

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

*La commande MPPT- floue d'un
générateur photovoltaïque*

Présenté par :

- Harkati Slimane
- Haddi Mohammed
- Morso Abdelkrim

Soutenu le : ...19/06/2020.... devant le Jury :

<i>M. Brahimi Mohammed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Maamar Yahiaoui</i>	<i>MCB</i>	<i>Université de Mascara</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Khessam Madjdoub</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M. Habchi Yassine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

المخلص :

مع ازدياد الاعتماد على الطاقة الشمسية بوصفها مصدرًا للحصول على الطاقة الكهربائية، طورت عدة تقنيات لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى المستخدمة في الأنظمة الكهروضوئية و تختلف هذه التقنيات من حيث البساطة و سرعة الأداء و الأدوات المستخدمة فيها . توجد منها التقليدية و من أكثرها استعمالاً طريقة الاضطراب و المراقبة و طريقة المواصلة المتزايدة و منها الحديثة التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي، منها تقنية المنطق الغامض.

هذه المذكرة تقدم مقارنة بين مختلف هذه التقنيات لغرض تحليل و تمثيل النظام الكهروضوئي، و ذلك تحت ظروف العمل المتغيرة . ولذلك قمنا بتقديم نماذج رياضية لمكونات النظام، النتائج المتحصل عليها باستعمال لغة البرمجة أثبتت على العموم أن الفعالية للطرق المستحدثة في إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية أحسن من الطريقة التقليدية.

Résumé :

Avec l'accroissement de l'utilisation de l'énergie solaire comme étant source alternative de production de l'énergie électrique, plusieurs méthodes ont été développées pour la poursuite du point de puissance maximale des panneaux solaires. Ces techniques se différencient selon la simplicité, la rapidité et les outils utilisés. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (IncCond) et les méthodes dites avancées, telle que la MPPT floue.

Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser et simuler le système global PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire ,les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide d'un outil de simulation, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT floue sont bien meilleures que celles du contrôleur MPPT conventionnel.

Abstract :

With the increased use of solar energy as alternative source of production of electric energy, several methods have been developed for continuing the maximum power point of the solar panels. These techniques differ according to the simplicity, speed and the tools used. There are often conventional MPPT methods, namely the method of perturbation and observation (P&O) and incremental conductance method (IncCond) and methods called advanced, such as fuzzy MPPT.

This paper presents a comparative study between these different techniques MPPT to analyze and simulate the global PV system under varying operating conditions. To do this, mathematical models of PV system components (GPV, DC / DC converter, load) have been developed. The simulation results obtained using a simulation tool, proved in general that the performance of the MPPT controller and fuzzy are much better than those of conventional MPPT controller.

Remerciements

Nous tenons à remercier, tout d'abord, le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre encadreur, **Dr MAAMAR YAHIAOUI** et **Dr.KHESSAM MADJDOUB** pour sa patience, son orientation et ses remarques constructives.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de notre travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants de département ST qui ont participé à notre formation.

Sommaire

Résumé	I
Remerciements	II
Sommaire	III
List des figures	VI
List des tableaux	IX
Listes des Acronymes et Symboles	X
Introduction générale	01

CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1.Introduction	03
I.2. Bref Historique	03
I.3.L'énergie Solaire	05
I.3.1.Le mouvement terre-soleil	05
I.3.2.Rayonnement solaire	05
I.3.3.Les différents types de rayonnement solaire	05
I.3.3.1. Le rayonnement direct	06
I.3.3.2.Le rayonnement diffus	06
I.3.3.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol	06
I.3.3.4. Le rayonnement global	06
I.4. Système photovoltaïque	07
I.4.1. L'effet photovoltaïque	07
I.4.2. Description de la cellule	07
I.4.3. Type de cellules	07
I.4.3.1.Les cellules mono-cristallines	07
I.4.3.2.Les cellules poly -cristallines	08
I.4.3.3.Les cellules amorphes	08
I.4.3.4.La cellule multi-jonction	08
I.4.3.5.Comparatif des différentes technologies	08
I.4.4. Jonction PN	09
I.5.1. Panneaux photovoltaïque	09
I.5.2. Générateur photovoltaïque	10
I.6. Les systèmes photovoltaïque	11
I.6.1. Système photovoltaïque autonome	11

I.6.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau	11
I.6. 3. Système photovoltaïque hybride	12
I.7. Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV	13
I.7.1. Les avantages	13
I.7.2. Les inconvénients	13
I.8.Conclusion	13

CHAPITRE II : Modélisation et simulation des éléments d'un système photovoltaïque

II.1. Introduction	15
II.2. Modélisation des modules photovoltaïques	15
II.2.1.Les propriétés de module photovoltaïque	15
II.2.1.1.Courant de court-circuit	15
II.2.1.2. Tension de circuit ouvert	16
II.2.1.3. Facteur de forme	16
II.2.1.4. Le rendement	16
II.2.2. Modélisation de Différent modèles d'une cellule PV	17
II.2.2.1. Model idéal	17
II.2.2.2. Modèle à une diode sans résistance shunt	18
II.2.2. 3. Modèle à deux diodes sans résistance shunt	19
II.2.2.4. Modèle à deux diodes avec résistance shunt	19
II.3. Modélisation de panneau photovoltaïque	20
II.4. Simulation de panneau photovoltaïque	21
II.5 Résultats de simulations	22
II.5 .1.les caractéristiques d'un panneau PV	22
II.5 .2.Effet de température	22
II.5 .3.Effet de l'ensoleillement	23
II.6. Convertisseur DC/DC	24
II.6.1.Définition	24
II.6.2.Type des hacheurs	24
II.6.2.1. Hacheur dévolteur (Buck)	24
II.6.2.2. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	25
II.6.2.3.Hacheur survolteur (Boost)	25
II.6.3. Modélisation d'un hacheur boost	26
II.7 Avantages de convertisseur Boost	26
II.8.Simulation de l'hacheur survolteur (boost)	27

II.8.1.1.Simulation de l'hacheur survolteur (boost)	27
II.8.1.2. Résultats de simulation du l'hacheur survolteur	27
II.8.2.1.Simulation de l'hacheur survolteur avec un panneau	28
II.8.2.2. Résultats de simulation du l'hacheur survolteur avec un panneau	29
II.8.2.2.1..Cas de variation de température	30
II.8.2.2.2..Cas de variation de l'éclairement	31
II.9. Conclusion	33

CHAPITRE III : Les commandes MPPT P&O et INC d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction	35
III.2. Commandes MPPT	35
III.3.1. Principe général de la commande	36
III.3.2.Principe de la Recherche du MPP	36
III.4. Les techniques de MPPT	37
III.4.1. la Commande perturber et observer (P&O)	37
III.4.1.1.définition	37
III.4.1.2. Organigramme de la méthode P&O (perturbe et observe)	38
III.4.1.3.Simulation de la commande MPPT (P&O) donne panneau PV	39
III.4.1.4.Résultats des simulations	39
III.4.1.4.1.Cas de variation de température	40
III.4.1.4.2.Cas de la variation de l'éclairement	41
III.4.2.La Commande incrémentale Conductance (INC)	42
III.4.2.1.définition	42
III.4.2.2. Organigramme de la méthode INC	42
III.4.2.3.Simulation de la commande MPPT (INC) donne panneau PV	43
III.4.2.4.Résultats de simulation de la commande MPPT INC	43
III.4.2.4.1. Cas de variation de température	44
III.4.2.4.2.Cas de la variation de l'éclairement	44
III.5.Comparaison entre les commandes P&O et INC	45
III.5.1. Cas de variation de température	45
III.5.2.Cas de la variation de l'éclairement	46
III.7.Conclusion	46

CHAPITRE IV : La commande par Logique floue d'un système photovoltaïque

IV.1. Introduction	48
--------------------	----

IV.2. Définition de la logique floue	48
IV.3. Principe de la Logique-Floue	48
IV.3.1. Variables linguistiques et ensembles Flous	49
IV.3.2. Fonctions d'appartenance	49
IV.3.3. Règles linguistiques	49
IV.4. Structure générale d'un système Floue	50
IV.4.1. Fuzzificateur	50
IV.4.2. Base de connaissances	51
IV.4.3. Inférence floue	51
IV.4.4. Défuzzification	51
IV.5. Les Avantages et les inconvénients de la logique floue	52
IV.5.1. Les avantages principaux des régulateurs flous sont les suivants	52
IV.5.2. Les inconvénients de la logique floue	52
IV.6. Application du contrôleur floue pour la commande MPPT	52
IV.6.1. Principe du régulateur floue	52
IV.6.2. Détermination des jeux de règles	54
IV.7. Résultats simulation.	55
IV.7.1.2. Comportement du système face à un changement de température	56
IV.7.1.3. Comportement du système face à un changement de l'éclairement	57
III.8. Comparaison entre les commandes P&O, INC et floue	57
IV.8.1. Cas de variation de température 25°C à 50°C	58
IV.8.2. Cas de la variation de l'éclairement de 500 W/m ² à 1000 W/m ²	59
IV.9. Conclusion	59
Conclusion Générale	61
Bibliographie	63
Annexes	65

List des figures

Figure (I.01) : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque, 2005–2015	04
Figure (I.02): Capacité du parc photovoltaïque	04
Figure (I.03) : La rotation de la Terre à la soleil	05
Figure (I.04) : Les différents composants du rayonnement solaire	06
Figure (I.05) : les différents types des panneaux photovoltaïques	08
Figure (I.06) : la coupe transversale d'une cellule PV typique	09

Figure (I.07) : panneau photovoltaïque	10
Figure (I.08) : Rangée d'un champ photovoltaïque	10
Figure (I.09) : Un champ photovoltaïque	10
Figure (I.10): Système photovoltaïque autonome	11
Figure (I.11): Système photovoltaïque raccordé au réseau	12
Figure (I.12): Système hybride PV-Eolien	12
Figure (II.01). Courant de court-circuit	15
Figure (II.02). Tension de circuit ouvert	16
Figure (II.03) : Modèle électrique idéal d'une cellule PV	17
Figure (II.04) : Modèle électrique a une diode sans résistance shunt	18
Figure (II.05) : Model électrique à deux diodes sans résistance shunt d'une cellule PV	19
Figure (II.06) : Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV	19
Figure (II.07) : Schéma électrique d'une cellule solaire à deux diodes avec résistance shunt	20
Figure (II.08) : Schéma block de simulation du générateur photovoltaïque	21
Figure (II.09) : Schéma block de simulation d'un panneau solaire	21
Figure (II.10) : Les caractéristiques du panneau (V-I) et (V-P) dans les conditions nominales 1000 W/m ² et 25C°	22
Figure (II.11) : Les caractéristiques V-P et V-I pour un éclairement constant 1000w/m ² et différentes valeur de température	23
Figure (II.12) : Les caractéristiques V-P et V-I pour une température constante de 25°C et différentes dégrées de éclairement	23
Figure (II.13) : convertisseurs DC-DC	24
Figure (II.14) : Schéma électrique du convertisseur Buck (Hacheur dévolteur)	25
Figure (II.15): Schéma du convertisseur dévolteur-survolteur	25
Figure (II.16) : Schéma électrique du convertisseur Boost (Hacheur Elévateur)	26
Figure (II.17) : Schéma bloc de hacheur boost	27
Figure (II.18) : Tensions d'entrée du hacheur boost	27
Figure (II.19) : Tensions de la sortie du hacheur boost	28
Figure (II.20) : Schéma de simulation d'un hacheur survolteur (boost) avec panneau	28
Figure (II.21) : Tension de sortie du hacheur	29
Figure (II.22) : Tension de sortie du panneau T = 25°C et E = 1000 W/m ²	29
Figure (II.23) : Puissance de sortie du panneau pour T = 25°C et E = 1000 W/m ²	30
Figure (II.24) : Tension de sortie du hacheur survolteur pour T = 25-50°C et E=1000W/m ²	30
Figure (II.25) : Tension de sortie du panneau pour T = 25-50°C et E = 1000 W/m ²	31

Figure (II.26) : Puissance de sortie de panneau pour $T = 25-50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	31
Figure (II.27) : Tension de sortie du hacheur survolteur pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 700-1000\text{W/m}$	32
Figure (II.28) : Tension de sortie du panneau pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 700-1000 \text{ W/m}^2$	32
Figure (II.29) : Puissance de sortie du panneau pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 700-1000 \text{ W/m}^2$	33
Figure(III.01) : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV	35
Figure (III.02) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant panneau pv ;un convertisseur BOOST ;une commande MPPT t une charge	36
Figure(III.03): Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b)	36
Figure(III.04) : Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM	37
Figure (III.05) : Caractéristique de puissance-tension du panneau PV	38
Figure (III.06) : Organigramme de la méthode P&O	38
Figure (III.07) : Schéma bloc de la technique P&O	39
Figure(III.08) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (P&O) pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	39
Figure(III.09) : variation de température	40
Figure(III.10) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (P&O) pour $T =$ $25/50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	40
Figure(III.11) : variation de l'éclairement	41
Figure (III.12) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (P&O) pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 500-1000 \text{ W/m}^2$	41
Figure (III.13) : Organigramme de la méthode INC	42
Figure (III.14) : Schéma bloc de la technique INC	43
Figure(III.15) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	43
Figure (III.16) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) pour $T=10/25/50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	44
Figure(III.17) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E= 500 -1000 \text{ W/m}^2$	44
Figure (III.18) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) et (P&O) pour $T= 25^{\circ}\text{C}$ et $E= 1000 \text{ W/m}^2$	45
Figure (III.19) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) et (P&O) pour $T =25-50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	45

Figure (III.20) : Puissance du panneau avec la commande INC et P&O Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 500 - 1000 \text{ W/m}^2$	46
Figure (IV.01) : Différentes formes de fonctions d'appartenance	49
Figure (IV.02) : Structure générale d'un système basé sur la logique flou	50
Figure (IV.03) : Structure du régulateur flou	52
Figure (IV:04): Fonction d'appartenance pour les entrées CE	53
Figure (IV:05): Fonction d'appartenance pour la sortie dD(K)..	54
Figure(IV.06) : Schéma block de la commande MPPT flou	55
Figure (IV.07) : Schéma block d'un régulateur flou	55
Figure(IV.08) : Puissance du panneau avec la commande MPPT floue pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	56
Figure(IV.09) : Puissance du panneau avec la commande MPPT floue pour $T = 25/50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	56
Figure (IV.10) : Puissance du panneau avec la commande MPPT floue pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E 500-1000 \text{ W/m}^2$	57
Figure (IV.11) : Puissance du panneau avec la commande MPPT INC, P&O et floue pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	58
Figure (IV.12) : Puissance du panneau avec la commande MPPT INC,P&O et floue pour $T = 25-50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$	58
Figure (IV.13) : Puissance du panneau avec la commande INC,P&O et floue Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 500 - 1000 \text{ W/m}^2$	59

List des tableaux

Tableau(I.01) : Comparatif des différentes technologies.	08
Tableau(II.01) : Les caractéristiques techniques expérimentales du panneau SOLAREX MSX60.	20
Tableau(II.02) : Les résultats de simulation du panneau réel et panneau proposé.	21
Tableau(IV.01): Table de règles à cinq classes.	53
Tableau(IV.02) : classes de variables d'entrée.	53

Listes des Acronymes et Symboles :

E : Eclairage (W/m^2).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

I_D : Courant dans la diode (A).

R_p : Résistances parallèle shunt. (Ω)

R_s : Résistance série (Ω).

T_C : Température de jonction ($^{\circ}\text{K}$).

T_{ref} : La température de référence (298°K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$)

q : La charge d'un électron = $1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$.

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

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

FF : Facteur de forme.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_T : Potentielle thermodynamique.

K : coefficient de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$).

T_C : Température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

INC : Conductance incrémentale.

FLC : Contrôle Logique Floue.

DC : Courant Continu (Direct Curent).

Introduction générale :

Plusieurs ressources d'énergie renouvelables ont été découvertes ces dernières années, notamment, l'énergie éolienne, hydraulique et l'énergie photovoltaïque, cette dernière est l'une de l'énergie les plus utilisé dans le monde.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Ce travail présente donc une modélisation et simulation du fonctionnement électrique des éléments de système photovoltaïque adapté par une commande numérique, en utilisant des méthodes classiques telle que P&O et INC et nouvelles technologies basées sur l'intelligence artificielle comme la logique floue, qui assurant la poursuite de la puissance maximale (PPM) fournie par le générateur photovoltaïque et on a fait une comparaison entre les méthodes.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons des notions généralité sur les systèmes photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre : Modélisation et simulation des éléments d'un système photovoltaïque.
- Le troisième chapitre, Les commandes MPPT P&O et INC d'un système photovoltaïque.
- Le quatrième chapitre, la commande par logique floue d'un système photovoltaïque.
- Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le soleil.

Sur terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

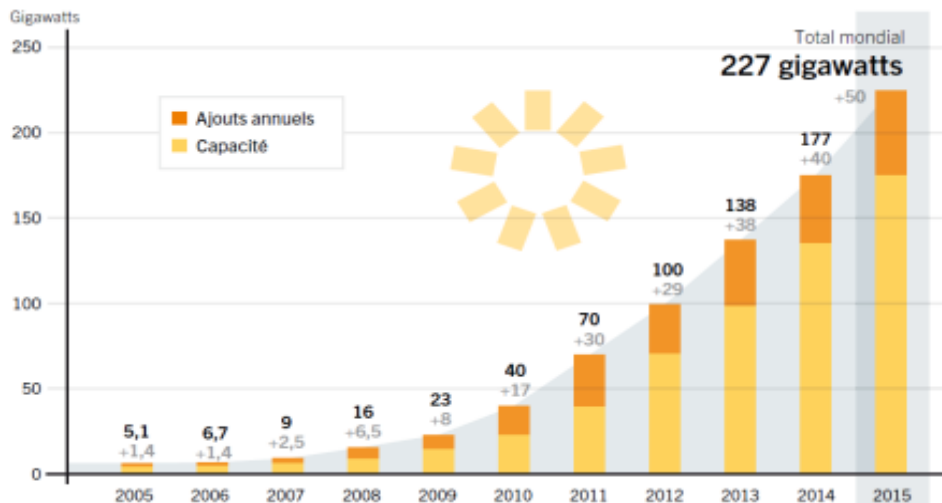
Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire. Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire: le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité; le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Dans ce chapitre nous présenterons l'énergie photovoltaïque.

I.2. Bref Historique :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque. Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire. Depuis le début des années 1980, la quantité de modules photovoltaïques réalisés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait [1].

La figure suivante donne l'évolution de la capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque de 2005 à 2015, cela confirme l'augmentation exponentielle de l'énergie produite de nature photovoltaïque.

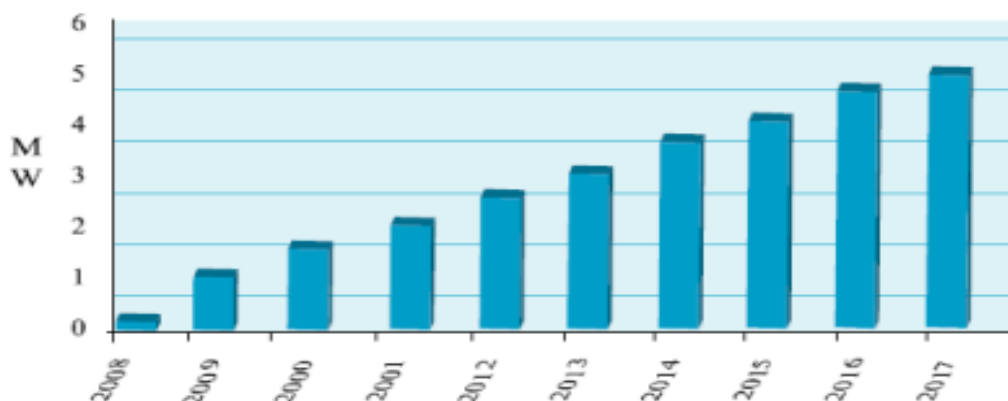


Figure(I.01) : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque, 2005–2015[2].

a révision du programme national sur l'énergie porte essentiellement sur le développement du photovoltaïque à grande échelle. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation des projets pilotes et des tests sur les différentes technologies disponibles. Le programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique vise la mise en service d'une capacité de production d'origine renouvelable de 22000 MW à l'horizon 2030, dont plus de 2500MW seront injectés dans le réseau d'ici 2020 [3].

La deuxième phase vient d'être lancée par l'appel d'offres national et international du projet algérien dénommé «Atlas 1», d'une capacité globale de 4.050 mégawatts, réparti en trois lots de 1.350 mégawatts chacun en énergie d'origine solaire de type photovoltaïque. Cela confirme la volonté politique de l'état d'investir de plus en plus dans les énergies renouvelables et en particulier énergie photovoltaïque [4].

La figure suivante donne l'évolution du parc photovoltaïque pour la période de 2008 à 2017 selon les prévisions du CREG [5].



Figure(I.02): Capacité du parc photovoltaïque

I.3.L'énergie Solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.[6]

I.3.1.Le mouvement terre-soleil :

Le mouvement de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles géographiques qui relie le pôle Nord au pôle Sud. Ce mouvement ne doit pas être confondu avec la révolution de la Terre, mouvement de translation elliptique de la Terre autour du Soleil.

La rotation de la Terre autour de son axe est un mouvement complexe dont la composante principale est une rotation effectuée en moyenne en 23 h 56 min 4,1 s. L'axe de rotation est incliné sur l'écliptique en moyenne de $23^{\circ} 26'$; cette inclinaison est la cause des saisons.

La Terre tourne sur elle-même. Mais en même temps, elle tourne autour du soleil. Elle met une année (365 jours) à faire le tour complet du soleil.

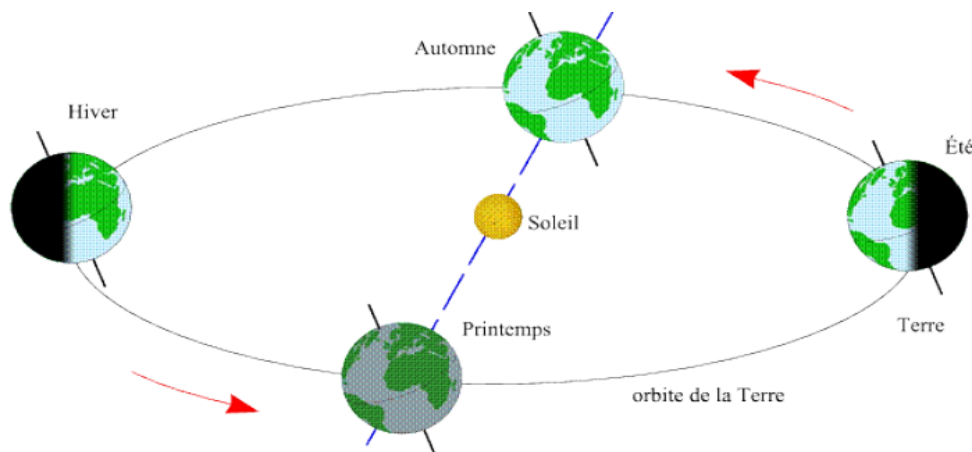


Figure (I.03) : La rotation de la Terre à la soleil

I.3.2.Rayonnement solaire :

Quel que soit la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150. 106Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180. 106GW.[6]

Le rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- ✓ 5 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- ✓ 40 % dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- ✓ 55 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$).

I.3.3.Les différents types de rayonnement solaire :

Il y a quatre types de rayonnement solaire :

I.3.3.1. Le rayonnement direct :

C'est le rayonnement reçu directement du soleil. Il est mesuré par un pyrhéliomètre.

I.3.3.2. Le rayonnement diffus :

Rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

I.3.3.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

Le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface (un obstacle). Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige)

I.3.3.4. Le rayonnement global :

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires.

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un polarimètre.

