenter dans un premier chapitre des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre concerne une présentation des différents types des systèmes photovoltaïques.
- Le troisième chapitre englobe la partie essentielle du travail, puisque qu'il est dédié à la modélisation de la cellule solaire et du module photovoltaïque.
- Le quatrième chapitre consiste en la comparaison entre les différents modèles du module PV dont le but est d'en déduire le modèle le plus pratique et le plus précis.
- Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les principaux enseignements émanant des différents tests effectués par simulation numérique.

Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

1. Introduction

L'augmentation de la population produira un choc sur la demande énergétique dans les années à venir. Le monde absorbe actuellement une grande quantité d'énergie, dont la majorité est obtenue par les sources fossiles (pétrole, gaz, nucléaire, etc.), mais les réserves de ces sources sont limitées en plus de leurs effets néfastes sur l'environnement. Le monde a donc besoin d'autres sources supplémentaires pour répondre à cette demande croissante en énergie. Les énergies renouvelables sont donc la solution. En effet, ces énergies sont des sources inépuisables et propres. Parmi ces sources renouvelables, on peut citer l'énergie issue du soleil qui se présente sous deux formes thermique et photovoltaïque. Malheureusement, cette énergie est dispersée puisque la durée d'ensoleillement varie d'une région à une autre de la terre et elle change aussi selon les saisons et les caractéristiques climatiques du site.

Actuellement plus de deux milliards de personnes ne sont pas reliées au réseau électrique. En fait la majorité d'entre elles ne sera jamais reliée au réseau électrique pour des questions de rentabilité liées à l'éloignement et à la faible densité de population. Les systèmes photovoltaïques peuvent jouer un rôle très important en apportant une solution réellement économique pour couvrir la totalité des besoins mondiaux de base en électricité [1], le marché de production d'énergie s'oriente dans la direction des énergies renouvelables et en particulier à l'énergie solaire photovoltaïque.

La production d'électricité d'origine photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement lumineux du soleil, est en pleine expansion depuis deux décennies. Sa part dans le bouquet énergétique mondial de 2050 sera certainement importante compte tenu de la pénurie et de la pollution des autres ressources. Dans ce chapitre, on donnera un minimum de connaissances sur les principes de la conversion photovoltaïque, incluant des généralités sur l'énergie transmise par le soleil, ainsi que quelques éléments de physique des semi-conducteurs et des principaux mécanismes de transport des charges électriques. La connaissance des caractéristiques électriques fondamentales (tension, courant, puissance crête et rendement de conversion) sera aussi abordée, ainsi que les différentes filières d'élaboration du dispositif photovoltaïque de la cellule classique (à base de silicium) aux couches minces et d'autres matériaux semi-conducteurs organiques.

2. L'énergie solaire

2.1. Définition

C'est une énergie inépuisable, tellement présente qu'on a tendance à l'oublier. Pourtant, cette énergie incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale en énergie [2]. Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable. Malheureusement on ne peut pas l'exploiter directement car il faut la transformer en d'autres formes d'énergies plus utiles [3] :

- en bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive) ;
- en utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique) ;
- en transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques (énergie photovoltaïque).

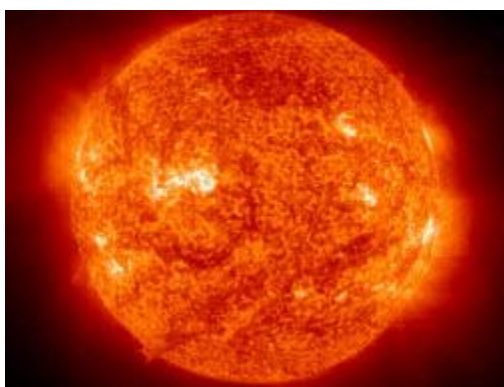


Figure I.1. Image du soleil [21].

2.2. Le rayonnement solaire

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaires (la fusion est la réunion de plusieurs noyaux atomiques légers en un seul (4 noyaux d'hydrogène) en un noyau d'hélium) [1]. Le rayonnement solaire peut être décomposé en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment : rayonnement direct, diffus, l'albédo et global.

2.3. Les différents types de rayonnements solaires

2.3.1. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est constitué de la lumière diffusée par les molécules de l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions [1]. C'est lui qui nous donne la « lumière du jour » qui nous permet de voir clair même quand le temps est couvert.

2.3.2. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil sans diffusion par l'atmosphère [1]. C'est lui qui nous aveugle lorsque on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.

2.3.3. Le rayonnement dû à L'albédo ou réfléchi

Il dépend de l'environnement du site [1], il résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). Il peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.

2.3.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de ces trois types de rayonnement diffus, le rayonnement direct et l'albédo [1], comme présenté par la figure I.2.

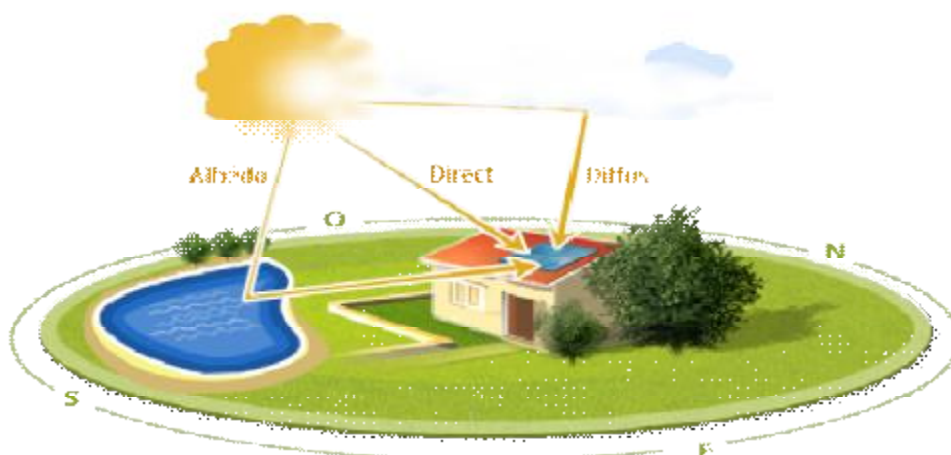


Figure I.2. Les différents types de rayonnements solaires.

2.4. Irradiation solaire

L'irradiation solaire exprime la quantité d'énergie reçue au niveau du sol par unité de surface. Ces unités usuelles sont J/m^2 , Wh/m^2 , ou bien KWh/m^2 . Elle dépend principalement de la couverture nuageuse, de la durée du jour et de l'instant considéré dans la journée [8].

L'irradiation solaire est très variable comme présentée par le tableau I.1.

L'Algérie est l'un des pays qui dispose d'un gisement solaire, surtout dans les régions Sahariennes qui reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais qui est caractérisée par une température de l'air plus élevée. La durée d'insolation, de l'ordre de 3 500 heures/an est la plus importante au monde, la puissance reçue par jour est toujours supérieure à 5 kWh/m² et peut atteindre facilement les 7 kWh/m² [5]. Si toute cette énergie est mise en valeur, cela constituerait une source d'énergie très importante et un revenu inestimable. Nous nous intéresserons ici à la ville de Tizi-Ouzou (tableaux (I.2) et(I.3)) et à la ville d'Alger en donnant les valeurs des irradiances et des températures pendant les années précédentes (Tableau I.1) :

Mois	Flux global sur plan incliné moyenne mensuelle (W/m ²)	Température moyenne mensuelle (°C)
Janvier	122,18	12,4
Fevrier	163,69	13.1
Mars	193,68	12.9
Avril	229,02	14
Mai	243,11	17.2
Juin	247,22	24.1
Juillet	272,04	28.7
Aout	184,81	30.6
Septembre	184,81	23.8
Octobre	184,81	20.1
Novembre	134,40	16.4
Décembre	136,39	14

Tableau I.1. Irradiation et température mensuelle moyenne à Alger en 2007[8].

Année										
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
T°Moy/m ensu en°C	18,3	17,3	17,1	17,3	18,8	18,4	17,6	18,7	17,8	18,6
T°Moy/m ensu Mini	13,3	11,9	11,6	12,1	13,4	12,9	12,9	13,6	12,9	13,8
T°Moy/m ensu MAX	24,7	23,8	23,9	24,1	25,5	25,1	23,5	25,0	24,0	24,9
Humidité moy en%	67	67	70	70	67	66	68	65	69	68
HUM/moy mini en%	41	41	43	43	42	40	44	41	46	45
Hum/moy Max en%	87	88	90	90	88	87	88	86	88	87
VENT moyen	1,8	1,7	1,6	1,7	1,9	1,8	2,1			1,7
Durée D'insol en hre	220	245	233	235	229	253	231	240	235,7	195

Tableau I.2. Irradiation solaire et température moyenne à Tizi Ouzou 1990 à 1999[4].

Année											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
T°Moy/mensu en°C	18,8	19,0	18,9	18,6	18,1	17,6	19,1	18,2	18,5	18,7	14,4
T°Moy/mensu mini	13,4	13,8	13,4	14,6	13,5	12,8	14,1	13,5	13,2	13,4	10,5
T°Moy/mensu MAX	25,5	25,4	24,7	25,0	24,4	24,3	25,8	24,4	24,7	24,9	19,3
Humidité moy en%	66	66	63	70	71	72	69	76	73	72	54,0
HUM/moy mini en%	41	41	46	46	47	47	43	52	44	46	34,7
Hum/moy Max en%	86	84	88	89	89	91	89	95	91	92	62,1
VENT moyen	1,6	1,6	0,9	1,8	1,8	1,7	2,0	1,6		1,3	1,0
Durée D'insol en hre	230	232	148,0	194	220	207	238	224	212	144	178

Tableau I.3. Irradiation solaire et la température moyenne au site de Tizi Ouzou 2000 à 2010[4].

2.5. Spectre solaire et masse d'air

La lumière du soleil est une onde électromagnétique qui peut se propager dans le vide sans support matériel avec une célérité $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Les ondes lumineuses comprennent les radiations visibles, ultraviolettes et infrarouges, ce qui correspond globalement au spectre solaire [15]. L'énergie d'un photon est donnée par la relation [1] :

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

Où h : est la constante de Planck ;

c : la vitesse de la lumière ;

λ : la longueur d'onde ;

ν : la fréquence.

D'après cette formule on constate que plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte a valu à Albert Einstein le prix Nobel en 1905. La couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultra-violet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

Du la présence des molécules dans l'atmosphère (O₃, CO₂, H₂O) le rayonnement solaire a plusieurs directions sur toute la surface de la terre [9]. Pour tenir compte de ces différences on introduit un coefficient x appelé masse atmosphérique ou nombre d'air masse (AM_x). La masse d'air est donnée par la relation suivante [1] :

$$x = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (\text{I-2})$$

(θ) L'angle en radians représente l'élévation du soleil sur l'horizon (90 ° au zénith) comme le montre la Figure I.3.

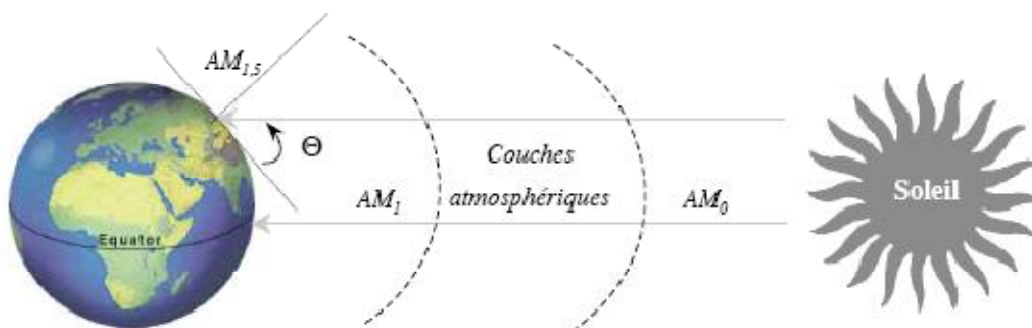


Figure I.3. Schéma indiquant le nombre de la masse d'air (AM) en fonction de la position [17].

Le tableau I.4 donne les valeurs énergétiques des photons à travers la longueur d'onde et les zones correspondant au spectre :

λ (μm)	Eph(ev)	Zone
0.2	6.2	Ultraviolet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau I.4. Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire [19,9].

Dans la courbe de la répartition spectrale du rayonnement solaire, on définit le spectre solaire **AM0** qui correspond à un éclairement solaire hors atmosphère, il est très proche de celui relatif à un corps noir dont la température de couleur serait de 5760 K [1]. Lorsque le soleil est au zénith, et le soleil en équilibre avec un ciel sans nuages (éclairement solaire au niveau de la mer) on a **AM1** [13].

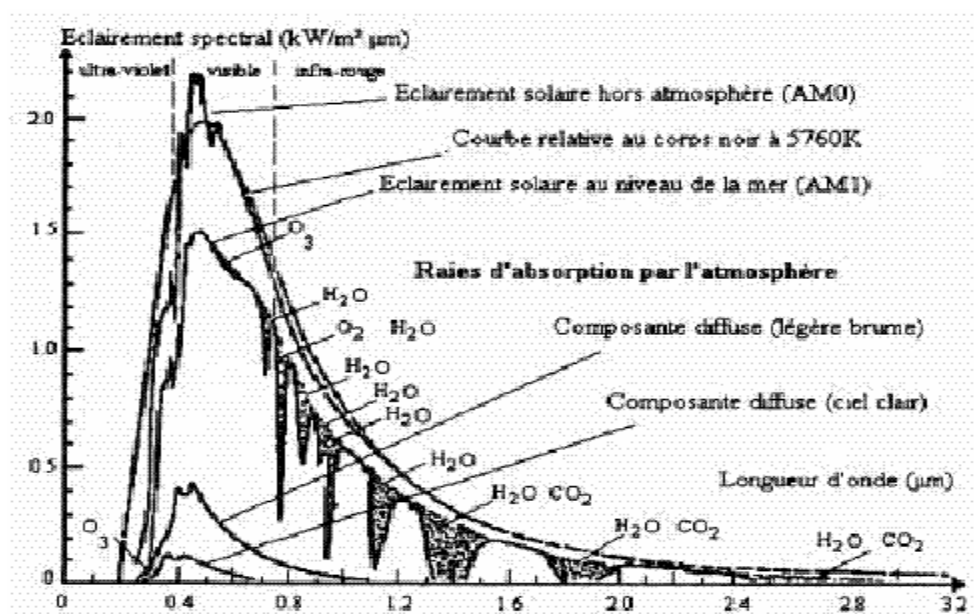


Figure I.4. Répartition spectrale du rayonnement solaire : hors atmosphère **AM0**, au niveau de la mer avec le soleil à l'aplomb **AM1** et avec le soleil 48,19° **AM1.5** [1].

La figure (1.4) montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air de 1,5 soit équivalent à une hauteur du soleil de 48,19° au niveau de la mer noté **AM1.5**, qui sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Ainsi on voit clairement sur le spectre AM1.5 les spectres d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le CO₂ et la vapeur d'eau [1].

3. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme une source de lumière. Cette énergie peut être captée et transformée en électricité grâce à des **panneaux solaires** installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Cette transformation est appelée « effet photovoltaïque ». Elle a été découverte en 1839 par Antoine-César Becquerel. Elle consiste à produire un courant lorsque la surface des panneaux est exposée à la lumière.

Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots: « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière et « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro

volta qui vient de « volt » et qui représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique [9, 3]. L'élément le plus important d'un système photovoltaïque est la cellule, élément de base de l'unité qui collecte la lumière du soleil et les modules qui rassemblent un grand nombre de cellules.

3.1. Cellule solaire photovoltaïque

3.1.1. Description de la cellule

Une cellule pv (photopile) est l'élément fondamental de la conversion photovoltaïque. En effet, cette cellule qui est exposée à la lumière (photons), transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La photopile délivre une tension variable entre 0V et 0.7V [1], elle dépend des propriétés des matériaux utilisés et de la température. Nous allons ici présenter la structure et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

3.1.2. Structure d'une cellule PV

La cellule solaire est réalisée en suivant les étapes suivantes :

- La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopée N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.
- La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargée positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P). voir la figure I.5.

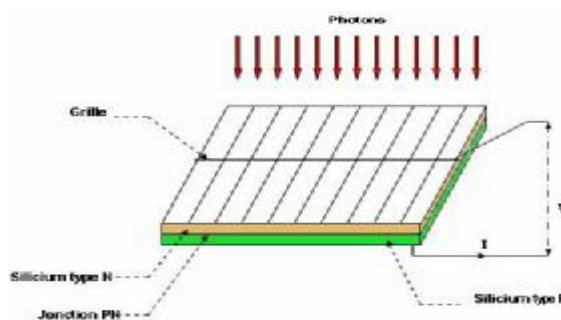


Figure I.5. Structure de la cellule photovoltaïque.

3.2. Le silicium comme matériau de base

Les cellules photovoltaïques utilisent des matériaux semi-conducteurs, et le plus utilisé aujourd'hui est le silicium qui produit des porteurs de charges (électrons et trous) en absorbant des photons. Si l'on applique une tension aux bornes du matériau, un courant circule; celui-ci varie avec la longueur d'onde du rayonnement.

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Le silicium (Si) est de base de la silice (SiO_2). Cette filière représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Il a été donc choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques. Il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. A cause de ces propriétés électriques, le dopage est réalisé qui permet de réaliser la jonction P-N, pour introduire des impuretés.

Ø Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium (figure I-7). Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant un libre électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative, et le semi-conducteur est dit dopé de type N.

Ø Dopage type P

Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 3 électrons périphériques (bore par exemple dans la figure I-6), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque, on dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi- conducteur est dit dopé de type P [1].

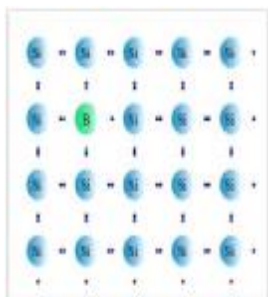


Figure I.6. Dopage de type P.

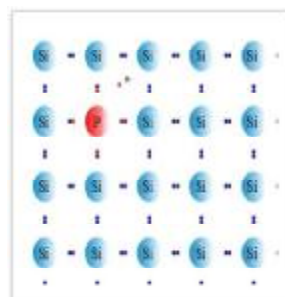


Figure I.7. Dopage de type N.

Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium qui en réalise la cellule photovoltaïque et parmi elles on peut citer : le silicium cristallin (monocristallin et poly cristallin) et le silicium amorphe (les couches minces).

4. Principaux types de cellules photovoltaïques

Les photopiles au silicium cristallin sont plus répandues [2]. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériaux cristallin, c'est parce que le silicium a les propriétés d'un cristal, avec un arrangement parfait des atomes.

4.1. La cellule au silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques. Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Elles sont en général d'une couleur bleu uniforme [1, 2, 24] (figure I.9).

⚡ Avantages

- bon rendement, de 12% à 18% ;
- durée de vie : 20 à 30 ans ;

-nombre de fabricants élevé.

✚ Inconvénients

-coût élevé ;

-rendement faible sous un faible éclairement.

4.2. La cellule au Silicium poly-cristallin

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [1,24] (Figure I.8).

✚ Avantages

-cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module ;

-moins cher qu'une cellule monocristalline.

✚ Inconvénients

-rendement moins bon qu'une cellule monocristalline : 11 à 15% ;

-rendement faible sous un faible éclairement.



Figure I.8. Cellule en silicium poly cristallin.



Figure I.9. Cellule en silicium monocristallin.

4.3 Les couches minces [24]

Le silicium est utilisé en couche mince dite « amorphe » car de structure désordonnée et de type « vitreuse » [1]. Lors de sa transformation, il produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. L'organisation des atomes n'est plus régulier comme dans un cristal, elle est

déformée, et l'ordre de cristallin n'est maintenu qu'à courte distance (2 à 3 liaisons atomiques) [1]. Lorsque les atomes ne sont liés qu'à trois autres atomes au lieu de quatre, cela crée des liaisons non satisfaites, il est donc un mauvais semi-conducteur, plein de défauts, et on ne peut pas le doper. Sa couleur est grise très foncée (la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires").

Avantages

- fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert) ;
- un peu moins chère que les autres technologies ;
- intégration sur supports souples ou rigides.

Inconvénients

- rendement faible en plein soleil, de 6% à 8% ;
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin.

Tableau I.5. Comparaison des différentes technologies [20]

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono Cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production du W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly Cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production du W. Plus de 50% du marché mondial	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatialux (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ , etc.)	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Quelque soit le type des cellules, les panneaux photovoltaïque sont fabriqués en respectant le procédé présenté par la Figure I.10. En effet, un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série et/ou en parallèles. Il faut ajouter aussi des diodes de protection (série pour éviter les courants inverses et dans le cas de déséquilibre elles sont mises en parallèle) pour passer d'un module à un panneau (figure I.10).

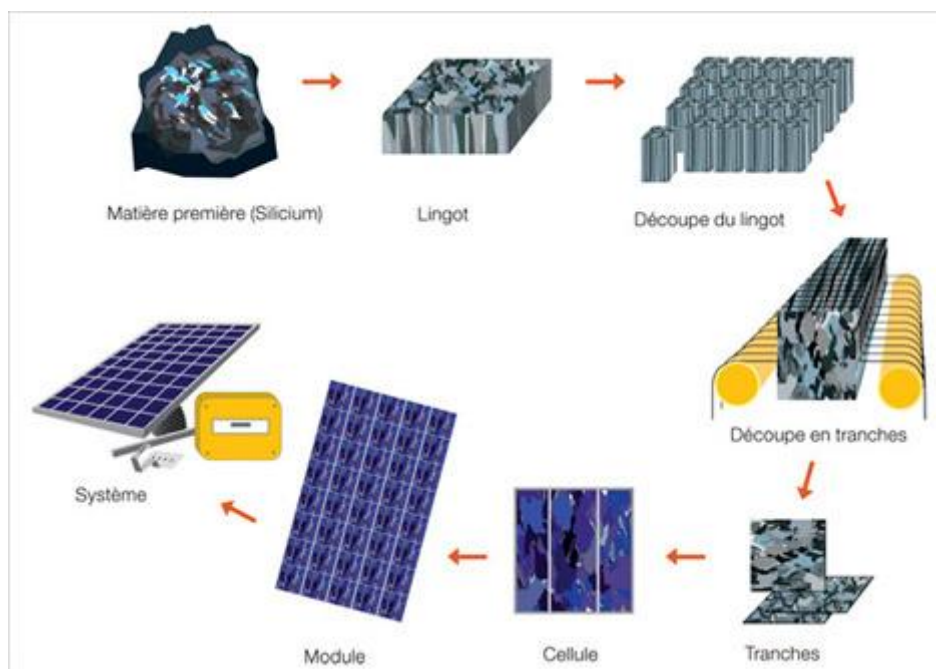


Figure I.10. Différentes étapes de production d'un système photovoltaïque.

5. L'effet photovoltaïque

5.1. L'effet photoélectrique et la jonction PN

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire, sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale ou supérieure à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise [11].

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque, selon les matériaux et la structure de la jonction [11]. D'une façon générale dans la figure (I-11), on a [12,13] :

- Dans le 3^{ème} quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement à tension donnée, il se comporte en photorésistance
- Dans le 4^{ème} quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est directement proportionnel à la puissance de l'éclairement et dont la tension à vide V_{co} est celle de la diode en polarisation directe (0 à 0,7 V pour Si). Il se comporte en convertisseur photovoltaïque dont un réseau de caractéristiques théoriques qui apparaissent comme montrées sur la (Figure I-11).

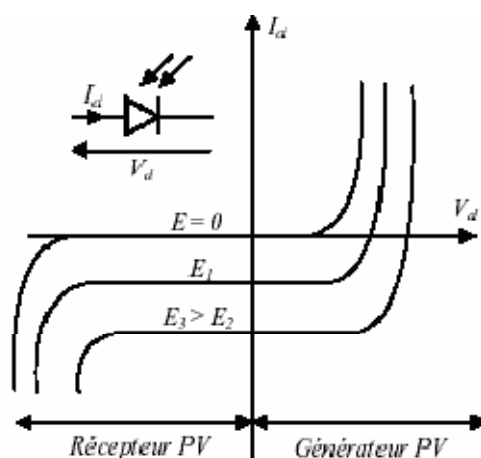


Figure I.11. Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous éclairnement [13,3].

