



République Algérienne Démocratique Et Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen



Faculté de technologie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER

Spécialité : Réseaux Electriques et Réseaux Electriques Intelligents

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par :

DJELLAL LEILA IMEMNE & DIB YASMINA

Sous l'intitulé de :

**Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées
à un Système Photovoltaïque**

Soutenu publiquement le 22 Juin 2017 devant le jury composé de :

Mr MERZOUK SID AHMED	Pr	U.A.B – Tlemcen	Président
Mr BOUMEDIENE Abdelmadjid	Pr	U.A.B – Tlemcen	Encadreur
Mr CHABANE SIDI MOHAMED	M.A.A	U.A.B – Tlemcen	Examineur
Mr YACOUBI BOUMEDIENE	M.A.A	U.A.B – Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : 2016 – 2017

REMERCIEMENT

Le plus grande merci revient Allah qui nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous aidé à réaliser ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier en particulier notre encadreur Monsieur **A.BOUMEDIENE**, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.*

*Nous remercions monsieur le président de jury **Mr S.A.MERZOUK**, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail **Mr S.A.CHABANE** et **Mr B.YACOUBI**.*

Enfin nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail

Dédicaces

A MA GRAND MERE

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur dans la vie

A ma mère

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre

À cette source de tendresse, de patience et de générosité

A mes oncles ABDELKARIM et MOHAMED

Je ne vous remercierai jamais assez pour vos amabilités, vos générosités, vos aides précieuses.

A mes tante NORA et SOUAD.

Vous m'avez toujours soutenu et vous continuez à le faire. Je vous considère beaucoup plus comme mes grandes sœurs que comme des tantes et je ne trouverai jamais les mots pour vous exprimer mon estime. Je vous souhaite tous bonheur, santé et Prospérité.

A mes cousins et ma meilleure amie DJAHIDA

A tous mes amis (es) avec qui j'ai partagé de très bons moments tout le long de ces années.

Leila

Dédicaces

*A ma grand-mère que dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur dans la
vie et*

A mes très chers parents aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur

Juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte.

À mon mari qui a toujours était à mes cotés

A mon frère ILYES et mes sœurs IKRAM et NARIMENE

A mes neveux et mes nièces

A toute la famille DIB et la famille BELKACEMI

A tous mes chères amies Bouchra, Amel et Fatima

A ma très chère binôme Leila.

Yasmina

Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses, les systèmes photovoltaïques commencent à trouver des grandes applications.

Dans ce travail, on a choisi deux modèles du générateur photovoltaïque, le premier consiste au modèle à trois paramètres qui correspond à une seule diode et le deuxième modèle est un modèle à cinq paramètres correspondant à une diode, résistance série et résistance shunt. Ces modèles sont utilisés pour étudier la variation de la puissance maximale et la caractéristique courant-tension avec la température et l'éclairement. Une comparaison entre les deux modèles est faite. Puis on a fait la modélisation et la simulation du fonctionnement du système photovoltaïque (PV) adapté par deux commandes numériques MPPT « perturbation et observation » et « incrémental de la conductance » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Mots clés : GPV, photovoltaïque, hacheur BOOST, MPPT, MPP, Perturber et Observer, Incrément de la Conductance.

Table de matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des symboles	xi
Introduction générale	xiv

Chapitre I: Généralité de système photovoltaïque

I.1. Introduction	18
I.2. Bref historique.....	18
I.3. Système photovoltaïque	20
I.3.1. L'effet photovoltaïque	20
I.3.2. Description de la cellule	21
I.3.3. Type de cellules	21
I.3.4. Jonction PN.....	23
I.3.5. Les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque	24
I.3.6. Association des cellules photovoltaïques	30
I.3.7. Panneaux photovoltaïque	32
I.3.8. Générateur photovoltaïque.....	32
I.3.9. Les caractéristiques d'un module PV	33
I.4. Les différents types de système photovoltaïques	34
I.5. Critère atmosphérique	35
I.6. Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV	37
I.6.1. Les avantages	37
I.6.2. Les inconvénients	37
I.7. Conclusion.....	38

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1. Introduction	40
II.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	40
II.3. Description de notre système PV	41
II.4. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque.....	41
II.4.1. Générateur à cinq paramètres (5p)	41

II.4.2. Simulation du générateur à cinq paramètres (5p)	43
II.4.3. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=g(V)$	45
II.4.4. Générateur à trois paramètres (3p)	48
II.4.5. Simulation de générateur à trois paramètres (3p)	49
II.4.6. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=g(V)$	51
II.5. Convertisseurs DC-DC.....	53
II.5.1. Type hacheurs.....	53
II.5.1.1. Hacheur survolteur (Boost).....	53
II.5.1.2. Hacheur dévolteur (Buck).....	54
II.5.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost)	54
II.5.1.4. Modèle de l'hacheur survolteur :	55
II.5.1.5. Dimensionnement du filtre LC.....	56
II.5.1.6. Simulation hacheur survolteur	59
II.5.1.7. Simulation du générateur PV alimentant une charge résistive	60
II.6. Conclusion.....	72

Chapitre III : Commandes MPPT

III.1. Introduction.....	74
III.2. Commandes MPPT	74
III.3. Principe de la Recherche du MPP.....	75
III.4. Techniques de commande MPPT	77
III.4.1. Méthodes indirectes	77
III.4.2. Méthodes directes	77
III.5. Méthode de perturbation et observation (P&O)	78
III.5.1. Organigramme Perturber et Observer (P&O)	80
III.5.2. Avantages et inconvénients de P&O.....	81
III.6. Méthode conductance incrémental	81
III.6.1. Organigramme Incrément de la Conductance (INC)	83
III.6.2. Les avantages et les inconvénients.....	84
III.7. Conclusion.....	84

Chapitre IV : Application des deux commandes MPPT

IV.1. Introduction.....	86
IV.2. Simulation du système PV menu de la commande MPPT	86
IV.3. Les résultats de simulation avec la technique perturbe et observe	86
IV.3.1.Influence de l'éclairement et la température.....	88
IV.3.1.1. Cas de la variation d'éclairement.....	88
IV.3.1.2. Cas de la variation de la température.....	89
IV.4. Les résultats de simulation avec la technique perturbe et observe	91
IV.4.1.Influence de l'éclairement et la température.....	92
IV.4.1.1. Cas de la variation de l'éclairement	92
IV.4.1.2. Cas de variation de température	94
IV.5. Simulation du système PV	96
IV.6. Les résultats de simulation avec la commande de conductance incrémental	96
IV.6.1.Influence de l'éclairement et la température.....	98
IV.6.1.1. Cas de variation de température	98
IV.6.1.2. Cas de variation de l'éclairement :	99
IV.7. Les résultats de simulation avec la commande incrémental conductance	100
IV.7.1.Influence de l'éclairement et la température.....	102
IV.7.1.1. Cas de variation de la température	102
IV.7.1.2. Cas de variation de l'éclairement	103
IV.8. Conclusion	105
Conclusion générale	107
Bibliographie	109
Annexes	112

Liste des figures et des tableaux

- Figure (I.1):** Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque 2005-2015.
- Figure (I.2):** Capacité du parc photovoltaïque
- Figure (I.3):** Cellule au Silicium Monocristallin
- Figure (I.4):** Cellule au Silicium Poly-cristallin
- Figure (I.5):** Cellule au Silicium amorphe (couche mince)
- Figure (I.6):** Cellule au Silicium nanocristallin
- Figure (I.7):** La coupe transversale d'une cellule PV typique
- Figure (I.8):** Modèle à sept paramètres
- Figure (I.9):** Modèle à six paramètres
- Figure (I.10):** Modèle à cinq paramètres R_s et R_{sh} négligée
- Figure (I.11):** Modèle à cinq paramètres diode éliminée
- Figure (I.12):** Modèle à quatre paramètres
- Figure (I.13):** Modèle à trois paramètres
- Figure (I.14):** Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.
- Figure (I.15):** Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques
- Figure (I.16):** Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_p+n_s) cellules identiques.
- Figure (I.17):** panneau photovoltaïque
- Figure (I.18):** Rangée d'un champ photovoltaïque
- Figure (I.19):** Un champ photovoltaïque
- Figure (I.20):** Evolution de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de l'irradiation
- Figure (I.21):** Evolution de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes température
- Figure (II.1):** Schéma de principe du convertisseur.
- Figure (II.2):** Schéma électrique du Modèle à cinq paramètres
- Figure (II.3):** Schéma de simulation du panneau photovoltaïque BP solar 2150S
- Figure (II.4):** la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000W /m^2$ et de température $T_c = 25^\circ C$
- Figure (II.5):** la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000W /m^2$ et de température $T_c = 25^\circ C$
- Figure (II.6):** Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes éclairement et une température $T_c = 25^\circ c$
- Figure (II.7):** Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes éclairement et une température $T_c = 25^\circ c$
- Figure (II.8):** Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes température et un éclairement de $G=1000W/m^2$
- Figure (II.9):** Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes température et un éclairement de $G=1000W/m^2$
- Figure (II.10):** schéma électrique du Modèle à trois paramètres

Figure (II.11): la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$

Figure (II.12): la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$

Figure (II.13): Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différents éclairagements et une température de $T_c=25^\circ\text{C}$

Figure (II.14): Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différents éclairagements et une température de $T_c=25^\circ\text{C}$

Figure (II.15): Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes température et un éclairagement de $G=1000$

Figure (II.16): Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes température et un éclairagement de $G=1000$

Figure (II.17): Schéma électrique du convertisseur survolteur.