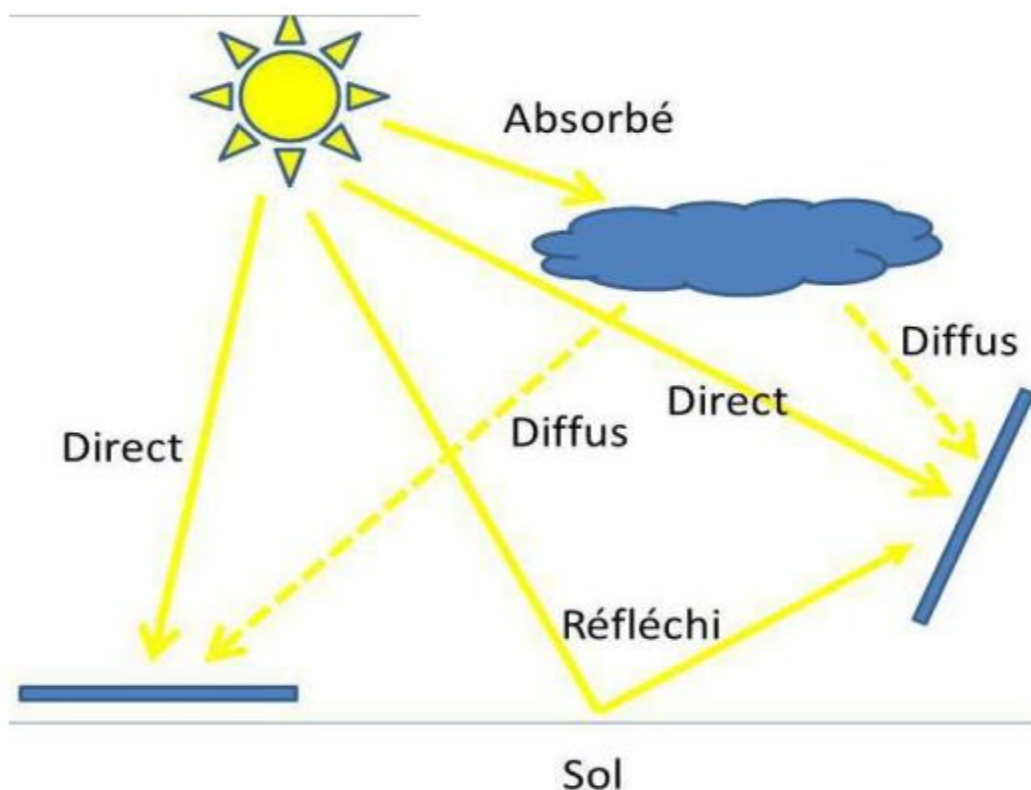


Figure (I.04) : Les différents composants du rayonnement solaire.

I.4 . Système photovoltaïque :

Nous allons définir l'effet photovoltaïque puis une description de la cellule ensuite nous présenterons les différents types des cellules par rapport à leur structure physique suivie d'une explication du phénomène qui se passe dans la jonction PN. Nous terminerons avec les différents types de systèmes photovoltaïques selon qu'il soit associé à une autre source d'énergie ou raccordé au réseau électrique

I.4.1. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques). Cet effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. Lorsque les "grains de lumière" (les photons) heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fins. Ce courant peut être ajouté à celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné [7].

I.4.2. Description de la cellule :

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium.

D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe) [1].

I.4.3. Type de cellules :

Il existe différents types de cellules en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si). Ce matériau est coupé en tranches minces en forme de disque, monocristallin, poly-cristallin, amorphe en fonction du procédé de fabrication de la barre de silicium [6].

I.4.3.1. Les cellules mono-cristallines :

Elles sont constituées d'un cristal à deux couches, le plus souvent du silicium. Elles ont un rendement entre 15 et 22 % mais elles sont chères à fabriquer. Ces panneaux sont actuellement le must sur le marché du photovoltaïque, ce sont de véritables générateurs d'énergie par tout temps. Le rendement moyen est compris entre 12 et 21%.

I.4.3.2. Les cellules poly-cristallines :

Elles sont constituées de plusieurs cristaux, ce qui diminue leur prix de fabrication. Cependant leur rendement n'est que de 10 à 13 %. Ces panneaux sont utilisés lorsque l'ensoleillement direct est garanti, ils sont généralement utilisés pour créer des centrales photovoltaïques. Le rendement moyen est d'environ 13% [6].

I.4.3.3. Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple) :

Elles ont un rendement très faible (5 à 10 %) mais leur prix est très bas. Ces panneaux ont la palme du rapport qualité/prix, ils fonctionnent très bien même avec une faible luminosité. Le rendement moyen est 7% d'environ [6].

I.4.3.4. La cellule multi-jonction :

La cellule photovoltaïque multi-jonction offre un rendement optimal, d'environ 40 %. Le seul inconvénient est que ce type de cellule solaire n'est pas commercialisé. En effet, il n'est utilisé que dans le milieu spatial.

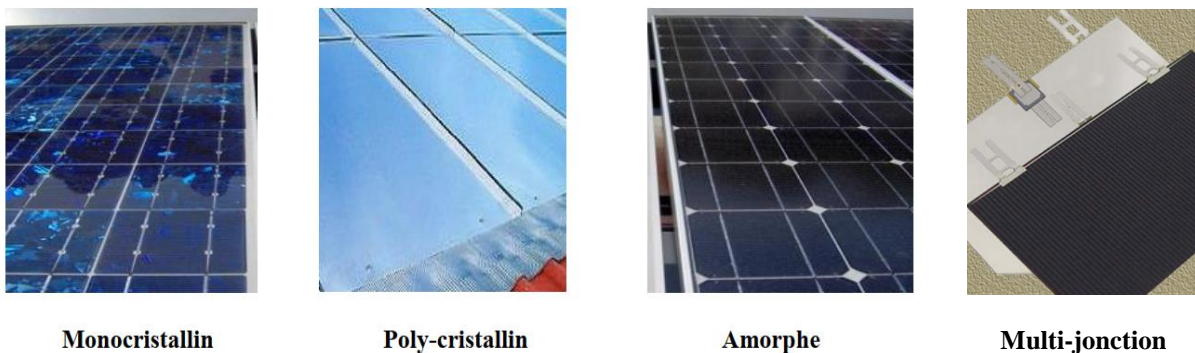


Figure (I.05) : les différents types des panneaux photovoltaïques

I.4.3.5. Comparatif des différentes technologies [18]:

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...

Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> * Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel 	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Multi-jonction	environ 40 %		*convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.	le milieu spatial

Tableau (I.01) : Comparatif des différentes technologies [6].

I.4.4. Jonction PN :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à faire apparaître une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V et dépend principalement du matériau utilisé. Elle peut aussi dépendre de la température et du vieillissement de la cellule. La figure I.1 illustre une constitution détaillée de la cellule. [8].

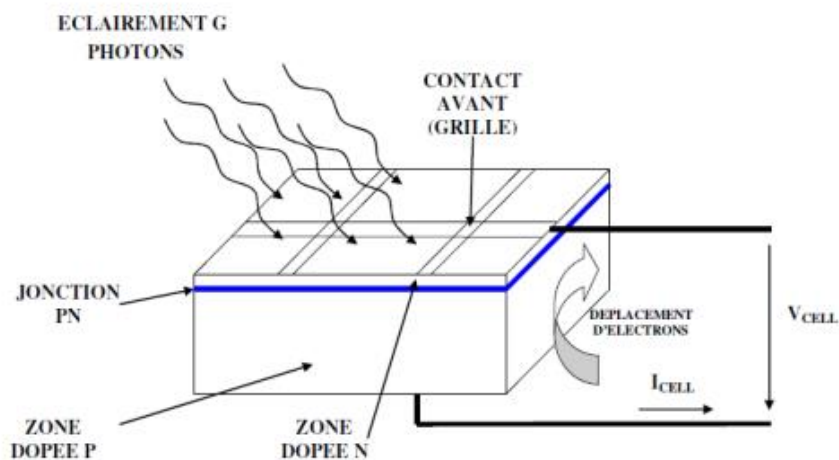


Figure (I.06) : la coupe transversale d'une cellule PV typique.

I.5.1. Panneaux photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série (augmentation de la tension) et/ou en parallèle (augmentation du courant) afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [9].



Figure (I.07) : panneau photovoltaïque.

I.5.2. Générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de panneaux photovoltaïque, connectés ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires. La performance du générateur dépend de la variabilité des modules que comprend le générateur et les cellules comprises par les modules. L'ensemble intégré des panneaux photovoltaïques ainsi que la structure de soutènement est défini comme rangée photovoltaïque, montré par la figure (I.08) [10]. L'ensemble de rangées photovoltaïques forment un champ photovoltaïque la figure (I.09).

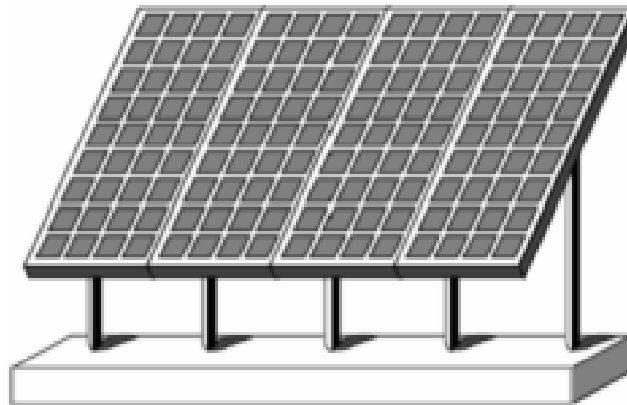


Figure (I.08) : Rangée d'un champ photovoltaïque.



Figure (I.09) : Un champ photovoltaïque.

I.6. Les systèmes photovoltaïques :

Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres sont arrivées au début des années 70.

Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Il associe plusieurs composants à fin de former un système PV.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types : autonome, raccordé au réseau et hybride [11].

I.6.1. Système photovoltaïque autonome :

Système autonome illustré en Figure (I.10), c'est un site isolé qui n'est pas connecté au réseau, il permet de fournir de l'énergie électrique pour le fonctionnement des sites isolés. Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.



Figure (I.10): Système photovoltaïque autonome.

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes :

- Des balises en mer.
- Les lampadaires urbains.
- Pompage solaire.
- Maison en site isolé

I.6.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Système raccordé au réseau, ou non autonome, c'est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique.

La figure suivante illustre ce type de système :

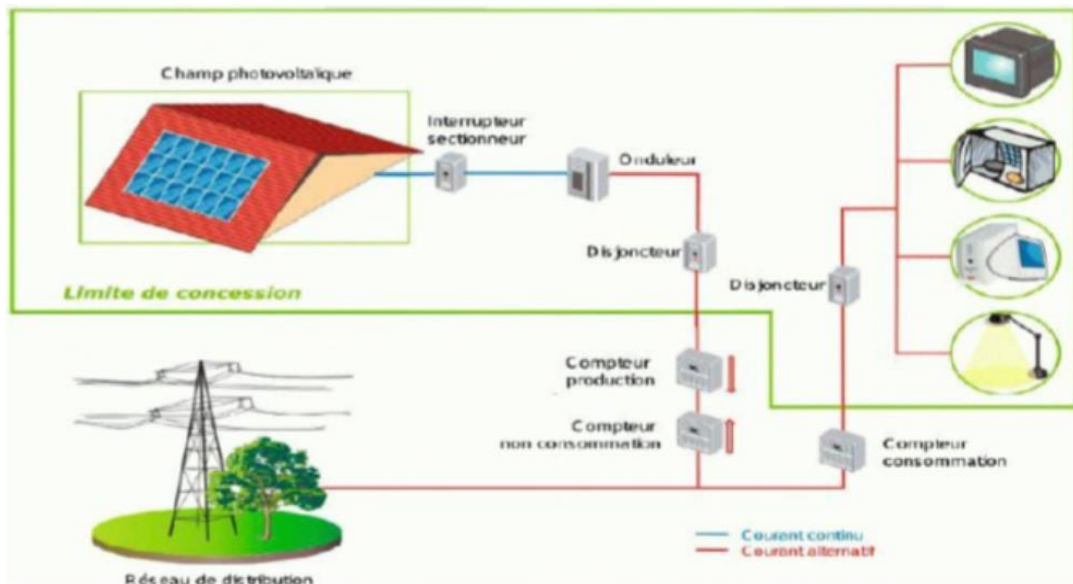


Figure (I.11): Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.6. 3. Système photovoltaïque hybride :

Il s'agit des systèmes regroupant des sources d'énergie de nature différente : Eolienne, générateur diesel ou une centrale de cogénération.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le GPV seul ne couvre pas tout l'énergie requise.

La figure suivante représente le système :

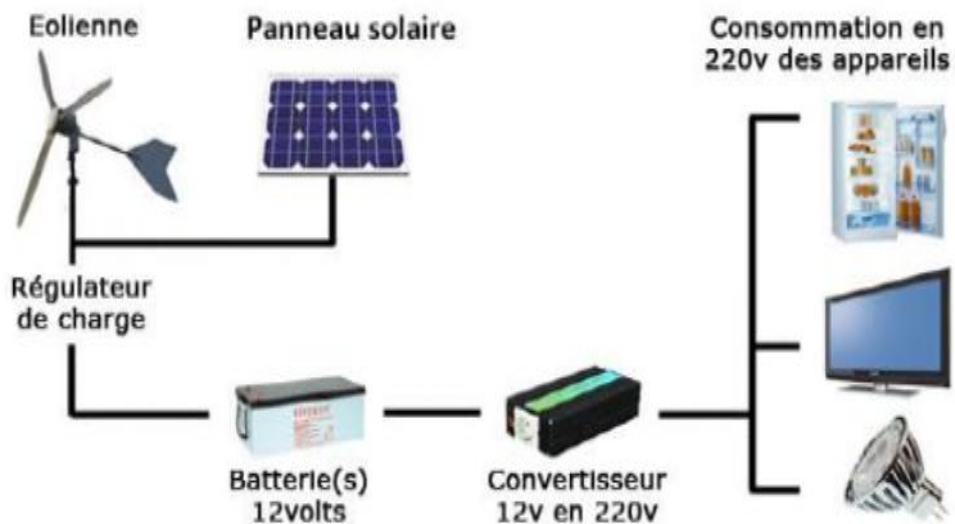


Figure (I.12): Système hybride PV-Eolienne.

I.7. Les Avantages et les Inconvénients d'un générateur PV :

I.7.1. Les avantage :

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- Ils sont de fonctionnement sûr, non polluant et silencieux.
- Ils sont très fiables.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Ils sont flexibles et peuvent être sollicités à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Le délai de réalisation d'une centrale photovoltaïque est minimal.
- Ils sont des systèmes décentralisés.

I.7.2. Les inconvénients :

- Le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'existe pas encore.
- Le rendement électrique diminue avec le temps.

I.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique aperçu sur l'énergie photovoltaïque, sa description et suivi d'un développement sur l'effet photovoltaïque puis une présentation du principe de fonctionnement de la cellule Ensuite nous avons vu les différents types des systèmes photovoltaïques.

Dans le Chapitre suivant, nous allons modéliser les éléments constituant un système photovoltaïque (panneau photovoltaïque et hacheur boost).

CHAPITRE II

Modélisation et simulation des éléments d'un système photovoltaïque

I.1. Introduction :

La modélisation mathématique d'un système est une étape indispensable pour toute opération d'étude du fonctionnement, d'optimisation du rendement ou de diagnostic d'un système. Celle – ci est une étape très importante dans la simulation des systèmes. En effet, afin de concevoir une structure de production d'électricité par une source photovoltaïque, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique représentant fidèlement les caractéristiques du système. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'éloigner de la réalité physique, et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse et la synthèse des structures du système.

Ce chapitre est consacré à la modélisation du panneau, hacheur boost. Dans la première partie on donnera la représentation mathématique d'un panneau et leurs propriétés, dans la seconde partie on procèdera à la modélisation d'un hacheur boost.

II.2. Modélisation des modules photovoltaïques :

II.2.1. Les propriétés de module photovoltaïque :

II.2.1.1. Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle il est appelé courant de court-circuit I_{cc} la figure (II.1) présente le schéma équivalent. Il est à noter que dans cette condition aucune puissance n'est extraite du panneau [12].

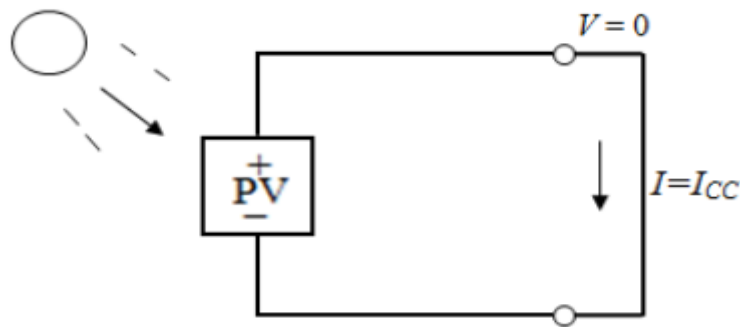


Figure (II.01). Courant de court-circuit [13].

Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation, on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc}R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc}R_{ser})}{R_{shu}} \quad (II.1)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} = \left[\exp\left(\frac{e(I_{ph}R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (II.2)$$

Devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

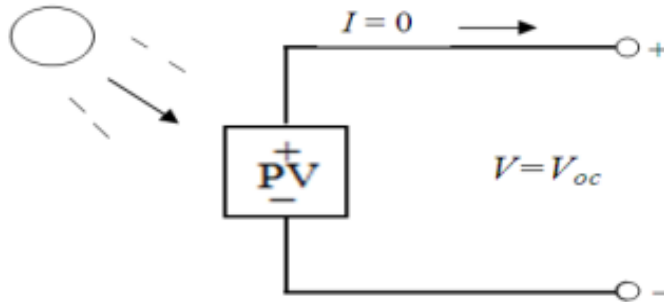
$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (II.3)$$

Quant activement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc}=I_{ph}$)

II.2.1.2. Tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension continue obtenue aux bornes d'un panneau sous un ensoleillement constant sans aucune circulation de courant (le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul) la figure (II.02) on appelle cette tension la tension de circuit ouvert V_{co} [12].

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (II.4)$$



Figure(II.02). Tension de circuit ouvert [13]

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \cdot \text{Ln}\left[\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) + 1\right] \quad (II.5)$$

II.2.1.3. Facteur de forme :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). Ce facteur de forme a pour formule [12] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (II.6)$$

II.2.1.4. Le rendement :

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m^2 , ce rendement a pour formule [14] :

$$\eta = \frac{P_m}{S \cdot E} \quad (II.7)$$

II.2.2. Modélisation de Différent modèles d'une cellule PV [14] :

Dans la littérature beaucoup des travaux sont effectués dans le domaine de la modélisation des systèmes photovoltaïques, donc il est très utile d'avoir un modèle précis.

On a quat cas de modélisation du générateur photovoltaïque, le cas le plus simple et le cas le plus compliqué :

- Cas du modèle idéal.
- Cas du modèle à une diode sans résistance shunt.
- Cas du modèle à une diode avec résistance shunt.
- Cas du modèle à deux diodes avec résistance shunt.

II.2.2.1. Model idéal :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement incident, en parallèle avec une diode figure(II-03) qui correspond à la jonction p-n de la cellule PV.

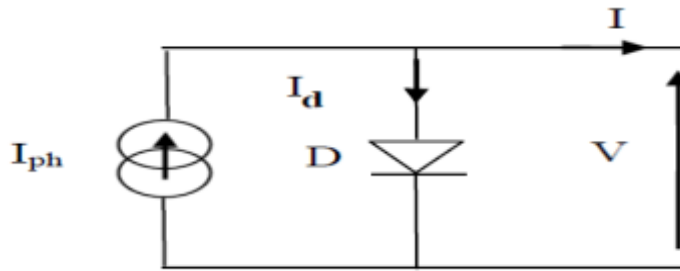


Figure (II.03) : Modèle électrique idéal d'une cellule PV.

Après la loi de nœuds en obtient:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.8}$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V_{pv} = V_d \tag{II.9}$$

V_d : la tension aux bornes de diode.

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

$$I_{pv} = I_0 \times \left[\frac{q \times v}{eAKT} - 1 \right] \tag{II.10}$$

I_0 : est le courant de saturation de la diode, qui est exprime comme suit :

$$I_0 = I_0(T_1) \times \left(\frac{T}{T_1}\right)^3 \times e^{\frac{-q \times v}{A \times K \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}} \tag{II.11}$$

Et :

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}(T_1)}{A \cdot K \cdot T_1} - 1}} \tag{II.12}$$

Avec:

V_g : et la tension de seuil de la diode (1.12 eV)

I_{sc} : le courant de court circuit

V_{oc} : tension de circuit ouvert.

k : constante de Boltzmann ($K=1.3854 \times 10^{-23}$ J/K).

q : est la charge électrique qui es égale 1.6×10^{-19} C.

A : facteur de qualité de la diode.

(KT/q) représente le potentiel thermique.

I_{ph} : courant photonique de la diode qui est donnée par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times [1 + K_0 \times (T - T_1)] \quad (II.13)$$

Avec:

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (II.14)$$

D'après les relations (II.1) et (II.3) on obtient :

$$I_{ph} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q \times (v - R_S)}{AKT}} - 1 \right] \quad (II.15)$$

Se qui implique :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times [1 + K_0 \times (T - T_1)] - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (v - R_S)}{AKT}} - 1 \right] \quad (II.16)$$

II.2.2.2. Modèle à une diode sans résistance shunt :

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode.

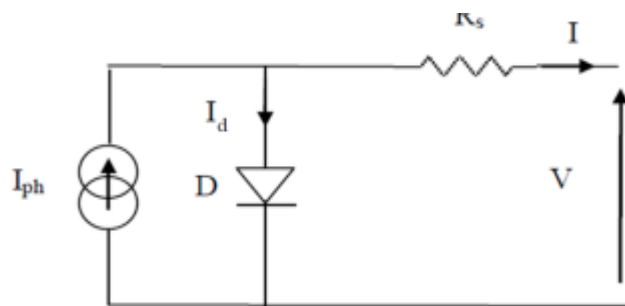


Figure (II.04) : Modèle électrique a une diode sans résistance shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles suivantes :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.17)$$

$$I_{ph} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q \times (v - R_S \times I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (II.18)$$

II.2.2. 3. Modèle à deux diodes sans résistance shunt :

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique figure (II.05), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.

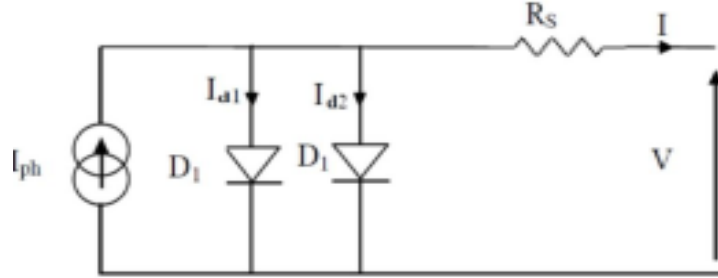


Figure (II.05) : Model électrique à deux diodes sans résistance shunt d'une cellule PV.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) \tag{II.19}$$

Le courant de la diode est donné comme suit :

$$I_{d1} = I_{01} \times \left[e^{\frac{q \times (v + R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.20}$$

$$I_{d2} = I_{02} \times \left[e^{\frac{q \times (v + R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.21}$$

I_{01} et I_{02} représente les courant de saturation des diodes D1, D2 respectivement :

Donc on aura :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{\frac{q \times (v + R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{\frac{q \times (v + R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.22}$$

II.2.2.4. Modèle à deux diodes avec résistance shunt (à deux exponentielles):

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant figure (II.6), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

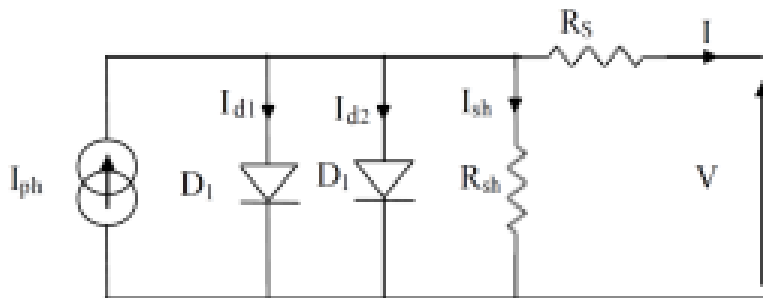


Figure (II.06) : Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV.

Après la loi des mailles on trouve :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sc} \quad (II.23)$$

De ou:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] - \left[\frac{V + (R_s \times I)}{R_{sh}} \right] \quad (II.24)$$

II.3. Modélisation de panneau photovoltaïque:

Dans notre travail on a intéressé par le modèle à deux diodes avec résistance shunt, qui représente fidèlement le comportement d'une cellule photovoltaïque. Ce module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (figure II.7) qui se compose d'une source de courant modélisent le flux lumineux, les pertes sont modélisé par les deux résistances, une résistance shunt R_{sh} , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires.