5.2. Les différentes étapes de fonctionnement d'une cellule PV

D'après sa structure, la cellule photovoltaïque est caractérisée par une jonction PN qui va créer une barrière de potentiel. Lorsque les grains de lumière (les photons) attaquent la surface de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la matière. Ce gain d'énergie libère des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons. Ceci engendre donc une différence de potentiel entre les deux couches [6]. Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV. Le courant et la

tension fournis par une cellule PV dépendent de différents paramètres que nous allons expliciter dans la suite de ce mémoire [6].

6. Module photovoltaïque (PV)

Le module photovoltaïque est un ensemble de photopiles, assemblées pour générer une puissance exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une cellule ne génère pas suffisamment de tension : entre 0V et 0.7 V [1] selon les technologies. Il faut les installer en série et en parallèle dans une armature comme représenté par la figure (I. 12), généralement cette assemblage contient également des protections pour protéger les cellules PV d'un fonctionnement qui peut être destructif. Alors, la topologie d'un module photovoltaïque est basée sur le schéma de cellule solaire. Un nombre important de modèles ont été employés pour représenter la cellule solaire. Chaque modèle diffère de l'autre en fonction du nombre de paramètres mis en jeu, ce qui les rend plus simples ou plus complexes. Dans ce mémoire, on va s'intéresser à ces différents modèles en conduisant une investigation sur un des panneaux installés sur le toit du laboratoire LATAGE de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.



Figure I.12. Architecture classique d'un module PV de type '80M-12'
(Laboratoire LATAGE, UMMTO).

6.1 Regroupement en Série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur [8]. Les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du regroupement en série dans les conditions standard (1000 W/m^2 , 25°C) est obtenue par addition des tensions à courant donné (Figure I.13).

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (I-3)$$

$$I_{cc} = I_{ccN_s}$$

I_{ccN_s} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série ;

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

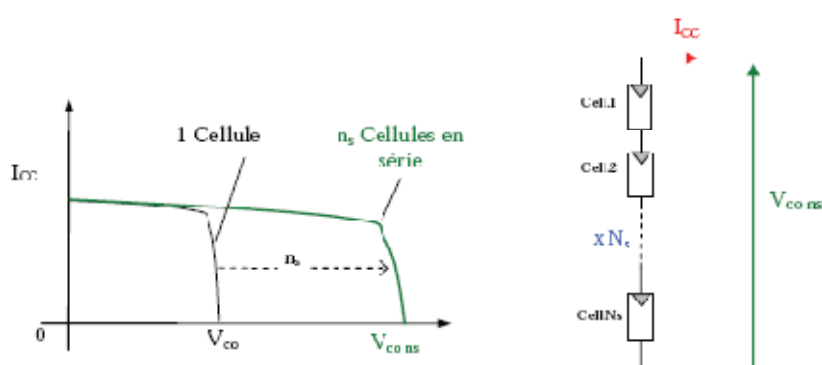


Figure I-13 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en série [19].

Les panneaux solaires du Laboratoire des Technologies Avancées en Génie Electrique LATAGE sont réalisés de 36 cellules en série se qui implique une tension optimale $V_{op} = 36 \cdot 0.608 = 21.9 \text{ Volt}$.

6.2 Regroupement en parallèle

Un groupement de cellules en parallèle, permet d'accroître le courant de sortie du générateur, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée (Figure I.14) [19].

$$I_{ccN_p} = N_p \cdot I_{cc} \quad ;$$

$$V_{co} = V_{coN_p} \quad (I-4)$$

Avec

I_{cc} : le courant de court circuit.

V_{coN_p} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

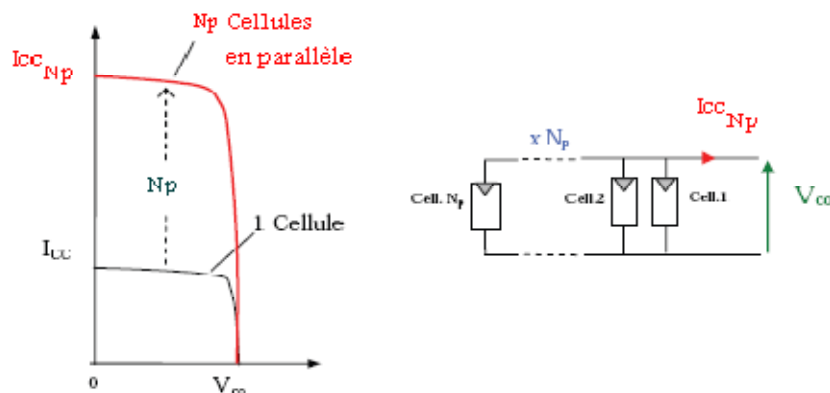


Figure I.14. Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle [19].

6.3. Regroupement des cellules (série et parallèle) [19]

La caractéristique (V_{pv} - I_{pv}) d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau ($N_p * N_s$) de cellules en série/parallèle. La caractéristique globale peut, en outre, varier en fonction de l'éclairement, la température, le vieillissement. De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur [8].

Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène du point chaud. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives. Un autre type de protection consiste à mettre une diode série entre le module et la batterie empêchant pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Cette diode est appelée dans ce cas diode anti-retour [19].

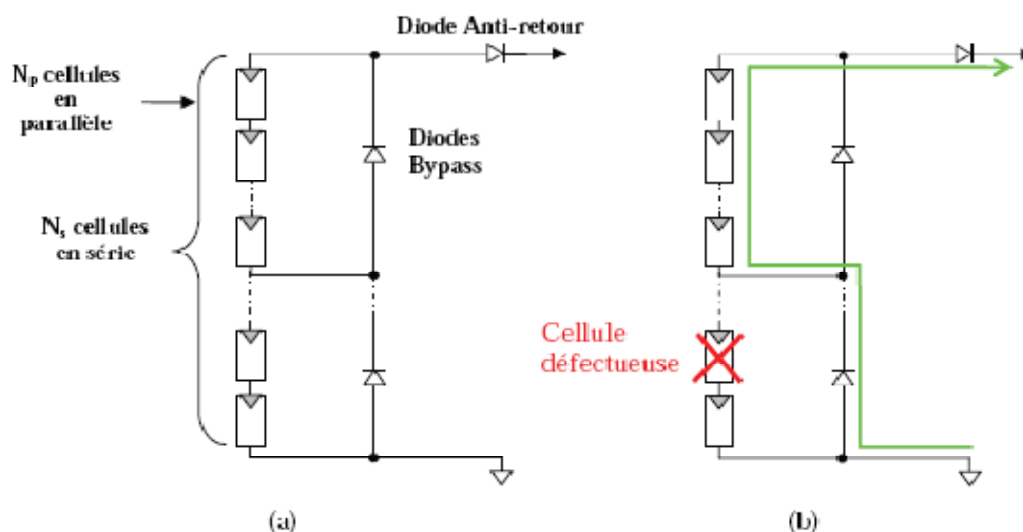


Figure I.15. Regroupement série et parallèle [19].

7. Caractéristique physique et électrique d'une cellule photovoltaïque

7.1. Caractéristique I(V)

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire, elle est exprimée sur trois quadrants sur les quatre existants. Dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4 la photopile se comporte comme un récepteur [7], donc absorbant de l'énergie ce qui est contraire à son rôle naturel. Par contre dans le quadrant 1, la cellule photovoltaïque délivre de l'énergie, ce qui représente son fonctionnement normal. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant (Figure I.16).

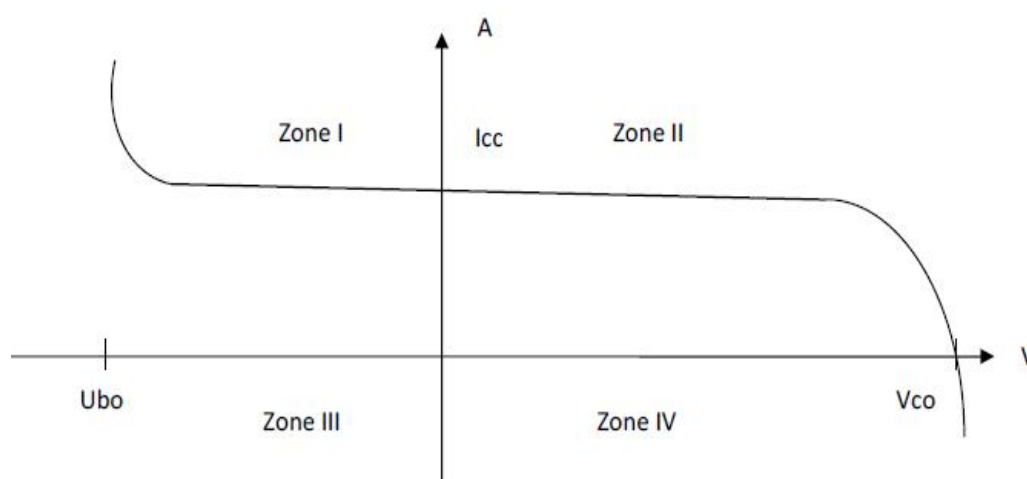


Figure I.16. Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [9].

7.2. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

La caractéristique d'un générateur PV constituée de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV en trois « 03 » zones comme présenté par la Figure I.15.

A partir de cette figure, on peut distinguer trois zones [12,9] :

- Une zone assimilable à un générateur de courant (I_{cc}) proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (Zone 1) [9].
- Une zone assimilable à un générateur de tension (V_{co}) d'impédance interne équivalente à R_s (Zone 2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement avec R_s à R_{sh} (Zone 3) [9].

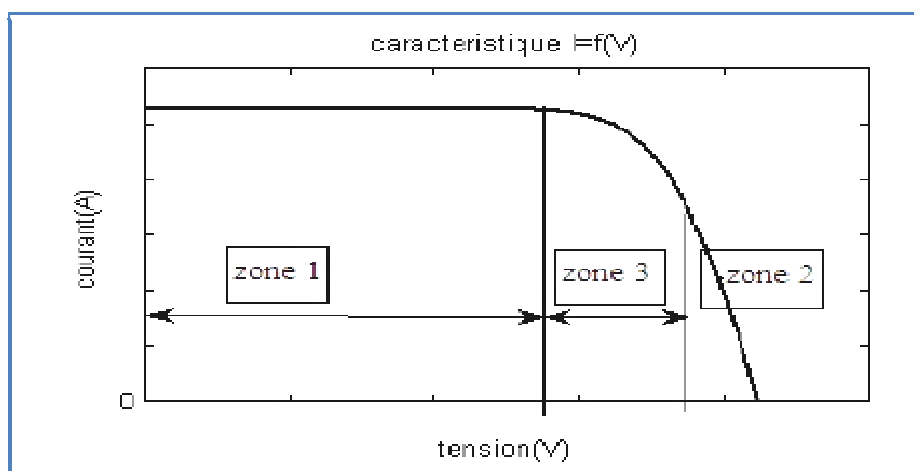


Figure I.17. Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$.

Le point de fonctionnement (MPPT) pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale est situé dans la Zone 3. Il est caractérisé par le couple (I_{max} , V_{max}), et donc seule la charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible.

8. Paramètre d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est caractérisée par un certain nombre de paramètres qu'on peut déterminer à partir de la caractéristique $I(V)$. Ces paramètres sont le rendement de

conversion, la tension à circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} et le facteur de forme ff (Figure I.18).

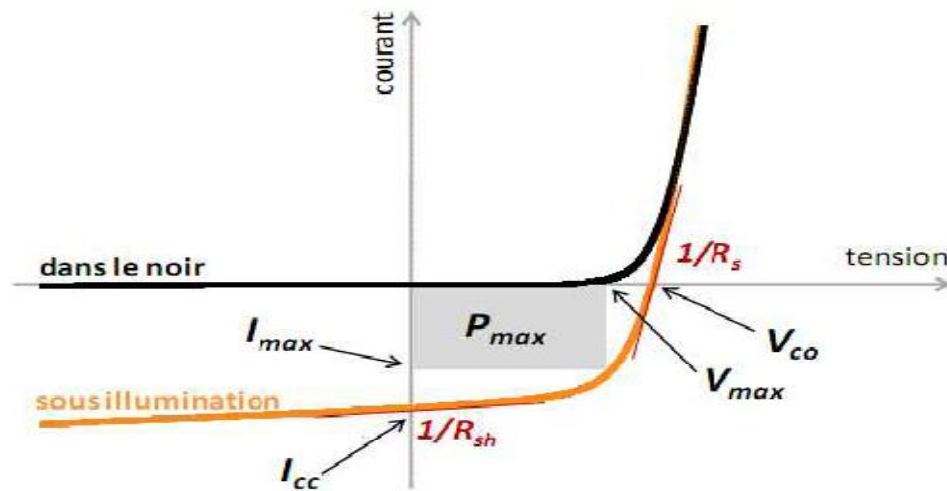


Figure I.18. La caractéristique I-V et les différents paramètres de la cellule PV.

À partir de la caractéristique présentée par la Figure I.18, nous pouvons déterminer un certain nombre de paramètres qui nous renseignent sur les phénomènes physiques mis en jeu dans la cellule [13].

8.1. Courant de court-circuit (I_{CC})

Le courant de court-circuit est le courant obtenu avec une différence de potentiels nulle aux bornes de la cellule ($V=0$). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination et dépend de la surface éclairée, du spectre du rayonnement solaire et de la température [13].

8.2. Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de la cellule est nul. Il est lié à la résistance shunt, lorsque cette dernière n'est pas connectée ou connectée mais sa valeur est infinie [13]. La valeur de cette tension diminue avec la température et dépend de l'éclairement de la cellule [1].

$$V_{co} = \frac{K \cdot T_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I-5)$$

$\frac{K \cdot T_c}{q}$: représente le potentiel thermodynamique;

T_c : la température absolue ;

q : la constante de charge d'un électron $= 1.602 \times 10^{-19}$ C ;

K : la constante de Boltzmann $= 1.38 \times 10^{-23}$;

I_{ph} : le photo courant ;

I_s : le courant de saturation.

Ou, pour $I_{cc} \gg I_s$:

$$V_{co} = \frac{K \cdot T_c}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (I-6)$$

On remarque que cette tension augmente avec $\log$ de I_{ph} , elle décroît avec la température [1]. Le courant de saturation, I_s , dépend de la surface de la diode et de la caractéristique de la jonction, il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $(K \cdot T_c / q)$. Donc la tension du circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement de la cellule.

8.3. Facteur de forme, ff [18]

Le facteur de forme d'une cellule solaire est défini comme étant le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension du circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Il est défini par la relation suivante [10,13]:

$$ff = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I-7)$$

où I_{max} et V_{max} représentent le couple intensité-tension pour lequel la puissance délivrée par la cellule est maximale. Le facteur de forme théorique est compris entre 0.25 et 1 [1]. Le facteur de forme peut aussi donner des informations sur la qualité des interfaces matériau-électrode.

8.4. Rendement de la cellule, η

Le rendement est un paramètre essentiel. Il est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule P_{max} et l'énergie lumineuse incidente P_{in} [1,10, 13]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{G \times A} \quad (I-8)$$

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions de référence, c'est-à-dire, sous l'ensoleillement de 1000 W/m^2 , à la température de 25°C et sous un spectre AM1, 5. Ces conditions normalisées sont dites STC « standard test Conditions ».

A : est la surface génératrice en m^2 ;

G : l'ensoleillement en W/m^2 .

On peut améliorer le rendement de conversion en agissant sur le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension du circuit ouvert.

9. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque [15, 16, 21]

9.1. Les avantages

L'énergie solaire photovoltaïque présente beaucoup d'avantages dont on peut citer à titre indicatif :

- L'énergie solaire est une énergie renouvelable et inépuisable.
- Aucune pollution, les sources PV peuvent convertir l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- Coût de fonctionnement faible, le coût de fonctionnement est très faible par rapport aux sources conventionnelles.
- Coût d'investissement en diminution, le prix des panneaux solaire a déjà beaucoup diminué.
- Faible entretien, les sources n'ont pas besoin de beaucoup d'entretien.
- Pas de risques électriques pour les usagers.

9.2. Les inconvénients

Cette source présente aussi quelques inconvénients tels que :

- Variation d'énergie solaire : les sources PV ne fonctionnent que lorsque l'énergie solaire est disponible.
- Densité énergétique et rendement : la densité des sources PV est faible et le rendement réel est aussi faible.
- Taille des installations : les surfaces des installations sont toujours importantes.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur augmente.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur l'énergie solaire. Au début nous nous sommes intéressées à étudier l'énergie solaire et les différents types de rayonnements solaires (directe, diffus, albédo). En suite, nous avons expliqué l'effet photovoltaïque en utilisant la caractéristique (I-V), et nous avons illustré les différents types des cellules existantes avec leurs avantages et inconvénients.

Les propriétés électriques des cellules photovoltaïques sont semblables d'une technologie à une autre. Afin de mieux comprendre le fonctionnement des différents systèmes PV sera l'objet d'études dans le deuxième chapitre.

Système photovoltaïque composition et fonctionnement

1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque constitue, parmi les énergies renouvelables, celle qui possède le plus large potentiel de développement. Pour saisir cette opportunité et où l'instar de plusieurs autres pays, l'Algérie a misé sur le développement de ces énergies renouvelables et en particulier sur le photovoltaïque. En effet, les pouvoirs publics misent sur une production de 30% de demande en énergie du photovoltaïque à l'horizon 2030. Cet ambitieux objectif est théoriquement réalisable si on se réfère à ce gisement solaire national qui est exceptionnel car il couvre une superficie de 2 381 745 Km², avec plus de 3000 heures d'ensoleillement par ans. Malheureusement en pratique, à l'heure actuelle, l'Algérie ne dispose que d'une installation photovoltaïque connectée au réseau celle du CDER d'une puissance de 9 540W. C'est le premier système PV connecté au réseau en Algérie. Donc, beaucoup de travail reste à faire. Notre travail s'inscrit dans l'engagement de notre pays à exploiter toutes ces ressources naturelles renouvelables et non polluantes et dans la mobilisation accrue des efforts de recherche/développement pour la maîtrise des technologies mises en œuvre dans les installations de conversion des énergies renouvelables de puissance.

Dans ce chapitre nous allons donner tous les éléments d'information concernant la composition d'un système photovoltaïque et son fonctionnement que l'utilisation soit en autonome ou en connexion sur le réseau électrique.

2. Les différents systèmes photovoltaïques

Il existe deux types de systèmes PV, les systèmes autonomes et les systèmes reliés au réseau :

2.1 Systèmes autonomes

Ce sont des installations qui alimentent l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (figure II-1). Dans la majorité des cas, les systèmes autonomes exigent des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

2.1.1 Alimentation directe sans stockage [1]

Dans un système sans stockage les panneaux photovoltaïques sont directement couplés à la charge avec une alimentation directe sans transformation. Les fonctions du système se limitent dès lors à **produire** et **consommer** [1], le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge connectée (figure II.1).

Ce cas présente autant d'avantages que d'inconvénients ; en effet, le système présente l'avantage d'être simple et d'un coût relativement bas, très intéressant pour des applications pour lesquelles les besoins en énergie coïncident avec la présence de la lumière [28] (exemple d'un ventilateur). Par contre le fait que les panneaux soient directement couplés à la charge entraîne un surdimensionnement puisqu'il faudra produire autant d'énergie lors des faibles ensoleillements.

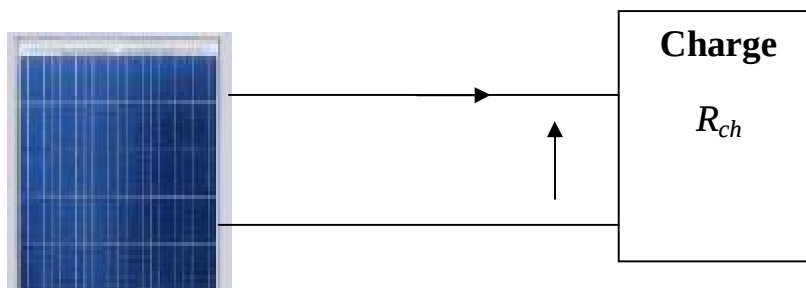


Figure II.1. Installation photovoltaïque avec alimentation directe.

2.1.2 Systèmes autonomes avec stockage

Cette configuration (figure II.2) est la plus utilisée pour les systèmes PV autonomes (Stand-Alone System) [1,26], dans ce système la batterie est utilisée comme un moyen de stockage d'énergie, les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie à travers un régulateur.

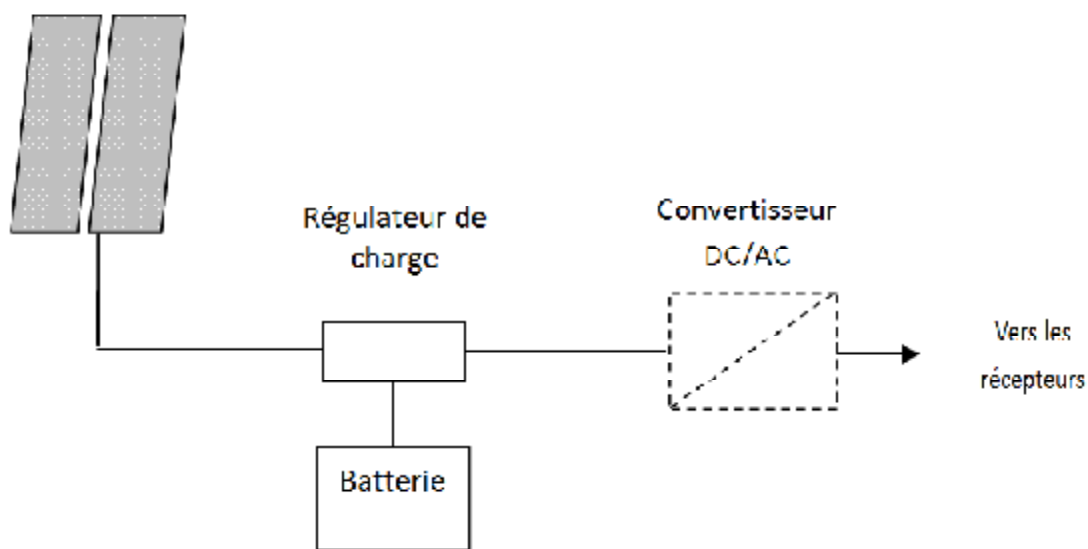


Figure II.2. Système photovoltaïque avec stockage [1].

2.2. Systèmes autonomes hybrides

Un système hybride est disposé d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque, le plus souvent utilisé est le groupe électrogène (figure II.3) [1]. Il peut servir à recharger la batterie en cas de période de manque d'ensoleillement trop prolongée ou de surconsommation. Le mieux est de prévoir un démarrage automatique du groupe en cas de baisse de tension des batteries (préférable à une alarme visuelle ou sonore), car il est impératif d'éviter une décharge profonde des accumulateurs [27].

Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

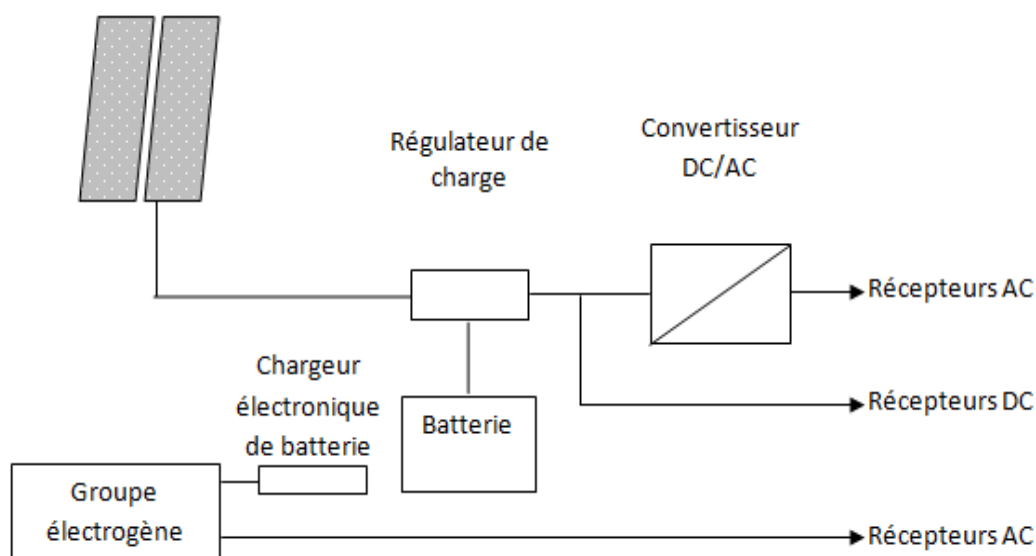


Figure II.3. Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque groupe électrogène.

