

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Option : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par
Lynda DEBIT

Thème

**Modélisation et commande pour la poursuite du point
de puissance maximale d'un système photovoltaïque
en tenant compte de la variation de la température**

Mémoire soutenu publiquement le 04/07/2018 devant le jury composé de :

Mr Salah HADDAD

Professeur, UMMTO, Président

Mr Rachid MANSOURI

Professeur, UMMTO, Encadreur

Mr Madjid SI BRAHIM

Maître de conférence (B), UMMTO, Examineur

Mme Malika IMADOUCHE

Maître de conférence (B), UMMTO, Examineur

Remerciements

Je tiens à adresser tout particulièrement mes remerciements à mon directeur de recherches Mr Rachid MANSOURI, Professeur au département d'électrotechnique à l'UMMTO qui m'a offert la possibilité de réaliser ce mémoire sous sa direction et dans les meilleures conditions possibles.

Je remercie également aussi les membres de jury qui ont accepté d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement Agnès et Rafik pour m'avoir soutenu et conseillé et pour avoir été là pour moi dans toutes les circonstances.

J'aimerais aussi remercier mes chers amis Sofiane, Idir, Karim, Lounis, Sylia, Fazia, Tinhinane, Rachid, Sonia et pour tous ceux que je n'ai pas cités je remercie l'ensemble des étudiants de ma promotion 2017/2018.

J'adresse un grand merci à ma famille en particulier mes parents, ainsi que mes sœurs et mon frère.

Dédicaces

À tous ceux qui me sont chers.

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Production d'électricité photovoltaïque- Etat de l'art

I.1. Introduction	4
I.2. Des énergies fossiles aux énergies renouvelables dans le monde	4
I.3. Le photovoltaïque en Algérie	7
I.4. Etat de l'art des travaux réalisés par les étudiants de l'UMMTO	8

Chapitre II : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction.....	13
II.2. Différentes technologies solaires	13
II.2.1. Energie solaire thermique	13
II.2.1.1. Le solaire thermique en Algérie.....	14
II.2.2. Energie solaire thermodynamique	15
II.2.2.1. Centrales à capteurs cylindro-paraboliques	15
II.2.2.2. Centrales à tour	16
II.2.2.3. Centrale à capteurs paraboliques.....	18
II.2.3. Solaire photovoltaïque	19
II.3. Notions sur le photovoltaïque	19
II.3.1. Cellule photovoltaïque.....	19
II.3.2. Effet photovoltaïque	20
II.3.3. Générateur photovoltaïque	20
II.3.3.1. Association série	21
II.3.3.2. Association parallèle	21
II.3.3.3. Association série-parallèle	22
II.3.4. Caractéristique électrique	23
II.3.5. Paramètres photovoltaïques	24
II.3.6. Protection d'un générateur photovoltaïque.....	25
II.3.7. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	25
II.3.7.1. Avantages	26
II.3.7.2. Inconvénients	26
II.3.8. Applications du photovoltaïques	26
II.3.9. Conclusion	26

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

III.1.	Introduction	28
III.2.	Circuits électriques équivalents d'une cellule photovoltaïque	28
III.2.1.	Cas d'une cellule idéale	28
III.2.2.	Cas d'une cellule réelle	29
III.2.2.1.	Modèle à une seule diode	29
III.2.2.2.	Modèle à deux diodes	30
III.3.	Simulation d'une cellule photovoltaïque	31
III.3.1.	Résultats de simulations	33
III.3.1.1.	Caractéristique courant-tension	33
III.3.1.2.	Caractéristique puissance-tension	34
III.4.	Simulation d'un générateur	35
III.5.	Influence de la température	37
III.6.	Influence de l'éclairement	39
III.7.	Conclusion	41

Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

IV.1.	Introduction	42
IV.2.	Principe de la recherche du point de puissance maximale (PPM)	42
IV.3.	Types de commande MPPT	43
IV.3.1.	Principe de la méthode Hill Climbing	43
IV.3.2.	Principe de la méthode 'Perturb and Observe'	44
IV.3.3.	Principe de la méthode d'incrément de la conductance	45
IV.4.	Simulation de la recherche du PPM	48
IV.4.1.	Algorithme (P&O)	48
IV.4.2.	Effet de l'ensoleillement sur la puissance du générateur	50
IV.4.3.	Influence de la température sur la puissance du générateur	54
IV.5.	Conclusion	56

Chapitre V : Effet de la température sur les performances du PV

V.1.	Introduction	57
V.2.	Méthode de réalisation du modèle	57
V.3.	Configuration du module PV	58
V.4.	Mécanisme de transfert de chaleur	59
V.4.1.	Conduction de chaleur	60
V.4.2.	Convection thermique	60
V.4.3.	Rayonnement thermique	60

V.5.3.1. Rayonnement de chaleur à longue longueur d'onde	61
V.5.3.2. Rayonnement de chaleur à courte longueur d'onde	61
V.5. Méthode de la capacité localisée	61
V.6. Equivalence entre le modèle thermique et le circuit équivalent de courant.....	61
V.7. Analyse du mécanisme de transfert de chaleur	62
V.8. Mis en œuvre du modèle thermique	63
V.8.1. La température de la couche du verre supérieure (T_+)	63
V.8.2. Température de la couche de verre (T_{fg})	64
V.9.3. La température de la couche de la cellule solaire (T_{PV})	65
V.9.4. Température de la couche TPT (T_t).....	66
V.10. Configuration réelle du PV	67
V.11. Comparaison des résultats	68
V.12. Les résultats de simulation en quatre saisons	68
V.13. Innovation de la modélisation dynamique	69
V.14. Conception appropriée de la feuille de fond pour le module PV	69
V.15. Discussion des résultats.....	71
V.16. Conclusion.....	71
Conclusion générale	73

Liste des figures

Figure I.1 : Évolution de la consommation mondiale en énergie primaire de 1988 à 2013.....	4
Figure I.2 : Perspective de l'IEA quant aux investissements à venir pour les différentes énergies renouvelables concernant les États-Unis (a), l'Union Européenne (b) et la Chine (c).	5
Figure I.3 : Evolution de la capacité PV globale cumulée, installée dans le monde, entre 2000 et 2013.	6
Figure II.1 : Collecteur cylindro-parabolique.....	16
Figure II.2 : Centrale à tour en Espagne.....	16
Figure II.3 : Tour solaire à effet de cheminée.	17
Figure II.4 : Centrale parabolique avec moteur Stirling.....	18
Figure II.5 : Structure interne d'une cellule photovoltaïque.	19
Figure II.6 : Caractéristique I(V) résultante d'un groupement série.	21
Figure II.7 : Caractéristique P(V) résultante du groupement parallèle.	21
Figure II.8 : Groupement de plusieurs cellules en série-parallèle [24].	22
Figure II.9 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV constitué de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle.	22
Figure II.10 : caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure II.11 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure II.12 : Architecture d'un module photovoltaïque avec les deux diodes de protection.	25
Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	28
Figure III.2 : Modèle électrique équivalent à une seule diode d'une cellule photovoltaïque. .	30
Figure III.3 : Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.	31
Figure III.4 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque.	33
Figure III.5 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	34
Figure III.6 : Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	35
Figure III.7 : Schéma de simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink..	36
Figure III.8 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV de 36 cellules en série.....	36
Figure III.9 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV de 36 cellules en série.....	37
Figure III.10 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV pour différentes températures.....	37
Figure III.11 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV pour différentes températures.....	38

Figure III.12 : Variation de la puissance en fonction du temps en tenant compte de la variation de la température.	38
Figure III.13 : Effet de la température sur la puissance du panneau PV.	39
Figure III.14 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV pour différents éclairagements.	39
Figure III.15 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV pour différents éclairagements.	40
Figure III.16: Variation de la puissance en fonction du temps en tenant compte de la variation de l'ensoleillement.	40
Figure III.17 : Effet de l'ensoleillement sur la puissance du panneau.	41
Figure IV.1 : Schématisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec un convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.	42
Figure IV.2 : Relation entre la puissance et le rapport cyclique.	43
Figure IV.3 : Organigramme de la méthode Hill Climbing	44
Figure IV.4 : Organigramme de la méthode (P&O).	45
Figure IV.5 : Organigramme de la méthode Incrémentation de la conductance.	47
Figure IV.6 : Implémentation de la méthode (P&O) sous Matlab/Simulink.	48
Figure IV.7 : Connection de l'ensemble générateur et MPPT sous Matlab/Simulink.	49
Figure IV.8 : Evolution de la puissance du GPV en fonction du temps pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$	49
Figure IV.9 : Variation de l'ensoleillement en fonction du temps.	50
Figure IV.10 : La caractéristique P(V) en utilisant la commande MPPT.	51
Figure IV.11 : Variation de l'éclairement sous forme d'une sinusoïdal.	51
Figure IV.12 : Evolution de la caractéristique P(t) pour un éclairement variable.	51
Figure IV.13 : Variation de l'éclairement sous forme de dents de scie.	52
Figure IV.14 : L'évolution de la caractéristique P(t) en fonction l'éclairement.	52
Figure IV.15 : Variation de l'ensoleillement.	53
Figure IV.16 : Modèle d'une variation de l'ensoleillement pendant une journée.	54
Figure IV.17: Evolution de la caractéristique P(t) pour un éclairement variable.	54
Figure IV.18 : Variation de la température en fonction du temps.	55
Figure IV.19 : Evolution de la puissance en fonction du temps en tenant compte de la variation de la température.	56
Figure V.1 : Structure d'un système PV.	58
Figure V.2 : Mécanisme de transfert de chaleur du PV.	62

Figure V.3 : Schéma du modèle thermique du PV	63
Figure V.4 : Schéma de modèle thermique du verre supérieur.....	64
Figure V.5 : Circuit électrique équivalent du modèle du verre supérieur.....	64
Figure V.6 : Schéma de modèle thermique du verre.....	65
Figure V.7 : Circuit électrique équivalent du modèle du verre.....	65
Figure V.8 : Schéma de modèle thermique de la cellule solaire.....	66
Figure V.9 : Circuit électrique équivalent du modèle de la cellule solaire.....	66
Figure V.10 : Schéma de modèle thermique de la couche TPT.....	67
Figure V.11 : Circuit électrique équivalent du modèle de la couche TPT.....	67
Figure V.12 : Variations des facteurs environnementaux.....	68
Figure V.13 : Température du modèle dynamique obtenue après l'introduction de la variation des facteurs environnementaux.....	69

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Paramètres de la cellule photovoltaïque.....	33
Tableau IV.1 : Puissance maximale avant et après l'introduction du MPPT pour un ensoleillement variable sous forme sinusoïdale.....	52
Tableau IV.2 : Puissance maximale avant et après l'introduction du MPPT pour un ensoleillement variable sous forme de dents de scie.....	53
Tableau IV.3 : Variation de la puissance maximale en tenant compte de la variation de la température.....	56
Tableau V.1 : Equivalence entre le système thermique et électrique.....	62
Tableau V.2 : Spécifications détaillées du module PV.....	67
Tableau V.3 : Températures obtenues en utilisant le verre.....	71
Tableau V.4 : Amélioration des performances du module PV.....	71

Nomenclatures

P :	Puissance produite par le panneau
GPV :	Générateur photovoltaïque
PPM :	Point de Puissance maximale
MPPT :	Maximum Power Point Tracking
P&O :	Perturb and Observe
Inc.Cond. :	Increment of Conductance
H.C :	Hill Climbing
V_{oc} :	Tension du circuit ouvert
I_{sc} :	Courant de court-circuit
I_{scn} :	courant de court-circuit nominal
I_D :	Courant traversant la diode
T :	Température
T_{ref} :	Température de référence
E :	Ensoleillement
E_0 :	Ensoleillement de référence
D :	Rapport cyclique
V_{PV} :	Tension délivrée par le panneau
I_{PV} :	Courant délivré par le panneau
I_0 :	Courant de saturation inverse de la diode
I_p :	Courant traversant la résistance shunt
Q :	Charge d'électron
V_D :	Tension de la diode
K :	Constante de Boltzmann
R_s :	Résistance série
R_{sh} :	Résistance shunt
E_g :	Energie de gap
FF :	Facteur de forme
η :	Rendement de la cellule
θ :	Résistance thermique
α :	Coefficient de température de la cellule
a :	Facteur d'idéalité de la diode
V_T :	Potentiel thermique

N_s :	Nombre de cellules en série
N_p :	Nombre de cellules en parallèle
K_i :	Coefficient de température du court-circuit
K_v :	Coefficient de température du circuit ouvert
G :	Conductance
V_{opt} :	Tension optimale du PV
V_r :	Tension de référence
η_e :	Efficacité énergétique
V_m :	Tension au point de puissance maximale
I_m :	Courant au point de puissance maximale
A :	Surface du panneau
η_{STC} :	Efficacité énergétique mesurée selon le STC
T_{PV} :	Température de la cellule PV
P_{STC} :	Puissance électrique de sortie sous STC
Q :	Flux de chaleur
ΔT :	Variation de la température
k :	Coefficient de conductivité thermique
L :	Langueur du panneau
q_x :	Flux de chaleur de la convection thermique
h :	Coefficient de convection thermique
ε :	Emissivité du corps gris
I_g :	Flux de chaleur du rayonnement de courte longueur d'onde
T_+ :	Température de la couche du verre supérieur
T_t :	Température de la couche du verre inférieur
T_{fg} :	Température de la couche TPT
EVA :	Ethylene Vinyl Acetate
TPT :	Tedlar-polyester-Tedlar

Introduction générale

Durant ces dernières décennies, la consommation énergétique est en croissance dans toutes les régions du monde. D'après l'agence internationale de l'énergie, la demande mondiale d'énergie pourrait augmenter de 45% d'ici l'an 2030 [60]. Actuellement, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur les ressources fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel qui représentent 81% de la production énergétique mondiale [60] ce qui entrainera dans les quelques prochaines années un risque d'épuisement de ces ressources. L'épuisement annoncé des énergies fossiles et les problèmes climatiques dus aux gaz à effet de serre, ont amené plusieurs pays à accorder un rang de priorité élevé à cette question.

Le réchauffement climatique de la terre engagé depuis quelques années, a occasionné une action à l'échelle mondiale pour atténuer les conséquences voire inversé la tendance. A cet effet le réchauffement climatique fait périodiquement l'objet de réunions internationales : Rio de Janeiro (1992), Berlin (1995), Genève (1996), Kyoto (1997), Buenos Aires (1998), La Haye (2000) et Montréal (suivi du protocole de Kyoto en 2005) [51]. Ces réunions ont pour objectif de stabiliser les concentrations du gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En raison de tous ces problèmes, trouver des solutions alternatives durables est devenu de plus en plus pressant. Il est donc indispensable de développer par la recherche des méthodes et des solutions technologiques ingénieuses des systèmes de conversion d'énergies renouvelables afin de les substituer aux applications énergétiques liées aux combustibles traditionnels.

Les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans la consommation énergétique mondiale. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie issue du soleil et notamment l'énergie photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Elle consiste à convertir directement les rayonnements solaires en électricité à l'aide des cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

Les recherches et les études réalisées dans ce domaine ont montré que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres ; internes (lié au dispositif lui-même, le matériau semi-conducteur utilisé pour la réalisation de ces cellules, etc.) et externes (lié aux conditions météorologiques : température, humidité, éclairage, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des cellules solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques de la cellule.

L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur les caractéristiques de la cellule solaire, d'où l'importance de l'étude de l'influence de l'éclairement et de la température pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est extraite sous forme d'énergie électrique, par conséquent c'est la grande partie de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit, sous rayonnement, à une température de fonctionnement relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée.

Pour traiter cette problématique, on a rédigé ce document qu'on a choisi de répartir comme suit :

Dans le premier chapitre, on décrira la croissance et l'évolution du marché photovoltaïque (PV) dans le monde et particulièrement en Algérie, ainsi que quelques projets de recherche réalisés au sein de la faculté de Génie Electrique et d'Informatique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou.

Le deuxième chapitre exposera les différents modes de conversion de l'énergie solaire, à savoir la conversion thermique, thermodynamique et la conversion photovoltaïque. On s'attardera longuement sur cette dernière vu que notre travail portera dessus, et ce en présentant les différentes configurations et principes de base du photovoltaïque : l'effet photovoltaïque, la cellule solaire et ses différentes technologies ainsi que les paramètres la caractérisant.

Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation d'une cellule solaire puis d'un panneau PV en intégrant l'influence de l'éclairement et de la température.

Le quatrième chapitre expliquera dans un premiers temps le contexte d'optimisation de la production d'énergie à partir d'un module PV ainsi que quelques techniques de recherche de point de puissance maximale (PPM) les plus rencontrées dans la littérature. Puis, sous l'environnement MATLAB/Simulink, on appliquera la méthode Perturb and Observe (P&O)

au système PV déjà étudié pour observer la poursuite du PPM sous des conditions météorologiques variables. Dans un second temps, dans le cinquième chapitre, on traitera avec une approche différente la question de l'optimisation du rendement et de l'efficacité du module PV et ce sans commande MPPT, mais plutôt en opérant sur la structure même de la cellule.

Pour clore, on conclura sur le travail effectué et les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Production d'électricité photovoltaïque- Etat de l'art

I.1. Introduction

Cette introduction décrit, en premier lieu, le contexte énergétique en se basant sur la contribution de l'énergie photovoltaïque dans la production de l'électricité dans le monde et en particulier en Algérie. Par la suite, les différents travaux réalisés au niveau de la faculté de Génie Electrique et d'Informatique de l'Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou seront présentés.

I.2. Des énergies fossiles aux énergies renouvelables dans le monde

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale de l'électricité a été observée pendant ces dernières décennies [39]. Les combustibles fossiles (charbon, gaz et pétrole) conservent aujourd'hui une position dominante pour satisfaire la demande énergétique. La figure (I.1) montre l'évolution de la consommation énergétique mondiale et la position dominante des combustibles fossiles.

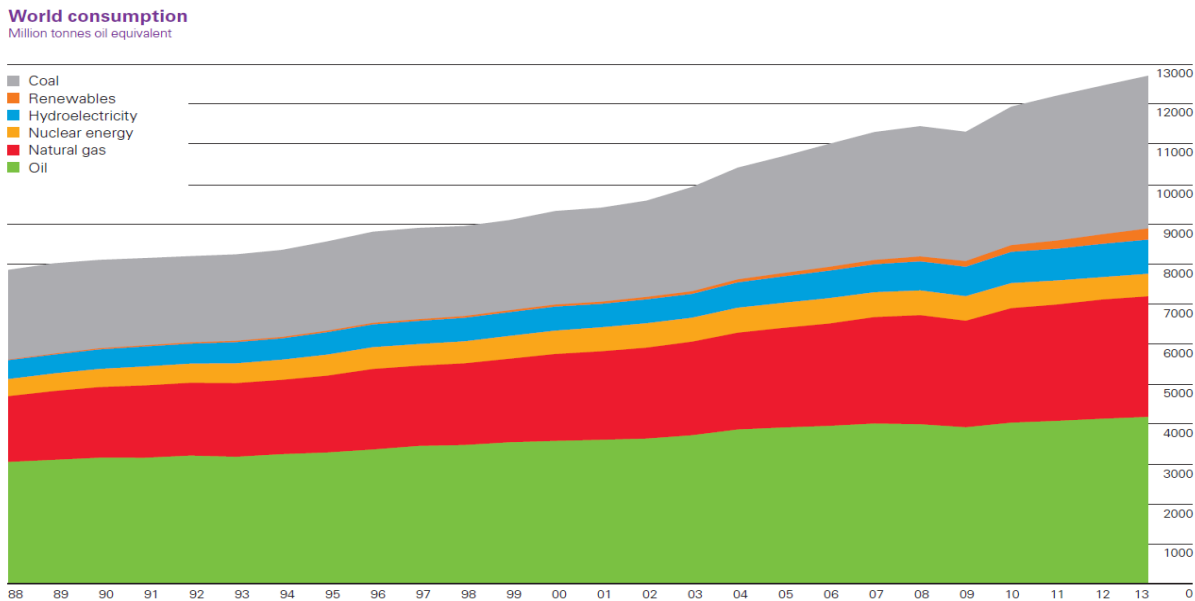


Figure I.1 : Évolution de la consommation mondiale en énergie primaire de 1988 à 2013 [69].

Néanmoins, ces énergies sont très polluantes et leur délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. Le secteur énergétique est responsable des deux tiers des émissions mondiales du gaz à effet de serre, beaucoup de scientifiques pensent que cela est la cause principale du changement climatique. Les orientations envisagées pour limiter ces émissions

sans affecter la croissance économique sont l'augmentation de l'efficacité énergétique, la limitation de la construction et l'utilisation des centrales en charbon et la réduction de l'émission de méthane dans les secteurs gazier et pétrolier en amont. C'est pourquoi le développement des énergies renouvelables, illimitées et non polluantes prend une place particulièrement importante, notamment le solaire photovoltaïque [69].

L'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, International Energy Agency) a proposé quelques perspectives concernant l'avenir énergétique et son impact sur l'environnement ainsi une vision sur l'utilité de l'énergie solaire photovoltaïque pour cet avenir, comme montré sur la figure (I.2) [69].

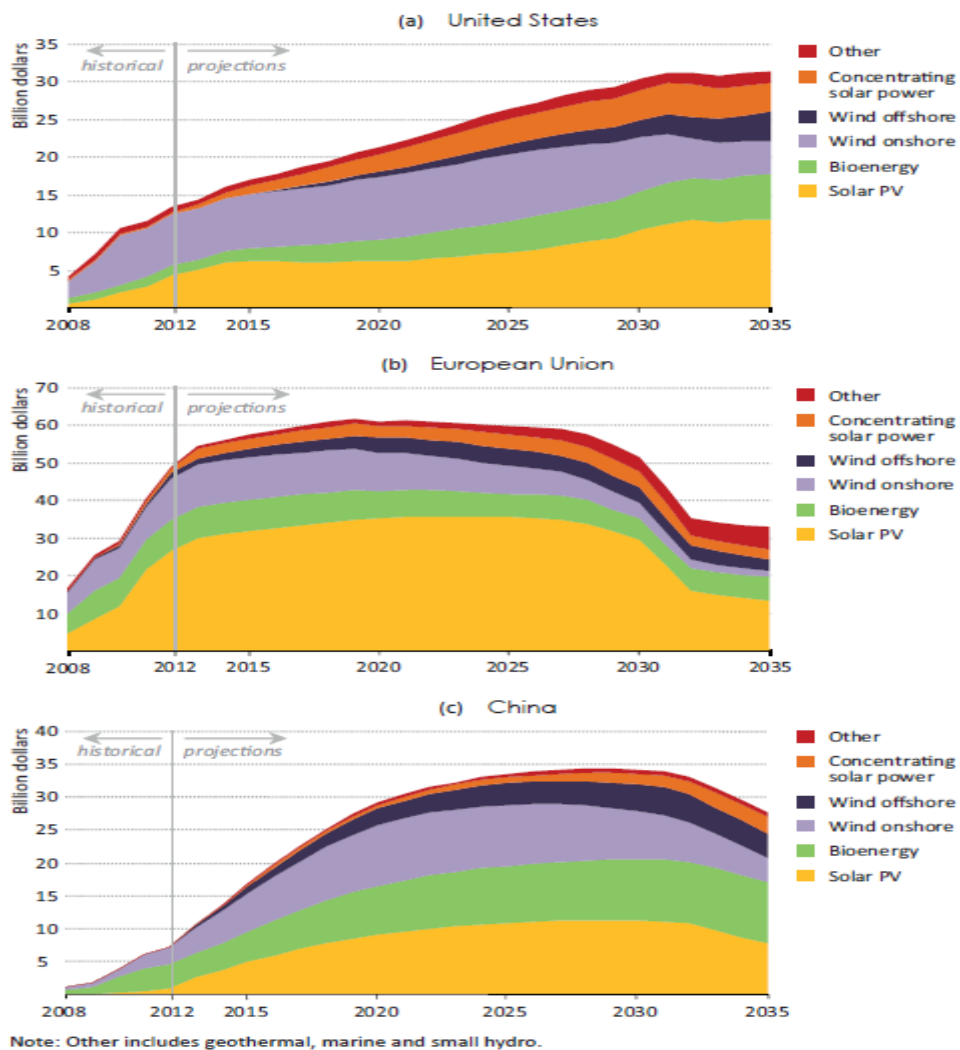


Figure I.2 : Perspective de l'IEA quant aux investissements à venir pour les différentes énergies renouvelables concernant les États-Unis (a), l'Union Européenne (b) et la Chine (c) [69].

Dans ces perspectives de l'IEA, les énergies renouvelables participent pour près de la moitié de l'augmentation de la production électrique mondiale jusqu'en 2035, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne participe de 45% de la croissance des énergies renouvelables.

Dans ce contexte énergétique, environ 38.4 GW de la capacité photovoltaïque (PV) installée en 2013 dans le monde pour atteindre une capacité totale PV de 138.9 GW comme indiqué dans le rapport 2014 de l'EPIA (European Photovoltaic Industry Association). La figure (I.3) montre ce très grand rythme de progression du photovoltaïque dans le monde [2].

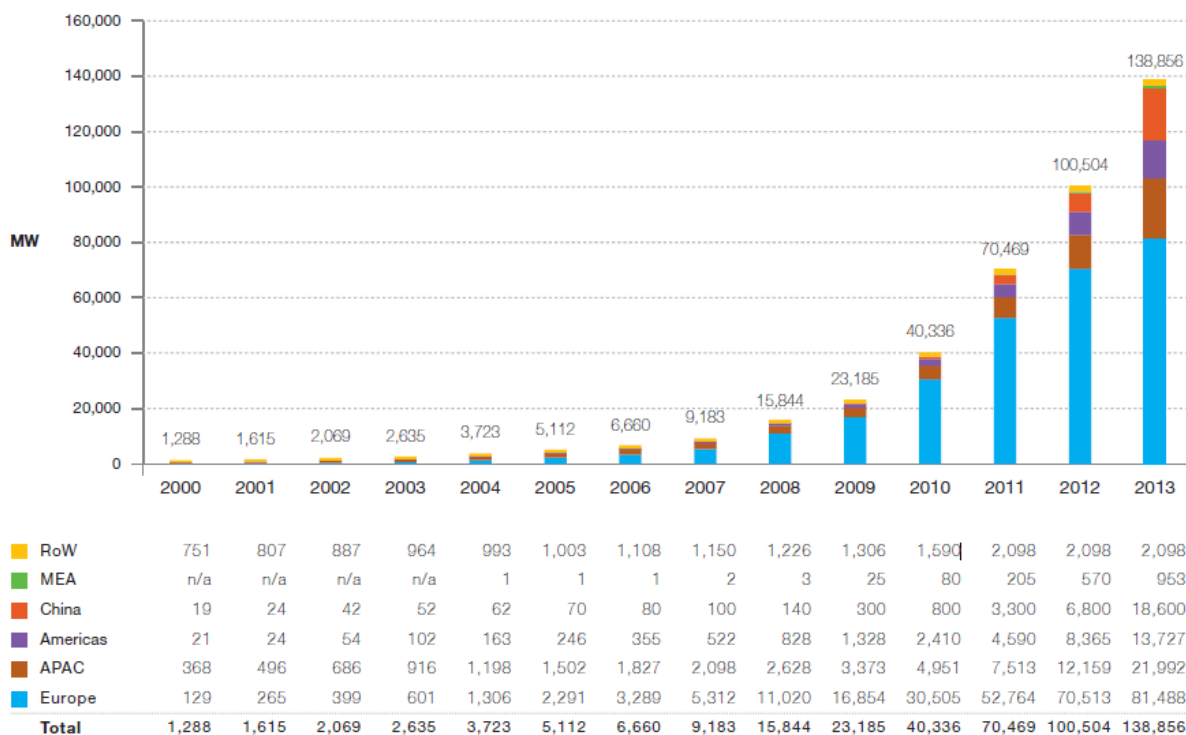


Figure I.3 : Evolution de la capacité PV globale cumulée, installée dans le monde, entre 2000 et 2013 [69].