Le courant généré par le modèle est donné par l'équation suivante :

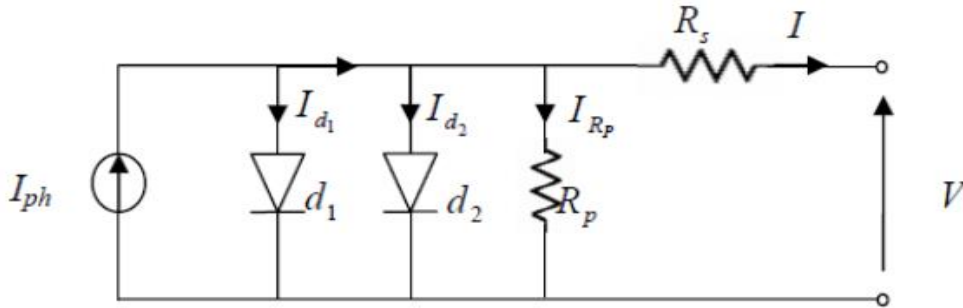


Figure (II.07) : Schéma électrique d'une cellule solaire à deux diodes avec résistance shunt.

$$I = I_{PH} - I_{d1} - I_{d2} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.25)$$

Et par multiplication par le nombre des cellules en série et en parallèle, nous aurons l'équation suivante qui représentait le modèle d'un panneau solaire:

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_{s1} \left(\frac{q(V - IR_s)}{eA_1KT_c} - 1 \right) - N_p I_{s2} \left(\frac{q(V - IR_s)}{eA_2KT_c} - 1 \right) - \frac{N_p V + IR_s}{R_p} \quad (II.26)$$

Une cellule solaire comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule:

- La résistance série R_s est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance des contacts des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt R_{sh} est due à un courant de fuite au niveau de la jonction elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

II.4. Simulation de panneau photovoltaïque:

On a réalisé le bloc de simulation sous Matlab/simulink du panneau photovoltaïque:

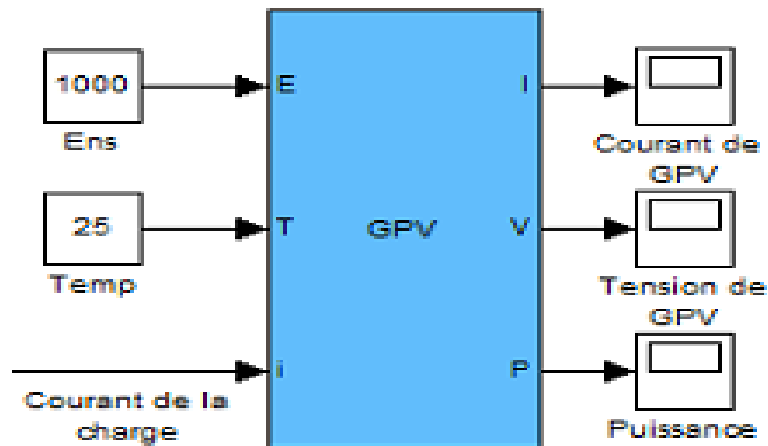


Figure (II.08) : Schéma block de simulation du générateur photovoltaïque

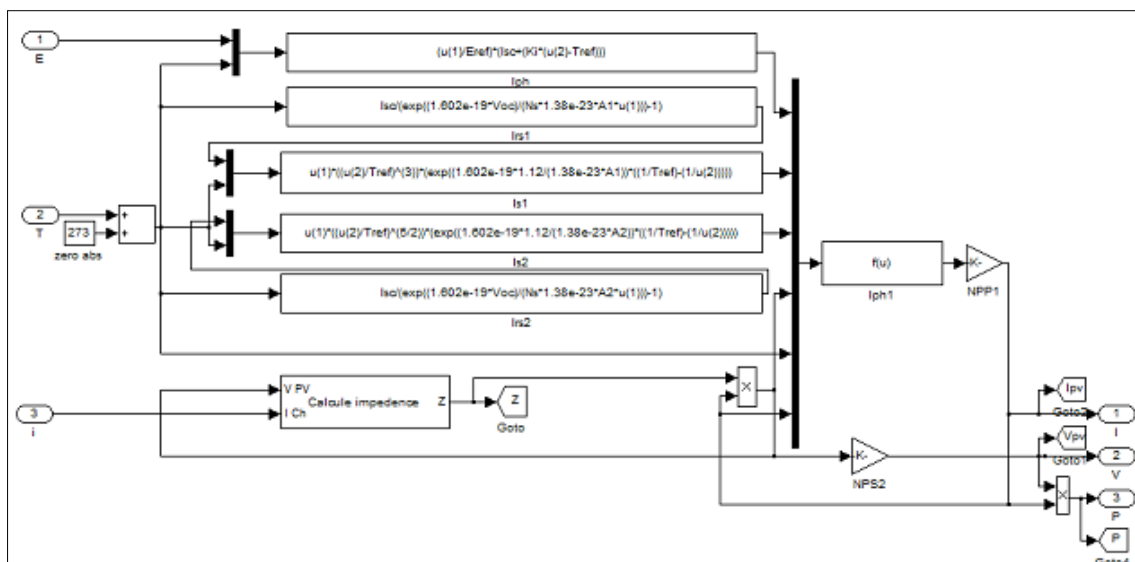


Figure (II.09) : Schéma block de simulation d'un panneau solaire.

La puissance maximale	60 W
La tension de circuit ouvert (V_{oc})	21.1V
Le courant de court-circuit (I_{sc})	3.8A
La tension opérationnelle a P_{max}	17.3 V
Le courant opérationnel a P_{max}	3.46 A
Coefficient de température courant de court-circuit	0.065A/K
Coefficient de température de tension de circuit ouvert	80mV/K
Coefficient de température de puissance (NOCT)	0.5%/K

Tableau (II.01) : Les caractéristiques techniques expérimentales du panneau SOLAREX MSX60.

II.5 Résultats de simulations :

Pour tester le comportement du modèle de simulation du panneau on a effectué des différents tests, l'influence de la température et de l'ensoleillement sur la caractéristique (I-V), (V-P) du module photovoltaïque.

II.5 .1.les caractéristiques d'un panneau PV :

Pour valider nous modèle de panneau proposé on a effectué une comparaison entre les résultats de simulation représentée dans la figure (II.10) avec les données de data sheet du modèle de panneau de MSX60, les résultats obtenus représentés dans le tableau (II.02) :

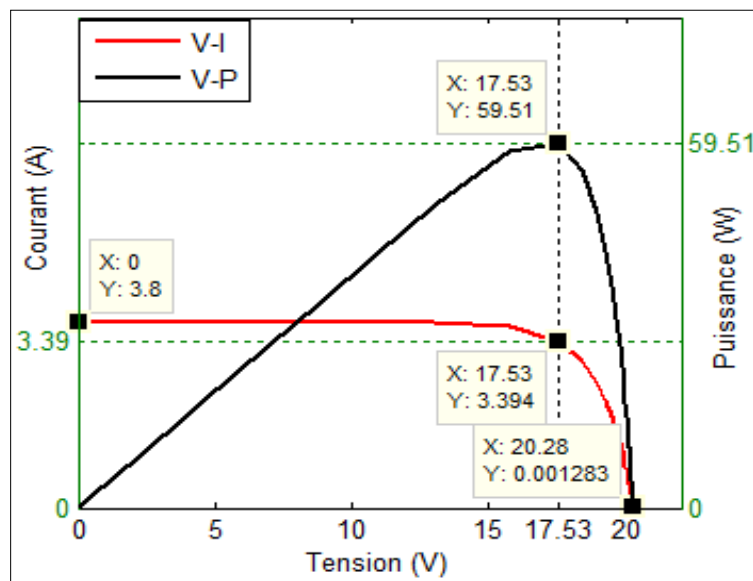


Figure (II.10) : Les caractéristiques du panneau (V-I) et (V-P) dans les conditions nominales 1000 W/m^2 et 25C°

	I_{cc} (A)	V_{co} (V)	P_{max} (W)	V_{opt} (V)	I_{opt} (A)
Modèle réel MSX60	3.8	21.1	60	17	3.46
Modèle proposé	3.8	20.28	59.51	17.53	3.39

Tableau (II.02) : Les résultats de simulation du panneau réel et panneau proposé.

II.5 .2.Effet de température :

Nous présentons ci-dessous la caractéristique I-V et P-V d'un module photovoltaïque. En fixe l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et on varie la température de 0°C jusqu'à 100°C , les allures obtenues sont présentées dans les figures suivantes :

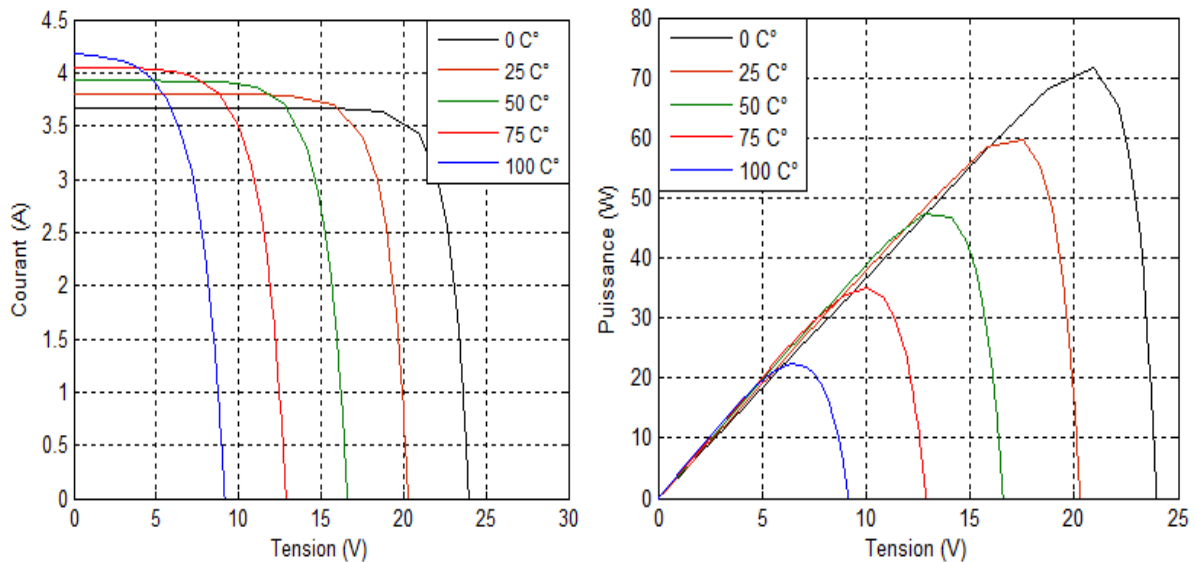


Figure (II.11) : Les caractéristiques V-P et V-I pour un éclairement constant 1000w/m^2 et différentes valeur de température.

À partir de la figure (II.11) on remarque dans la caractéristique (I-V) que 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 de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Donc et par conséquent la puissance diminue si la température augmente, ce qui remarque dans la caractéristique puissance tension.

II.5 .3.Effet de l'ensoleillement :

On applique une température $T=25^\circ\text{C}$ maintenue constante et on varie l'ensoleillement (E) de 100 W/m^2 jusqu'à 1000 W/m^2 , les résultats obtenues sont illustrés en figures (II.1) :

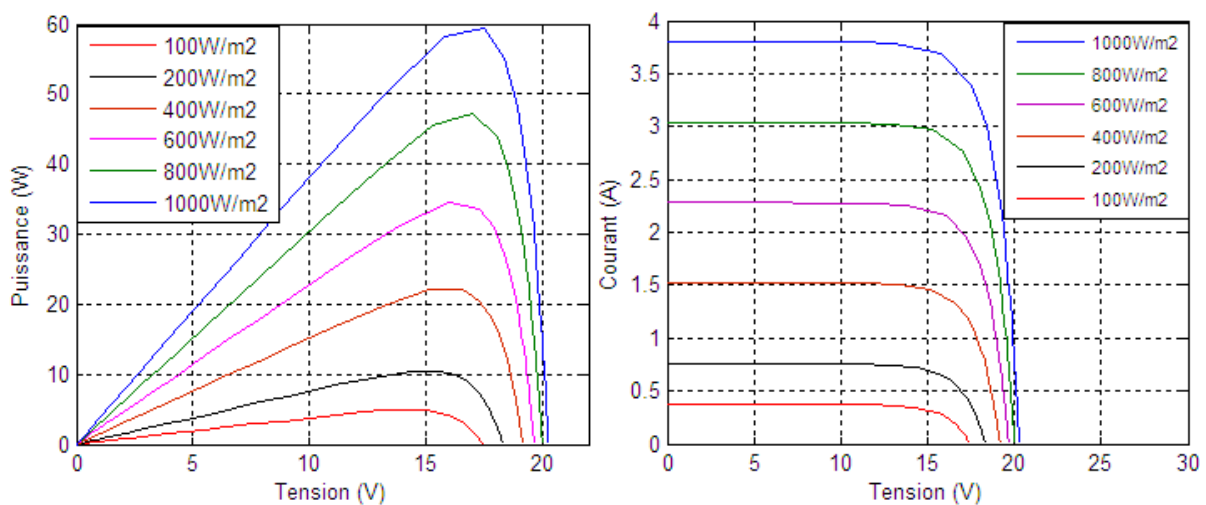


Figure (II.12) : Les caractéristiques V-P et V-I pour une température constante de 25°C et différentes degrés d'éclairement

À partir de la figure (II.12) à la caractéristique (I-V) La tension de circuit-ouvert V_{oc} diminue faiblement lors de la diminution de l'ensoleillement par contre le courant de court-circuit I_{cc} marque une forte diminution, on remarque dans la caractéristique (P-V) puissance – tension, la puissance maximale diminue si ensolleillements est diminué.

II.6. Convertisseur DC/DC (Hacheurs):

II.6.1. Définition :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, où pour alimenter une charge continue. Il se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ont un bon rendement, ils ne consomment aucune puissance active [15].

Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [15].

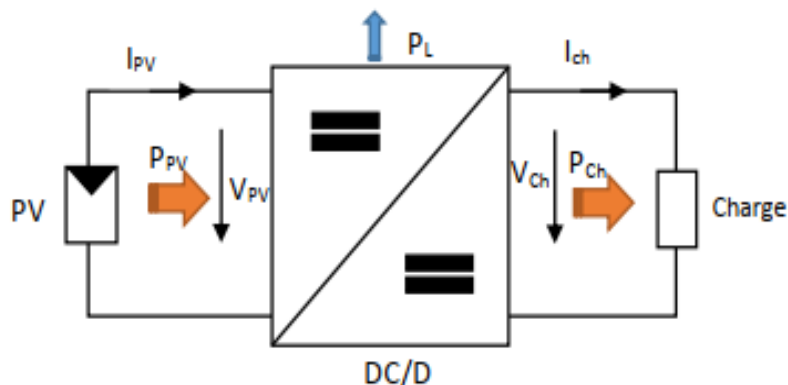


Figure (II.13) : convertisseurs DC-DC.

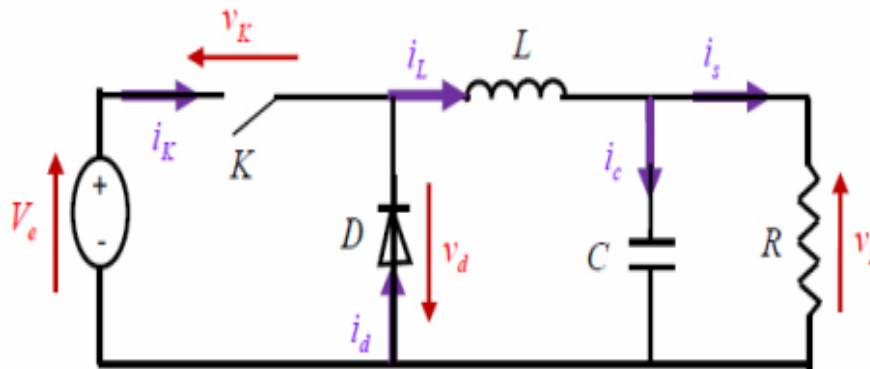
II.6.2. Type des hacheurs :

Il existe plusieurs types d'hacheurs, nous citons dans la partie suivante quelques types qui servent à notre étude.

- Abaisseur de tension « Buck » ou hacheur dévolteur.
- Élévateur de tension « BOOST » ou notamment appelé hacheur survolteur.
- Abaisseur/Élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

II.6.2.1. Hacheur dévolteur (Buck) :

Le schéma de circuit du convertisseur dévolteur est illustré à la figure(II.14) ce schéma contient un transistor et une diode avec un filtre LC. Son principe de fonctionnement consiste à multiplier la tension d'entrée constante E par un facteur scalaire, plus petit que l'unité.



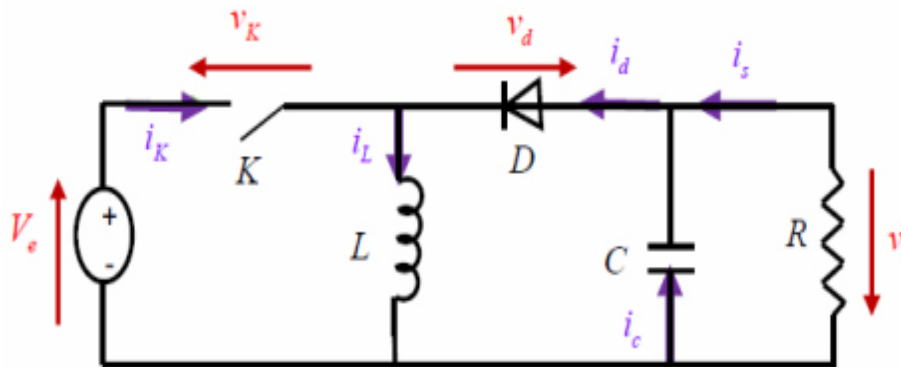
Figure(II.14) : Schéma électrique du convertisseur Buck (hacheur dévolteur)[16].

II.6.2.2. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

Un autre arrangement possible des commutateurs à semi-conducteurs permet d'ajouter un autre type de convertisseur DC-to-DC connu sous le nom de convertisseur dévolteur-survolteur.

En fait, ce nouveau convertisseur est obtenu en échangeant la diode D et l'inductance L du convertisseur dévolteur. Le circuit est illustré à la figure (II.15).

Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieur ou inférieur à un par rapport au changement de polarité. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs dévolteur et survolteur est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E .

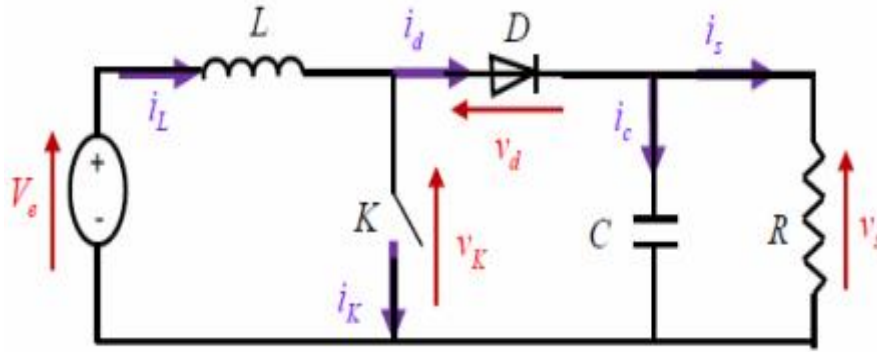


Figure(II.15): Schéma du convertisseur dévolteur-survolteur [16].

II.6.2.3.Hacheur survolteur (Boost) :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

La figure ci-dessous donne la forme la plus simple du hacheur BOOST.



Figure(II.16) : Schéma électrique du convertisseur Boost (Hacheur survolteur)[16].

II. 6.3.Modélisation d'un hacheur boost :

$$V_{pv} - R_L * I_L - Ld \frac{I_L}{dt} - \alpha V_{pv} = 0 \quad (II.27)$$

$$(1 - \alpha)I_L = Cd \frac{V_{ch}}{dt} + \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \quad (II.28)$$

$$Ld \frac{I_L}{dt} = V_{pv} - \alpha V_{ch} - R_L * I_L \quad (II.29)$$

$$\frac{cdV}{dt} = (1 - \alpha)I_L - \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \quad (II.30)$$

$$I_L = \int \frac{1}{L} - (V_{pv} - \alpha V_{ch} - R_L * I_L) \quad (II.31)$$

$$V_{pv} = \frac{1}{c} \int \left((1 - \alpha)I_L - \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \right) \quad (II.32)$$

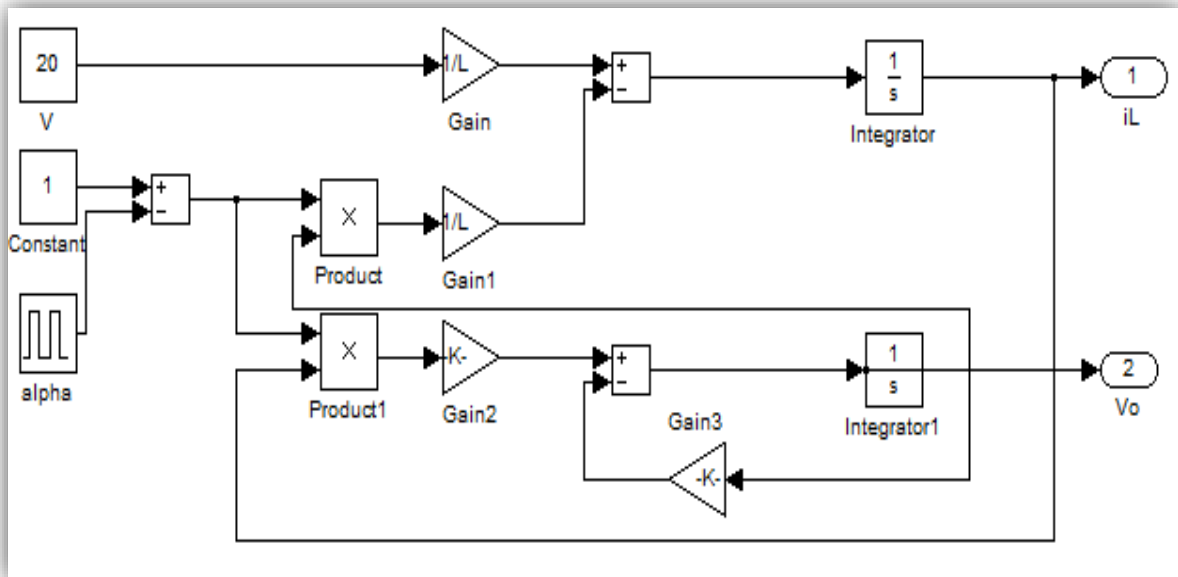
II.7. Avantages de convertisseur Boost :

Le convertisseur Boost est plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT), grâce à ces avantages :

- le convertisseur Boost fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir de générateur photovoltaïque.
- Ce convertisseur a l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance L.
- Il peut fonctionner même avec une tension d'entrée fiable, ceci permet de récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclairément. Aussi le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension de sortie plus élevée, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie.