2 .3. Système photovoltaïque connecté au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (DC-AC).

Étant donné que l'énergie est directement distribuée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins de vouloir disposer d'une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité (figure II.4).

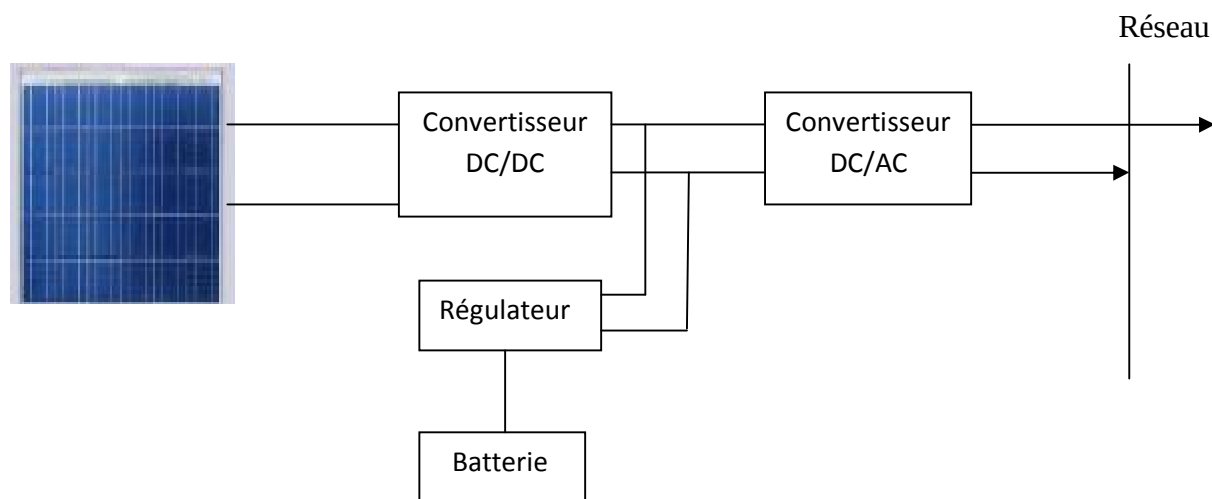


Figure II.4. Système photovoltaïque raccordé au réseau.

3. Définition d'un système de conversion photovoltaïque

Quelque soit sa nature autonome ou non autonome, un système photovoltaïque est un ensemble de composants nécessaires à l'alimentation d'une application en toute fiabilité. L'énergie fournie par un module PV est très variable, d'où la nécessité de la transformer, la stocker et la contrôler comme le montre le schéma synoptique suivant :

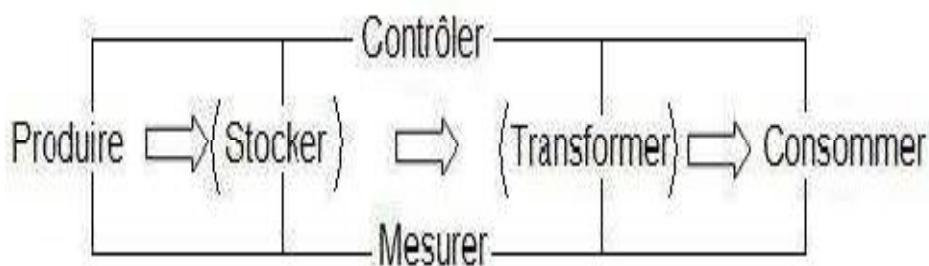


Figure II.5. Fonctions principales d'un système photovoltaïque [1].

« Contrôler » : est indispensable pour veiller à ce que les composants ne soient pas endommagés et durent le plus longtemps possible, surtout pour les batteries, qui ont la durée de vie la plus faible;

« Mesurer » est utile pour avoir des informations sur le fonctionnement de l'ensemble [1].

Fonctionnement d'un système photovoltaïque :

Tout système de production d'énergie photovoltaïque, et pour son bon fonctionnement, doit être composé des principaux éléments suivants :

- un système de captage (champ photovoltaïque) ;
- un système de stockage (batterie) ;
- un système de régulation ;
- un système de conversion.

3.1. Le système de captage photovoltaïque

Le système de captage est constitué par un panneau ou un champ PV. Ce dernier est un groupement de modules constitués par association de cellules.

3.1.1. La cellule photovoltaïque

La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus appelé « effet photovoltaïque ».

3.1.2. Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique.

3.1.3. Le panneau photovoltaïque

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenter la tension) et en parallèle (augmenter le courant) pour former un panneau (ou champ de modules)

3.2. Le système de stockage

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques dépend énormément des conditions météorologiques. En général, les composants utilisés pour le stockage dans les systèmes photovoltaïques autonomes sont les batteries [1]. Il existe plusieurs types d'accumulateurs de stockage.

1. Les accumulateurs au plomb (très utilisés).
2. Les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).

3.2.1. Les différents types de batteries

3.2.1.1. Les batteries au plomb [1]

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives, bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative. Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique. La quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande [1]. La tension varie entre 1.7 Volts et 2.4 Volts par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. Ces accumulateurs ont un

rendement énergétique de l'ordre de 70 à 85 %. En raison de leur maintenance nécessaire, ils sont réservés aux systèmes photovoltaïques de puissance [26].

3.2.1.2 Les batteries en Cadmium-Nickel [1]

La tension de ce type d'accumulateurs varie entre 1.15 et 1.45 Volts par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- très bonne résistance mécanique ;
- possibilité de supporter des décharges profondes ;
- pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- ne craint pas le gel.

3.2.1.3. Les batteries en Nickel-Zinc [26]

Ces accumulateurs sont encore dans le domaine de la recherche mais ils ont l'intérêt d'utiliser des matériaux moins coûteux est moins toxiques, leur tension varie entre 1.6 et 1.8 Volts et leur inconvénient principal est lié à la durée de vie qui reste limitée par nombre de cycles.

3.2.1.4. Les batteries au Lithium [24]

Ces nouveaux accumulateurs utilisent un électrolyte liquide organique, leur intérêt réside dans une forte capacité par unité de masse, une très bonne étanchéité et une stabilité importante vis-à-vis de la température. Leur développement est subordonné à une augmentation du nombre de cycles qu'ils peuvent accepter.

Il existe encore bien d'autres types d'accumulateurs réservés aux applications spatiales tels que les éléments Nickel-Hydrogène ou Argent- Hydrogène.

Les applications terrestres photovoltaïques n'utilisent pour l'instant que les accumulateurs au Plomb ou Cadmium-Nickel, leur couplage est relativement simple moyennant quelques règles de sécurité.

Tandis que les batteries au Plomb représentent plus de 90% de la production mondiale. Leur coût est comparable aux batteries Nickel-Cadium ou Nickel-Zinc [26].

3.2.2. Les caractéristiques principales d'un accumulateur [26,24]

- **Capacité en Ampère heure** : c'est la quantité maximale d'énergie électrique restituable par l'accumulateur ou plus pratiquement c'est le nombre d'ampères-heures que peut débiter un

accumulateur pour un courant et une tension définis. Elle s'exprime en ampères heures ou en Watts heures.

- **La tension d'utilisation:** c'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **le rendement :** c'est le rapport entre l'énergie restituée par l'accumulateur et l'énergie électrique fournie à l'accumulateur.
- **La durée de vie :** un accumulateur peut être chargé complètement un certain nombre de fois avant que ses caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il a une durée de vie totale exprimée en années (ou en nombre de cycles).
- **Auto décharge :** est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.
- **La profondeur de décharge :** la batterie doit être maintenue en bon état une très longue durée. Pour cela nous ne devons pas la décharger à plus de 80% de sa capacité normale. Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.

Température : Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27°C. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [24].

3.3. Le système de régulation [1,26]

Le régulateur est le cœur du système photovoltaïque. C'est un petit appareil qui se place entre la batterie et les panneaux photovoltaïques pour éviter que la batterie ne soit endommagée par un courant trop fort ou inversement qu'elle ne se décharge trop. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Sachant que, l'état de charge de la batterie est estimé par la mesure de la tension aux bornes des éléments. Il doit aussi assurer la surveillance et la sécurité de l'installation [24].

3.3.1. Différents types de régulateurs

3.3.1.1. Régulateur de décharge

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension préréglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil [1, 30].

3.3.1.2. Le régulateur de la charge [1,22]

Le régulateur de la charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

Les régulateurs de charge d'un système PV autonome peuvent se diviser en trois groupes principaux [1] :

3.3.1.2.1 Régulateur de charge série [23]

Ce régulateur est un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge [1, 26].

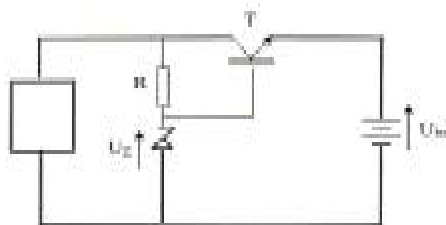


Figure II .7. Régulateur série [26].

Le dispositif (figure II.7) fonctionne de la manière suivante: Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zéner U_Z , le courant délivré par le panneau charge la batterie à travers un transistor ; dès que la tension de la batterie U_{bat} devient supérieure à U_Z le transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers (R).

3.3.1.2.2. Régulateur de charge à coupure [24]

Ce régulateur comporte un relais qui connecte et déconnecte le générateur photovoltaïque à deux seuils différents et qui sont commandés par une unité de contrôle. Il mesure en permanence la tension aux bornes de la batterie [24].

3.3.1.2.3. Régulateur shunt [1]

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissance selon le principe suivant :

Lorsque la tension de la batterie est faible, le courant et la tension aux bornes de la résistance sont faibles alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zéner atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il dérive une partie du courant de charge.

En conclusion, nous pouvons dire qu'un régulateur de charge, qu'il soit de conception simple ou compliquée est le cœur d'une installation photovoltaïque. La régulation de la charge a pour but de limiter la tension de la batterie (seuil haut), cependant la régulation de décharge est assurée par déconnexion des utilisations lorsque la tension de batterie atteint une valeur trop faible (seuil bas). La catégorie supérieure de régulateurs de charge modernes gèrent différents processus de recharge (y compris de régénération périodiques), disposent de la technique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM). Leur fonctionnement est contrôlé par logiciel.

3.4. La conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (il portera le nom de convertisseur continu-continu DC/DC), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif DC/AC).

3.4.1. Convertisseur continu-continu (DC/DC)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu que l'on dispose généralement entre le champ PV et la charge. Ce type de convertisseur est destiné à la partie contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler, par le rapport cyclique. Il permet d'adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande qui permet de rechercher le point de puissance maximum [24].

Le rendement du convertisseur DC/DC se situe entre 90 et 95%. Mais son prix est très élevé.

3.4.1.1. Définition de la commande MPPT

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (PV), (ensemble de cellules photovoltaïques) de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et irradiation) et quels que soit la tension de la charge (charge résistive ou batterie), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximums (figure II.8).

3.4.1.2. Différents types de MPPT

Plusieurs algorithmes pour la poursuite du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking) ont été proposés par les chercheurs et peuvent être présentés en deux catégories [29] :

3.4.1.2.1. Les méthodes directes

La méthode d'ajustement de la courbe, la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur et la méthode de court circuit.

3.4.1.2.2. Les méthodes indirectes

On retrouve la méthode de l'incrémentation de la conductance, la méthode contre réaction de courant, la méthode contre réaction de tension et la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation, cette méthode est basée sur la courbe P-V (la dérivée $\frac{dp}{dv}$) en agissant sur le rapport cyclique.

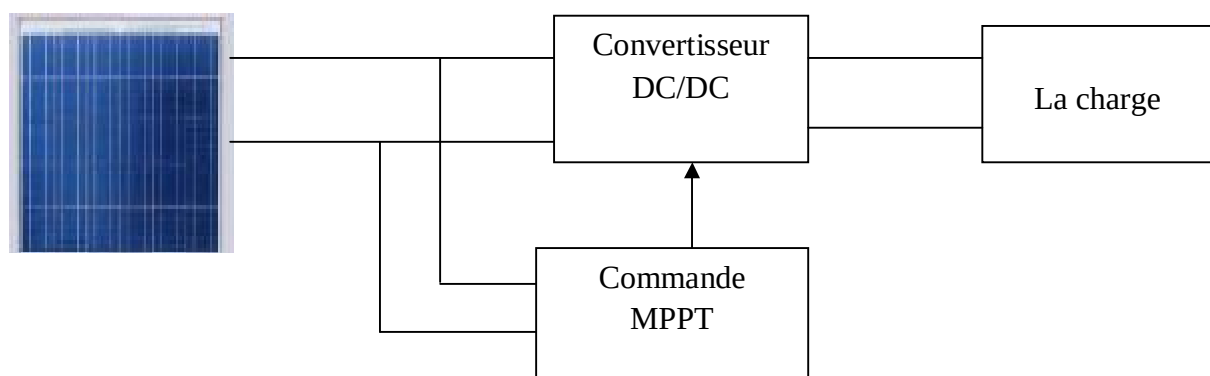


Figure II.8. Schéma du système photovoltaïque avec la commande MPPT.

3.4.2. Convertisseur continu- alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'onde de sortie peut être assurée par un convertisseur statique (onduleur). C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charge, des pertes à vide considérables surtout pour les faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (Pulse Width Modulation MLI) qui permettent grâce à la modulation de la largeur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale.

Le système utilisé au niveau du Laboratoire des Technologies Avancées en Génie Electrique (LATAGE) est présenté par le schéma suivant :

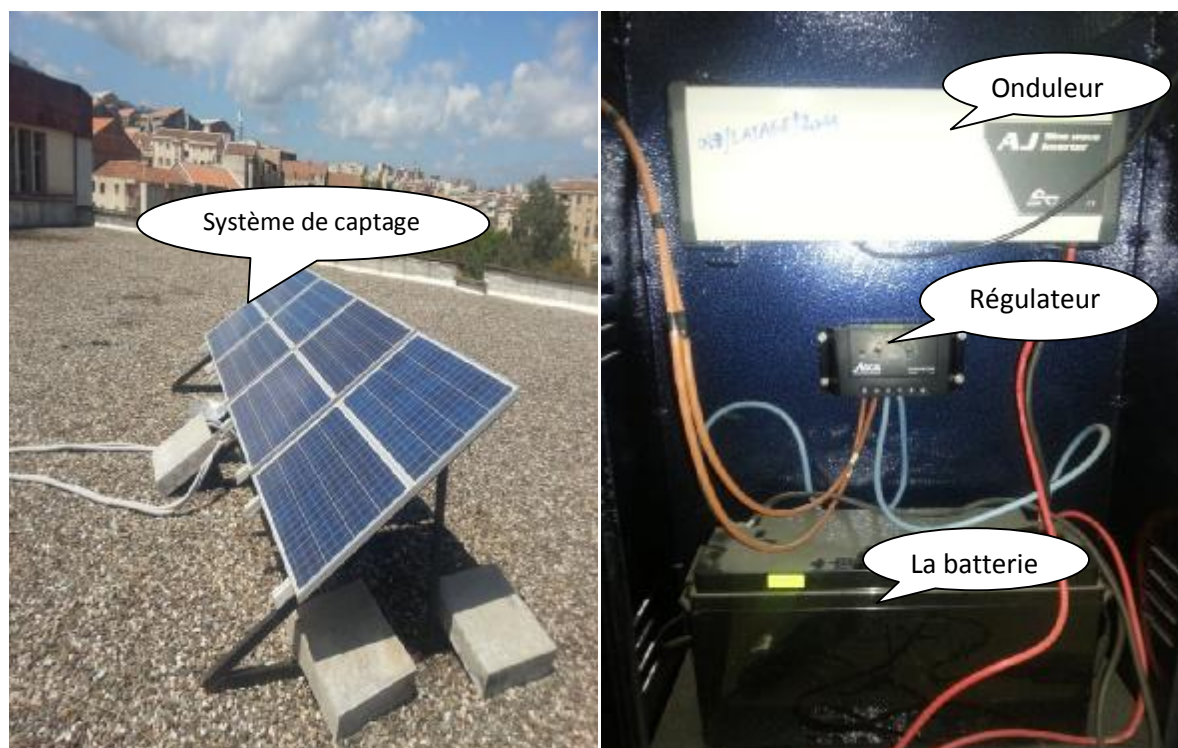


Figure II.10. Installation photovoltaïque au niveau du laboratoire LATAGE.

4. Exemples des centrales solaires photovoltaïques dans le monde [26]

En 2009, la plus grande centrale solaire photovoltaïque au monde se trouve à Moura au Portugal (62 MW de puissance). La centrale du CDER est disposée d'un générateur photovoltaïque (PV) qui est constitué de 90 modules photovoltaïque de puissance crête 106 Wc, couplés à trois onduleurs monophasés de 2500 W du fournisseur à travers une série de protections. Ces onduleurs sont branchés en étoile sur le réseau basse tension SONELGAS, 220V - 50Hz. La centrale du CDER un angle d'inclinaison de 27 degré d'orientation ouest. Les 90 modules sont structurés de telle manière à constituer trois champs de 30 modules ; chaque champ est formé de 2 branches parallèles de 15 modules couplés en série ; chaque champ de modules est connecté à un onduleur enfin Chaque onduleur est branché sur une phase du réseau. Cette centrale est certes de petite taille (9,54kWc).

Tableau II.1. Les plus grandes centrales photovoltaïques dans le monde [26].

Puissance (MW crête)	Localisation	Description	Production
62 MW	Moura, Portugal	350 000 modules	88 GWh, mise en service en 2009
46.41 MW	Amareleja, Portugal	262.000 modules	93GWh, mis en 2008
40 MW	Sarnia, Ontario, Canada	1 million de modules sur 365 hectares	40 GWh, mise en service en 2010
40 MW	Brandis, Allemagne	400.000 m ² , 550.000 modules CIS	40 GWh,
20 MW	Beneixama, Espagne	non précisé	mise en service en septembre 2007
18 MW	Las Vegas, États-Unis	non précisé	en service en 2007
14 MW	Murcia, Espagne	non précisé	20000 MWh (fin 04.2007)
12 MW	Bavaria solarpark, Allemagne	passée à 12 MW en 2006	12 GWh
11 MW	Serpa, Portugal	52000 modules	entrée en service en 2007
7 MW	Narbonne, France	modules First Solar	8250 MW·h
6.3 MW	Mühlhausen, Allemagne	57600 modules	6750 MW·h
5 MW	Bürostadt, Allemagne	30000 modules	4200 MW·h
5 MW	Espenhain, Allemagne	33500 modules	5000 MW·h
4.59 MW	Springerville, Arizona, USA	34980 modules	7750 MW·h

5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale sur les systèmes photovoltaïques. Tous les éléments ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV, nous avons aussi donné des exemples des centrales photovoltaïques dans le monde.

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

1. Introduction

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique $I(V)$ plus performante et pratique. En général le choix d'un modèle dépend toujours de l'usage que l'on veut en faire et des données fournies par le fabricant.

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Les dispositifs PV sont fondamentalement représentés par deux modèles différents

- § Modèle à une diode (ou exponentiel simple) ;
- § Modèle à deux diodes (ou double exponentiel).

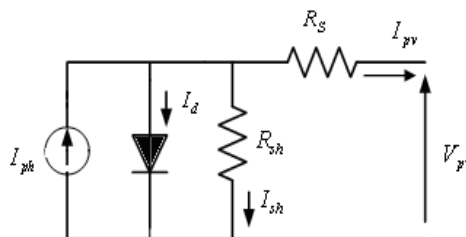


Figure III.1. Modèle à une diode.

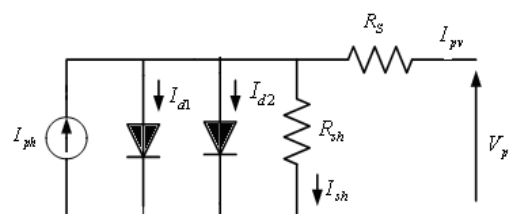


Figure III.2. Modèle à deux diodes.

2. Modèle à deux diodes

2.1. Modèle à sept paramètres (2M7P)

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (III.3). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire [9], de la résistance série R_s et de la résistance parallèle (shunt), R_{sh} [9].

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

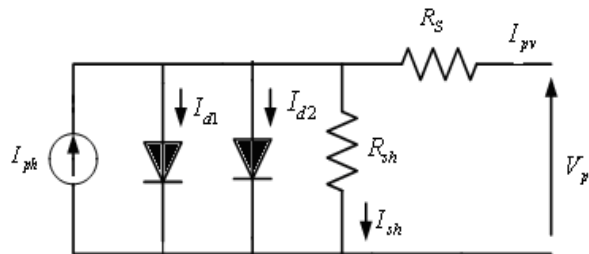


Figure III.3. Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff[9] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{III-1})$$

Avec ;

I_{ph} : courant photonique

I_{d1} : courant de diode 1

I_{d2} : courant de diode 2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{III-2})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{III-3})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (III-4)$$

Avec :

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique

T_c : est la température absolue

q : la charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} C$

K : la constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} J/k$

I_{sh} : est le courant de la résistance shunt.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right)} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (III-5)$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [9]:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph_ref} - \mu_{cc} (T_c - T_{c_ref}) \right) \quad (III-6)$$

Avec,

I_{ph_ref} : Le courant photonique sous condition de référence [A]

μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

G, G_{ref} : L'éclairement réel et celui relatif à la condition de référence [W/m²]

T_c, T_{c_ref} : La température réelle de la cellule, et celle relative aux conditions de référence [K]

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes [9]:

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot K} \right) \quad (III-7)$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp \left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot K} \right) \quad (III-8)$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre 150 - 180 A.K⁻³ et $1,3 - 1,7 \times 10^{-2}$ A.K^{-5/2} pour une cellule de 100 cm²[9].

Une valeur du facteur d'idéalité n différente de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux des pièges[9].

§ $n = 1$: La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).

§ $1 < n < 2$: Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation [9].

§ $n = 2$: Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.

§ $2 < n < 4$: Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface

E_{gap} : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV) [9].

Il est possible de déterminer ces caractéristiques par des méthodes numériques itératives. (La méthode de dichotomie, la méthode de Lagrange, la méthode du point fixe et la méthode de Newton Raphson).

La méthode de Newton Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (III-9)$$

Avec ;

$f'(x)$: est la dérivée de la fonction $f(x)$

$f(x) = 0$, x_n est une valeur actuelle et x_{n+1} est une prochaine valeur.

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_t \cdot n_1} \right)} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_t \cdot n_2} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (III-10)$$

La substitution de cette équation dans l'équation (III-10) donne l'équation suivante, et le courant de sortie est calculé itérativement.

$$I_{pv(n+1)} = I_{pv(n)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(n)} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{R_{sh}} \right)}{-1 - I_{s1} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - I_{s2} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (III-11)$$

2.2. Modèle à six paramètres (2M6P)

Si la résistance shunt est considérée infinie ($R_{sh}=\infty$), le nombre de paramètres à déterminer devient six. Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (III-7)) et I_{s2} (équation (III-8)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photocourant I_{ph} (équation (III-6)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série R_s . La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique, figure (III.4)[9].

