

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

THÈME

Etude et réalisation de l'effet de l'ombrage sur les panneaux photovoltaïques

Préparés par :

KHALED KHOUDJA Roufaïda

KHEIR Fatima Zohra

Devant le Jury :

Nom et prénom	Grade	Qualité
SAIBI Ali	MCB	Président
KOUADRIA Selman	MCB	Examineur
KOULALI Moustapha	MCB	Examineur
MIHOUB Youcef	MCB	Encadrants
HASSAINE Said	Pr	

PROMOTION 2022 /2023

REMERCIEMENTS

Louange à Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos encadrants Messieurs MIHOUB Youcef et HASSAINE Said pour leurs précieux conseils et leur aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury : Monsieur SAIBI Ali pour avoir accepté de présider la soutenance de notre travail ainsi que Messieurs KOUADRIA Selman et KOULALI Moustapha pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous remercions tous les enseignants du département de Génie Electrique d'avoir contribué à notre formation.

Nous remercions tous les membres du Laboratoire de Génie Energétique et Génie Informatique (L2GEGI)

Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralité et modélisation d'un système Photovoltaïque.	
I.1 Introduction	3
I.2 Energie solaire	3
I.2.1 Soleil	3
I.2.2 Rayonnement solaire	3
I.2.3 L'énergie photovoltaïque	4
I.3 L'effet photovoltaïque	5
I.4 La cellule photovoltaïque.....	5
I.4.1 Les différents types des cellules.....	7
I.4.1.1 Cellule en silicium monocristallin	7
I.4.1.2 Cellule en silicium polycristallin	7
I.4.1.3 Cellule en silicium amorphe	8
I.5 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	8
I.5.1 Influence de l'éclairement.....	8
I.5.2 Influence de température.....	9
I.6 Association des modules PV.....	10
I.6.1 Association en série.....	10
I.6.2 Association en parallèle	10
I.6.3 Association mixte (série/parallèle).....	10
I.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV	11
I.7.1 Avantages.....	11
I.7.2 Inconvénients	11
I.8 Ombrage partiel	11
I.9 Causes de l'ombrage.....	12
I.10 Effet de l'ombrage partiel	12
I.11 Système de protection.....	13
I.11.1 Diode By-pass	13
I.11.2 Diode anti-retour	14
I.12 Conclusion	14
Chapitre II : Effet de l'ombrage partiel sur les panneaux photovoltaïques.	
II.1 Introduction	15
II.2 Modélisation du GPV	15
II.3 Paramètres de la cellule PV	17
II.3.1. Courant de court-circuit.....	17
II.3.2. Tension de circuit ouvert V_{co}	17
II.3.3. Facteur de forme FF	17
II.3.4. Rendement énergétique.....	18
II.4 Paramètres électriques du PV utilisé	18
II.5 Simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink	19
II.5.1. la simulation de chaque bloc sous Matlab-Simulink	19
II.6 résultats de simulation	20
II.7 Influence des paramètres externes sur un module photovoltaïque	22
II.7.1. Influence de l'éclairement	22
II.7.2. Influence de la température.....	23
II.8 Simulation d'ombrage partiel	24
II.8.1. Trois modules en série	24
II.8.2. Résultats de simulation	25
II.8.3. Deux modules en série/parallèle (mixte)	26

II.8.4. Résultat de simulation.....	26
II.9 Conclusion	28
Chapitre III :Commande MPPT d'un système photovoltaïque	
III.1 Introduction	29
III.2 Convertisseur DC/DC (hacheur).....	29
III.3 Convertisseur élévateur (Boost).....	29
III.4 Principe de fonctionnement	30
III.5 Détermination des paramètres du hacheur Boost.....	33
III.5.1 Calcul de l'inductance L	33
III.5.2 Calcul du condensateur C.....	35
III.6 Modèle Simulink du Hacheur Boost.....	36
III.7 La commande MPPT	38
III.8 Principe de MPPT	38
III.9 Les techniques de recherche du point de puissance maximale	38
III.9.1 La méthode Perturbation et Observation (P&O).....	38
III.9.1.1 Organigramme Perturber et Observer (P&O)	40
III.9.1.2 Avantages et inconvénients de P&O.....	40
III.9.1.3 Méthode conductance incrémental.....	41
III.9.1.4 Avantages et inconvénients de INC.....	42
III.9.2 Commande par la logique floue	43
III.9.2.1 Le principe de logique floue	43
III.9.2.2 MPPT floue proposée	44
III.9.2.3 Avantages et inconvénients de la logique floue.....	45
III.10 Conclusion	46
Chapitre IV : Résultats de simulation	
IV.1 Introduction	47
IV.2 Simulation du système PV avec la MPPT P&O	48
IV.3 Simulation du système PV avec la MPPT floue proposée	50
IV.4 Etude les commandes MPPT sur l'ombrage partiel.....	53
IV.4.1 Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT P&O	55
IV.4.2 Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT logique flou	56
IV.5 Conclusion	57
Annexes	60
Bibliographie	62

Chapitre I : Généralité et modélisation d'un système Photovoltaïque.	
Figure I. 1: Analyse spectrale du rayonnement solaire.	4
Figure I. 2: Schéma de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque [4].....	5
Figure I. 3 : Dopage de type N.	6
Figure I. 4 : Dopage de type P.....	6
Figure I. 5 : Représentation d'une jonction PN sous éclairement.	7
Figure I. 6: Différents types de cellule PV. (a) Silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.....	7
Figure I. 7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	8
Figure I. 8:Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	8
Figure I. 9 :Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	9
Figure I. 10 :Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	9
Figure I. 11: Association en série des cellules PV.	10
Figure I. 12: Association en parallèle des cellules PV.	10
Figure I. 13: Association mixte des cellules PV.....	11
Figure I. 14 : L'ombrage partiel sur les panneaux photovoltaïque.....	12
Figure I. 15 : GPV dans des conditions partiellement ombragés causés par le passage de nuages.	12
Figure I. 16 : Diagramme de puissance et de tension de GPV a de moments différents de la journée (avec et sans ombrage partiel)	13
Figure I. 17 : Utilisation de la diode by-pass.	13
Figure I. 18 : Association sécurisée des modules PV en série parallèle avec leurs diodes de protection.....	14
Chapitre II : Effet de l'ombrage partiel sur les panneaux photovoltaïques.	
Figure II. 1: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	15
Figure II. 2 : schéma bloc d'un générateur PV sou Matlab-Simulink	19
Figure II. 3 : : schéma d'un courant de module PV.....	20
Figure II. 4 :schéma de photo- courant	20
Figure II. 5 : schéma d'un courant de saturation	20
Figure II. 6 : Caractéristique courant-tension du GPV avec les conditions standards.....	21
Figure II. 7 : Caractéristique puissance-tension du GPV avec les conditions standards.	21
Figure II. 8 : Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques I-V du GPV pour $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	22
Figure II. 9 : Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques P-V du GPV pour $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	22
Figure II. 10 : Influence de la variation de température sur la caractéristique I-V de GPV pour $E=1000\text{ W/m}^2$	23
Figure II. 11 :Influence de la variation de température sur la caractéristique P-V de GPV pour $E=1000\text{ W/m}^2$	23
Figure II. 12 : Schéma bloc de trois modules en série.....	24
Figure II. 13 :caractéristique P-V du trois modules en série sous l'effet d'ombrage	25
Figure II. 14:caractéristique (I-V) du trois modules en série sous l'effet d'ombrage.....	25
Figure II. 15 :schéma bloc de deux modules série/parallèle.....	26
Figure II. 16 :caractéristique (P-V) de deux modules mixte sous l'effet de l'ombrage.....	27
Figure II. 17 :caractéristique (P-V) de deux modules mixte sous l'effet de l'ombrage.....	27
Chapitre III :Commande MPPT d'un système photovoltaïque	
Figure III. 1: Schémas de base d'un convertisseur Boost	30
Figure III. 2: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	30
Figure III. 3 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert	31
Figure III. 4: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....	33
Figure III. 5: Ondulation du courant	34
Figure III. 6: Ondulation de tension	35
Figure III. 7 : Schéma block Simulink du Hacheur Boost	36
Figure III. 8 : courant de l'inductance	36
Figure III. 9 : Courant de sortie du hacheur Boost.	37
Figure III. 10 : Tension d'entrée et de sortie du Boost	37
Figure III. 11 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.	38
Figure III. 12 : Principe de la méthode P&O	39
Figure III. 13 : Algorithme de P&O classique	40
Figure III. 14 : Méthode MPPT Incrémentale Conductance (INC).....	41
Figure III. 15 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance	42
Figure III. 16 : La structure générale d'un système floue	43
Figure III. 17 : Les fonctions d'appartenances des entrées	45
Figure III. 18 : Les fonctions d'appartenances de sortie.....	45

Chapitre IV : Résultats de simulation.	
Figure IV. 1 : Schéma bloc Simulink du système global	47
Figure IV. 2 : Schéma bloc Simulink de la technique P&O.....	48
Figure IV. 3 : puissance de sortie du GPV avec MPPT P&O	48
Figure IV. 4 :tension de sortie du GPV avec MPPT P&O	49
Figure IV. 5 :puissance de sortie du hacheur Boost avec MPPT P&O	49
Figure IV. 6 :tension de sortie du hacheur Boost avec MPPT P&O	49
Figure IV. 7 :comparaison entre la puissance de sortie de GPV et la puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O	50
Figure IV. 8 :schéma bloc Simulink la MPPT flou proposé	51
Figure IV. 9 :la puissance de sortie du GPV avec la MPPT flou	51
Figure IV. 10 : la tension de sortie du GPV avec la MPPT flou	51
Figure IV. 11 :puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT flou	52
Figure IV. 12 :tension de sortie du hacheur Boost avec la MPPT flou	52
Figure IV. 13 : comparaison entre la puissance de sortie de DGPV et du hacheur Boost avec la MPPT flou	52
Figure IV. 14 Schéma bloc de MPPT P&O de trois modules en série	53
Figure IV. 15 :puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT P&O sans ombrage.....	54
Figure IV. 16 : Schéma bloc de MPPT logique flou de trois modules en série.....	54
Figure IV. 17 : puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT logique flou sans ombrage	55
Figure IV. 18 : Schéma bloc de MPPT P&O de trois modules en série avec ombrage.....	55
Figure IV. 19 : puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT P&O avec ombrage	56
Figure IV. 20 : Schéma bloc de MPPT logique flou de trois modules en série avec ombrage.....	56
Figure IV. 21 : puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT logique flou avec ombrage	57
Tableau II. 1 :les paramètres electriques sous les conditions standards du modules KC200GT SOLAR.....	19
Tableau III. 1 : Les règles utilisées pour déterminer la sortie ΔD [34].....	44

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
G_{ref}	L'ensoleillement de référence en condition nominal (1000).	[W/m ²]
I_D	Courant de diode.	[A]
I_L	Le courant aux bornes d'inductance du « Boost ».	[A]
I_{cc}	Le courant de court-circuit.	[A]
I_{mpp}	Le courant de point maximal.	[A]
I_{ph}	Courant photonique.	[A]
I_{pv}	Le courant délivrée par le module PV.	[A]
I_s	Le courant de sortie du « boost ».	[A]
I_0	Courant de saturation.	[A]
K_i	Coefficient de la température en court-circuit.	[A/°C]
K_v	Coefficient de la température en circuit ouvert.	[V/°C]
P_{max}	La puissance maximal	[W]
R_s	La résistance série de la cellule PV.	[Ω]
R_{sh}	La résistance shunt/parallèle de la cellule PV.	[Ω]
T_{ref}	La température de référence en condition nominal.	[K]
V_{co}	La tension en circuit ouvert.	[V]
V_e	La tension d'entrée du « Boost ».	[V]
V_{mpp}	La tension de point maximal.	[V]
V_{pv}	La tension délivrée par le module PV.	[V]
V_s	La tension de sortie du « Boost ».	[V]
V_t	La tension thermique.	[V]
f	Fréquence de coupure de convertisseur.	[Hz]
i_e	Le courant d'entrée du « Hacheur Boost ».	[A]

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
ΔI	L'ondulation de courant.	[A]
ΔT	Déférence entre la température de cellule et température nominal.	[K]
ΔV	L'ondulation de la tension de sortie.	[V]
G	L'ensoleillement du module PV.	[W/m ²]
K	La constante Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$)	Joule/Kelvin
T	La température du module PV.	[K]
α	Le facteur d'idéalité de diode.	---
q	La charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} c$).	[C]
D	Rapport cyclique de convertisseur [0 ; 1].	---
η	Le rendement énergétique.	---
λ	La longueur d'onde.	[m]

Acronyme	Signification
DC	Courant Continu
FF	Facteur de Forme
FLC	Fuzzy Logic Controler ou Contrôleur à base de Logique Floue.
GPV	Générateur Photovoltaïque
INC	Conductance Incrémentale
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking ou Poursuite du Point de Puissance Maximale.
P&O	Perturber et Observer
PV	Photovoltaïque

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie est largement dépendante des énergies fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel et le nucléaire. Cependant, l'utilisation de ces sources d'énergies présente des risques environnementaux majeurs en raison de la pollution liée aux émissions de gaz à effet de serre et à la combustion.

Effectivement, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque a connu une croissance significative au cours des dernières décennies. Les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique utilisable. L'avantage de ce type d'énergie et sa nature non polluante et abondante. En contrepartie sa nature intermittente et sa dépendances des conditions climatiques telles que la température et l'ensoleillement présente un défi à surmonter pour exploiter au maximum cette énergie.

Un des objectifs majeurs de notre travail consiste à étudier l'ombrage, un phénomène important qui influe directement sur la puissance produite par le PV. Les modules PV sont très sensibles à l'ombrage, contrairement aux panneaux solaires thermiques. L'ombrage sur des cellules PV entraîne une perte de production. Il existe principalement deux types d'ombrage à savoir : l'ombrage partiel et l'ombrage total.

Un ombrage partiel expose une partie des cellules à un rayonnement réduit, ce qui modifie la caractéristique de puissance du PV et peut même détruire ce dernier. Plusieurs études ont été menées sur l'effet de l'ombrage et la dégradation des performances des systèmes PV. L'utilisation de la diode de dérivation « by-pass diode » parallèle à des cellules solaires pourrait bénéficier la production d'électricité dans les modules ombrés.

Selon les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et de leur association, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes dites techniques de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT).

Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe un algorithme particulier nommé « maximum power point Tracking ». Cette technique, comme son nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le

rapport cyclique du convertisseur DC-DC, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation [1].

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitre :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les différents types de cellules PV et leur structure de fonctionnement. Nous allons approfondir cette étude par la modélisation des cellules PV ainsi que leurs caractéristiques électriques. Nous allons présenter aussi l'influence des conditions météorologiques (la température et l'éclairement) sur le GPV ainsi que l'effet de l'ombrage partiel. A la fin, nous allons exposer les avantages et les inconvénients des systèmes GPV

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation d'un système PV, en commençant par le générateur PV puis on a simuler l'effet du l'ombrage partiel sur les différents configurations du GPV

Dans le troisième chapitre nous allons étudier le principe de fonctionnement et la modélisation du hacheur survolteur, puis nous allons présenter les différentes commandes MPPT : Perturbation et Observation (PO), Incrémental Conduction (IC) ainsi que la commande basée sur la logique floue (FL).

Dans le quatrième chapitre nous allons appliquer les deux stratégies de commande MPPT dans un système PV sous les conditions atmosphériques standards et en cas de l'ombrage partiel. Les résultats de simulations vont nous permettre de faire une comparaison entre les différentes méthodes étudiées.

Chapitre I:

Etat de l'art sur les modules PV

I.1 Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus abondante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conversion photovoltaïque; dans un premier temps, nous décrirons brièvement la structure et le fonctionnement des cellules et des générateurs photovoltaïques (GPV). Ainsi, nous étudierons l'influence des paramètres météorologiques (Température et Eclairement) sur le comportement électrique d'une cellule solaire. Après nous sommes intéressés particulièrement à l'effet de l'ombrage partiel sur la production énergétique des PV.

I.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable. C'est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la terre. Elle est également une source d'énergie intermittente (pas d'énergie solaire la nuit).

I.2.1 Soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km , Il est situé à une distance moyenne de 149675108 km de la terre, il est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale [2]

La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes.

I.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique[3].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à $\pm 3 \%$, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200 W/m^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus, la figure (I.1) montre, l'analyse spectrale du rayonnement solaire.

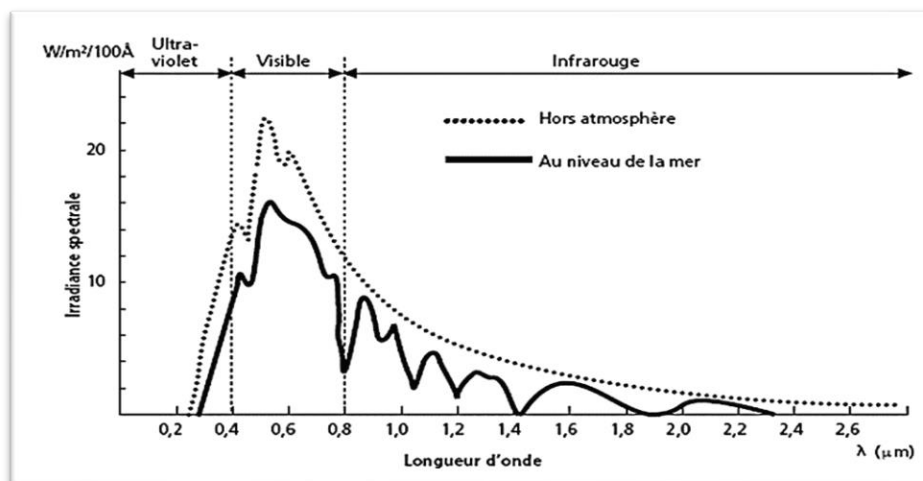


Figure I. 1: Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I.2.3 L'énergie photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique figure (I.2).