II.8.Simulation de l'hacheur survolteur (boost) :

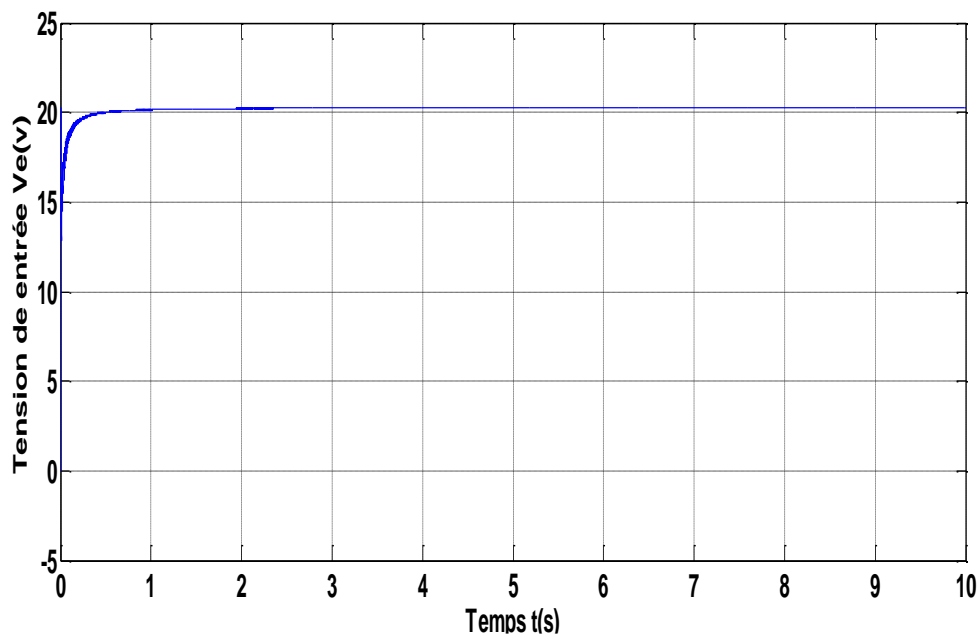
II.8.1.1.Simulation de l'hacheur survolteur (boost):



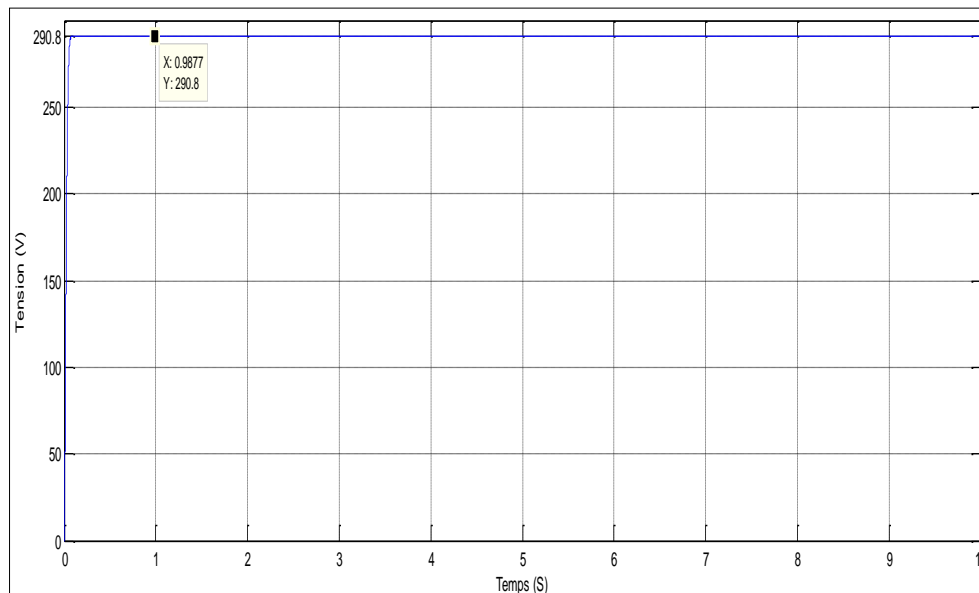
Figure(II.17) : Schéma bloc de hacheur boost.

II.8.1.2. Résultats de simulation du l'hacheur survolteur :

Pour valider le model du boost on à effectué une simulation par l'environnement MATLAB/simulink avec une tension d'entrée de 20V.



Figure(II.18) : Tensions d'entrée du hacheur boost



Figure(II.19) : Tensions de la sortie du hacheur boost

On remarque que la tension de sortie du convertisseur survolteur (hacheur boost) est très grande par rapport la tension d'entrée.

II.8.2.1.Simulation de l'hacheur survolteur avec un panneau :

La figure (II.20) représente le schéma block de simulation du panneau et hacheur survolteur avec une charge d'impédance Z :

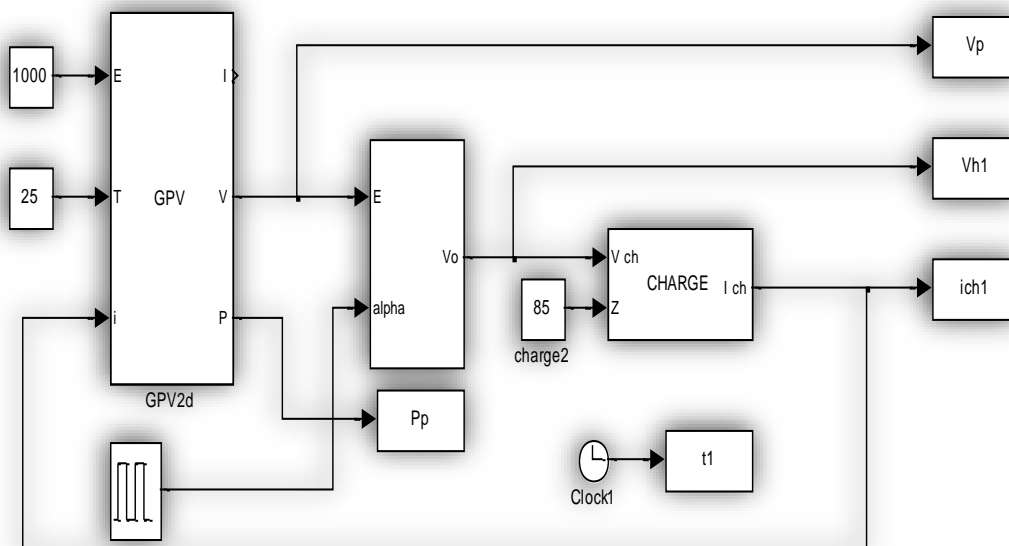


Figure (II.20) : Schéma de simulation d'un hacheur survolteur (boost) avec panneau.

II.8.2.2. Résultats de simulation du l'hacheur survolteur avec un panneau :

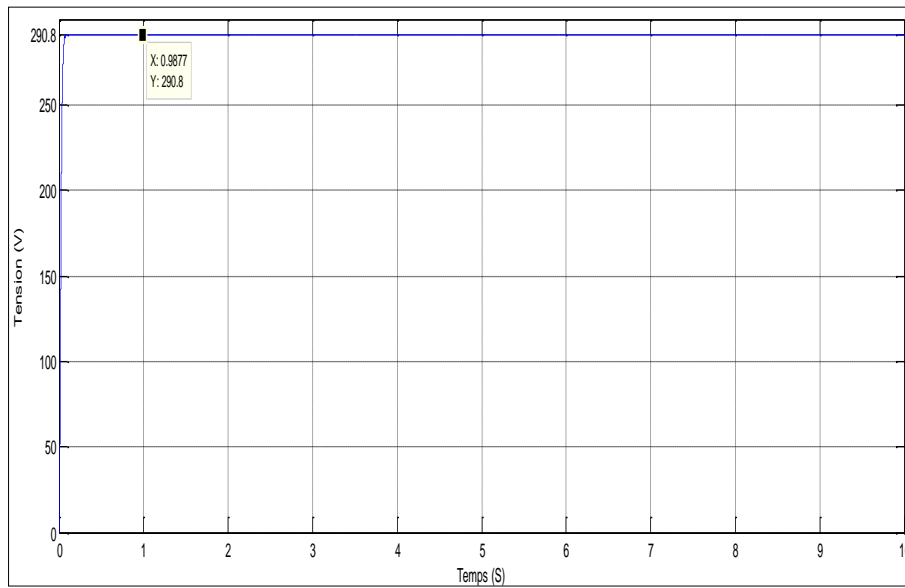


Figure (II.21) : Tension de sortie du hacheur

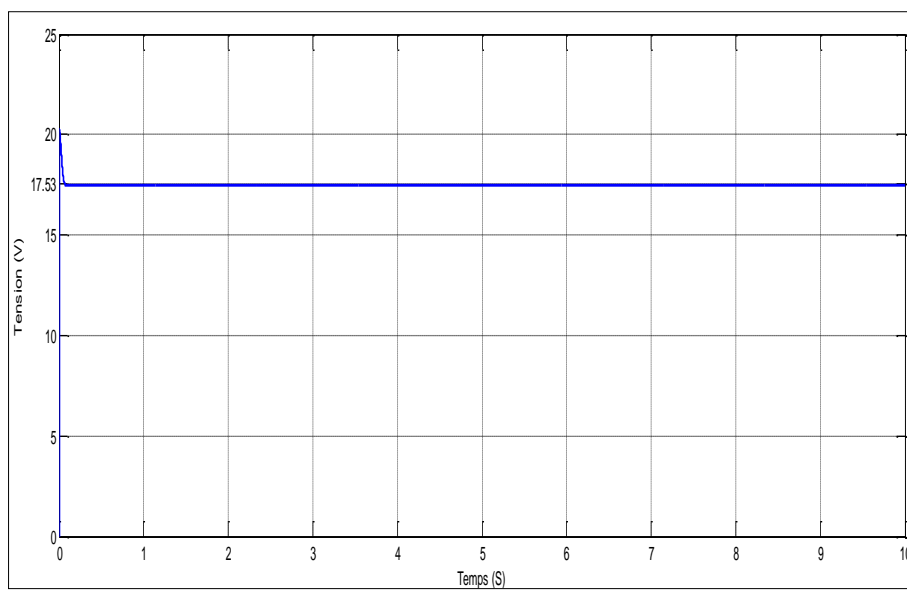


Figure (II.22) : Tension de sortie du panneau $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

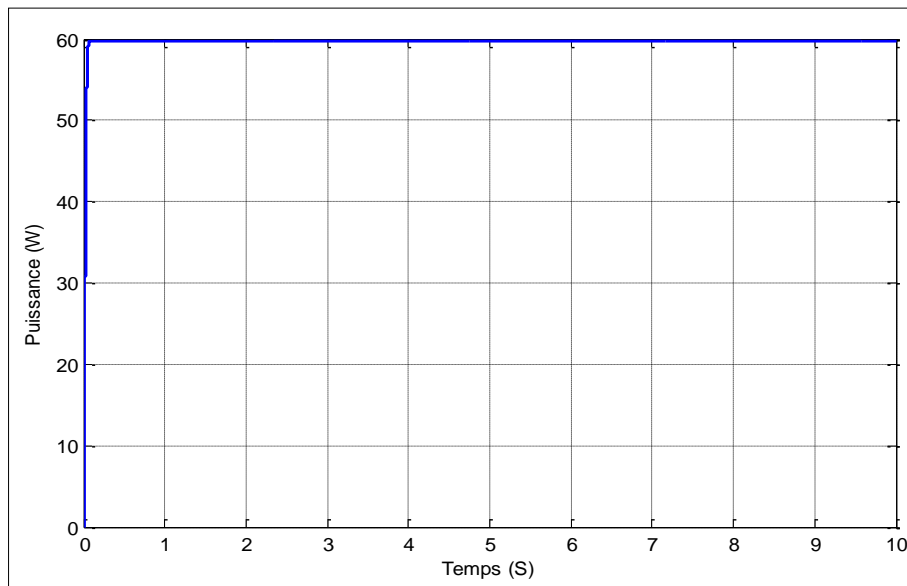


Figure (II.23) : Puissance de sortie du panneau pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

A partir des résultats des figures (II.21) ; (II.22) et (II.23) on remarque que le panneau donne une puissance de 60W, tension de 17.3V un courant de 3.4A et l'hacheur augmente la tension jusqu'à une valeur de 290.8V.

II.8.2.2.1. Cas de variation de température :

Nous allons simuler pour un éclairement fixe 1000 W/m^2 et une variation de température de $25\text{-}50^{\circ}\text{C}$.

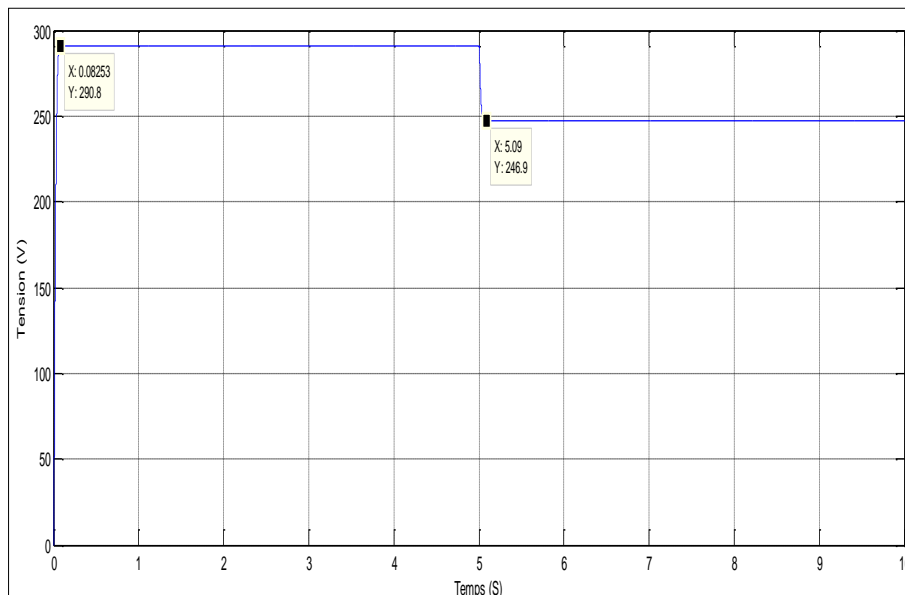


Figure (II.24) : Tension de sortie du hacheur survolteur pour $T = 25\text{-}50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

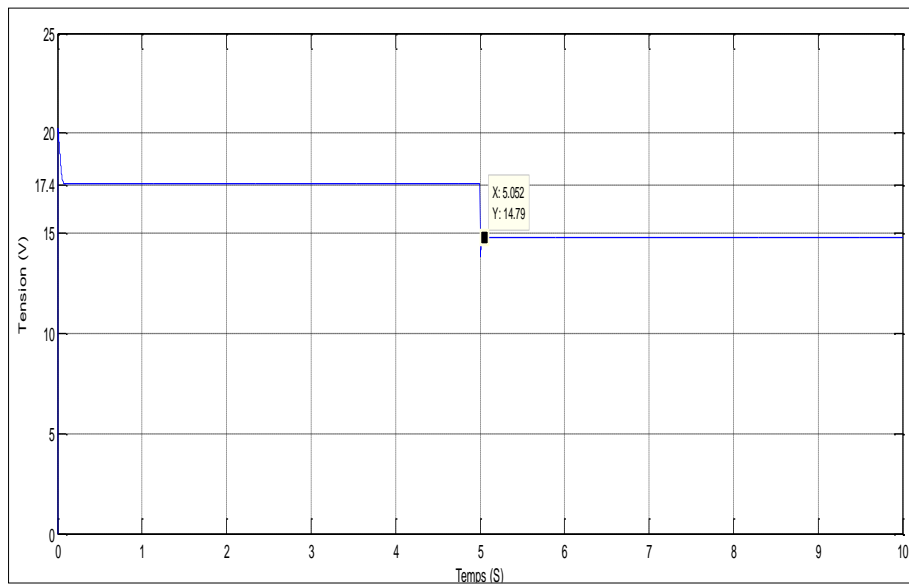


Figure (II.25) : Tension de sortie du panneau pour $T = 25-50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

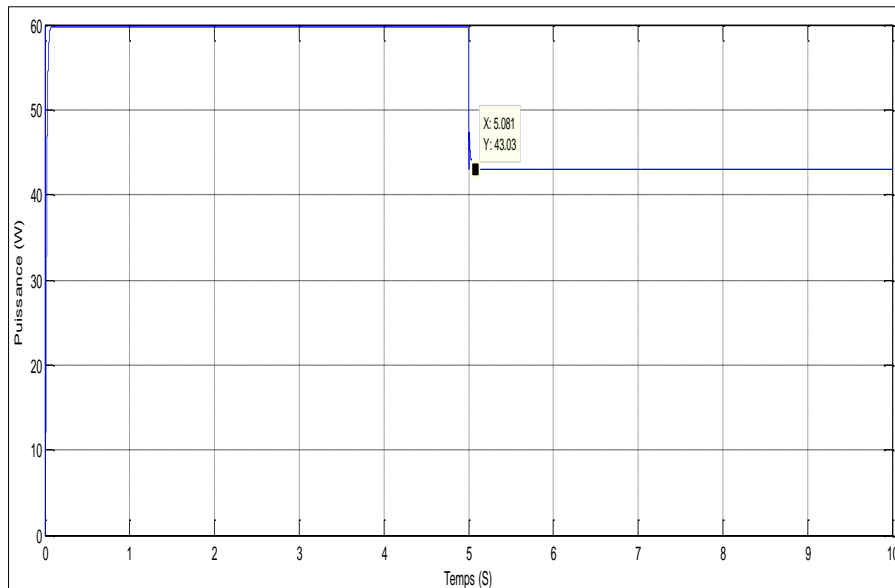


Figure (II.26) : Puissance de sortie de panneau pour $T = 25-50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

II.8.2.2.2. Cas de variation de l'éclairement :

Nous allons simuler pour une température fixe 25°C et une variation de l'éclairement de $700-1000\text{W/m}^2$:

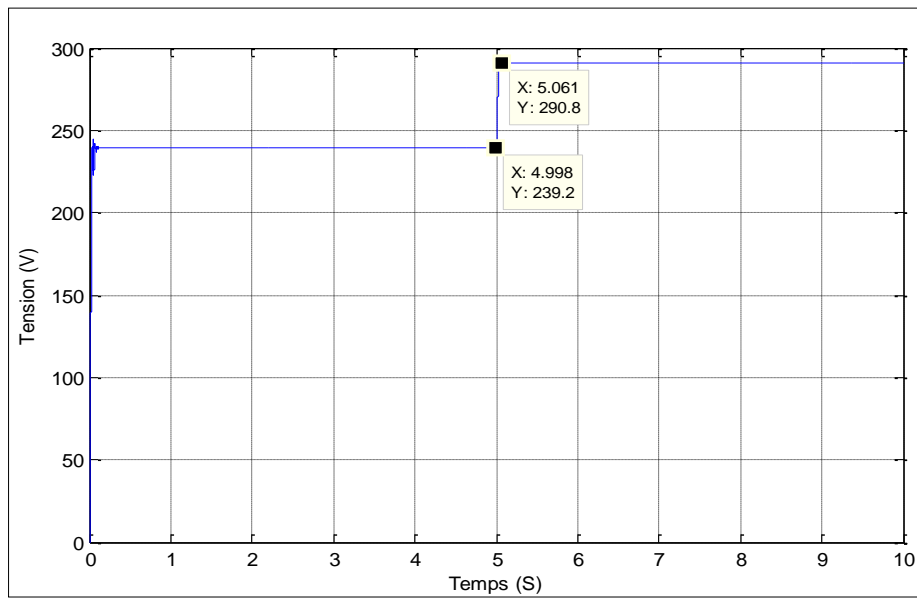


Figure (II.27) : Tension de sortie du hacheur survolteur pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 700\text{-}1000 \text{ W/m}^2$

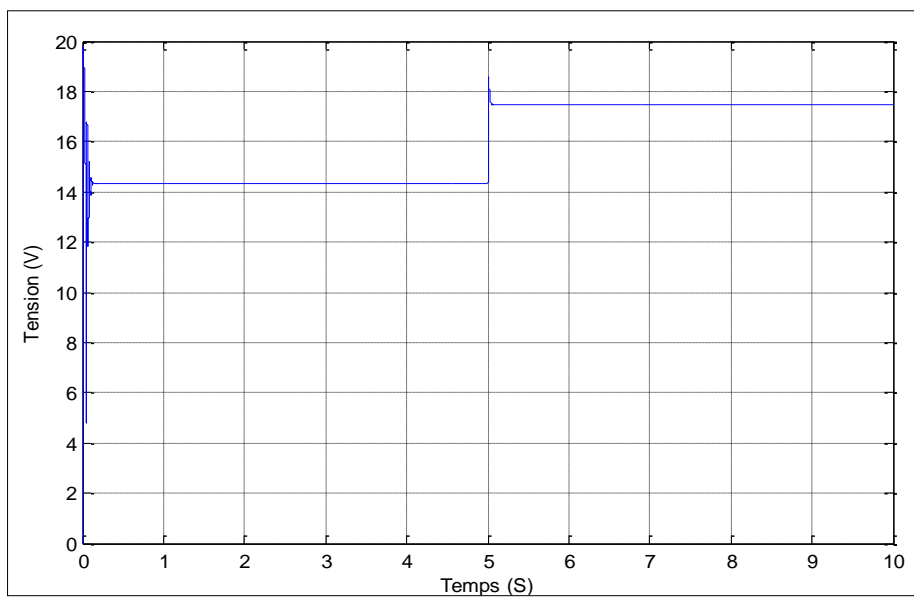


Figure (II.28) : Tension de sortie du panneau pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 700\text{-}1000 \text{ W/m}^2$

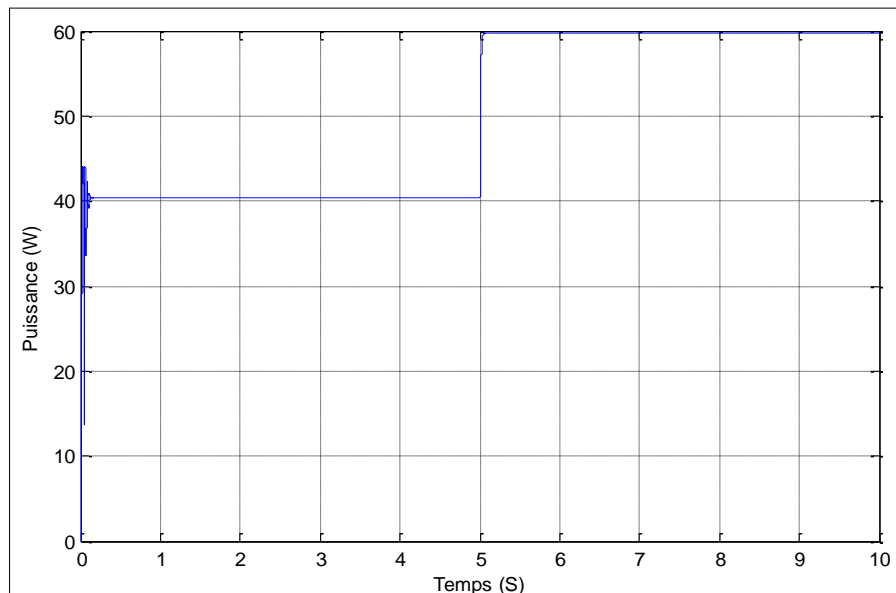


Figure (II.29) : Puissance de sortie du panneau pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 700\text{-}1000 \text{ W/m}^2$

A partir de résultat de simulation présentes par les figures (III.24) ;(II.25) ; (II.26) ; et (II.27), (II.28) et (II.29) on remarque que ; en cas de l'augmentation de la température, la puissance et la tension de panneau diminuent donc la tension de sortie de l'hacheur diminue aussi. Mais en cas de l'augmentation de l'éclairement de 700 W/m^2 à 1000 W/m^2 on remarque que la puissance et la tension de panneau augmentent donc la tension de sortie de l'hacheur augmente aussi.

Ces résultats impliquent que la variation de tension de sortie du hacheur survolteur varie avec la variation de la tension délivrée par le panneau.

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a modélisé les différents éléments de la chaîne de production d'énergie solaire et pour valider nos modèles on a testé le panneau et le convertisseur boost dans des différentes conditions

À partir des résultats obtenus, on a un problème des pertes d'énergie ou le rendement de l'étage de conversion n'est pas toujours au point maximal. Donc nécessite d'une procédure pour maintenir le système photovoltaïque fonctionné à sa puissance maximale, donc on a proposé dans le chapitre suivant des méthodes de commande pour extraire le maximum de puissance.