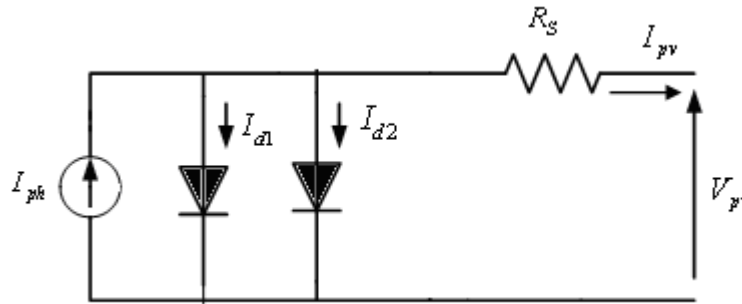


Figure III.4. Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{III-12})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante[9]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n_2}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-13})$$

La méthode de Newton Raphson a été utilisée et le courant de sortie est donné par l'équation (III-14).

$$I_{pv(n+1)} = I_{pv(n)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(n)} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right)}{-1 - I_{s1} \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - I_{s2} \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right)} \quad (III-14)$$

2.3. Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (III.4) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P. Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle [9].

Le circuit équivalent sera représenté comme suit, figure (III.5).

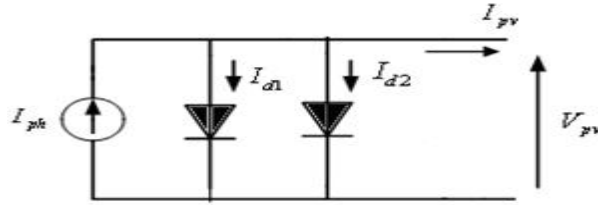


Figure III. 5. Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (III-7)) et I_{s2} (équation (III-8)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photocourant I_{ph} (équation (III-6)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température [9]. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (III-15)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) \quad (III-16)$$

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-30).

$$I_{pv(n+1)} = - \frac{I_{cc} - I_{pv(n)} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right)}{(-1)} \quad (\text{III-17})$$

3. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Schotky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant- tension une exponentielle de moins [9].

3.1. Modèle à trois paramètres (L3P)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} (équation (III-6)) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters). Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode [9].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (III.6) :

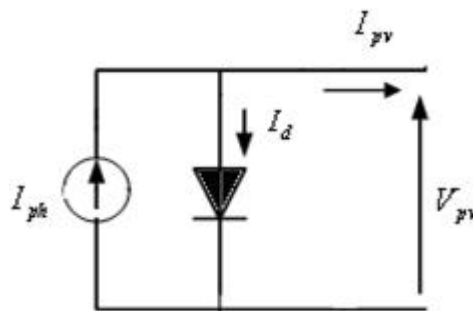


Figure III.6. Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff[9]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (III-18)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation:

$$I_d = I_s \left(e^{\left(\frac{V_d}{V_t \cdot n} \right)} - 1 \right) \quad (III-19)$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n} \right)} - 1 \right) \quad (III-20)$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [9]:

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}} \right)^3 \exp \left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (III-21)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte des pertes de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

3.2. Modèle à quatre paramètres (L4P)

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend [9]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I(V) sont le courant photonique I_{ph} , la résistance série R_s , le courant de saturation I_s , et le facteur d'idéalité n . Ces

paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont généralement pas inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants)[9].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (III.7) :

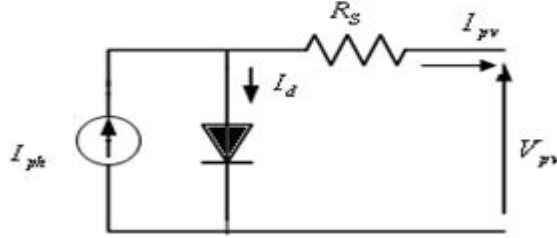


Figure III.7. Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [9]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (III-22)$$

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-23).

$$I_{pv(n+1)} = I_{pv(n)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(n)} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right)}{-1 - I_s \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n}\right)} \quad (III-23)$$

3.3. Modèle à cinq paramètres (L5P)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique, figure (III.8) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt, une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: n , I_{ph} , R_s , R_{sh} et I_s . Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters)[9].

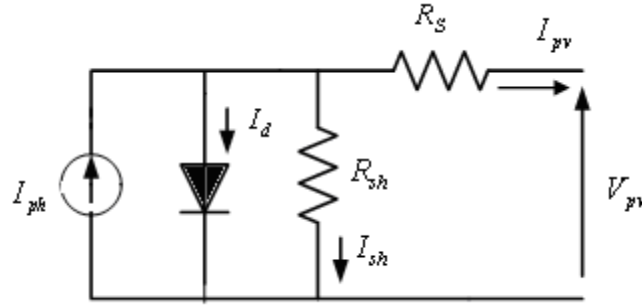


Figure III.8. Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III-24})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [9]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-25})$$

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-26).

$$I_{pv(n+1)} = I_{pv(n)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(n)} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv(n)} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv(n)} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{R_{sh}} \right)}{-1 - I_s \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv(n)} + I_{pv(n)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{III-26})$$

4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents modèles électriques caractérisant les cellules photovoltaïques. La cellule photovoltaïque est modélisée par un générateur de courant continu et des modèles différents par le nombre de diodes et le nombre de paramètres aux quels ils font appel.

Simulation et interprétation des résultats

1. Introduction

Après avoir représenté les différents modèles PV et les composants les constituant dans le chapitre précédent, nous présentons dans ce chapitre leurs résultats de simulations. Les résultats sont obtenus à l'aide d'un programme développé sous environnement Matlab. Une validation expérimentale s'avère nécessaire, les résultats obtenus par la simulation sont donc comparés à ceux trouvés expérimentalement.

2. Définition du site

Le module photovoltaïque de type 80M-12 est constitué d'une mise en parallèle de deux groupes de 36 cellules mises en série.

2.1. Module photovoltaïque utilisé

Le module utilisé est constitué de la mise en parallèle de deux groupes de 36 cellules connectées en série, il est de type monocristallin et par la dénomination 80M-12.

Les caractéristiques de ce module mesurées dans les conditions standard STC (1000 W/m², masse optique: AM 1.5, Température de la cellule: 25 °C) sont illustrés sur le tableau (IV.1).

Grandeurs	Valeurs
Nombre de cellules en série(N_s)	36
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	2
Puissance maximale (P_{max})	80W
Courant de court-circuit (I_{cc})	4.96A
Tension du circuit ouvert (V_{co})	21.9V
Courant au point de MPP (I_{ppm})	4.7A
Tension au point de MPP (V_{ppm})	17.2V

Tableau IV.1. Caractéristiques du générateur PV du module de type 80M-12 choisi pour la modélisation

3. Résultats de simulation

Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats de la simulation d'une cellule photovoltaïque avec les valeurs des résistances série et parallèle que nous avons choisies.

Nous utiliserons dans ce qui suit les notations suivantes pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque:

Le courant photonique :

$$I_{ph} = N_p \cdot I_{ph} \quad (IV-1)$$

Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

$$I_{cc(\text{cellule})} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (IV-2)$$

La tension du circuit ouvert (V_{co}) :

$$V_{co(\text{cellule})} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (IV-3)$$

Le courant maximal:

$$I_{mp(\text{cellule})} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (IV-4)$$

La tension maximale:

$$V_{mp(\text{cellule})} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (IV-5)$$

La puissance maximale:

$$P_{\max(\text{cellule})} = I_{mp(\text{cellule})} \cdot V_{mp(\text{cellule})} \quad (IV-6)$$

La résistance série:

$$R_{s(\text{cellule})} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s(\text{module})} \quad (IV-7)$$

La résistance shunt:

$$R_{sh(\text{cellule})} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sh(\text{module})} \quad (IV-8)$$

3.1. Résultats de simulation pour une cellule photovoltaïque

3.1.1. Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque selon les modèles à une diode:

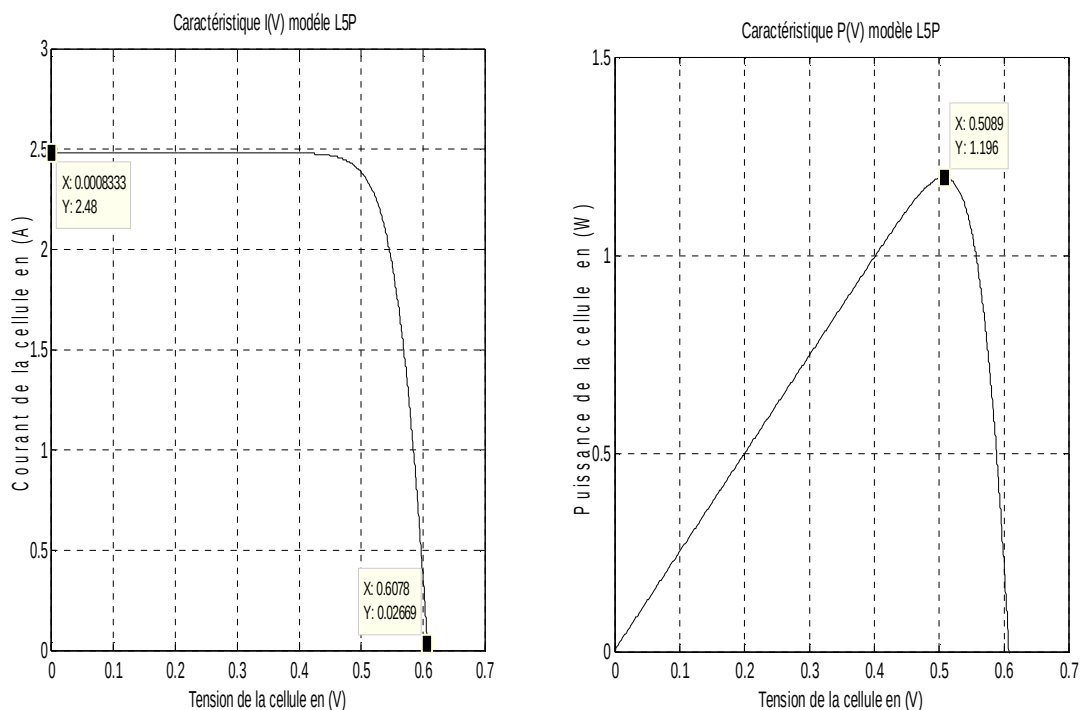


Figure IV.1. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, L5P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

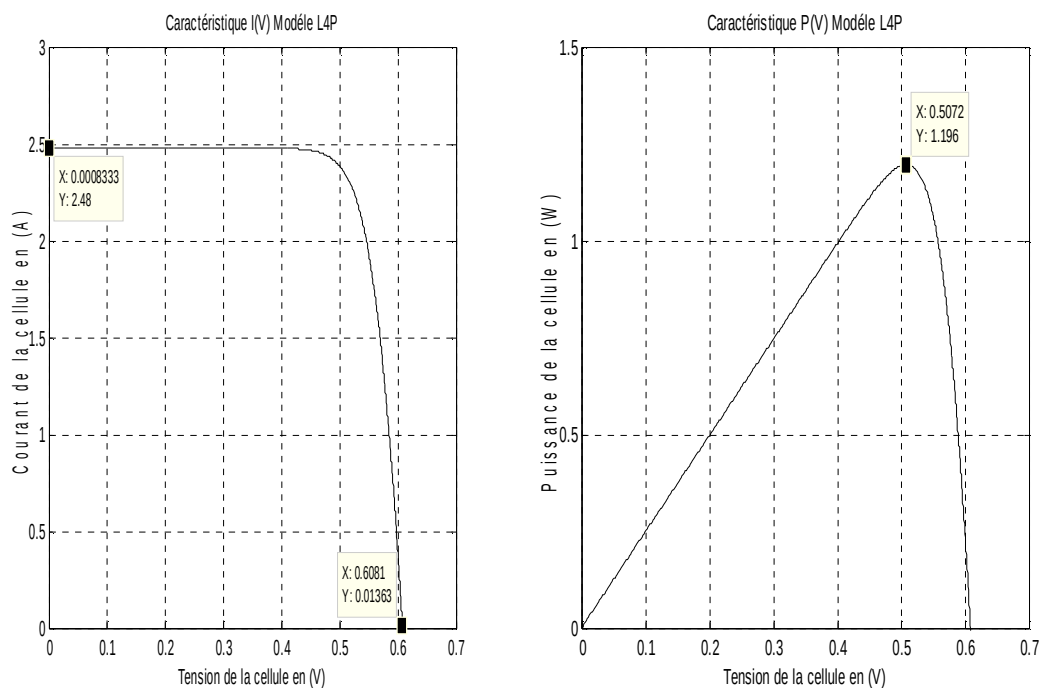


Figure IV.2. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, L4P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

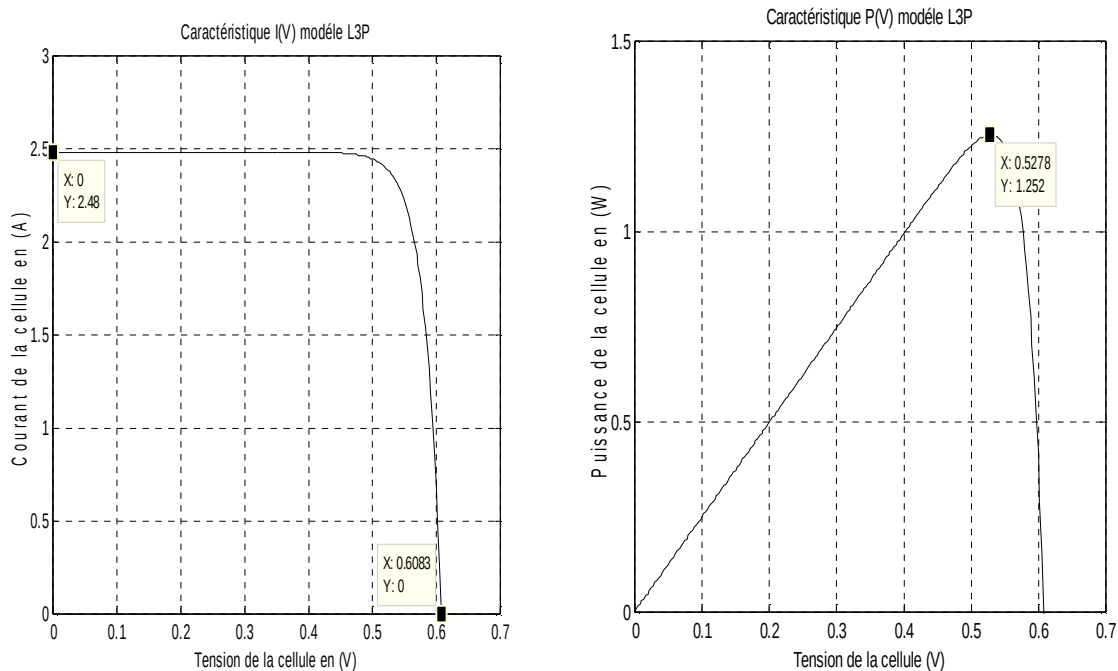


Figure IV.3. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, L3P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

3.1.2. Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque selon les modèles à deux diodes

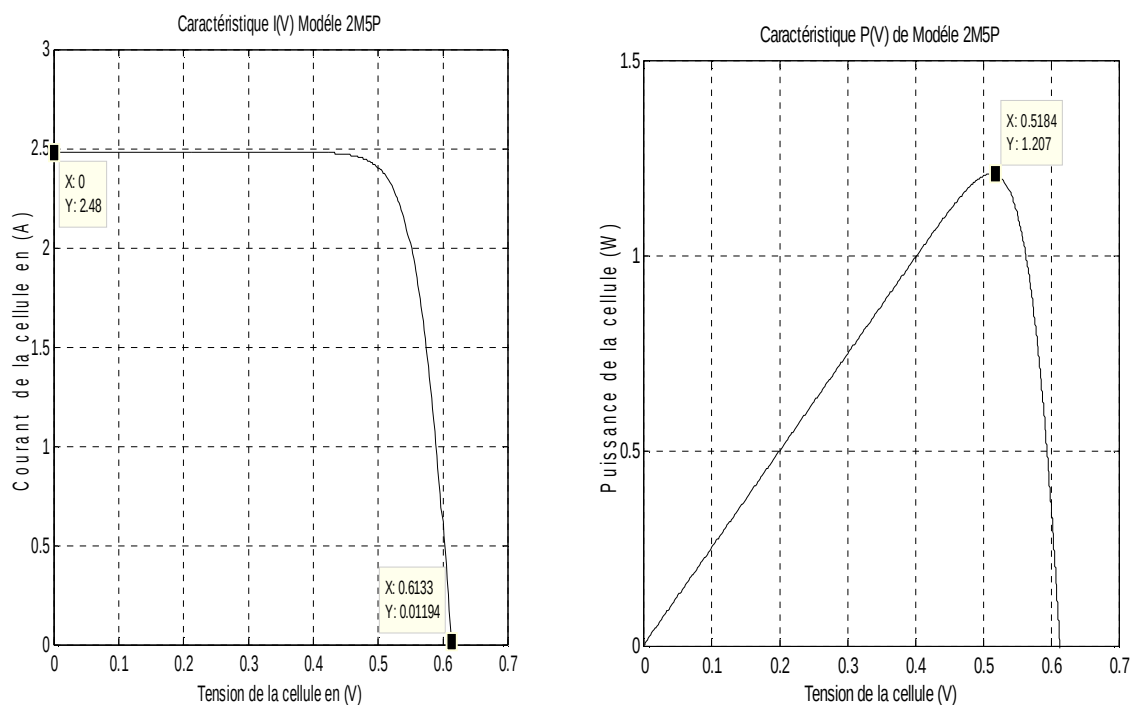


Figure IV.4. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, 2M5P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

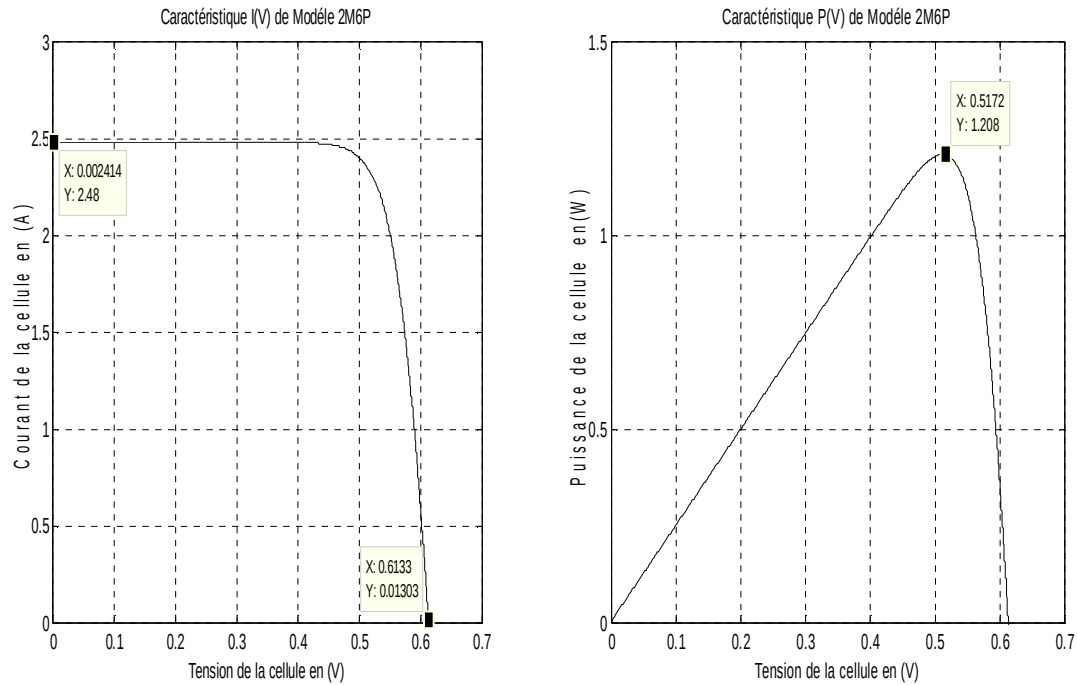


Figure IV.5. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, 2M6P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

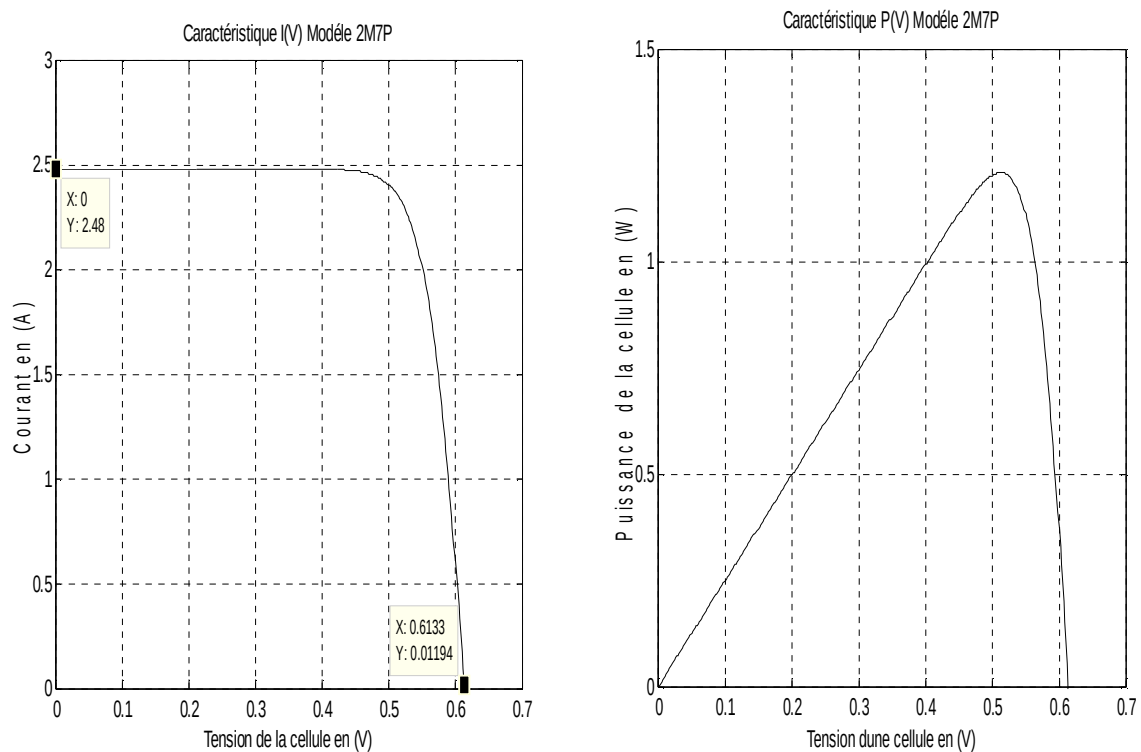


Figure IV.6. Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV, 2M7P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

Dans les figures (IV.1) à (IV.6) on remarque que le courant reste constant aux basses tensions et ce courant est égal au courant de court circuit $I_{cc} = 2,48$ A, puis le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est majorée par une valeur égale à la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque $V_{co} = 0.608$ V. On constate aussi sur la courbe de la caractéristique puissance-tension qu'il y a un point où la puissance à une valeur maximale. À ce point la cellule fonctionne au rendement le plus grand; c'est le point de puissance maximale (MPP).

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules mises en série ou en parallèle donc la modélisation d'une seule cellule est insuffisante pour représenter l'ensemble du module. Il est donc nécessaire de passer à la modélisation complète.

4. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

La stratégie de la modélisation d'un module PV n'est pas différente de celle adoptée pour une cellule photovoltaïque. Les paramètres utilisés restent inchangés sauf la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit. Dans ce cas, la tension sera multipliée par le nombre de cellules en série et le courant par le nombre de cellules en parallèles.