L'essor du photovoltaïque dans le monde, rendu possible par la forte baisse du coût de production du kWh, est l'événement le plus spectaculaire des dix dernières années.

Six pays se distinguent et représentent 70% des emplois : la Chine, le Brésil, les Etats-Unis, l'Inde, l'Allemagne et le Japon sont les plus grands employeurs mondiaux dans le secteur. L'Allemagne a longtemps mené la course avec une capacité de 39.7 GW mais les plus fortes capacités installées le sont aujourd'hui par les Etats-Unis et la Chine en tête avec une capacité de 43.5 GW.

I.3. Le photovoltaïque en Algérie

L'énergie solaire photovoltaïque est l'un des axes de la politique énergétique, économique et financière en Algérie à l'instar des autres pays du monde.

Le parc national des énergies renouvelables et nouvelles comprend 23 centrales photovoltaïques cumulant une puissance globale de 354.3 MW selon le PDG de Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida (SKTM, filiale de Sonelgaz). L'Algérie a tracé une stratégie pour développer ces énergies pour mettre en place un écosystème et une industrie locale avec une intégration nationale progressive de tous les maillons de la chaîne de valeurs [22].

Cette stratégie était bénéfique pour l'Algérie du fait que les coûts d'investissement ont finalement été ramenés de 50 milliards de dollars, tel qu'évalué initialement, à un montant oscillant entre 20 et 25 milliards de dollars [22].

Cette stratégie est scindée en trois phases dont la première avait consisté à réaliser des projets pilotés et à mettre en place des mécanismes de financement nécessaires au développement de ce programme. Parmi ces projets en phase de réalisation depuis 2014, une centrale photovoltaïque de 1.1 MW à Ghardaïa. Pour ce qui est de la deuxième phase, achevée en juillet 2017, elle consistait à déployer 22 centrales réparties sur plusieurs wilayas de l'intérieur et du sud du pays telles que ; dans les hauts plateaux (11 centrales : Souk Ahras, M'sila, Djelfa (1) et (2), Laghouat (1) et (2), Ouargla, El Bayodh, Naâma, Saida, Sidi Belabes) région In Salah-Adrar-Timimoun (07 centrales : Adrar, In Salah, Kebertène, Reggane, Zaouyet Kounta, Aoulef et Timimoune) et 3 autres centrales à Tindouf, Djanet et Tamanrasset [22]. S'agissant de la troisième phase, toujours en cours de réalisation, elle vise à mettre sur pieds une industrie dédiée aux énergies renouvelables devant permettre la fabrication en Algérie des équipements liés à cette filière énergétique et également de réaliser une intégration nationale progressive de tous les maillons de la chaîne de valeurs du système industriel énergétique intégré depuis la fabrication des équipements jusqu'aux services de construction, d'exploitation et de maintenance [22].

Dans ce contexte de fabrication des panneaux solaires en Algérie, Condor Electronics a opté pour l'option du solaire. La SPA Condor Electronics a été créée en avril 2002, une entreprise qui dispose actuellement de plusieurs activités de conception, de fabrication, de vente et de distribution. Parmi les tâches assurées par Condor, on trouve la fabrication des panneaux solaires photovoltaïques. Cette usine de fabrication a été lancée en janvier 2012, destinée à la fabrication

des panneaux solaires photovoltaïques mono et poly cristallins ayant une gamme de production allant de 70 W à 320 W et une capacité de production installée de 750 W/an [22].

En 2015, Condor a lancé un projet de réalisation d'une centrale solaire photovoltaïque de 2 MW à Dahissa (Bordj Bou Arreridj) et un autre projet de réalisation d'une station solaire de 1 MW à Boughezoul en partenariat avec CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables). Condor ne s'arrête pas là mais plutôt elle vise d'aller plus loin dans ce domaine, en s'engageant avec la société américaine ENKI (fournisseur d'équipements d'énergie solaire). Une entente qui lui ouvre les portes de s'approprier les dernières innovations technologiques dans le domaine de l'énergie solaire. La convention a été signée avec l'ENKI pour le développement des modules photovoltaïques spécifiquement conçus pour la zone MENA (Moyen Orient et Nord-Africain) et notamment pour le développement des couches qui réduisent l'adhérence des poussières et du sable tout en améliorant la durée de vie des modules photovoltaïques [22].

I.4. Etat de l'art des travaux réalisés par les étudiants de l'UMMTO

Afin d'aider le lecteur sur les travaux qui ont été réalisés au sein de notre faculté ces dernières années, on présentera dans ce qui suit un état de l'art des travaux de recherche réalisés dans le cadre des mémoires de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master.

En 2011, le binôme Boukaf F. et Dahdouh T. ont traité dans leur mémoire [14] la modélisation et la commande d'un système de production d'énergie électrique en utilisant des panneaux photovoltaïques. Ils ont présenté deux méthodes différentes pour la poursuite du point de puissance maximale, en particulier la méthode P&O [79] [7]. Dans un premier temps, ils ont modélisé un générateur photovoltaïque à l'aide du modèle mathématique à double exponentielle, en étudiant ainsi la capacité de ce modèle à décrire un générateur PV et l'influence des paramètres internes et externes sur son fonctionnement. Ensuite, ils ont étudié quelques convertisseurs DC/DC en particulier du hacheur Buck_Boost, puis ils ont implémenté leur modèle ainsi le convertisseur par la méthode P&O sous le logiciel MATLAB/ Simulink pour de nombreux changements climatiques. A la fin de leur projet, ils ont étudié un système de pompage photovoltaïque en utilisant un système de conversion DC/AC qui est l'onduleur à deux niveaux de commande MLI [11] [61].

Dans la même année et dans le même contexte, un autre travail a été réalisé par M. A. Khalfouni, il a porté sur la modélisation et le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque

[40]. Dans un premier temps, l'auteur a mis en évidence quelques notions sur les systèmes PV en donnant une description des centrales photovoltaïques autonomes et connectées au réseau [42] ainsi les différents convertisseurs tels que le hacheur et l'onduleur. Puis il a présenté deux méthodes de poursuite de point de puissance maximale qui sont la méthode de la cellule pilotée et la méthode de la dérivée de la puissance [26]. Dans un second temps, il a fait une modélisation suivie d'une simulation avec le logiciel Power Sim de MATLAB d'un modèle à une seule diode en tenant compte des variations de la température et de l'ensoleillement. A la fin, il a dimensionné un générateur PV et a établi une balance énergétique [26].

En 2012, le binôme Bounoua B. et Haouchine R. ont traité dans leur mémoire [30] l'optimisation du transfert d'énergie d'un champ photovoltaïque basée sur la commande MPPT prédictive. Ils ont commencé leur travail par un rappel sur la conception des systèmes photovoltaïques ainsi que leur modélisation. Ils ont ensuite étudié des convertisseurs statiques DC/DC destinés aux systèmes photovoltaïques. Ils ont également présenté le principe de base de la commande prédictive des convertisseurs statiques continu-continu qui représente une technique basée sur un modèle mathématique permettant de poursuivre le point de puissance maximale à un instant présent et aussi prédire le comportement du système photovoltaïque dans le futur proche [34] [68]. Dans un second temps, ils ont présenté quelques structures différentes de commande MPPT parmi les plus utilisées, en particulier la méthode (P&O) [5] [8] qu'ils ont utilisé pour simuler leur système constitué d'un panneau photovoltaïque et un régulateur PI sous le logiciel PSIM [16]. A la fin, ils ont comparé les performances de la méthode (P&O) et la commande MPPT prédictive, et ils ont conclu en attribuant un avantage à cette dernière.

Dans le mémoire [1] réalisé par Badji A. et Akhmoum H. les auteurs avaient comme objectif l'étude et la réalisation d'une carte de commande numérique d'un hacheur élévateur entrelacé associé à un panneau photovoltaïque [21]. Leur travail consiste à proposer une étude sur les convertisseurs DC/DC élévateur entrelacés adaptés aux applications photovoltaïques. Il s'agit de réaliser une carte électronique basée sur un microprocesseur 16F877A [13]. Les travaux réalisés dans leur mémoire ont été faites au niveau de laboratoire LATAGE de l'UMMTO. L'objectif de cette carte est d'extraire le maximum de la puissance d'un panneau PV tout en contrôlant un hacheur élévateur entrelacé avec 3 cellules et le microcontrôleur est utilisé comme cerveau du régulateur. Dans un premier temps, ils ont défini les principales caractéristiques des systèmes PV et le convertisseur MPPT. Ensuite, ils ont fait une étude comparative entre un convertisseur élévateur simple et un convertisseur élévateur entrelacé suivie d'une simulation des deux convertisseurs. Ils ont également consacré une partie de leur

mémoire à la programmation du microcontrôleur et à la réalisation d'un prototype de leur structure. A la fin, ils ont présenté les résultats obtenus ainsi que quelques améliorations.

Le mémoire [10] fait par Azouagh L., Zidi D. et Dahmani M. a traité l'étude d'un système de pompage photovoltaïque. L'objectif de ce mémoire est l'étude du fonctionnement d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT. Dans un premier temps, les auteurs ont commencé par des généralités sur les systèmes PV, tout en expliquant le principe de conversion de l'énergie solaire et les convertisseurs utilisés (hacheur et onduleur) [18] [4] [36]. Ensuite, elles ont entamé la modélisation d'un générateur PV en résolvant l'équation non linéaire d'une cellule PV en utilisant la méthode de Newton-Raphson [55]. Puis elles ont dimensionné un système de pompage photovoltaïque en précisant le dimensionnement du champ photovoltaïque, du moteur et de la pompe [20] [2-3]. A la fin, pour décrire les performances du l'ensemble pompe-système photovoltaïque elles ont fait une simulation sous le logiciel MATLAB/Simulink.

Le mémoire [44] rédigé par Lamine M. et Leharani L. a comme but la contribution à la commande MPPT numérique d'un panneau photovoltaïque à travers un hacheur parallèle entrelacé. Leur travail contient une étude théorique et une validation expérimentale. Au début, ils ont présenté un générateur photovoltaïque et ses performances, la commande MPPT [48] et les convertisseurs DC/DC qui sont le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur dévolteur-survolteur [53] ainsi les deux classifications de la commande MPPT (selon le type de recherche et selon les paramètres d'entrée) [9] [45]. Ils ont présenté aussi quatre algorithmes appropriés à la commande MPPT : algorithme de la tension constante, algorithme du courant constant, P&O et la méthode conductance incrémentale [65] [74] [79]. Ensuite, ils ont étudié les différentes structures simples des convertisseurs DC/DC en particulier le hacheur Boost entrelacé. Dans un second temps, pour valider leurs résultats théoriques, ils ont fait quelques essais au niveau de laboratoire LATAGE [32] afin de tester les performances du générateur PV et de hacheur Boost entrelacé en relevant des courbes des paramètres de convertisseur MPPT pour la partie puissance et la partie control. Ils ont clôturé leur travail par des interprétations.

Le mémoire [70] réalisé par Toulait A. et Aili R. a traité de la modélisation et la simulation sous MATLAB/Simulink d'un système PV adapté à la commande MPPT. L'objectif de ce mémoire est l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système PV. Ils ont commencé par un aperçu général sur la technologie photovoltaïque en commençant par des notions sur le rayonnement, le principe photovoltaïque et l'influence des paramètres

météorologiques sur le rendement du panneau. Ensuite, ils ont modélisé un panneau photovoltaïque tout en précisant la configuration physique des éléments des cellules et plus précisément les caractéristiques électriques de chaque élément. Puis ils ont présenté l'une des techniques de poursuite et d'optimisation de la puissance maximale qui est la méthode P&O ainsi le hacheur Boost et son principe de fonctionnement. Et pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système PV, ils ont analysé en variant les conditions météorologiques et la charge le fonctionnement optimal du système PV.

Dans le mémoire [27] réalisé par Fellouah S. et Mesbahi S. les auteurs avaient comme objectif l'étude d'un système photovoltaïque connecté à un réseau. Ils ont commencé leur projet par un aperçu général sur les systèmes PV et leurs caractéristiques. Ensuite, ils ont défini trois types de systèmes PV et plus précisément les installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique classique, en présentant l'architecture de ce dernier [37] et en particulier le réseau électrique Algérien [1] [55]. Puis ils ont présenté les deux structures générales d'un système PV connectés au réseau qui sont la structure d'un système PV connecté directement au réseau et la structure d'un système d'un PV à bus continu [20] ainsi les principaux types d'onduleurs [18]. A la fin, ils ont clôturé leur travail par un dimensionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau de 1 MW en se basant sur le module CONDOR Poly Cristallin 72 cellules de 225 W_C [50] en utilisant un onduleur de type SMA Sunny Central de puissance 250 kW [49].

Le mémoire [76] réalisé par le binôme YAKER Aniss et BELKACEM Belaid avait comme but le dimensionner d'une centrale photovoltaïque autonome alimentant un village écologique (vert) contenant deux bâtiments de huit appartements de F3 et une supérette. Ils ont commencé par des généralités sur l'énergie solaire en particulier l'énergie photovoltaïque en citant deux systèmes PV ; l'un est autonome et un autre raccordé au réseau. Ensuite, ils ont procédé au dimensionnement de la station PV en suivant quelques étapes intermédiaires, telles que :

- Détermination des besoins énergétiques de l'utilisateur,
- Chiffrage de l'énergie solaire récupérable selon l'emplacement et la situation géographique,
- Choix des modules PV, de régulateur, de l'onduleur, ...
- Choix des câbles et des batteries de stockage, ...

A la fin, ils ont fait leur étude sur trois configurations différentes et ils ont comparé ces résultats pour choisir la configuration la plus appropriée.

Dans le mémoire [67] réalisé par le binôme Tansaout M. et Khemmar S., les auteurs ont traité la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/Simulink. Le but de l'étude réalisée dans ce mémoire est de simuler les effets des paramètres météorologiques et des résistances séries et parallèle sur les caractéristiques puissance-tension et courant-tension du panneau solaire MSX 60 de SOLAREX en comptant sur un modèle à une seule diode. Elles ont commencé par définir des notions sur le rayonnement, l'effet photovoltaïque, les systèmes de régulation et de conversion. Dans un second temps, elles ont décrit les convertisseurs DC/DC tels que le hacheur élévateur, dévolteur et le hacheur élévateur-dévolteur ainsi les deux méthodes de poursuite de point de puissance maximale (P&O et la méthode de d'incrémentation de la conductance) [64] [73]. A la fin de ce travail, elles ont modélisé et simulé un générateur photovoltaïque MSX 60 SOLAREX [11] [60].

En 2017, le binôme Hadjeras M. et Khales A. ont traité dans leur mémoire [29] l'étude et le dimensionnement pour un convertisseur dédié aux systèmes photovoltaïques. Ils ont commencé leur travail en donnant un aperçu général sur les énergies renouvelables existantes sur terre (biomasse, éolien, solaire, eau, ...), ainsi les notions fondamentales sur le solaire photovoltaïque telles que ; les cellules, les matériaux semi-conducteurs, caractéristiques des cellules, effet photovoltaïque, ...

Ensuite, ils ont modélisé un générateur photovoltaïque sous différentes conditions météorologiques à savoir la température et l'ensoleillement, suivi par une présentation des structures des commandes les plus utilisées :

- Méthodes indirectes : méthode de la tension de circuit ouvert et la méthode du courant de court-circuit, [62]
- Méthodes directes : méthode d'incrémentation de la conductance et la méthode de perturbation et d'observation (P&O) [62] [25].

Puis, ils ont présenté les convertisseurs statiques les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques, la modélisation et la simulation du hacheur élévateur de tension (Boost) plus précisément []. A la fin, ils ont simulé sous MATLAB/Simulink le comportement d'un système photovoltaïque du type 'SUNTECH STP80S-12' avec la commande de maximisation de puissance Perturber et observer (P&O) alimentant une charge résistive et cela sous conditions météorologiques variables.

Chapitre II

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction

L'énergie électrique a toujours été indispensable à l'existence humaine et ses sources sont diverses. Malgré la maîtrise des techniques, le contexte de la disponibilité de l'énergie électrique est devenu l'une de nos préoccupations majeures. Certaines de ces sources s'épuisent, d'autres s'avèrent dangereuses pour l'environnement, et nos besoins énergétiques ne cessent d'augmenter, alors, que doit-on faire ? Que faut-il utiliser pour produire cette énergie et garantir sa disponibilité ? [24]

Depuis l'antiquité, l'homme a appris à utiliser les énergies contenues dans la nature, telles que : le vent, l'eau ou encore le soleil pour se chauffer, ... etc. A partir de la révolution industrielle, les besoins énergétiques de l'homme ont connu une expansion phénoménale, et comme une grande partie de la production de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles qui disparaissent une fois utilisées, l'homme a pensé à d'autres sources pour produire cette énergie afin de satisfaire ses besoins énergétiques et aussi maintenir son développement. Ces sources sont dites sources d'énergie renouvelable.

Les énergies renouvelables sont des énergies quasiment illimitées à l'échelle temporelle. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie issue du soleil.

Le soleil fournit une énergie surprenante à la terre, elle est d'environ 420 trillions de kWh [24]. Cette énergie est beaucoup plus importante que toutes les autres énergies utilisées dans le monde.

II.2. Différentes technologies solaires

Il existe principalement trois modes de conversion de l'énergie solaire : la conversion thermique, la conversion thermodynamique et la conversion photovoltaïque.

II.2.1. Energie solaire thermique

Le solaire thermique consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur et à la récupérer pour chauffer l'eau. Son utilisation se fait principalement pour produire l'eau chaude sanitaire, mais elle peut être utilisée comme complément pour le chauffage de l'habitat. Il existe différents types de capteurs solaires à basse température utiles pour ce type de conversion de l'énergie solaire [65], tels que :

- Capteurs plans vitrés : ce sont les capteurs les plus répandus avec un bon rendement et un prix abordable. Ils sont utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire.
- Capteurs moquettes : ce sont des capteurs simples et économiques. Ils sont utilisés pour chauffer l'eau des piscines. Ils sont composés d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres.
- Capteurs sous vide : ce sont des capteurs qui permettent d'atteindre de très hautes températures pour le refroidissement et la climatisation.

L'énergie solaire thermique se trouve dans nombreuses applications :

- La production de l'eau de chaude,
- Le chauffage des maisons, l'eau des piscines,
- Le séchage de la récolte agricole,
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments, ...etc.

II.2.1.1. Le solaire thermique en Algérie

En 1954, sur le site du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), un four solaire a été édifié à Bouzaréah sous le nom 'Héliodyne'. C'est une réalisation prestigieuse de plus de 40 tonnes et dont la hauteur atteint près de 9 mètres. Ce four solaire répond à des caractéristiques remarquables qui lui ont valu le titre du plus puissant four au monde à l'époque [6].

Cette réalisation de l'Héliodyne avait pour but d'obtenir à l'échelle une expérience semi-industrielle, des produits susceptibles d'un débouché direct sur le territoire algérien. Il s'agit principalement de la synthèse à partir de l'oxygène et de l'azote atmosphérique, de l'acide azotique destiné à la fabrication d'engrais azotés, ainsi que le craquage de certains composés organique contenus dans des gisements de gaz naturel découvert en Algérie.

Et dans ce contexte de l'énergie solaire thermique, l'Algérie s'est engagé dans un programme national des énergies renouvelables très ambitieux pour l'avenir de l'industrie des équipements du solaire [6].

Le programme lancé en 2011 a comme objectifs :

- L'apport des solutions globales et durables aux défis environnementaux,
- Diversification des sources d'énergie et la promotion de l'efficacité énergétique,
- Préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

La concentration solaire représente deux tiers (2/3) de la puissance installée. En 2030,

pour les centrales à concentration solaires, la capacité cumulée à installer prévue est de 7200 MW, soit environ 32% par rapport à la production nationale d'électricité [6].

Le projet Alsol, piloté par le ministère d'énergie et des mines, a pour rôle d'amorcer la création d'un marché national du chauffe-eau solaire et de favoriser l'implantation d'une industrie locale. Le volet incitation est renforcé par un projet d'installation de 1000 chauffe-eau solaires individuels sur le territoire national. La subvention de l'Etat est à hauteur de 45% du coût du chauffe-eau solaire installé. Le financement est assuré par le fond National de la Maîtrise de l'Energie (FNME) [6].

II.2.2. Energie solaire thermodynamique

L'énergie thermodynamique désigne l'énergie solaire récupérée par des capteurs cylindro-paraboliques, des centrales à tour ou des capteurs paraboliques pour produire l'énergie électrique. Le flux solaire concentré réchauffe un fluide caloporteur (l'huile thermique, des sels fondus, l'huile synthétique, ... etc.) dans une gamme de température allant de 250 °C à 1000 °C selon les techniques utilisées. Ces fluides viennent ensuite chauffer de l'eau dont la vapeur entraîne un turboalternateur à l'instar d'une centrale thermique classique [65].

Il existe un large éventail de technologies de concentration et chacune d'elles est capable de générer des températures élevées mais elles se différencient dans la façon dont elles suivent le soleil et concentrent la lumière [35].

II.2.2.1. Centrales à capteurs cylindro-paraboliques

Un capteur cylindro-parabolique est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Le récepteur est un tube positionné juste au-dessus du milieu du miroir parabolique et rempli d'un fluide caloporteur. Le réflecteur suit le soleil pendant la journée le long d'un axe unique [65].

Une centrale électro-solaire à capteurs cylindro-paraboliques se compose de trois principaux éléments ; le champ de capteur solaire, le système de transfert de chaleur et le système de génération électrique.

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide circulant dans ce tuyau est chauffé à une température de l'ordre de 400 °C et transporté par la suite à travers des échangeurs

conventionnels afin de produire de la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique [65].

La puissance électrique de ce type de centrale solaire est comprise entre 30 et 300 MW. Le concentrateur cylindro-parabolique est utilisé pour diverses applications comme la production de la vapeur et le dessalement d'eau.



Figure II.1 : Collecteur cylindro-parabolique [52].

II.2.2.2. Centrales à tour

Les centrales solaires à tour sont constituées d'un champ de miroirs uniformément répartis (héliostat) concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet de la tour. L'énergie concentrée au niveau du receveur placé au sommet de la tour est utilisée pour chauffer un fluide caloporteur qui sera envoyé ensuite vers une chaudière pour produire de la vapeur pour actionner des turbines. Ces dernières entraînent des alternateurs produisant de l'électricité. Ce type de concentration nous permet d'atteindre des températures importantes qui varient entre 600 °C à 1000 °C [65].

Les centrales à tour sont moins répandues que les systèmes cylindro-paraboliques, mais elles offrent un bon rendement et une meilleure capacité de stockage de l'énergie [35].



Figure II.2 : Centrale à tour en Espagne [35].

Il existe aussi des centrales à tour à effet de cheminée qui fonctionnent à base de l'air chauffée qui s'échappe par une grande cheminée centrale. La différence entre la température d'entrée et la température de sortie de l'air provoque le déplacement perpétuel de l'air. Cette circulation de l'air fait fonctionner des turbines situées à l'entrée de cheminée pour produire de l'électricité. Ce système de conversion est caractérisé par son fonctionnement continu en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur emmagasinée dans le sol pendant la nuit.

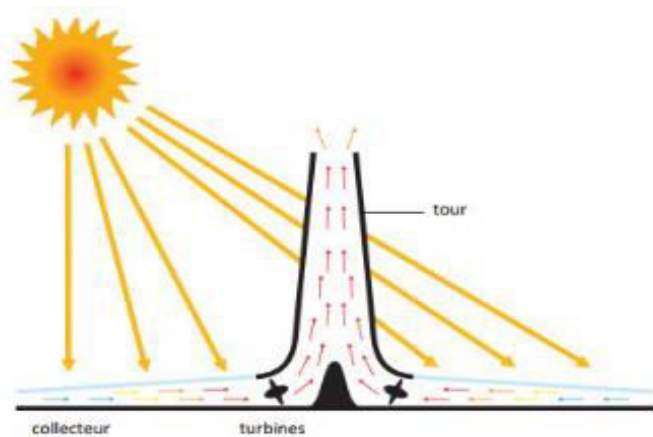


Figure II.3 : Tour solaire à effet de cheminée [35].

II.2.2.3. Centrale à capteurs paraboliques

Ce système convertit l'énergie thermique du rayonnement solaire en énergie mécanique puis en énergie électrique de la même manière que les centrales thermiques classiques à combustibles. Elles utilisent un réseau de miroirs pour réfléchir et concentrer le rayonnement direct entrant à un récepteur afin d'atteindre les températures souhaitées. Ce rayonnement solaire concentré est absorbé par le récepteur et transféré à un moteur [35].

Les systèmes à capteurs paraboliques offrent un meilleur rendement de transformation d'énergie solaire en électricité de toutes les technologies d'énergie solaire concentrée (entre 31% et 32%) et une puissance varie entre 10 MW et 100 MW.

Leur nature modulaire permet de les installer dans des endroits isolés et non raccordés au réseau électrique [65].

Il existe aussi le système parabole-moteur Stirling qui est destiné à l'électrification décentralisée car sa puissance varie de quelques centaines de Watts à quelques dizaines de kW. Il comprend un concentrateur parabolique équipé d'un suiveur solaire, un récepteur solaire (source chaude du cycle), le moteur Stirling et une génératrice de courant alternatif. Le rayonnement solaire concentré chauffe le gaz de travail (hydrogène, 650 °C) dans le récepteur placé au fond de la cavité. La régulation thermique du récepteur est assurée par la pression d'hydrogène qui dépend de l'énergie solaire collecté. La source froide du cycle Stirling est un refroidisseur à eau. L'eau est fournie par un circuit qui refroidit également le corps du moteur ainsi que l'entrée de la cavité. La puissance thermique évacuée est rejetée dans l'atmosphère à travers un radiateur convecteur. Le cycle Stirling produit la puissance mécanique et entraîne la génératrice électrique [65].



Figure II.4 : Centrale parabolique avec moteur Stirling [65].

II.2.3. Solaire photovoltaïque

Le terme photovoltaïque désigne le processus physique qui consiste à transformer une partie du rayonnement solaire en une énergie électrique par le biais des cellules photovoltaïques. Le phénomène a été découvert par le physicien français A. Edmond Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 [32].

Le mot photovoltaïque vient du Grec qui veut dire :

- Photo : lumière,
- Volt : unité de tension électrique du nom du physicien Alessandro Volta.

II.3. Notions sur le photovoltaïque

II.3.1. Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur solaire. Une cellule PV est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur (généralement à base de silicium) qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique [46].

Son principe de fonctionnement est basé sur la structure interne d'absorption du rayonnement lumineux. Une cellule est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre N formant une jonction PN comme le montre la figure (II.5) [46].

Lorsque le semi-conducteur absorbe les photons, ces derniers transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN, des électrons se libèrent et créent des paires électrons-trous. D'où une différence de potentiel a été créée entre les deux couches.

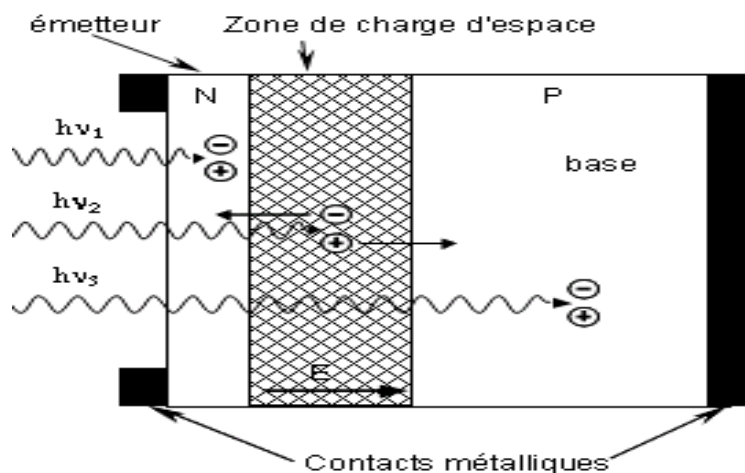


Figure II.5 : Structure interne d'une cellule photovoltaïque [32].