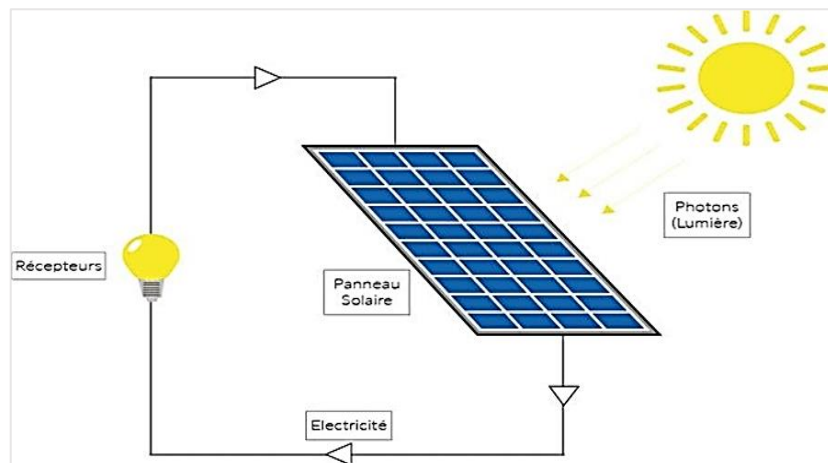


Figure I. 2: Schéma de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque [4]

I.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

I.4 La cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage [5].

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau est le siège d'électrons libres en excès : il est de type N (exemple : silicium dopé au phosphore) Figure (I.3).
- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il est de type P (exemple : silicium dopé au bore). Figure (I.4)

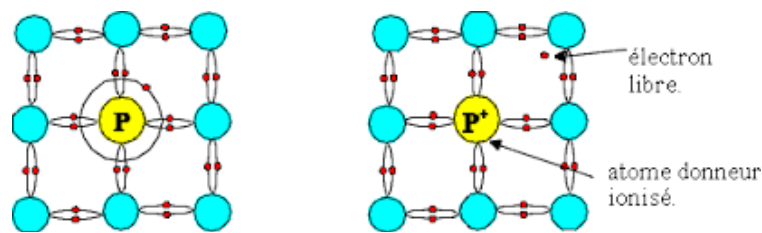


Figure I. 3 : Dopage de type N.

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du bore ou du phosphore. La cellule solaire est obtenue en constituant une jonction de deux zones de types opposés (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, y sont déposés [6].

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [7] :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

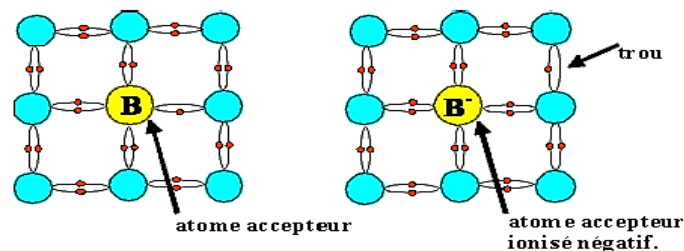


Figure I. 4 : Dopage de type P.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit posséder deux niveaux d'énergie et être suffisamment conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs.

Pour collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire, une jonction PN est utilisée le plus souvent Figure (I.5)

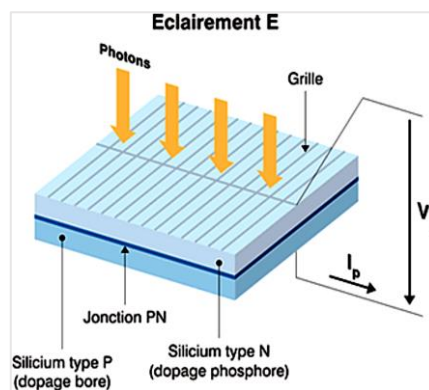


Figure I. 5 : Représentation d'une jonction PN sous éclairage.

I.4.1 Les différents types des cellules

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium figure (I.6):

- Cellule en silicium monocristallin,
- Cellule en silicium polycristallin,
- Cellule en silicium amorphe.

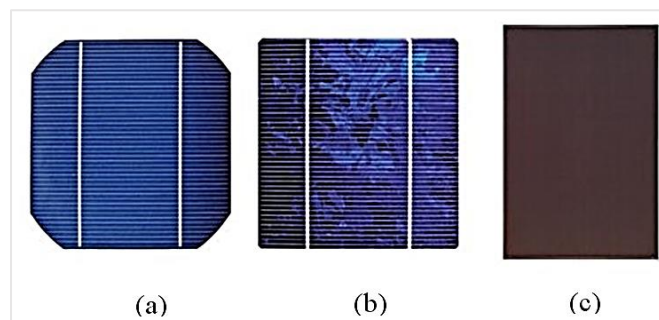


Figure I. 6: Différents types de cellule PV. (a) Silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.

I.4.1.1 Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

I.4.1.2 Cellule en silicium polycristallin

Les cellules polycristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Leur rendement de 13 % et jusqu'à 20 % au laboratoire[8].

I.4.1.3 Cellule en silicium amorphe

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes [9]. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages.

I.5 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

I.5.1 Influence de l'éclairement

La figure (I.7) et (I.8) représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante

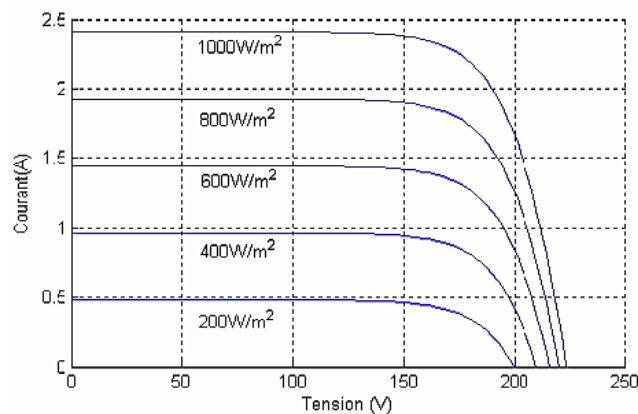


Figure I. 7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

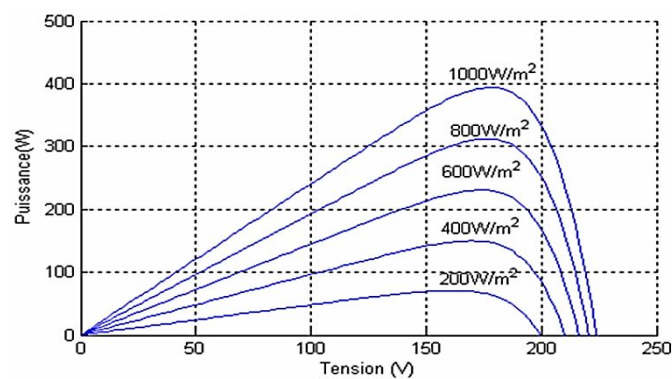


Figure I. 8: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

On remarque bien que la puissance et le courant varie proportionnellement avec l'éclairement et la puissance maximale correspond à l'irradiation nominale, par contre la tension varie légèrement.

I.5.2 Influence de température

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Les figures (I.9) et (I.10) donnent l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairement constant.

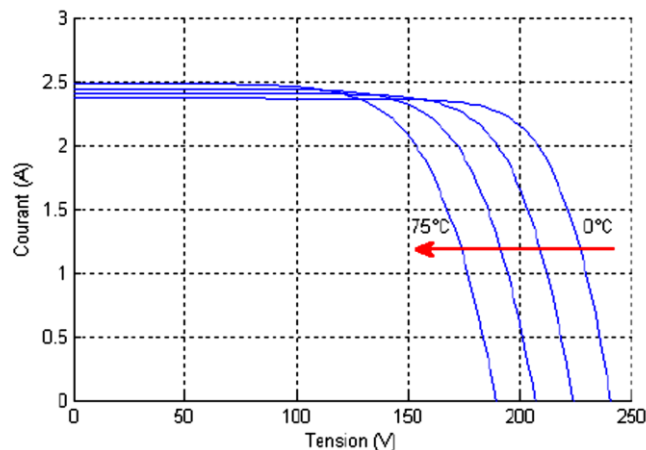


Figure I. 9 :Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

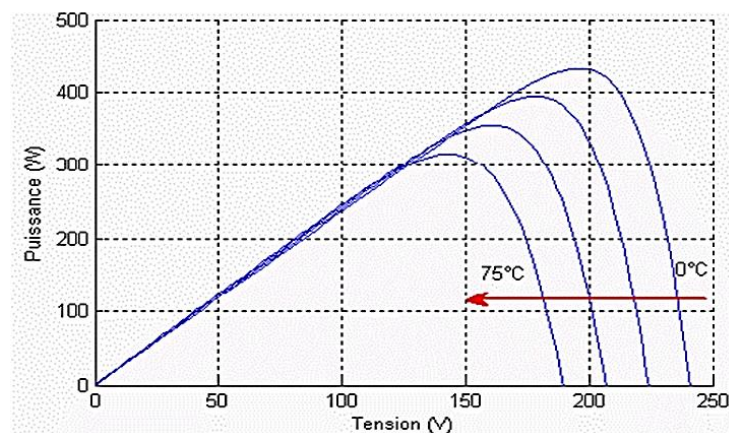


Figure I. 10 :Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

La figure (I.9) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$, il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I-V dont le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension du circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [10].

I.6 Association des modules PV

Pour pouvoir augmenter la tension, le courant et la puissance d'un générateur PV, on peut associer plusieurs modules PV en série, en parallèle ou encore en mixte(série/parallèle).

I.6.1 Association en série

L'association des cellules photovoltaïques en série, permet d'obtenir une tension de sortie égale à la somme des tensions de toutes les cellules, tandis que le courant qui en circule est le même Figure (I.11) [11].

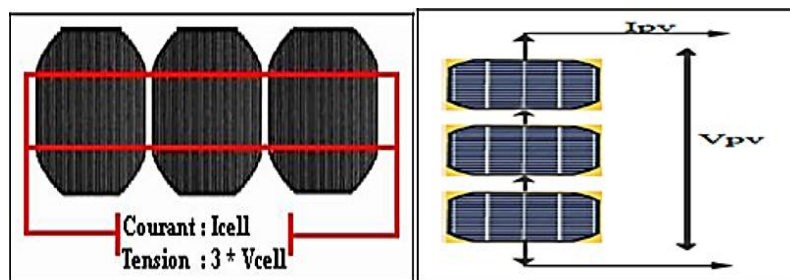


Figure I. 11: Association en série des cellules PV.

I.6.2 Association en parallèle

En additionnant les cellules ou les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule ou chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules ou de modules en parallèle dans la branche. (Voir la figure (I.12)) [12]

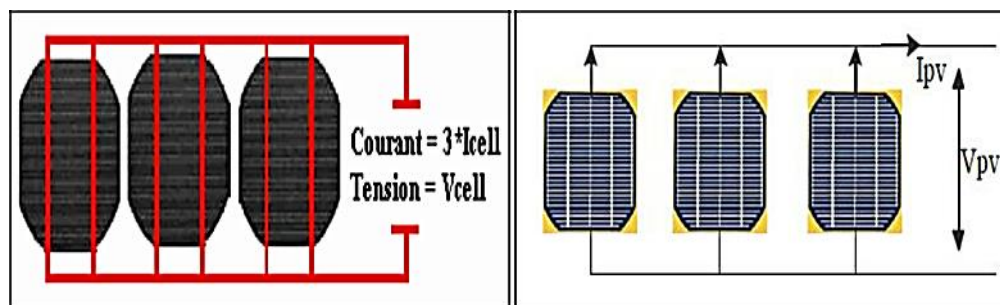


Figure I. 12: Association en parallèle des cellules PV.

I.6.3 Association mixte (série/parallèle)

Pour obtenir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire série parallèle comme montre dans la figure (I.13).

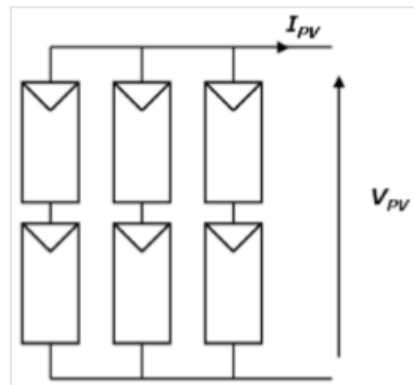


Figure I. 13: Association mixte des cellules PV.

I.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.7.1 Avantages

- Gratuité,
- Pas de pollution,
- Structure fixe,
- Systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance,
- Cout de fonctionnement est très faible par rapport aux autres énergies.

I.7.2 Inconvénients

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent,
- La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit,
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages)
- Besoin de beaucoup d'espace.

I.8 Ombrage partiel

L'ombrage partiel concerne la moitié d'une cellule ou de la moitié d'une rangée de cellule. Ce effet diminuera la puissance proportionnellement au pourcentage de la surface ombrée.

Lorsque des cellules PV sont associées en série, le courant circulant dans l'ensemble est limité par la cellule la moins performante ou la moins éclairée. Ainsi, une cellule qui ne recevrait pas la même quantité de lumière que le reste de l'ensemble produirait un courant plus faible, c'est ce qu'on appelle l'ombrage partiel. A cause de l'ombrage partiel la cellule recevant le moins de flux va dissiper une partie d'énergie produite par le reste. L'ensemble produirait un courant plus faible, c'est ce qu'on appelle l'ombrage partiel[13].



Figure I. 14 : L'ombrage partiel sur les panneaux photovoltaïques

I.9 Causes de l'ombrage

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

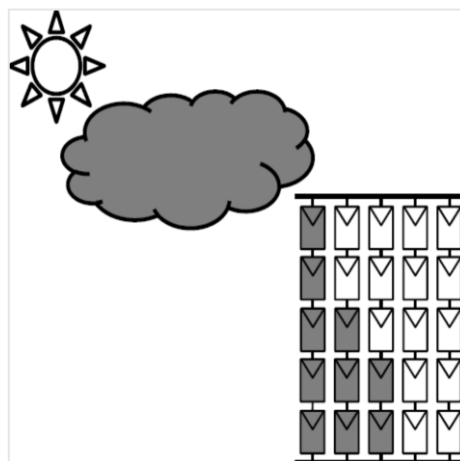


Figure I. 15 : GPV dans des conditions partiellement ombragés causés par le passage de nuages.

I.10 Effet de l'ombrage partiel

L'ombre perturbe le fonctionnement normal du système photovoltaïque, car le module ombragé affecte négativement les modules restants uniformément éclairés. Parmi les problèmes rencontrés, il y a la réduction du rendement du système PV, la présence de maximums locaux de puissance (miss-matching) et les apparitions de points chauds (hot spots) qui peuvent être évités en utilisant des diodes bypass [14] [15].

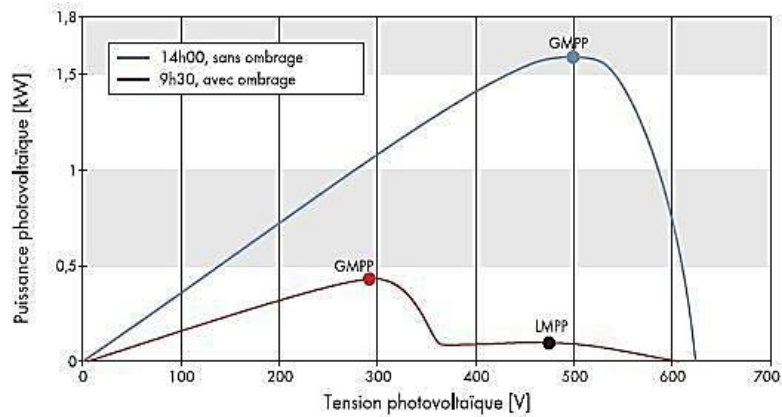


Figure I. 16 : Diagramme de puissance et de tension de GPV à de moments différents de la journée (avec et sans ombrage partiel)

I.11 Système de protection

Pour garantir une plus grande durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules PV. Celles-ci permettent d'éviter des pannes destructrices dues au groupement de cellules en série et de modules en parallèle. Actuellement, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations :

I.11.1 Diode By-pass

L'utilisation de la diode de dérivation « by-pass diode » pourrait bénéficier la production d'électricité dans les modules ombrés [16]. La diode by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse [17]. Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairage n'est pas homogène et éviter ainsi l'apparition de points chauds (hot spots) et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de maximums locaux de puissance[18].

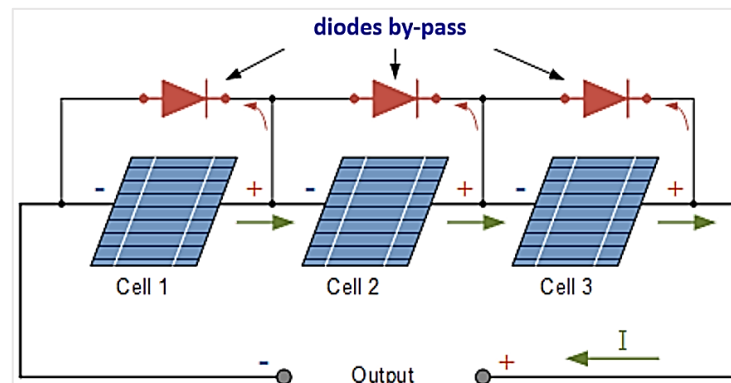


Figure I. 17 : Utilisation de la diode by-pass.

I.11.2 Diode anti-retour

La diode anti-retour empêche le courant négatif dans les générateurs photovoltaïques .Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

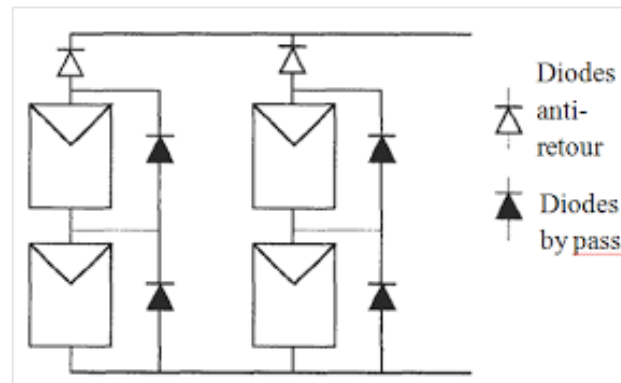


Figure I. 18 : Association sécurisée des modules PV en série parallèle avec leurs diodes de protection (by-pass et anti-retour).