4.1. Résultats de simulation pour un module photovoltaïque

4.1. La caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV selon le modèle à une diode

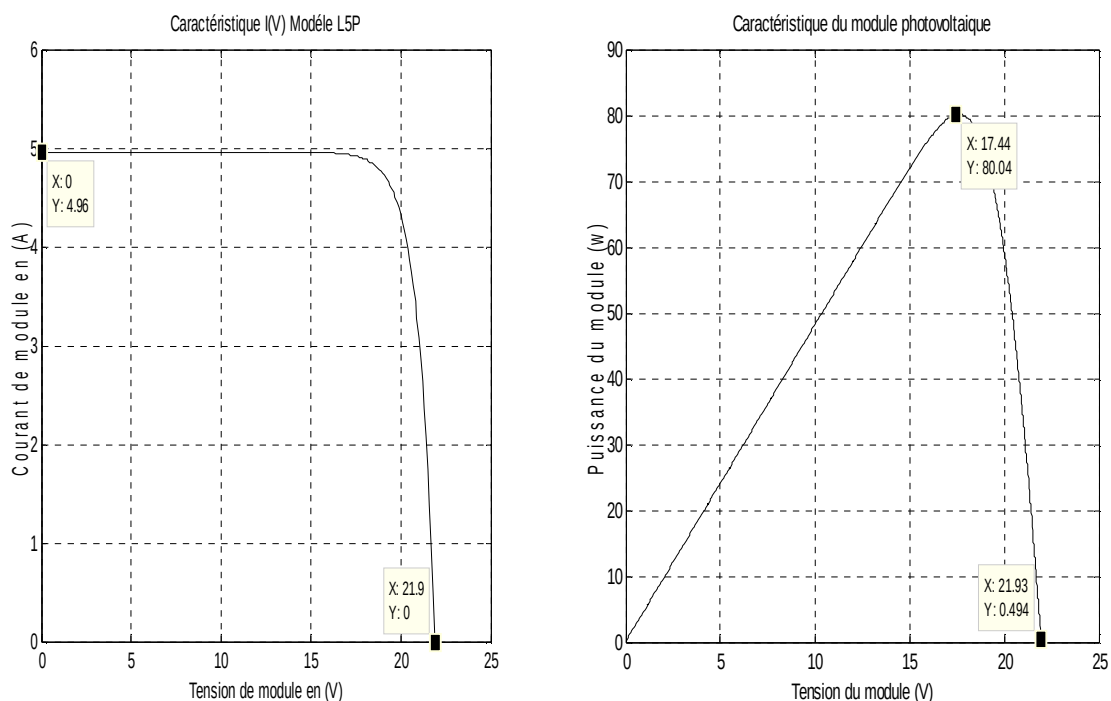
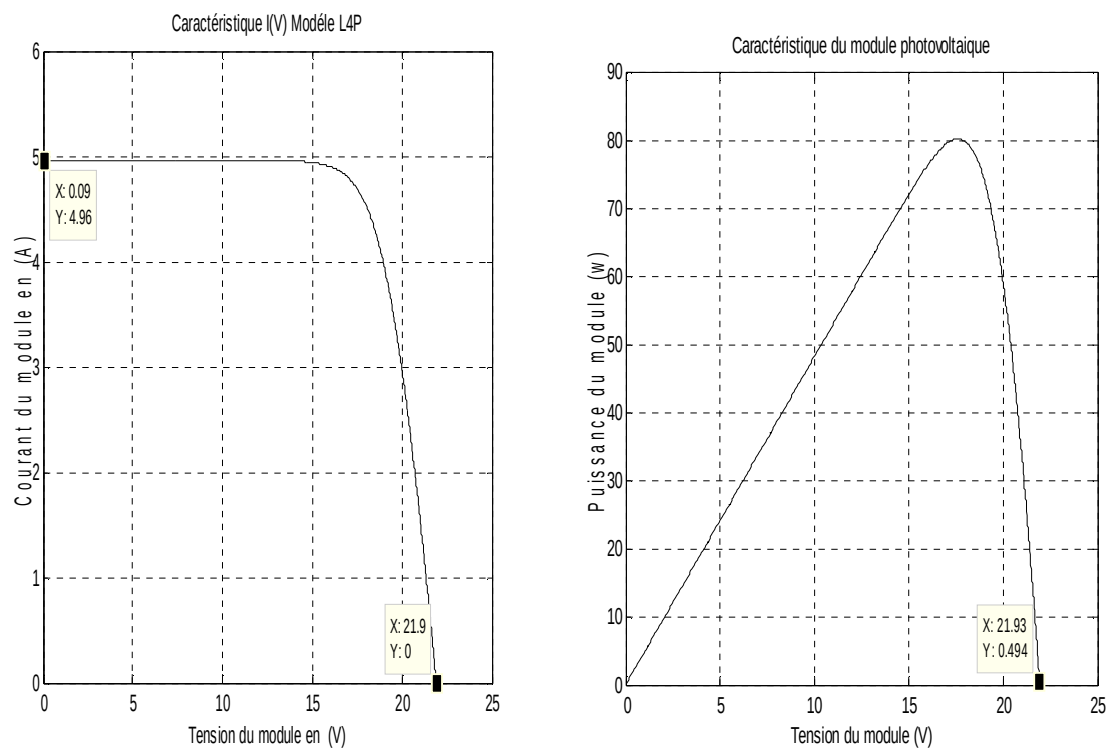
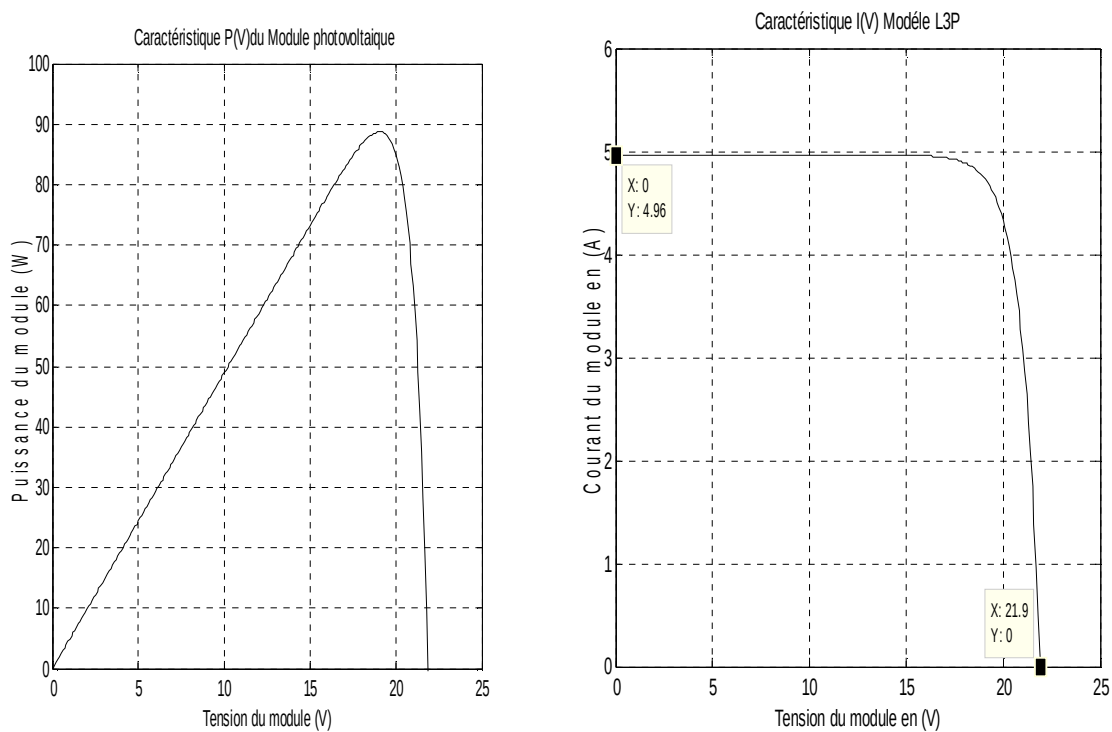


Figure IV.7. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV, L5P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)

Figure IV.8. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV, L4P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)Figure IV.9. Caractéristique P(V) et I(V) d'un module PV, L3P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)

4.1.2. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV selon le modèle à deux diodes

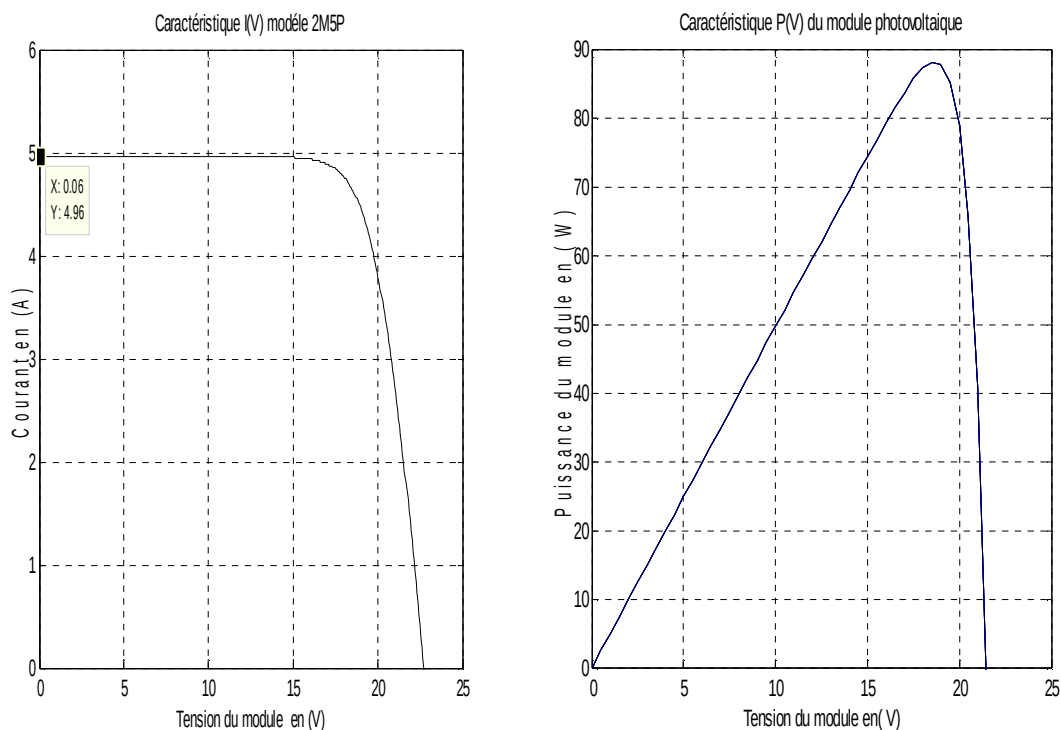


Figure IV.10. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV, 2M5P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)

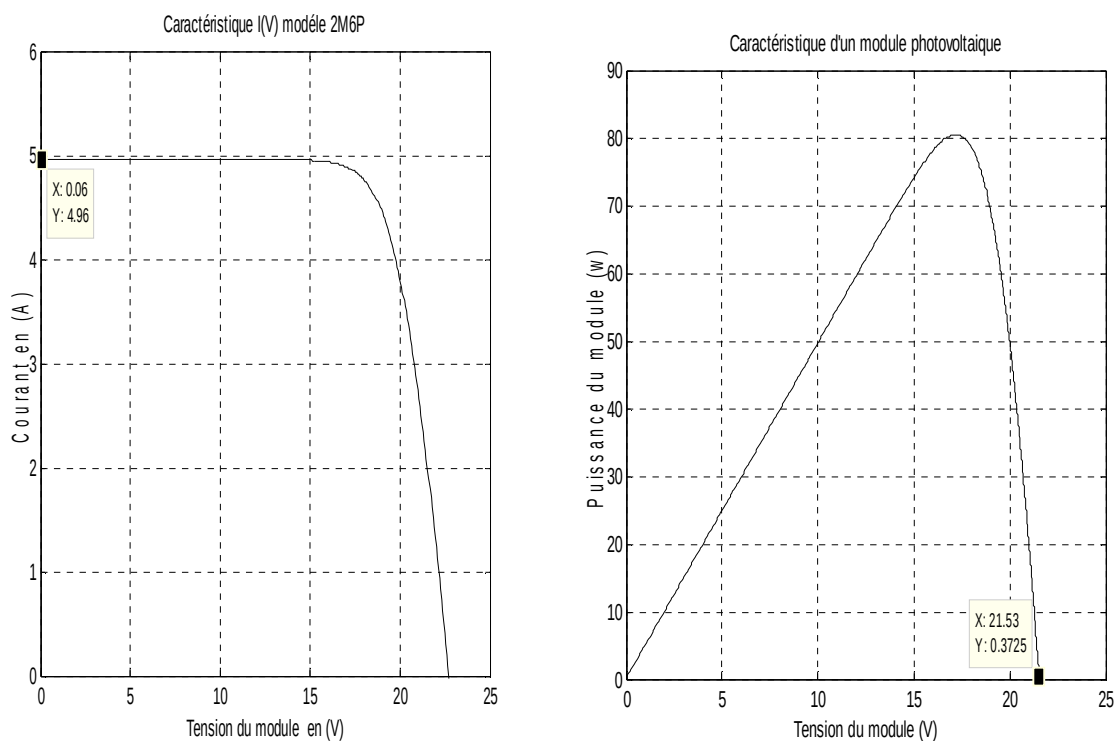


Figure IV.11. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV, 2M6P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)

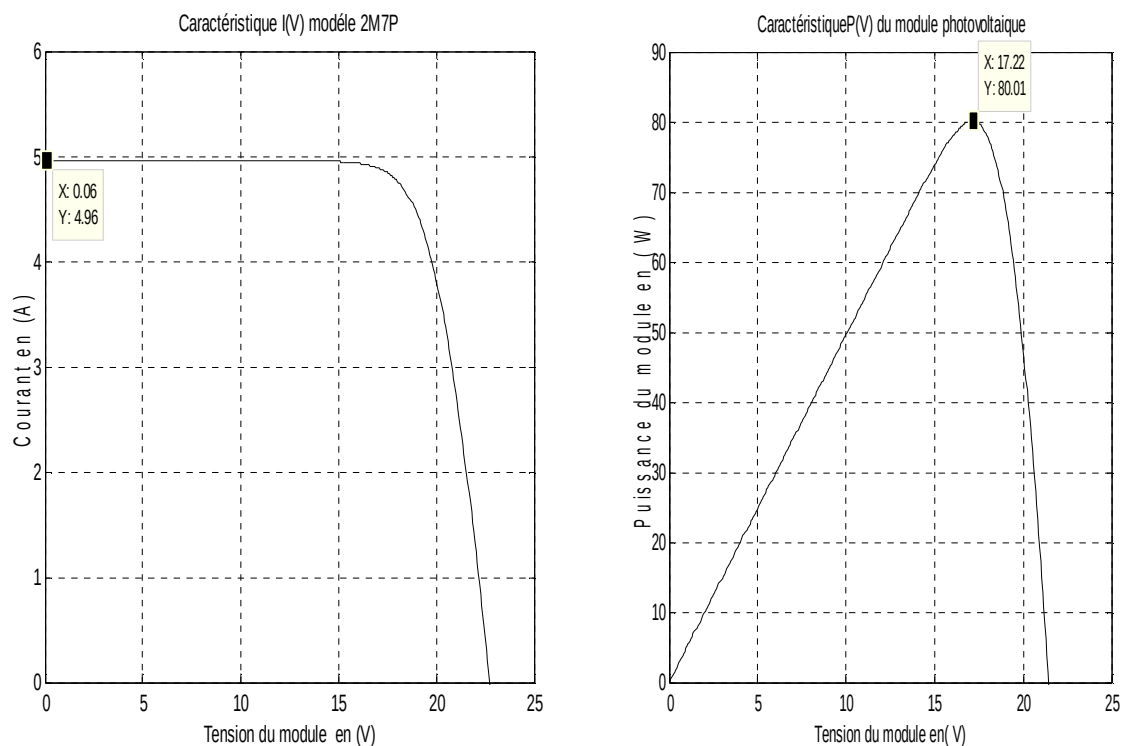


Figure IV.12. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV 2M7P ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$).

Les figures (IV.7) à (IV.12), illustrent la caractéristique I(V) du module 80M-12 qui a été modélisé avec le modèle à une diode et à deux diodes dans les conditions standard. On observe que le courant de court circuit est égal à 4.96A et la tension de circuit ouvert approche les 21.9V dans les modèle à deux exponentielles, par contre dans les modèles à une exponentielle elle est égal à 21.9V. On constate aussi sur la courbe de la caractéristique puissance-tension qu'il y a un point où la puissance à une valeur maximale et elle est égale à 80W. En ce point le module donne un rendement plus important ; c'est le point de puissance maximale (MPP).

5. Comparaison entre les caractéristiques I(V) et P(V) selon les modèles à une et à deux diodes du module PV dans les conditions STC

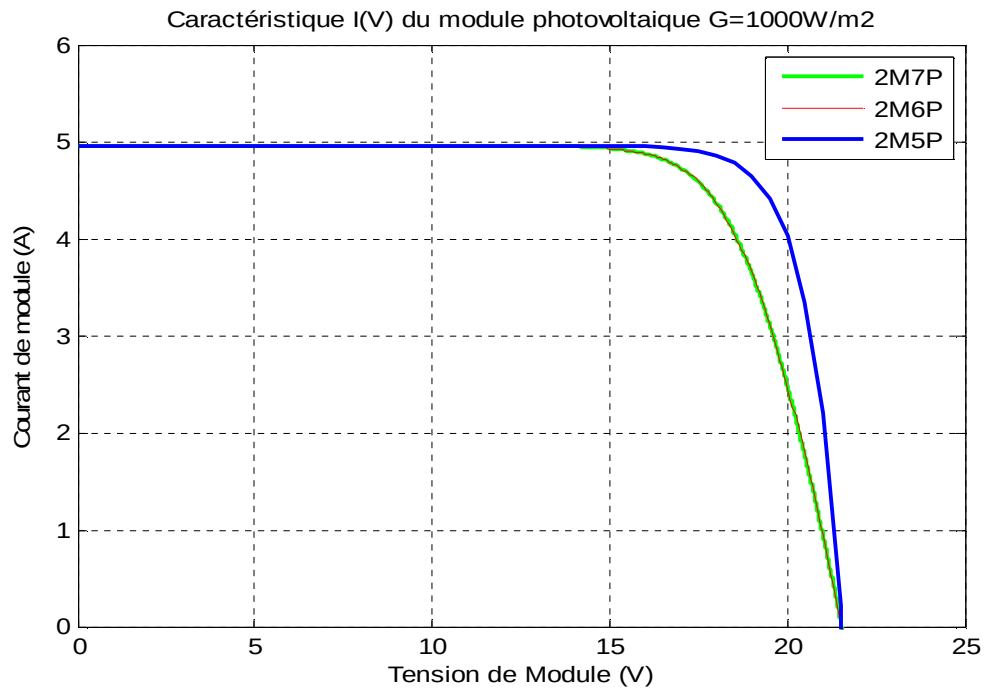


Figure IV.13. Caractéristiques I(V) du modèle à deux diodes pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P)

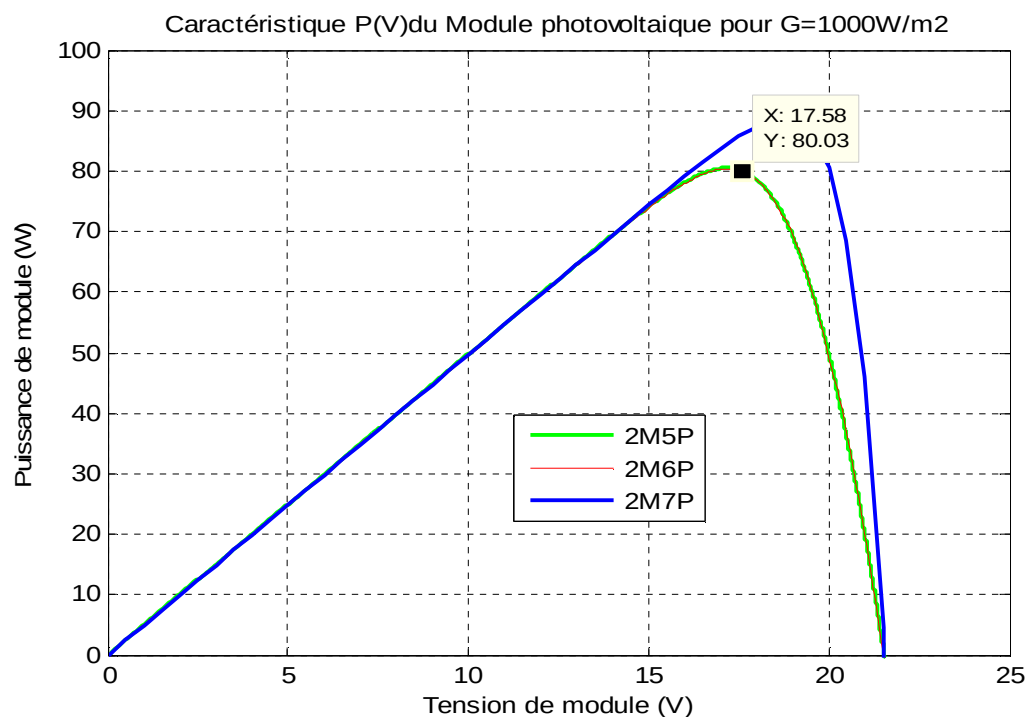


Figure IV.14. Caractéristiques P(V) du modèle à deux diodes pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

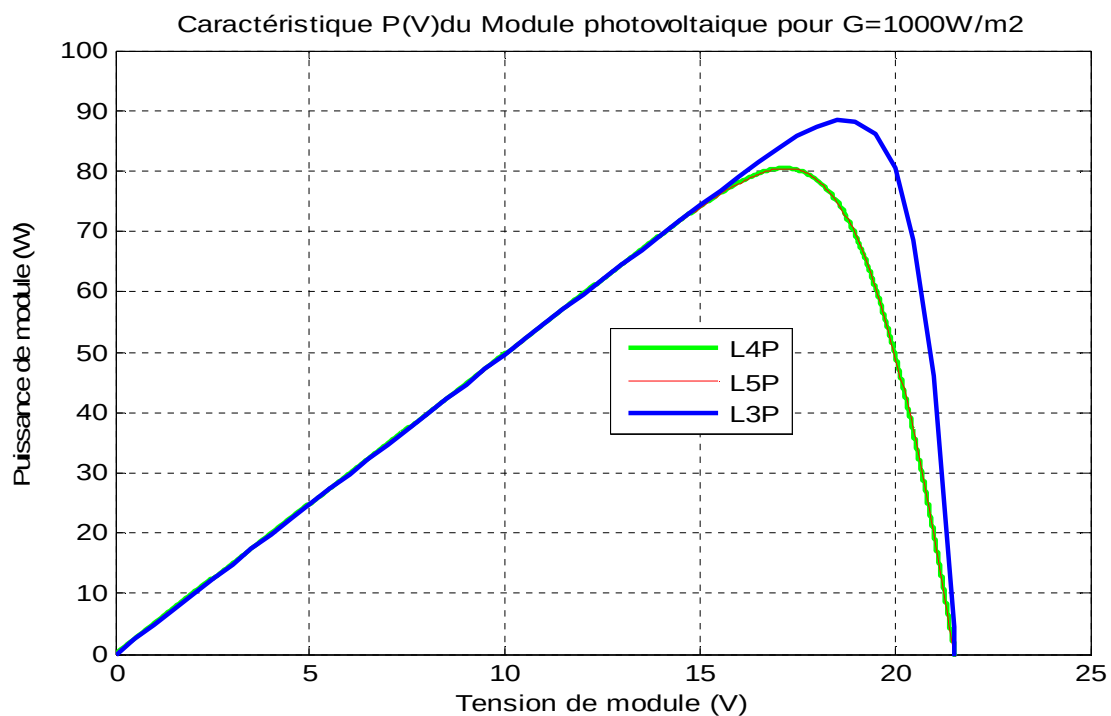


Figure IV.15. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P)

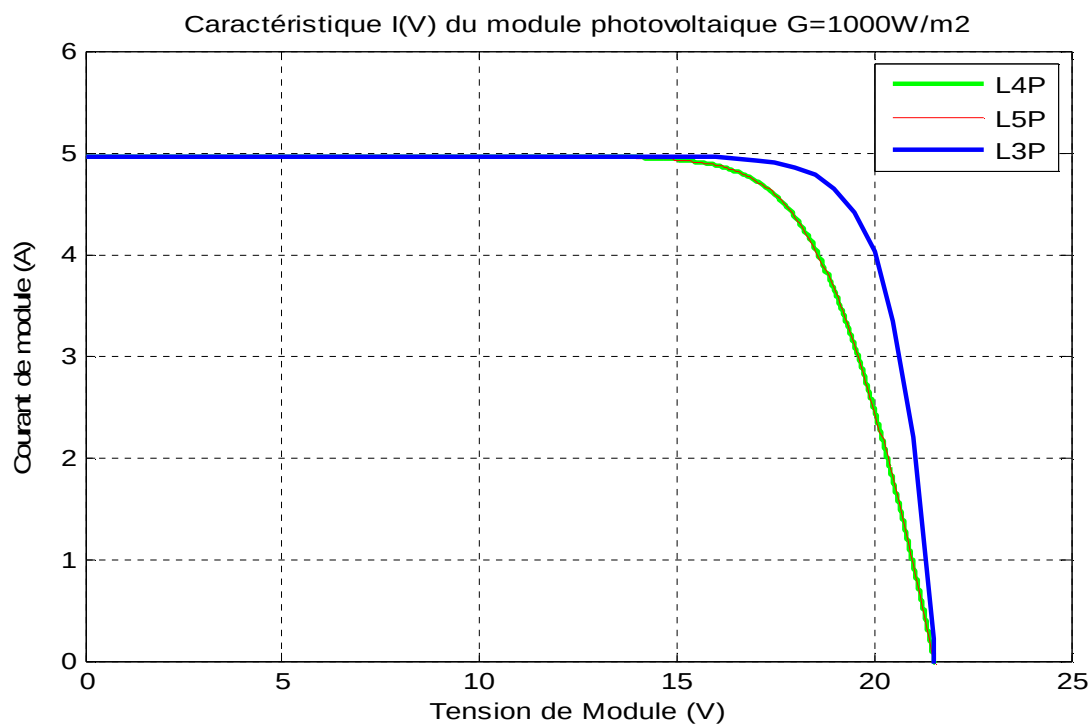


Figure IV.16. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P).