CHAPITRE III:

Les commandes MPPT P&O et INC d'un système photovoltaïque

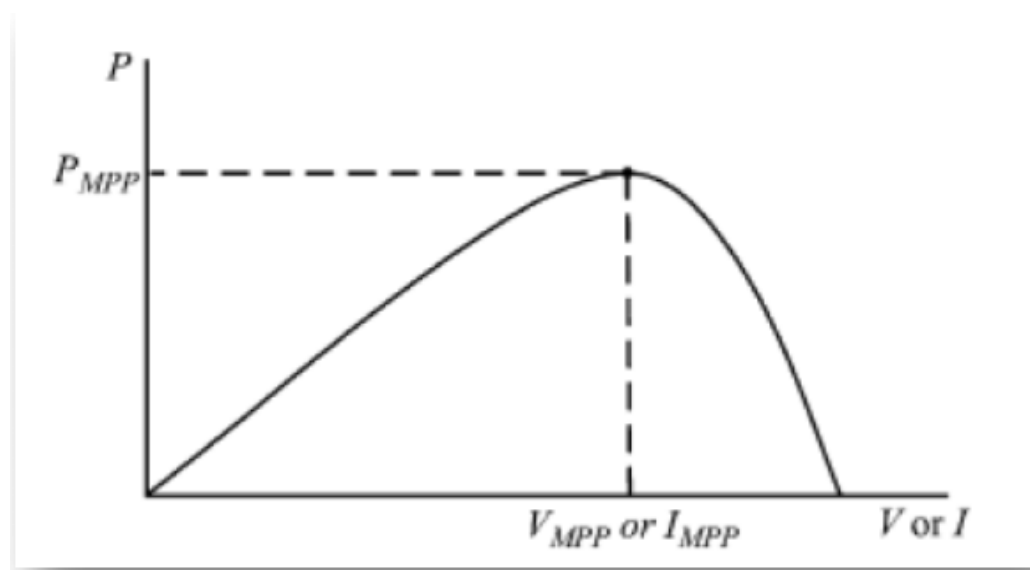
III.1. Introduction :

La puissance délivrée par un générateur PV dépend fortement du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules. Elle est de ce fait très imprévisible. Comme on a déjà vu dans le chapitre précédent, la courbe caractéristique de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement de coordonnées VMPP pour la tension et IMPP pour le courant. La position de ce MPP varie dans le temps du fait qu'elle dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules. Un suiveur de ce point maximum de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit donc être utilisé de manière à imposer au GPV de fonctionner au MPP et donc de fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. Les premières utilisations des MPPTs remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement des MPPTs a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que, un grand nombre de procédures et techniques ont été développées.

Dans ce chapitre on a élaboré deux méthodes de recherche de point de puissance maximale MPPT, la méthode de perturbation et observation et la méthode d'incrémental conductance et une comparaison entre les deux méthodes.

III.2. Commandes MPPT :

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique d en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [17].



Figure(III.01) : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.

III.3.1. Principe général de la commande :

Toutes les techniques de commande MPPT, qu'on va présenter ultérieurement sont basées sur le principe général de la figure (II.02).

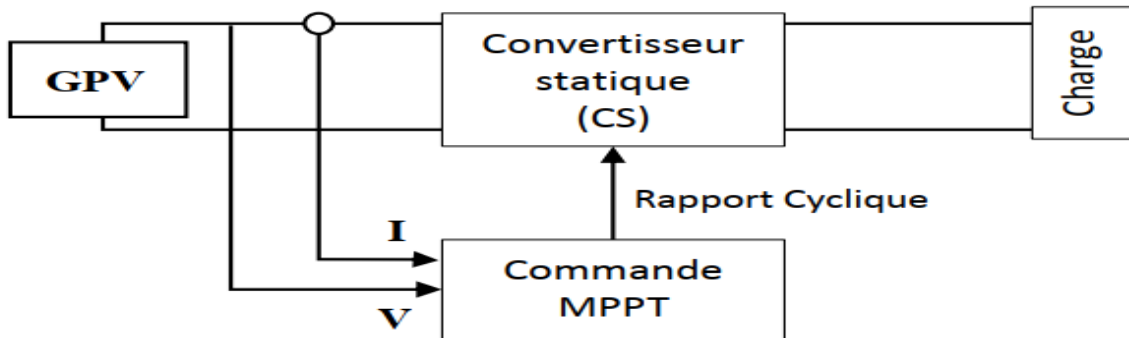


Figure (III.02) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant panneau pv ;un convertisseur BOOST ;une commande MPPT t une charge

III.3.2.Principe de la Recherche du MPP :

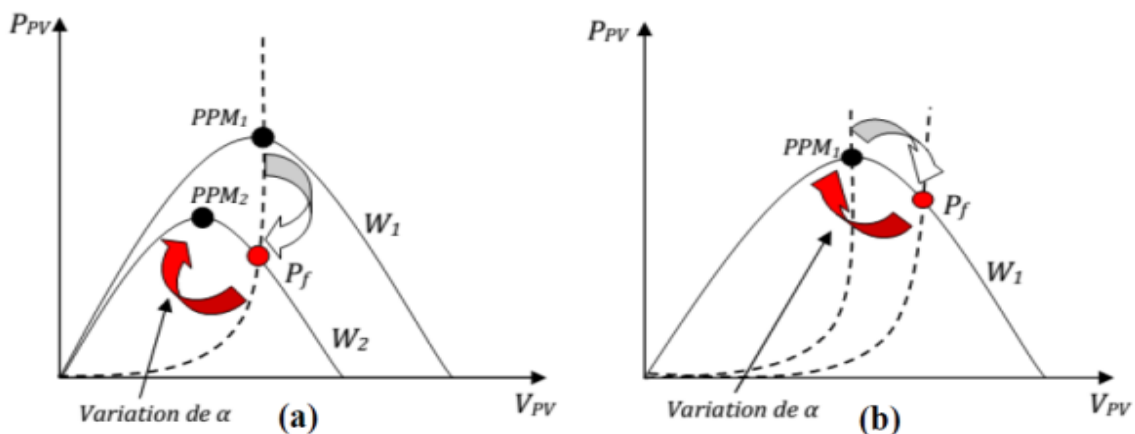
Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la Figure(III.3)

La puissance incidente W_1 n'est maximale que pour un rapport cyclique optimal α_{1opt} : point PPM1 sur la figure(III.3_a)

Une variation de W_1 à W_2 mené, conséquemment, le fonctionnement du système au point de fonctionnement P_f

Alors, assurer une puissance maximale au nouveau point PPM2 exige d'ajuster le rapport cyclique à la valeur α_{2opt}

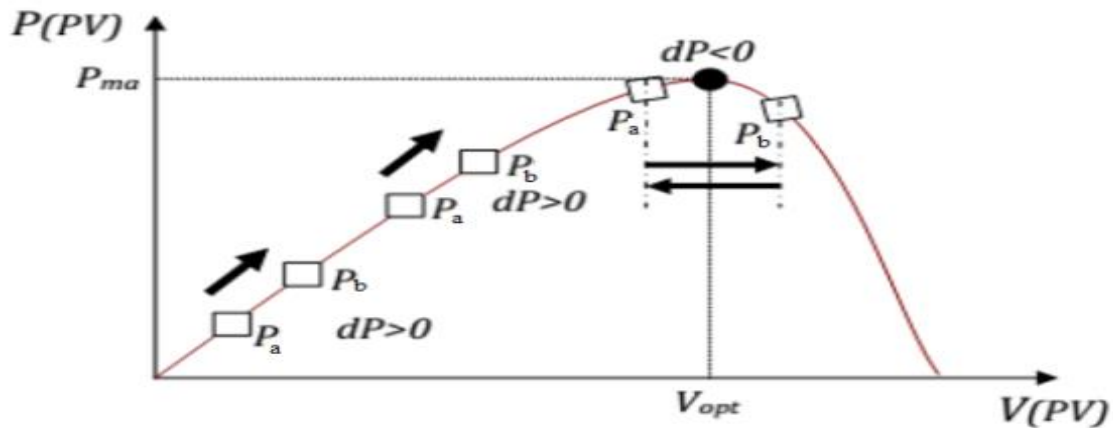
De même, une variation de la charge Figure(III.3_b): le point de puissance maximale dévie d'abord de sa position optimale (PPM1) et donc pour revenir vers ce même PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique « α ». De cette manière, le système sera toujours amené à son optimum de puissance.



Figure(III.03):Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b).

La comparaison des P_a et P_b mesurées respectivement aux instants (t-1) et (t) permet de chercher le point de la puissance maximale, Figure(III.4) en incrémentant ou diminuant le rapport cyclique α . Si la dérivée est positive ($P_a < P_b$) cela signifie que nous nous rapprochons du PPM en incrémentant α , et si la dérivée de la puissance est négative ($P_a > P_b$) cela veut dire que nous l'avons dépassé nous devons décrémente α .

Une fois α modifié, prend la valeur P_a et P_b on effectue une nouvelle mesure de I_{pv} et V_{pv} pour calculer la nouvelle puissance P_b .



Figure(III.04) : Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM

III.4. Les techniques de MPPT :

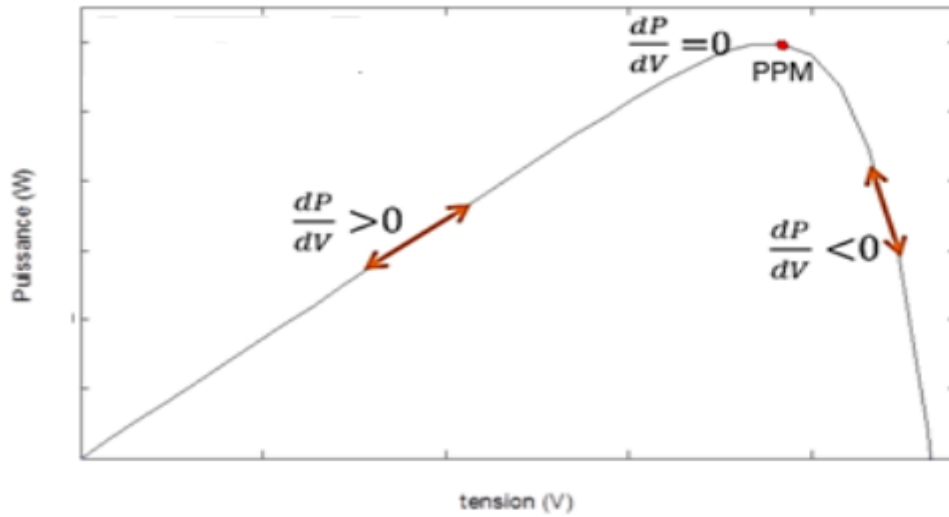
Il existe différents types de contrôleurs MPPT, mais tous ces contrôleurs sont basés en général sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique.

III.4.1. la Commande perturber et observer (P&O) :

III.4.1.1.définition :

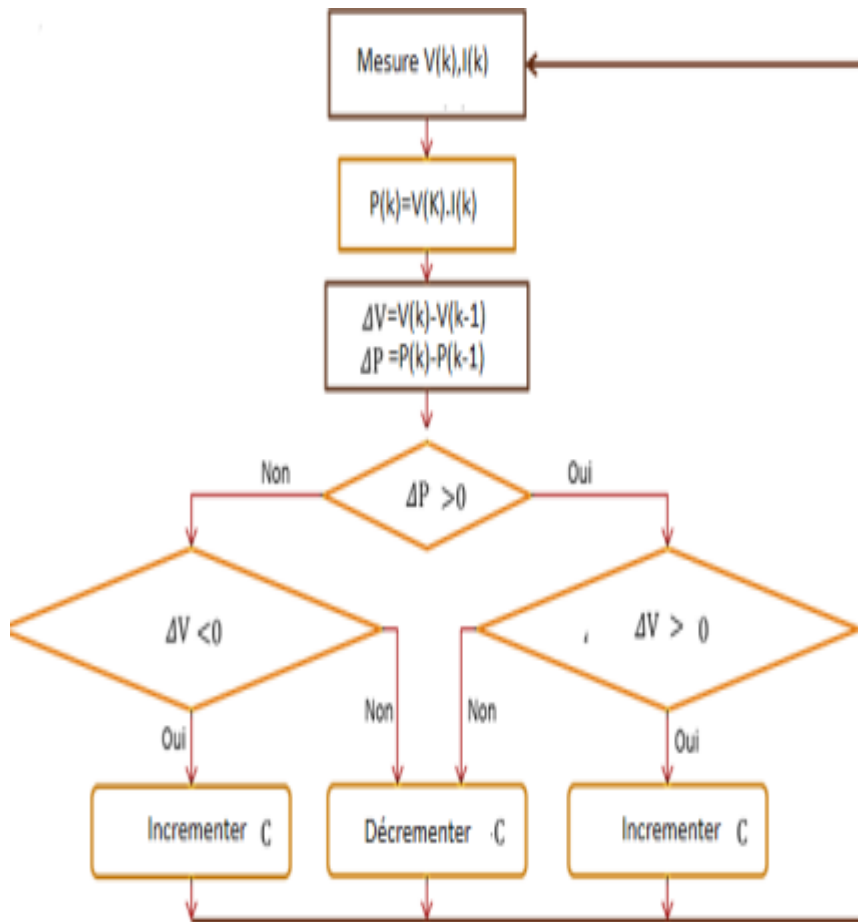
La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure(III.4), on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($\frac{dP}{dV} > 0$) l'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($\frac{dP}{dV} < 0$) alors l'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante [18]. Généralement on a les situations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{dV} &= 0 && \text{au MPP} \\
 \frac{dP}{dV} &> 0 && \text{à gauche de MPP} \\
 \frac{dP}{dV} &< 0 && \text{à droit de MPP}
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$



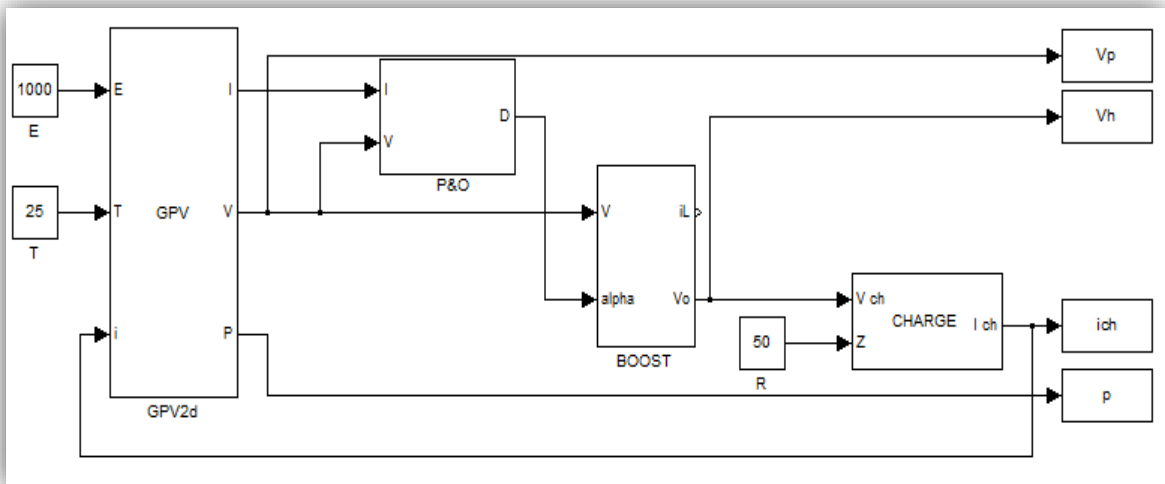
Figure(III.05) : Caractéristique de puissance-tension du panneau PV.

III.4.1.2. Organigramme de la méthode P&O (perturbe et observe) :



Figure(III.06) : Organigramme de la méthode P&O [19].

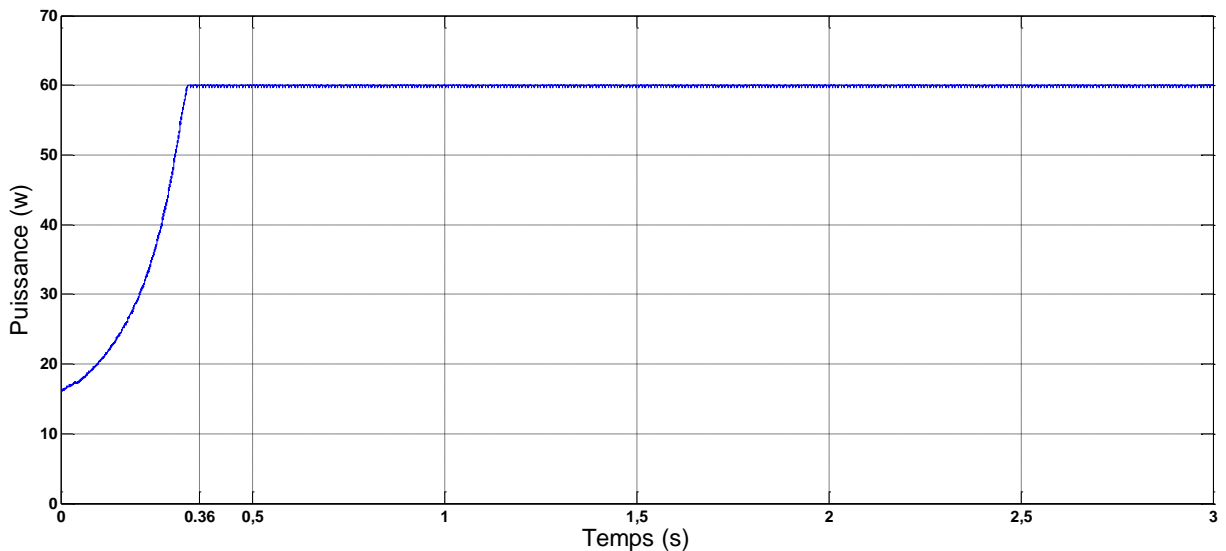
III.4.1.3. Simulation de la commande MPPT (P&O) donne panneau PV :



Figure(III.07) : Schéma bloc de la technique P&O.

III.4.1.4. Résultats des simulations de la commande MPPT P&O :

Nous allons simuler pour un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

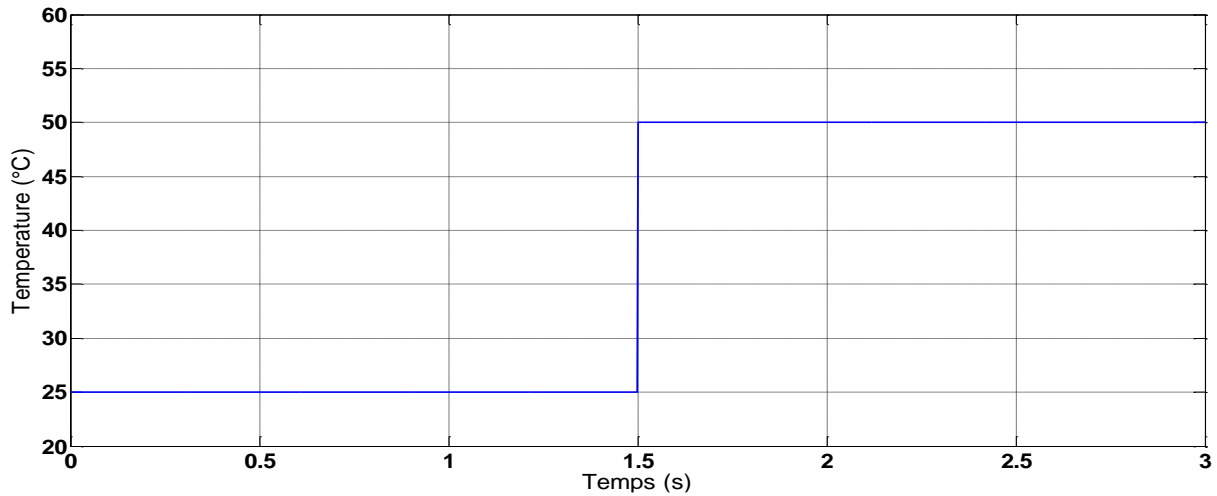


Figure(III.08) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (P&O) pour $T = 25^\circ\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

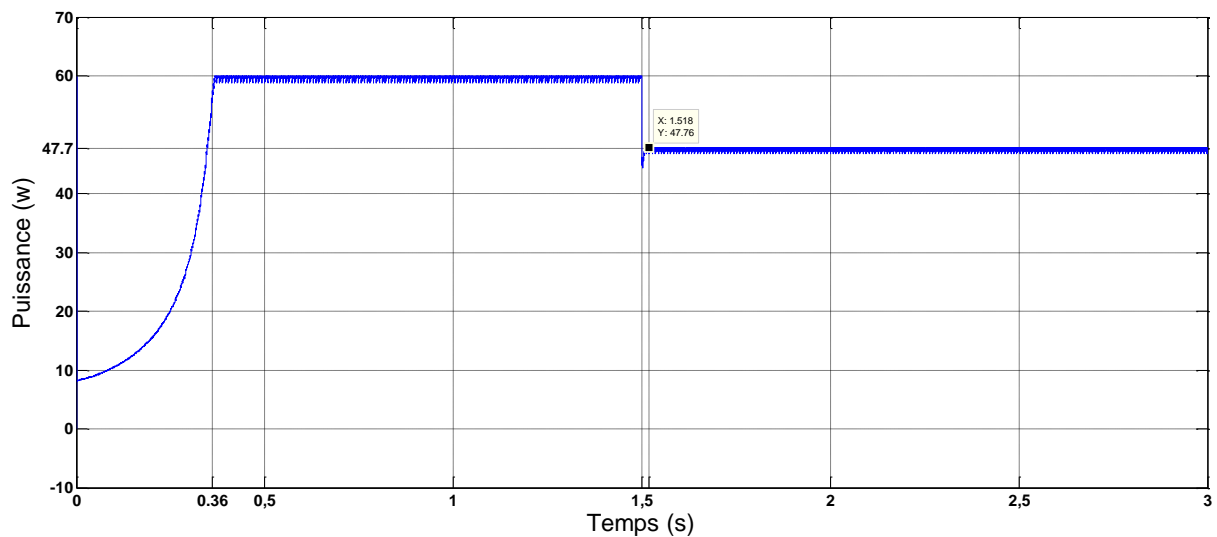
À partir de résultat obtenue de la figure (III.08) en remarque que la puissance du générateur attient sa valeur de puissance maximale 60 W après un temps de 0.36s et rester au voisinage de ce point avec une variation de +0.06 W et -1 W.

III.4.1.4.1. Cas de variation de température 25°C /50°C :

Nous allons simuler pour un éclairement de 1000 W/m² et une variation de température 25°C à 50°C :



Figure(III.09) : variation de température 25°C /50°C.

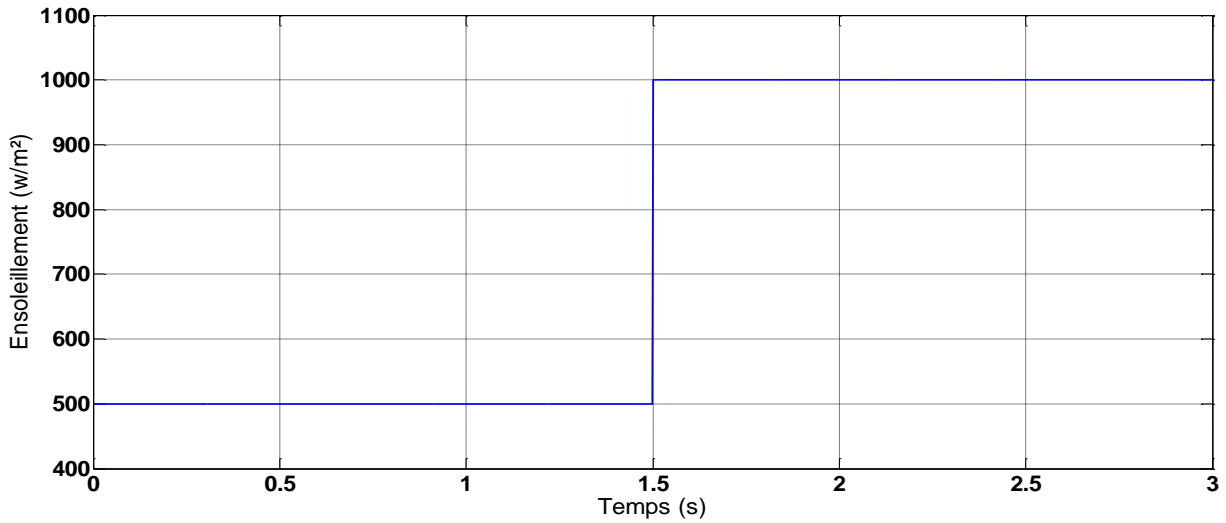


Figure(III.10) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (P&O) pour T = 25/50°C et E = 1000 W/m²

À partir de la figure (III.10), on remarque que la commande P&O donnée un temps de réponse de 0.36 s, et rester au voisinage de point (60w), jusqu'à 1.5 s la puissance diminue par l'augmentation de température et rester au voisinage de point puissance maximal (47.7w) avec temps de réponse 0.01 s.

III.4.1.4.2. Cas de la variation de l'éclairement de 500 W/m² à 1000 W/m²:

Nous allons simuler pour une de température 25°C et une variation d'éclairement de 500 W/m² à 1000 W/m².