Il existe plusieurs types de cellules PV, mais les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial.

On distingue trois catégories des cellules PV fabriquées à partir de silicium :

- **Cellules monocristallines** : chaque couche est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule dispose d'un très bon rendement et pouvoir de conversion mais de coût très cher.
- **Cellules poly-cristallines** : ce sont des cellules de bon rendement aussi mais légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur coût amoindri.
- **Cellules amorphes** : ce type de cellules ne possèdent pas de structures cristallines. Elles présentent l'avantage d'être intégrées sur des supports souples et rigides. Elles sont souvent utilisées dans des appareils portables, calculatrices, montres, etc.

Récemment, une nouvelle génération de cellules PV est apparue, il s'agit des cellules en couche mince sous formes de films fines elles possèdent une très grande efficacité de conversion énergétique et un bon rendement. Les cellules à couche mince peuvent être construites sur un substrat flexible.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont les deux types de cellules PV les plus répandus sur le marché photovoltaïque.

II.3.2. Effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque fonctionne selon le phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce dernier consiste à établir une force électromotrice lorsqu'une cellule est exposée aux rayonnements solaires. Des électrons et des trous se créent dans le matériau semi-conducteur [30].

Cet effet ne se manifeste que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande passante du semi-conducteur [46].

II.3.3. Générateur photovoltaïque

La puissance délivrée par une cellule photovoltaïque élémentaire de quelque dizaine de centimètres carrés est faible vis-à-vis des besoins des applications domestiques ou industrielles [46].

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être regroupées afin de créer un générateur ou un module photovoltaïque. En effet, un générateur est un ensemble de cellules mises en série et/ou en parallèle produisant une puissance continue et élevée [46].

II.3.3.1. Association série

La tension d'un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs cellules en série est la somme des tensions traversant chaque cellule, tandis que le courant est la même que celui traversant chaque cellule comme le montre la figure (II.6).

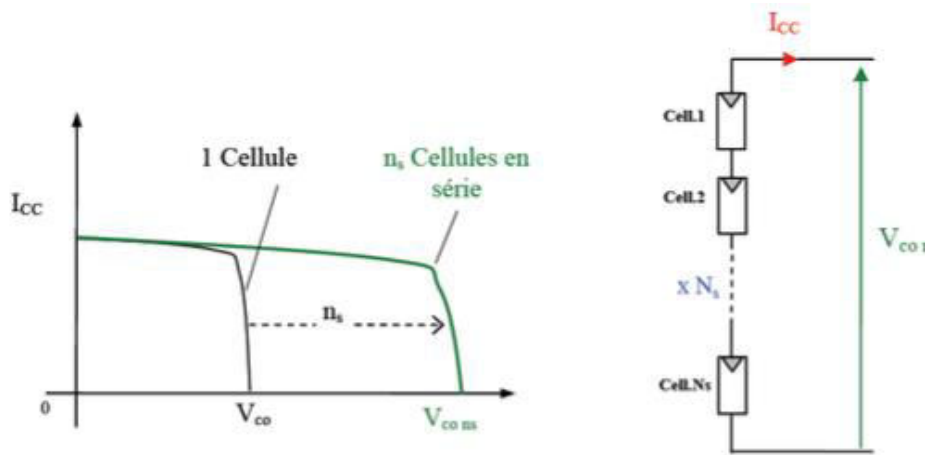


Figure II.6 : Caractéristique I(V) résultante d'un groupement série [60].

II.3.3.2. Association parallèle

La tension à la sortie du générateur est la même que celle traversant chaque cellule, tandis que le courant est la somme des courants traversant chaque cellule constituant ce générateur. Figure (II.7).

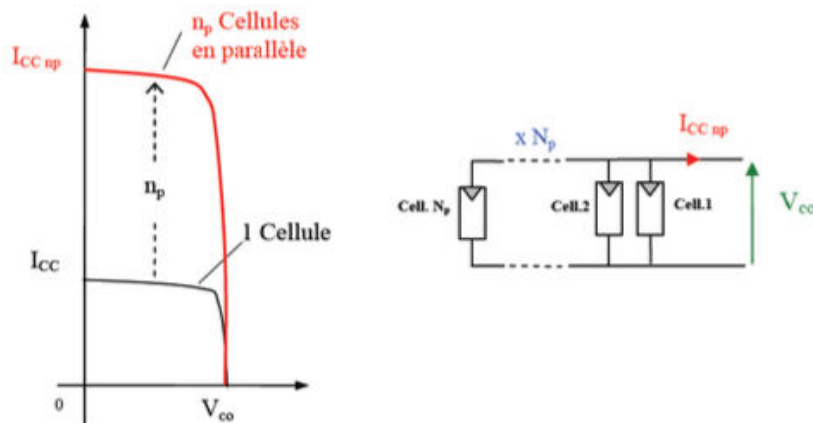


Figure II.7 : Caractéristique P(V) résultante du groupement parallèle [60].

II.3.3.3. Association série-parallèle

Dans le groupement série, les tensions des cellules s'additionnent ce qui augmente la tension totale du générateur PV. D'une autre part, les cellules connectées en parallèle augmentent le courant à la sortie du générateur. La figure ci-dessous montre une autre structure d'association des cellules photovoltaïques.

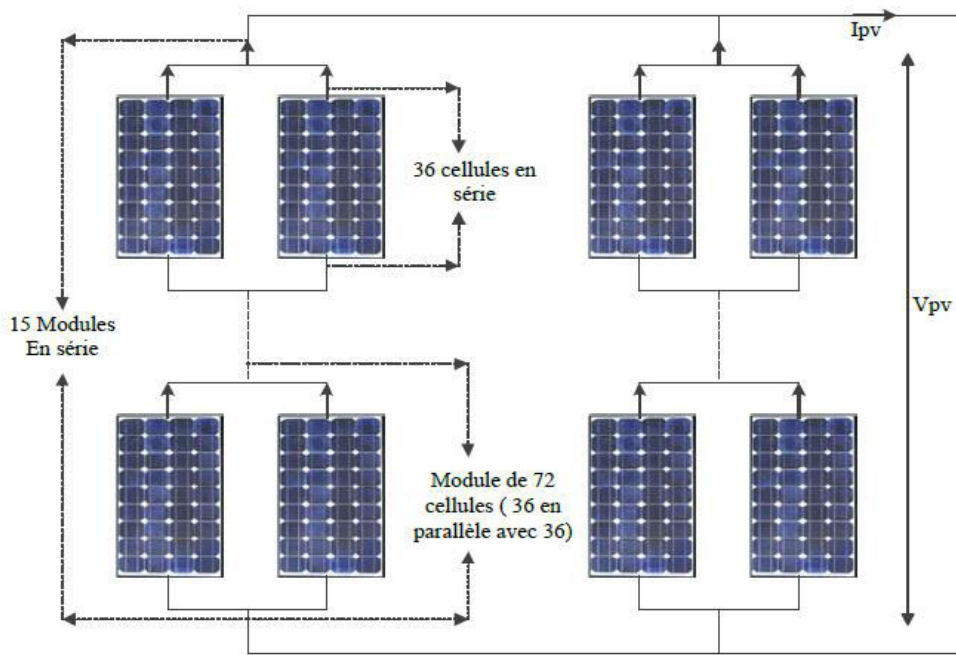


Figure II.8 : Groupement de plusieurs cellules en série-parallèle [23].

Comme la puissance est le produit d'une tension et d'un courant, donc ce produit sera optimal pour une tension et un courant maximums qui sont les résultats d'un groupement série et d'un groupement parallèle respectivement.

La figure (II.9) illustre la caractéristique P(V) obtenue de ce groupement série-parallèle.

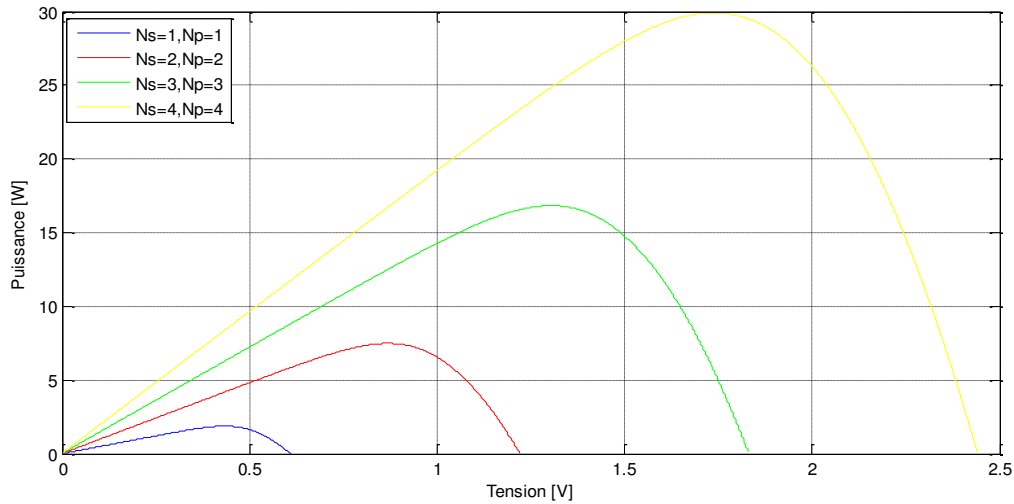


Figure II.9 : Caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV constitué de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle.

II.3.4. Caractéristique électrique

La figure (II.10) représente la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque. La figure montre que la caractéristique $I(V)$ balaie sur trois zones I, II et IV. Dans les zones II et IV la cellule se comporte comme un récepteur, par contre dans la zone I elle se comporte comme un générateur d'énergie. Cette zone caractérise le fonctionnement normal d'une cellule photovoltaïque [22].

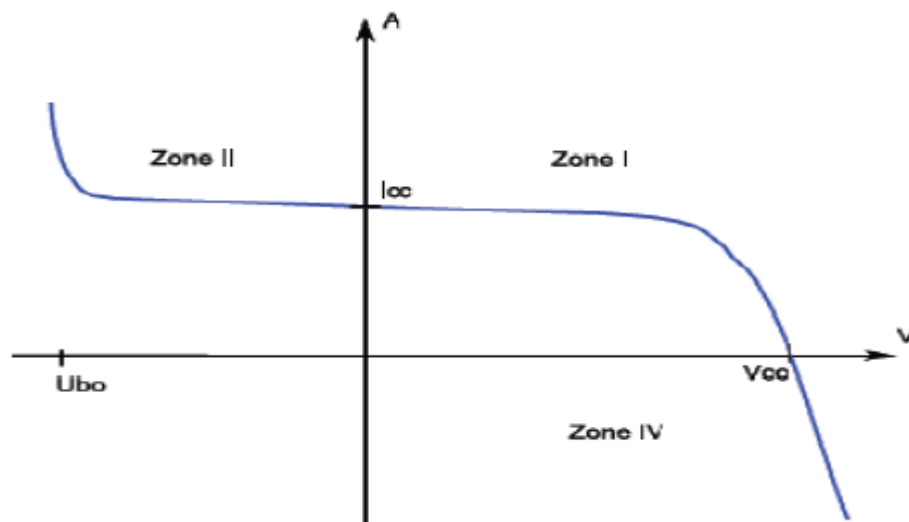


Figure II.10 : caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque [32].

II.3.5. Paramètres photovoltaïques

Il existe plusieurs paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques qui sont déduits de la caractéristique I(V) montrée dans la figure (II.11) [4].

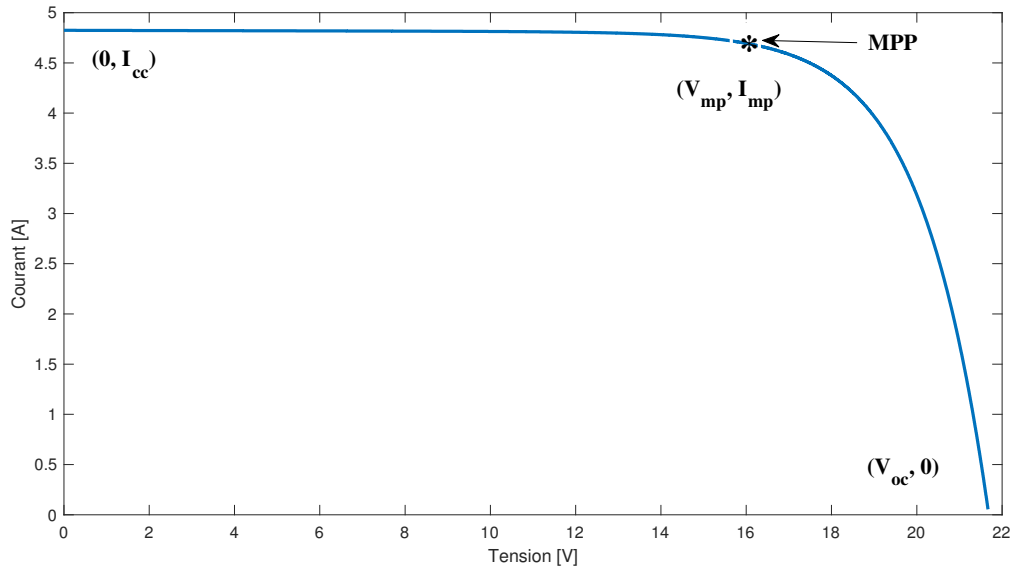


Figure II.11 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

- A. **Courant de court-circuit (I_{cc})** : c'est le courant délivré par un module photovoltaïque en absence de la tension (court-circuit),
- B. **Tension de circuit ouvert (V_{oc})** : c'est la tension aux bornes du module photovoltaïque en circuit ouvert,
- C. **Facteur de forme (FF)** : il représente le rapporte entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut délivrer une cellule,
- D. **Rendement (η)** : c'est le rapport entre la puissance fournie par la cellule et la puissance incidente,
- E. **Puissance maximale (crête P_c)** : c'est la puissance électrique maximale que peut fournir un module photovoltaïque dans les conditions météorologiques standards de température et d'ensoleillement ($T=25^\circ\text{C}$ et $E=1000 \text{ W/m}^2$).

II.3.6. Protection d'un générateur photovoltaïque

Afin d'augmenter la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à la production de l'énergie électrique sur des années, on doit assurer sa protection électrique tout en évitant les pannes destructrices liées à l'association des cellules et leur fonctionnement.

Pour se faire, deux types de protection sont utilisés : [51]

- **Diode anti-retour** : assure la protection des installations en cas de connexion de plusieurs modules en parallèle pour éviter la circulation des courants négatifs,
- **Diode by-pass** : assure la protection lors de la mise en série de plusieurs modules photovoltaïques, et permet dans le cas où un élément de la chaîne est défectueux de l'isoler et d'assurer ainsi la continuité de fonctionnement de la chaîne.

La figure (II.12) montre le schéma d'un module photovoltaïque avec l'insertion des deux protections citées.

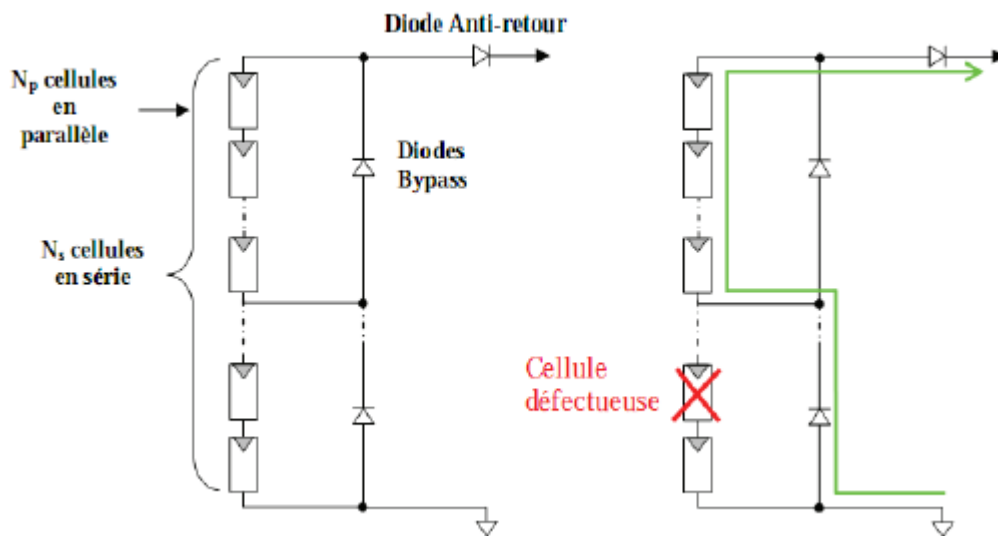


Figure II.12 : Architecture d'un module photovoltaïque avec les deux diodes de protection [51].

II.3.7. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont : [24]

II.3.7.1. Avantages

- L'énergie solaire est inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités,
- La production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire photovoltaïque ne présente pas de dangers pour l'environnement (source d'énergie non polluante),
- Le matériau le plus répandu utilisé dans les panneaux solaires est le silicium qui est très abondant et n'est pas toxique,
- La possibilité de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés (les toits, les fermes solaires, les satellites, ...),
- La production de l'électricité à partir de l'énergie solaire est décentralisée.

II.3.7.2. Inconvénients

- La technologie photovoltaïque est très coûteuse,
- Les panneaux solaires les plus répandus sont faits à base de silicium cristallin d'où ils sont lourds et fragiles,
- La technologie photovoltaïque dispose d'un faible rendement,
- L'énergie électrique récupérée des panneaux solaires n'est pas directement sous sa forme primaire.

II.3.8. Applications du photovoltaïques

On trouve la technologie photovoltaïque dans plusieurs secteurs, comme :

- Pour le grand public : utilisé pour les petits appareillages comme les montres, les portables, les lampes de jardins, ...
- Applications professionnelles : alimenté des sites isolés en électricité, la télécommunication, ...
- Photovoltaïque connecté au réseau : installation des panneaux sur les toits, les façades (intégré dans les bâtiments) et les centrales électriques qui sont intégrées dans les paysages,
- Applications spatiales : intégration des panneaux sur des satellites.

II.3.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de l'énergie renouvelable qui est l'énergie solaire, connue sous ses différentes formes : Thermique, thermodynamique et Photovoltaïque. On s'est intéressé à la conversion photovoltaïque dont on a présenté brièvement la constitution

d'un générateur PV, des notions préliminaires de la jonction PN et la cellule solaire PV avec ses différentes structures existantes. Par la suite, on a décrit le principe de fonctionnement de la cellule PV, les différents groupements de cellules et leurs influences sur le comportement du module photovoltaïque, ainsi que les différents paramètres la caractérisant.

Puis, on a donné quelques avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque et quelques-unes de ses applications. La source d'énergie électrique photovoltaïque présente un choix stratégique des années à venir afin de régler le problème du manque ou de l'insuffisance de l'énergie électrique dans le monde.

Chapitre III

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction

Les performances d'un système photovoltaïque dépendent des conditions météorologiques (rayonnement, température, ...). Afin d'assurer la continuité et la disponibilité de l'énergie extraite des panneaux solaires durant toute l'année, un système photovoltaïque doit être convenablement dimensionné. Pour ce faire, des modèles électriques sont développés pour représenter de comportement non linéaire du système photovoltaïque [53].

Une bonne modélisation passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents qui diffèrent entre eux dans le nombre des paramètres intervenants dans le calcul du courant et de la tension à la sortie du générateur photovoltaïque [40].

III.2. Circuits électriques équivalents d'une cellule photovoltaïque

III.2.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, une cellule peut être schématisée par un circuit électrique équivalent contenant un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode. La figure (III.1) représente le circuit électrique équivalent d'un tel circuit [40].

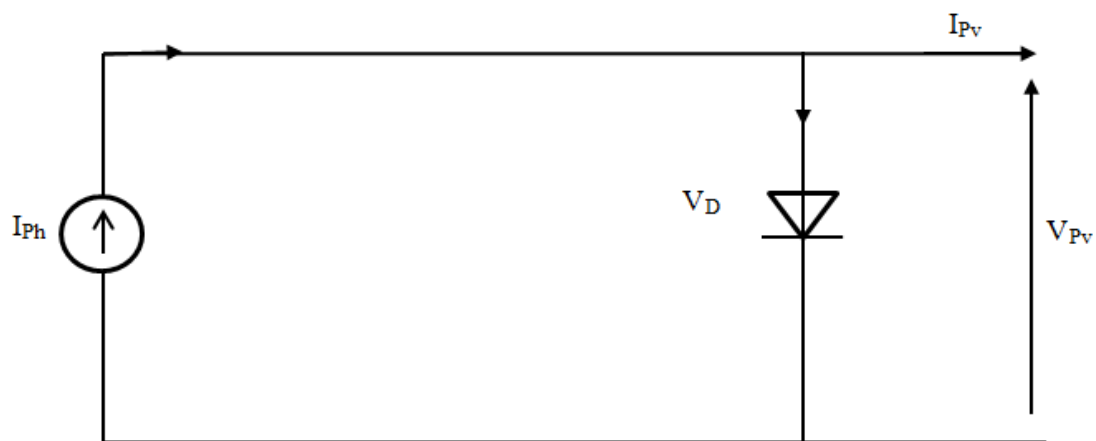


Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Avec :

I_{ph} : courant photonique ou de l'éclairement,

I_D : courant de saturation traversant la diode,

D : diode caractérisant la jonction PN,

V_{pv} : tension délivrée par le panneau,

I_{pv} : courant délivré par le panneau.

Les équations représentant ce modèle sont :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D \quad (III.1)$$

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{\alpha K T}} - 1 \right) \quad (III.2)$$

Avec :

I_0 : courant de saturation inverse de la diode,

q : charge de l'électron,

V_D : tension de la diode,

K : constante de Boltzmann,

T : température.

En remplaçant I_D par son expression dans l'équation (III.1), on aura :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{\alpha K T}} - 1 \right) \quad (III.3)$$

III.2.2. Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte des effets résistifs (résistance shunt et série) [54].

Dans ce cas, la résistance shunt notée R_{sh} modélise les courants de fuite et la résistance série notée R_s modélise les pertes en tension à la sortie de la cellule.

Il existe deux modèles de la cellule photovoltaïque réelle [40].

III.2.2.1. Modèle à une seule diode

La figure (III.2) représente le circuit équivalent d'une cellule solaire réalisée par la connexion d'une diode caractérisant la jonction PN, une source de courant caractérisant le photo-courant, une résistance série qui représente les pertes par effet Joule et une résistance shunt qui caractérise le courant de fuite à travers la diode.

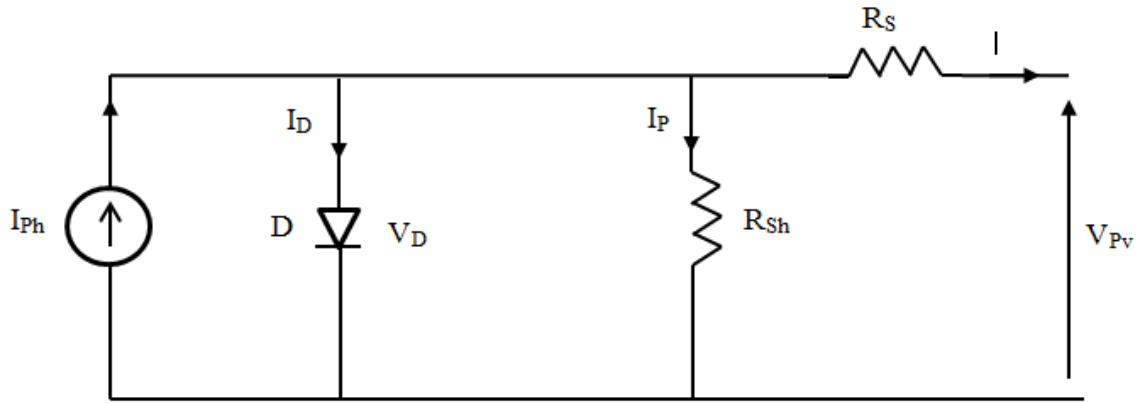


Figure III.2 : Modèle électrique équivalent à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

R_{sh} : résistance shunt,

R_s : résistance série

I_p : courant traversant la résistance shunt.

A partir du schéma précédent, le courant à la sortie de la cellule peut s'écrire :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_p \quad (III.4)$$

En remplaçant chaque courant par son expression, on aura l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{q V_D}{\alpha V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (III.5)$$

Avec :

$$V_T = \frac{N_s K T}{q} \quad (III.6)$$

V_T : représente le potentiel thermique,

N_s : nombre de cellules connectées en série.

III.2.2.2 Modèle à deux diodes

Dans ce modèle une diode supplémentaire est mise en parallèle au circuit précédent, comme le montre la figure (III.3). C'est un circuit réalisé par une connexion en parallèle de deux diodes ayant chacune d'elles un courant de saturation.

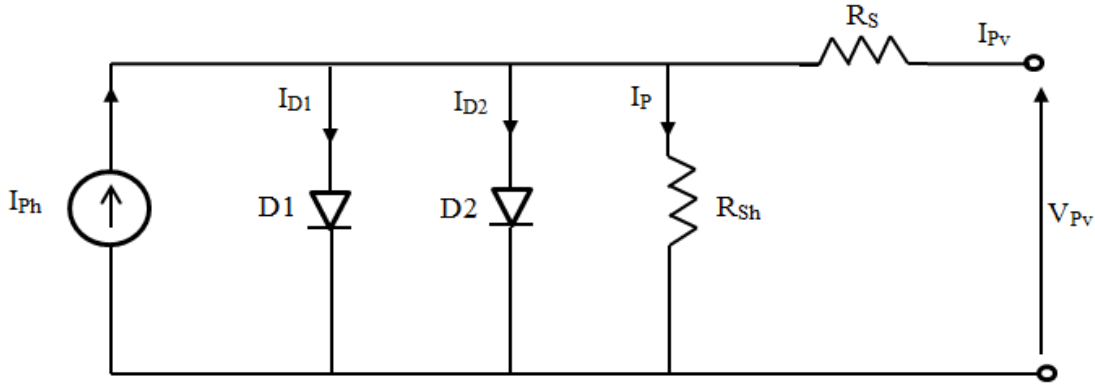


Figure III.3 : Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.

Avec :

I_{D1} : courant de saturation traversant la diode D1,

I_{D2} : courant de saturation traversant la diode D2.

Le courant généré par cette schématisation est donné par l'expression suivante :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_P \quad (\text{III.7})$$

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_{01} \left(e^{\frac{qV_D}{\alpha_1 V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{qV_D}{\alpha_2 V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (\text{III.8})$$

Et comme :

$$I_{01} = I_{02} = I_0 \quad (\text{III.9})$$

$$V_{T1} = V_{T2} = V_T \quad (\text{III.10})$$

A partir des équations (III.9) et (III.10), on obtient finalement :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left[\left(e^{\frac{qV_D}{\alpha_1 V_T}} - 1 \right) + \left(e^{\frac{qV_D}{\alpha_2 V_T}} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (\text{III.11})$$

III.3. Simulation d'une cellule photovoltaïque

Afin de mesurer les performances énergétiques d'une cellule photovoltaïque, on a visualisé les caractéristiques fondamentales déterminant son comportement sous conditions météorologiques standards (éclairage et température). En se référant aux équations (III.5) et

(III.11), on a simulé les deux modèles d'une cellule photovoltaïque sous le logiciel Matlab/Simulink.