La figure (IV.13) montre une comparaison entre les caractéristiques $I(V)$ du modèle à deux diodes à 5 paramètres, 6 paramètres et 7 paramètres respectivement, pour une température de référence de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de 1000 W/m^2 . En comparant les résultats des modèles 2M7P et 2M6P, nous constatons que l'effet de la résistance parallèle est négligeable, par contre en négligeant la résistance série dans le modèle 2M5P, cela induit un éloignement par rapport au cas où cette résistance est prise en considération. Ce qui prouve l'influence de la résistance série.

Les mêmes remarques peuvent être constatées sur la figure (IV.14) représentant les courbes $P(V)$.

Les figures (IV.15), (IV.16) montrent une comparaison entre les différents modèles à une diode dans les mêmes conditions que les modèles à deux diodes. D'après les modèles L4P et L5P nous constatons que la résistance série marque la différence entre les différents modèles. Ainsi, nous remarquons dans les modèles L4P, L5P, 2M7P, 2M6P il y a un point où la puissance est maximale (80W) qui est égale à la puissance donnée par le constructeur du module.

5.2. Effet de l'éclairement

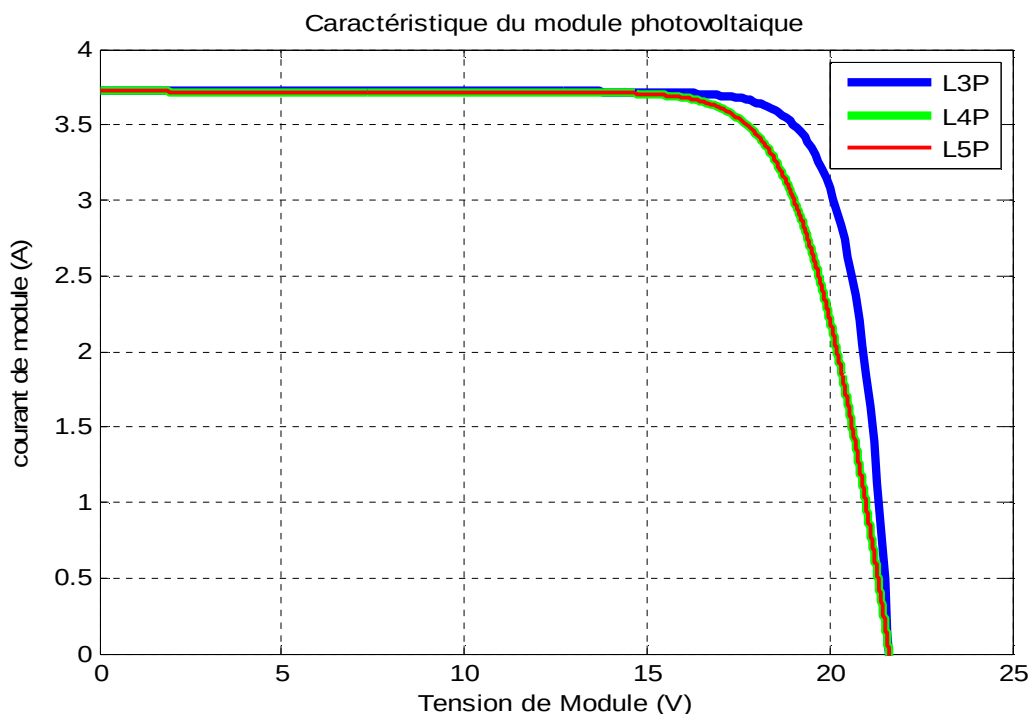


Figure IV.17. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=750\text{ W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$ (L3P, L4P et L5P).

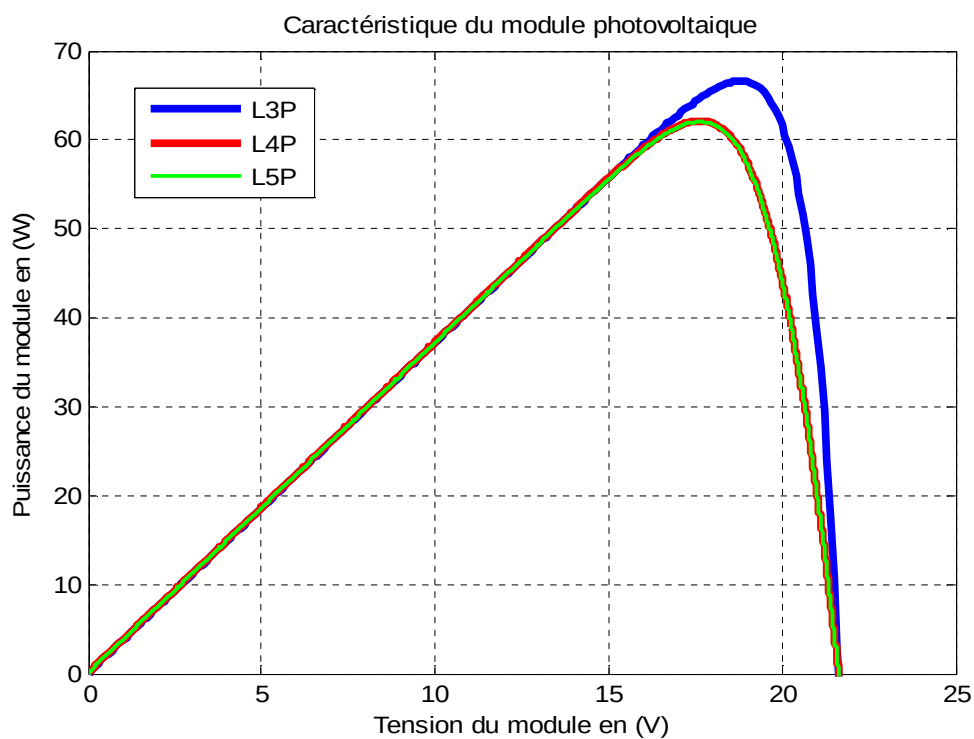


Figure IV.18. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=750\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P).

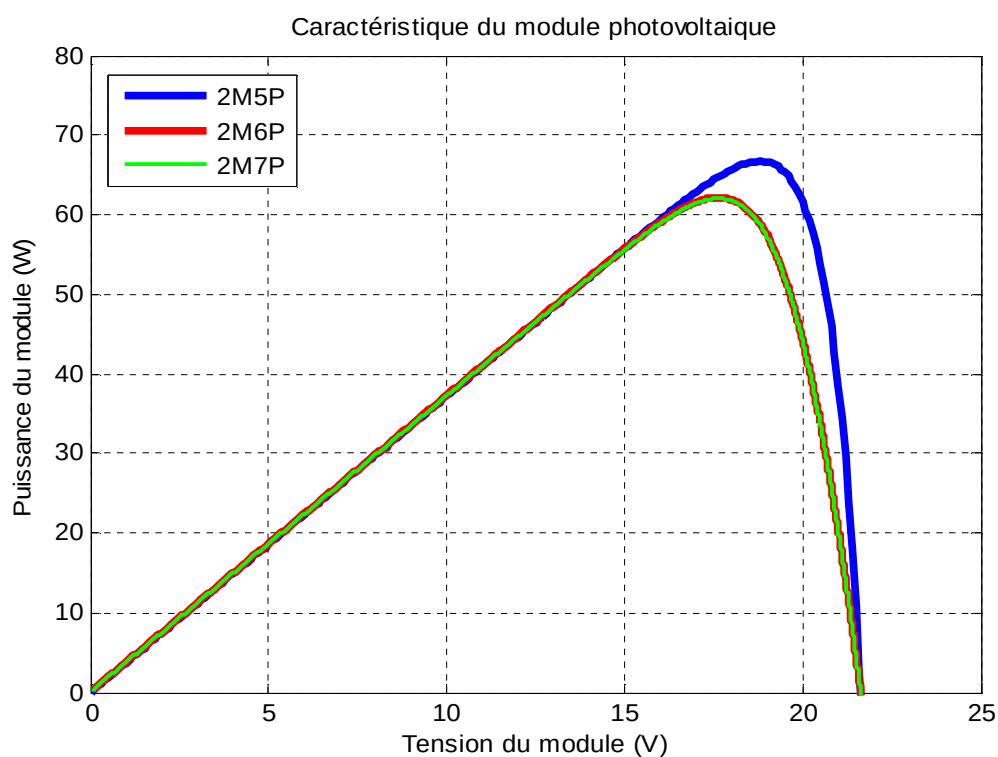


Figure IV.19. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour $G=750\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

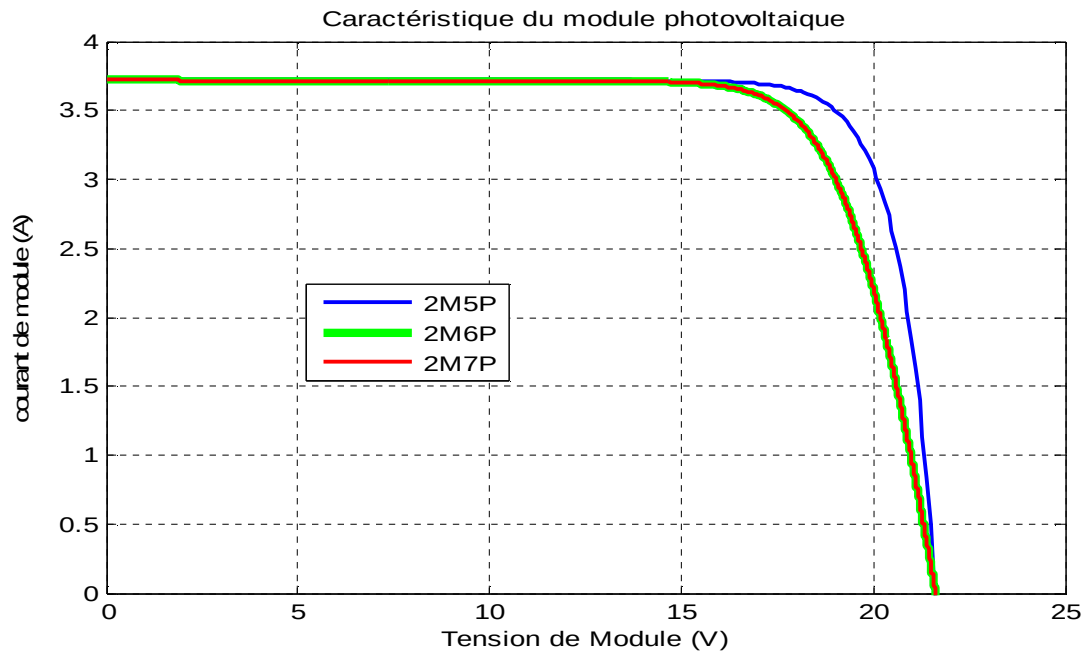


Figure IV.20. Caractéristique I-V du modèle à deux diodes pour $G=750\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

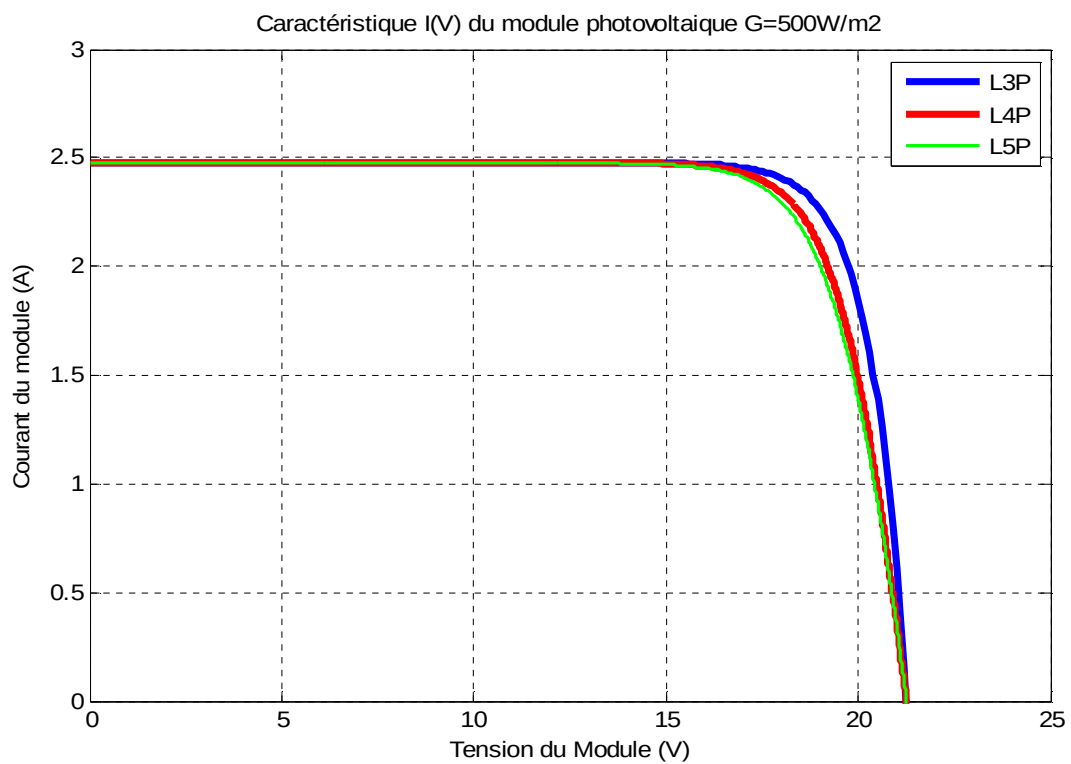


Figure IV.21. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=500\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P).

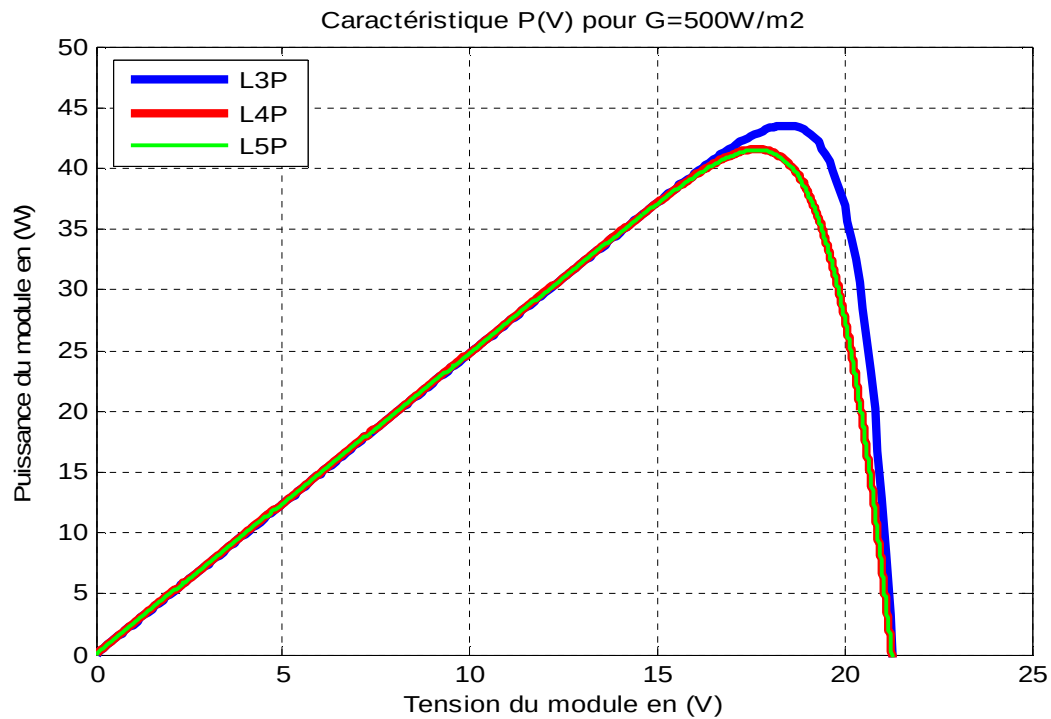


Figure IV.22. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=500\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P)

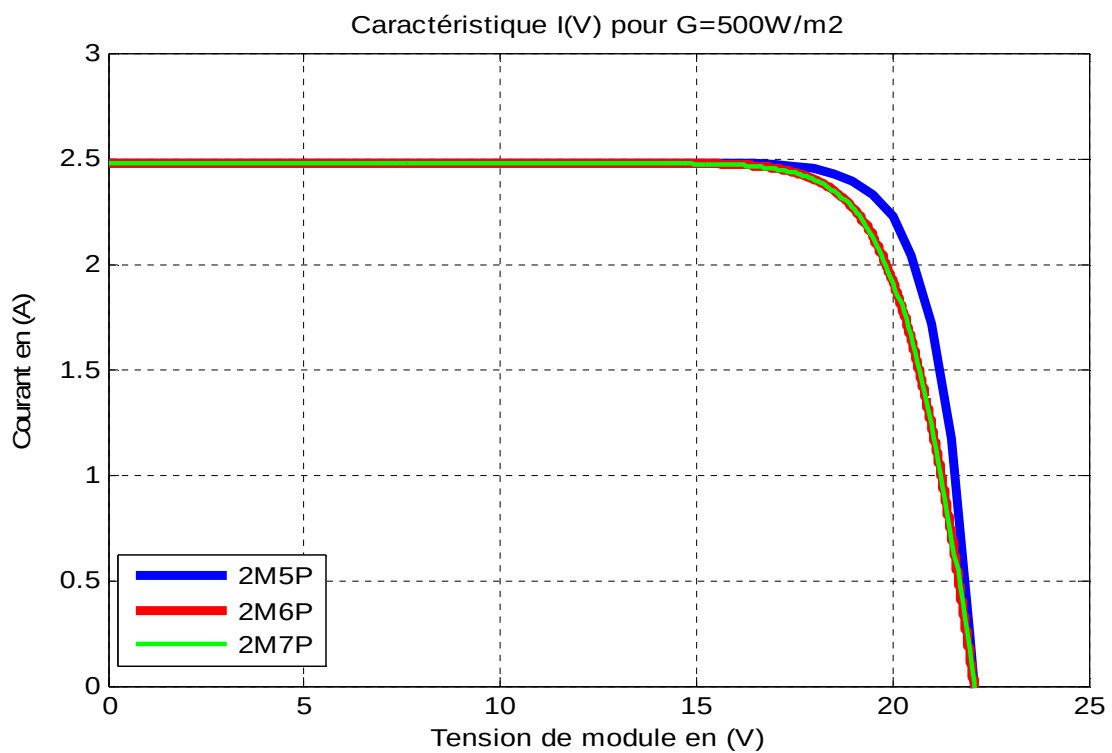


Figure IV.23. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour $G=500\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

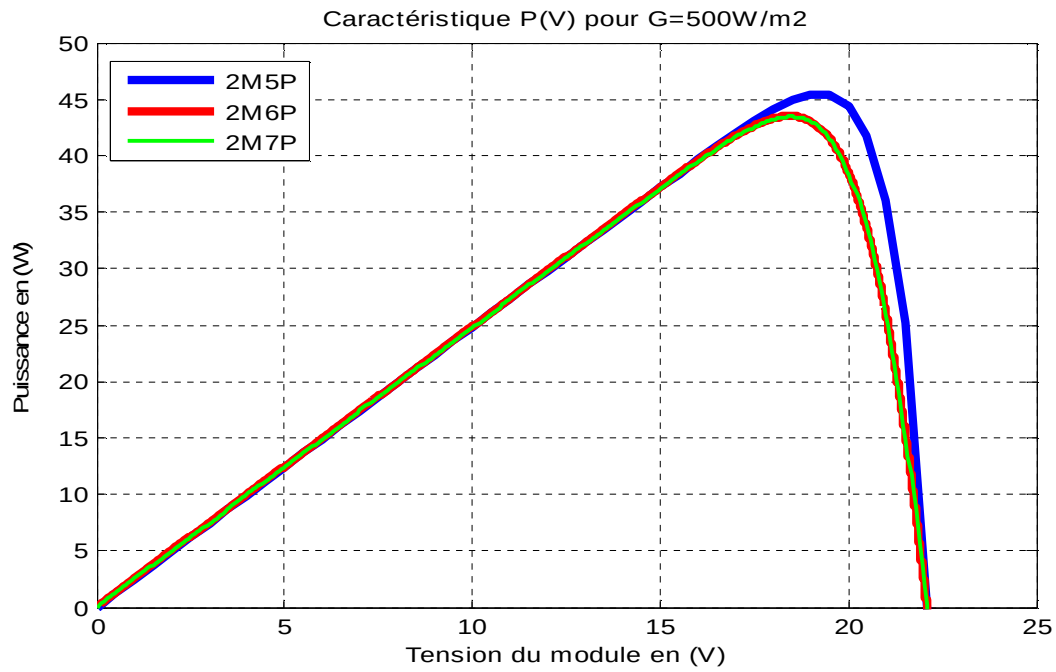


Figure IV.24. Caractéristique P-V du modèle à deux diode pour $G=500\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

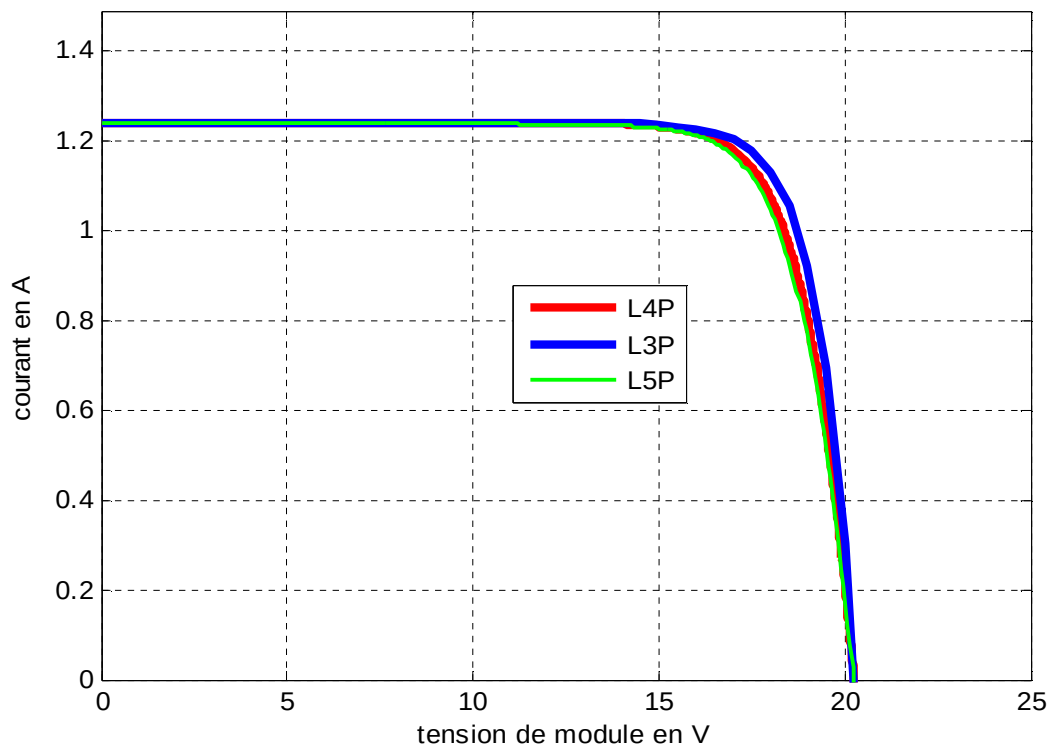


Figure IV.25. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=250\text{W/m}$ et $T=25^\circ\text{C}$. (L3P, L4P et L5P).