Figure (II.18): Schéma du convertisseur dévolteur.

Figure (II.19): Schéma de convertisseur dévolteur-survolteur

Figure (II.20): Schéma topologique du convertisseur survolteur.

Figure (II.21): Schéma topologique équivalent en utilisant un commutateur idéal du convertisseur survolteur.

Figure (II.22): Ondulation du courant de l'inductance

Figure (II.23): Ondulation sur la tension de condensateur.

Figure (II.24): Schéma de simulation du hacheur survolteur << **BOOST** >>.

Figure (II.25): Tension de sortie du hacheur survolteur.

Figure (II.26): Courant de sortie du hacheur survolteur.

Figure (II.27): Schéma Simulink de simulation.

Figure (II.28): Tension de sortie du système (panneau+hacheur).

Figure (II.29): Puissance de sortie (panneau+hacheur).

Figure (II.30): Courant de sortie du système (panneau+hacheur).

Figure (II.31): Puissance générée par le panneau PV avec un éclairagement variable de $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Figure (II.32): Puissance consommée par la charge avec un éclairagement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Figure (II.33): Tension générée par le panneau avec un éclairagement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Figure (II.34): Tension aux bornes de la charge avec un éclairagement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Figure (II.35): Tension aux bornes de la charge avec une variation de température de 50°C à 25°C .

Figure (II.36): Tension générée par le panneau PV avec une variation de température de 50°C à 25°C .

Figure (II.37): Puissance consommée par la charge avec une variation de température de 50°C à 25°C

Figure (II.38) : Puissance générée par le panneau PV avec une variation de température de 50°C à 25°C .

Figure (II.39): Tension de sortie du système (panneau+hacheur).

Figure (II.40): Courant de sortie du système (panneau+hacheur).

Figure (II.41): Puissance de sortie du système (panneau+hacheur).

Figure (II.42): Puissance générée par le panneau PV avec une variation de température de 50°C à 25°C .

Figure (II.43): Puissance consommée par la charge avec une variation de température de 50°C à 25°C

Figure (II.44): Tension générée par le panneau pour une variation de température de 50°C à 25°C

- Figure (II.45):** Tension aux bornes de la charge pour une variation de température de 50°C à 25°C
- Figure (II.46):** Puissance générée par le panneau pour un éclairement variable de 750 W/m² à 1000 W/m².
- Figure (II.47):** Puissance consommée par la charge pour un éclairement variable de 750 W/m² à 1000W/m².
- Figure (II.48):** Tension générée par le panneau PV pour un éclairement variable de 750 W/m² à 1000W/m².
- Figure (II.49):** Tension aux bornes de la charge avec un éclairement variable de 750 W/m² à 1000W/m²
- Figure (III.1):** Schéma de principe du convertisseur MPPT.
- Figure (III.2):** Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge RS (b).
- Figure (III.3):** présentation de l'organigramme d'un fonctionnement du système à son PPM.
- Figure (III.4):** comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement
- Figure (III.5):** Organigramme de la commande P&O
- Figure (III.6):** Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque.
- Figure (III.7):** Organigramme de la commande INC
- Figure (IV.1):** Schéma block de la commande MPPT (P&O)
- Figure (IV.2):** Tension générée par le panneau PV pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.3):** Tension de sortie aux bornes de la charge pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.4):** Puissance générée par le panneau PV pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.5):** Puissance consommée par la charge pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.6):** Tension générée par le panneau PV pour T=25°C fixe et éclairement variable 750W/m² à 1000W/m²
- Figure (IV.7):** Tension aux bornes de la charge pour T=25°C et éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m².
- Figure (IV.8):** Puissance générée par le panneau PV pour T=25°C et éclairement variable 750W/m² à 1000W/m²
- Figure (IV.9):** Puissance consommée par la charge pour T=25°C et éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m².
- Figure (IV.10):** Tension générée par le panneau PV pour 1000W/m² et température variable de 50°C à 25 °C.
- Figure (IV.11):** Tension aux bornes de la charge pour 1000W/m² et température variable de 50°C à 25°C.
- Figure (IV.12):** Puissance générée par le panneau PV pour 1000W/m² et température variable de 50°C à 25°C.
- Figure (IV.13):** Puissance de sortie consommée par la charge 1000W/m² et température variable de 50°C à 25°C.
- Figure (IV.14):** Tension générée par le panneau PV pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.15):** Tension aux bornes de la charge pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.16):** Puissance générée par le panneau PV pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.17):** Puissance consommée aux bornes de la charge pour E=1000W/m² et T=25°C
- Figure (IV.18):** Tension générée par le panneau PV pour T=25°C et éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m²
- Figure (IV.19):** Tension aux bornes de la charge pour T=25°C et éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m²
- Figure (IV.20):** Puissance générée par le panneau PV pour T=25°C et éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m²
- Figure (IV.21):** Puissance consommée aux bornes de la charge pour T=25°C et éclairement variable 750W/m² à 1000W/m²
- Figure (IV.22):** Tension générée par le panneau PV pour 1000W/m² fixe et température variable 50°C à 25°C

Figure (IV.23): tension de sortie aux bornes de la charge pour $1000\text{W}/\text{m}^2$ fixe et température variable 50°C à 25°C

Figure (IV.24): Puissance générée par le panneau PV pour $1000\text{W}/\text{m}^2$ et température variable de 50°C à 25°C .

Figure (IV.25): Puissance consommée aux bornes de la charge pour $1000\text{W}/\text{m}^2$ et température variable de 50°C à 25°C .

Figure (IV.26): Schéma de simulation de la commande MPPT (INC)

Figure(IV.27) : Tension générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.28): Tension aux bornes de la charge pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.29): Puissance générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.30): Puissance consommée par la charge pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.31) : Tension générée par le panneau PV avec une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.32): Tension aux bornes de la charge avec une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.33): Puissance générée de panneau PV avec une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.34): Puissance consommé par la charge avec une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.35) : Tension générée par le panneau PV avec un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.36): Tension aux bornes de la charge avec un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.37): Puissance générée par le panneau PV pour un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.38): Puissance consommée par la charge avec un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.39): Tension générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.40): Tension aux bornes de la charge pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.41): Puissance générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.42): Puissance consommée par la charge pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure(IV.43): Tension générée par le panneau PV avec une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.44): Tension aux bornes de la charge pour une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.45): Puissance générée par le panneau PV avec une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.46): Puissance consommée par la charge pour une variation de température 50°C à 25°C

Figure(IV.47): Tension générée par le panneau PV avec un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.48): Tension aux bornes de la charge pour un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.49): Puissance générée par le panneau PV avec un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure(IV.50): Puissance consommée par la charge pour un éclaircissement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

Tableau (IV.1) : comparaison des résultats avec et sans MPPT

Liste des symboles

AsGa : Arséniure de Gallium

CdTe : Tellure de Cadmium

Si : silicium

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant inverse de saturation de la diode 1.

I_{s2} : Courant inverse de saturation de la diode 2.

A_1 : Le facteur de qualité de la diode 1.

A_2 : Le facteur de qualité de la diode 2.

R_s : La résistance série.

R_{sh} : La résistance shunt.

I_{pv} : Courant photovoltaïque (générée par la cellule photovoltaïque).

I_{D1} : Courant traversé dans la diode

I_{D2} : Courant traversé dans la diode

I_R : Courant traversé dans la résistance.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{cc} : Tension de court-circuit.

n_p : Nombre des cellules en parallèle,

n_s : Nombre des cellules en série.

U_{co} : Tension en circuit ouvert

η : Rendement

FF : Le facteur de forme

T_{mod} : Température de fonctionnement de la cellule

G : Éclairement .