Les valeurs numériques de la cellule utilisée sont regroupées dans le tableau III.1 :

Paramètres	Symboles	Valeurs
Température [°C]	T_{ref}	25
Eclairement [w/m^2]	E_{ref}	1000
Tension de circuit ouvert [V]	V_{oc}	0.61
Courant de court-circuit nominal [A]	I_{scn}	4.75
Résistance série [Ω]	R_s	0.019
Résistance shunt (parallèle) [Ω]	R_p	30
Coefficient de température du courant de court-circuit [mA/K]	K_i	$0.65 \cdot 10^{-3}$
Coefficient de température de la tension de circuit ouvert [mV/K]	K_v	-0.080
Facteur d'idéalité de la diode	a	1.3
Charge d'un électron [C]	q	$1.6 \cdot 10^{-19}$
Energie de gap [ev]	E_g	1.12
Constante de Boltzmann [J/K]	K	$1.38 \cdot 10^{-23}$

Tableau III.1 : Paramètres de la cellule photovoltaïque [4].

Le schéma de simulation de la cellule photovoltaïque obtenu sous Matlab est représenté dans la figure (III.4).

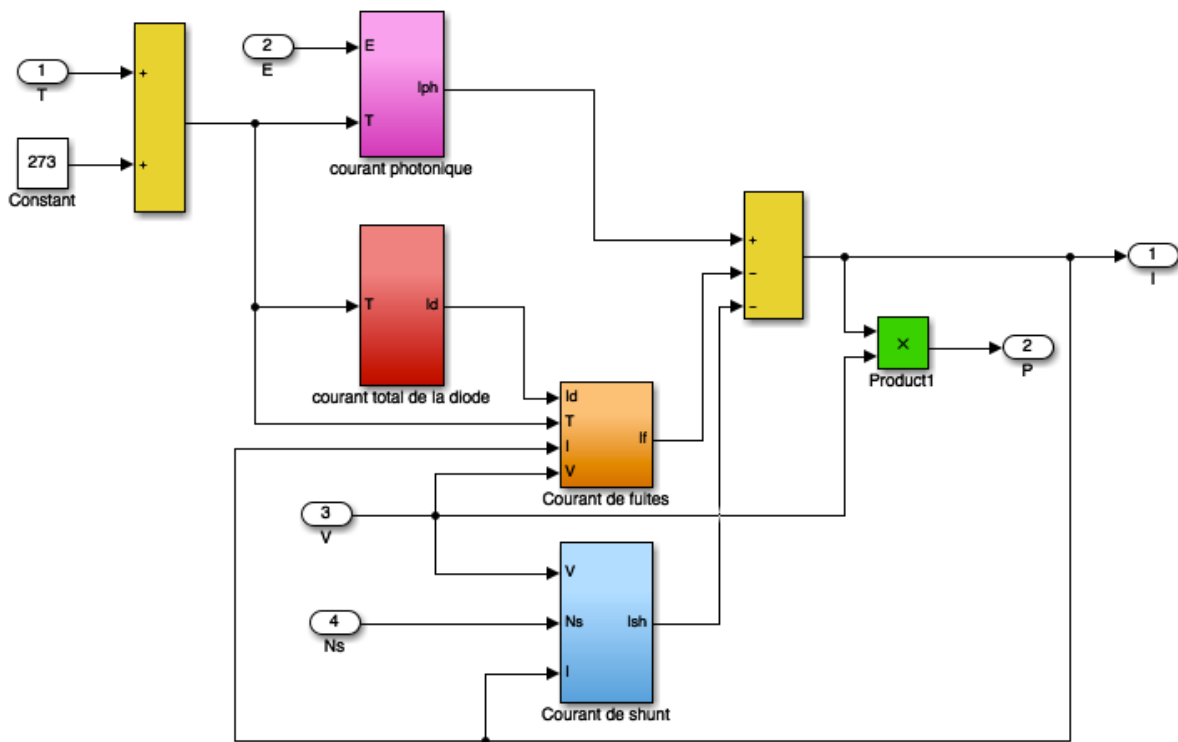


Figure III.4 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque.

Les blocs du schéma de simulation de la cellule PV sont détaillés dans l'annexe A.

III.3.1. Résultats de simulations

III.3.1.1. Caractéristique courant-tension

La figure (III.5) représente la courbe du courant en fonction de la tension $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque obtenue pour un éclairement de référence 1000 w/m^2 et une température de 25°C pour les modèles à une seule diode et à deux diodes.

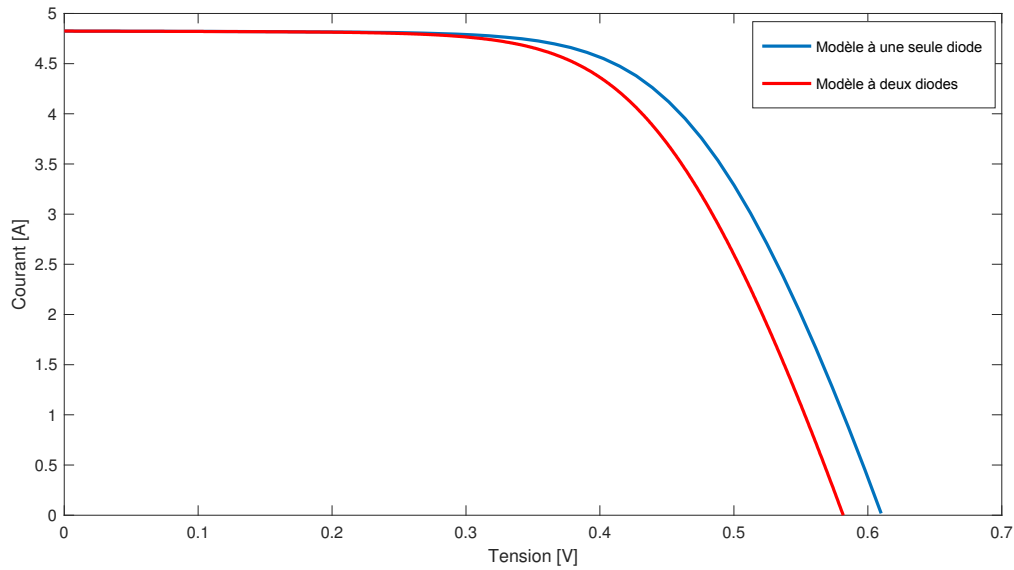


Figure III.5 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

La cellule se comporte comme une source d'énergie dont la partie horizontale correspond au fonctionnement d'un générateur de courant, et la partie verticale au fonctionnement d'un générateur de tension tout en passant par un point maximum.

Néanmoins, on note un léger décalage entre les caractéristiques des deux modèles, où le courant du modèle à deux diodes s'annule à une tension inférieure à celle du modèle à une seule diode, ce qui entraîne l'apparition de deux points de puissance maximale.

III.3.1.2. Caractéristique puissance-tension

La figure (III.6) représente une autre caractéristique décrivant le comportement d'une cellule photovoltaïque pour les deux modèles précédemment étudiés.

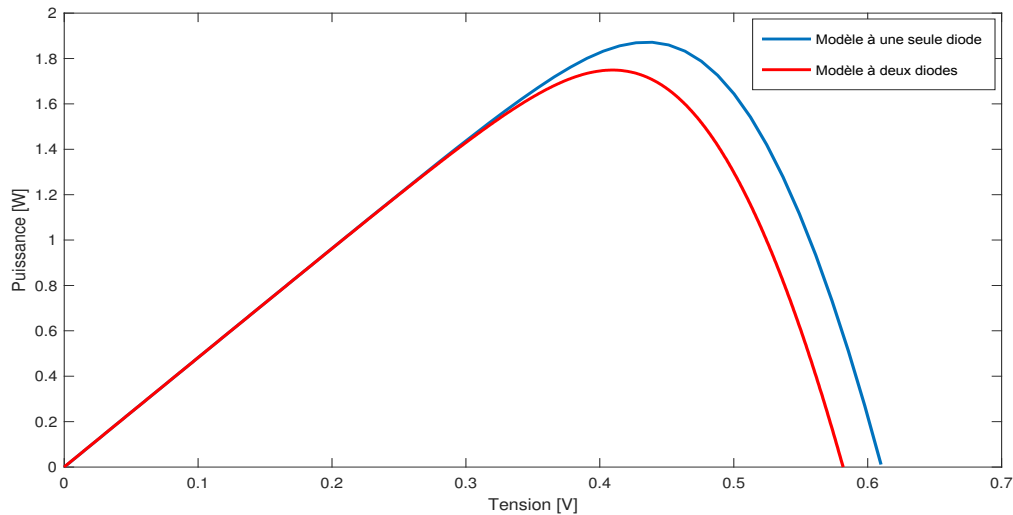


Figure III.6 : Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

On constate que pour le modèle à deux diodes, la puissance générée par la cellule est légèrement inférieure que celle du modèle à une seule diode, et cela peut être dû aux pertes supplémentaires causées par les diodes.

III.4. Simulation d'un générateur

Comme on l'a cité dans le chapitre II, un générateur photovoltaïque représente une association de plusieurs cellules en série, en parallèle ou en série-parallèle.

Le schéma de simulation sous Matlab/Simulink représentant un générateur photovoltaïque contenant N_s cellules en série est celui de la figure (III.7) :

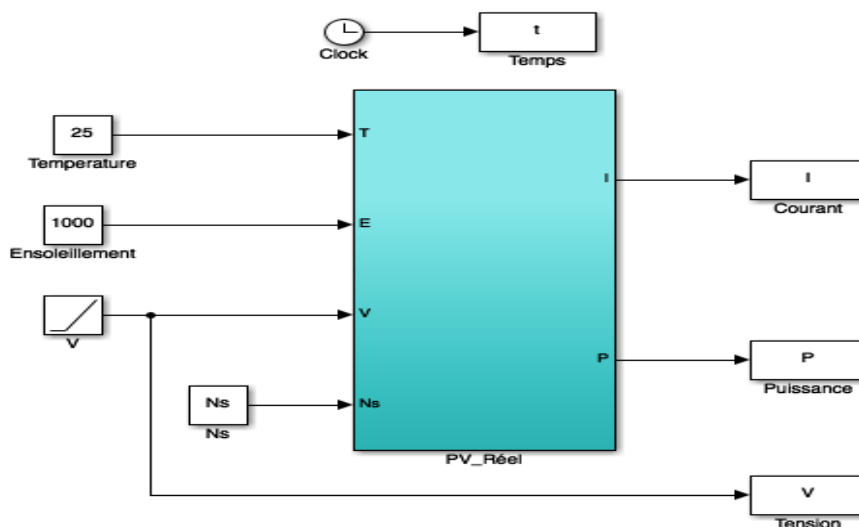


Figure III.7 : Schéma de simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

Le bloc PV_Réel de la figure (III.7) représente la cellule photovoltaïque détaillée dans la figure (III.4) auquel on a ajouté un paramètre qui est le nombre de cellules en série noté N_s afin d'obtenir le générateur PV.

Les figures (III.8) et (III.9) représentent les nouvelles caractéristiques obtenues pour un groupement de 36 cellules en série sous un éclairement et une température constants.

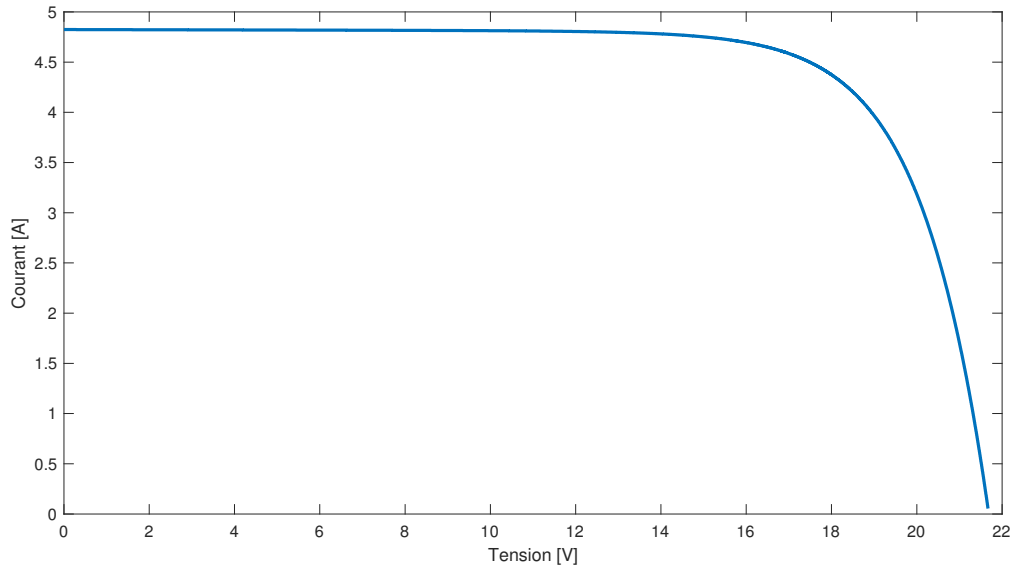


Figure III.8 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV de 36 cellules en série.

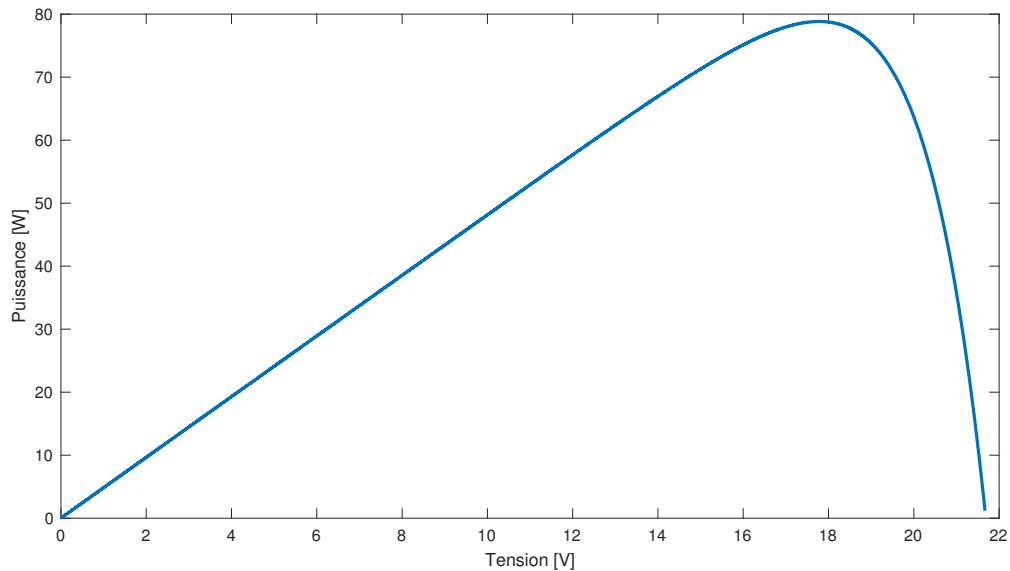


Figure III.9 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV de 36 cellules en série.

Pour N_s cellules en série, la tension augmente de N_s fois la tension d'une seule cellule, ce qui a pour effet d'augmenter la puissance générée par le générateur PV.

III.5. Influence de la température

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule PV et son rendement. La température d'une cellule PV peut parfois atteindre les 70 °C dans la journée [41].

Les figures (III.10), (III.11) et (III.12) montrent l'influence de la température sur les caractéristiques du générateur PV et sur la puissance extraite du générateur.

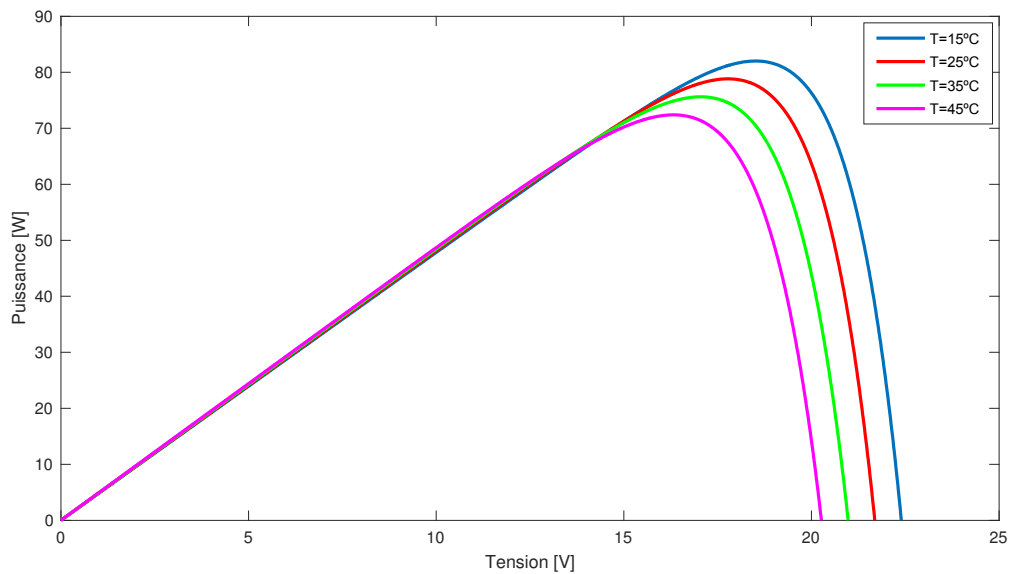


Figure III.10 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV pour différentes températures.

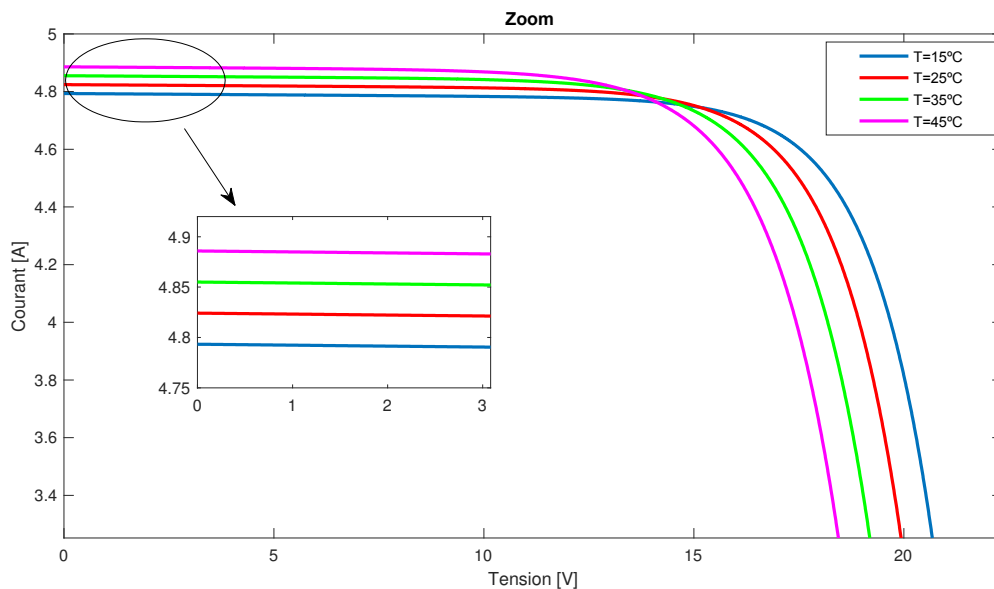


Figure III.11 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV pour différentes températures.

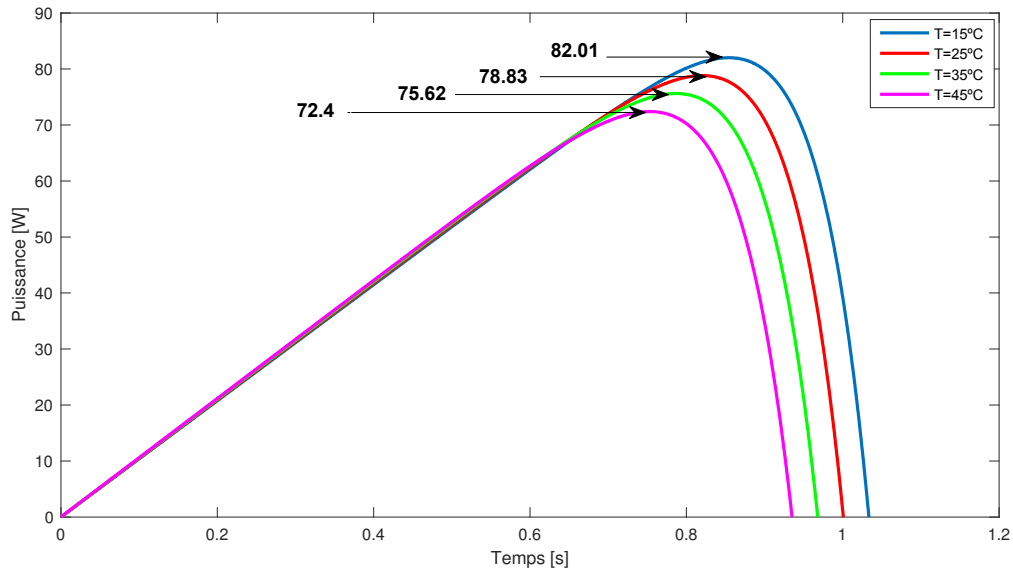


Figure III.12 : Variation de la puissance en fonction du temps en tenant compte de la variation de la température.

Les figures (III.10), (III.11) et (III.12) montrent que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert ainsi que de la puissance maximale, et une augmentation du courant de court-circuit, ce qu'on peut expliquer par une meilleure absorption de la lumière et une baisse de l'énergie de gap lorsque la température augmente. L'effet de la température sur la puissance extraite du panneau on peut le constater à partir de la figure (III.13).

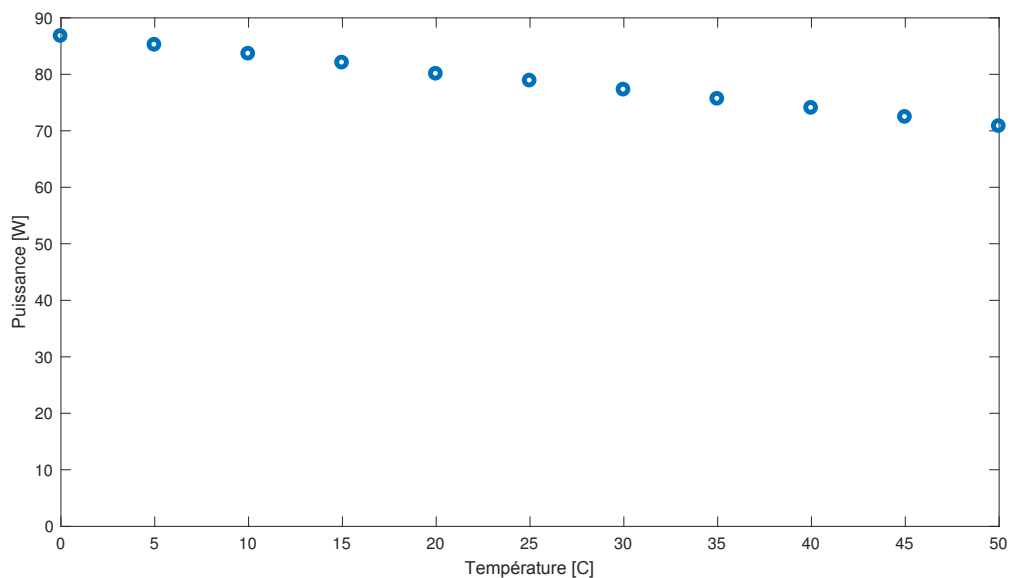


Figure III.13 : Effet de la température sur la puissance du panneau PV.

III.6. Influence de l'éclairement

Bien entendu la production photovoltaïque d'un panneau dépend directement du flux lumineux reçu, puisque c'est sa source d'énergie [61].

Les figures (III.14), (III.15) et (III.16) illustre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques d'un générateur PV et sur sa puissance extraite.

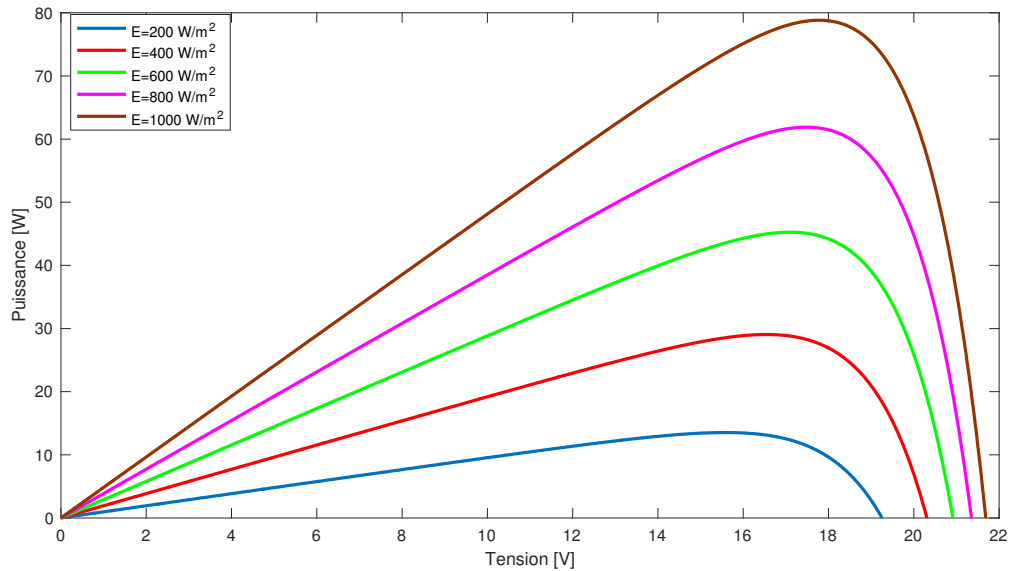


Figure III.14 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV pour différents éclairements.

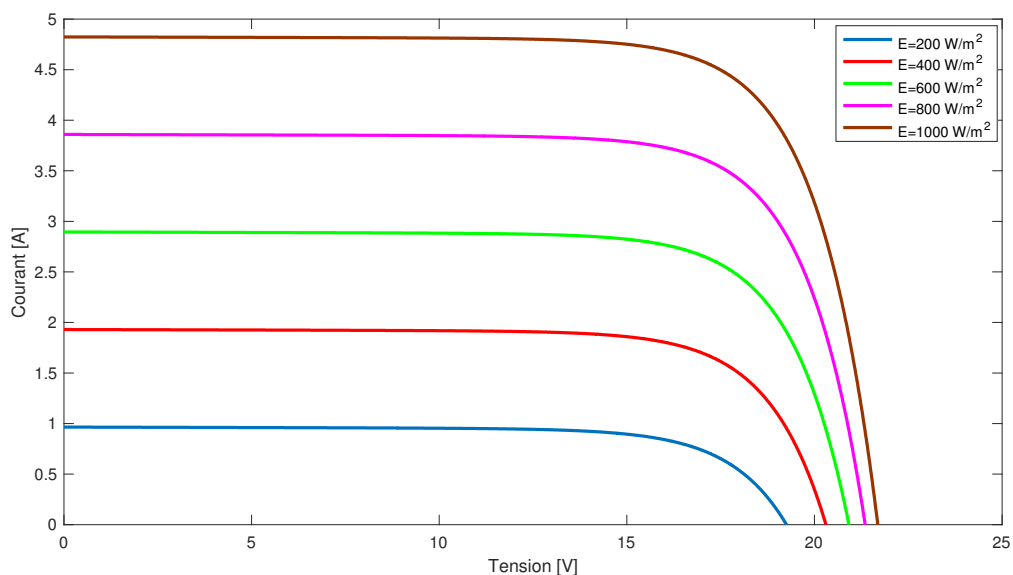


Figure III.15 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV pour différents éclairements.