Figure(III.11) : variation de l'éclairement de 500 W/m² à 1000 W/m²

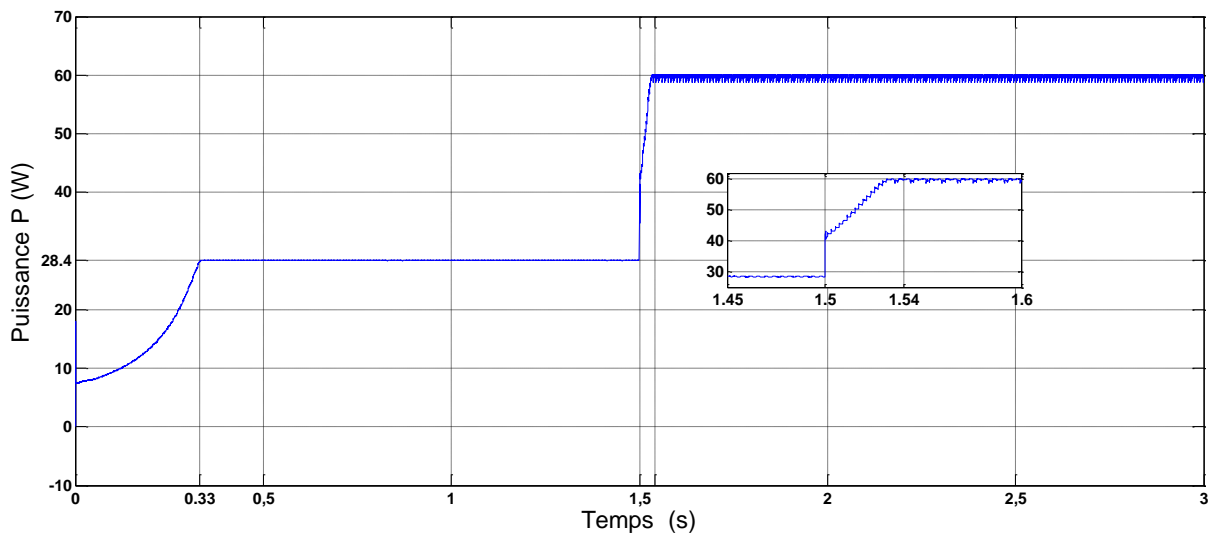


Figure (III.12) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (P&O) pour T = 25°C et E = 500-1000 W/m²

À partir de la figure (III.12), on remarque que la commande P&O donnée un temps de réponse de 0.33 s, et rester au voisinage de point de puissance maximale 28.4w, jusqu'à 1.5 s la puissance augmente par l'augmentation de l'éclairement et rester au voisinage de point de puissance maximal 60w avec temps de réponse 0.04 s.

III.4.2. La Commande incrémentale Conductance (INC) :

III.4.2.1. définition :

Comme l'algorithme P&O, l'algorithme InCond est aussi basé sur l'évolution de la puissance du module par rapport à la tension. Lorsque la dérivée de la puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le MPP, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative [18], il se situe à droite (équation : II.1).

Et puisqu'on a :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial (IV)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{II.2})$$

On peut écrire :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta V} &= -I.V && \text{au MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &> -I.V && \text{à gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &< -I.V && \text{à droit du MPP} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

III.4.2.2. Organigramme de la méthode INC :

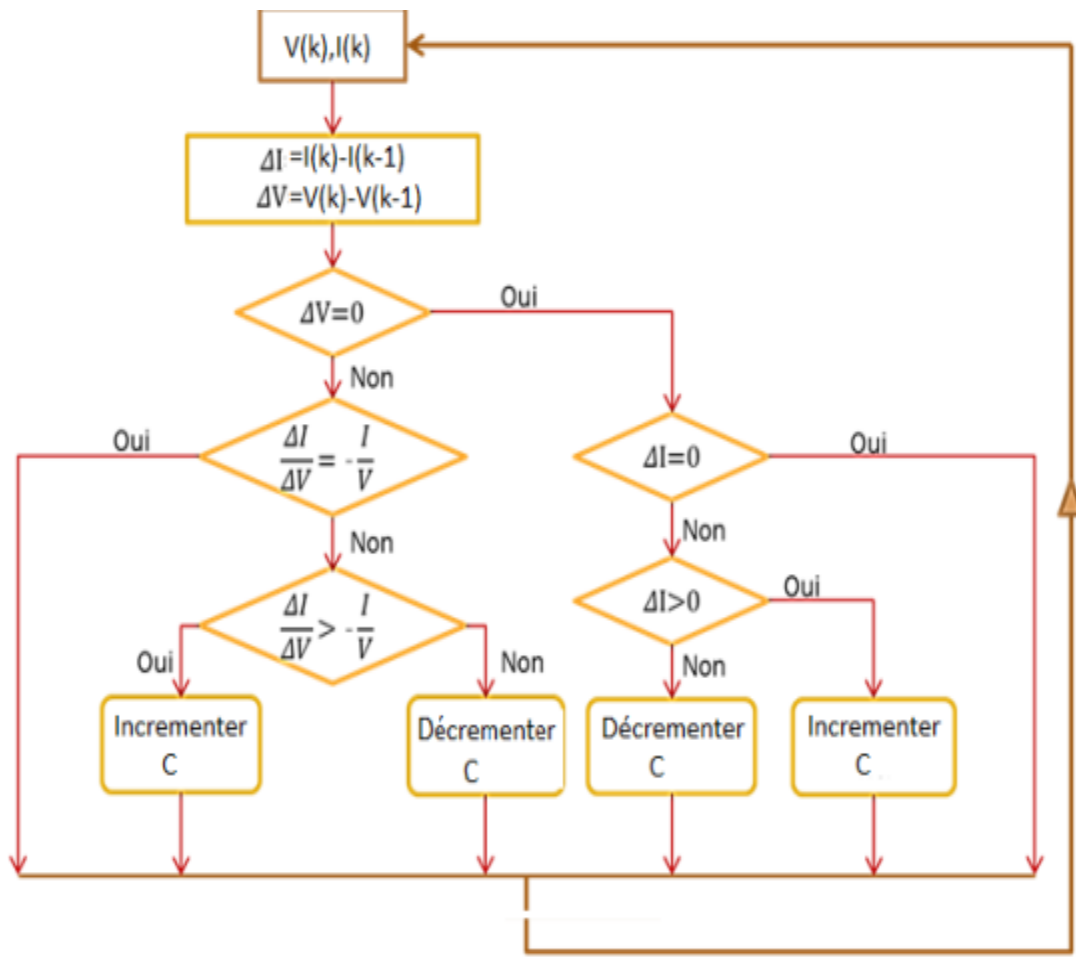
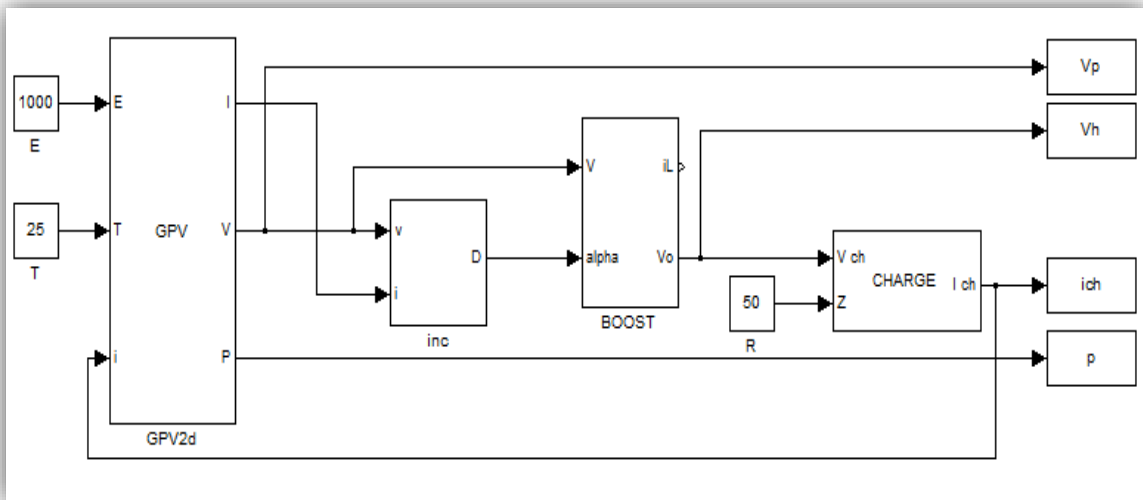


Figure (III. 13) : Organigramme de la méthode INC [19].

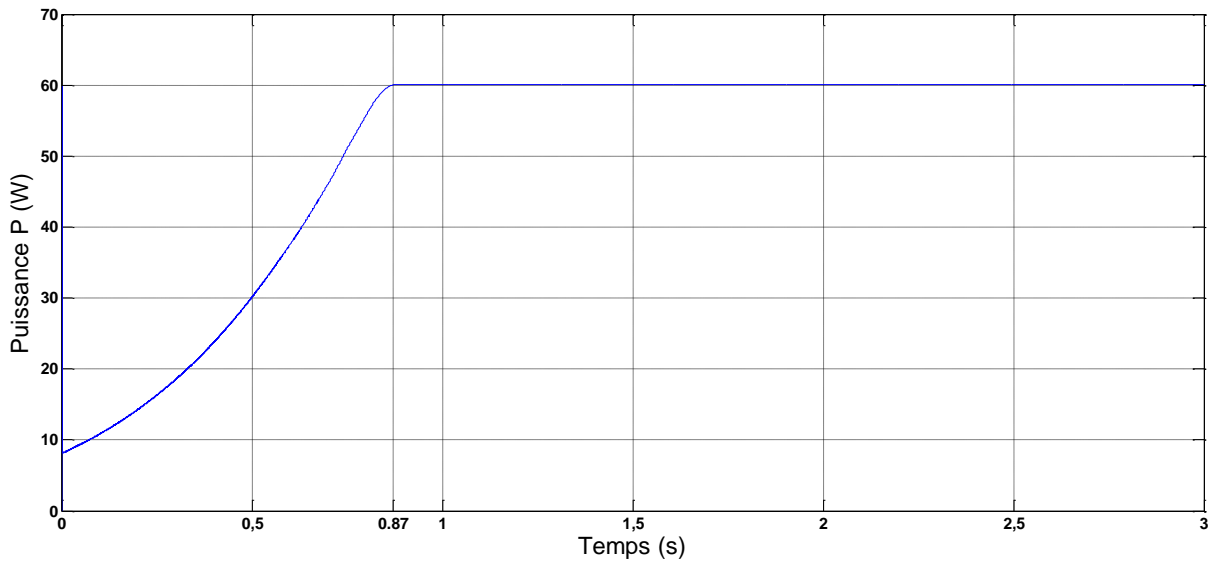
III.4.2.3. Simulation de la commande MPPT (INC) donne panneau PV :



Figure(III.14) : Schéma bloc de la technique InCond.

III.4.2.4. Résultats de simulation de la commande MPPT INC :

Nous allons simuler pour un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .



Figure(III.15) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) pour $T = 25^\circ\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

À partir de résultat obtenu à figure (III.15) en remarque que la puissance du générateur atteint sa valeur maximale après un temps de réponse 0.87s et rester au voisinage de point de puissance maximal 60 W avec une variation $\pm 0.06 \text{ W}$.

III.4.2.4.1. Cas de variation de température 25°C 50°C :

Nous allons simuler pour un éclairement de 1000 W/m² et une variation de température 25°C à 50°C :

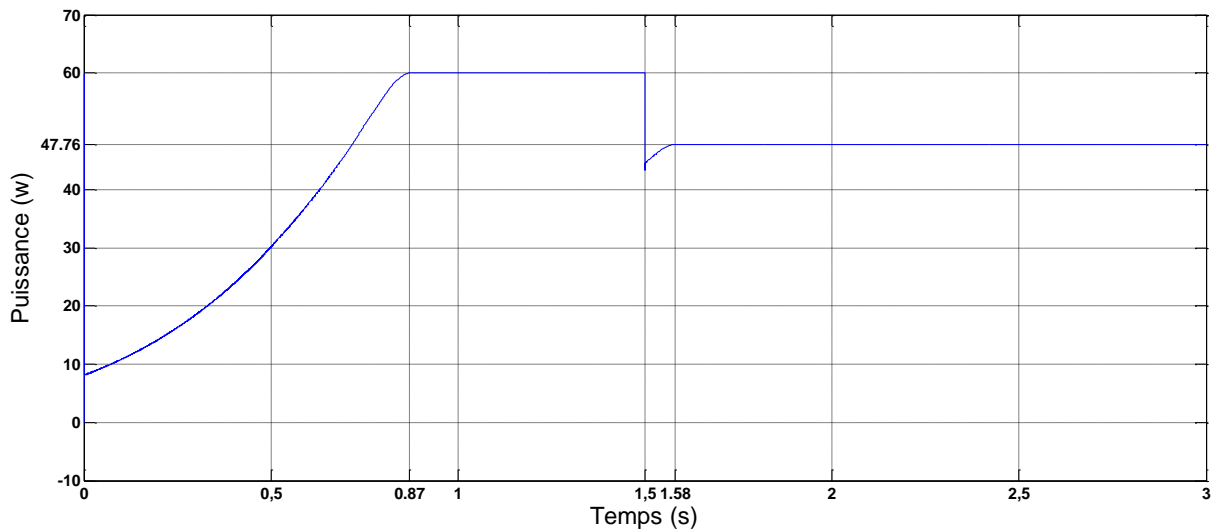
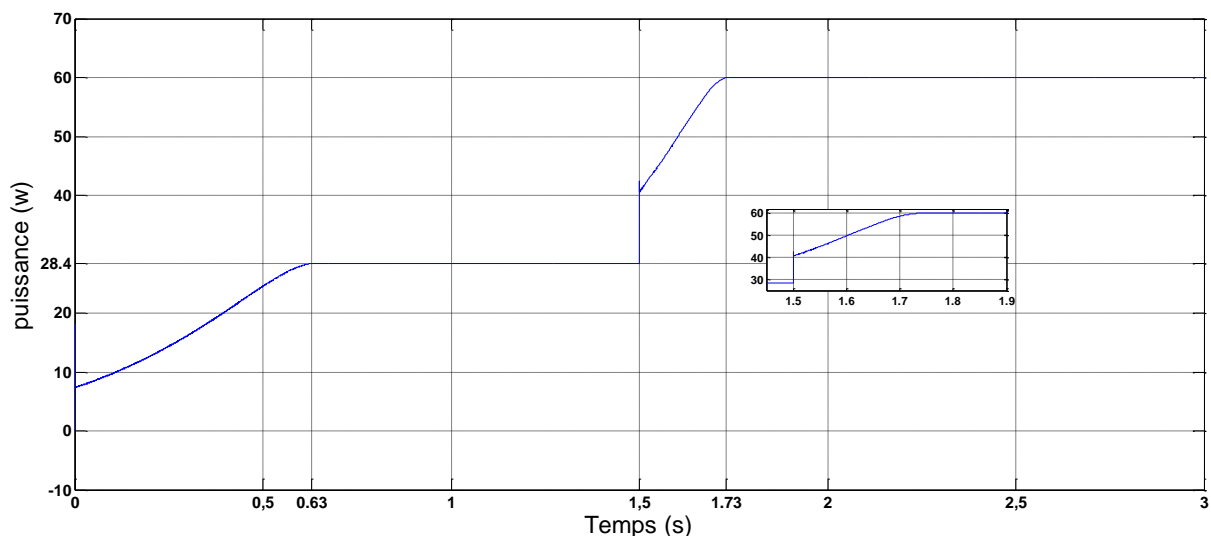


Figure (III.16) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) pour T =25/50°C et E = 1000 W/m²

À partir de figure (III.16), on remarque que la commande INC donnée un temps de réponse de 0.87 s, et rester au voisinage de point puissance maximal (60w) W, jusqu'à 1.58 s la puissance démunie par l'augmentation la température et rester au voisinage de point (47.7W) avec un temps de réponse 0.08 s.

III.4.2.4.2.Cas de la variation de l'éclairement de 500 W/m² a 1000 W/m²:

Nous allons simuler pour un éclairement de 500W/m² et 1000 W/m² et une température de25°C .



Figure(III.17) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) pour T = 25°C et E= 500 -1000 W/m²

À partir de la figure (III.17), on remarque que la commande INC donnée un temps de réponse de 0.63 s, et rester au voisinage de point de puissance (28.4w) avec une variation de ± 0.06 W, jusqu'à 1.5 s la puissance augmente par l'augmentation de l'éclairement, et rester au voisinage de point de puissance maximal (60w) avec une un temps de réponse 0.23 s.

III.5.Comparaison entre les commandes P&O et INC :

Nous allons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque avec les commandes MPPT INC et P&O pour une température constante 25°C et un éclairement de 1000W/m², température constante 25°C éclairement variable de 500 W/m² à 1000 W/m² et éclairement constant 1000W/m² température variable de 25°C à 50°C :

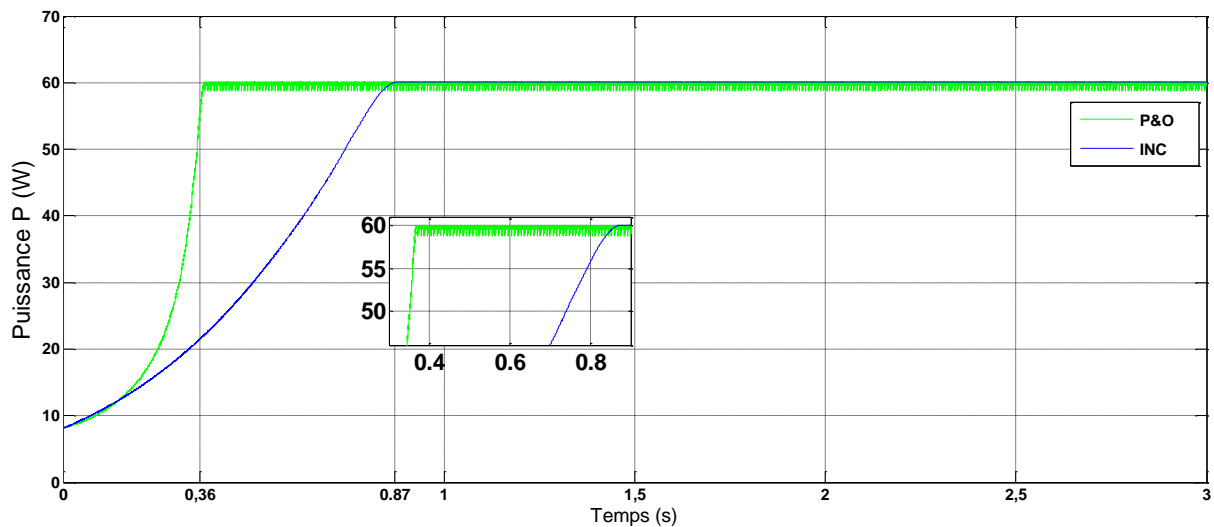


Figure (III.18) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) et (P&O) pour T = 25°C et E= 1000 W/m²

III.5.1.Cas de la variation de température 25°C à 50°C :

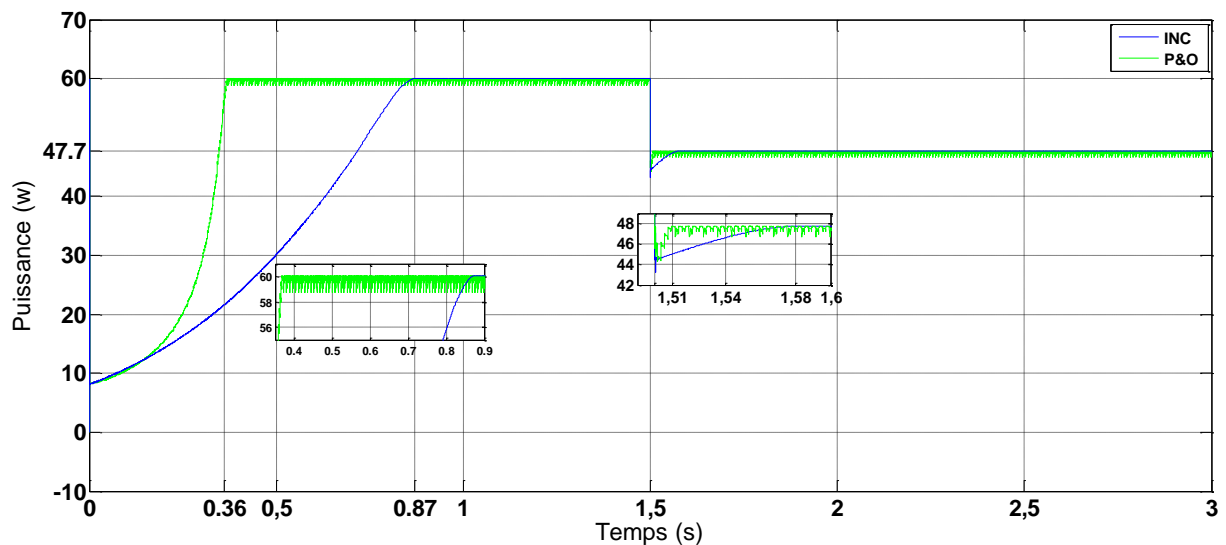


Figure (III.19) : Puissance du panneau avec la commande MPPT (INC) et (P&O) pour T = 25-50°C et E = 1000 W/m²

III.5.2. Cas de la variation de l'éclairement 500W/m^2 à 1000W/m^2

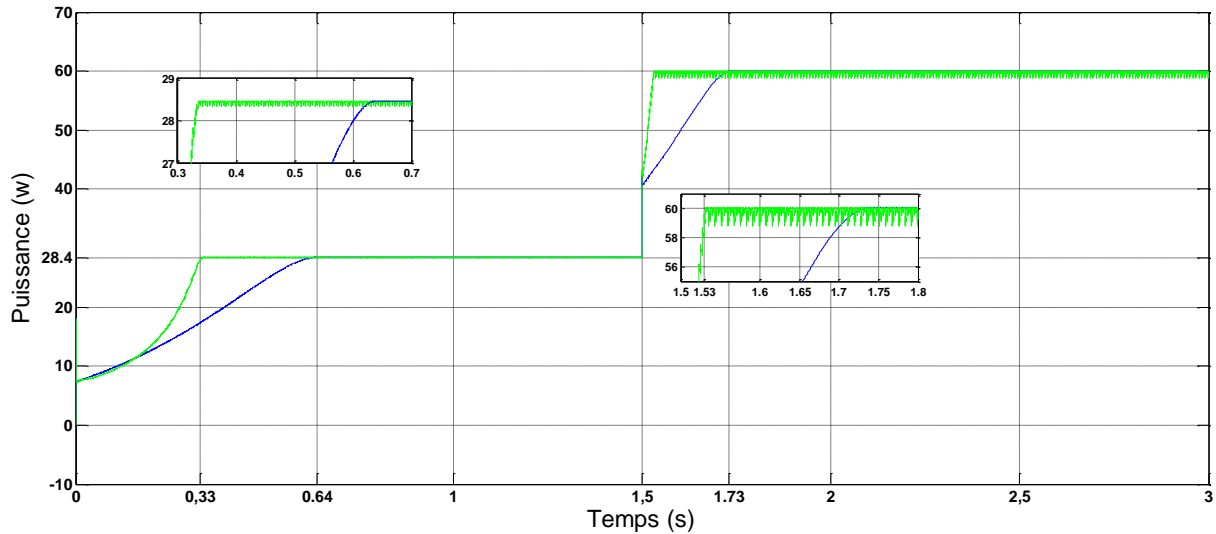


Figure (III.20) : Puissance du panneau avec la commande INC et P&O Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 500 - 1000\text{ W/m}^2$.

À partir des figures (III.18), (III.19), (III.20), on remarque que la commande P&O donnée un temps de réponse meilleur que la commande INC mais une fois la commande atteint le point maximale la commande INC rester plus proche de point de puissance maximale que la commande P&O dans le cas de variation de l'éclairement et de même en cas de la variation de température la commande INC présente une chute plus importante que la commande P&O.

III.6. Conclusion :

Après une présentation théorique des algorithmes de recherche du point de puissance maximale perturbe et observe et Incrémental conductance, on a fait une modélisation et une simulation de ces algorithmes de commandes.