P_{max} : Puissance maximal

Liste des symboles

T_{ref} : Température de référence [K]

K_i : Coefficient de la température de la cellule.

G_0 : Éclairement pour les STC (standard test condition).

T_r : Température référence de la cellule.

E_g : Énergie de seuil.

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

K : la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23}$ J/K)

M_s : nombre de module en série

r_{scell} : Résistance série de la cellule

r_{shcell} : Résistance shunt de la cellule

α : rapport cyclique

V_{co} : *tension de circuit ouvert*

MPP : le point de la puissance maximale

MPPT : Maximum Power Point Tracking ou Poursuite du Point de Puissance Maximale

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. La consommation de ces sources fossiles donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution de l'atmosphère, en plus elles sont épuisables.

En vertu du protocole de Kyoto, plusieurs pays se sont engagés à trouver d'autres sources d'énergies fiables, rentables et renouvelables. Parmi ces sources on compte : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, la géothermie et la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles. Les énergies nouvelles ne sont pas polluantes, pas d'émissions de gaz à effet de serre et non dangereuse conformément au protocole de Kyoto, pour les futures générations. A l'exception de l'énergie géothermique ; les autres sources proviennent directement ou indirectement du soleil, elles sont donc inépuisables tant que ce dernier rayonnera.

L'énergie solaire photovoltaïque se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, l'automatique et d'autres filières.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour les coupler le plus parfaitement possible.

Les systèmes PV génèrent une puissance dépendante du changement des conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température des panneaux et de la variation de la charge. Par conséquent, une technique de recherche du point de puissance maximale (PPM) destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC/DC est nécessaire pour garantir un fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation. Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes MPPT. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode perturbé observe et incrémental conductance.

Ce travail a pour but de présenter les différents modèles d'un générateur photovoltaïque PV relié à un hacheur élévateur commandé par la technique MPPT (The maximum power point tracking) pour atteindre cet objectif, il faut réaliser les étapes suivantes :

- Etude des différents modèles d'un générateur PV
- Etude de l'hacheur survolteur dans un système photovoltaïque
- Présentation de l'aspect théorique des commandes MPPT
- Application de deux algorithmes de commandes MPPT, la méthode perturbé observe et la méthode conductance incrémentale sur notre système PV.
- Etude comparative des résultats obtenus par les deux méthodes

Ce mémoire est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter une généralité sur les générateurs photovoltaïque, ensuite les différents types de cellules par rapport à leur structure physique suivi d'une explication du phénomène qui se passe dans la jonction PN. Nous allons approfondir cette étude par la présentation des différents modèles de la cellule photovoltaïque et ces caractéristiques électriques et nous terminons avec les différents types de système photovoltaïque selon qu'il soit associé à une autre source d'énergie ou raccordée au réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés plus à la modélisation de la cellule photovoltaïque cas à cinq paramètres et le cas à trois paramètres liés à un hacheur survolteur alimentant une charge. Ensuite nous allons simuler leur fonctionnement.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents types méthodes de recherche du point de puissance maximale rencontrés dans la littérature. Dans notre cas d'étude, l'aspect théorique va être développé que pour deux stratégies de commande « Perturbe et Observe » (P&O) et « Incrément de Conductance » (IncCond).

Dans Le quatrième chapitre nous allons appliquer les deux stratégies de commande MPPT a notre système photovoltaïque, les résultats de simulation vont nous permettre de les comparer du point de vue qualité et amplitude des grandeurs électriques générées, rapidité (temps de réponse), complexité de la méthode, convergence, pas de calcul, ainsi que le temps de calcul.

Chapitre I

Généralité de système photovoltaïque

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 [1].

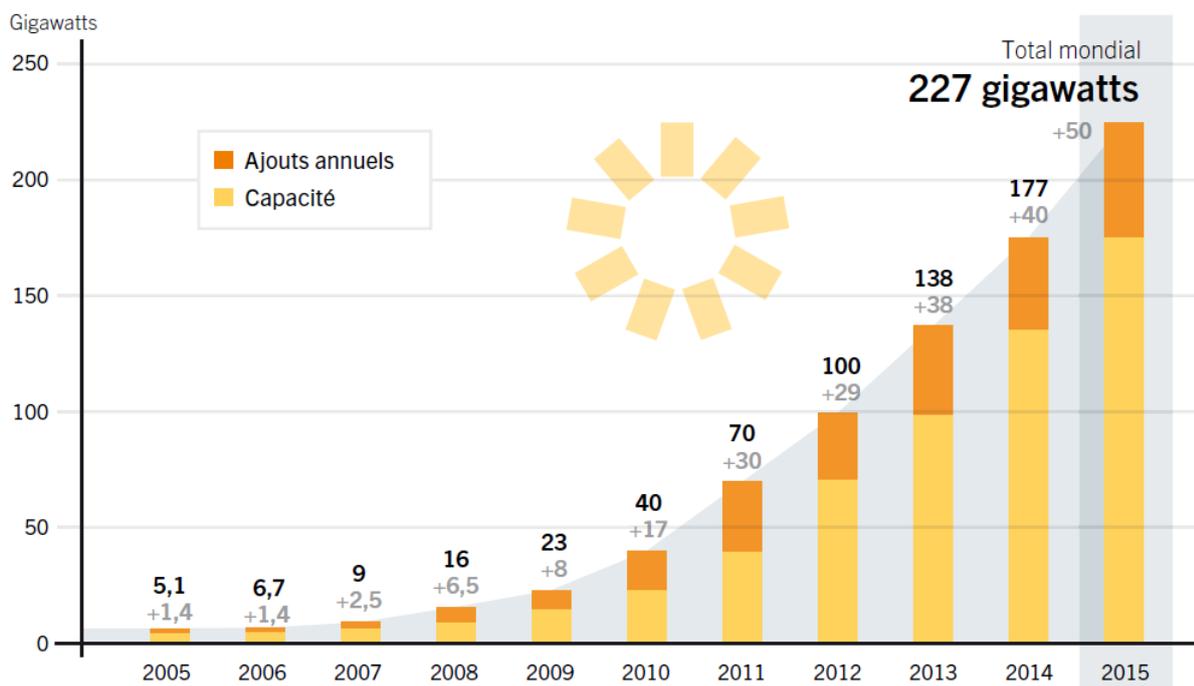
I.2. Bref historique

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

80, 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 [2].

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.

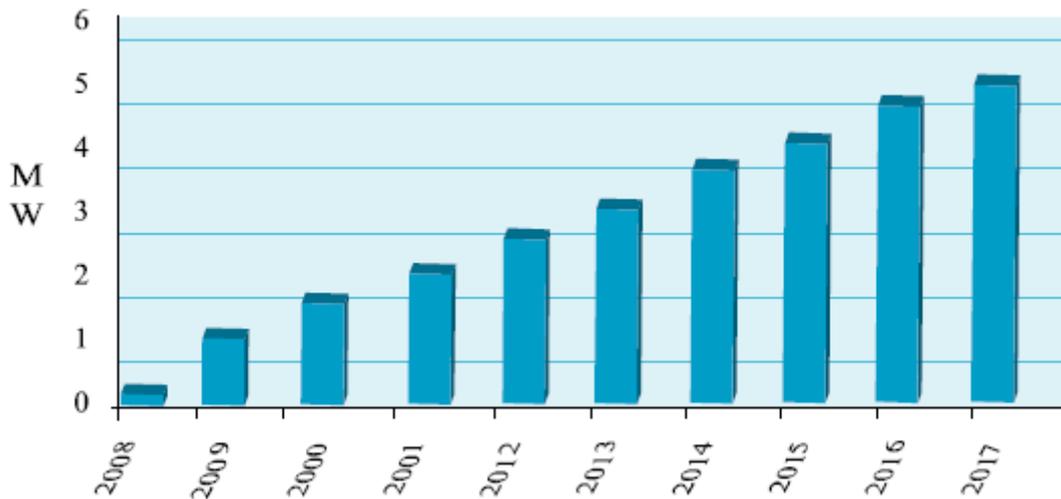


Figure(I.1) : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque, 2005–2015[3].

La 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 [4].

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 l'énergie photovoltaïque [5].

La figure suivante donne l'évolution du parc photovoltaïque pour la période de 2008 à 2017 selon les prévisions du CREG [6].



Figure(I.2): Capacité du parc photovoltaïque

I.3. Système photovoltaïque

Dans ce paragraphe 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 après nous présentons les différents modèles de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques. 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.3.1. 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.3.2. 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), Tellurure de Cadmium (CdTe) [2].