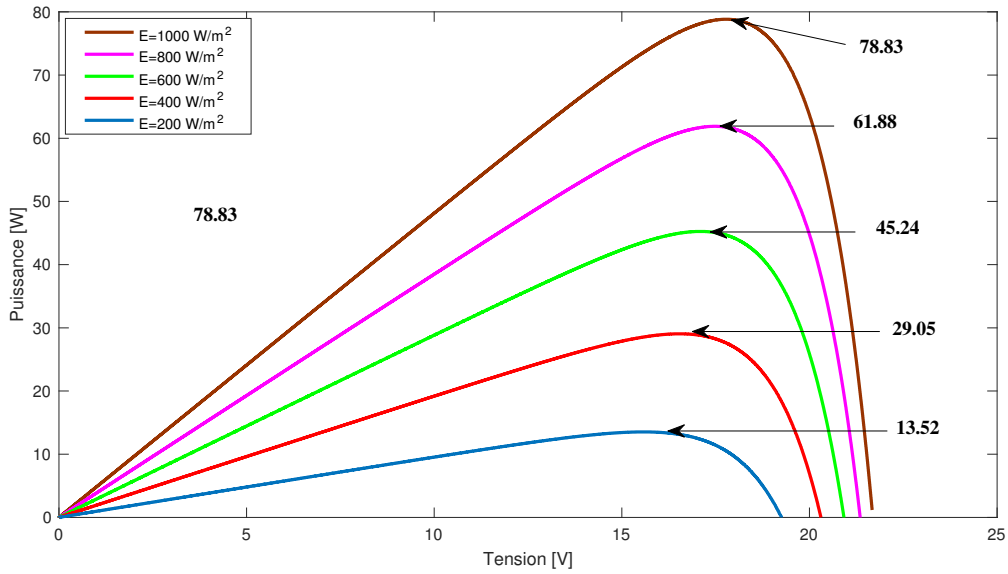


Figure III.16: Variation de la puissance en fonction de la tension en tenant compte de la variation de l'ensoleillement.

Les figures (III.13), (III.14) et (III.15) montrent que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant générée par le panneau PV et une légère augmentation au niveau de la tension du circuit ouvert, ce qui résulte une puissance importante. On constate donc que le courant est directement proportionnel au rayonnement par contre la tension est moins dégradée lorsque la lumière baisse. Cet effet de l'ensoleillement on peut le constater à partir de la figure (III.16).

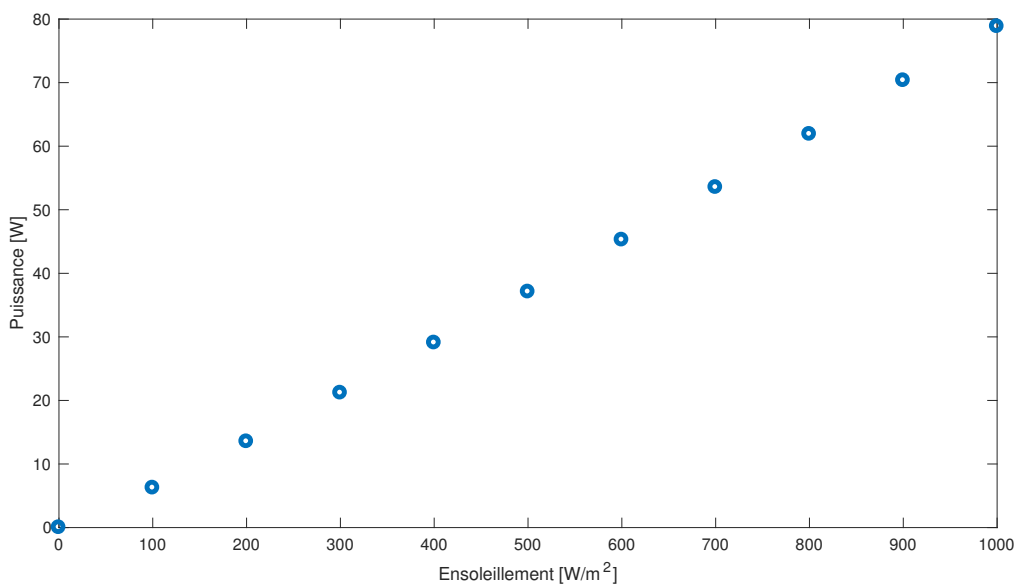


Figure III.17 : Effet de l'ensoleillement sur la puissance du panneau.

III.7. Conclusion

Ce chapitre était consacré à la modélisation et à la simulation d'un système photovoltaïque. Pour ce faire on a débuté par la présentation des circuits équivalents d'une cellule PV pour exprimer les équations régissant chaque circuit. Par la suite, on a effectué la simulation sous Matlab d'une cellule puis d'un générateur PV. Cela nous a permis de relever les différentes caractéristiques qui s'y rapportent.

Dans le chapitre suivant, on se consacrera à la commande MPPT et à son implémentation.

Chapitre IV

Poursuite du point de puissance maximale

IV.1. Introduction

Pour qu'un système photovoltaïque puisse fonctionner à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est dite commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) dont la traduction en français est la poursuite de puissance maximale.

La commande MPPT est un dispositif ou une fonction qui cherche constamment le point de fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque afin d'extraire le maximum de sa puissance [66]. Le MPPT utilise différents types de circuits de contrôle ou logique pour chercher le point de fonctionnement optimal, afin de permettre au convertisseur d'extraire le maximum de puissance du panneau solaire [28]. Le principe de ces commandes est basé sur la recherche du point de puissance maximale (PPM).

Par conséquent, plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie. Dans la littérature, on trouve des algorithmes basés sur les méthodes telles que ; Hill Climbing, Logique floue, Incrémentation de Conductance, Perturbe and Observe, fraction de court-circuit, ...

IV.2. Principe de la recherche du point de puissance maximale (PPM)

Le principe de fonctionnement de la commande MPPT est d'effectuer à la fois une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une bonne adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge afin de transférer le maximum de puissance produite vers la charge. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique (DC-DC) (figure IV.1) permettant de faire une adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge alimentée de manière que la puissance générée correspond à sa valeur maximale [43].

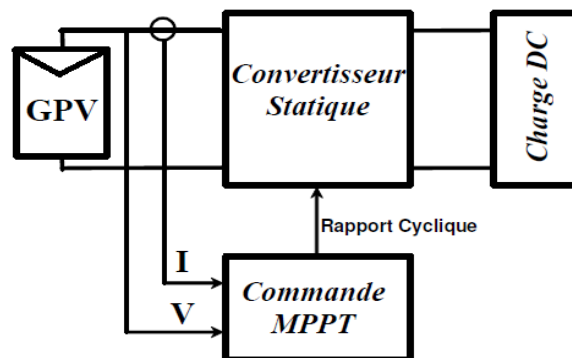


Figure IV.1 : Schématisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec un

convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT [60].

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les conditions météorologiques et la variation brutale de la charge.

IV.3. Types de commande MPPT

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de recherche du point de puissance maximale, on présente dans ce qui suit les trois méthodes les plus utilisées dans la littérature.

IV.3.1. Principe de la méthode Hill Climbing

La technique de la commande ‘Hill Climbing’ consiste à perturber le rapport cyclique tout en perturbant la tension. Cette perturbation se traduit par un déplacement du point de fonctionnement le long de la caractéristique puissance-rapport cyclique du générateur photovoltaïque [60], comme le montre la figure (IV.2).

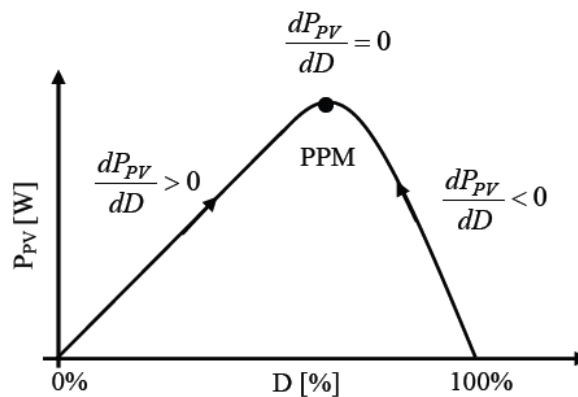


Figure IV.2 : Relation entre la puissance et le rapport cyclique [28].

Si avec une incrémentation positive du rapport cyclique on obtient une augmentation de la puissance, on en déduit que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM et que le sens de la perturbation doit être maintenu [60].

Dans le cas contraire, le point de fonctionnement se situe à droite du PPM et que le sens de la perturbation doit être inversé [60].

La variable ‘slope’ prend une valeur de (1) ou (-1) suivant la direction de recherche pour augmenter la puissance et ‘a’ est la variable d’incrément du rapport cyclique [28].

L’organigramme de la méthode Hill Climbing est montré dans la figure (IV.3).

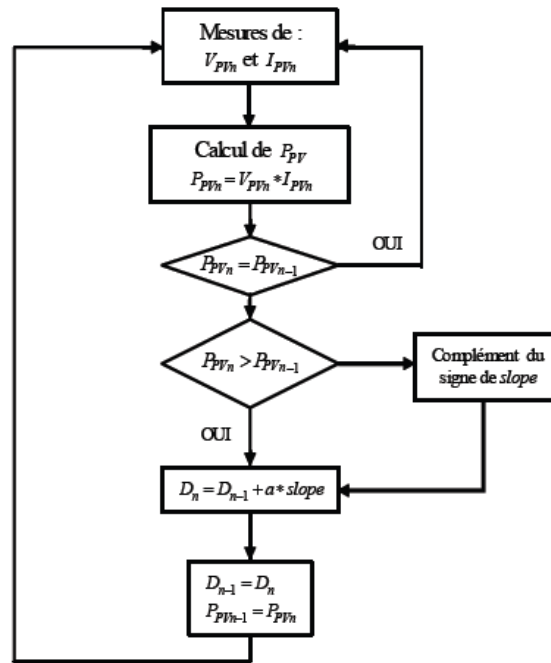


Figure IV.3 : Organigramme de la méthode Hill Climbing [60].

L'avantage de cette méthode est le fait qu'on a pas besoin de connaître la caractéristique réelle du courant et de la tension du générateur photovoltaïque.

IV.3.2. Principe de la méthode 'Perturb and Observe'

La méthode Perturb and Observe (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche du point de puissance maximale grâce à sa simplicité [12].

Comme son nom l'indique la méthode (P&O) consiste à perturber avec une amplitude faible la tension à la sortie du panneau autour de sa valeur initiale, ensuite analyser ou observer l'impacte de ce changement sur la puissance obtenue du panneau [51].

La figure (IV.4) montre l'organigramme de la méthode (P&O).

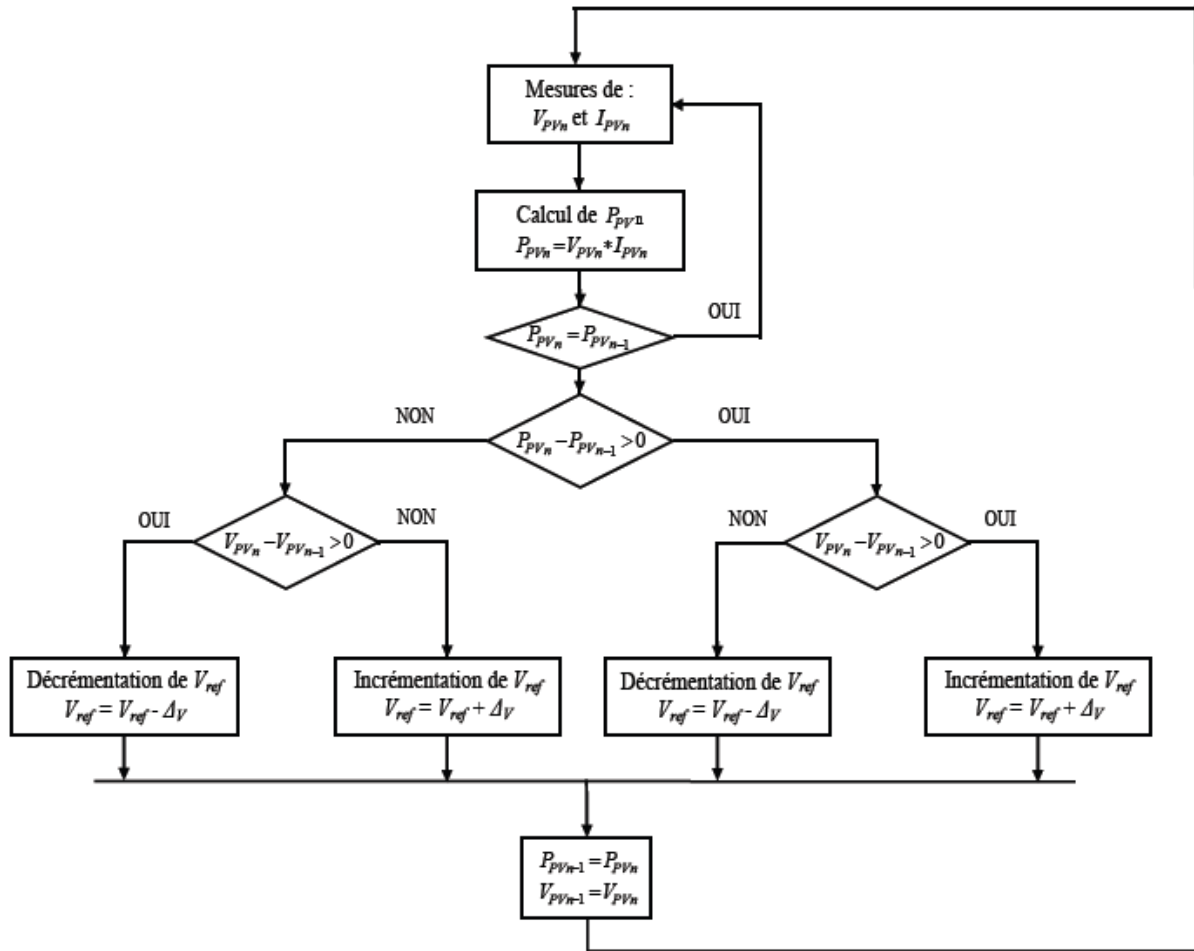


Figure IV.4 : Organigramme de la méthode (P&O) [60].

D’après cette figure, la tension V_{PVn} et le courant I_{PVn} sont mesurés pour calculer la puissance de sortie P_{PVn} qui sera comparée à la puissance P_{PVn-1} de la dernière mesure. Si la puissance de la sortie a augmenté la perturbation va être augmentée, et si la puissance a diminué depuis la dernière mesure la perturbation va être diminuée.

L’avantage de cette méthode c’est qu’elle peut dépister le PPM même lors des faibles variations de l’éclairement et de la température.

IV.3.3. Principe de la méthode d’incrément de la conductance

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de la conductance G du panneau et la position du point de puissance maximale [43]. Cette conductance est définie par l’équation :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (IV.1)$$

Et son incrémentation peut être définie par l'équation :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad (IV.2)$$

Ainsi, l'algorithme d'incrément de la conductance est basé sur le fait que le PPM n'est atteint que si $\frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}}$ est nul. D'autre part, lorsque la dérivée est non nulle, le point de puissance maximale se trouve à gauche ou à droite du point de puissance maximale, comme le montrent les expressions suivantes :

- $\frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}} < 0$ pour $V > V_{mp}$: le point de fonctionnement se trouve sur la droite du PPM,
- $\frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}} = 0$ pour $V = V_{mp}$: le point de fonctionnement se trouve au point de puissance maximale,
- $\frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}} > 0$ pour $V < V_{mp}$: le point de fonctionnement se trouve sur la gauche du PPM.

Sachant que :

$$P = V * I \quad (IV.3)$$

La relation entre la conductance et la dérivée de la puissance $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ peut être décrite par l'équation (IV.4) :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d[I_{PV} * V_{PV}]}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} * \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} * \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad (IV.4)$$

D'où :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + \Delta G \quad (IV.5)$$

D'où on peut écrire d'autres nouvelles conditions sur la variation de la conductance, telles que :

- Si $\Delta G > -G$: le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM,
- Si $\Delta G = -G$: le point de fonctionnement se trouve sur le PPM,
- Si $\Delta G < -G$: le point de fonctionnement se trouve sur la droite du PPM.

A partir des équations précédentes, on peut déduire alors que le PPM peut être traqué en comparant à chaque fois (instant) la valeur de la conductance G avec celle de l'incrément ΔG .

La figure (IV.5) représente l'organigramme de l'algorithme de la méthode Incrémentation de la conductance (Inc.Con).

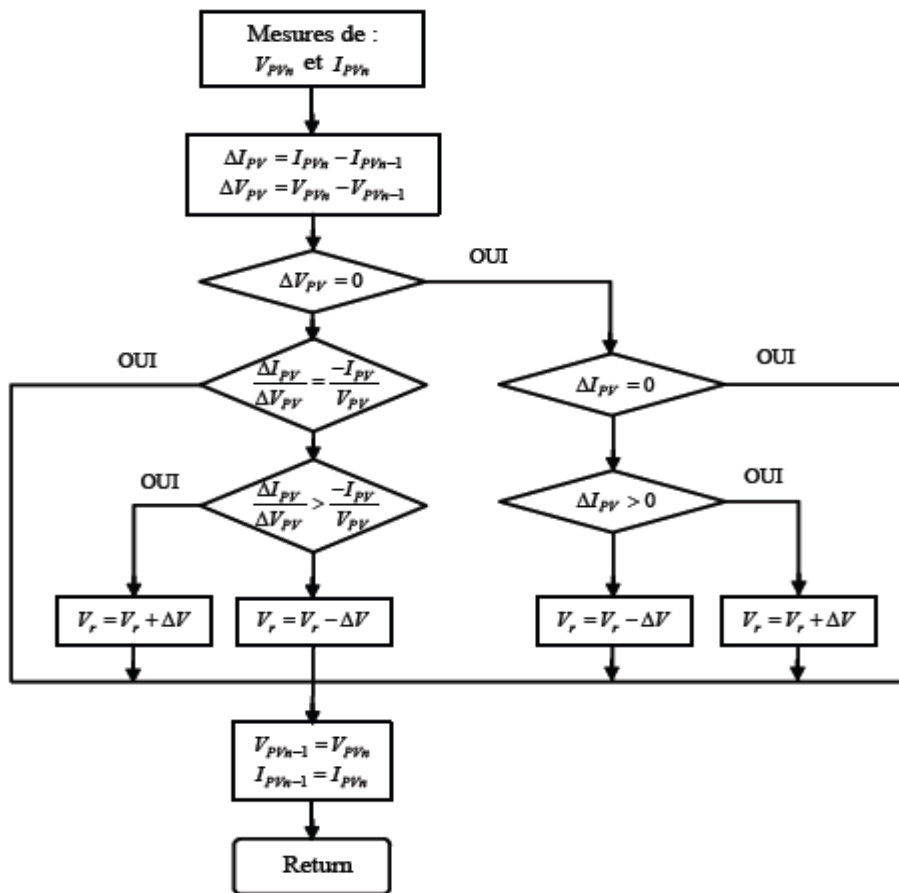


Figure IV.5 : Organigramme de la méthode Incrémentation de la conductance [60].

Si la condition $\Delta G = -G$ est atteinte, alors la tension de référence V_r correspond à la tension optimale V_{opt} .

Si le PPM est atteint, le point de fonctionnement va être maintenu jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{pv} , ce qui signifie un changement au niveau des conditions météorologiques et un nouveau PPM apparaît qu'on doit rechercher. Dans ce but, l'algorithme de cette méthode incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à l'atteinte du PPM.

IV.4. Simulation de la recherche du PPM

On présente dans ce qui suit l'une des méthodes citée dessus, la méthode 'Perturb and Observe'.

IV.4.1. Algorithme (P&O)

La figure (III.16) montre les résultats de simulation de la caractéristique puissance-tension du générateur photovoltaïque pour une température fixe ($T=25\text{ °C}$) et pour différentes valeurs de l'éclairement sans l'utilisation de la commande MPPT. Les points de puissance maximale correspondant à chaque valeur de l'ensoleillement sont repérés sur la courbe.

Pour montrer l'intérêt et l'influence de la commande MPPT sur la puissance extraite du panneau, on a utilisé l'algorithme de la méthode (P&O) pour simuler le fonctionnement du PV pour un ensoleillement variable. L'implémentation de l'algorithme (P&O) sous Matlab/Simulink est représentée sur la figure (IV.6).

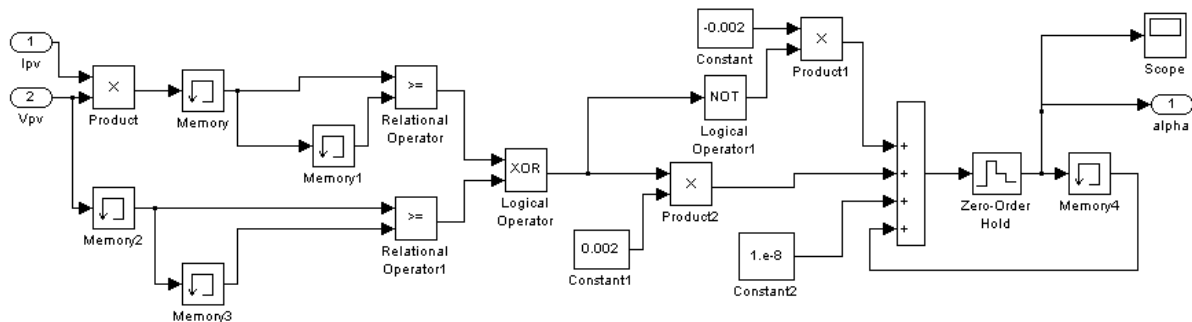


Figure IV.6 : Implémentation de la méthode (P&O) sous Matlab/Simulink.

Après on a connecté le modèle du générateur photovoltaïque à celui du modèle MPPT comme le montre la figure (IV.7) :

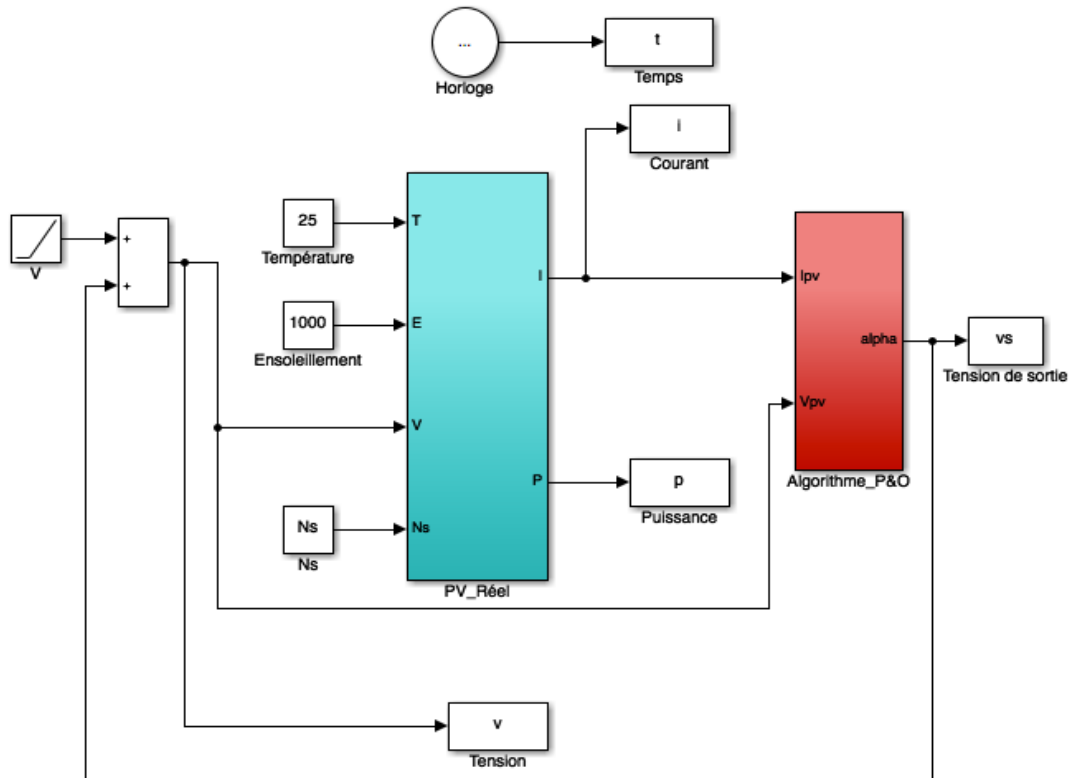


Figure IV.7 : Connection de l'ensemble générateur et MPPT sous Matlab/Simulink.

La puissance obtenue en fonction du temps pour une température et un ensoleillement fixes ($T=25\text{ °C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$) est illustrée sur la figure (IV.8)

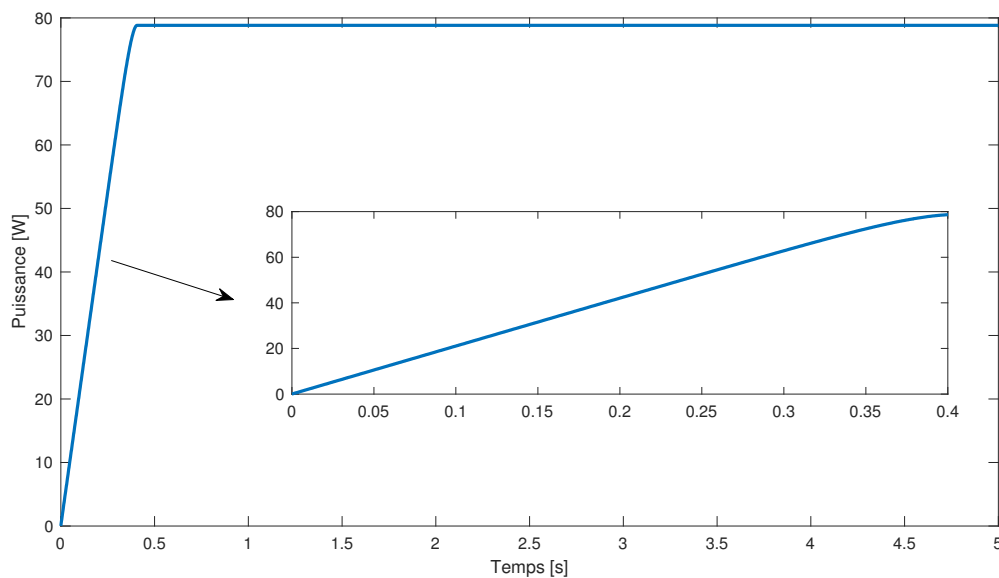


Figure IV.8 : Evolution de la puissance du GPV en fonction du temps pour $T=25\text{°C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$.

On remarque que durant l'intervalle [0 s-0.4 s] la puissance du générateur

IV.4.2. Effet de l'ensoleillement sur la puissance du générateur

Afin de visualiser l'effet de l'ensoleillement sur la puissance extraite du générateur photovoltaïque, on a introduit un ensemble de variation du l'éclairement sous forme des échelons d'amplitudes différentes et à des instants différents, comme le montre la figure (IV.9).

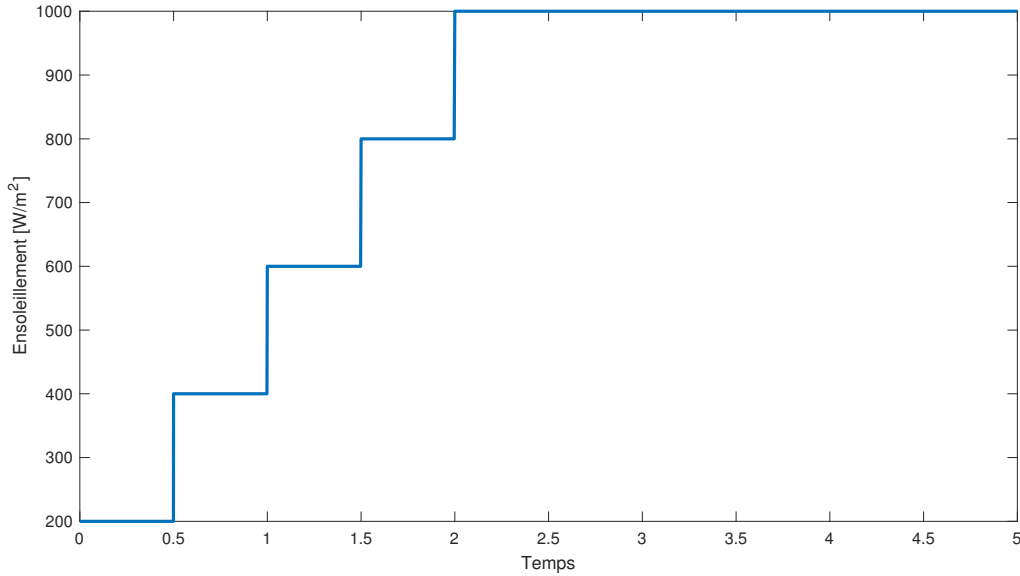


Figure IV.9 : Variation de l'ensoleillement en fonction du temps.