Après la simulation des méthodes P&O et Incrémental conductance, nous avons conclu qu'il est des algorithmes simples peuvent suivre le point de puissance maximale avec une efficacité et avec une préférence de l'algorithme P&O en matière de temps de convergence, mais l'inconvénient major de cette méthode réside dans les fluctuations autour du MPP à l'état permanent et le mouvant recherche de MPP dans les changements rapides des conditions atmosphériques par apport à la commande Incrémentale conductance, qui représente moins de fluctuation autour du point de puissance maximale avec un temps de convergence lent.

CHAPITRE IV

La commande MPPT floue d'un système photovoltaïque

IV.1. Introduction :

A fin d'améliorer les performances des commandes proposées dans le chapitre précédent on a proposé dans ce chapitre une commande intelligente par l'utilisation de la logique floue cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler.

La logique floue est une extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise.

Le réglage classique est basé sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de fonctions de transfert ou d'équations d'état. Cela nécessite souvent des notions assez avancées de mathématique. Par contre, le réglage par logique floue donne une approche plutôt pragmatique, permettant d'inclure aussi les expériences acquises par les opérateurs.

IV.2. Définition de la logique floue :

La logique floue (*fuzzy logic, en anglais*) est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques ; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie. La théorie de la logique floue a été formalisée par *Lotfi Zadeh* en 1965 et utilisée dans des domaines aussi variés. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous. Cette théorie, introduite par *Zadeh*, est une extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise. C'est une théorie formelle et mathématique dans le sens où *Zadeh*, en partant du concept de fonction d'appartenance pour modéliser la définition d'un sous-ensemble d'un univers donné, a élaboré un modèle complet de propriétés et de définitions formelles. Il a aussi montré que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit effectivement à la théorie des sous ensembles classiques dans le cas où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires (0,1). Elle présente aussi l'intérêt d'être plus facile et meilleur marché à implémenter qu'une logique probabiliste [20].

IV.3. Principe de la 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 : Chaude, 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, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance [21].

IV.3.1. Variables linguistiques et ensembles Flous :

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues a savoir ; (grand, petit, positif, négatif, etc. ...). Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que [22] :

$\{x, T(x), U, G, M\}$

Ou :

x : est le nom de la variable,

T(x) : est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x,

U : est l'univers du discours associe avec la valeur de base,

G : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x,

M : est la règle sémantique pour associer un sens a chaque valeur linguistique

IV.3.2. Fonctions d'appartenance :

Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. en général la forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application, et peut être triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche comme le montre la Figure (IV.01) [22].

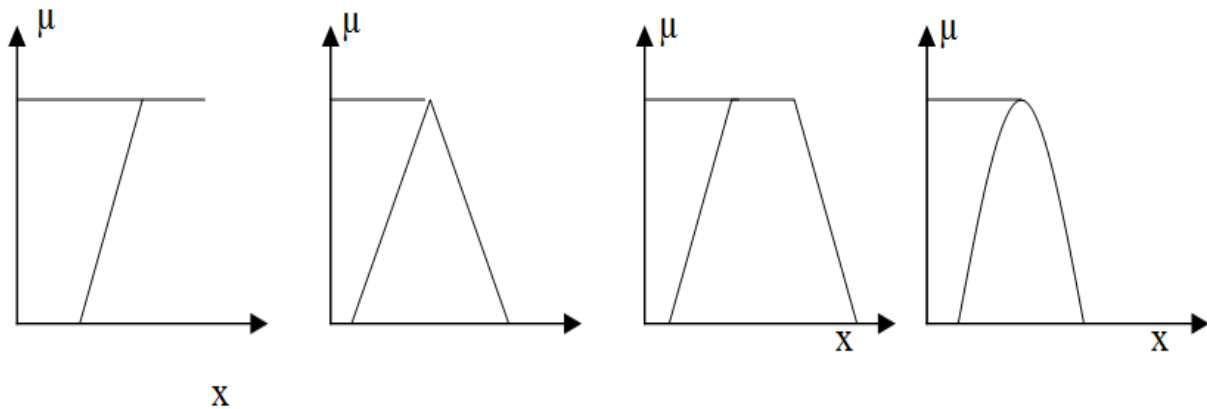


Figure (IV.01) : Différentes formes de fonctions d'appartenance

IV.3.3. Règles linguistiques :

L'idée principale des systèmes bases sur la logique floue, est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme **Si...alors...** Chaque règle a deux parties[22]:

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par **Si...**,
- Partie conséquente (conclusion) exprimée par **alors**.

La partie antécédente est la description de l'état du système.

La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue. Il y a plusieurs formes de **Si...alors ...** la forme générale est :

Si (un ensemble de conditions est satisfait) **alors** (un ensemble de conséquences peut être exécuté).

IV.4. Structure générale d'un système Floue :

Le système à base de la logique floue est composé de quatre blocs principaux Figure (IV.02).

- Fuzzificateur
- Base de connaissances floues
- Engin d'inférence floues
- Défuzzificateur

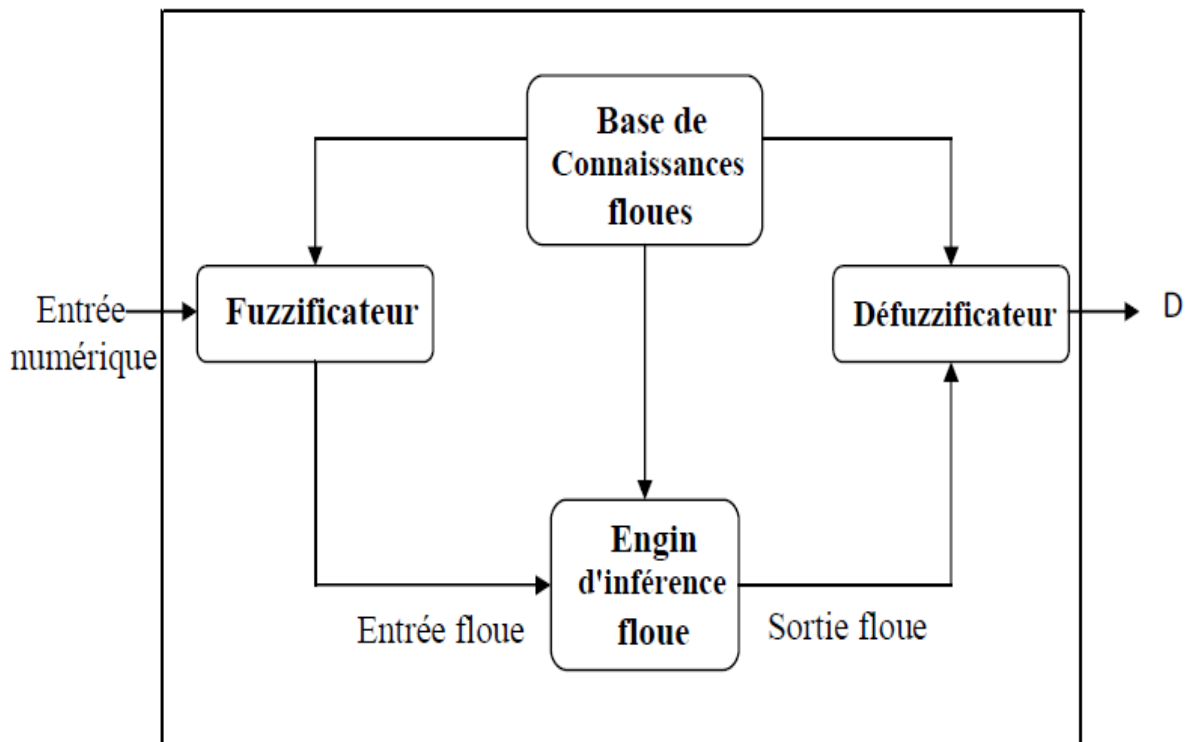


Figure (IV.02) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue [21].

IV.4.1. Fuzzificateur :

La Fuzzificateur est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou, il permet d'assurer le passage des grandeurs physiques d'entrée du contrôleur en variables linguistiques qui peuvent être traitées par les inférences [23].

IV.4.2. Base de connaissances :

La base de connaissances est le cœur du système de contrôlé flou. C'est la base d'inférence pour le contrôlé flou. La base de connaissances définit toutes les règles et tous les paramètres de contrôle de langue pertinents. La dérivation de règles de contrôlé floues peut être effectuée dans quatre modes. Ces quatre modes ne sont pas mutuellement exclusifs, et il est nécessaire de les combiner pour obtenir un système efficace [24].

IV.4.3. Inférence floue :

Il est mentionné que les inférences floues sont basées sur l'implication floue de type **modus ponens** généralise. Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connections **et (AND)** et **ou (OR)**. Supposons que le système flou a deux entrées x, y et une sortie z et que l'on a défini n règles linguistiques comme suit [25] :

Si $x=A_1$ et $y=B_1$ alors $z=C_1$

Si $x=A_2$ et $y=B_2$ alors $z=C_2$

· · ·
· · ·
· · ·
Si $x=A_n$ et $y=B_n$ alors $z=C_n$

Ou x, y et z sont des variables linguistiques qui représentent les variables d'état de processus et variables de contrôlé ; A_i , B_i et C_i ($i=1, n$) sont les sous-ensembles flous définis dans les ensembles de référence pour x, y et z respectivement. En toute généralité, n'importe quelle combinaison des opérateurs **ou**, **et** et **non** peut apparaître dans la condition d'une règle, suivant les conditions imposées par le système à régler. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs. On introduit donc la notion de méthodes d'inférence.

Les méthodes les plus utilisées sont:

- Méthode d'inférence (Max-Min).
- Méthode d'inférence (Max-Produit).
- Méthode d'inférence (Somme-Produit).

IV.4.4. Défuzzification :

Le résultat d'une inférence floue est une fonction d'appartenance. C'est un sous-ensemble flou. Un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). De plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale/analogique. Il y a plusieurs méthodes de défuzzification proposées dans la littérature. Il n'y a pas de stratégie systématique pour choisir parmi l'une de ces méthodes [22].

Il existe plusieurs modèles de régulateur flous comme :

- _ Régulateur flou de type MAMDANI
- _ Régulateur flou de type SUGENO
- _ Modèle flou de LARCEN
- _ Modèle flou de TSUKAMOT

IV.5. Les Avantages et les inconvénients de la logique floue :

IV.5.1. Les avantages principaux des régulateurs flous sont les suivants :

- ❖ L'incorporation directe des informations floues et linguistiques, provenant d'un expert humain, dans le système flou.
- ❖ Il n'y a pas nécessaire de faire un modèle mathématique du système à régler.
- ❖ Le système flou est un approximateur universel, c'est-à-dire, il est suffisamment générales pour générer n'importe quelle action.
- ❖ La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain.
- ❖ On peut maîtriser les systèmes non linéaires et difficiles à modéliser [22]

IV.5.2. Les inconvénients de la logique floue :

- ❖ Manque de directives précises pour la conception d'un régulateur,
- ❖ Précision de réglage en général peu élevée [22].

IV.6. Application du contrôleur floue pour la commande MPPT :

IV.6.1. Principe du régulateur floue :

Le schéma de base d'un régulateur flou représenté sur la figure (IV.03).

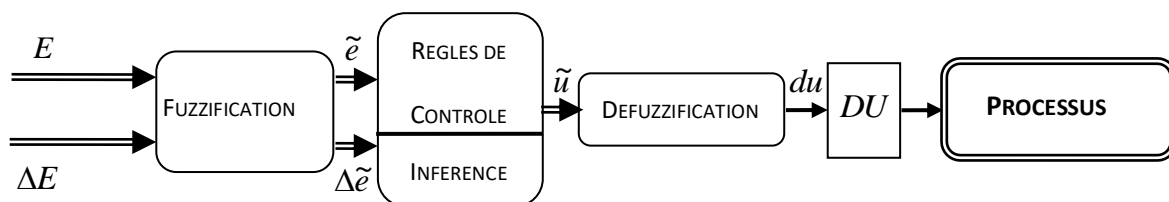


Figure IV.03 : Structure du régulateur flou

Nous définissons l'erreur E par :

$$E(K) = y'(k) - y(k) \tag{IV.1}$$

$$\text{Avec: } E(K) = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \tag{IV.2}$$

$$P(K) = V(K) * I(K) \tag{IV.3}$$

La variation de l'erreur ΔE par :

$$\Delta E(K) = E(k) - E(k-1) \tag{IV:4}$$

Où k : est une valeur entière positive ou nulle.

Après fuzzification, les grandeurs d'entres $E(k)$ et $\Delta E(k)$ sont transformées en valeurs floues \tilde{e} et $\Delta\tilde{e}$. Ces dernières sont utilisées par le bloc des règles de contrôle flou pour obtenir la variable floue de sortie (\tilde{u}) de laquelle on obtient la valeur physique (du) par défuzzification.

La sortie du régulateur est donc donnée par :

$$U'(K) = U'(k+1) * DU(k) * T_{ech} \tag{IV:5}$$

OU : T_{ech} est le temps d'échantillonnage.

Les règles d'inférences permettent de déterminer le comportement du contrôleur flou. Il doit donc inclure des étapes intermédiaires qui lui permettent de passer des grandeurs réelles vers les grandeurs floues et vice versa ; ce sont les étapes de fuzzification et défuzzification, qui ont été déjà discutées [26].

Les entrées sont choisies de telle sorte à représenter le plus fidèlement possible la dynamique du système. A cet effet, on choisit l'erreur de réglage E et sa variation ΔE comme entrée et la commande U^* comme sortie.

Les fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales, Figure IV.04, IV.05 ont été optées pour les variables d'entrées et de sortie et les différents univers de discours utilisés pour l'erreur, sa dérivée $[-100, 100]$ et la commande $[-0.03, 0.03]$.

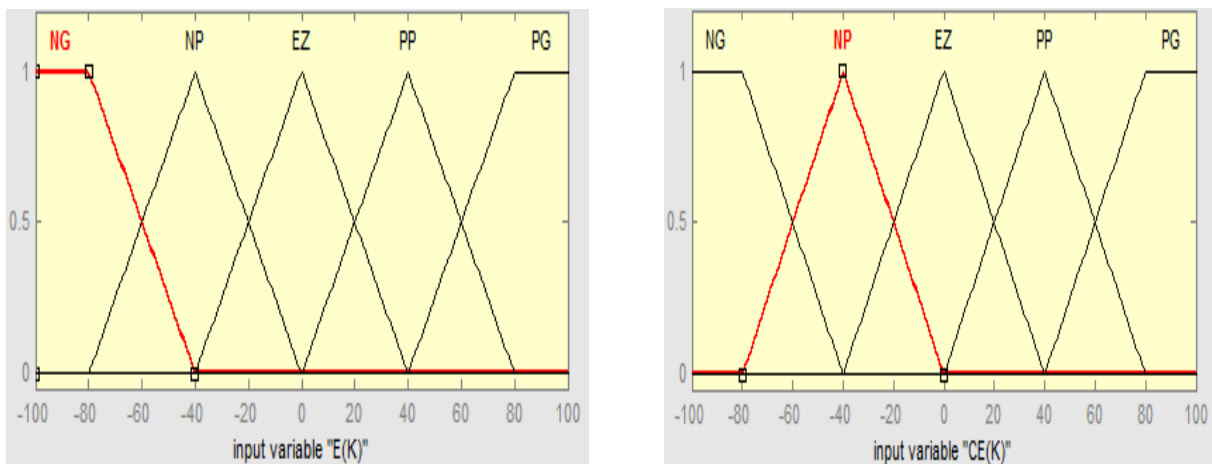


Figure (IV:04): Fonction d'appartenance pour les entrées CE.

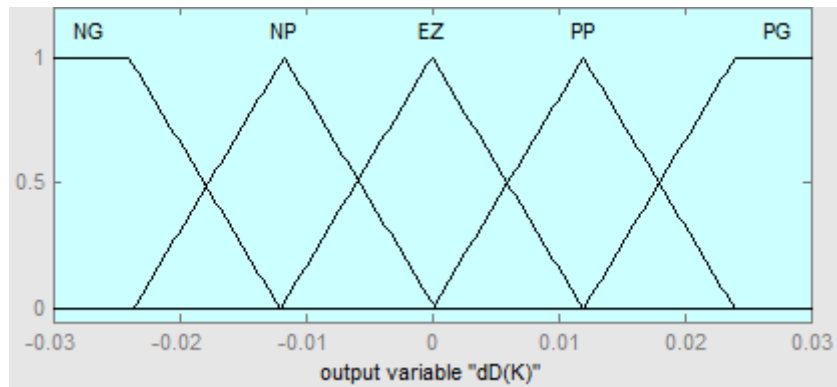


Figure (IV:05): Fonction d'appartenance pour la sortie dD(K).

IV.6.2. Détermination des jeux de règles :

D'une manière générale, l'écriture des règles d'un contrôleur flou fait appel à l'expertise et l'expérience des opérateurs humains. Dans le cadre de la régulation, on utilise fréquemment l'erreur et la variation de l'erreur. A partir de ces deux mesures, traduites sous la forme de variables floues, il est possible de déterminer les règles, dans le domaine temporel.

L'analyse temporelle qui doit conduire au jeu de règles du contrôleur flou, peut par exemple consister à considérer la réponse à un échelon d'un processus à piloter en fonction des objectifs que l'on fixera en boucle fermée, et à écrire les règles pour chaque type de comportement du processus.

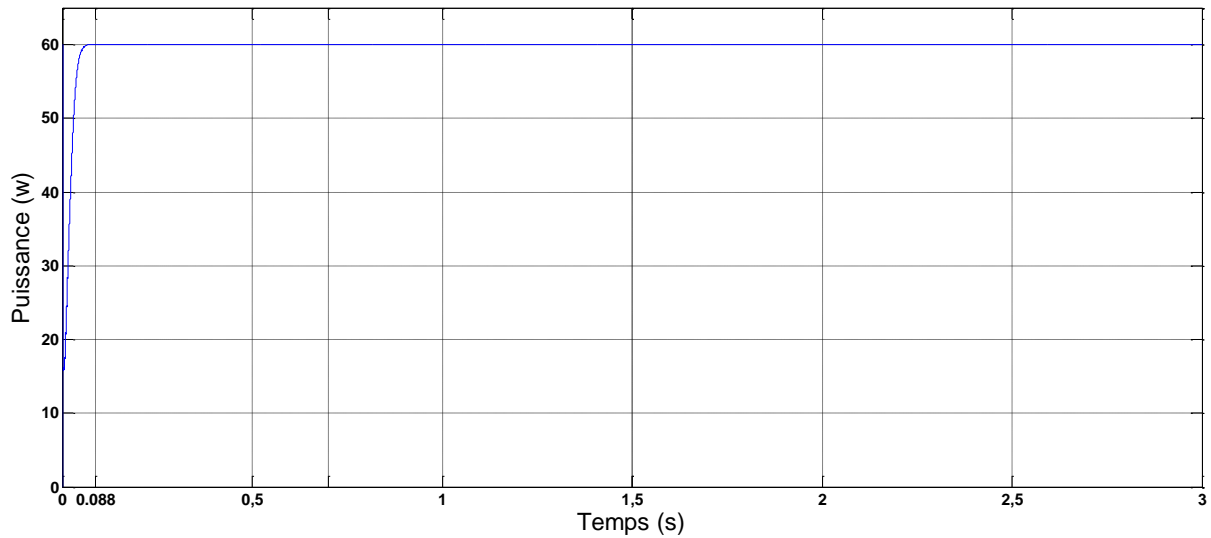
Grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé Tableau (IV.01).

CE \ E	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	EZ	EZ	NG	NG	NG
NP	EZ	EZ	NP	NP	NP
EZ	NP	EZ	EZ	EZ	PP
PP	PP	PP	PP	EZ	EZ
PG	PG	PG	PG	EZ	EZ

Tableau(IV.01): Table de règles à cinq classes.

(NG)	négatif grand
(NP)	négatif petit
(EZ)	environ zéro
(PP)	positif petit
(PG)	positif grand

Tableau (IV.02) : classes de variables d'entrée.



Figure(IV.08) : Puissance du panneau avec la commande MPPT floue pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$.

À partir de résultat obtenue de la figure (IV.08) en remarque que la puissance du générateur atteint sa valeur maximale après un temps de 0.08s et rester plus proche de point de puissance maximal 60 w.

IV.7.1. Comportement du système face à un changement de température :

Nous allons simuler pour un éclairement de 1000 W/m^2 et une variation de température 25°C à 50°C :

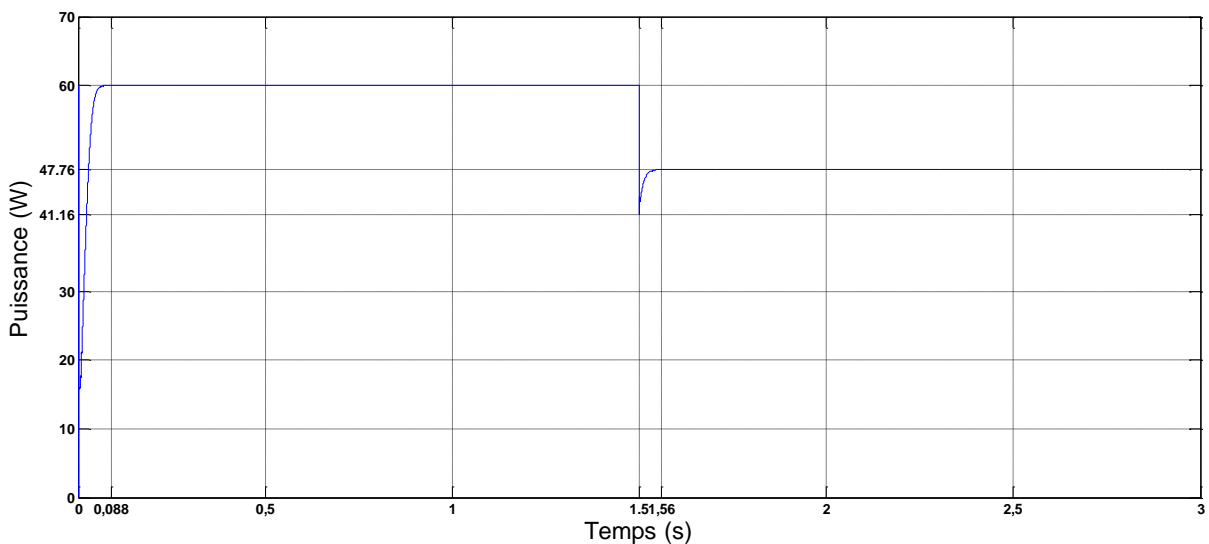
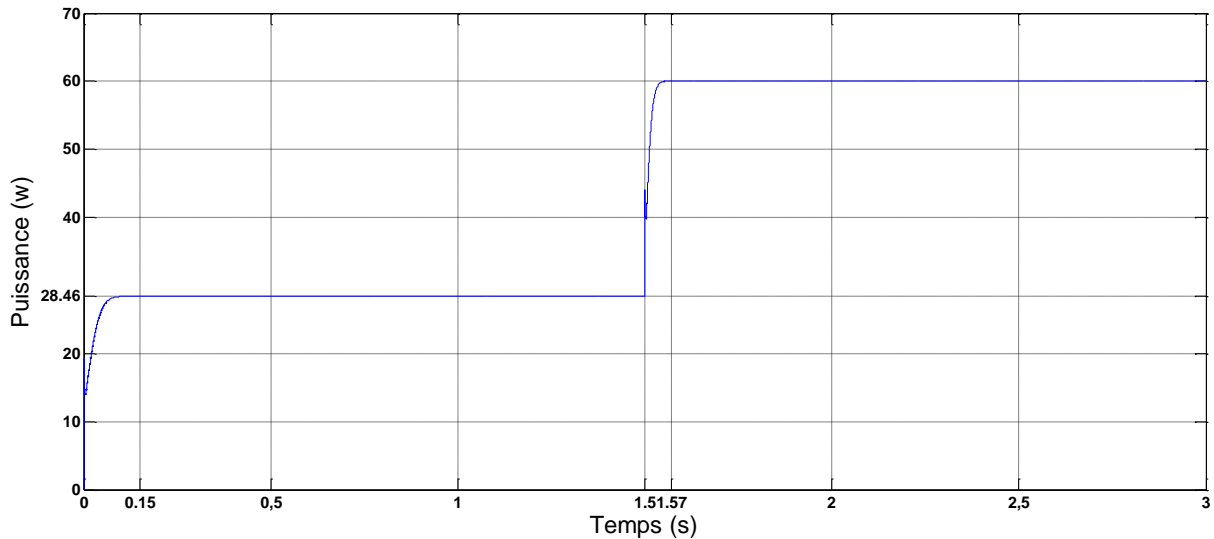


Figure (IV.09) : Puissance du panneau avec la commande MPPT floue pour $T = 25/50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

À partir de la figure (IV.09), on remarque que la commande floue donnée un temps de réponse de 0.08 s ,et rester au voisinage de point de puissance maximal 60w, jusqu'à 1.5 s la puissance démunie par l'augmentation de température et rester de point de puissance maximal 47.7 w avec un temps de réponse 0.06 s.