I.3.3. 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 ou nanocristallin en fonction du procédé de fabrication de la barre de silicium [8].

❖ Les cellules mono-cristallines

- La première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur [9].

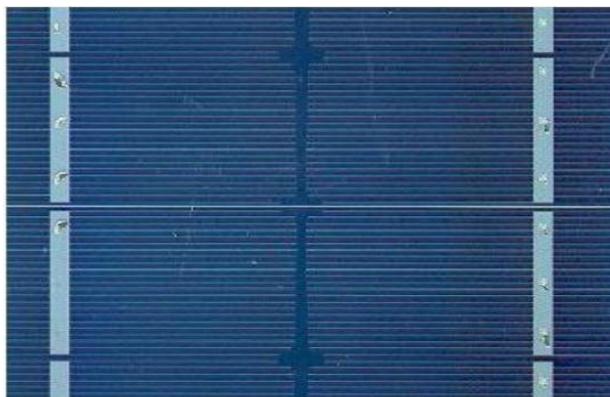


Figure (I.3) : Cellule au Silicium Monocristallin

❖ Les cellules poly-cristallines

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement 11-13% (18% en Labo) [9].

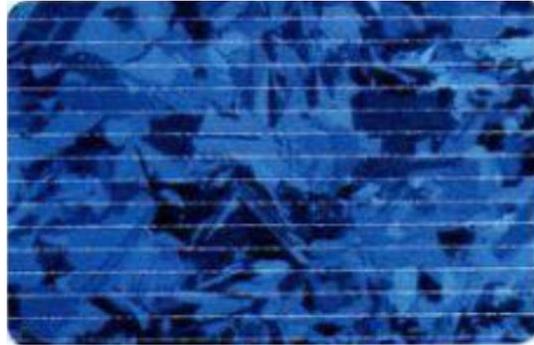


Figure (I.4) : Cellule au Silicium Poly-cristallin

❖ Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- Durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres, etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production) [9].

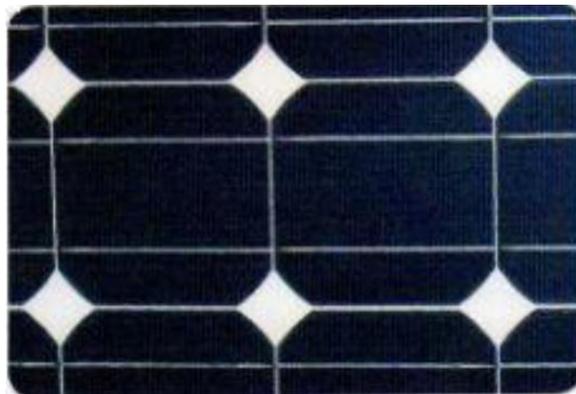


Figure (I.5) : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

❖ Les cellules nanocristallines

-Une des dernières générations de photopiles.

-Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques.

-Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire.

-Procédé et coût de production bas [9].



Figure (I.6) : Cellule au Silicium nanocristallin

I.3.4. Jonction PN

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles d'une diode. Sans éclairage, le comportement d'une cellule photovoltaïque est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction. Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux [10].

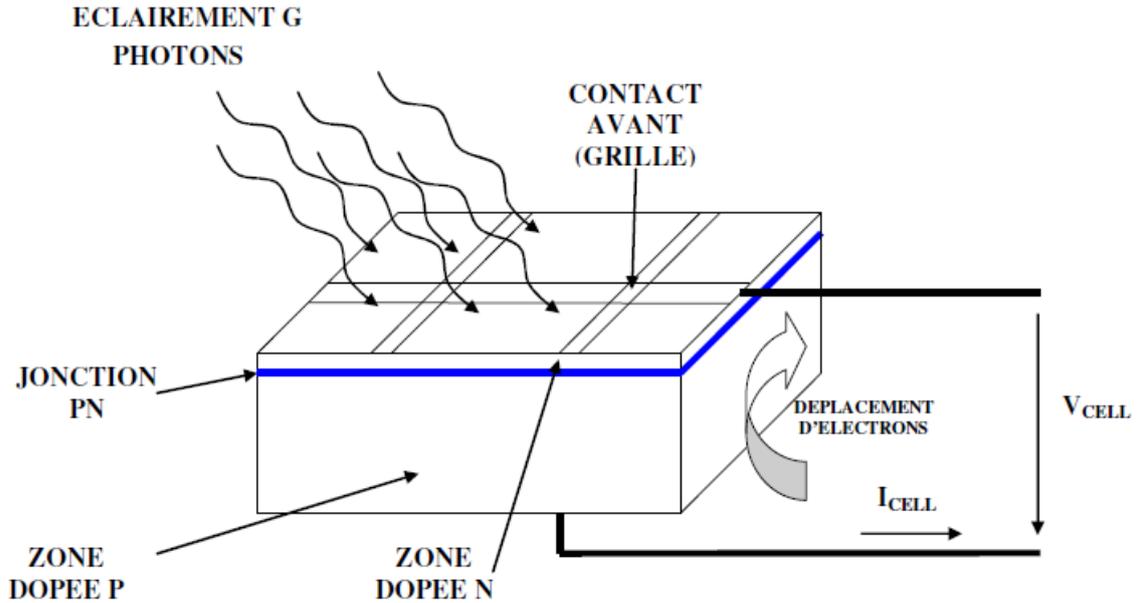


Figure (I.7) : la coupe transversale d'une cellule PV typique

I.3.5. Les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque

Les modèles représentent une approche mathématique des phénomènes physique d'une cellule photovoltaïque, plus le modèle est complexe plus on s'approche plus de la réalité physique.

❖ Modèle à sept paramètres (7p)

Nous avons choisi de commencer par le modèle le plus complexe à sept paramètres, qui s'approche plus de la réalité physique. Ce modèle est défini par le schéma électrique suivant [11]:

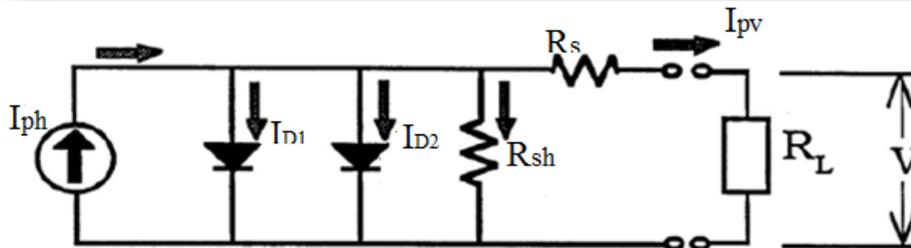


Figure (I.8) : Modèle à sept paramètres [11]

Les paramètres de ce circuit sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant inverse de saturation de la diode 1.

I_{s2} : Courant inverse de saturation de la diode 2.

A_1 : Le facteur de qualité de la diode 1.

A_2 : Le facteur de qualité de la diode 2.

R_s : La résistance série.

R_{sh} : La résistance shunt.

Les équations caractéristiques de ce circuit sont :

Substituer (I.3) et (I.4) dans (I.1) donne :

$$I_{pv} = \left(I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{A_1KT_c} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q}{A_2KT_c} \times (V + IR_s) \right) - 1 \right) - \frac{(V+IR_s)}{R_{SH}} \right) [1.5]$$

❖ Modèle à six paramètres (6P)

Ce modèle correspond une élimination de la résistance shunt, ce qui constitue la première simplification du modèle à sept paramètres.

Ce modèle à six paramètres est défini par le schéma électrique suivant :

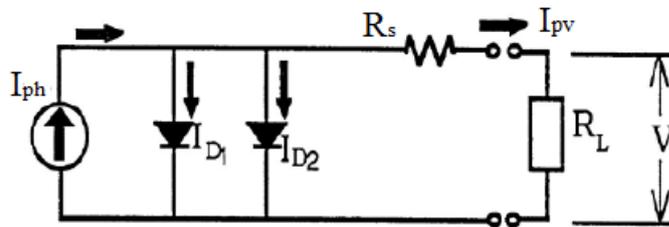


Figure (I.9) : Modèle à six paramètres [11]

Les six paramètres de ce circuit sont [11] :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant de saturation de la diode 1.

I_{s2} : Courant de saturation de la diode 2.

A_1 : Le facteur de qualité de la diode 1.

A_2 : Le facteur de qualité de la diode 2.

R_s : La résistance série.