Pendant chaque changement de l'éclairement, le système converge vers un nouveau PPM qui correspond à l'éclairement imposé (figure IV.10).

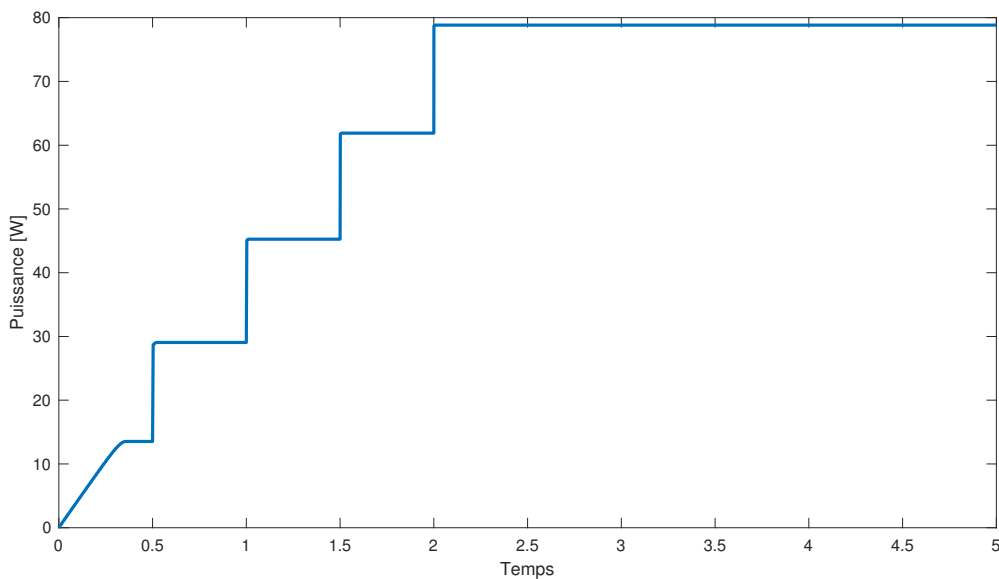


Figure IV.10 : La caractéristique P(V) en utilisant la commande MPPT.

La figure (IV.10) montre que pour chaque instant où l'ensoleillement change, la commande MPPT suit ce changement.

En comparant les résultats obtenus avant l'introduction du MPPT (figure III.16) et après son introduction, on trouve que pour chaque éclairement on a aboutit à des résultats similaires. On peut donc conclure que la commande MPPT suit le point de puissance maximale pour toute variation de l'éclairement, ainsi il permet d'extraire le maximum d'énergie du générateur photovoltaïque.

Pour que la variation de l'éclairement soit une variation logique et naturel (correspond aux variations réelles), on a remplacé les échelons dans un premier temps par une fonction sinusoïdale qui oscille autour d'un éclairement $E=900 \text{ W/m}^2$. La nouvelle caractéristique P(V) obtenue est illustré sur la figure (IV.12).

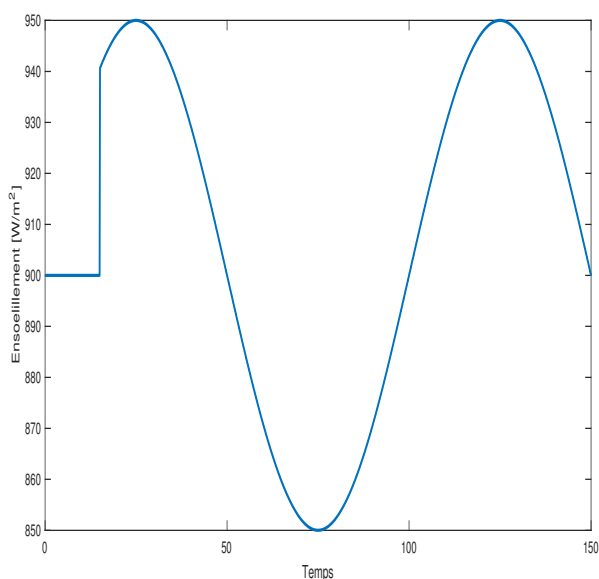


Figure IV.11 : Variation de l'éclairement sous forme d'une sinusoïdal.

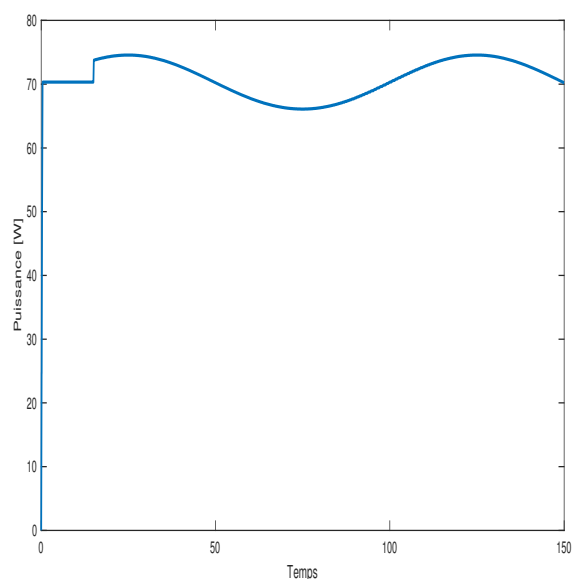


Figure IV.12 : Evolution de la caractéristique P(t) pour un éclairement variable.

Sur la figure (IV.11), on a introduit un échelon d'amplitude 900 W/m^2 dans un intervalle de [0-15] suivi d'un signal sinusoïdal oscillant entre un éclairement de 850 W/m^2 et 950 W/m^2 comme une variation de l'ensoleillement afin de montrer la poursuite du PPM par la commande MPPT dans chaque instant, comme le montre la figure (IV.12).

Le tableau (IV.1) illustre les résultats de comparaison avant et après l'introduction du MPPT.

Temps [s]	20	40	60	80	100
Ensoleillement [W/m^2]	947.6	929.4	870.6	852.4	900
Puissance maximale [W] sans MPPT	74.3	72.8	67.8	66.3	70.3
Puissance maximale [W] avec MPPT	74.3	72.7	67.7	66.3	70.3

Tableau IV.1 : Puissance maximale avant et après l'introduction du MPPT pour un ensoleillement variable sous forme sinusoïdale.

Dans un second temps, on remplace les échelons par un signal sous forme de dents de scie (repeating sequence) (figure IV.14). Le résultat obtenu est illustré par la figure (IV.15).

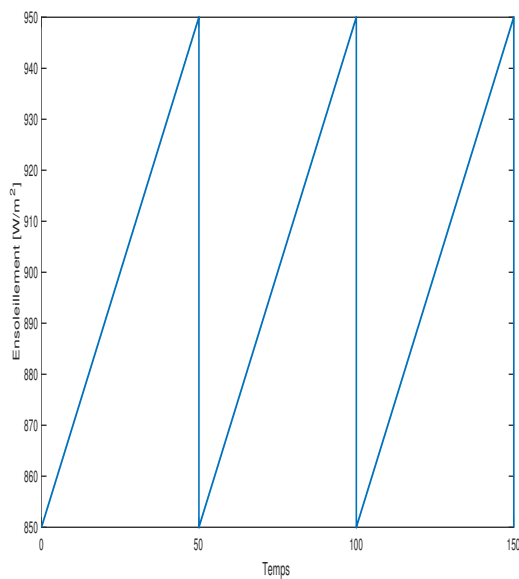


Figure IV.13 : Variation de l'éclairement sous forme de dents de scie.

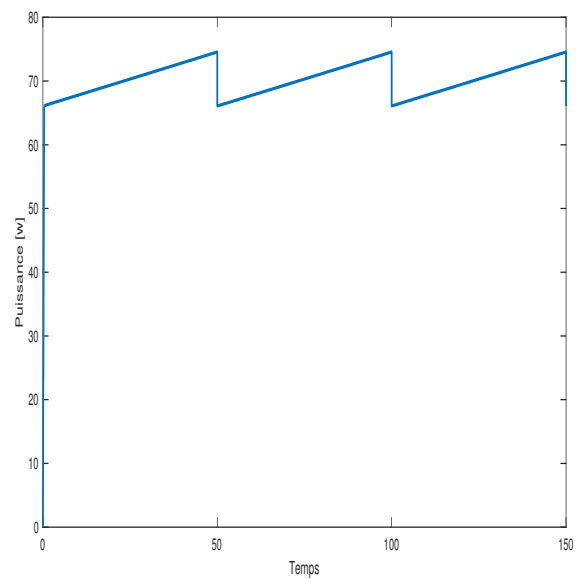


Figure IV.14 : L'évolution de la caractéristique $P(t)$ en fonction l'éclairement.

La figure (IV.14) montre bien la poursuite du point de puissance maximale à tous changement de l'ensoleillement.

Le tableau ci-dessous montre les résultats obtenus après et avant l'introduction du MPPT.

Temps [s]	20	40	60	80	100
Ensoleillement [W/m^2]	947.6	929.4	870.6	852.4	900
Puissance maximale [W] sans MPPT	74.3	72.8	67.8	71.3	74.3
Puissance maximale [W] avec MPPT	74.4	72.8	67.7	71.1	74.5

Tableau IV.2 : Puissance maximale avant et après l'introduction du MPPT pour un ensoleillement variable sous forme de dents de scie.

On remarque que le régulateur MPPT suit l'évolution de la puissance pour toute variation de l'ensoleillement et que pour chaque variation un nouveau PPM apparaît.

La figure (IV.15) illustre l'image d'un profil réel de la variation de l'éclairement pendant 24H qui traduit un bon moyen pour tester la commande MPPT.

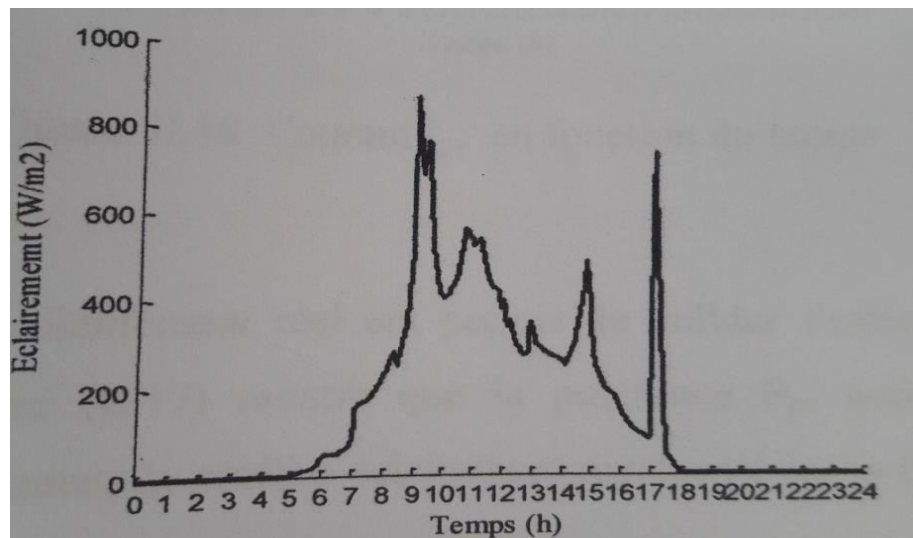


Figure IV.15 : Variation de l'ensoleillement.

Pour réaliser ce modèle sur MATLAB/Simulink, on a introduit quelques points principaux sous forme de deux vecteurs, l'un étant les valeurs du temps sur l'axe des abscisses et le second étant les valeurs de l'ensoleillement sur l'axe des ordonnées et on a abouti à ce résultat illustré sur la figure (IV.16)

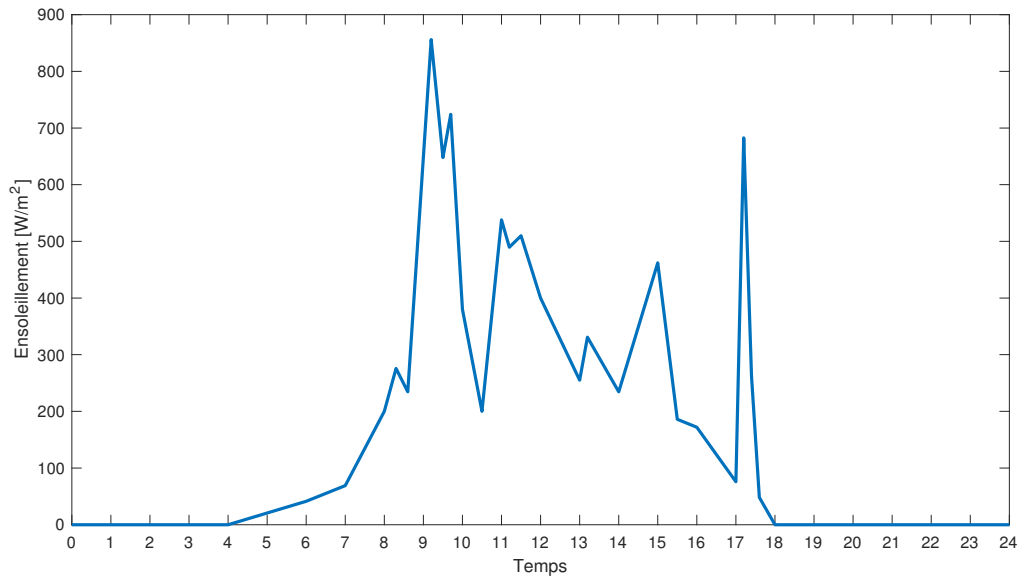


Figure IV.16 : Modèle d'une variation de l'ensoleillement pendant une journée.

La figure ci-dessous montre les résultats obtenus après l'introduction du modèle cité dessus.

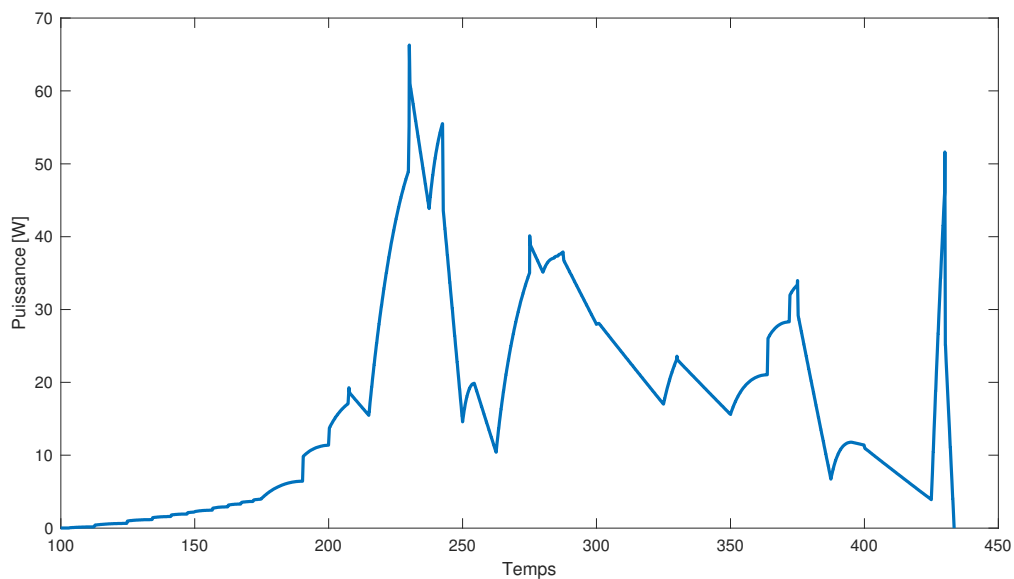


Figure IV.17: Evolution de la caractéristique $P(t)$ pour un éclairement variable.

IV.4.3. Influence de la température sur la puissance du générateur

La conversion photovoltaïque est une application énergétique dépendante de la température. Pendant la journée, les panneaux sont exposés à des températures variables qui peuvent atteindre 70 °C.

La figure (III.10) montre des caractéristiques $P(V)$ mesurées à différentes températures sous un éclairage constant (1000W/m^2). On remarque une diminution de la puissance maximale avec chaque augmentation de la température.

Pour varier les températures, on a introduit les variations sous forme d'une fonction sinusoïdale oscillant autour d'une température $T=30\text{ }^\circ\text{C}$, d'amplitude 20 (figure IV.20).

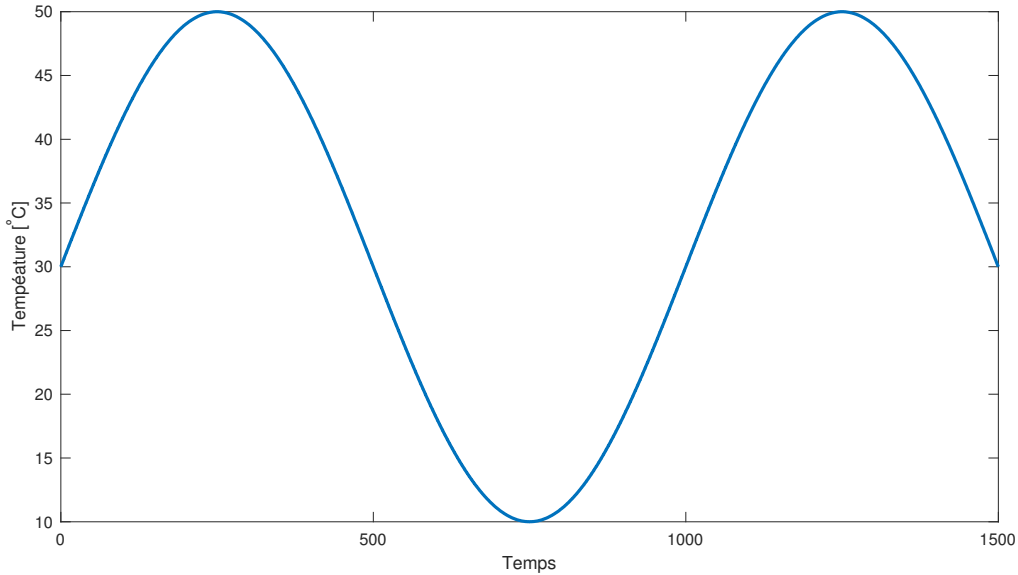


Figure IV.18 : Variation de la température en fonction du temps.

La figure et le tableau ci-dessous montrent l'évolution de la puissance en fonction du temps en variant la température.

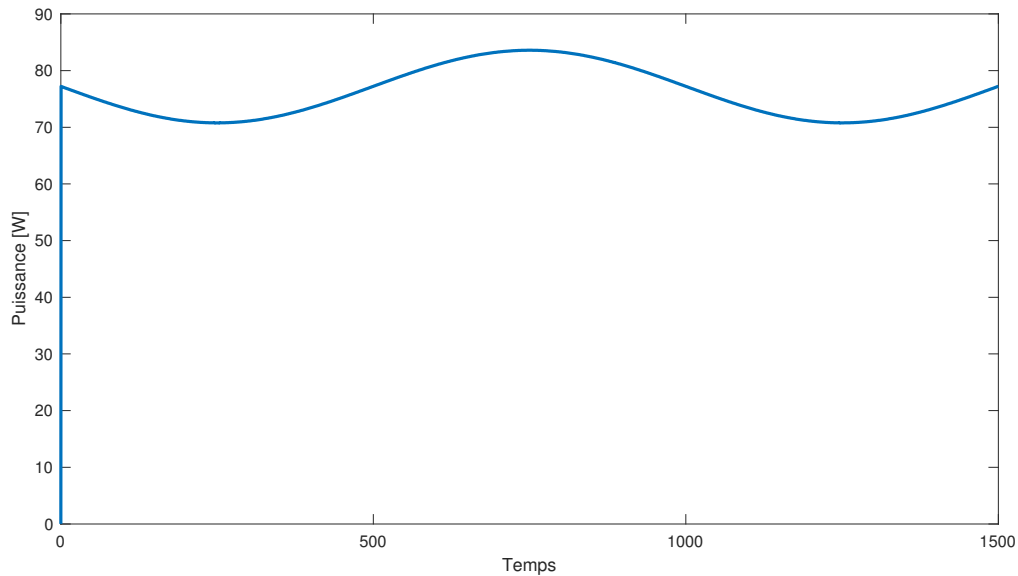


Figure IV.19 : Evolution de la puissance en fonction du temps en tenant compte de la variation de la température.

Temps [s]	250	500	750	916	1803
Température [°C]	50	30	10	20	40
Puissance maximale [W]	70.7	77.2	83.6	80.4	74.0

Tableau IV.3 : Variation de la puissance maximale en tenant compte de la variation de la température.

D'après ces résultats obtenus, on peut déduire que la température a un grand effet sur la puissance recueillie du panneau photovoltaïque et que la relation entre ces deux paramètres (puissance-température) est inversement proportionnelle.

IV.5. Conclusion

Dans la littérature, plusieurs types de commande MPPT sont étudiés. Dans ce chapitre, on a détaillé les techniques de commande les plus utilisées, à savoir la méthode Hill Climbing, Perturb and Observe et la méthode Incremental Conductance. Pour étudier et simuler le fonctionnement du système photovoltaïque choisi lors de son fonctionnement à sa puissance maximale, on a choisi la méthode Perturbe and observe (P&O). Les résultats de simulation sont donnés pour différentes valeurs de températures et d'ensoleillement.

Chapitre V

Effet de la température sur les performances du PV

V.1. Introduction

Habituellement dans les systèmes PV, pour extraire la puissance maximale, on utilise des techniques de commande externes en se basant sur la mesure de la tension et du courant délivrés par les panneaux. Ce sont les méthodes dites MPPT qu'on a présenté dans le chapitre IV.

Il existe un autre moyen d'augmenter (même légèrement), la puissance délivrée par un PV, c'est d'optimiser sa conception et les matériaux qui le composent. C'est ce qui est proposé dans plusieurs travaux de recherche, tels que : Koehl et Heck [41] ont démontré la modélisation de l'effet de l'éclairement et de la température sur les paramètres du modules PV. Skoplaki et Palyvos [64] ont dérivé un modèle PV pour simuler l'effet des variables climatiques. Dans ce qui suit on présentera la méthode proposée dans [78].

Selon le type de la cellule, un panneau photovoltaïque peut absorber 80% de la lumière solaire incidente, mais seulement la moitié peut être convertie en énergie électrique et le reste est converti en énergie thermique. L'augmentation de la température de la cellule causée par l'accumulation de cette énergie thermique est le facteur qui influence le plus sur les performances du panneau, en réduisant l'énergie électrique produite et le cycle de vie du panneau [78]. La température de fonctionnement de la cellule solaire peut atteindre 80 à 90 °C et même supérieure pendant la génération de l'énergie, ce qui engendre une diminution de la puissance électrique générée.

Pour cela, un système de matériaux à changement de phase photovoltaïque peut être développé pour réduire la perte de sortie de puissance dépendante de la température de la cellule ou l'isolation thermique de la feuille arrière des modules PV sur la température du module à partir d'un modèle dynamique photovoltaïque.

L'étude a pour but d'améliorer les performances de sortie du module solaire tout en améliorant la puissance électrique et l'efficacité électrique du module PV. Pour ce faire, le matériau de la feuille de fond qui est le TPT traditionnel (Tedlar-Polyester-Tedlar) est remplacé par le verre disposant d'une conductivité plus élevée, et cela sous des facteurs environnementaux variables.

V.2. Méthode de réalisation du modèle

Dans [78] les auteurs ont établi un modèle PV pour mesurer la puissance électrique en commençant par l'analyse du mécanisme de transfert de chaleur résultant de chaque structure de couche formant le PV. Ils ont construit par la suite un modèle thermique selon la loi de

conservation de l'énergie thermique et la méthode de capacité localisée. Ensuite, ils ont converti ce modèle thermique en un circuit équivalent de courant pour obtenir l'équation d'équilibre thermique de chaque structure de couche PV. Enfin, ils ont calculé l'équation différentielle sous MATLAB/Simulink.

Dans [78] les auteurs ont introduit des facteurs environnementaux locaux (température, vitesse de vent, rayonnement solaire) afin d'obtenir la température ambiante dynamique de chaque structure de couche, le rendement électrique dynamique et la puissance électrique. L'expérience a été faite pendant trois jours de chaque saison pour une année.

Pour valider le résultat de la modélisation dynamique du PV, ils ont utilisé pour cela un PV réel afin de garantir l'exactitude du modèle. Ils ont choisi le matériau de la feuille du fond approprié du PV en fonction des facteurs environnementaux locaux pour obtenir une conception optimale des paramètres de sortie du PV.

V.3. Configuration du module PV

En cas d'exposition directe à l'atmosphère, l'efficacité de la conversion photoélectrique diminue en raison de l'humidité, de la poussière et des pluies acides et endommage d'avantage la cellule solaire. Par conséquent, la cellule solaire doit être emballée comme PV par laminage avant l'utilisation. La figure (V.1) représente le schéma de la structure du système PV et ses composants.

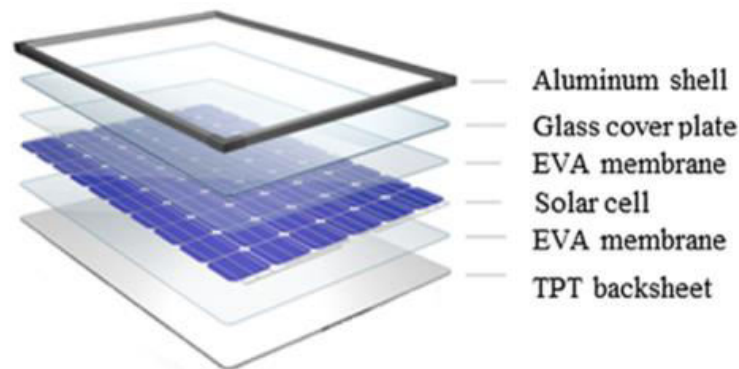


Figure V.1 : Structure d'un système PV [78].

Le système PV comporte :

- Aluminium shell, dont sa traduction en français est la coque en aluminium utilisée pour protéger le PV,
- Solar cell, ou une cellule solaire en français, utilisée pour absorber la lumière du soleil,
- EVA membrane Une membrane EVA (Ethylene Vinyl Acetate) transparente

- résistante au vieillissement est fixée sur le coté haut et bas de la cellule solaire,
- Glass cover plate ou une plaque de recouvrement en verre trempé à haute transmissivité et à faible teneur en fer résistant aux chocs,
- TPT backsheet ou un film composite TPT résistant à l'humidité comme feuille de fond.

La membrane EVA est laminée sur la plaque de recouvrement en verre, la cellule solaire et la feuille de fond TPT pour former le PV.

Le PV convertit une partie de la lumière solaire incidente en énergie électrique, et le reste de cette énergie incidente risque de réduire les performances du PV qui sont ; l'énergie électrique produite du panneau et l'efficacité électrique [74] [41].

L'efficacité électrique s'exprime par l'équation (V.1) et la puissance électrique par l'équation (V.2) :

$$\eta_e = \frac{P}{G A} \quad (V.1)$$

$$P = \int V_m I_m dt \quad (V.2)$$

Où G est le rayonnement solaire reçu par le PV, A est la surface du PV, V_m et I_m sont respectivement la tension et le courant au point de puissance maximale.