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques en commençant par l'énergie solaire et en passant sur l'effet photovoltaïque pour arriver au fonctionnement de la cellule photovoltaïque et les types des cellules photovoltaïque . L'étude de la caractéristique courant-tension ainsi que l'influence de l'éclairement et la température puis nous avons présentés les différentes structures associations des module PV. Nous avons étudié le phénomène d'ombrage partiel et ses causes et son impact sur les panneaux photovoltaïques .puis on a proposé des solutions comme les diodes by-pass et diodes anti-retour pour leur contribution à réduire l'effet d'ombrage.

Dans le prochain chapitre, nous allons introduire la modélisation de GPV et étudier l'effet de l'ombrage sur les différentes configurations de modules PV.

Chapitre II :

Effet de l'ombrage partiel sur les systèmes Photovoltaïques

II.1 Introduction

Les modules PV sont très sensibles à l'ombrage, contrairement aux panneaux solaires thermiques. L'ombrage sur des cellules PV entraîne une perte de production. Un ombrage partiel expose une partie des cellules à un rayonnement réduit, ce qui modifie la caractéristique de puissance du PV et peut même détruire ce dernier.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque par utilisation de logiciel MATLAB SIMULINK pour faire une simulation numérique sur le module photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) et étudier l'impact d'ombrage sur le système PV.

II.2 Modélisation du GPV

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_{sh} caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

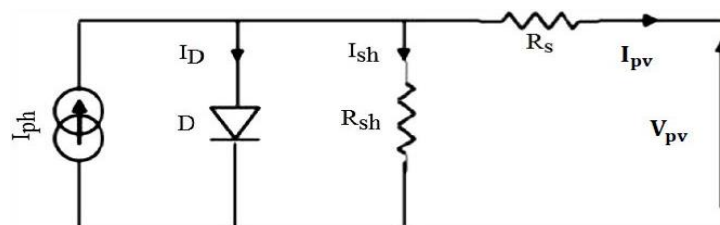


Figure II. 1: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

La figure (II.1) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Elle correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode, une résistance série R_s représentant les pertes par effet joule, et une résistance shunte R_{sh} caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le courant arrière qui est généralement très supérieure à R_s .

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire : est déduire à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \alpha}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

Le courant dans la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

Le courant fourni par une cellule PV :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Le courant de saturation est calculé par :

$$I_0 = \frac{I_{cc} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{co} + K_V \Delta T}{\alpha V_t}\right) - 1} \quad (\text{II.5})$$

Le photon courant est calculé par :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.6})$$

Où :

I_{pv} : est le courant fourni par le module PV.

$I_{ph} : I_{cc} \left(\frac{G}{1000}\right)$: est le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_{cc} : Est le courant de court-circuit.

V_{pv} : est la tension délivrée par le module PV

V_{co} : est la tension en circuit ouvert

I_0 : est le courant de saturation.

K : est la constante de Boltzmann (1.381.10⁻²³joule/Kelvin).

q : est la charge d'électron (1.602.10⁻¹⁹c).

T : est la température du module PV en Kelvin (K).

T_n =Température nominale en Kelvin (K).

α : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < \alpha < 3$).

R_{sh} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

K_i Coefficient de température du courant de court-circuit.

K_v : Coefficient de température en circuit ouvert.

II.3 Paramètres de la cellule PV

D'après les courbes courant-tension ou l'équation caractéristique en pouvant être déterminé quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires[19] :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ,
- La tension en circuit ouvert V_{co} ,
- Le facteur de forme FF,
- Le rendement de conversion d'énergie η .

II.3.1. Courant de court-circuit

Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée non raccordée c'est-à-dire que ($V = 0$). Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} .

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

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \alpha \cdot V_t \cdot \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II.7})$$

II.3.3. Facteur de forme FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule ($P_{max} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}$) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule, plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante. Il est de

l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{I_{cc}V_{co}} \quad (II.8)$$

II.3.4. Rendement énergétique

On appelle rendement énergétique le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i)

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{\phi \cdot S} \quad (II.9)$$

Où :

V_{mpp} : la tension de point maximal.

I_{mpp} : le courant de point maximal.

P_{max} : puissance maximale.

S : est la surface de la cellule.

ϕ : est le flux incident.

II.4 Paramètres électriques du PV utilisé

Nous avons choisi Le KC200GT SOLAR PANEL qui est un panneau photovoltaïque composé de 36 cellules monocristallines en, ayant une puissance maximale de 200 W et considéré dans les conditions standards (STC : Standard Test Conditions) $G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$

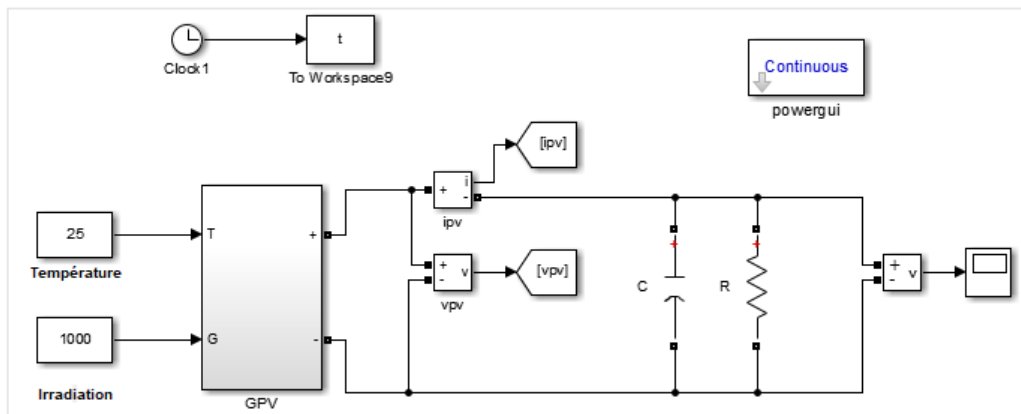
Tableau II. 2 : Les Paramètres Electrique sous conditions standards du module KC200GT SOLAR PANEL

Grandeurs	Valeurs
Puissance maximale du module P_{max}	200 w
Tension de circuit ouvert V_{co}	32.9 V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.21 A
Tension optimale V_{mpp}	26.3 V
Courant optimale I_{mpp}	7.61 A
Résistance série R_s	0.221 Ω
Résistance shunt R_{sh}	415.405 Ω
Nombre des cellules en séries N_s	36
Nombre des cellules en parallèle N_p	1
Coefficient de la température en court-circuit K_i	0.0032 A/K
Coefficient de la température en circuit ouvert K_v	-0.1230 V / K

II.5 Simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink

Le modèle du GPV sous l'environnement de Matlab Simulink représenté dans la figure (II.2) comporte les blocs de circuit équivalent de panneau PV, le bloc de visualisation des résultats, et à partir des équations (II.4, II.5 et II.6) les blocs des calculs des courants I_{pv} , I_0 et I_{ph} .

II.5.1. Simulation de chaque bloc sous Matlab-Simulink

**Figure II. 2 :** Schéma bloc Simulink d'un générateur PV sou Matlab-Simulink.

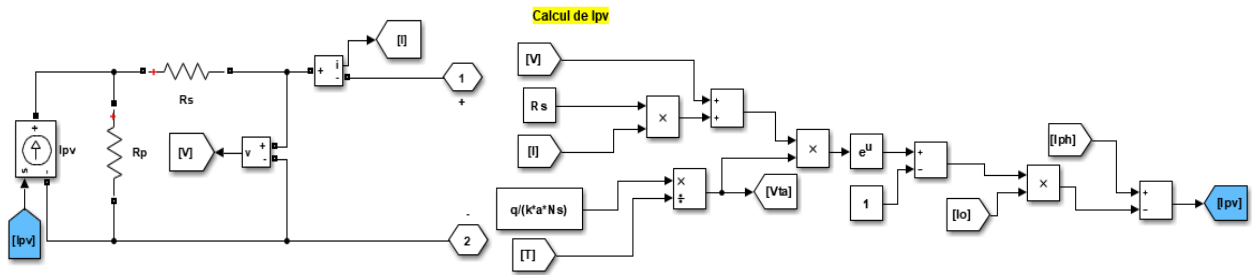


Figure II. 3 : schéma d'un courant de module PV.

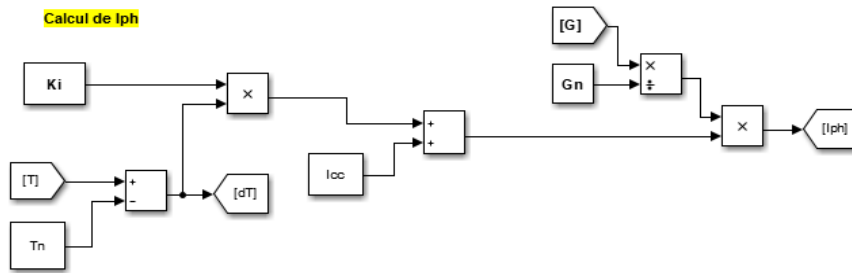


Figure II. 4 : schéma de photo- courant

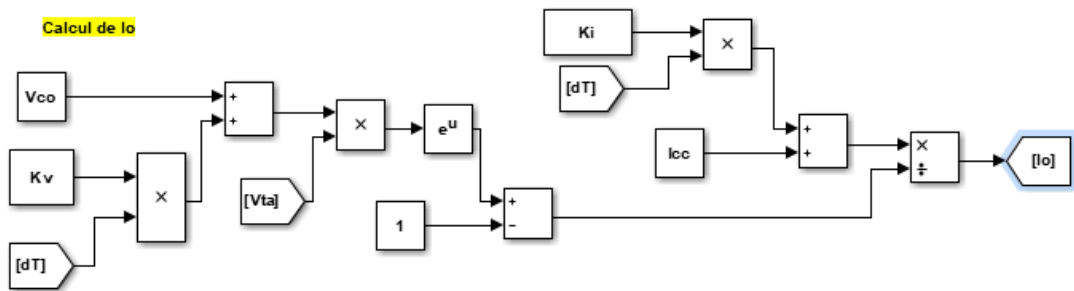


Figure II. 5 : Schéma d'un courant de saturation.

II.6 résultats de simulation

Les résultats obtenus de la simulation (en utilisant le logiciel MATLAB) des caractéristiques courant –tension $I(V)$ et puissance -tension $P(V)$ de la cellule photovoltaïque Dans les conditions standards ($T=25^{\circ}c$, $E=1000 \text{ W/m}^2$) sont représentés dans les figures suivant :

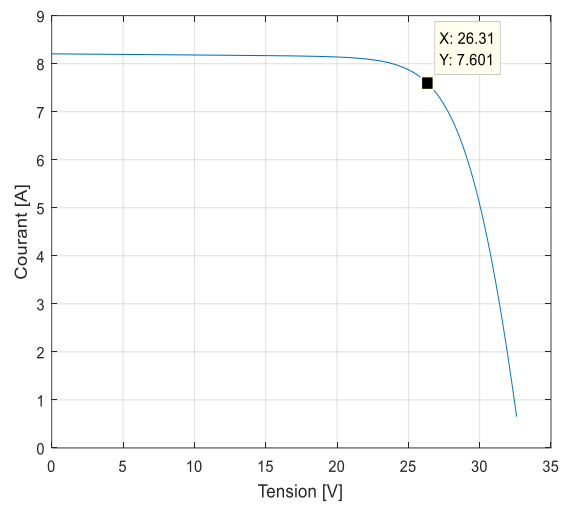


Figure II. 6 : Caractéristique courant-tension du GPV avec les conditions standards

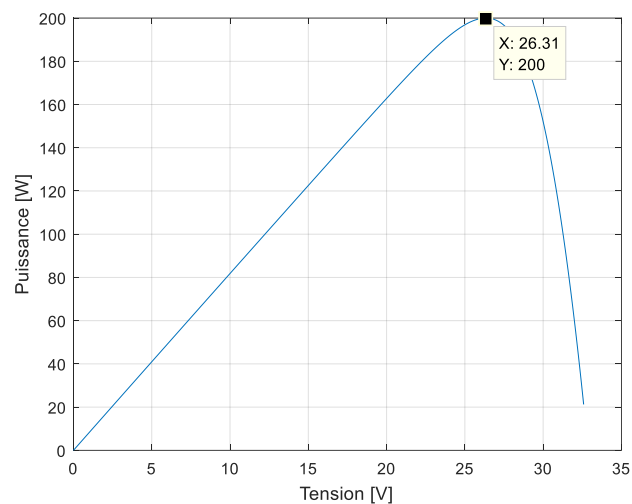


Figure II. 7 : Caractéristique puissance-tension du GPV avec les conditions standards.

On constate que la caractéristique courant-tension (I-V) a un courant maximum (courant de court-circuit I_{cc}) et une tension maximale V_{co} (tension de circuit ouvert). De même la caractéristique puissance-tension (P-V) a un point de puissance maximale du générateur à une tension appelée V_{mpp} inférieure à la tension V_{co} . Ce point est très important et doit être l'objet de toute l'étude d'un système PV, en effet c'est le point où le GPV fournit le maximum de puissance.

II.7 Influence des paramètres externes sur un module photovoltaïque

II.7.1. Influence de l'éclairement

La figure (II.8) représente les caractéristiques courant-tension d'un générateur photovoltaïque pour différents niveaux d'éclairiments à une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

On remarque que la valeur du courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'éclairement. Contrairement La tension en circuit ouvert (V_{co}) change peu en fonction de l'éclairage. Elle peut être considérée comme constante pour une installation donnée

Dans l'autre côté la caractéristique puissance-tension est donnée par la figure (II.8), on remarque que la puissance est proportionnelle à l'éclairement.

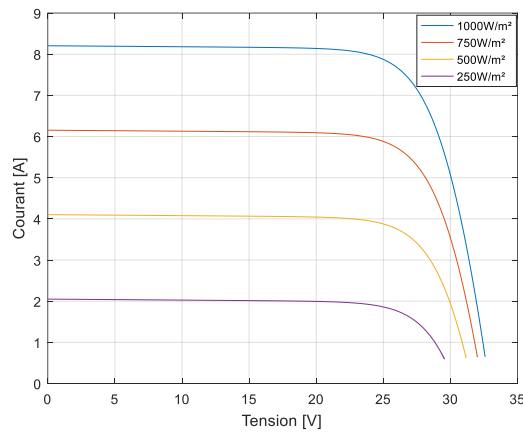


Figure II. 8 : Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques I-V du GPV pour $T= 25^{\circ}\text{C}$.

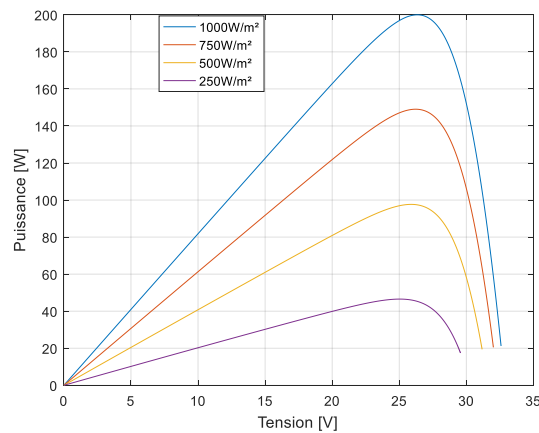


Figure II. 9 : Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques P-V du GPV pour $T= 25^{\circ}\text{C}$.

II.7.2. Influence de la température

On fixe l'éclairement à 1000 W/m^2 et on fait varier la température de 0°C jusqu'à 50°C , les allures des caractéristiques courant-tension et puissance-tension obtenues sont présentées en dessous

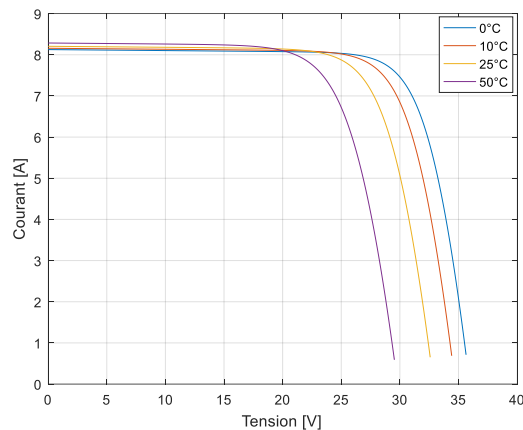


Figure II. 10 : Influence de la variation de température sur la caractéristique I-V de GPV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$

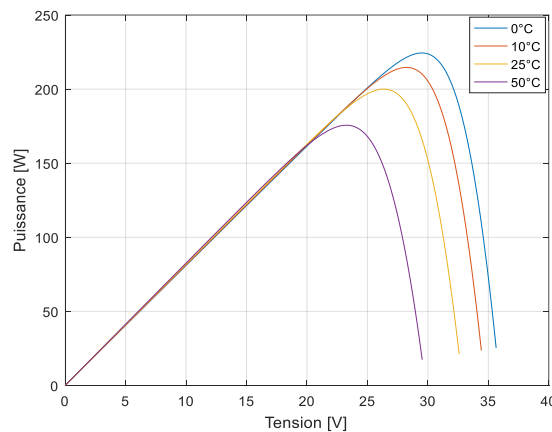


Figure II. 11 : Influence de la variation de température sur la caractéristique P-V de GPV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$.

On remarque que La tension de circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, par Contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue.

On conclut que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

II.8 Simulation d'ombrage partiel

Dans le but de pouvoir visualiser les caractéristiques (I, V) et (P, V) sous l'effet de l'ombrage il faudra faire la schématisation électrique de ce phénomène, en modélisant le GPV, la diode et la variation de l'insolation. Pour cela l'environnement Matlab/Simulink est convenable à faire cette simulation. Nous examinons plusieurs cas possibles de connections des modules PV.