Les équations caractéristiques de ce circuit sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad [I.6]$$

$$I_{D1} = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q}{A_1 K T_c} \times (V + I R_s) \right) - 1 \right) \quad [I.7]$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q}{A_2 K T_c} \times (V + I R_s) \right) - 1 \right) \quad [I.8]$$

Remplaçant (I.7) et (I.8) dans (I.6) donne :

$$I_{pv} = \left(I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{A_1 K T_c} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{A_2 K T_c} \right) - 1 \right) \right) \quad [I.9]$$

❖ Modèle à cinq paramètres (5P)

Il existe deux variantes du modèle à cinq paramètres par rapport au modèle à sept paramètres. La première consiste à négliger les deux résistances (série et shunt) et la deuxième variante correspond à l'élimination de la deuxième diode.

Cette simplification, par rapport au cas à 6 paramètres, se traduit à supposer que la résistance série est négligeable, cette première variante du cas à 5 paramètres est représentée par le schéma électrique suivant (figure (I.10)) :

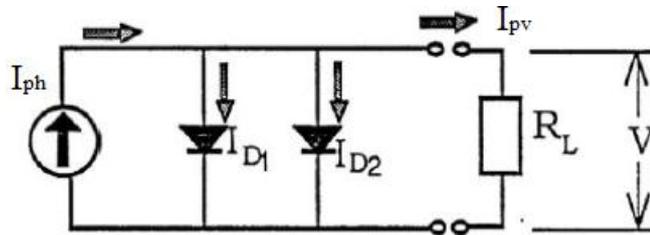


Figure (I.10) : Modèle à cinq paramètres R_s et R_{sh} négligée [11]

Les cinq paramètres de ce modèle sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant de saturation de la diode 1.

I_{s2} : Courant de saturation de la diode 2.

A_1 : Le facteur de qualité de la diode 1.

A_2 : Le facteur de qualité de la diode 2.

Les équations caractéristiques de ce circuit sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad [I.10]$$

$$I_{D1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_1 K T_c}\right) - 1 \right) \quad [I.11]$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_2 K T_c}\right) - 1 \right) \quad [I.12]$$

Remplaçant (II.11) et (II.12) dans (II.10) nous obtenons :

$$I_{pv} = \left(I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_1 K T_c}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_2 K T_c}\right) - 1 \right) \right) \quad [I.13]$$

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en éliminant la deuxième diode du circuit du modèle à sept paramètres représenté sur la figure (I.8). Cette deuxième variante du modèle à cinq paramètres est représentée par le schéma électrique suivant (figure (I.11)) :

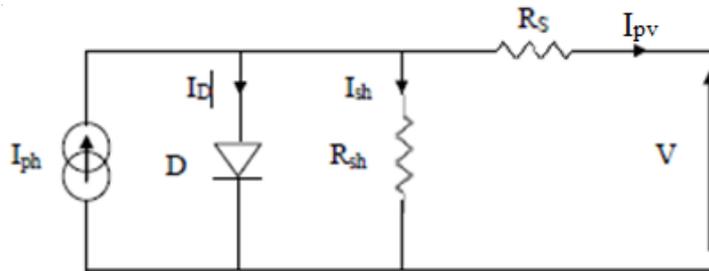


Figure (I.11) : Modèle à cinq paramètres diode éliminée [11]

Les cinq paramètres de ce modèle sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant de saturation de la diode 1.

A_1 : Le facteur de qualité de la diode 1.

R_s : La résistance série.

R_{sh} : La résistance shunt.

Les équations caractéristiques de ce circuit sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_R \quad [I.14]$$

Avec : $I_R = \frac{V_D}{R_{Sh}}$

$$I_{D1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_1KT_c}\right) - 1 \right) \quad [I.15]$$

L'équation générale de ce modèle est :

$$I_{pv} = \left(I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{A_1KT_c}\right) - 1 \right) - \frac{(V+IR_S)}{R_{SH}} \right) \quad [I.16]$$

❖ Modèle à quatre paramètres (4P)

Le modèle à quatre paramètres correspond à une élimination d'une diode et la résistance shunt, d'où le schéma électrique suivant [11]:

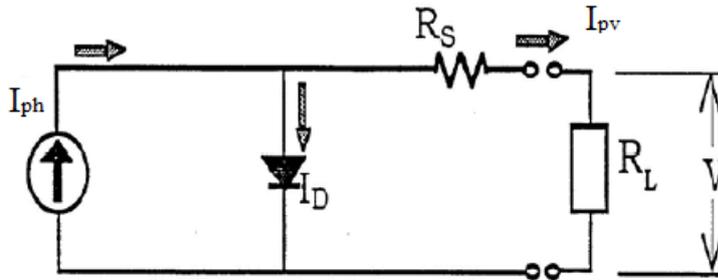


Figure (I.12) : Modèle à quatre paramètres [11]

Les quatre paramètres de ce modèle sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant de saturation inverse

A_1 : Facteur de qualité

R_S : La résistance série

Les équations caractéristiques de ce circuit sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad [I.17]$$

$$I_{D1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_1KT_c}\right) - 1 \right) \quad [I.18]$$

L'équation générale de ce modèle est :

$$I_{pv} = \left(I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{A_1KT_c}\right) - 1 \right) \right) \quad [I.19]$$

❖ Modèle à trois paramètres (3P)

Si on néglige la résistance série du modèle à quatre paramètres, cela conduit à un circuit à trois paramètres représenté par la figure (I.13). Ce circuit équivalent est considéré comme idéal [11].

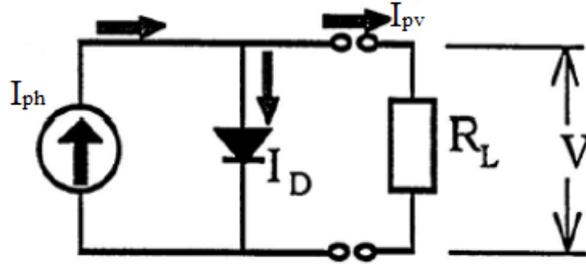


Figure (I.13) : Modèle à trois paramètres [11]

Les trois paramètres de ce circuit sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{s1} : Courant de saturation inverse

A_1 : Facteur de qualité

Les équations caractéristiques de ce circuit sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad [I.20]$$

$$I_D = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_1 K T_c}\right) - 1 \right) \quad [I.21]$$

Remplaçant (I.20) dans (I.19) on obtient :

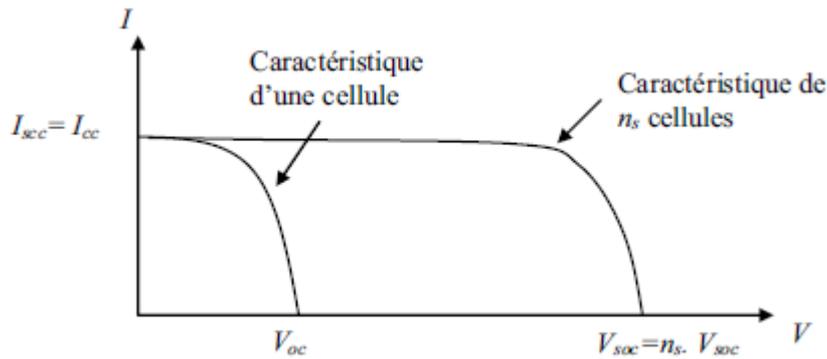
$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{qV}{A_1 K T_c}\right) - 1 \right) \quad [I.22]$$

I.3.6. Association des cellules photovoltaïques

Afin d'adapter la source à la charge du point de vue puissance nous utilisons les montages série et parallèle des cellules photovoltaïques.

❖ Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (I-14) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques [12].



Figure(I.14) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

❖ Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La figure (I.15) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques [12].