En se référant de la figure (III.12), la puissance électrique des cellules solaires diminue évidemment lorsque la température de fonctionnement des cellules augmente. La relation entre l'efficacité électrique des cellules et la température de la cellule solaire est exprimée par :

$$\eta_e = \frac{P}{G A} = \frac{P_{STC}}{G A} [1 - \beta(T_{PV} - 1)] = \eta_{STC} [1 - \beta(T_{PV} - 1)] \quad (V.3)$$

Où η_{STC} est l'efficacité mesurée selon le STC (Condition de test standard), β est le coefficient de température de la cellule solaire, T_{PV} est la température de la cellule solaire en (°C) et P_{STC} est la puissance électrique de sortie totale sous le STC.

V.4. Mécanisme de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est l'énergie calorifique transférée en raison de la différence de température selon trois modes [58] :

- Par conduction,
- Par convection,
- Par rayonnement.

Et chaque mécanisme de transfert de chaleur provoque des changements de température dans le module PV. Le flux de chaleur est exprimé par l'équation :

$$Q = \frac{\Delta T}{\theta} = G \Delta T \quad (V.4)$$

Où Q est le flux de chaleur en (W), ΔT est le changement de la température en ($^{\circ}\text{C}$) et θ est la résistance thermique en (K/W).

Si la conductance thermique et la différence de température de chaque mécanisme de transfert de chaleur sont connues, alors la température dynamique peut être obtenue en fonction du flux de chaleur provoqué par chaque mécanisme de transfert de chaleur [63].

V.4.1. Conduction de chaleur

Quand il y a une différence de température entre les objets, un flux de chaleur de haute température à basse température est généré. Le flux de chaleur est exprimé par l'équation :

$$q_x = \frac{T_2 - T_1}{\frac{L}{kA}} = \frac{\Delta T}{\theta} = G \Delta T \quad (V.5)$$

La conductance thermique du transfert de chaleur est exprimée par :

$$G_{\text{con}} = \frac{kA}{L} \quad (V.6)$$

Où k est le coefficient de conductivité thermique en (W/m.K) et L est la longueur du PV en (m).

V.4.2. Convection thermique

Le mécanisme de la convection thermique est généré lorsqu'il existe une différence de température entre un plan et un fluide de circulation. Le flux de chaleur est donné par :

$$q_x = h A \Delta T \quad (V.7)$$

Le coefficient de convection thermique (HCVC) est la somme du HCVC forcé ($h_{\text{forcé}}$) et du HCVC naturel (h_{naturel}). L'équation (V.7) devient :

$$q_x = (h_{\text{forcé}} + h_{\text{naturel}}) A \Delta T \quad (V.8)$$

La conductance thermique du transfert de chaleur est exprimée par :

$$G_{\text{cov}} = (h_{\text{forcé}} + h_{\text{naturel}}) A \quad (V.9)$$

V.4.3. Rayonnement thermique

Deux objets à différentes températures mettent en œuvre l'échange de chaleur en émettant un rayonnement thermique. Et comme la plage de la longueur d'onde de ce rayonnement est large (10^{-5} nm-1m), le rayonnement est divisé en rayonnement thermique à longueur d'onde courte et un rayonnement thermique à longueur d'onde longue [31].

V.5.3.1. Rayonnement de chaleur à longue longueur d'onde

Il se produit lorsque la longueur d'onde du flux de chaleur émis entre deux surfaces corporelles dépasse 2500 nm [31]. Le flux de chaleur est exprimé par l'équation :

$$q_x = (A K K T_S^4) - (A K \sigma T_1^4) = A \varepsilon K (T_S^4 - T_1^4) \quad (V.11)$$

Où T_S et T_1 sont respectivement les valeurs de température de surface de deux objets différents, K est la constante de Stefane- Boltezman et ε est l'émissivité du corps gris. La conductance thermique du rayonnement thermique est :

$$G_{ra} = A \varepsilon K (T_S^4 - T_1^4) (T_S + T_1) \quad (V.12)$$

V.5.3.2. Rayonnement de chaleur à courte longueur d'onde

Il est dû à la longueur d'onde inférieure à 2500 nm, y compris la lumière du soleil lors de l'émission de la chaleur. Son intensité peut être obtenue directement par l'héliographe [31]. Le flux de chaleur du rayonnement de courte longueur d'onde est donné par :

$$I_g = \alpha G A \quad (V.13)$$

Avec α est le taux d'absorption du rayonnement solaire.

V.5. Méthode de la capacité localisée

La méthode de la capacité localisée utilise la capacité calorifique comme composant d'analyse thermique et définit l'énergie absorbée ou libérée pour augmenter ou réduire la température d'un objet de 1°C [57]. La méthode de la capacité localisée utilise la loi de conservation de l'énergie thermique pour transférer les flux de chaleur créés par différents mécanismes de transfert de chaleur puis la capacité calorifique convertit la valeur d'énergie du flux thermique absorbé ou relâché en équation de capacité thermique [48], comme indiqué dans l'équation (V.14).

$$C \frac{dT}{dt} = q_x \quad (V.14)$$

V.6. Equivalence entre le modèle thermique et le circuit équivalent de courant

Le modèle thermique a été converti en système électrique équivalent comme montré dans le tableau (V.1) :

Système thermique	Système électrique
Température T en (K)	Tension V en (V)
Flux thermique q en (W)	Courant I en (A)
Résistance thermique θ en (K/W)	Résistance R en (Ω)
Capacité thermique C_t en (J/K)	Capacité C en (F)
$T = q \cdot \theta$	$V = R \cdot I$
$q = C_t \frac{dT}{dt}$	$I = C \frac{dV}{dt}$

Tableau V.1 : Equivalence entre le système thermique et électrique [78].

V.7. Analyse du mécanisme de transfert de chaleur

L'étude traite la modélisation dynamique PV pour produire la puissance électrique dynamique et l'énergie électrique générée par le PV installé. La figure (V.2) représente le mécanisme de transfert de chaleur reçu à l'intérieur et à l'extérieur du module PV.

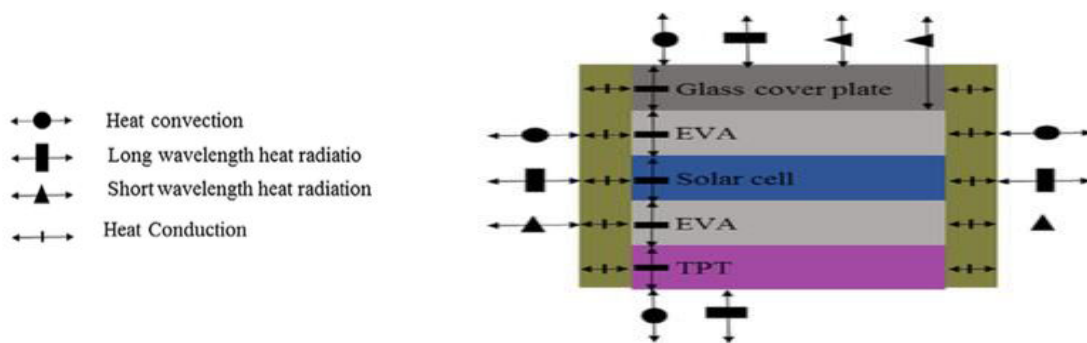


Figure V.2 : Mécanisme de transfert de chaleur du PV [78].

Le mécanisme de transfert de chaleur reçu par le cadre externe en aluminium est la convection thermique affectée par les facteurs environnementaux locaux, avec le rayonnement thermique est divisé en rayonnement thermique à longueurs d'onde longues et courtes. Le verre transmet le rayonnement à longueur d'onde courte à la cellule solaire d'une manière à avoir un mécanisme de rayonnement de chaleur au niveau de la cellule. Et le contact des structures de la couche à l'intérieur du module entraîne un transfert de chaleur en formant un mécanisme de conduction thermique.

Durant cette expérience, tous les mécanismes des transferts de chaleur ont été considérés comme étant linéaires et uniformément diffusés alors que le processus de transfert de chaleur n'est pas complètement linéaire, en particulier le rayonnement thermique est transmis en tant qu'une fonction non linéaire. Cependant, la plage de variation de la température peut être considérée comme une relation linéaire.

V.8. Mis en œuvre du modèle thermique

Le modèle thermique de chaque structure de couche de PV peut être obtenu à partir de la représentation de la résistance thermique et la différence de température, comme le montre la figure (V.3).

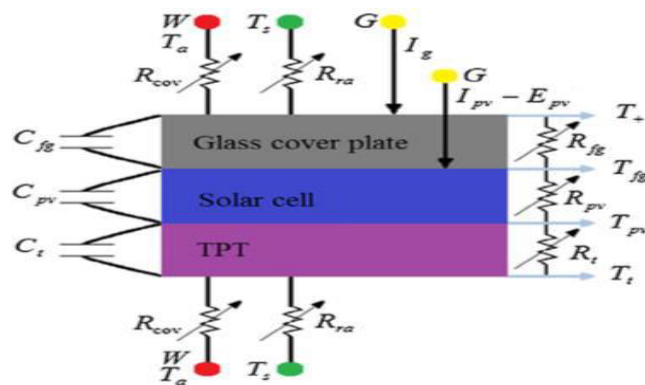


Figure V.3 : Schéma du modèle thermique du PV [78].

Le modèle thermique a été converti par couche en circuit électrique du courant, afin de formuler l'équation d'équilibre thermique pour chaque couche structurale à partir des composants du circuit du courant.

V.8.1. La température de la couche du verre supérieure (T_+)

La couche supérieure du verre est affectée par les facteurs environnementaux pour former la convection thermique et un mécanisme de rayonnement. Elle est également affectée par la température de la couche de verre inférieure pour former le mécanisme de transfert de chaleur. La figure (V.4) représente le modèle du verre supérieur et son circuit électrique est équivalent est représenté sur la figure (V.5).

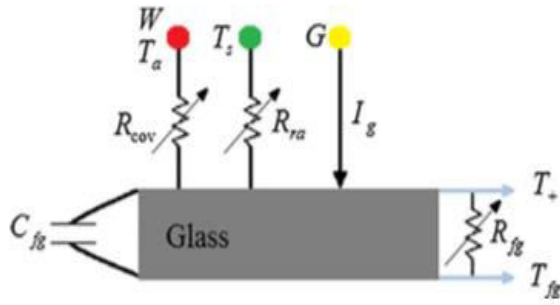


Figure V.4 : Schéma de modèle thermique du verre supérieur [78].

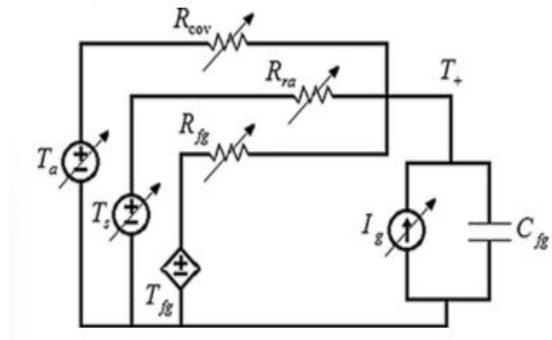


Figure V.5 : Circuit électrique équivalent du modèle du verre supérieur [78].

A partir de la figure (V.5), en utilisant la loi de Kirchhoff, l'équation d'équilibre de la couche de verre supérieure est exprimée par :

$$C_{fg} \frac{dT_+}{dt} = I_g + \frac{1}{R_{cov}} (T_a - T_+) + \frac{1}{R_{ra}} (T_s - T_+) + \frac{1}{R_{fg}} (T_{fg} - T_+) \quad (V.15)$$

Par la suite, les inductances électriques et de radiation sont données par :

$$\frac{dT_+}{dt} = \frac{I_g + G_{cov}(T_a - T_+) + G_{ra}(T_s - T_+) + G_{fg}(T_{fg} - T_+)}{C_{fg}} \quad (V.16)$$

Où T_a , T_s et T_{fg} sont respectivement les températures de l'environnement, de l'atmosphère et de la couche de verre inférieure, C_{fg} est la capacité thermique de la couche de verre, G_{cov} , G_{fg} et G_{ra} sont respectivement les inductances de convection de chaleur, de conduction et de rayonnement.

V.8.2. Température de la couche de verre (T_{fg})

La couche du verre est affectée par les températures du verre supérieur et la cellule solaire pour former le mécanisme de transfert de chaleur. La figure (V.6) représente le modèle thermique du verre et son circuit électrique équivalent est représenté sur la figure (V.7).

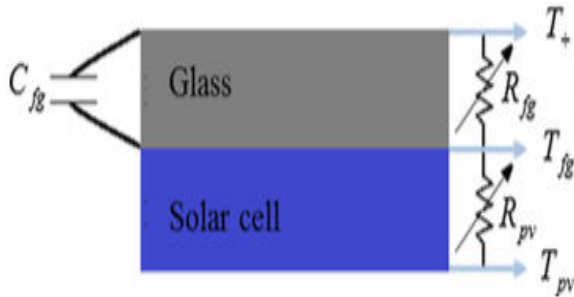


Figure V.6 : Schéma de modèle thermique du verre [78].

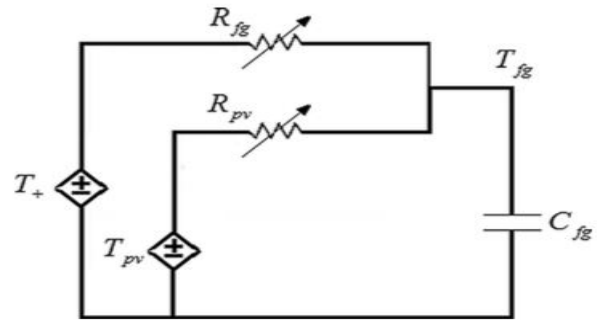


Figure V.7 : Circuit électrique équivalent du modèle du verre [78].

A partir de la figure (V.7), en utilisant la loi de Kirchhoff, l'équation d'équilibre de la couche de verre est exprimée par :

$$C_{fg} \frac{dT_{fg}}{dt} = \frac{1}{R_{fg}} (T_+ - T_{fg}) + \frac{1}{R_{pv}} (T_{pv} - T_{fg}) \quad (V.17)$$

Les inductances électriques et de radiation sont données par l'équation :

$$\frac{dT_+}{dt} = \frac{G_{fg}(T_+ - T_{fg}) + G_{pv}(T_{pv} - T_{fg})}{C_{fg}} \quad (V.18)$$

V.9.3. La température de la couche de la cellule solaire (T_{pv})

Pour la conversion photovoltaïque, une cellule solaire doit être irradiée par un rayonnement solaire de longueur d'onde courte (<2500 nm). Le verre transmet plus de 90% de ce rayonnement de courte longueur pour irradier la cellule ainsi que générer de l'énergie électrique et thermique. La cellule solaire est affectée par un rayonnement de longueur d'onde courte pour former un mécanisme de rayonnement thermique de courte longueur d'onde, et elle affectée aussi par la température de la couche du verre et de la couche TPT pour former un mécanisme de transfert de chaleur. Son modèle thermique est représenté sur la figure (V.8) ainsi que son circuit électrique sur la figure (V.9).

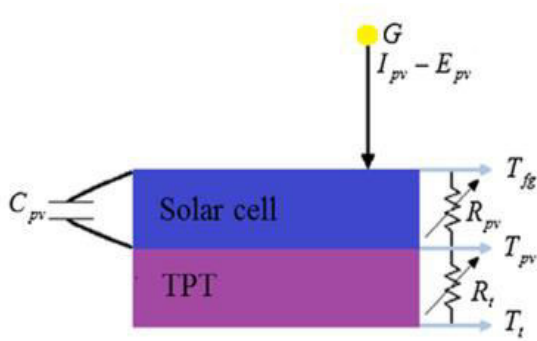


Figure V.8 : Schéma de modèle thermique de la cellule solaire [78].

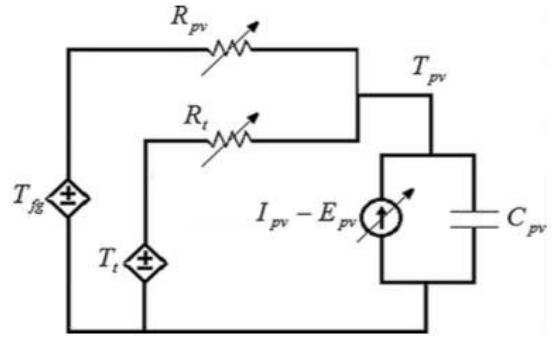


Figure V.9 : Circuit électrique équivalent du modèle de la cellule solaire [78].

A partir de la figure (V.9), en utilisant la loi de Kirchhoff, l'équation d'équilibre de la couche de verre est exprimée par l'équation (V.19) et les inductances électriques et de radiation sont données par :

$$C_{PV} \frac{dT_{PV}}{dt} = (I_g - E_{PV}) + \frac{1}{R_{PV}} (T_{fg} - T_{PV}) + \frac{1}{R_t} (T_t - T_{PV}) \quad (V.19)$$

$$\frac{dT_{PV}}{dt} = \frac{(I_g - E_{PV}) + G_{PV}(T_{fg} - T_{PV}) + G_t(T_t - T_{PV})}{C_{PV}} \quad (V.20)$$

Où E_{PV} est l'énergie électrique produite lorsque la cellule reçoit un rayonnement de courte longueur d'onde, C_{PV} est la capacité thermique de la couche de la cellule solaire, G_t et G_{PV} sont respectivement l'inductance de conduction thermique de la cellule solaire et de la couche TPT.

V.9.4. Température de la couche TPT (T_t)

Cette couche est affectée par les températures de la cellule solaire pour former le mécanisme de transfert de chaleur. La figure (V.10) représente le modèle thermique de la couche TPT et la figure (V.11) représente son circuit électrique correspondant.

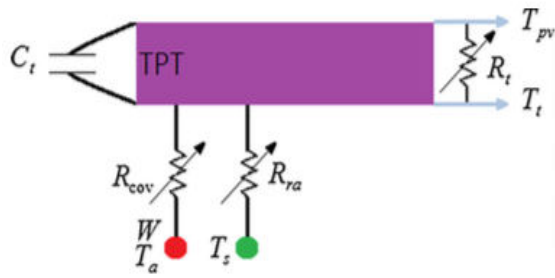


Figure V.10 : Schéma de modèle thermique de la couche TPT [78].

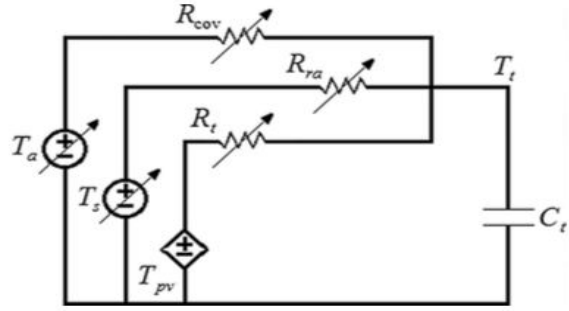


Figure V.11 : Circuit électrique équivalent du modèle de la couche TPT [78].

A partir de la figure (V.11), en utilisant la loi de Kirchhoff, l'équation d'équilibre de la couche de verre est exprimée par l'équation (V.21) et les inductances électriques et de radiation sont données par l'équation (V.22).

$$C_t \frac{dT_t}{dt} = \frac{1}{R_{cov}} (T_a - T_t) + \frac{1}{R_{ra}} (T_s - T_t) + \frac{1}{R_t} (T_{PV} - T_t) \quad (V.21)$$

$$C_t \frac{dT_t}{dt} = G_{cov}(T_a - T_t) + G_{ra}(T_s - T_t) + G_t(T_{PV} - T_t) \quad (V.22)$$

A partir des équations (V.20) et (V.22) on obtient :

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{G_t(T_{PV} - T_t)}{C_t} \quad (V.23)$$

Où C_t est la capacité thermique de la couche TPT.

V.10. Configuration réelle du PV

Le modèle réel utilisé est : Benq PV : Sun Forte-MONO203, PM-096B00, 330 W PV les spécifications détaillées du PV sont présentées dans le tableau (V.2). La période d'essai était de 05h à 18h tous les jours. Les données des facteurs environnementaux ont été mesurées par héliographe et par la station météorologique, et les données de la puissance électrique ont été extraites par charge électrique DC. La production quotidienne de l'électricité collectée a été divisée par le rayonnement solaire accumulé pour obtenir la puissance électrique par jour.

SunForte-Mono203, PM-096B00, 330 W	
Puissance de sortie (W)	330
Efficacité électrique (%)	20.3
Tension de circuit ouvert (V)	64.9
Courant de court-circuit (A)	6.52
NOCT (°C)	45
Coefficient de température du PV(%/K)	-0.38
Coefficient de température du circuit ouvert (%/K)	-0.27
Coefficient de température du court-circuit (%/K)	0.06
Taille (m)	1.559* 1.046* 0.046

Tableau V.2 : Spécifications détaillées du module PV [78].

V.11. Comparaison des résultats

Dans cette étude, ils ont utilisé les résultats réels du test PV pour valider l'exactitude des résultats du modèle dynamique. La figure (V.12) illustre la condition de l'environnement extérieure du jour.

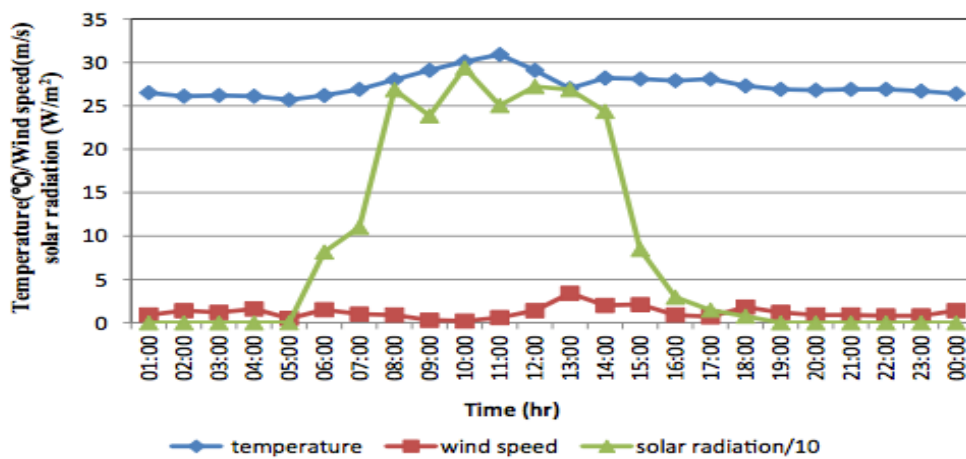


Figure V.12 : Variations des facteurs environnementaux [78].

Avec :

- La température,
- La vitesse du vent,
- L'éclairement.

Les facteurs d'environnement ont été entré dans le modèle dynamique PV pour obtenir la valeur de la température de chaque couche structurelle comme le montre la figure (V.13). Pour valider la précision de la prévision de modélisation dynamique PV, la puissance électrique de sortie de PV réel a été soustraite de la puissance électrique. Le pourcentage d'erreur absolue de puissance électrique est de 1.244%. Par conséquent, la modélisation PV dérivée dans cette étude peut prédire avec précision la performance de sortie du PV local.

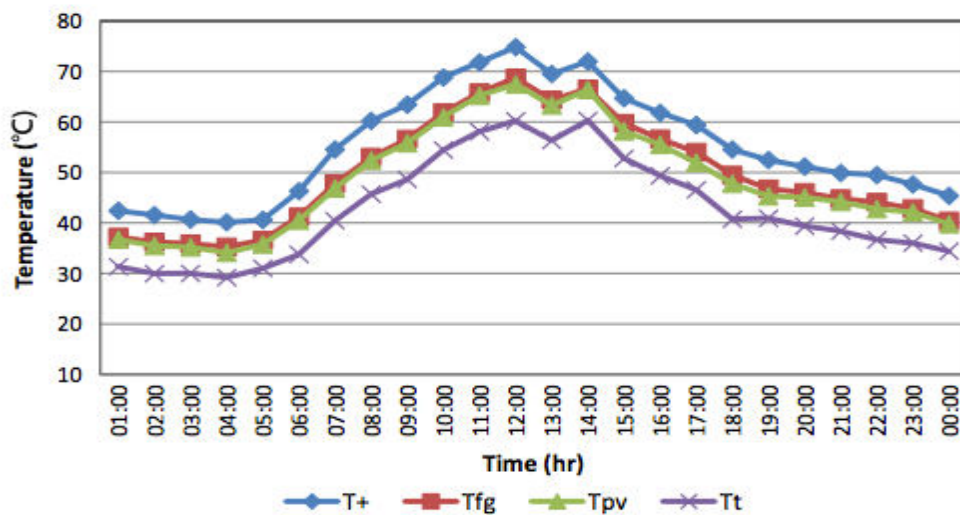


Figure V.13 : Température du modèle dynamique obtenue après l'introduction de la variation des facteurs environnementaux [78].

Avec :

- Température de la couche de verre supérieure,
- Température de la couche de verre inférieure,
- Température de la couche de la cellule solaire,
- Température de la couche de la feuille de fond en TPT.

V.12. Les résultats de simulation sur quatre saisons

L'expérience a été menée pendant trois jours de chaque saison. Les facteurs environnementaux ont été introduits dans le modèle dynamique PV pour améliorer les performances de sortie du PV et pour obtenir une sortie optimale et une conception de matériau de la feuille de fond appropriée.

L'efficacité électrique moyenne quotidienne calculée en fonction des résultats et des conditions des quatre saisons est différente d'une saison à une autre, où la plus faible valeur obtenue revient à la saison d'été avec un pourcentage de 17.59%. Pour les trois autres saisons allant du printemps jusqu'à l'hiver, l'efficacité électrique s'améliore de plus en plus qu'on approche de l'hiver avec un pourcentage de 19.45% pour le printemps, 19.15 pour l'automne et 20.82% qui représente le pourcentage le plus élevé pour l'hiver.

D'après ces résultats, l'efficacité électrique moyenne quotidienne de l'hiver est meilleure que les autres saisons. Et celle de l'été est moins importante que toutes les autres saisons à cause des températures élevées en été.

V.13. Innovation de la modélisation dynamique

Cette étude considère principalement les facteurs du mécanisme de transfert de chaleur en se basant sur la loi de conservation de l'énergie thermique et la méthode de la capacité localisée pour dériver la modélisation dynamique PV. Le PV réel a été sollicité pour valider la précision prévisionnelle du modèle dynamique qui est utilisé pour prédire les performances de sortie du PV d'une manière précise.

V.14. Conception appropriée de la feuille de fond pour le module PV

Les facteurs environnementaux sont incontrôlables et pour obtenir une efficacité électrique de sortie plus élevée et une température de cellule solaire plus basse, le matériau de la feuille de fond peut être déterminé sous le modèle dynamique PV avant d'être monté sur le PV réel [63].

En été la température et le rayonnement solaire sont élevés et la vitesse du vent est faible, ce qui engendre une augmentation de la température de fonctionnement des cellules solaires qui entraîne par la suite un faible pourcentage de la puissance électrique (17.59%) [14].

Le matériau de la feuille de fond est le facteur le plus important qui influence le plus les performances de sortie du PV et que différents matériaux de feuille de fond ont des coefficients de conduction de chaleur différents [31]. Un coefficient de conduction de chaleur plus élevé est utile pour l'absorption de la chaleur des cellules solaires. Les matériaux de la feuille de fond existant sont le verre et le TPT.

La simulation des performances a été faite de TPT. Et pour améliorer l'efficacité de sortie, les effets de différents matériaux de la feuille de fond sur les performances du PV seront comparés par modèle dynamique. Puis le matériau TPT a été changé par le verre pour

l'expérience de simulation des performances de la modélisation dynamique. Le tableau (V.4) résume les résultats de températures obtenues.