II.8.1. Trois modules en série

Cette architecture représente l'assemblage de trois générateur PV en série, la borne négative est reliée à la borne positive du deuxième GPV ainsi de suite. Ces trois derniers sont connectés en parallèle avec trois diodes, comme cité précédemment. Pour mesurer la tension aux bornes du GPV nous introduisons toujours un voltmètre aux bornes de ce dernier, le courant produit par les trois GPV sera aussi mesurer par un ampèremètre introduit en série avec les trois générateurs. Ceux-ci nous permettront de calculer la puissance produite par l'ensemble. les trois GPV sont soumis à des conditions météorologiques différents (1000 et 600 et 200 w/m^2) et à une température constante $T=25^\circ C$. Les résultats de simulation sous Simulink sont représentés par les figures suivantes :

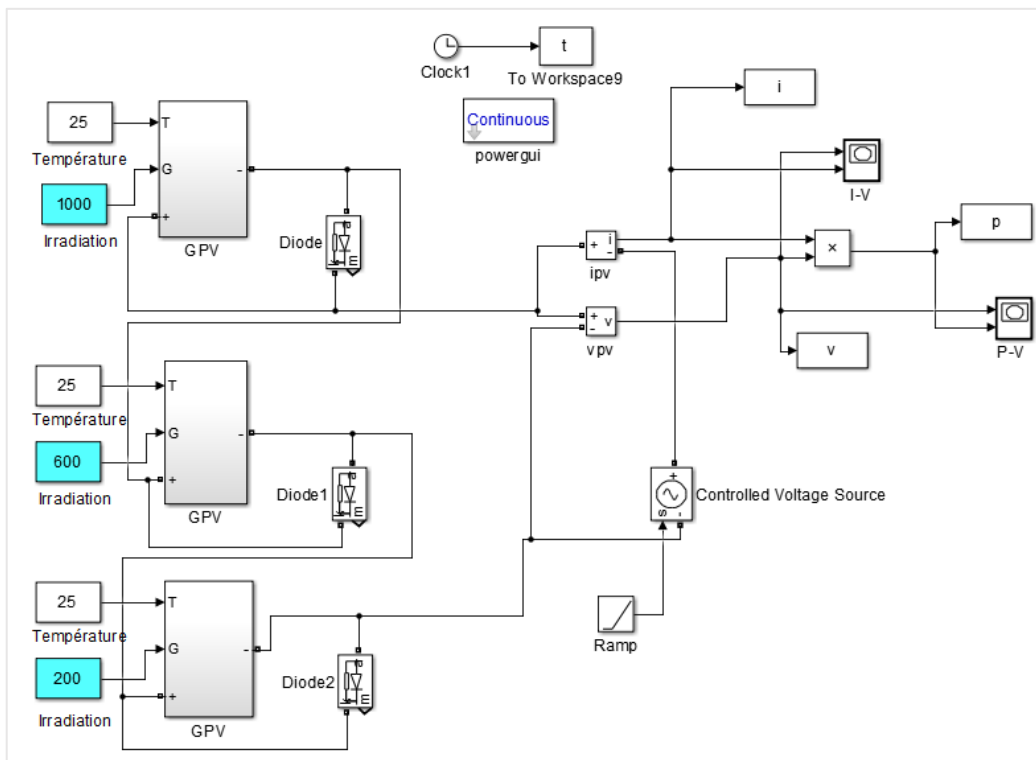


Figure II. 12 : Schéma bloc de trois modules en série.

II.8.2. Résultats de simulation

Les figures (II.13) et (II.14) représentent les caractéristiques (P-V) et (I-V) de trois modules en série ombragés sont soumis à des conditions météorologiques différents (1000 et 600 et 200 w/m²) et à une température constante T=25°C.

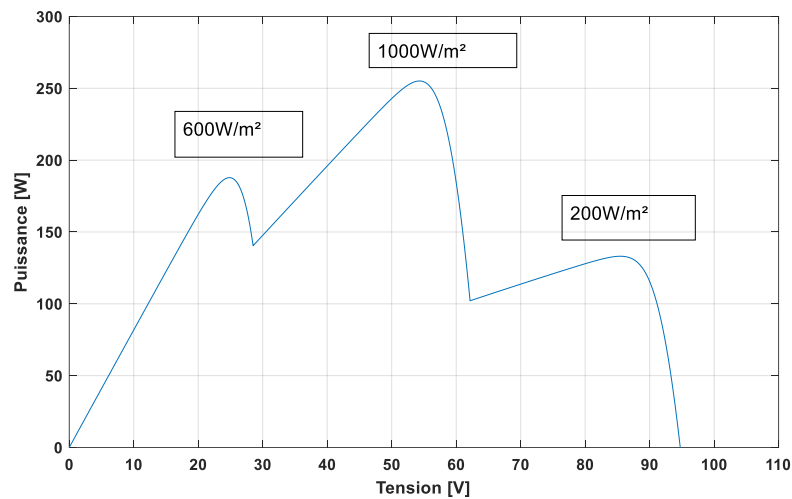


Figure II. 13 : Caractéristique P-V de trois modules en série sous l'effet d'ombrage.

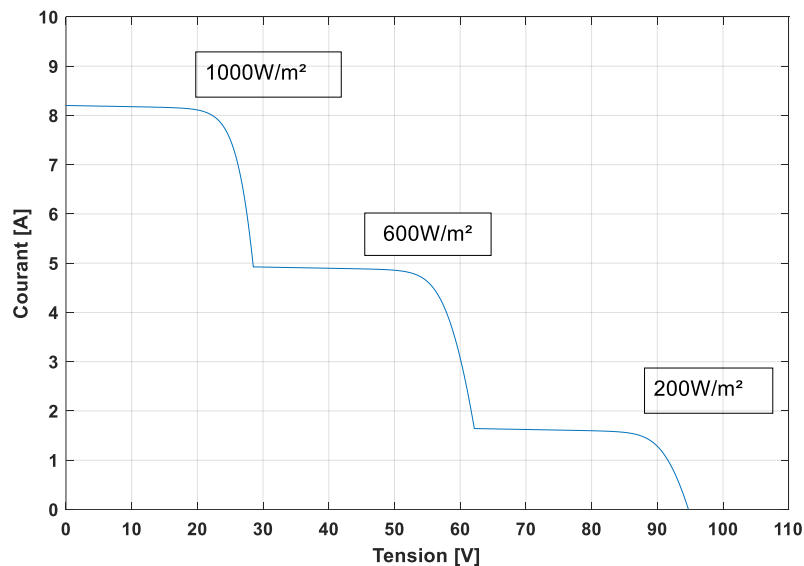


Figure II. 14: Caractéristique(I-V) du trois modules en série sous l'effet d'ombrage.

II.8.3. Deux modules en série/parallèle (mixte)

Cette architecture représente l'assemblage de deux branches de deux générateurs PV en série et en parallèle. Chaque module est connecté en parallèle avec la diode By-pass, l'intérêt de cette diode est cité précédemment. Nous introduisons toujours un voltmètre aux bornes de ce dernier, le courant produit par les deux GPV sera aussi mesurer par un ampèremètre introduit en série avec les trois générateurs. Ceux-ci nous permettront aussi de calculer la puissance produite par l'ensemble. La source de voltage contrôlée par une rampe qui sert à faire varier la tension d'entrée produite. Les quatre GPV sont soumis à des conditions météorologiques différents (1000 et 500 w/m²) et à une température constante T=25°. Les résultats de simulation sous Simulink pour ces conditions sont illustrés par les figures suivantes :

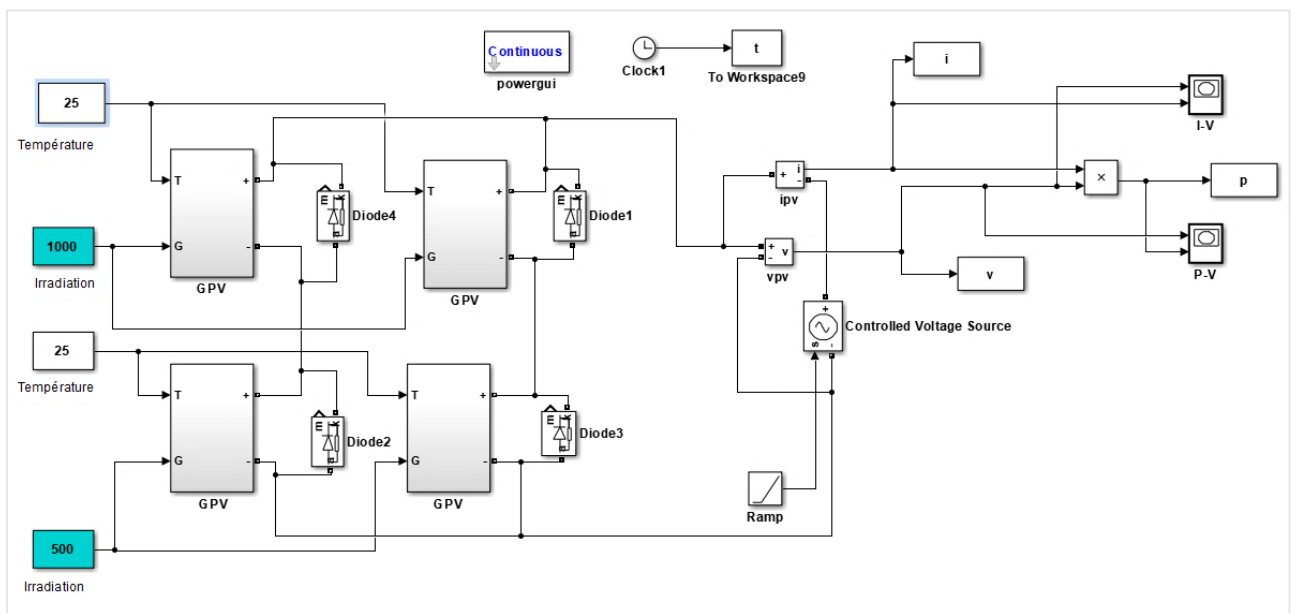


Figure II. 15 : Schéma bloc de deux modules série/parallèle.

II.8.4. Résultat de simulation

Les figures suivantes représentent les caractéristiques (P-V) et (I-V) de deux modules en série/parallèle ombragés soumis à des conditions météorologiques différents (G=1000, 500w/m²) et à une température constante T=25°C.

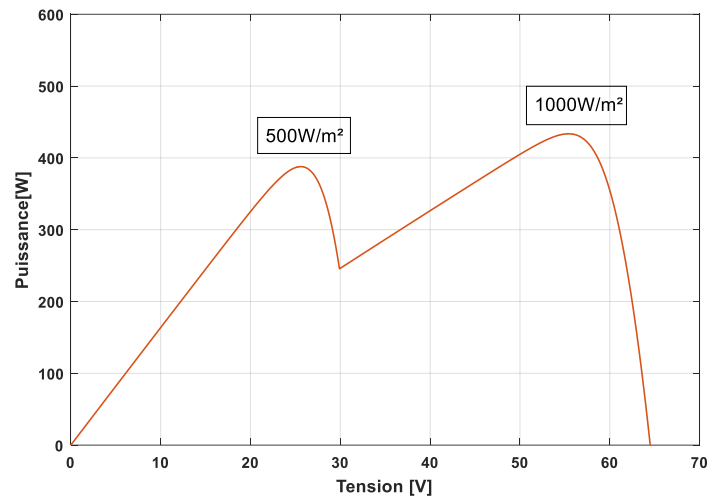


Figure II. 16 : Caractéristique (P-V) de deux modules mixtes sous l'effet de l'ombrage

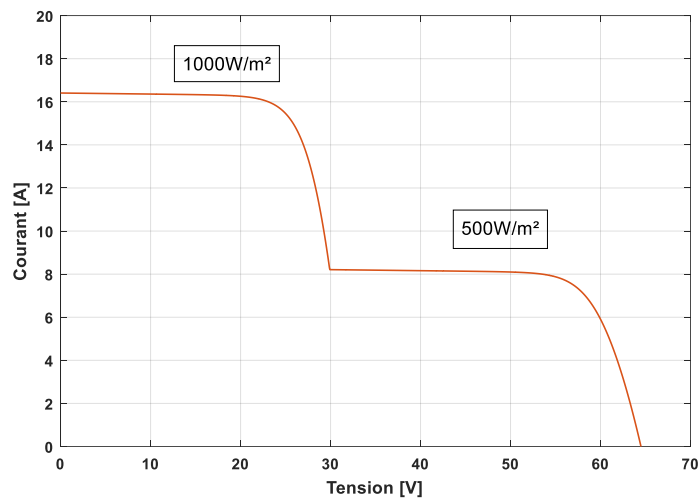


Figure II. 17 : Caractéristique (P-V) de deux modules mixtes sous l'effet de l'ombrage.

Dans les conditions d'ombrage partiel, on remarque dans la figure (II.13) l'apparence de trois points de maximum de puissance ($G=1000, 600, 200\text{W/m}^2$) présente deux points locaux et un point de puissance global. On constate que l'ombrage partiel influe considérablement sur la puissance maximale de sortie du panneau et une dégradation de courant comme représenté sur la figure (II.14) et (II.17).

Dans cette figure (II.16) on remarque l'apparence de deux points de maximum de puissance respectivement aux insolationes $G=1000\text{w/m}^2$ et 500w/m^2 .

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque. Après, nous avons étudié l'effet de l'ombrage pour différentes configurations sur modèle PV. Une simulation des caractéristiques (I, V) et (P, V) pour la mise de trois GPV en série et deux en série/parallèle sous les conditions d'ombrage a été effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink. Il est constaté que l'effet de l'ombrage sur les panneaux reliés en série est important que les panneaux reliés en série/ parallèle.

Dans le chapitre suivant, on présentera les différentes techniques de commande MPPT classique et intelligentes qui sont appliquées au convertisseur survolteur (Boost) pour maximiser la puissance.

Chapitre III

Commande MPPT d'un système photovoltaïque

III.1 Introduction

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum [20].

Le principe de commande MPPT est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation par le Hacheur Boost entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

Dans notre travail nous sommes intéressés à étudier le convertisseur hacheur Boost pour la conception d'une interface de puissance. Après la détermination de la structure du convertisseur utilisé, différentes technologies MPPT, permettant au GPV de fonctionner à sa puissance maximale sont abordées.

III.2 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Un hacheur est un convertisseur continu-continu qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue.

Les hacheurs sont utilisés comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire [21].

III.3 Convertisseur élévateur (Boost)

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Le schéma de la figure (III.1) représente le circuit Boost. Il est couramment employé dans les systèmes alimentés par batterie nécessitant des tensions d'alimentation élevées [22]. Dans ce cas, le convertisseur est utilisé pour réduire le nombre de composants nécessaires pour atteindre la tension requise.

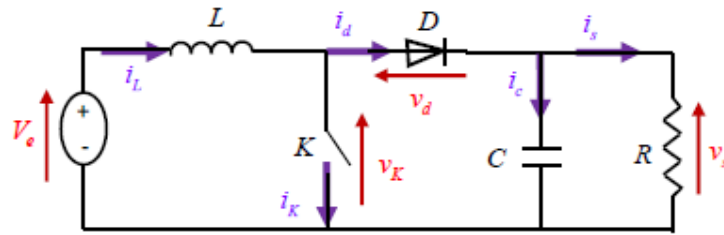


Figure III. 1: Schéma de base d'un convertisseur Boost.

III.4 Principe de fonctionnement

Le circuit étant alimenté par une source de tension V_e , le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K [23]. L'interrupteur K est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T ($0 < t < \alpha T$). Le courant traversant L va augmenter linéairement et une énergie sera stockée dans L voir la figure (III.2)

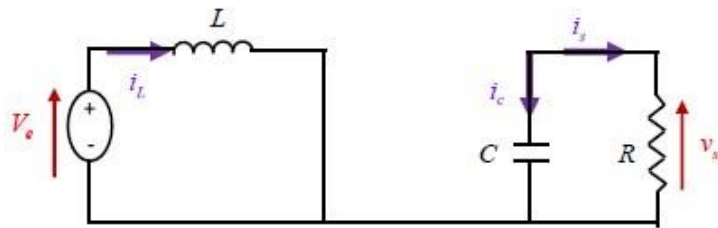


Figure III. 2: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{III.1})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{III.2})$$

Avec : I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance à l'instant $t = 0$.

A l'instant : $t = \alpha T$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max} .

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{III.3})$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans la l'inductance. De l'expression (III.1) on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance.

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T = \frac{\alpha V_e}{Lf} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

f : la fréquence de découpage,

L : Valeur de l'inductance de lissage (H),

V_e : Tension aux bornes du générateur(V),

T : Période de découpage du signal de l'interrupteur $T = \frac{1}{f}$ en secondes (s),

α : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$

i_L : Courant de l'inductance.

Pour tracer les formes d'ondes, dans l'instant ($0 < t < \alpha T$) on a :

$$\begin{cases} V_K(t) = 0 \\ i_d(t) = 0 \\ V_L(t) = V_e \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Lors du blocage du transistor ($\alpha T < t < T$), la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de la charge. Le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure (III. 3)

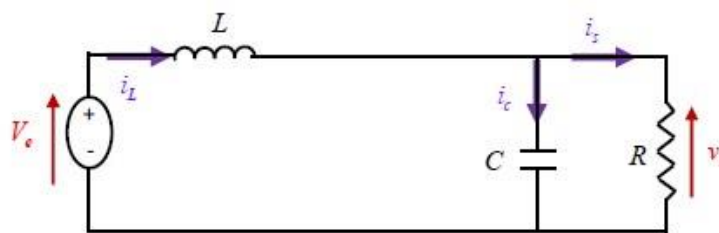


Figure III. 3 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{III.6})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad (\text{II.7})$$

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (III.2) et (III.6), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{III.8})$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Ce dernier étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (\text{III.9})$$

Pendant la première séquence de fonctionnement ($0 < t < \alpha T$), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (\text{III.10})$$

Dans la fraction ($\alpha T < t < T$), on a :

$$\begin{cases} V_K(t) = V_s \\ i_K(t) = 0 \\ V_L(t) = V_e - V_s \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

V_s Tension de sortie du convertisseur (V),

i_s Courant de sortie du convertisseur (A).