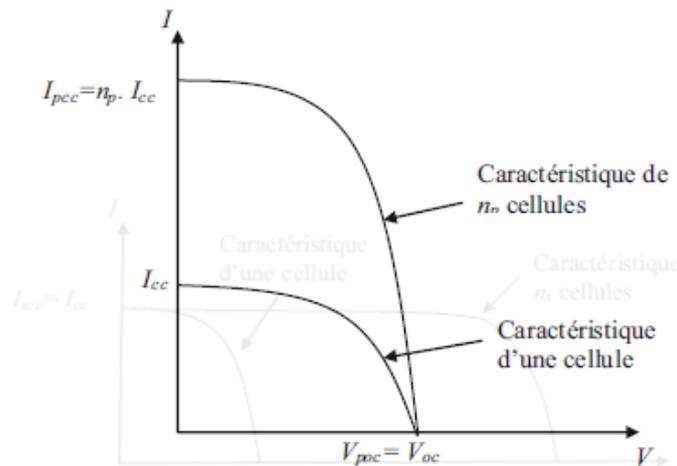


Figure (I.15) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

❖ Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \cdot I_{cc} \text{ [I.23]}$$

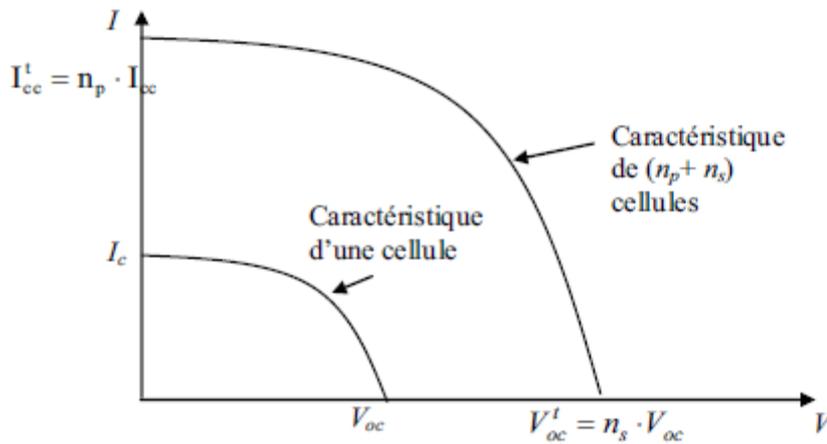
$$V_{oc}^t = n_s \cdot V_{oc} \text{ [I.24]}$$

Avec :

n_p : Nombre des cellules en parallèle,

n_s : Nombre des cellules en série.

La figure I-16 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.



Figure(I.16): Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_p+n_s) cellules identiques.

Selon l'association en série et parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure I-16). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [12].

I.3.7. 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 [13].



Figure (I.17) : panneau photovoltaïque

I.3.8. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de panneaux photovoltaïque, connectées 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.18)[14]. L'ensemble de rangées photovoltaïques forment un champ photovoltaïque.

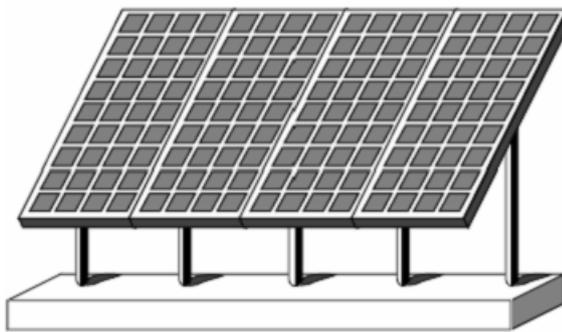


Figure (I.18) : Rangée d'un champ photovoltaïque



Figure (I.19) : Un champ photovoltaïque

I.3.9. Les caractéristiques d'un module PV

❖ La tension en circuit ouvert

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert U_{co} ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [2].

❖ Le courant de court-circuit

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc} . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [2]

❖ La puissance maximale

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale U_m et à une intensité maximale I_m . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement standard STC (25°C et un éclairement de 1000 W/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [2].

❖ 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/m², ce rendement a pour formule [2] :

$$\eta = \frac{P_m}{S * E} \quad [I.25]$$

❖ Le facteur de forme

Le facteur de forme est un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV.

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le produit $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [2].

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} * I_{cc}} \quad [I.26]$$

I.4. Les différents types de système photovoltaïques

Les systèmes PV peuvent être réalisés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride [15] [16]:

❖ Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système photovoltaïque autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, l'éclairage, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée.

Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques.

Les performances des systèmes autonomes reviennent surtout sur l'état des batteries, c'est l'élément de base dans ces types de systèmes [15] [16].

❖ Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés [15] [16].

❖ Système PV accordée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur.

La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings.

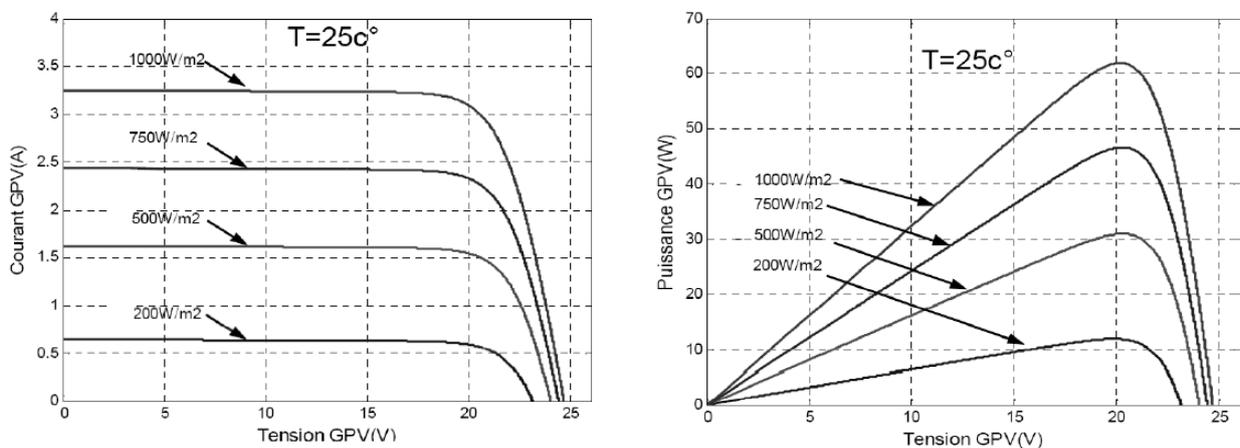
Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

Dans les systèmes raccordés au réseau, c'est l'onduleur qui remplace les batteries, dans ce cas c'est l'élément de base dans ces types des systèmes [15] [16].

I.5. Critère atmosphérique

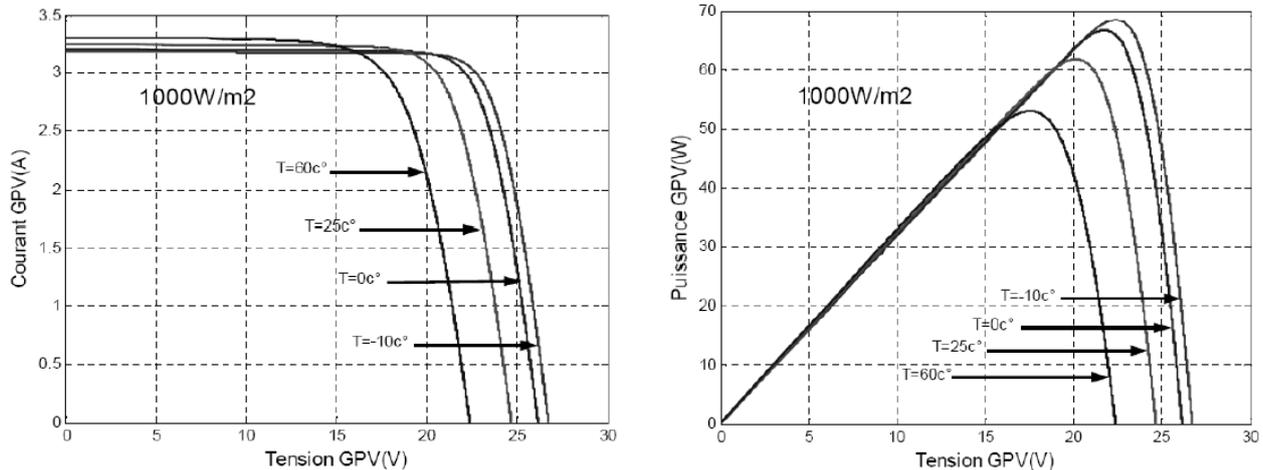
La caractéristique d'une cellule PV est directement dépendante de l'éclairement et de température.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure (I.20), montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux points de puissance maximale Pmax. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit Icc varie proportionnellement à l'irradiation. En même temps, la tension de circuit ouvert Vco varie très peu [10].



Figure(I.20) : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'irradiation [17].

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires, Ce qui est visible sur ces caractéristiques électrique. La figure (I.21) présente la variation des caractéristiques électrique (courant et puissance) d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement fixé à 1000W/m^2 [10].



Figure(I.21) : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour différentes température [17].

Par contre si la température croit à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse du courant est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV [11].

I.6. Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV

I.6.1. Les avantages

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 n'exigent presque aucun entretien.