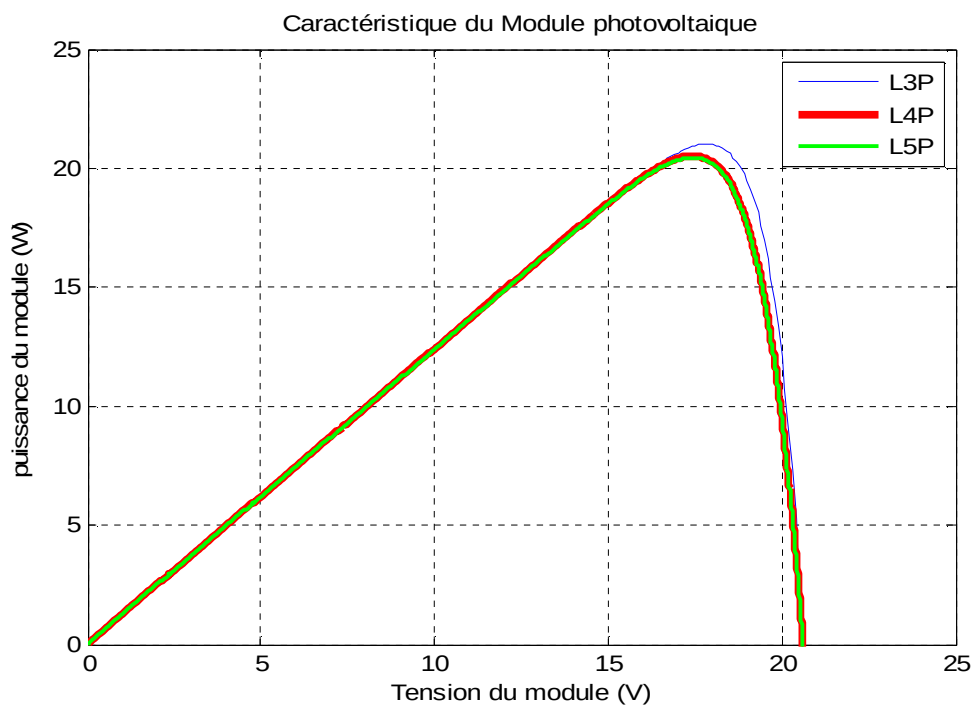


Figure IV-26 : Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (L3P, L4P et L5P).

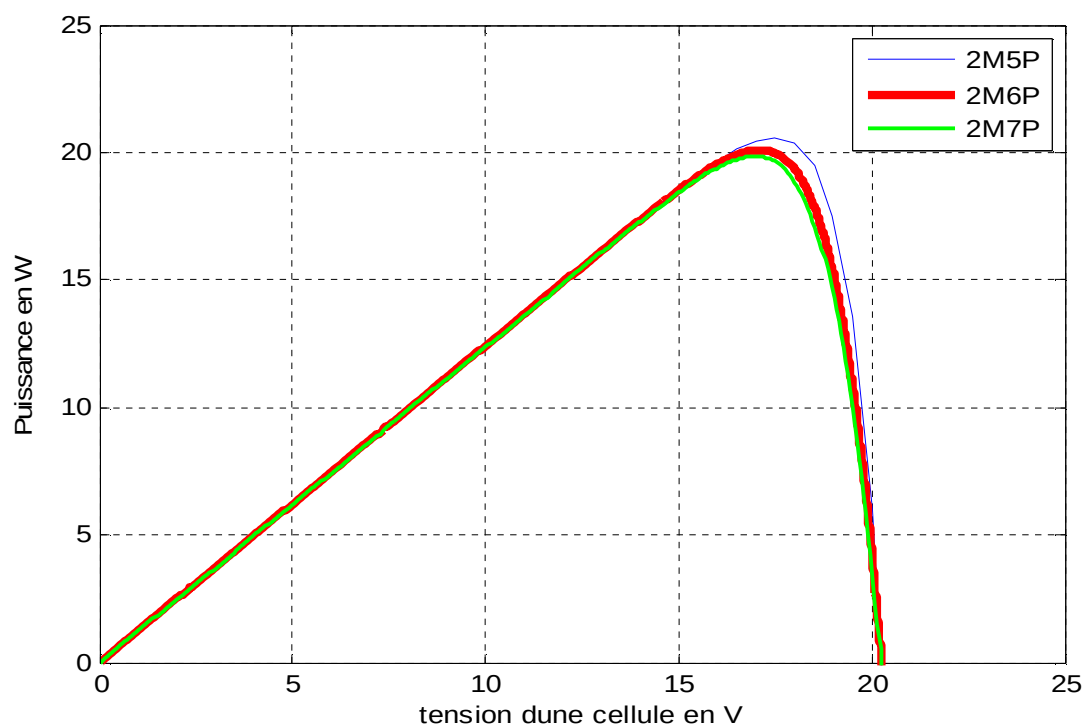


Figure IV.27. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

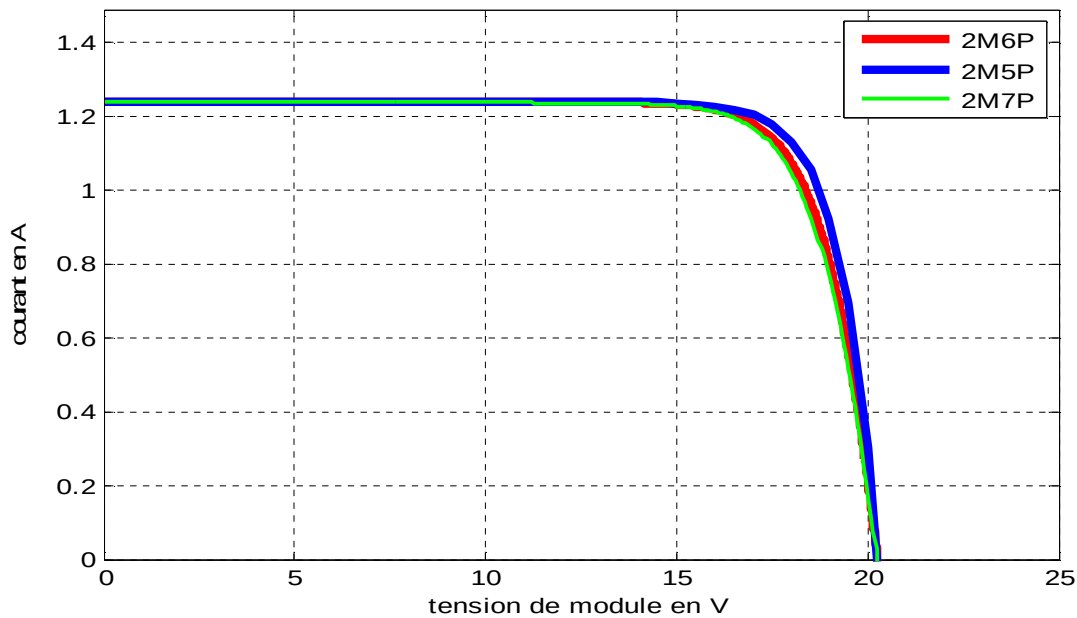


Figure IV.28. Caractéristique I-V du modèle à deux diode pour $G=250\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ (2M5P, 2M6P et 2M7P).

D'après les figures (IV.19) à (IV.28) on constate que :

- Ø l'augmentation de l'éclairement provoque une augmentation du courant de court circuit (I_{cc}) quand le générateur PV fonctionne comme un générateur de courant donc on peut dire que le courant de court-circuit (I_{cc}) est proportionnel à la variation de l'irradiation solaire.
- Ø La tension de circuit ouvert V_{co} ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.
- Ø Le point de puissance maximale diminue avec la diminution de l'éclairement.
- Ø l'influence de la résistance shunt dans les modèles (7P), (6P) sur la caractéristique $I(V)$ est uniquement présente au niveau des éclairements très bas.

D'après les résultats théoriques obtenus ainsi que leurs comparaisons il est difficile de préciser le meilleur circuit équivalent, il est donc nécessaire de valider ces résultats expérimentalement ceci est possible puisque le module photovoltaïque existe au sein de notre département.

6. Réalisation expérimentale

Afin de valider les résultats de simulation obtenus précédemment ; dans cette partie nous avons réalisé le schéma de la figure IV.29.



Figure IV. 29. Schéma réalisé au niveau du laboratoire LATAGE.

Pour relever expérimentalement les différentes valeurs du courant et de la tension du panneau photovoltaïque, il suffit de disposer des résistances variables, d'un ampèremètre et d'un voltmètre. En faisant varier la résistance totale on mesure la tension et le courant ainsi obtenu et à l'aide de ces valeurs on trace les caractéristiques du module photovoltaïque.

Avant de relever les différents points (I, V) on mesure l'éclairement avec l'appareil **SAM 20** en respectant l'angle d'inclinaison du panneau. On mesure également la température de la cellule et la température ambiante avec un thermomètre.

6.1. Validation expérimentale pour différentes valeurs de l'éclairement G et de la température T :

6.1.1. Comparaison des caractéristiques I(V) et P(V) obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour un $G=350\text{W/m}^2$, $T_c=37^\circ\text{C}$ et $T=22^\circ\text{C}$

ü Modèle à une diode

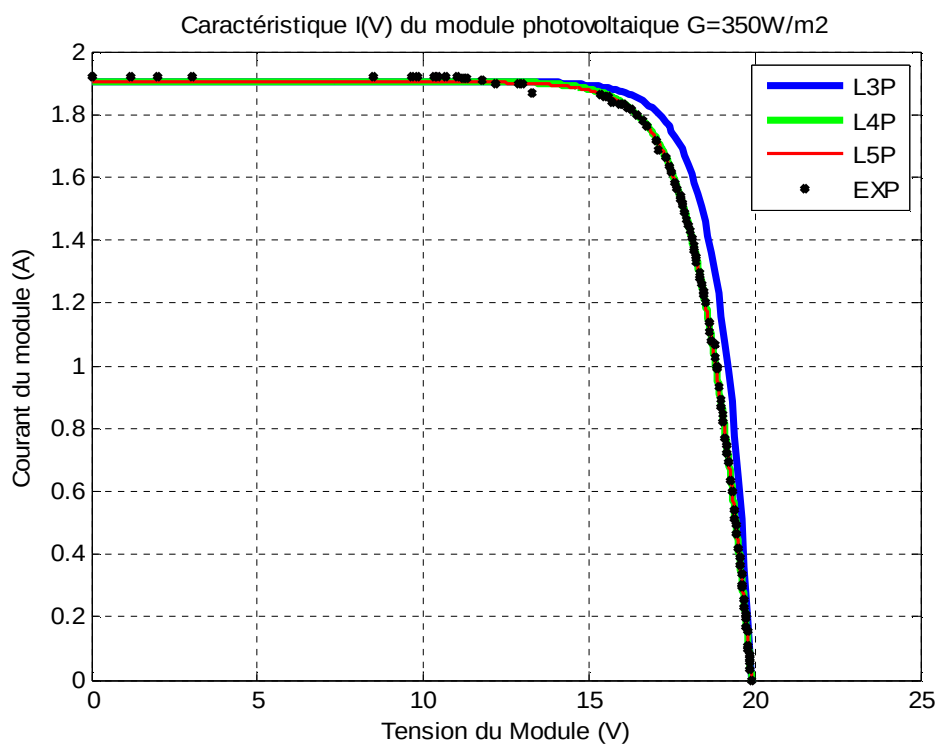


Figure IV.30. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=350\text{W/m}^2$, $T_a=22^\circ\text{C}$ et $T_c=37^\circ\text{C}$

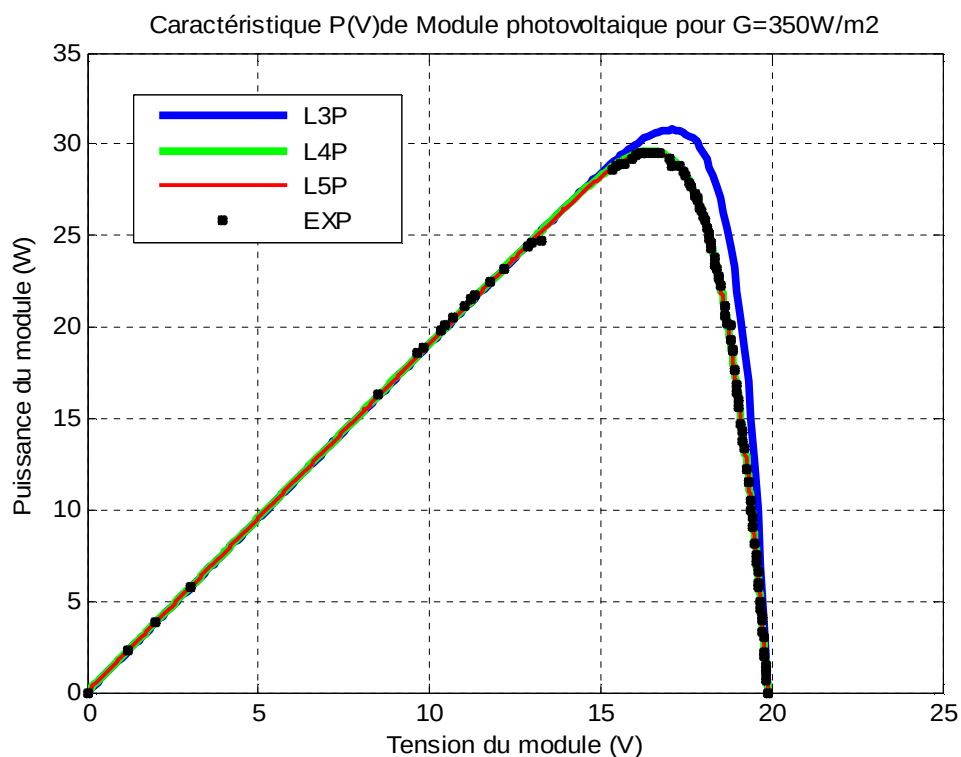


Figure IV.31. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=350\text{W/m}^2$, $T_a=22^\circ\text{C}$ et $T_c=37^\circ\text{C}$.

ü Modèle à deux diodes :

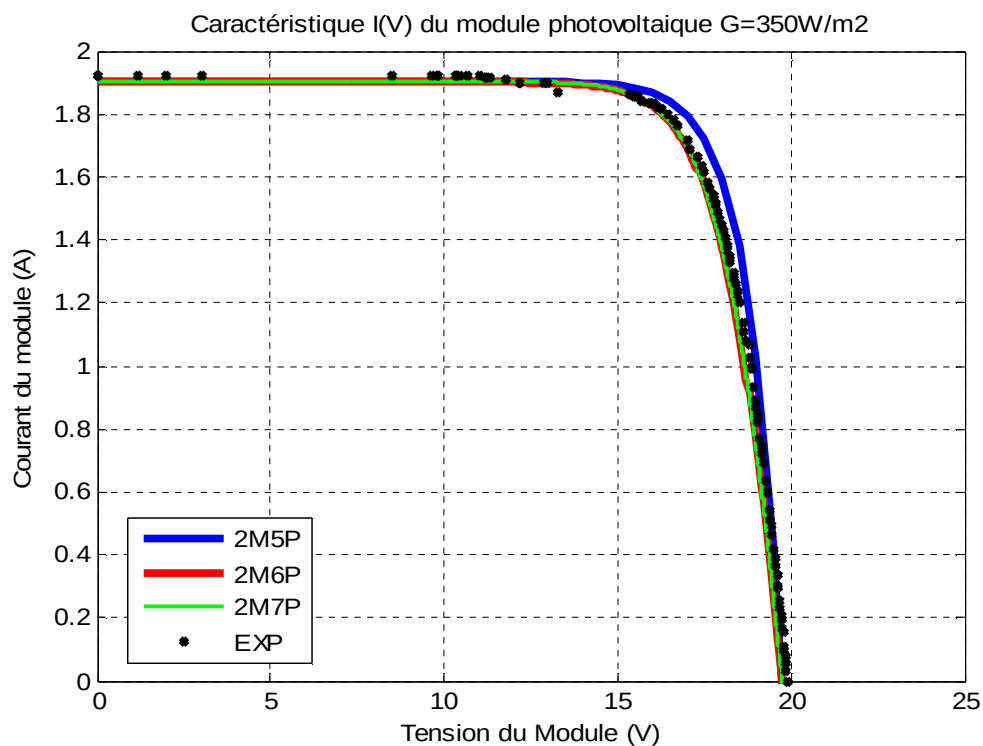


Figure IV.32. Caractéristique I-V du modèle à deux diodes pour $G=350\text{W/m}^2$ et $T_a=22^\circ\text{C}$

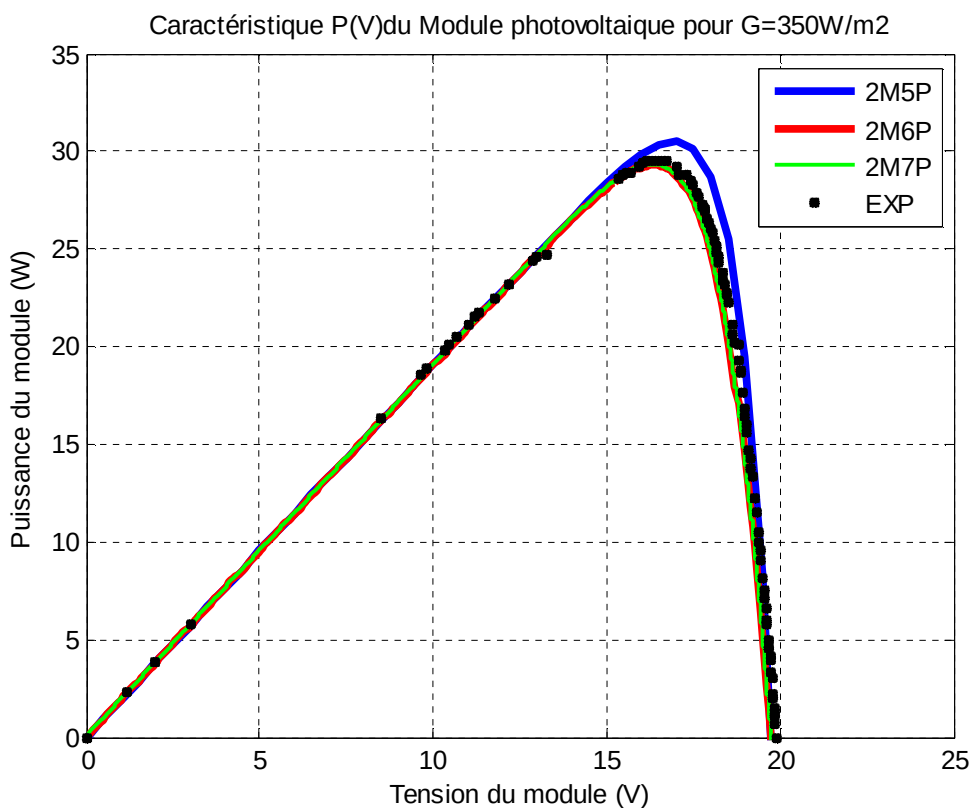


Figure IV.33. Caractéristique P-V du modèle à deux diodes pour $G=350\text{W/m}^2$ et $T_a=22^\circ\text{C}$

6.1.2. Caractéristiques I(V) et P(V) obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour un éclairement $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$

ü Modèle à une diode

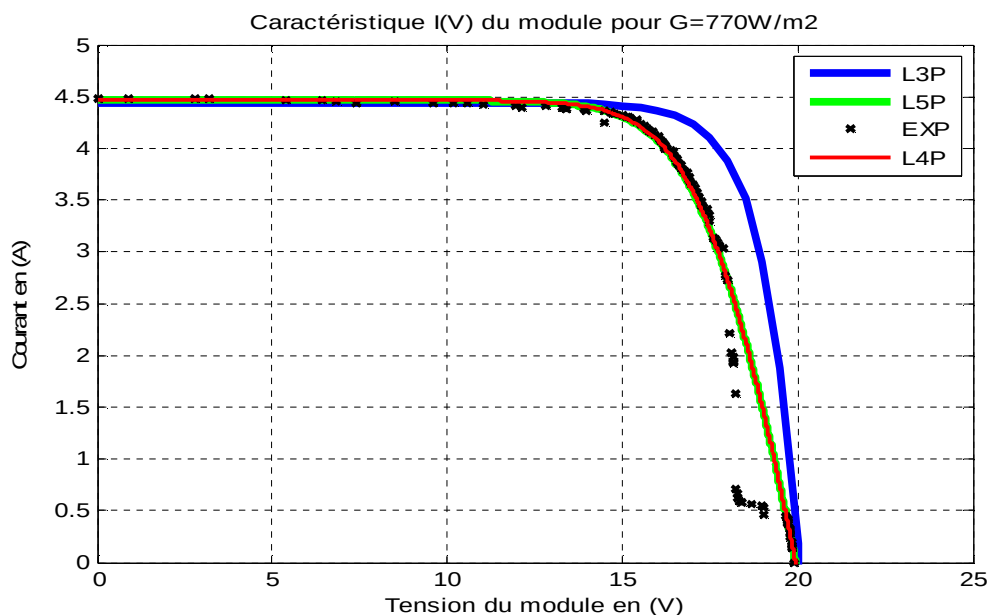


Figure IV.34. Caractéristique I-V du modèle à une diode pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$

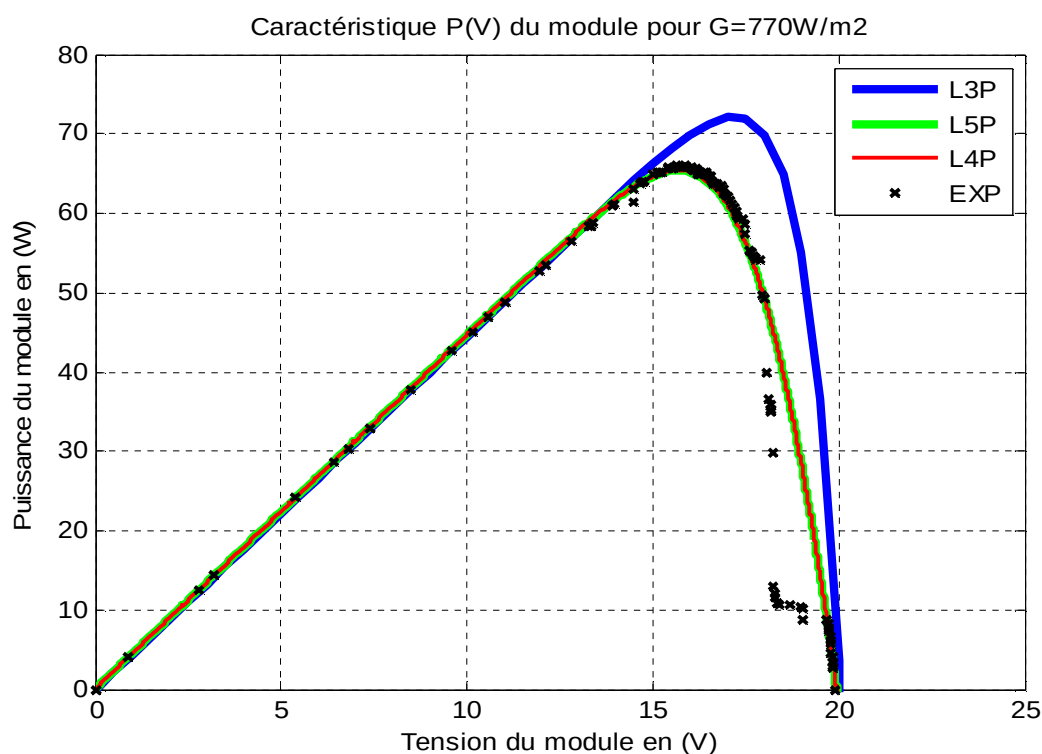


Figure IV.35. Caractéristique P-V du modèle à une diode pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$