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure (III.4), en régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle.

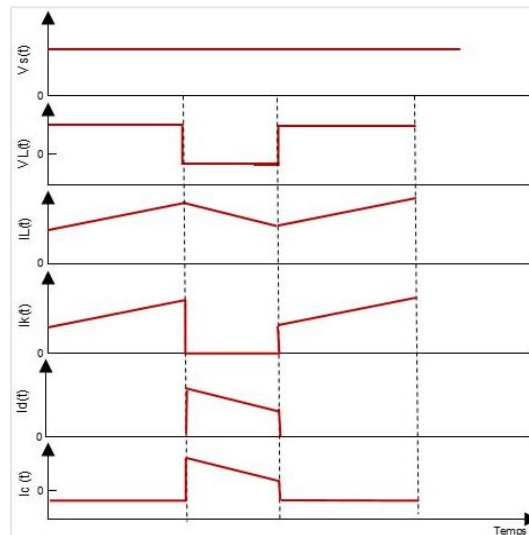


Figure III. 4: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.

III.5 Détermination des paramètres du hacheur Boost

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source V_p . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

III.5.1 Calcul de l'inductance L

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne figure (III.5).

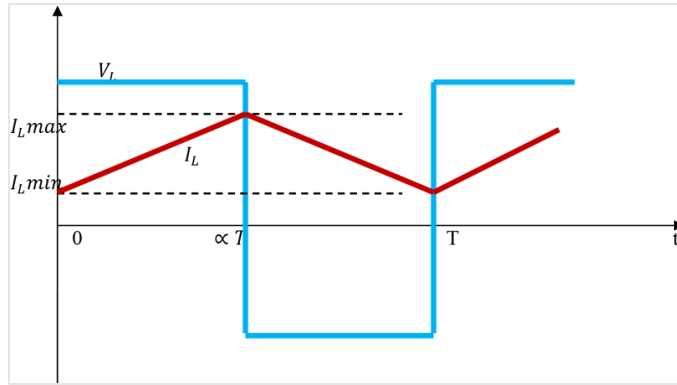


Figure III. 5: Ondulation du courant.

Calculons l'ondulation du courant pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_L(t) = \frac{V_e}{L} + I_{L \min} \quad (\text{III.12})$$

En $t = \alpha T$

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{L \min} \quad (\text{III.13})$$

$$I_L(\alpha T) = I_{L \max} \quad (\text{III.14})$$

D'où :

$$\Delta I_L = I_{L \max} - I_{L \min} \quad (\text{III.15})$$

$$\Delta I_L = \frac{V_e}{L \cdot f} \alpha \quad (\text{III.16})$$

A partir de (III.8 et III.16) nous pouvons écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)}{L \cdot f} V_s \quad (\text{III.17})$$

Où :

$I_{L \min}$ Courant minimum dans l'inductance(A),

$I_{L \max}$ Courant maximum dans l'inductance(A).

III.5.2 Calcul du condensateur C

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance, l'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur voir (III.6).

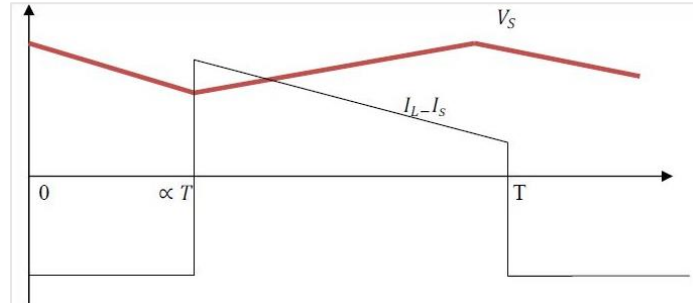


Figure III. 6: Ondulation de tension

Calculons l'ondulation de la tension pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_s(t) = V_{smax} - \frac{i_s}{c} t \quad (III.18)$$

En $t = \alpha T$

$$V_s(\alpha T) = V_{smax} - \frac{i_s}{c} \alpha T \quad (III.19)$$

D'où :

$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin} = \frac{i_s}{cf} \alpha \quad (III.20)$$

A partir de III.9 et III.20 nous pouvons écrire :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{c.f} \quad (III.21)$$

Où :

C : valeur du condensateur de filtrage (F).

V_{smin} : Tension minimum aux bornes de condensateur(V).

V_{smax} : Tension maximum aux bornes de condensateur(V).

ΔV_s : Ondulation de tension aux bornes de condensateur(V).

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée.

III.6 Modèle Simulink du Hacheur Boost

Dans l'environnement Simulink de Matlab nous avons vérifié que le hacheur Boost permet d'élever la tension (figure III.7), pour les paramètres suivantes ($V_e=100V$, $L=0.00175H$, $R=15$, $C=0.0022$, $\alpha=50\%$)

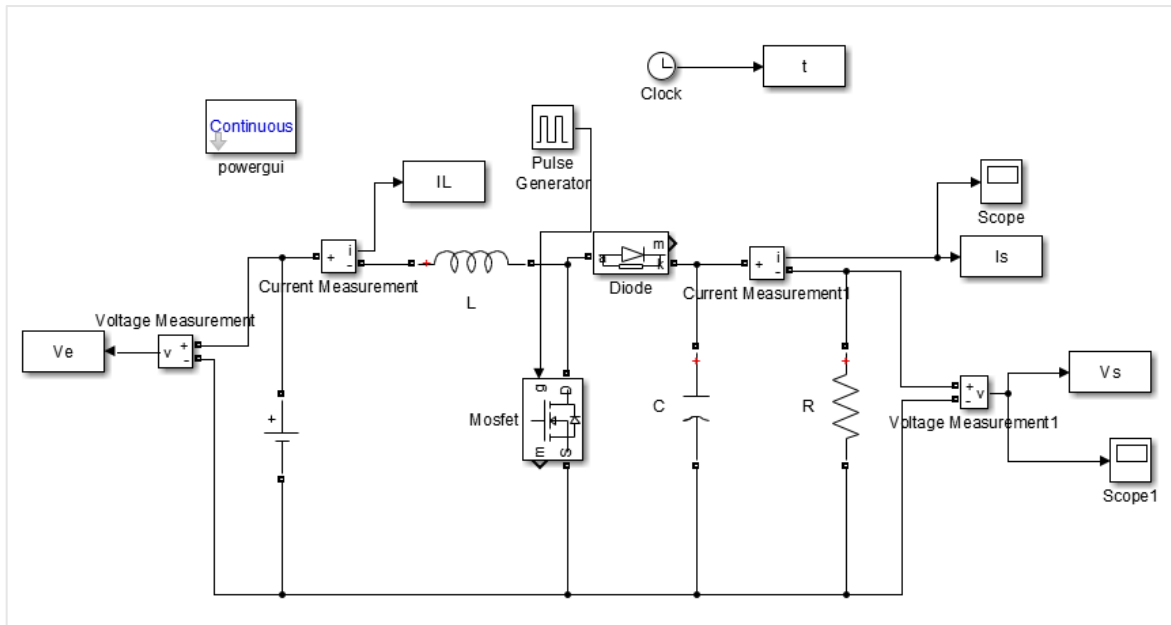


Figure III. 7 : Schéma block Simulink du Hacheur Boost.

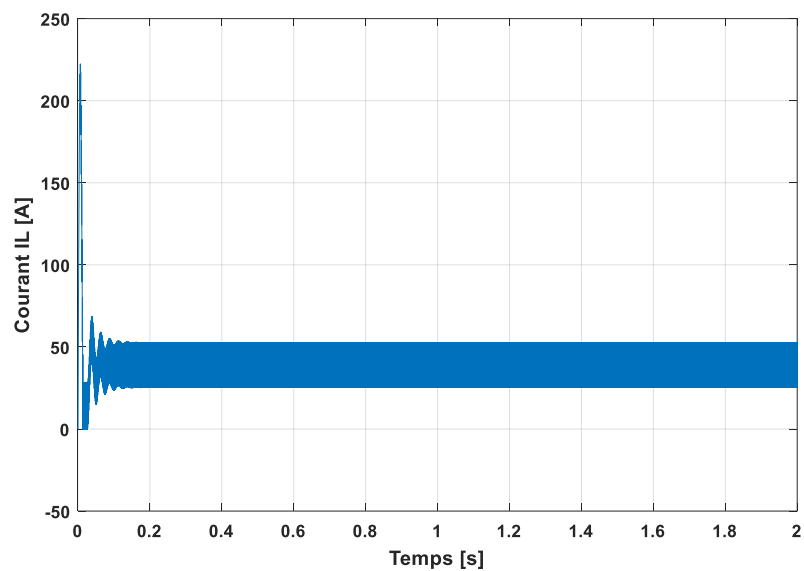


Figure III. 8 : Courant dans l'inductance.

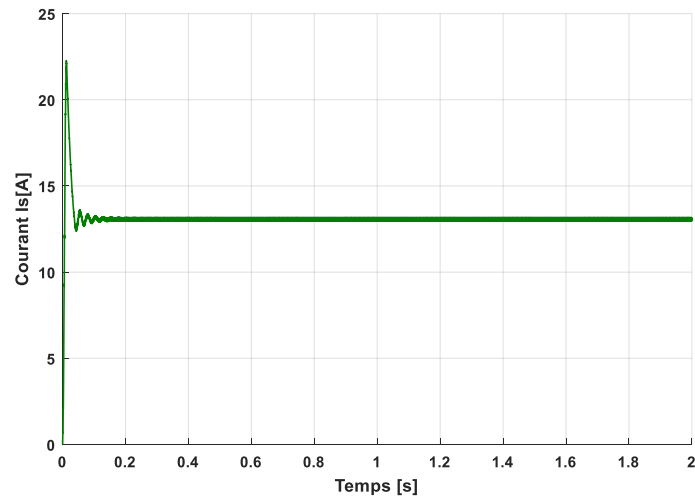


Figure III. 9 : Courant de sortie du hacheur Boost.

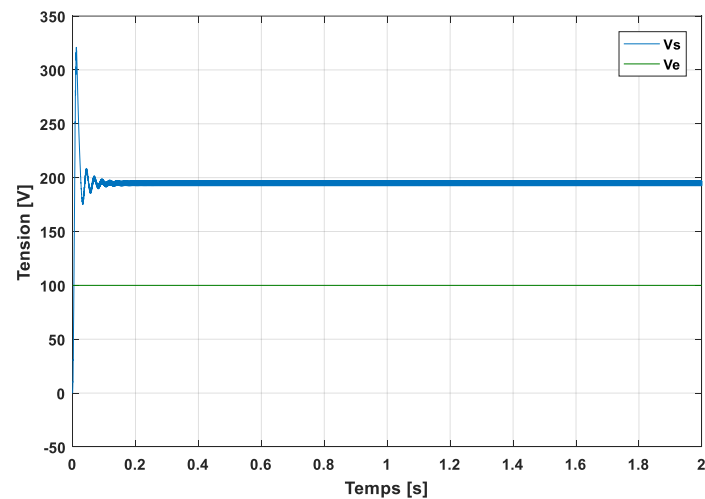


Figure III. 10 : Tension d'entrée et de sortie du Boost.

Les résultats de simulation montrent que convertisseur Boost a effectué son rôle correctement par l'augmentation de la tension de sortie par rapport la tension d'entrée, par contre le courant de sortie est inférieur de l'entrée.

III.7 La commande MPPT

La commande Maximum Power Point Tracking (MPPT) est une commande essentielle qui assure le fonctionnement du module photovoltaïque en son point de fonctionnement optimal, quelles que soient la charge et les conditions atmosphériques (température et ensoleillement). Le principe de cette commande est basé sur la variation du point de fonctionnement en modifiant le rapport cyclique pour atteindre la valeur optimale Figure(III.11) [24].

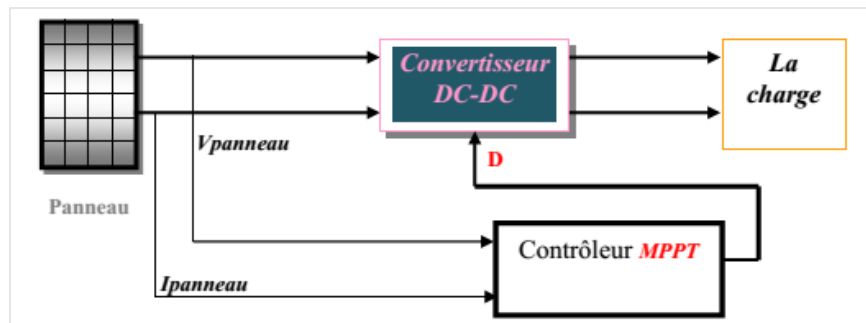


Figure III. 11 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.

III.8 Principe de MPPT

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le module PV, La chaîne de puissance ou un générateur photovoltaïque alimente une charge continue en une adaptation avec un convertisseur statique de type hacheur élévateur commandé par une MPPT [25].

III.9 Les techniques de recherche du point de puissance maximale

La littérature propose un certain nombre d'algorithmes de recherche de MPP dont plusieurs ont été élaborés il y a déjà quelques décennies [24][26][27].

III.9.1 La méthode Perturbation et Observation (P&O)

D'après les recherches scientifiques, la méthode Perturber & Observer (P&O) est la plus adaptée dans le domaine du photovoltaïque. Cette dernière est une approche largement répandue pour la détermination du point PPM., ce dernier utilise comme entrée les valeurs de la tension V du panneau et le courant I du panneau, et comme sortie soit la valeur de la tension de référence

V_{ref} soit le rapport cyclique. Comme son nom indique la méthode de P&O, fonctionne par la perturbation du système soit par l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement et d'observer son impact sur la puissance de sortie du panneau. D'après la figure (III.6), si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre une augmentation de la puissance P_{pv} cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, donc on devrait continuer dans la même direction pour atteindre le PPM. Si au contraire, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP, donc la perturbation devrait être inversée. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît. Il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande adapté. Le premier inconvénient de cette méthode est que l'on impose toujours une oscillation autour du PPM. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur en faisant en sorte que le point de fonctionnement oscille le plus près possible du PPM, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées [28,29].

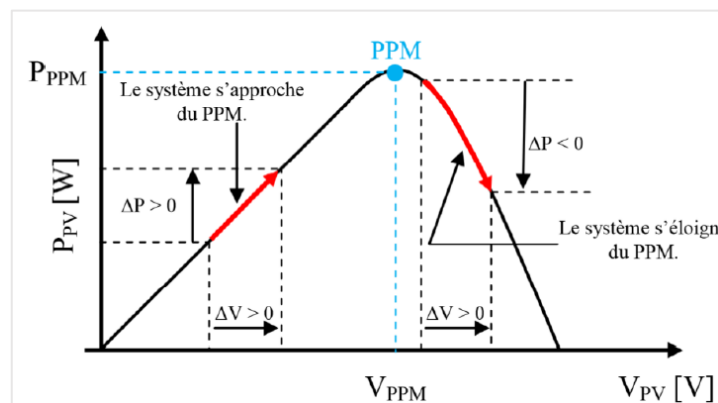


Figure III. 12 : Principe de la méthode P&O.

La puissance du PV doit être déterminée à chaque instant dans ce type de commande. La P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation. Ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM [28].

III.9.1.1 Organigramme Perturber et Observer (P&O)

La figure (III.13) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', d'après cette figure, la tension et le courant V_{pv} et I_{pv} , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie du GPV $P_{pv}(k)$ de la rangée. Cette valeur $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle [30].

Si $\Delta P = P(k) - P(k-1) > 0$ et si $\Delta V = V(k) - V(k-1) > 0$, on diminue le rapport cyclique $D(k)$; Sinon on augmente $D(k)$.

Si $\Delta P < 0$ et si $\Delta V > 0$, on augmente le rapport cyclique $D(k)$; si $\Delta V < 0$, on diminue $D(k)$.

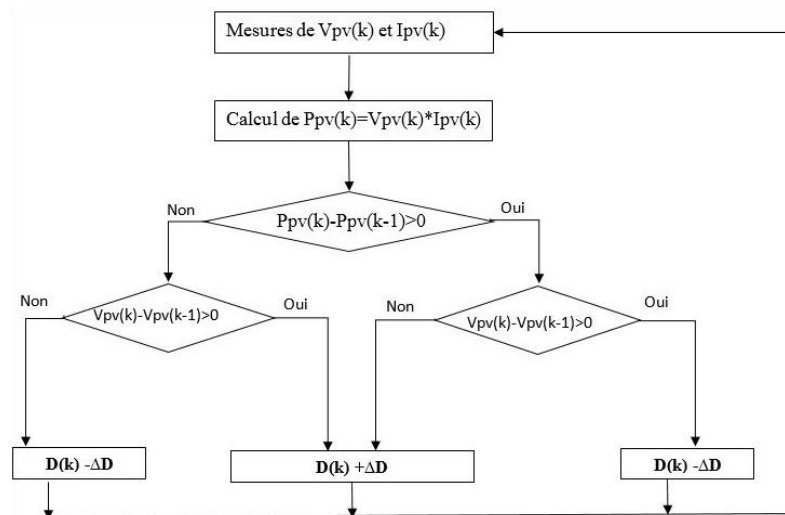


Figure III. 13 : Algorithme de P&O classique.

III.9.1.2 Avantages et inconvénients de P&O

Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques

III.9.1.3 Méthode conductance incrémental

L'algorithme de la conductance incrémentale est un algorithme qui s'adapte bien aux variations rapides des conditions météorologiques du site, il est relativement plus stable que la méthode P&O, cependant son implémentation pratique est plus difficile [31]. Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ et l'incrément de la conductance ($\Delta I/\Delta V$) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport PPM, Ce dernier est suivi lorsque $\frac{dP}{dV} = 0$.