- 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.6.2. 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.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref aperçu historique 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 et ses différents modèles électrique. Ensuite nous avons vu les différents types des systèmes photovoltaïques et l'effet des phénomènes atmosphériques (éclairage et température), nous avons commencé par la présentation de l'effet de la température dont l'augmentation conduit à une baisse de la puissance générée et de même la diminution de l'éclairage la réduit aussi. Dans le chapitre suivant, nous allons choisir deux modèles électriques d'une cellule photovoltaïque afin de simuler leur fonctionnement sur MATLAB.

Chapitre II

Modélisation du système photovoltaïque

II.1. Introduction

La modélisation mathématique des cellules solaire est indispensable pour toute opération d'étude du fonctionnement, d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque.

Le module photovoltaïque est présenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. La modélisation de ces dernières s'impose comme une étapes cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs, leurs différences se situent principalement dans le nombres de diodes la résistance shunt finie ou infinie le facteur d'idéalité constant ou non ainsi que les méthodes numériques utilisées pour détermination des différents paramètres inconnus [10].

II.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

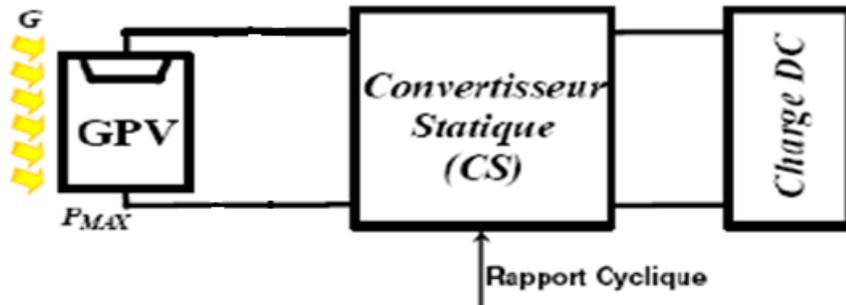
La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électrique de chaque élément. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour présenter un comportement non linéaire. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres.

Pour notre modélisation, nous avons choisi deux modèles électriques que nous allons étudier. Ces modèles choisis sont les modèles à cinq paramètres (5p) et trois paramètres (3p) [10].

II.3. Description de notre système PV

Le système PV de notre cas d'étude est formé d'un générateur photovoltaïque alimentant une charge R à travers un hacheur survolteur commandé par la stratégie MLI. Il est présenté dans la Figure (II.1).



Figure(II.1) : Schéma de principe du convertisseur.

Pour faciliter l'étude du système photovoltaïque, nous allons diviser l'étude en trois parties, nous commençons par l'étude du générateur photovoltaïque qui dans notre cas est constitué de N_s cellules en série et N_p cellule en parallèle, puis en deuxième partie nous présentons une description et modélisation de l'hacheur survolteur et nous terminons avec l'association générateur PV avec le hacheur et charge

II.4. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque

II.4.1. Générateur à cinq paramètres (5p)

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il est représenté par le circuit électrique qui se compose d'une source de courant une diode, pour les phénomènes physique de polarisation sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt et une résistance série.

Ce modèle est connu sous le nom L5p (lumped, 1 mechanism, 5 paramètres), le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres suivants (Figure II.02).

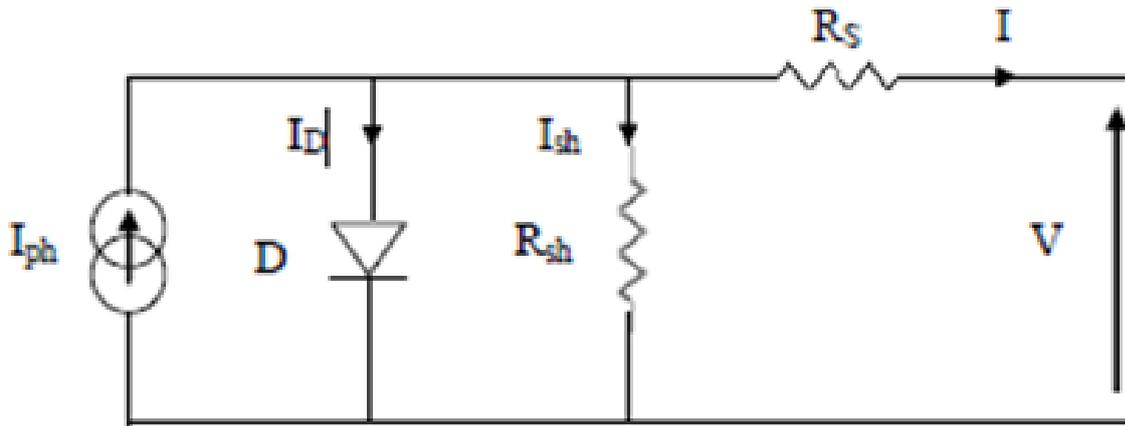


Figure (II.02): Schéma électrique du Modèle à cinq paramètres.

Le courant de sortie I_{pv} de la cellule PV est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit équivalent représentée sur la figure précédente:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_R \quad [\text{II.1}]$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Courant photonique.

I_D : Le courant circulant dans la diode.

I_R : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} .

$$T_{mod} = G * \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) + T_{ref} \quad [\text{II.2}]$$

T_{mod} : Température de fonctionnement de la cellule

G : Éclairement.

T_{ref} : Température de référence [K]

Avec NOCT étant la température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet).

$$I_{ph} = \left(4.75 + K_i(T_{mod} - T_r) \right) \frac{G}{G_0} \quad [\text{II.3}]$$

K_i : Coefficient de la température de la cellule.

G_0 : Éclairement pour les STC (standard test condition).

T_r : Température référence de la cellule.

$$I_{s1} = I_{cc} \left(\frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.E_g}{A_1.K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad [\text{II.4}]$$

I_{s1} : Courant de saturation de la diode.

I_{cc} : Le courant de court-circuit de la cellule.

E_g : Énergie de seuil.

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

A_1 : Facteur d'idéalité de la diode.

K : la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$I_D = I_{s1} * \left(e^{\left(\frac{V}{N_s * M_s} \right) + (r_{scel} * I) * \left(\frac{q}{(A_1 * K * T_{mod})} \right) - 1} \right) \quad [\text{II.5}]$$

N_s : nombre de cellule en série par module

M_s : nombre de module en série

r_{scel} : Résistance série de la cellule

$$I_R = \frac{V}{N_s * M_s} + \frac{(r_{scell} * I)}{r_{shcell}} \quad [\text{II.6}]$$

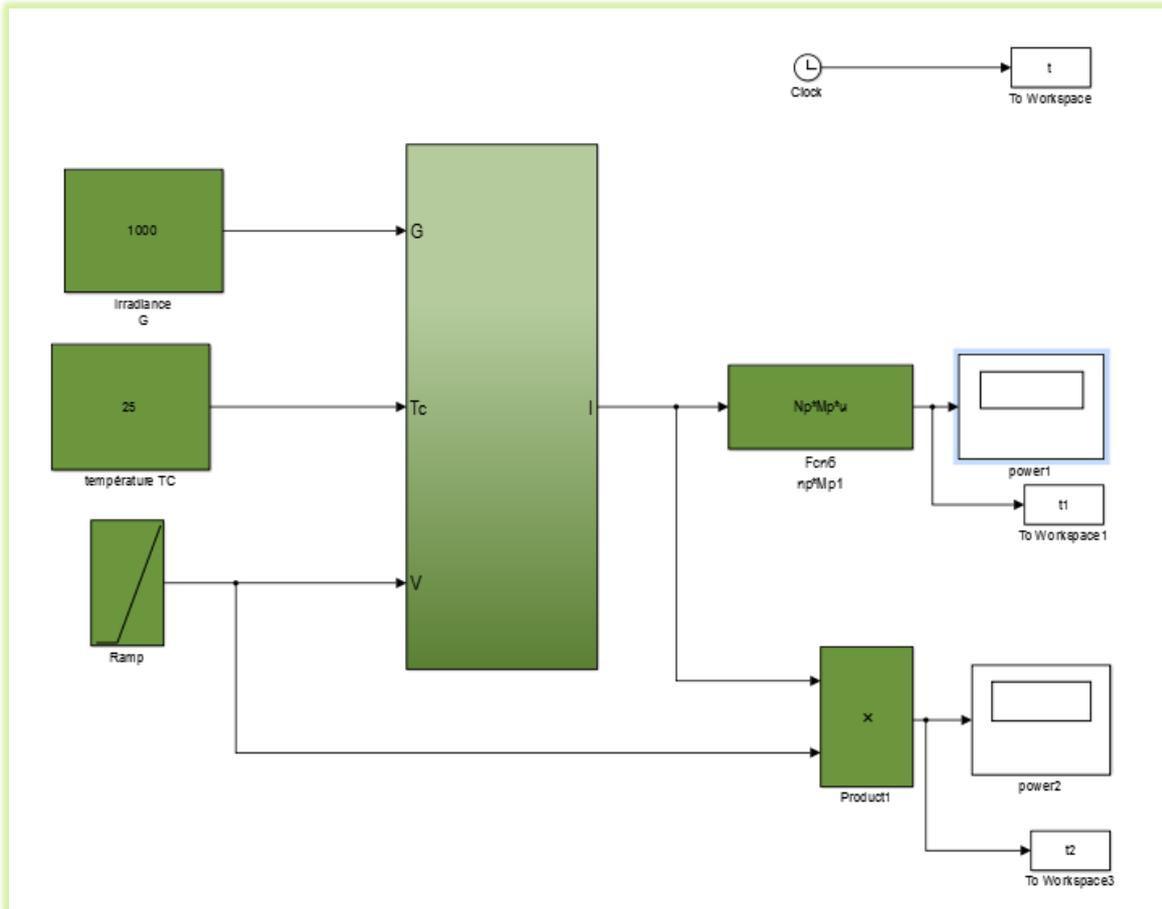
r_{shcell} : Résistance shunt de la cellule