Temps (H)	Température (°C)	Temps (H)	Température (°C)
1:00	36.16	13:00	66.48
2:00	35.75	14:00	70.49
3:00	34.08	15:00	77.18
4:00	33.77	16:00	70.67
5:00	33.12	17:00	63.07
6:00	43.81	18:00	60.14
7:00	54.37	19:00	55.39
8:00	64.46	20:00	54.16
9:00	65.08	21:00	48.93
10:00	69.49	22:00	48.04
11:00	70.37	23:00	47.09
12:00	68.94	24:00	43.16

Tableau V.3 : Températures obtenues en utilisant le verre [78].

D'après ce tableau des températures de la cellule solaire, l'efficacité électrique moyenne quotidienne en été en utilisant le verre comme étant la feuille de fond du PV est de 18.004%. Le tableau (V.5) illustre les performances du PV pour les deux matériaux de la feuille de fond du PV.

Matériau	TPT	Verre
Coefficient de conduction thermique (W/m-K)	0.033	1.1
Efficacité électrique (%)	17.59	18.004

Tableau V.4 : Amélioration des performances du module PV [78].

Lorsque le matériau de la feuille de fond est le TPT et le coefficient de conduction thermique est faible, la cellule solaire ne parvient pas à dissiper la chaleur ce qui entraîne une diminution de la puissance. Par contre, lorsqu'on utilise le verre en tant que feuille de fond, le coefficient de conduction thermique est élevée et que l'énergie thermique de la cellule peut être dissipée, la puissance électrique est alors augmentée.

V.15. Discussion des résultats

En utilisant les résultats du teste de PV réel pour valider la précision des résultats du modèle dynamique PV. Les conclusions sont ci-dessous :

- comme le modèle utilisé peut prédire les performances du PV avec précision en fonction des facteurs environnementaux locaux, l'erreur de puissance est inférieure à 1.3%.
- si on remplace le TPT par le verre avec un coefficient de conduction de chaleur plus élevé en tant que matériau de la feuille de fond du PV, la puissance électrique peut être augmentée de 2.353%.
- le modèle dynamique étudié peut prédire la puissance électrique du PV en dessous de la différence de 1.9%.

V.16. Conclusion

Dans le but d'étudier le comportement du système par rapport aux variations de la température, on a procédé à l'étude du modèle dynamique du PV pour prédire la puissance et l'efficacité électrique du générateur sans passer par la commande MPPT. Ce modèle est basé sur l'optimisation de la conception et des matériaux qui constituent le panneau. D'après les résultats de [78], le rendement et l'efficacité énergétique du PV ont été amélioré de 2.353% quand on remplace le TPT de la feuille du fond du PV par le verre qui dispose d'une conductivité meilleure.

Conclusion générale

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause de développement de l'industrie et du développement démographique. Pour résoudre ce problème, de nombreuses voies de recherches se sont orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. Cette dernière constitue alors une vraie alternative efficace aux énergies fossiles à plusieurs titres : elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre. Cependant, cette énergie dispose d'un faible rendement et d'une puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques, ce qui doit être pris en considération lors de la conception des cellules solaires.

Dans ce contexte, on a commencé tout d'abord par donner un aperçu général sur le développement du marché photovoltaïque dans le monde et particulièrement en Algérie, puis on a présenté quelques travaux réalisés au niveau du département de Génie Electrique et de l'Informatique de l'UMMTO. Ensuite, on a rappelé dans le deuxième chapitre les principes de base de la conversion photovoltaïque suivie d'une modélisation et d'une simulation d'un panneau photovoltaïque sous l'environnement MATLAB/Simulink dans le troisième chapitre. Pour que le système fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation associé à une commande MPPT. Dans le quatrième chapitre, on a présenté les trois principaux algorithmes de la commande MPPT présents dans la littérature, à savoir, la méthode 'Hill Climbing', la méthode 'Perturb and Observe' et la méthode 'Increment of Conductance'. Dans ce travail, on a utilisé la méthode 'Perturb and Observe (P&O)' pour simuler le fonctionnement du système photovoltaïque. Les résultats de simulation ont illustré les Points de Puissance Maximale (PPM) sur les caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de la température et de l'ensoleillement. Afin de voir le comportement du système par rapport aux variations climatiques, on a simulé le système photovoltaïque pour des variations brusques soit de la température soit de l'ensoleillement. Les résultats de simulations ont montré que la commande MPP suit le point de fonctionnement optimal du système pour toute variation des conditions météorologiques.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires et l'objectif de ce travail est l'étude des effets de températures sur le comportement et l'efficacité énergétique du panneau solaire. La modélisation dynamique PV construite dans cette étude a analysé le mécanisme de transfert de chaleur pour chaque structure de couche du

module afin d'établir un modèle thermique. Par la suite, le modèle thermique a été converti en boucle électrique pour analyse selon la théorie du transfert de chaleur. La méthode de la capacité thermique et la loi de conservation de l'énergie thermique ont été combinées avec le logiciel Matlab / Simulink pour l'analyse, et une modélisation réelle PV a été créée pour valider la précision des prévisions du modèle dynamique. Enfin, les paramètres structurels de PV ont été modifiés par un modèle dynamique pour obtenir les performances de sortie optimales de PV. Les résultats de [78] ont montré que lorsque le TPT avec un coefficient de transfert de chaleur inférieur a été remplacé par du verre avec un coefficient de transfert de chaleur plus élevé en tant que matériau de feuille du fond de PV, la puissance électrique peut être augmentée de 2,353% d'où la performance de sortie du PV a été améliorée efficacement.

Annexes

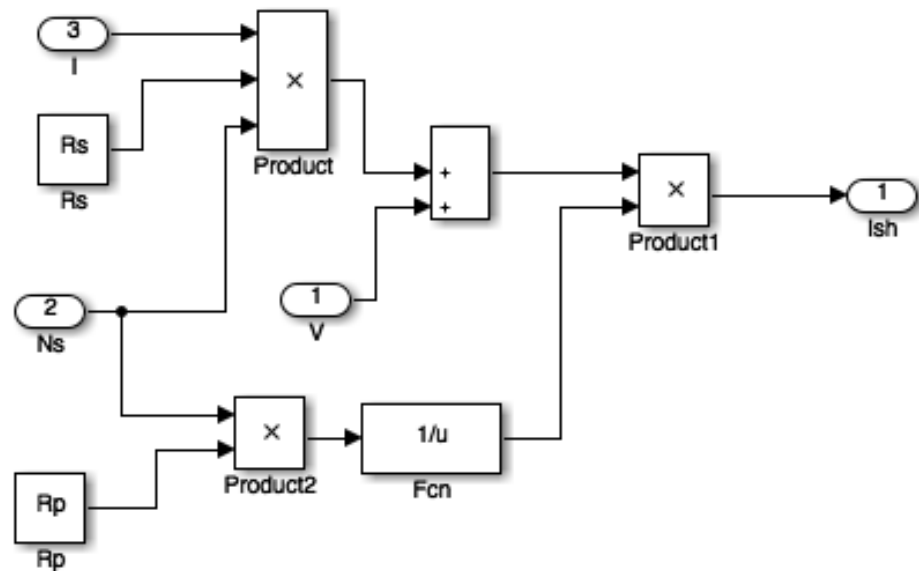
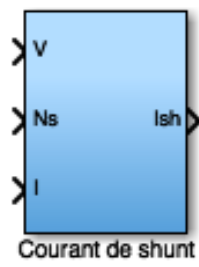


Figure 1 : Courant photonique I_{sh} .

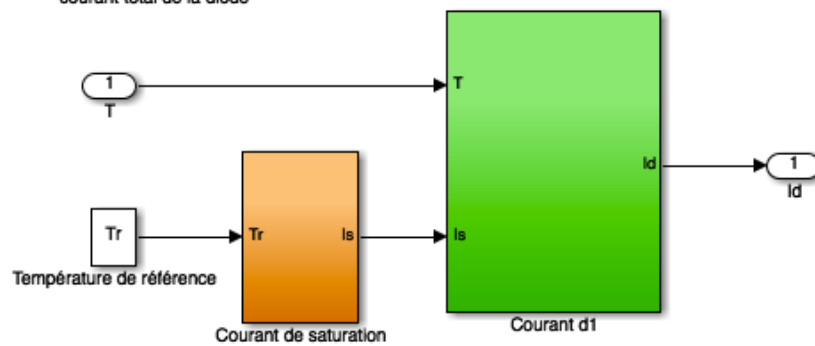
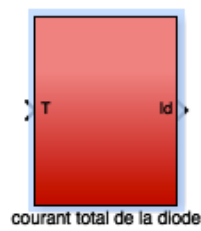


Figure 2 : Courant total de la diode I_d .

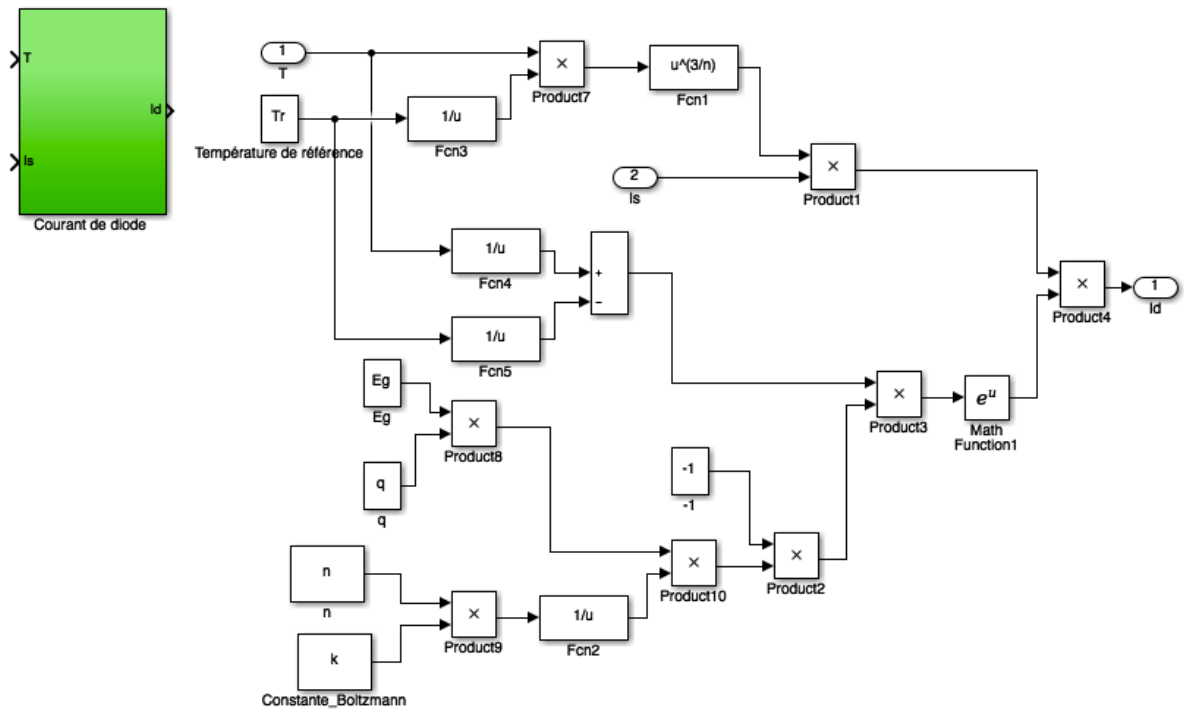


Figure 3 : Courant traversant la diode.

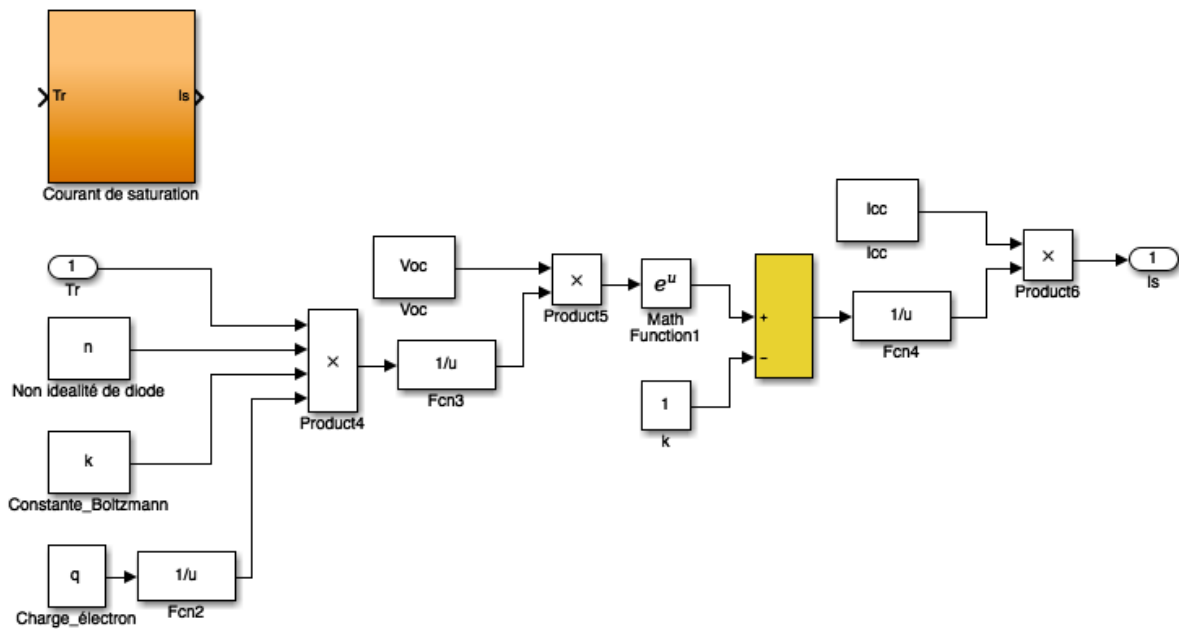


Figure 4 : Courant de saturation I_s .

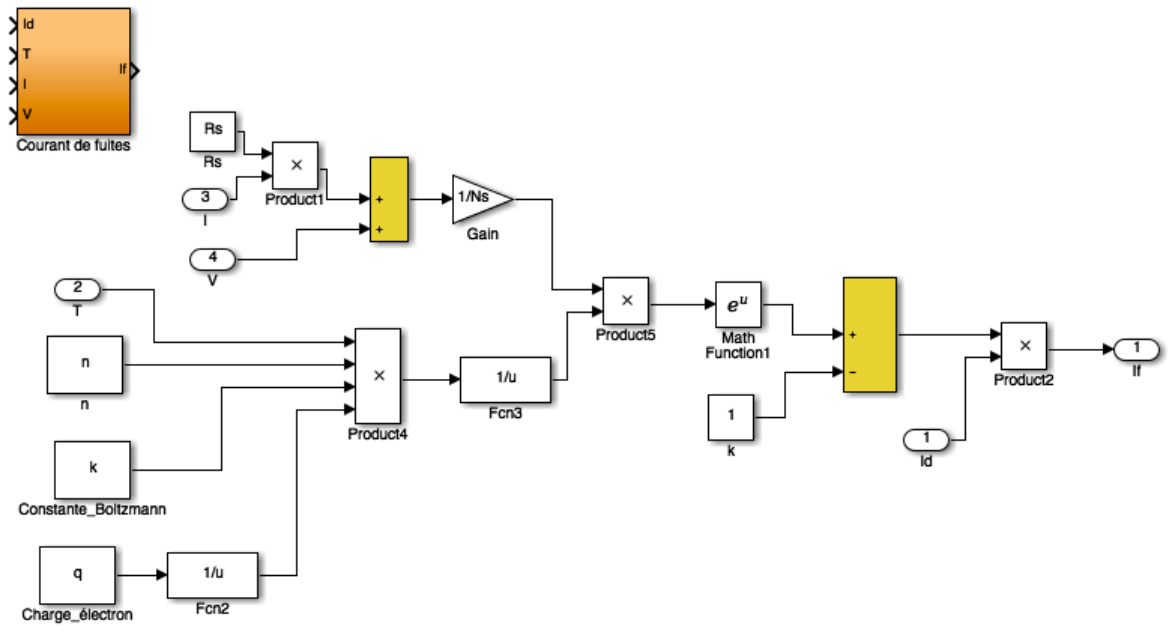


Figure 5 : Courant de fuites I_f .

Références bibliographiques

- [1] A. BADJI et H. AKHAMOUM, « Etude et réalisation d'une commande numérique d'un hacheur élévateur entrelacé associé à un panneau photovoltaïque », Mémoire de master, UMMTO, Algérie, 2013.
- [2] A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM et A. GHARBI, « Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, 2005.
- [3] A.K. Chahrazette, « Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque application à la FGEI », Mémoire d'ingénieur, UMMTO, Algérie, 2009.
- [4] A. LABOURET, M. VILLOZ, « Energie solaire photovoltaïque », 3^{ème} édition DUNOD, Paris, France, 2007.
- [5] ABBASSENE Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magistère, UMMTO, 2011.
- [6] Abderrahmane Hamidat, « Le solaire thermique en Algérie : histoire et perspectives », Bulletin des Energies renouvelables-N°22 2012.
- [7] AISSAT Mohamed et SAIDI Adel, « Etude et réalisation d'un suiveur automatique pour panneau solaire », Mémoire d'ingénieur, USTHB, Algérie, 2010.
- [8] AKASSEWA Tchaps Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétique autonome », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2011.
- [9] Antonio LUQUE et Steven HEGEDUS, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering » John Wiley et Sons Ltd, 2003.
- [10] Azouagh L., Zidi D. et Dahmani M., « Etude de fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de master, UMMTO, 2013.
- [11] B. Soufiane et B. Mohamed, « Conception d'une commande robuste à structure variable floue de Ben Ghalia d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire d'ingénieur, USTHB, Algérie, 2010.

- [12] Bencherif Mohammed, « Modélisation des systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens : intégration dans un système hybride à basse tension », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2011.
- [13] BIGONOFF, « La programmation des PIC par Bigonoff, Seconde Partie-Révision 21, la gamme MID-Range par l'étude des PIC16F27X ».
- [14] Boukaf F. et Dahdouh T., « Modélisation et commande d'un système de production d'énergie électrique en utilisant des panneaux photovoltaïques », Mémoire de Master, UMMTO, 2011.
- [15] Boukhes Djamil, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque : Application au pompage », Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [16] BRAHIMI Mustapha et MOUSSAOUI Nadia, « Etude et réalisation d'une commande PID d'un moteur à courant continu », Mémoire d'ingénieur d'état, UMMTO, 2008.
- [17] Browne MC, Norton B. « Phase change materials for photovoltaic thermal management ». *Renew Sustain Energy Rev* 2015 ;47 :762–82.
- [18] CONDOR Electronics, Catalogue des Kits Solaires, 2014.
- [19] Condor Electronics, Energie solaire, 2014.
- [20] D. BELLALIA, « Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie : application au système photovoltaïque », Mémoire de magistère, Université de Batna.
- [21] D. GUILBERT, « Comparaison de topologies de convertisseurs DC/DC entrelacés en cas de défauts d'interrupteurs de puissance pour véhicule électrique à pile combustible », Article, Fédération de recherche CNRS FCLab, France, 2013.
- [22] D. Samia, « Energie solaire : L'Algérie à l'heure du photovoltaïque », *Journal El Moujahid*, février 2016.
- [23] Dahmane Menad, « Gestion, optimisation et conversion des énergies pour habitat autonome », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, France, 2015.
- [24] M. ZELLAGUI, « Etude des protections des réseaux électriques MT », Mémoire de magistère, Université de Mentouri, Constantine, Algérie, 2010.

- [25] F. ANSARI et A-K. JHA, « Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm », International journal of reseach in engineering & applied sciences, 2011.
- [26] F. BOUKHTOUCHE CHERFA, « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution BT », Mémoire de magistère de l'école nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2005.
- [27] Felouah S. et Mesbah S., « Etude d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire de Master, UMMTO, 2015.
- [28] Gunjay Varshney, D. S. Chauhan et M. P. Dave, « Simscape based Modelling and simulation of MPPT controller for PV systems », IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), e-ISSN: 2278-1676, p-2320-3331, Vol.9, Issue 6 Ver. I (Nov-Dec. 2014), PP 41-46.
- [29] Hadjeras M. et Khales A., « Etude et dimensionnement d'un convertisseur dédié aux systèmes photovoltaïques », Mémoire de Master, UMMTO, 2017.
- [30] Haouchine R. et Bounoua B., « Optimisation du transfert d'énergie d'un champ photovoltaïque basée sur la commande MPPT prédictive », Mémoire de Master, UMMTO, 2012.
- [31] Hasan A, McCormack SJ., « Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: materials comparison in different climates ». Sol Energy 2015 ;115 :264–76.
- [32] Helali Kamelia, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire de Magistère, UMMTO, 2012.
- [33] HESPUL, « Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques fonctionnement état de l'art et étude des performances », 2007.
- [34] IDIRI Ghania, « Commandes prédictives des systèmes non linéaires dynamiques », Mémoire de magistère, UMMTO, 2011.
- [35] J. Abdul Aziz, « Concentrateurs solaires et production électrique », Rapport, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, France, 2014.

- [36] K. Djamila, O. Fetta, « Commande d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, UMMTO, Algérie, 2009.
- [37] K. Kadda, T. Bergheul, M. Boudour, A. Hadj Arab et A Malek, « Etude de faisabilité de l'insertion d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau de distribution de Ghardaïa », Revue des Energies Renouvelables, vol N° 02.309.322, 2014.
- [38] Kaddoura TO, Ramli AM., « On the estimation of the optimum tilt angle of PV Panel in Saudi Arabia », Renew Sustain Energy Rev 2016 ;65 :626–34.
- [39] Kessaissia Fetma Zohra, « Caractérisation de modules photovoltaïques de différentes technologies », Mémoire de Magistère, Université de Chlef, 2013.
- [40] Khalfouni A. « Modélisation et dimensionnement d'un générateur photovoltaïque », Mémoire de Master, UMMTO, 2011.
- [41] Koehl M, Heck M., « Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering », Sol Energy Mater Sol C 2011 ;95 :1638–46.
- [42] L. HASSAINE, « Modélisation et simulation d'un système de conditionnement de puissance pour la poursuite de point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques », Mémoire de magistère de l'école nationale polytechnique, Alger, Algérie, - 2002.
- [43] Lahlah Salah, « Etude comparative des techniques MPPT : Perturbation and Observation (P&O), Incrimental Conductance (Inc.Cod.) et Hill Climbing (HC) », Mémoire de Magistère, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2007.
- [44] Lamine M. et Leharani L., « Contribution à la commande MPPT numérique d'un panneau photovoltaïque d'un hacheur à travers un hacheur parallèle entrelacé », Mémoire de Master, UMMTO, 2014.
- [45] M. Angel Cid PASTOR, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques », Institut National de Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2006.
- [46] M. Belhadj, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magistère, Université de Bechar, 2008.

- [47] Makki A, Omer S., « Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance », *Renew Sustain Energy Rev* 2015 ;41 :658–84.
- [48] Min Won PARK, In-Keun YU, Member IEEE, « A study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell », Chagwon National University, Corée du Sud, 2000.
- [49] Ministère de l'énergie et des mines, Algérie, 2011.
- [50] Ministère de l'énergie et des mines, les réseaux électriques nationaux, Algérie, 2013.
- [51] Missoume Mohammed, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie », Mémoire de Magistère, Université de Chlef, 2011.
- [52] Muriel Alaphilippe, Pascal Stouffs, Didier Marquet, « Production d'énergie électrique pour site isolé par système hybride de conversion d'énergie solaire », Actes des 13 èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France du 28 au 30 Août 2007.
- [53] N. ABOUCHABANA, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de magistère, Ecole national polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [54] O. GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat, l'école normale supérieure de CACHAN, décembre 2002.
- [55] P. BARRET, « Régime transitoires des machines électriques », Edition EYROLLES, 1987.
- [56] P. NATTORN, « Analysis and Simulation Tools for Solar Array Pumping Systems », Faculty of California Polytechnic State University, USA, 2005.
- [57] Pierrick H, Christophe M., « Dynamic numerical model of a high efficiency PV-T collector integrated into a domestic hot water system », *Sol Energy* 2015 ;111 :68–81.
- [58] Ramli M, Twaha S, Ishaque K, Al-Turki Y., « A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions », *Renew Sustain Energy Rev* 2017 ;67 :144–59.

- [59] S. ABBADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur SEPIC », Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 2011.
- [60] S. ABBOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques », thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et université de Sfax, 2015.
- [61] S. AISSAOUI et A. MEZAOUROU, « Mise en œuvre d'une commande à structure variable floue d'un moteur asynchrone alimenté en tension contrôlé en courant », Mémoire d'ingénieur, USTHB, Algérie, 2010.
- [62] S. AISSOU, « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Abd Arrehmane MIRA de Bejaia, 2016.
- [63] Shukla A, Karunesh K, Sharma A, Pascal HB, « Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency : a review », Sol Energy Mater Sol C 2017 ;160 :275–86.
- [64] Skoplaki E, Palyvos JA., « On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : a review of efficiency/power correlations », Sol Energy 2009 ;83:614–24.
- [65] Skouri Safa, « Contribution à l'étude des concentrateurs solaires », Thèse de Doctorat, Université Monastir, Maroc, 2016.
- [66] Søren Baekhøj Kjaer, « Evaluation of the Hill Climbing and Incremental Conductance Maximum power point trackers for photovoltaïque », IEEE Transactions on energy conversion, Vol.27, No.4, 2012.
- [67] Tansout M. et Khemmar S., « Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink », Mémoire de Master, UMMTO, 2016.
- [68] TENIOU Samir, « Analyse de de la commande prédictive floue, algorithmes et méthodologies de solutions », Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Constantine, 2009.

- [69] Thomas Mambriné, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implémentation et en fonction des différentes technologies », Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, France, 2014.
- [70] Toulait A. et Aili R., « Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink d'un système PV adapté à la commande MPPT », Mémoire de Master, UMMTO, 2014.
- [71] Trishan ESRAM, Patrick CHAPMAN, « Comparison of Photovoltaic Array MPPT Techniques », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.21, pp.17-22, 2006.
- [72] V. BOITIER, P. MAUSSION et C. CABAL, « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », Revue 3 E.I, N°54, pp 90-96, Université de Toulouse, France, septembre 2008.
- [73] V. SALAS, E. BARRADO, A. LAZARO, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems », Solar Energy Materials and Solar Cells 90 pp.1555.1578, 2006.
- [74] www.hespule.org
- [75] www.peracod.sn
- [76] Yaker A. et Belkacem B., « Dimensionnement d'une centrale photovoltaïque autonome alimentant un village écologique », Mémoire de Master, UMMTO, 2015.
- [77] Yann RIFFONNEAU, « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau », Thèse de Doctorat, Université Josef Fourier, France, 2009.
- [78] Yu-Wei Lee, Chung-Feng Jeffrey Kuo, Wei-Han Weng, Chao-Yang Huang, Cheng-Yu Peng, « Dynamic modeling and entity validation of a photovoltaic system », Applied Energy 200 (2017) 370–382.
- [79] ZAROUR Laid, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Mémoire de magistère, Université de Mentouri Constantine, Algérie, 2010.

Résumé

Les énergies renouvelables sont des énergies naturelles, inépuisables et facilement exploitables. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie issue du soleil, notamment l'énergie solaire photovoltaïque. Néanmoins, cette énergie dépend fortement des conditions météorologiques et son rendement est un peu faible. Cependant, l'utilisation de cette énergie nécessite la poursuite du point de puissance maximale et l'optimisation de l'énergie électrique recueillie à partir de cette source. L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude d'un système photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale, soit en lui attribuant un étage d'adaptation associé à un algorithme MPPT, ou procédé à l'optimisation de la conception et les matériaux qui constituent le panneau photovoltaïque afin de visualiser l'effet de la température sur les performances du PV.

Mots clés

Panneau solaire, commande MPPT, température, modèle dynamique du PV, matériau de feuille du fond.