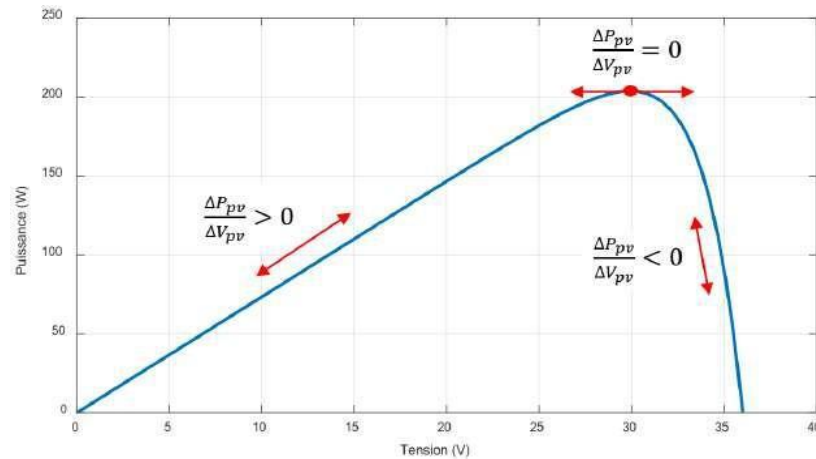


Figure III. 14 : Méthode MPPT Incrémentale Conductance (INC).

Sachant que $P=I \times V$ la dérivée du produit par rapport V et I donne la relation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \cdot \frac{dV}{dV} \quad (\text{III.22})$$

$$\frac{dP}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \quad (\text{III.23})$$

Comme l'indique cette la figure (III.14), la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle au PPM, positive à gauche, et négative à droite. L'équation (III.24) indique que le PPM est atteint lorsque :

$$\frac{dI}{dV} = -I/V \quad (\text{III.24})$$

- Si $\frac{dI}{dV} > -I/V$ le point de fonctionnement est sur la gauche du PPM sur la courbe $P - V$
- Si $\frac{dI}{dV} < -I/V$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM sur la courbe $P - V$

Le PPM peut ainsi être poursuivi en comparant la conductance instantanée (I/V) à la conductance incrémentielle ($\Delta I/\Delta V$) comme indiqué dans l'organigramme de la figure (III.15).

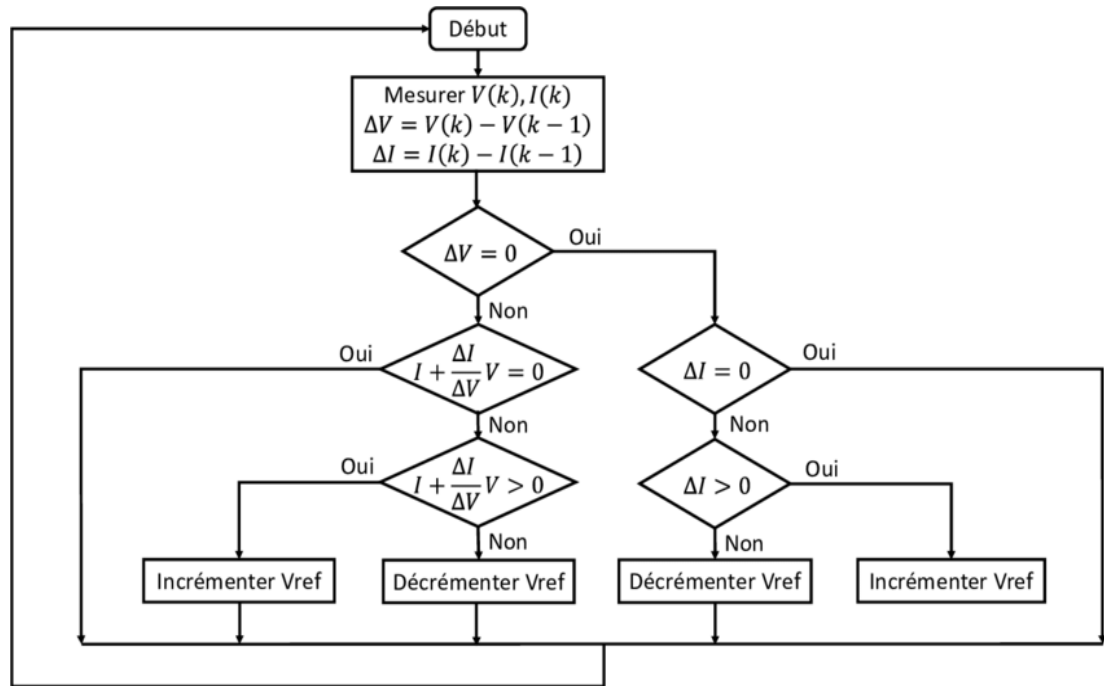


Figure III. 15 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.

III.9.1.4 Avantages et inconvénients de INC

Avantages

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques

Inconvénients

L'inconvénient est que le circuit de commande est complexe et très couteux [32].

III.9.2 Commande par la logique floue

Un système flou (SF) est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numériques (entres nettes), les faire passer dans un domaine flou puis avoir une sortie scalaire (Sortie nette), a été utilisé dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système. La structure générale de ce traitement est donnée par la figure qui suit :

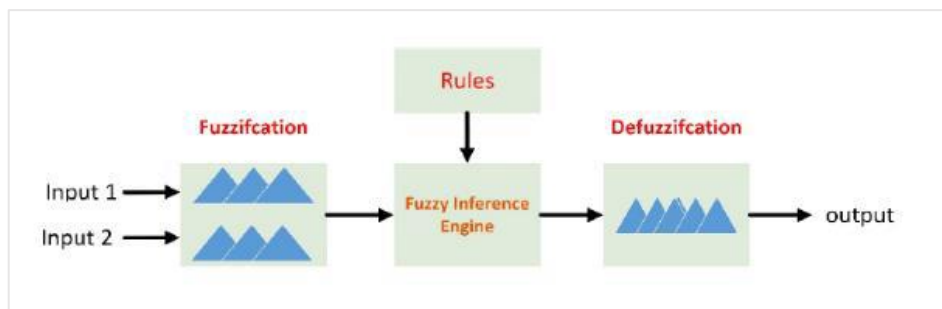


Figure III. 16 : Structure générale d'un système flou.

III.9.2.1 Le principe de logique floue

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaud, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative...etc.

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques et les ensembles flous, les fonctions d'appartenance [33].

Un contrôleur flou sous sa forme générale remplace le contrôleur classique dans une boucle de régulation, il est considéré comme étant un système expert. Ce contrôleur est constitué de quatre blocs principaux :

- Fuzzificateur,
- Base de connaissances floues,
- Engine d'inférence floues,
- Defuzzificateur.

III.9.2.2 MPPT floue proposée

Dans notre travail, la MPPT floue proposée est basée sur un système flou avec deux d'entrées et une sortie, les variables d'entrée du contrôleur flou sont l'erreur $e(k)$ et la variation du l'erreur $\Delta e(k)$ c'est deux variables sont données par les équations (III.25) et (III.26) tandis que la variable de sortie du contrôleur Fuzzy est la variation du pas (ΔD) pour ajuster le rapport cyclique

$$e(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III.25})$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (\text{III.26})$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle sont données par les figures (III.17) et (III.18). Toutes les fonctions d'appartenance sont de forme triangulaire et se composent de cinq ensembles flous qui sont notes NG (Négative Grande), NP (Négative Petite), ZE (zéro), PP (Positive Petite) et PG (Positive Grande). La base de règles floues est une collection de règles si-alors que toutes les informations sont disponibles pour les paramètres contrôles. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5, alors les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles illustrées dans le tableau (III.1). Ces règles sont utilisées pour déterminer la sortie du contrôleur afin de suivre le point de puissance maximale. La méthode de Mamdani est utilisée comme une méthode d'interface floue avec l'opération max-min combinée à la loi floue dans ce travail. La sortie du contrôleur flou proposé est défuzzifié pour calculer ΔD .

Tableau III. 1 : Les règles utilisées pour déterminer la sortie ΔD [34].

$e \backslash \Delta e$	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	PG	PG	PG	PG
NP	PG	PP	PP	ZE	ZE
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	ZE	ZE	NP	NP	NG
PG	PG	ZE	NP	NG	ZE

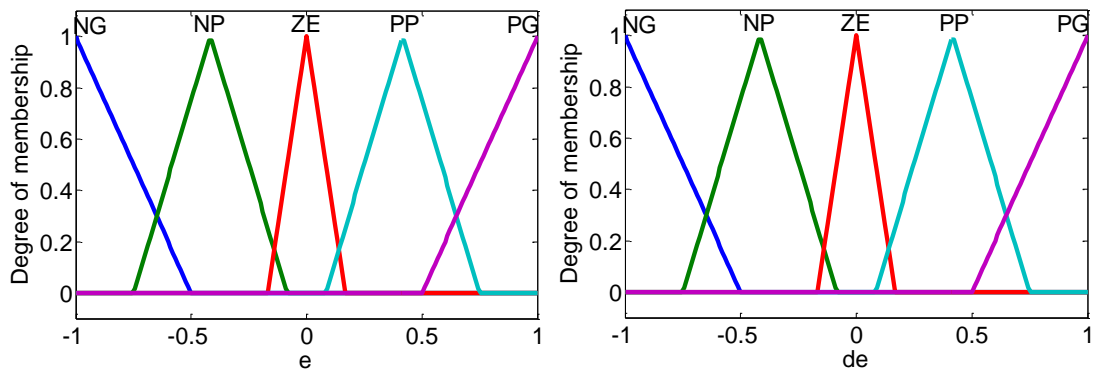


Figure III. 17 : Fonctions d'appartenances des entrées.

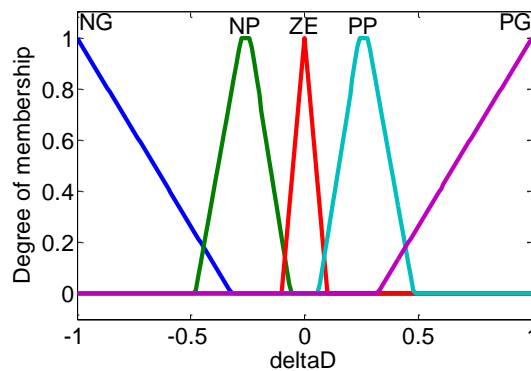


Figure III. 18 : Fonctions d'appartenances de sortie.

III.9.2.3 Avantages et inconvénients de la logique floue

- **Avantages**
 - Théorie simple et s'applique à des systèmes complexes,
 - Pas de modèles mathématiques requis du procédé à asservir,
 - Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.
- **Inconvénients**
 - Technique de réglage essentiellement empirique,
 - Performances dépendent de l'expertise,

Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse (difficultés de certification dans le transport, espace...) [35].

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé mathématiquement le convertisseur hacheur Boost pour obtenir un modèle exploitable sur Simulink. Ensuite nous avons présentés différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par les méthodes classiques (PO et IC), on a présenté les organigrammes puis par application du contrôle intelligente (logique floue).

Dans le chapitre suivant nous allons simuler un système PV adapté à un hacheur survolteur « Boost » avec une commande MPPT classique « PO » et une commande MPPT intelligente « Logique Floue » et on présentera les différents techniques de MPPT sur l'ombrage partiel.

Chapitre IV:

Résultats de simulation.

IV.1 Introduction

Ce chapitre fait l'objet d'une comparaison des résultats de simulation obtenus avec l'outil Matlab Simulink relatifs aux différentes techniques MPPT à savoir :

- Commande P&O d'un GPV,
- Commande MPPT d'un GPV basée sur la logique floue,
- Commande P&O pour trois modules en série avec et sans ombrage,
- Commande MPPT pour trois modules en série basé sur logique floue avec et sans ombrage.

Le but de ces essais est de vérifier le fonctionnement de chaque technique et comparer les performances de chaque méthode

Nous avons procédé à la simulation du système ci-dessous, sous les conditions standard (température 25°C et un éclairement 1000 /m^2). Notre choix a été de prendre I_{pv} et V_{pv} du PV comme entrées du bloc de la commande et le rapport cyclique D comme sortie. La figure (IV.1) montre le schéma bloc Simulink du GPV connecté à une charge résistive par un convertisseur Boost, les paramètres du Hacheur BOOST sont donnés dans l'Annexe A.

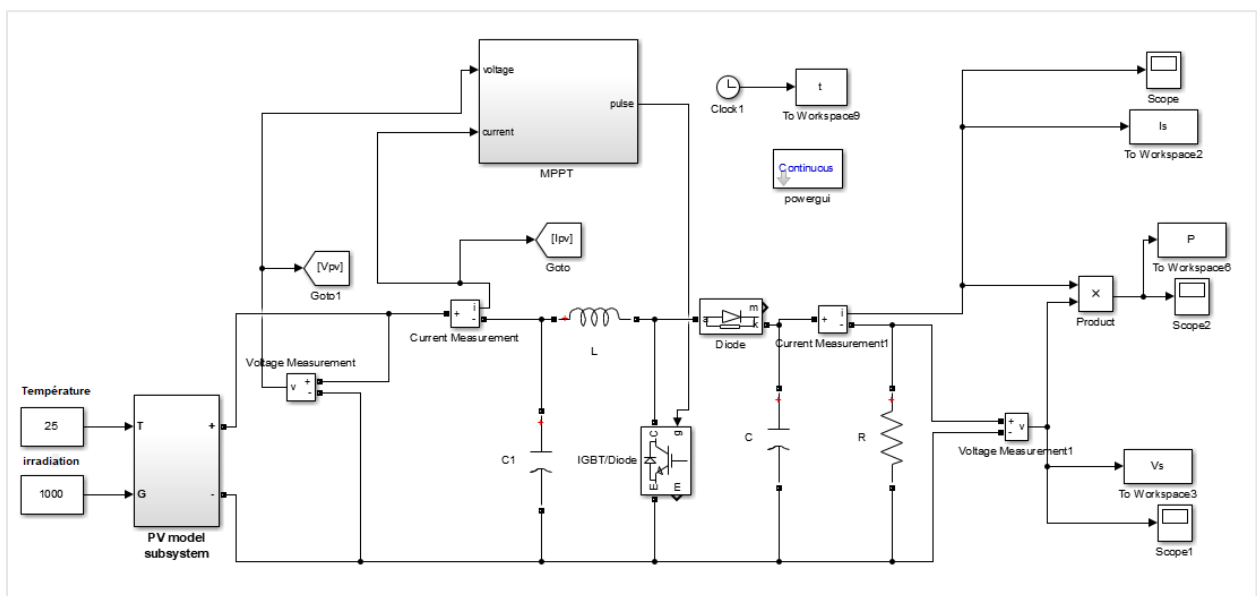


Figure IV. 1 : Schéma bloc Simulink du système global.

IV.2 Simulation du système PV avec la MPPT P&O

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type PO, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge), dans cette technique MPPT, la valeur du pas de variation du rapport cyclique est fixée à 0,0001. La technique MLI triangulaire est utilisé dans le contrôleur MPPT (voir la figure (IV.2)) afin de générer un train d'impulsions pour contrôler l'état de l'interrupteur du Hacheur Boost.

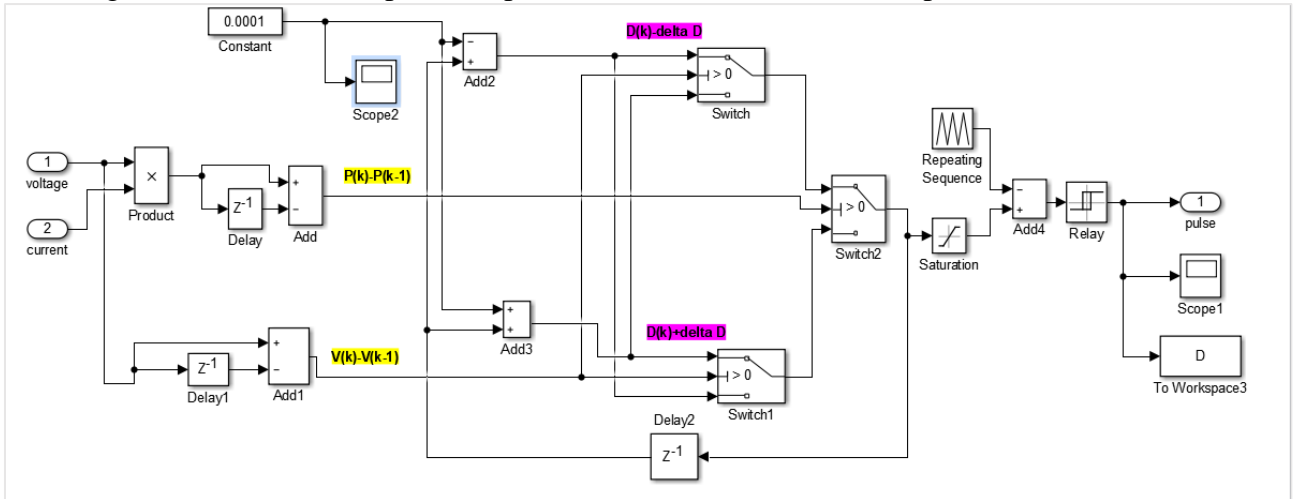


Figure IV. 2 : Schéma bloc Simulink de la technique MPPT P&O.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés par les figures suivantes pour un pas de perturbation de 0.0001.

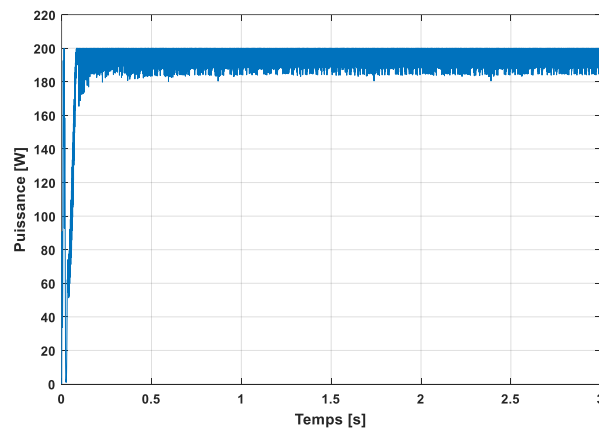


Figure IV. 3 : Puissance de sortie du GPV avec MPPT P&O.