IV.7.2. Comportement du système face à un changement de l'éclairement :

Nous allons simuler pour un éclairement de 500W/m^2 et 1000W/m^2 et une température de 25°C .



Figure(IV.10) : Puissance du panneau avec la commande MPPT floue pour $T = 25^\circ\text{C}$ et $E = 500 - 1000\text{W/m}^2$.

À partir de la figure (IV.10), on remarque que la commande floue donnée un temps de réponse de 0.15 s, et rester au point de point de puissance maximal 28.4w, jusqu'à 1.5 s la puissance augmente par la augmentation de l'éclairement attient de point de puissance maximal 60 w avec un réponse 0.07 s.

IV.8. Comparaison entre les commandes P&O, INC et floue :

Nous allons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque avec les commandes MPPT INC,P&O et floue pour une température constante 25°C et un éclairement de 1000W/m^2 , température constante 25°C éclairement variable de 500W/m^2 à 1000W/m^2 et éclairement constant 1000W/m^2 température variable de 25°C à 50°C :

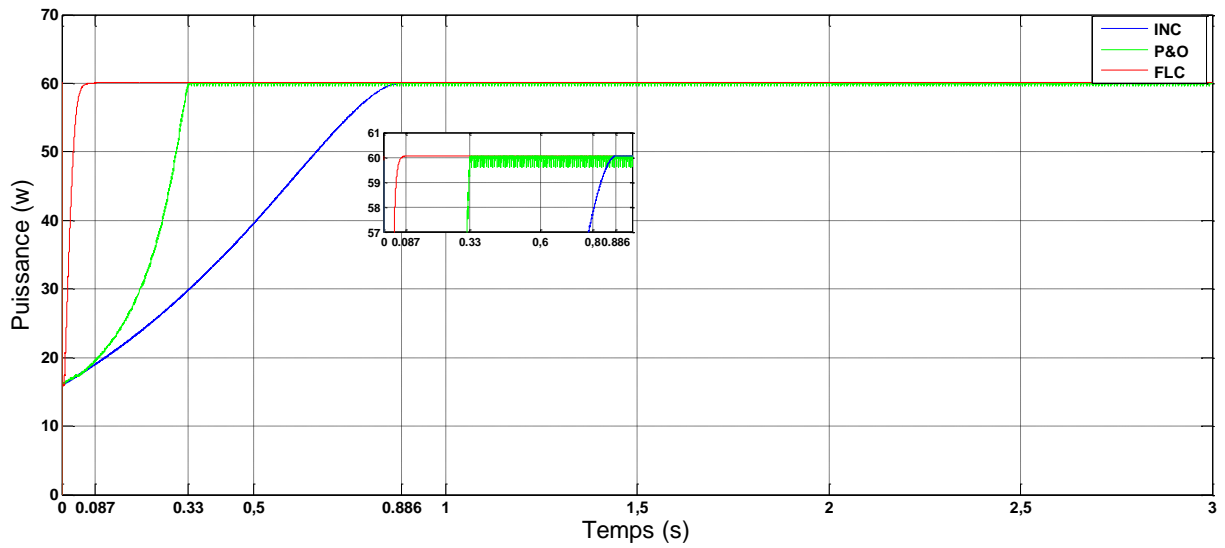


Figure (IV.11) : Puissance du panneau avec la commande MPPT INC, P&O et floue pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

IV.8.1. Cas de variation de température :

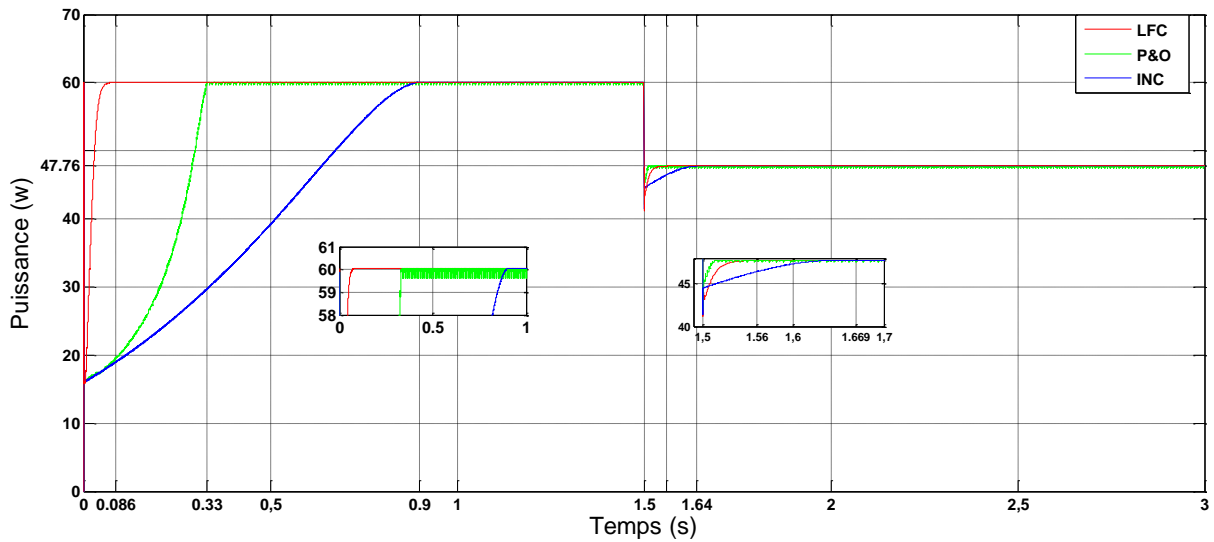


Figure (IV.12) : Puissance de panneau avec les commandes MPPT INC, P&O et floue pour $T = 25\text{-}50^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$

IV.8.2. Cas de la variation de l'éclairement:

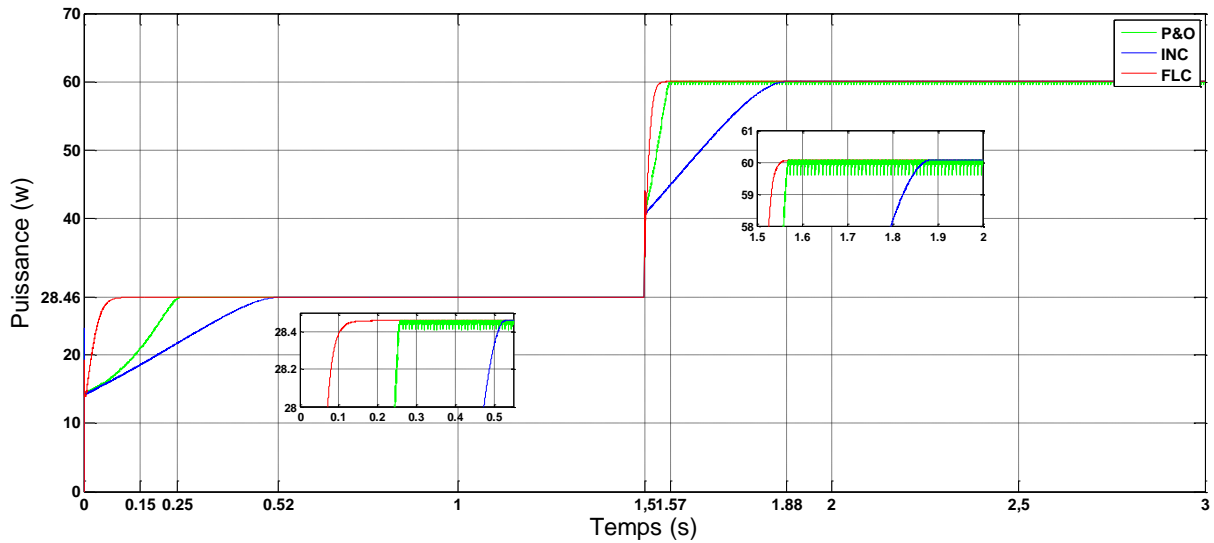


Figure (IV.13) : Puissance du panneau avec la commande INC, P&O et floue Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 500 - 1000 \text{ W/m}^2$.

À partir des figures (IV.11), (IV.12) et (IV.13) on remarque que la commande floue donnée un temps de réponse meilleur que la commande INC et P&O mais une fois la commande atteint le point maximale la commande floue rester plus proche de point de puissance maximale que la commande P&O et INC ,dans le cas de variation de l'éclairement la commande floue atteint point de puissance maximal après un temps plus court , même en cas de la variation de température la commande INC et floue présente une chute plus importante que la commande P&O.

IV.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la structure générale du contrôleur MPPT flou et sa méthode de conception, à partir des résultats de simulation et la comparaison effectuée avec les commandes classiques la commande MPPT floue donnée des meilleures performances, en temps de réponse rapide, et une robustesse aux variations brusque des conditions atmosphériques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Dans le cadre de cette mémoire, nous avons fait une étude de la chaîne de conversion photovoltaïque qui pose un problème de transfert d'énergie qui n'est pas toujours maximal, le travail que nous avons présenté porte sur la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV dans des conditions atmosphériques variées aléatoirement avec le temps.

Pour ce faire, nous avons commencé par des généralités sur l'énergie solaire nous avons ensuite expliqué le principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque.

Dans un deuxième temps, nous avons attaqué la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente l'étape d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Quant à la partie de commande MPPT, on a réalisé des commandes classiques pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions atmosphériques. On a présenté la commande d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation.

Après la simulation de ces deux commandes MPPT (P&O) et (INC), on a conclu que la commande Perturbe et Observe (P&O) converge plus rapidement mais elle présente des oscillations par rapport à la commande Inclément Conductance (INC).

Afin d'améliorer les performances du système photovoltaïque nous avons présenté la commande MPPT floue qui donne de bons résultats en terme de temps de réponse et poursuite de point de puissance maximale.

La commande MPPT soit classique (P&O et INC) ou Floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le système à fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue conduit à de meilleures performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Finalement, Nous pouvons aussi conclure que :

- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairement.
- Le convertisseur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV.

- La commande MPPT adapte le point de fonctionnement du panneau PV à la charge.

Comme perspective nous proposons la réalisation expérimentale des commandes proposées dans le cadre de cette mémoire.

Bibliographie :

- [1] R.merahi, «Modélisation d'un diapositif mppt pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques», mémoire, Annaba 2010.
- [2] Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables2016, policy network for the 21st century(www.ren21.net/gsr).
- [3] Sarah A. Benali Cherif , «Le Forum d'affaires Algérie – UEsur les énergies renouvelables en juin à Alger, Journal Elmoudjahid», juin 2017
- [4] Sarah A. Benali Cherif, «Énergies renouvelables, Projet Atlas 1 : l'appel d'offres national et international lancé», Journal Elmoudjahid, juin 2017.
- [5] Creg : «programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité» 2008 – 2017.
- [6] B. Nourddine M.Seif eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT» mémoire de master Annaba 2018.
- [7] Y.azzoug«Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque» mémoire, QUEBEC, février 2008.
- [8] Angel CID PASTOR,«conception et réalisation de module photovoltaïques électriques»,2006, Mémoire Magister, Institut National des sciences Appliquées de Toulouse.
- [9] M. Belhadj, «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome» Mémoire de Magister, Université de Béchar, 2008.
- [10] L.Alain Bilbao,«Réalisation de commande MPPT Numérique», rapport de stage, Toulouse (France) ,septembre 2006.
- [11] Boualem,Dendib, «Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative», Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.
- [12] Dossier technique, « Eolienne et photovoltaïque »
- [13] Mlle Ayache Khedidja, « Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique », mémoire de magister Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, Algérie, 2014.
- [14] D.Boukhers «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application ou au pompage» .(2007 , Mémoire de Master université Mentouri de Constantine)
- [15] R. Merahi, R.Chenni, «amélioration de la commande p&o par une détection synchrone du courant de batterie». université des frères mentouri route de Ain el bey de Constantine, 2011

-
- [16] N. Aouchiche, «M.S. Aït Cheikh, A. Malek, poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation». division énergie solaire photovoltaïque centre de développement des énergies renouvelables, Alger, 2013
- [17] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de command en MPPT pour un système photovoltaïque ». Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Sousse, Tunisie, 2013
- [18] Mlle. El Himer Sarah, «Etude comparative des technique de commande MPPT d'un générateur photovoltaïque». Mémoire de Master université Sidi Mohammed Ben Abdellah 22 juin 2013
- [19] Tarak Salmi, Mounir Bouzguenda, Adel Gastli, Ahmed Masmoudi, MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell ,Vol.2, No.2, pp. 35-40.2012.
- [20] L.Ahlam A.Zouletkha, « Application de lagipue floue pour la poursuite du point de puissance maximale d' un générateur photovoltaïque ». Mémoire de Master ,Université Saida20/06/2017.
- [21] Z.Ayache, A.Bendaoud, H.Slimani, B. Benazza,H. Miloudi, A. Bentaallah «Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue». Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès. Article.
- [22] Mohamed Redha Rezoug, Rachid Chenni and Djamel Taibi , « Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Steps of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronouns Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Arry » Renew. Energies, 2018, 11, 02–15
- [23] M.Boukli Hacene Omar, «Conception er Réalisation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique». Mémoire Magister, 2011 Université Abou Bakr Belekaid.
- [24] Fathi A O Aashoor, « Maximum power point tracking techniques for photovoltaic water pumping system ». Doctor thesis of Philosophy, University of Bath, May 2015.
- [25] Havared breysnes Vika, « modelling of photovoltaïque modulees with battry energy storage in simulink/matlab ».June2014.
- [26] Yahia. Miloud, «Etude de l'estimation de la résistance rotorique dans la commande vectorielle d'un moteur asynchrone en utilisant la logique floue». Thèse de Doctorat, U.S.T.Oran, Algérie, Février 2006.

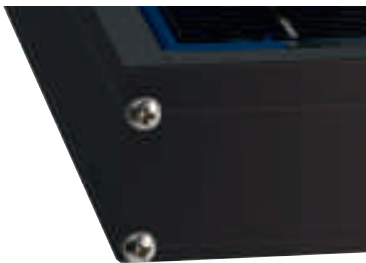
ANNEXE

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. The MSX 60 provides 60 watts of nominal maximum power, and is well-suited to traditional applications of photovoltaics such as telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 36 multicrystalline silicon solar cells configured as two 18-cell series strings;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Bronze Anodized Universal Frame

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction box is raintight (IP54 rated) and accepts PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Its volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal connection block enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the junction box.

Options include:

- blocking and bypass diodes;
- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration by moving leads in the junction box. Six-volt modules are intended to support 6V loads, and are not recommended as series elements in higher voltage arrays.

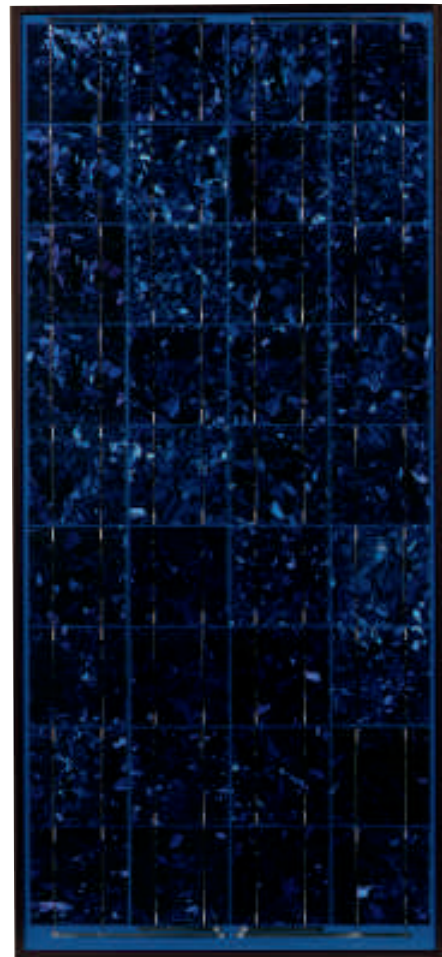
Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Certified by PowerMark Corporation;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TÜV Rheinland as Class II equipment;
- Approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations;
- Compliant with the requirements of IEC 61215 including:
 - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
 - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
 - a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
 - a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
 - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.



BP MSX 60

Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point (P_{max})—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.



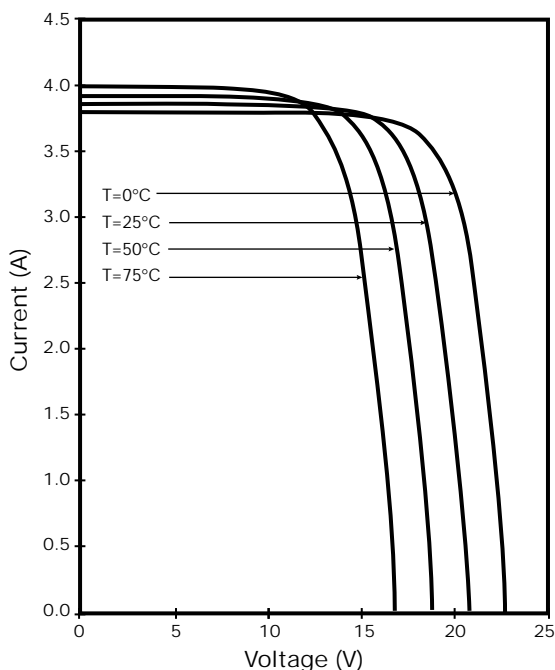
Electrical Characteristics¹

	BP MSX 60	BP MSX 64 ⁴
Maximum power (P_{\max}) ²	60W	64W
Voltage at P_{\max} (V_{mp})	17.1V	17.5V
Current at P_{\max} (I_{mp})	3.5A	3.66A
Minimum P_{\max}	58W	62W
Short-circuit current (I_{SC})	3.8A	4.0A
Open-circuit voltage (V_{OC})	21.1V	21.3V
Temperature coefficient of I_{SC}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{OC}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

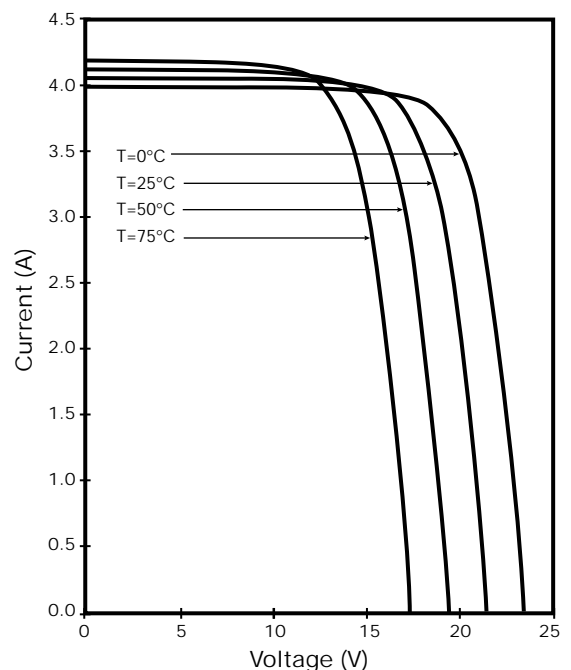
Notes

- These data represent the performance of typical MSX 60 and MSX 64 modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
 - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
 - cell temperature of 25°C.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{\max} .
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.
- The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 64 is assembled in limited quantities using cells of slightly higher power than the MSX 60.

MSX 60 I-V Curves



MSX 64 I-V Curves



Mechanical Characteristics

Weight
MSX 60

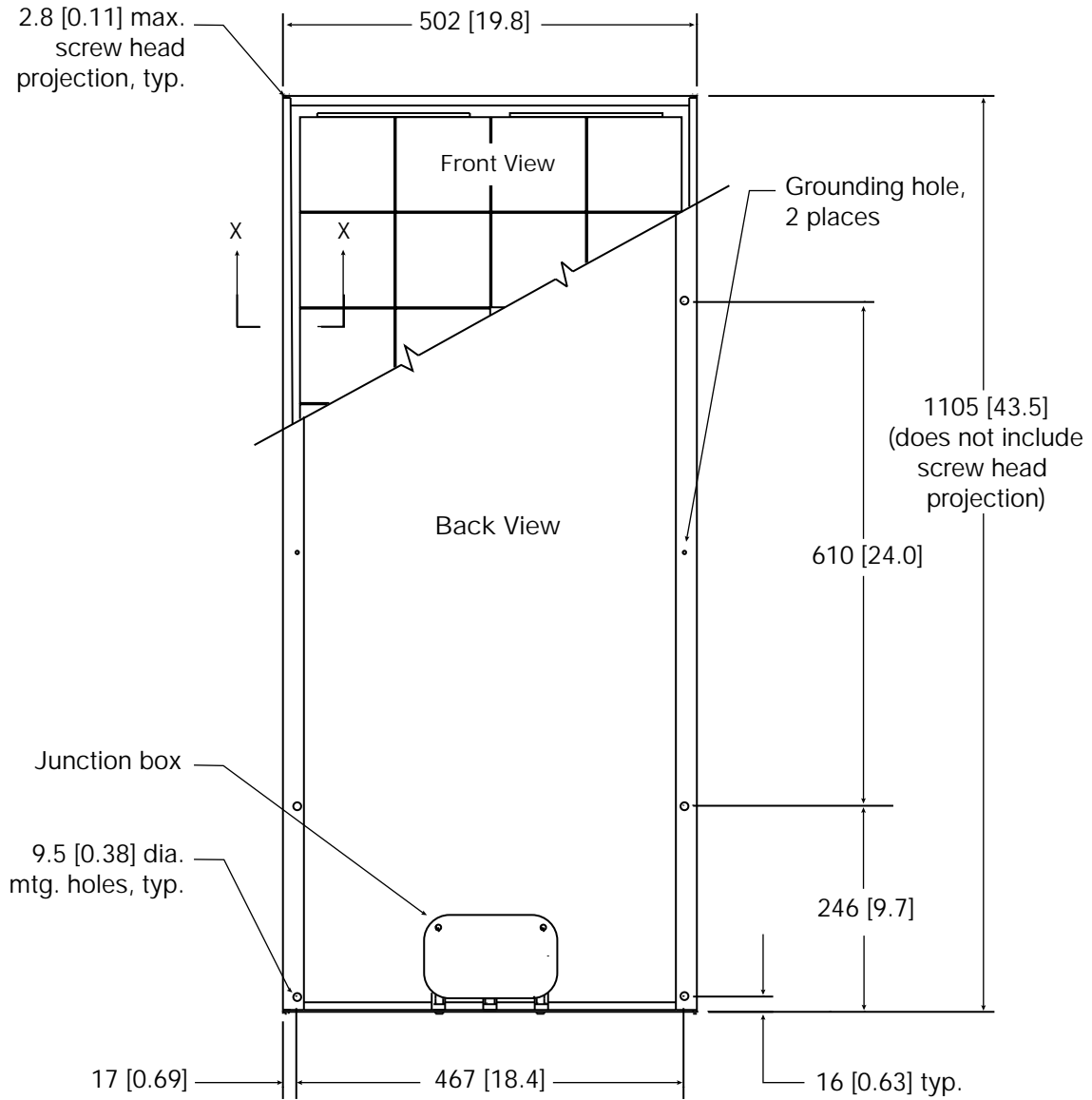
7.2 kg (15.9 pounds)

Dimensions

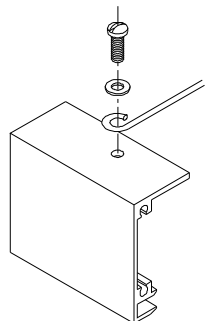
Unbracketed dimensions are in millimeters.

Dimensions in brackets are in inches.

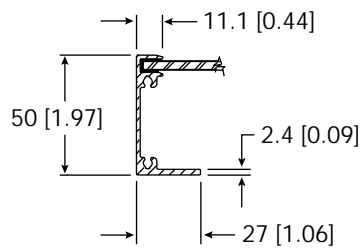
Overall tolerances $\pm 3\text{mm}$ ($1/8"$)



MSX 60



Grounding Detail



Section X-X