ü Modèle à deux diodes

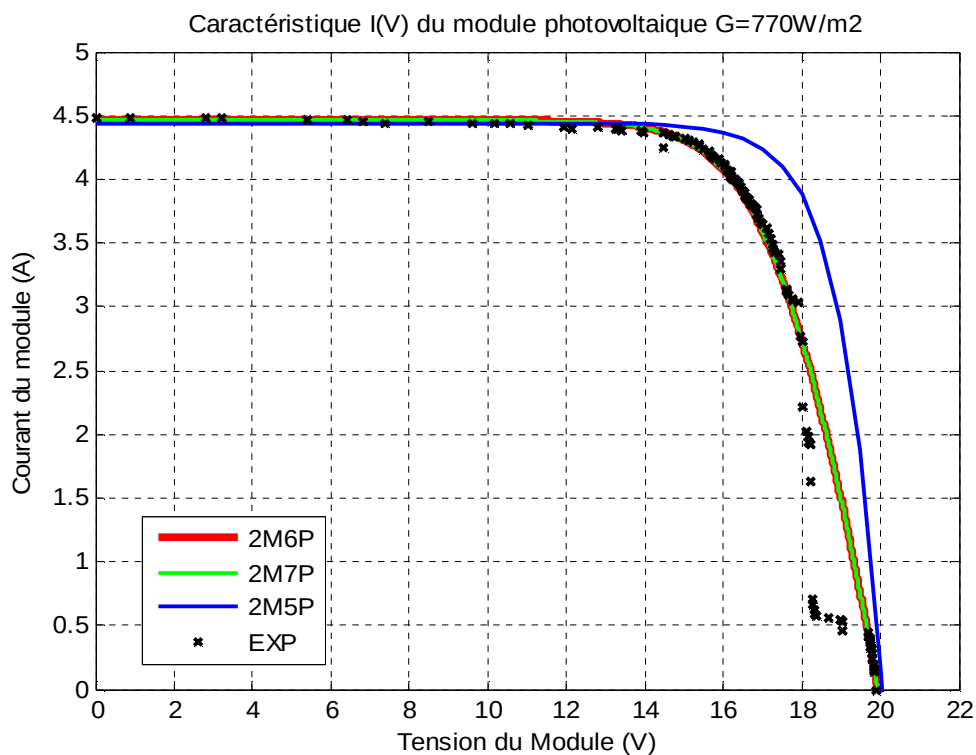


Figure IV.36. Caractéristiques I-V du modèle à deux diodes pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$

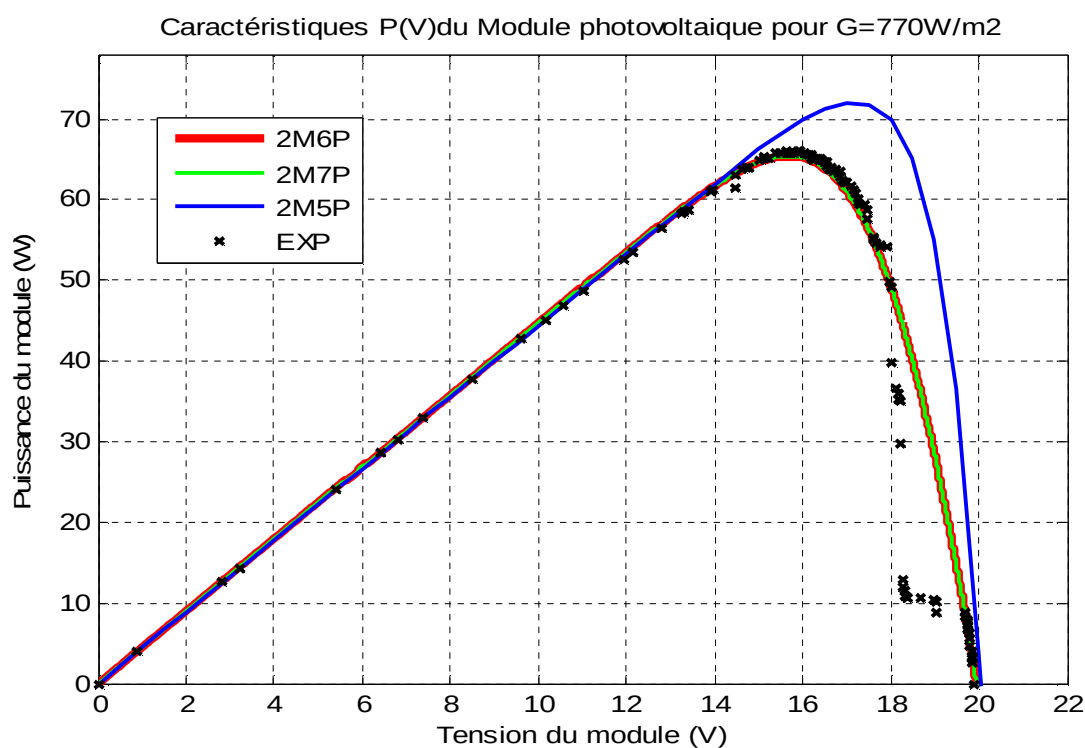


Figure IV.37. Caractéristiques P-V du modèle à deux diodes pour $G=770\text{W/m}^2$ et $T=28^\circ\text{C}$.

6.1.3 Caractéristiques I(V) et P(V) obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour un $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$ et $T_c=43^\circ\text{C}$

ü Modèle à une diode

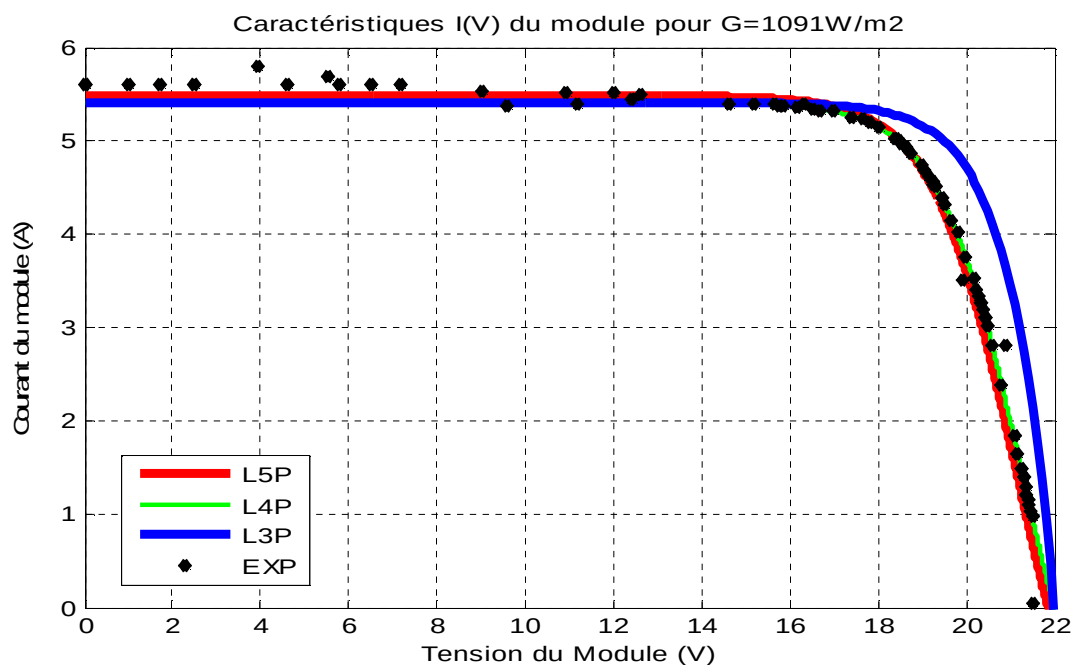


Figure IV.38. Caractéristiques I-V du modèle à une diode pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$

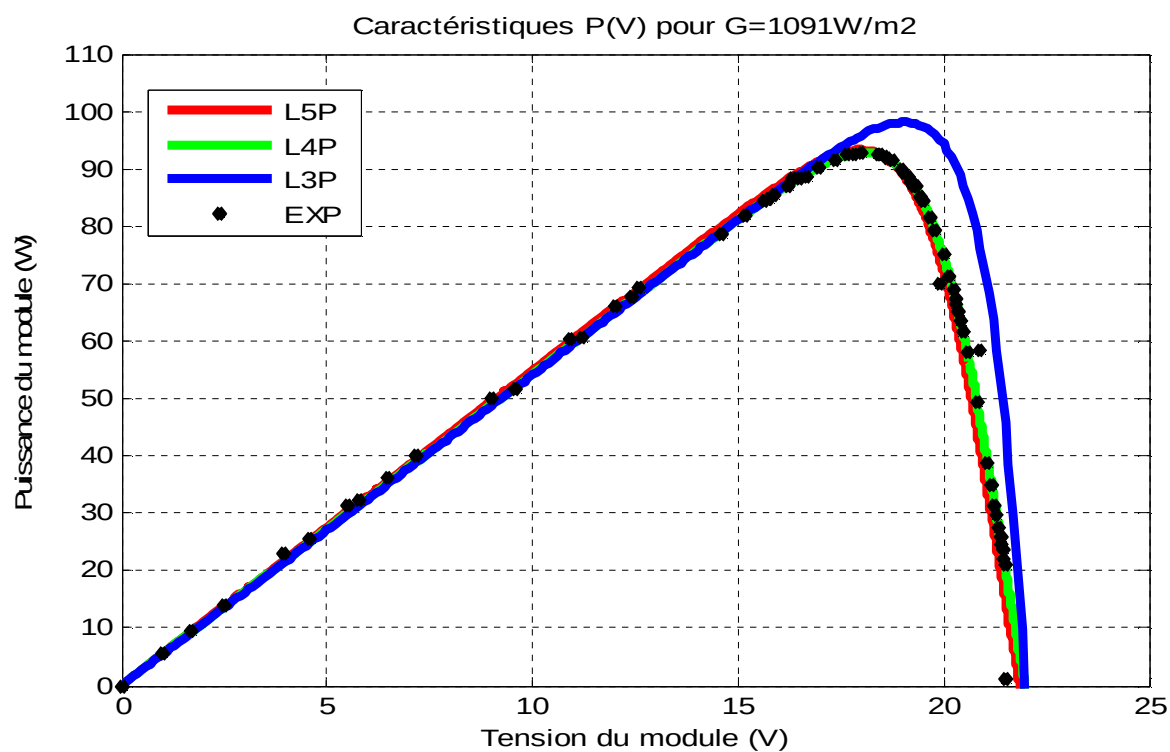


Figure IV.39. Caractéristiques P-V du modèle à une diode pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$.

ü Modèle à deux diodes

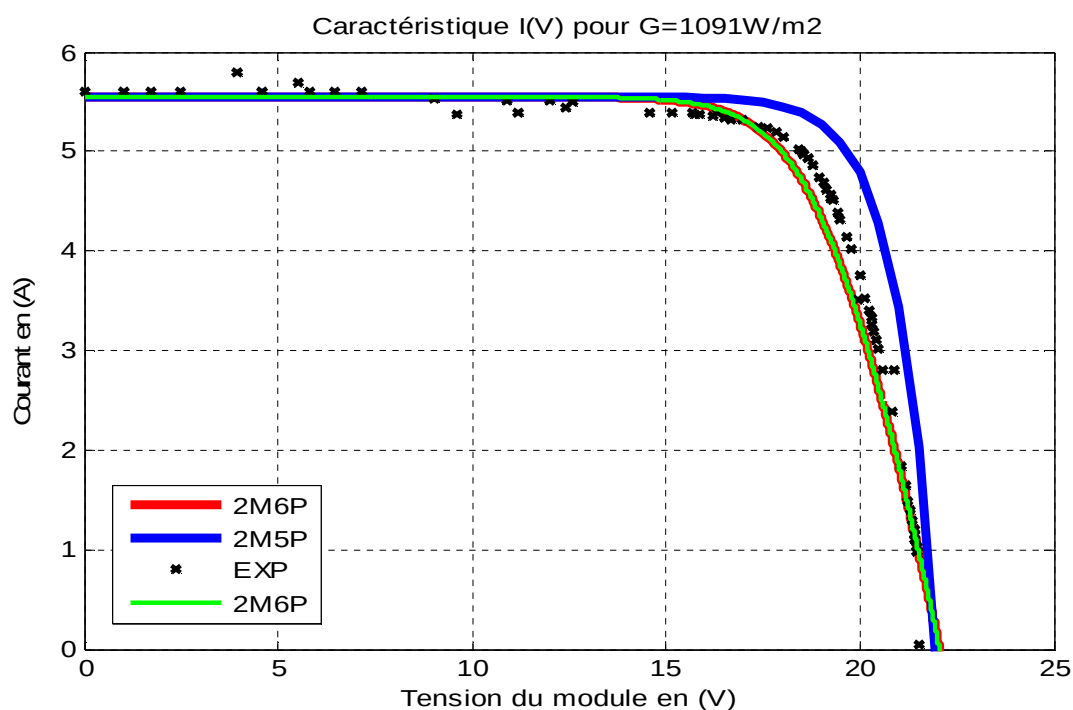


Figure IV.40. Caractéristiques I-V du modèle à deux diodes pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$

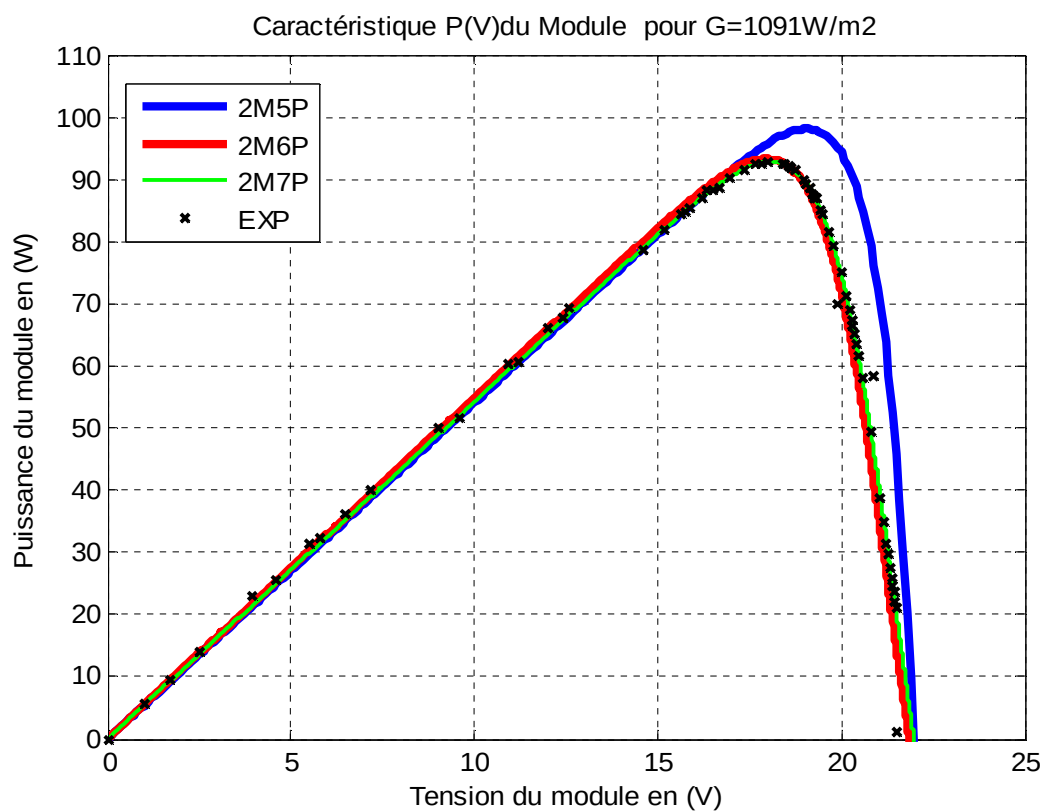


Figure IV.41. Caractéristiques P-V du modèle à deux diodes pour $G=1091\text{W/m}^2$ et $T=37^\circ\text{C}$

Les figures (IV.30) à (IV.41) présentent la comparaison entre les résultats obtenus par simulation et ceux obtenus expérimentalement pour différentes valeurs de l'éclairement ($1091,770$ et 350 W/m^2), et de la température de la cellule ainsi que de la température ambiante.

Les figures (IV.30) à (IV.33) illustrent la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux, on remarque que dans le modèle à une diode et le modèle à double diode (deux exponentielles) pour un éclairement égal à 350 W/m^2 , température de référence de 22°C et une température de la cellule de 37°C , les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module PV de type 80M-12 obtenues théoriquement avec les modèles L4P, L5P, 2M6Pet 2M7P sont proches de celles obtenues expérimentalement mais en remarque qu'il y a une petite déviation presque négligeable pour les deux derniers modèles, ceci est due aux erreurs de mesure.

On observe dans les figures (IV.34) à (IV.37) pour une température de la cellule égal à 54°C , un éclairement $G=770 \text{ W/m}^2$ et une température de référence de 28°C ; une petite différence entre les résultats théoriques et expérimentaux pour les modèles L4P, L5P, 2M6P et 2M7P dans la zone assimilable à un générateur de tension. Cette déviation est dû au passage d'un nuage, la diminution des valeurs expérimentales de tension est très rapide dans ce cas, ces valeurs reviennent à un fonctionnement normal après la disparition de ce nuage.

Par contre, dans le cas où le point de fonctionnement est dans la zone de variation de l'impédance R_s et R_{sh} les résultats expérimentaux et théoriques sont confondus surtout pour le modèle à une diode (L4P et L5P).

Dans le cas des figures (IV.38) à (IV.41) l'éclairement dépasse l'éclairement de référence (1091 W/m^2), la température de référence est de 37°C et la température de la cellule vaut 43°C .

Les résultats trouvés par les modèles L4P, L5P, 2M7P et 2M6P sont proches de ceux obtenus théoriquement, une augmentation du courant de court circuit ainsi qu'une augmentation du point de fonctionnement est observé; ceci se justifie par l'augmentation de l'éclairement. Par contre les résultats des modèles 2M7P et 2M6P montrent une déviation du point maximum. Les résultats de ces deux modèles s'éloignent des résultats théoriques.

D'après la comparaison expérimentale et théorique les modèles 4P et 6P sont ceux qui donnent des résultats plus proches de l'expérimental on peut donc dire que ces modèles sont plus précis.

7. Conclusion

Ce chapitre a porté sur l'exploitation des programmes construits sous environnement Matlab à base des modèles établis dans le chapitre précédent.

Les différents tests effectués par simulation ont été dans la mesure du possible dans les mêmes conditions que les essais expérimentaux réalisés.

Nous nous sommes basées sur la comparaison les deux caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$, obtenues par simulation d'une part et par l'expérience d'autre part tout en faisant varier certains paramètres tels que l'éclairement et la température, ceci pour essayer de trouver le modèle qui reproduit le plus fidèlement le comportement réel relevé par l'expérimentation.

Les différentes comparaisons effectuées ont montré que le modèle L4P est celui qui permet d'englober à la fois simplicité et précision.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a concerné la modélisation d'un système de production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Il s'agit de la conversion photovoltaïque.

Nous nous sommes essentiellement intéressées à déduire les caractéristiques théoriques courant-tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque à partir de deux modèles (à une diode puis à deux diodes) et à les comparer à celles qui sont issues des résultats expérimentaux relevés au laboratoire LATAGE de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.

Après un bref rappel sur l'intérêt des énergies renouvelables dans le monde et sur la transformation du rayonnement solaire grâce à un capteur PV ainsi, nous avons présenté dans un premier chapitre les bases indispensables à la compréhension du sujet en général. Nous avons également étudié les différentes technologies des cellules photovoltaïques commercialisées sur le marché, leurs caractéristiques ainsi que leurs associations série/parallèle pour finir avec les avantages et les inconvénients des énergies PV.

Dans le deuxième chapitre, une attention particulière a été portée sur les différents types de systèmes photovoltaïques existants (autonome et non autonome) et à l'ensemble des éléments les constituant; à savoir : les panneaux PV, le système de conversion (DC/DC) et (DC/AC) et la batterie.

Nous avons représenté une cellule photovoltaïque par son circuit électrique équivalent à une ou à deux diodes. Les modèles résultants font appel à un certain nombre de paramètres comme les résistances série et parallèle, le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et le facteur de forme ou d'idéalité, ...etc. Ces modèles associés à leurs paramètres aboutissent à des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ non linéaires. Les équations non linéaires représentant ces caractéristiques peuvent être linéarisées moyennant l'utilisation de la méthode de Newton Raphson.

Les différents paramètres des modèles sont déduits des données fournies par les constructeurs de panneaux solaires.

Une comparaison entre les résultats des modèles à une et à deux diodes avec plusieurs mesures expérimentales sur le module 80-M-12 a montré que le modèle L4P est celui qui allie à la fois la simplicité et la précision. En effet il fait appel à relativement moins de paramètres (1 diode et une résistance série) et aboutit à des résultats suffisamment précis malgré sa simplicité.

Références bibliographiques

- [1] Anne Labouret, Michel Villos : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006.
- [2] Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010.
- [3] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingéniorat, UMMTO, 2012.
- [4] « Archive des données d'Irradiation et de Température », Service météorologie de la radio de Tizi-Ouzou.
- [5] R.Boudries-khallaf et A.khellaf :« Estimation de la production d'hydrogène solaire au sud », Revue des Energies Renouvelable : ICPWE, 2003, PP 73-77.
- [6] Vanessa Terrazonni-Daudrise : « Cellule solaire en couches minces de silicium amorphe », thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, 2004.
- [7] Stéphane Vighetti : « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : choix et dimensionnement des étages de conversion », thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [8] « Revue des énergies renouvelables » CER, 07, OUJDA, 2007, PP131-136.
- [9] Hellali Kamelia : « Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [10] Than-Xun Lan : « Réseau et réseau interpénétrés carbazole/pérylène à hétérojonction », thèse de Doctorat, Université de Cergy-pontoise, 2008.
- [11] Driga Meekhun : « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans autonome pour l'application aéronautique », thèse de Doctorat, Université de Toulouse.

- [12] Stephan-Astier : « Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule », Technique de l'Ingénieur ,2008.
- [13] Mathieu Urien : « Cellules photovoltaïques organiques à base de copolymères à blocs de type rigide-flexible », thèse de Doctorat, Université Bordeaux, 2008.
- [14] Wassim Hojeij : « Réalisation et caractéristiques de cellules photovoltaïque organiques », thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [15] Madjid Zandi : « Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique », thèse de Doctorat de L'INPL, Nancy, 2010.
- [16] Mohamed Arouf : « Optimisation de l'ensemble onduleur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [17] José Miguel Navarro : « Cellules photovoltaïque organiques transparentes dans le visible », thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- [18] Dang Minh Trung : « Elaboration des cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, études des systèmes réticulables », thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2009.
- [19] Abbassen Lyes : « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, UMMTO, 2011.
- [20] Petibon Stephane : « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de Doctorat, 2009.
- [21] Belhadj Mohammed :« Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de Magister, Université de Bechar, 2007/2008.
- [22] M.F. Yaden, M. El Ouariachi, T. Mrabti, Ka. Kassmi, B. Tidhaf, E. Chadli et K. Kassmi :« Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'une commande

MPPT numérique », Article de la Faculté des Sciences, Laboratoire LEPAS, Oujda, Maroc 2011.

[23] Nakoul Zakia : « Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV (Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah) », mémoire de Magister, Université de Tlemcen 2010.

[24] Makhlouf Messaoud : « Modélisation et optimisation de systèmes de production d'énergies renouvelables couplés au réseau », thèse de Doctorat, Université de Constantine 2012.

[25] M. Djouadi Yacine et Belouni Kamel : « Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque (Application à la bibliothèque centrale de L'UMMTO) », 2009/2010.

[26] Otmane Benseddik, Fathi Djaloud : « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », thèse de Magister, Université de Ouargla, 2011/2012.

[27] Khettache Laid : « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique », thèse de Magister, Université de Batna ,2007.

[28] Bendjellouli Zakaria : « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » ,mémoire de Magister, Université de Bechar,2009.