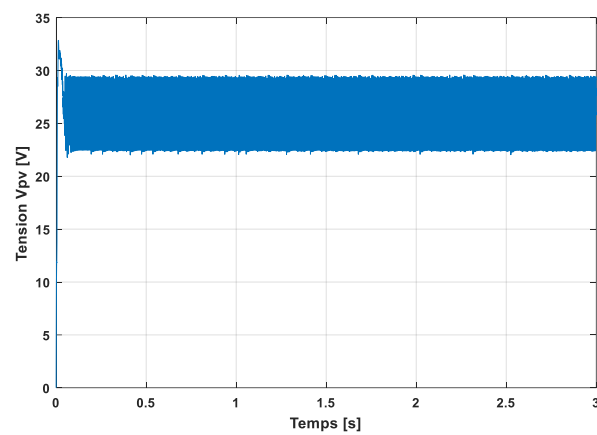


Figure IV. 4 : Tension de sortie du GPV avec MPPT P&O.

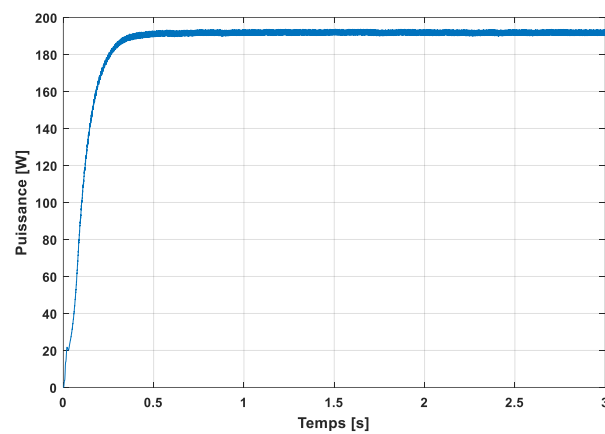


Figure IV. 5 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec MPPT P&O.

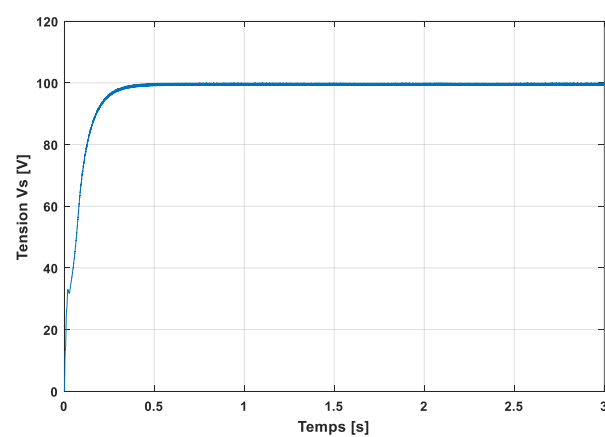


Figure IV. 6 : Tension de sortie du hacheur Boost avec MPPT P&O

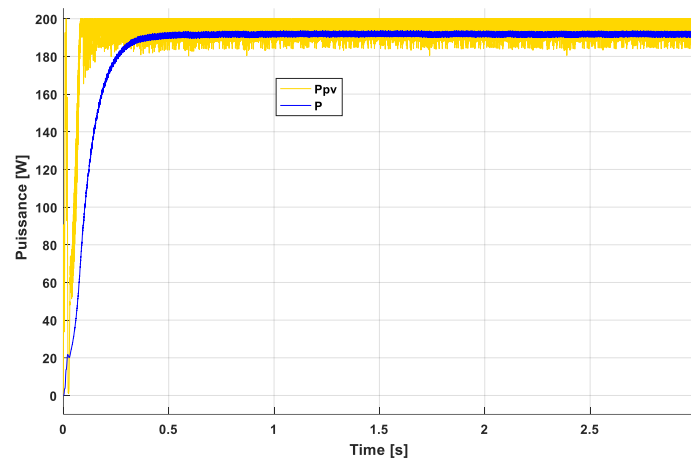


Figure IV. 7 : Comparaison entre la puissance de sortie de GPV et la puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O.

On remarque que la puissance P_{pv} et la tension V_{pv} de GPV sont fluctuantes et présentent des ondulations. Figure (I V.3) et (IV.4)

Les figures (IV.5) et (IV.6) représentent respectivement la puissance P et la tension V_s de sortie du convertisseur Boost. On remarque que la commande MPPT P&O est capable de suivre le point de puissance maximum.

La figure (IV.7) présente une comparaison entre la puissance P_{pv} et la puissance de sortie du hacheur Boost en utilisant l'algorithme P&O. Cette figure montre que l'algorithme P&O et le convertisseur Boost donnent un meilleur contrôle de la puissance dans la sortie du système, avec la présence des changements visibles et des ondulations dans la puissance de sortie du GPV, le convertisseur améliore efficacement les variations et la forme de cette grandeur.

IV.3 Simulation du système PV avec la MPPT floue proposée

Le contrôleur flou proposé utilise l'erreur de la variation de puissance par rapport à la tension ainsi que la variation de cette erreur pour agir sur le rapport cyclique en incrémentant ou en décrémentant ce dernier. Ce contrôleur flou est basé sur la connaissance préalable du système par un expert. La figure (IV.8) montre le schéma bloc Simulink relatif à cette technique.

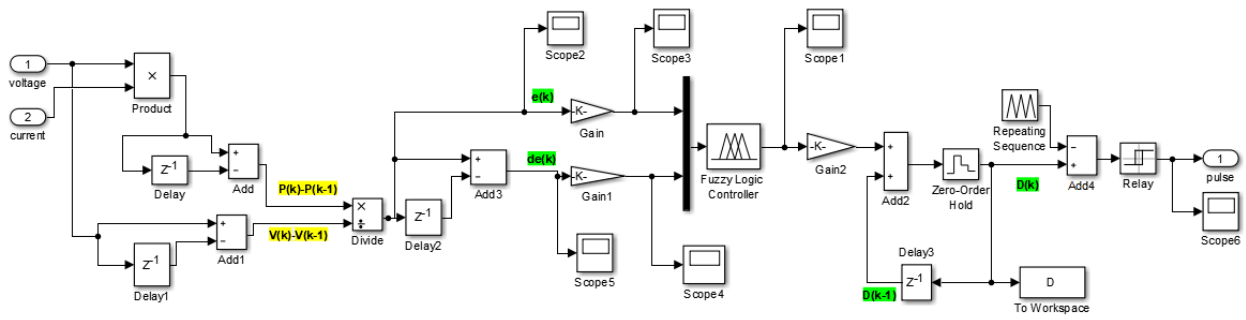


Figure IV. 8 : Schéma bloc Simulink la MPPT floue proposée.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « logique floue » sont représentés par les figures suivante :

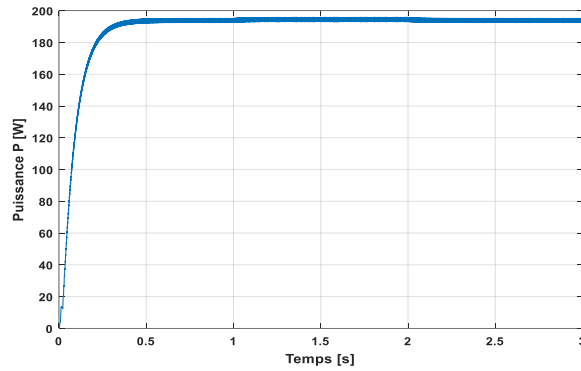


Figure IV. 9 : Puissance de sortie du GPV avec la MPPT floue.

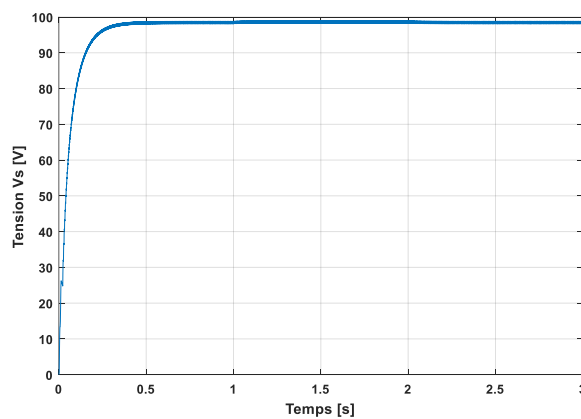


Figure IV. 10 : Tension de sortie du GPV avec la MPPT floue.

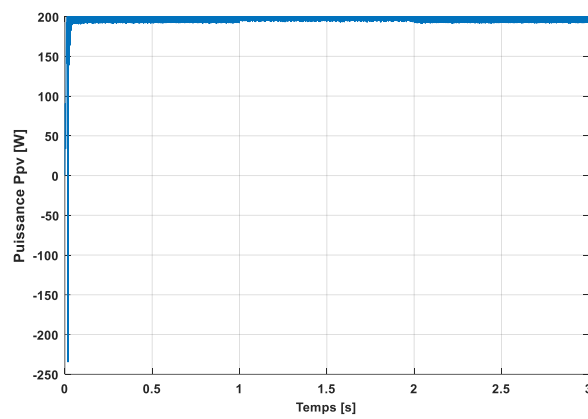


Figure IV. 11 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT floue.

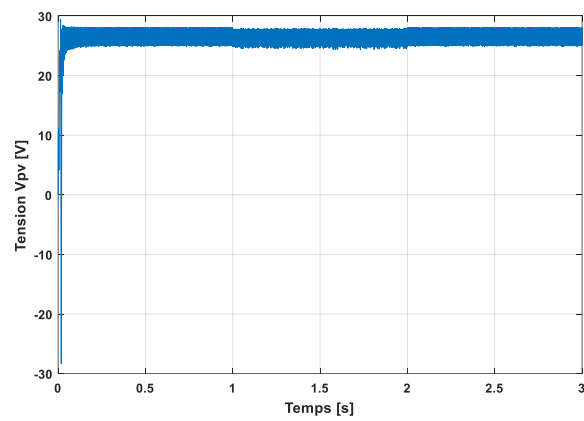


Figure IV. 12 : Tension de sortie du hacheur Boost avec la MPPT floue.

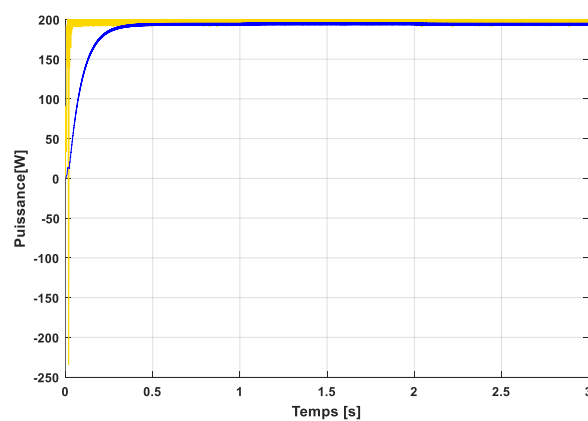


Figure IV. 13 : Comparaison entre la puissance de sortie de De GPV et du hacheur Boost avec la MPPT floue.

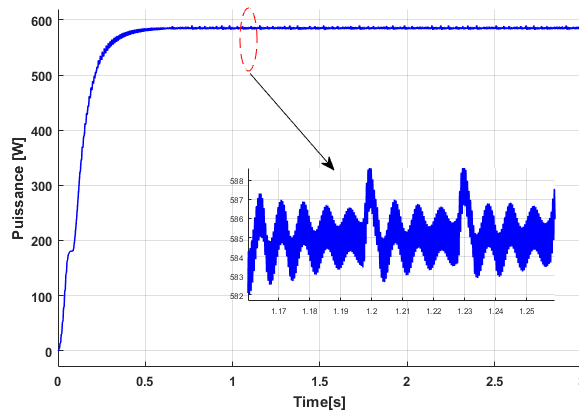


Figure IV. 15 : puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT P&O sans ombrage

On a simulé trois modules en série avec la commande basé sur logique flou dans les conditions standard ($G=1000\text{w/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

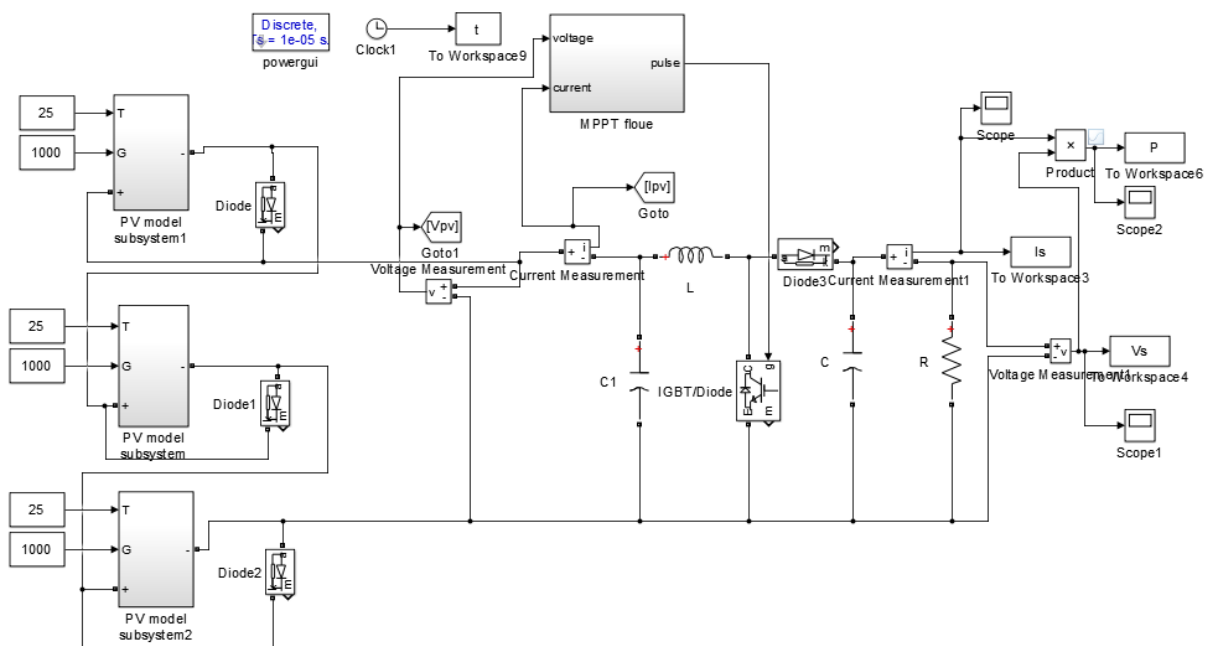


Figure IV. 16 : Schéma bloc de MPPT logique flou de trois modules en série

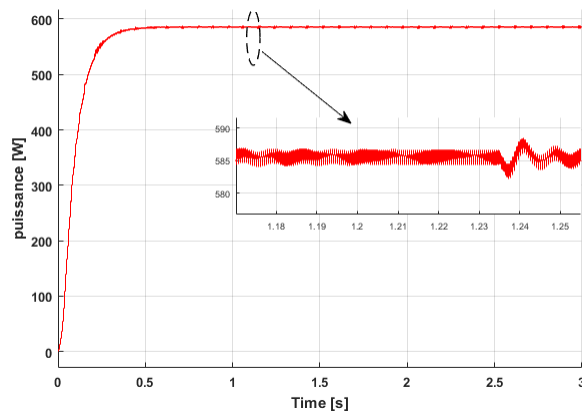


Figure IV. 17 : puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT floue sans ombrage

Les figure (IV.16) et la figure (IV.17) représentant la puissance de sortie du hacheur avec la MPPT P&O et MPPT floue

On remarque que avec la MPPT logique flou les oscillations de la puissance sont moindres par rapport la MPPT P&O.

IV.4.1 Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT P&O

Les trois GPV sont soumis à des conditions météorologiques différents (1000 et 600 et 200 w/m²) et à une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes :

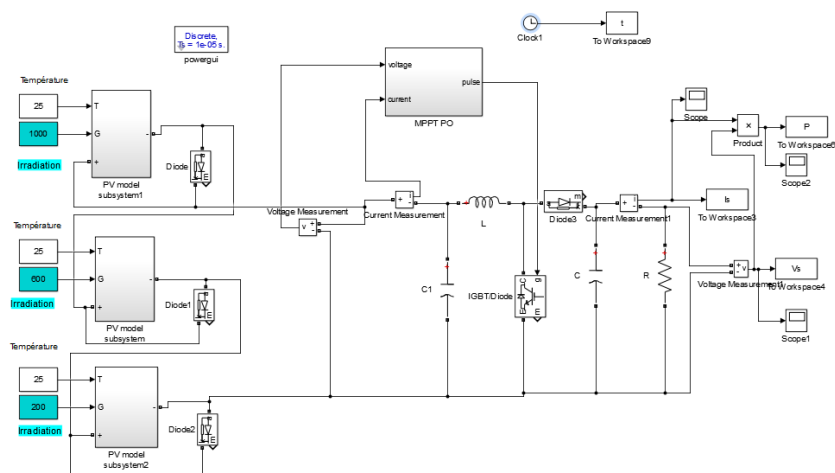


Figure IV. 18 : Schéma bloc de MPPT P&O de trois modules en série avec ombrage

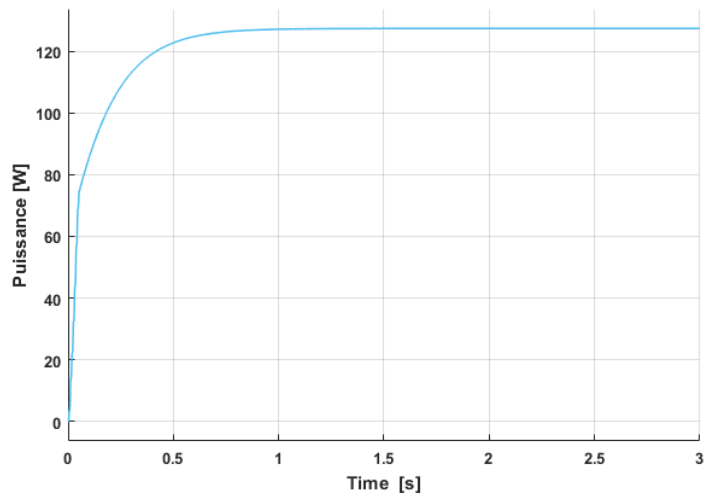


Figure IV. 19 : puissance de sortie de hacheur Boost avec la commande MPPT P&O avec ombrage

IV.4.2 Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT logique flou

Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes :

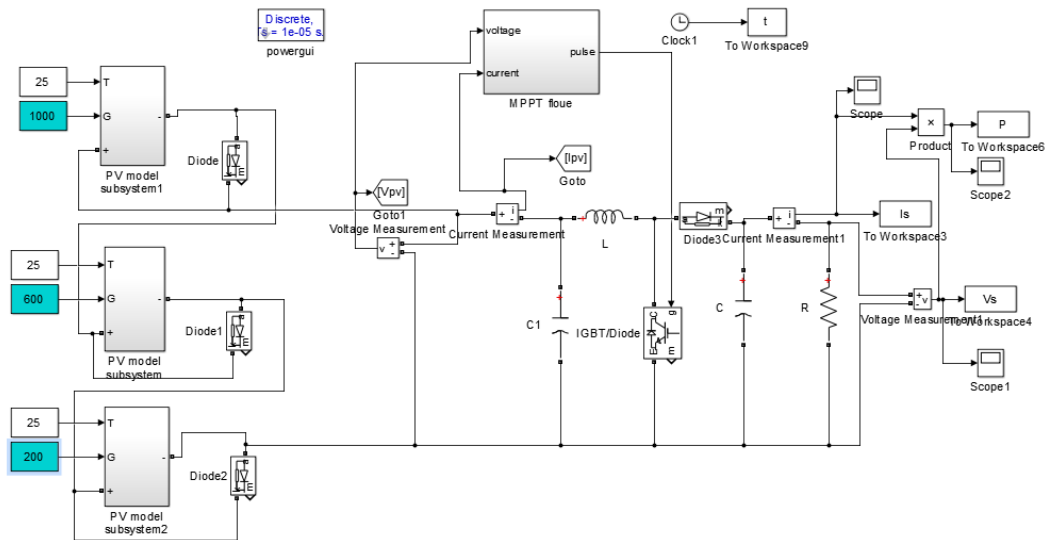


Figure IV. 20 : Schéma bloc de MPPT floue de trois modules en série avec ombrage

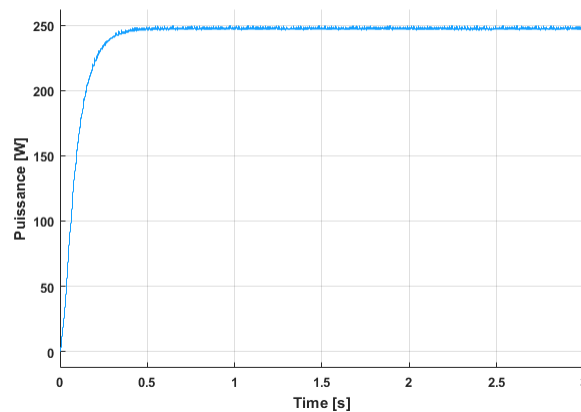


Figure IV. 21 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la commande MPPT floue avec ombrage

D'après les Figures (IV.20 et IV.21) on peut remarquer que la puissance de sortie du hacheur avec la MPPT P&O est 126 Watts et avec la MPPT logique floue est 250 Watts.

Si l'on compare ce résultat on déduit que la commande floue est plus performante que la commande P&O. Cependant ces techniques ne convergent pas vers le PPM. Elle reste bloquée autour d'un minimum local à cause de l'effet de l'ombrage partiel

IV.5 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus par deux méthodes de commande de MPPT appliqué à un générateur PV. Nous dénombrons deux cas de figure : conditions atmosphériques idéales (25°C et 1000 w/m^2) sans ombrage et avec ombrage partiel. Nous avons effectué une étude comparative entre deux méthodes MPPT, la première est la méthode P&O, la deuxième est basée sur la commande par logique floue. Les deux méthodes donnent d'assez bons résultats. Cependant, à partir des résultats obtenus, en ombrage partiel, la commande par logique floue présente de meilleures performances par rapport la méthode P&O mais n'aboutit pas à l'extraction maximale de la puissance ceci est du aux valeurs de gains de normalisation qui doivent être adaptés.

Conclusion Générale

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes MPPT pour la poursuite du point maximum de puissance ont été étudiées pour un système photovoltaïque autonome soumis à un ombrage partiel. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en œuvre d'une commande MPPT permettant de poursuivre la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques. Dans ce travail, nous avons introduit dans un premier temps des généralités sur l'énergie solaire. Ensuite ; nous avons explicité la modélisation de la cellule, le module et le générateur PV avec ombrage partiel.

La modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque a été détaillée et expliquée par des équations mathématiques et des schémas électriques.

La simulation de ces modèles a été réalisée sous l'environnement MATLAB SIMULINK. Les résultats de simulation ont permis de valider cette modélisation en les comparant aux allures relatives à la littérature.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé la modélisation et le dimensionnement du hacheur DC-DC, ainsi que les différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (PPM) ainsi nous avons rappelé le principe de fonctionnement de quelques algorithmes utilisés pour le suivi du point de puissance maximum. Finalement nous avons testé et comparé principalement deux méthodes MPPT à savoir la méthode « P&O », et la commande basée sur logique floue. Les résultats montrent que toutes les méthodes testées sous les conditions atmosphériques standards atteignent le point PPM avec succès. Cependant, nous avons constaté que la méthode « P&O » présente des oscillations autour du PPM tandis que la commande floue donne la meilleure réponse en termes de précision.

Notre simulation ne s'est pas limitée aux conditions atmosphériques standards. En effet, nous avons testé aussi les deux méthodes en cas de l'ombrage partiel dans le cas d'une association de plusieurs modules. L'étude et la simulation ont été développées en particulier pour le cas de trois modules en série. Les résultats de simulation nous ont montré que la technique « P&O » converge vers optimum local. La MPPT floue donne des meilleurs résultats et converge vers le PPM.

En perspectives nous proposons l'application de technique intelligentes différentes comme le self-tuning afin d'ajuster instantanément les gains de mise à l'échelle pendant le fonctionnement de l'algorithme. Nous avons développé l'algorithme mais nous pas eu le temps de finaliser. D'autre techniques méta-heuristiques sont également envisageables.

Une réalisation pratique pour valider ces algorithmes serait aussi intéressante.

Annexes

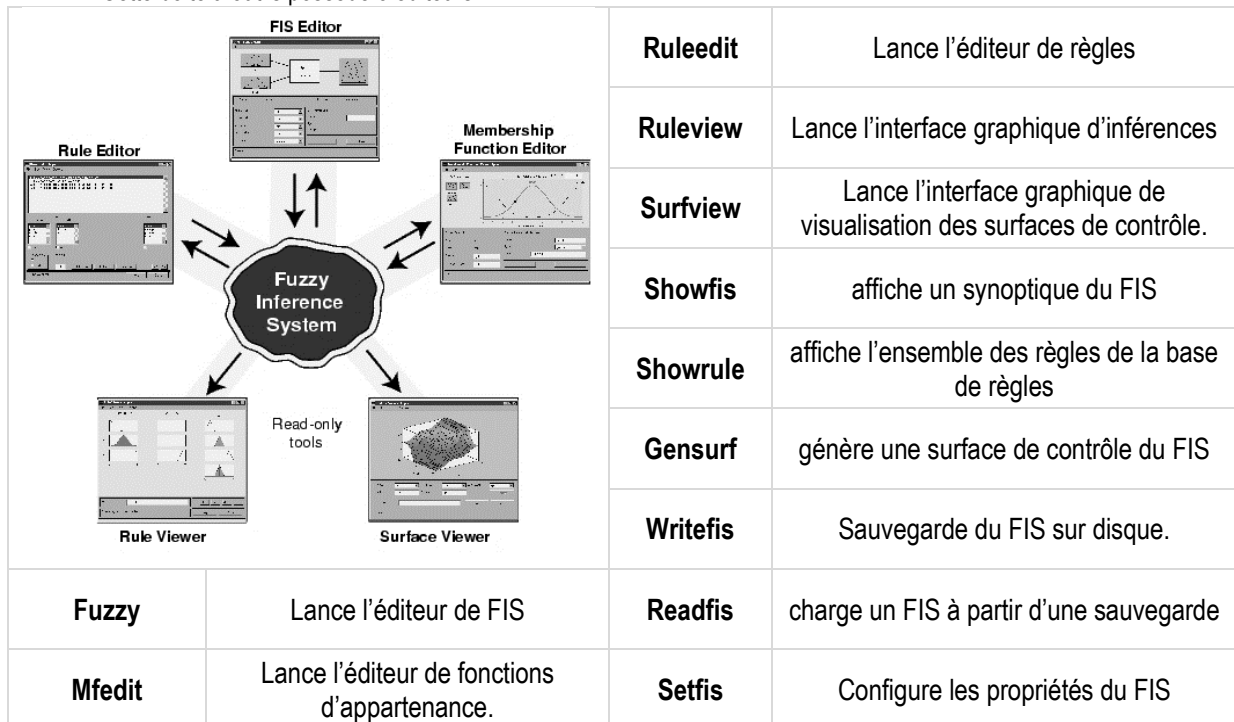
Hacheur Boost utilisé

Nous avons utilisé les paramètres du hacheur Boost suivantes dans le modèle Simulink [32]:

Paramètres	Valeurs
Fréquence de commutation f	1 KHz
Capacité à l'entrée du Hacheur Boost $C1$	1 mF
Capacité C	3 mF
Inductance L	1.5 mH
Resistance R	50 Ω

- les principales commandes utilisées pour générer ces éditeurs et ces interfaces graphiques

Cette boîte à outils possède 3 éditeurs



- **FIS Editor** l'éditeur des systèmes d'inférence flou qui l'éditeur principal pour définir le nombre d'entrées et de sorties, leur noms ainsi que le type : Mamdani ou sugeno
- **Membership Function Editor** : éditeur de fonctions d'appartenance qui donne la main pour insérer, supprimer et paramétrer les fonction d'appartenances. C'est là aussi qu'on peut définir l'univers de discours
- **Rule Editor** : éditeur de règles et de fonctions d'appartenance qui permettent de saisir l'ensemble des règles reliant les entrées et les sorties du FIS. On peut ajouter supprimer et modifier une règle changer de connecteur et /ou et encore plus modifier le poids
- **Rule viewer** et **surface viewer** : interfaces graphiques qui permettent de visualiser les inférences directement sur la base de règles, ainsi que des surfaces de contrôle. Dans la fenêtre du Rule viewer, on peut vérifier le fonctionnement du système en appliquant des entrées nettes (valeurs numériques pour voire le fonctionnement du systèmes et obtenir la sortie nette).

Choix des gains de normalisation : $K_e initial = \frac{1}{|2 \times e_{max}|}$ et $K_{de} initial = \frac{1}{|\Delta e_{max}|}$

- Après les calculs des gains initiales nous avons commencé de tolérer jusqu'à obtenir les performances requises

Essais retenus	K_e	K_{de}	S	Observation
(1)	0.001	0.5	0.01	Manque de précision
(2)	0.01	0.7	0.01	Manque de précision
(3)	0.06	0.6	0.001	Acceptable

Références Bibliographiques

Bibliographie

[1]	Durukan, I. K., Bayal, Ö., Kurtuluş, G., Baş, Y., Gültekin, A., Öztürk, M. K., ... & Özbay, E. (2015). Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells. <i>Superlattices and Microstructures</i> , 86, 379-389.f
[2]	N. Kehoul et K. Khentache, « Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
[3]	M. I. Krim et H. E. Debbah, « Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
[4]	« cellule solaire photovoltaïque composition panneau solaire ». https://www.totalenergies.fr/particuliers/nos-services/autoconsommation-solaire/fonctionnement-panneaux-photovoltaïques/differents-types-de-cellules-photovoltaïques (consulté le 30 mai, 2023).
[5]	A. Sorokin, S. Bobashev, T. Feigl, K. Tiedtke, H. Wabnitz, and M. Richter, "Photoelectric effect at ultrahigh intensities," <i>Physical review letters</i> , vol. 99, no. 21, p. 213002, 2007.
[6]	D. M. Chapin, C. Fuller, and G. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power," <i>Journal of Applied Physics</i> , vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954
[7]	V. M. Puri and F. Costello, "Domestic solar energy systems for delaware," tech. rep., Delaware Univ., Newark (USA). Dept. of Biological Sciences, 1973.
[8]	Y. Garah, « Etude d'une chaine de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 2015
[9]	M. Ayachi et O. Hamdoud, « Etude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïques », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2012.
[10]	Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2009.
[11]	R. Merahi and R. Chenni, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. PhD thesis, Université Frères Mentouri Constantine, 2018.
[12]	Y. Abdelmoula, « Etude et simulation des sources renouvelables dans le réseau électrique : Générateurs photovoltaïques », Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, 2019.

Bibliographie

[13]	Bandou Farida, "commande MPPT avancée par d'un système de conversion d'énergie solaire : photovoltaïque et thermoélectrique "Mémoire, Hassiba BEN Bouali Chelef, 2014
[14]	B. D. Mert, F. Ekinici, and T. Demirdelen, "Effect of partial shading conditions on off-grid solar pv/hydrogen production in high solar energy index regions," <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , vol. 44, no. 51, pp. 2771327725, 2019.
[15]	. D. P. Winston, S. Kumaravel, B. P. Kumar, and S. Devakirubakaran, "Performance improvement of solar pv array topologies during various partial shading conditions," <i>Solar Energy</i> , vol. 196, pp. 228–242, 2020..
[16]	Petrova-Koch, V., Hezel, R., & Goetzberger, A. (Eds.). (2008). <i>High-efficient low-cost photovoltaics: recent developments (Vol. 140)</i> . Springer
[17]	Y. El Bastri, <i>Architecture de puissance distribuée reconfigurable dédiée à l'optimisation de l'énergie photovoltaïque</i> . PhD thesis, Toulouse 3, 2013.
[18]	K. Kim, <i>Hot spot detection and protection methods for photovoltaic systems</i> . PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
[19]	Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », <i>Mémoire de Magister</i> , Université de Bechar, 2009.
[20]	A. Hakoumi et A. Benamar, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue », <i>Mémoire de Master</i> , Université Ahmed Draia, Adrar, 2019.
[21]	A. e. M. A. GUELLAL, « La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et renouvelable, » 2016.
[22]	J. S. R. Rex and D. M. S. R. Praba, "Design of pwm with four transistor comparator for dc–dc boost converters," <i>Microprocessors and Microsystems</i> , vol. 72, p. 102844, 2020
[23]	B. M. Hasaneen and A. A. Elbaset Mohammed, "Design and simulation of dc/dc boost converter," in <i>2008 12th International Middle-East Power System Conference</i> , pp. 335–340, 2008..
[24]	T. Eswaran and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," <i>IEEE Transactions on energy conversion</i> , vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007
[25]	Alabedin, A. Z., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. A. (2011, July). <i>Maximum power point tracking for photovoltaic systems using fuzzy logic and artificial neural networks</i> . In <i>2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting</i> (pp. 1-9). IEEE
[26]	A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, and K. B. Mohanty, "A review on mppt techniques of pv system under partial shading condition," <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , vol. 80, pp. 854–867, 2017

Bibliographie

[27]	M. A. Eltawil and Z. Zhao, "Mppt techniques for photovoltaic applications," <i>Renewable and sustainable energy reviews</i> , vol. 25, pp. 793–813, 2013
[28]	B. Fatima, « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2018.
[29]	A. Talha et S. Boukhalfa, « Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque », Conférence, Alger, 2010.
[30]	N. Aouchiche, M. S. Aït Cheikh et A. Malek, « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », <i>Revue des Energies Renouvelables</i> Vol. 16 N°3 (2013) 485- 498, 2013.
[31]	A. Rhif, <i>Etudes et Applications sur les Energies Renouvelables</i> , International Centre for Innovation & Development –ICID– , -PET- Vol. 60 ISSN : 1737-9934..
[32]	L. I. Djellal et Y. Dib, « Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées », Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
[33]	M. T. Messaoudi, « Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015
[34]	P. Anwasha et C. B. Kanhu, «Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Generation System », <i>Journal of Green Engineering</i> , Vol. 6 4, 403–426., 2017
[35]	M. Moussaoui, « Contrôleur flou testable », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2009.

ملخص

ركز هذا العمل على تأثير التظليل على النظام الكهروضوئي وتأثيره على الخصائص المختلفة لـ GPV. لكي يعمل هذا النظام بأقصى طاقته، ارتبطت مرحلة التكيف بخوارزمية مختلفة (والمنطق الضبابي) يمكن أن يحل جزء من خوارزمياته مشكلة التظليل الجزئي من خلال تصميم نموذج تحت MATTLAB / SUMILINK.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، التظليل، P&O المنطق الضبابي، Boost

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque est son impact sur les différentes caractéristiques du GPV. Pour que ce système fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation a été associé principalement à deux algorithmes MPPT P&O et MPPT floue. La modélisation l'optimisation par la recherche du MPP ainsi que la simulation ont été développés sous l'environnement MATTLAB/SUMILINK. Les essais de simulation ont été réalisés pour trois modules en série avec et sans ombrage avec les deux techniques de maximisation étudiées. Les résultats de simulations sont encourageants en particulier pour la MPPT floue proposée

Mots clés : Système PV, Ombrage partiel, P&O, MPPT floue, Boost

Abstract

This work focuses on the effect of shading on a photovoltaic system and its impact on the different characteristics of the GPV. For this system to operate at its maximum power, an adaptation stage has been associated mainly with two algorithms MPPT P&O and fuzzy MPPT. The modeling of the optimization by research of the MPP as well as the simulation have been developed under the MATTLAB/SUMILINK environment. Simulation tests were carried out for three modules in series with and without shading with the two studied maximization techniques. Simulation results are encouraged especially for the proposed fuzzy MPPT.

Keywords: PV System, Partial Shading, P&O, Fuzzy MPPT, Boost