En remplaçant dans [II.7] les équations [II.3][II.5][II.6], nous obtenons :

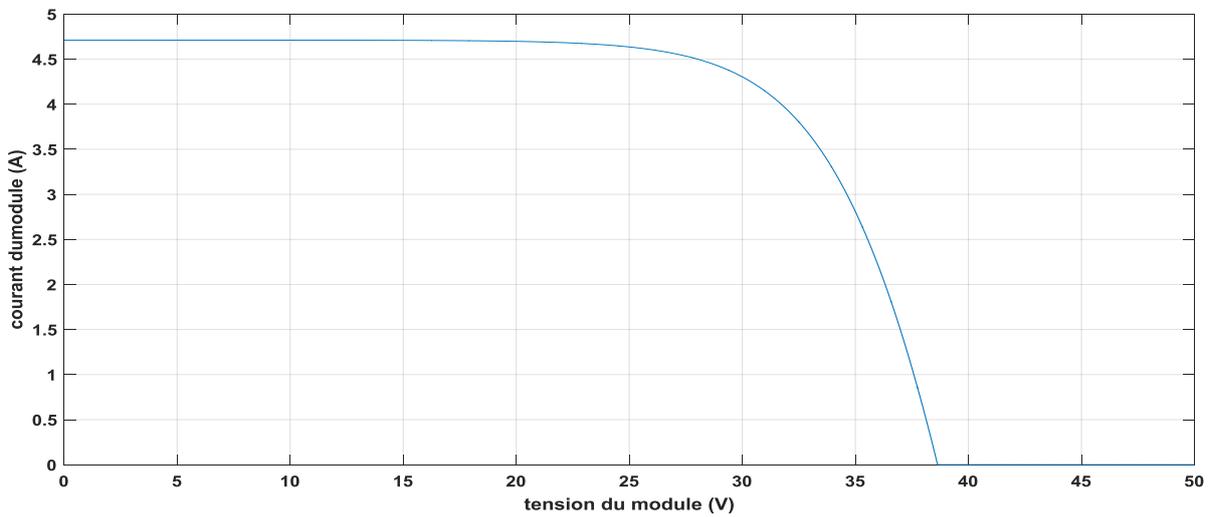
$$I_{pv} = (4.75 + K_i(T_{mod} - T_r)) \frac{G}{G_0} - I_{s1} * \left(e^{\left(\frac{V}{N_s * M_s} \right) + (r_{scel} * I) * \left(\frac{q}{(A_1 * K * T_{mod})} \right) - 1} \right) - \frac{V}{N_s * M_s} + \frac{(r_{scell} * i)}{r_{shcell}} \quad [\text{II.7}]$$

II.4.2.Simulation du générateur à cinq paramètres (5p)

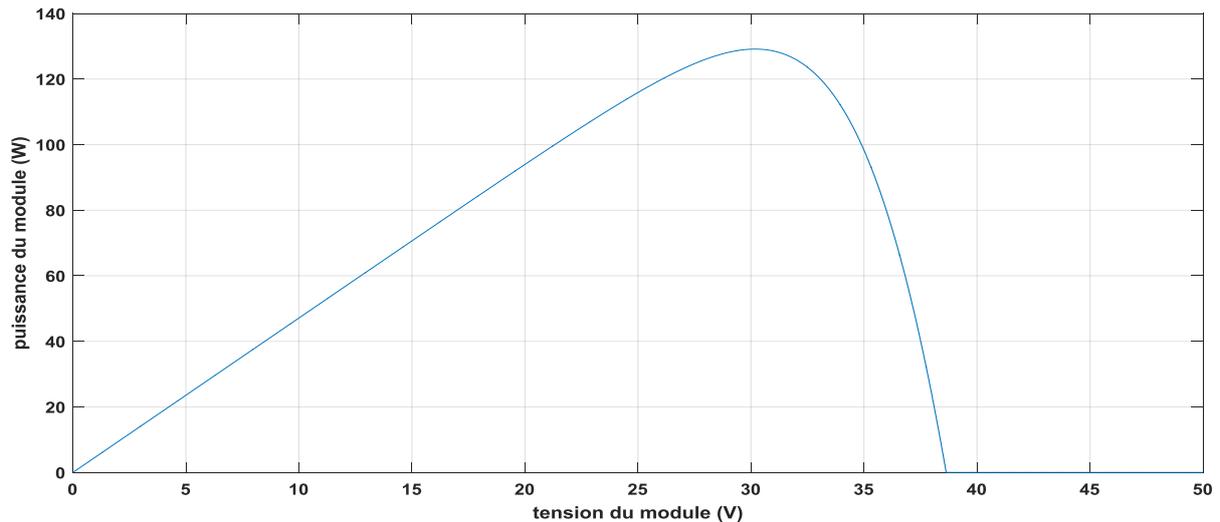
Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle à 5p, nous allons procéder à une série de simulations.



Figure(II.3) : Schéma de simulation du panneau photovoltaïque BP solar 2150S.



Figure(II.4): La caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$.



Figure(II.5):La caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$.

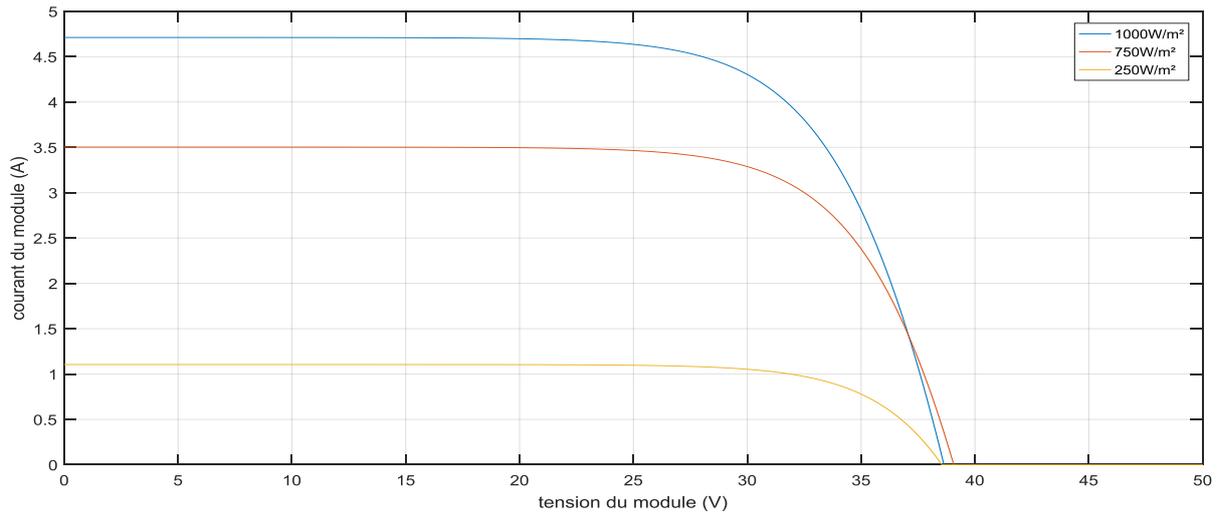
❖ La figure(II.4) présente la variation du courant du module en fonction de la tension à une température et un éclairement fixe, On note que le courant reste constant jusqu'à $V=23\text{V}$ puis il diminue jusqu'à son annulation.

❖ La figure(II.5) présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe, on note que la puissance augmente jusqu'à $P=129\text{W}$ puis elle diminue.

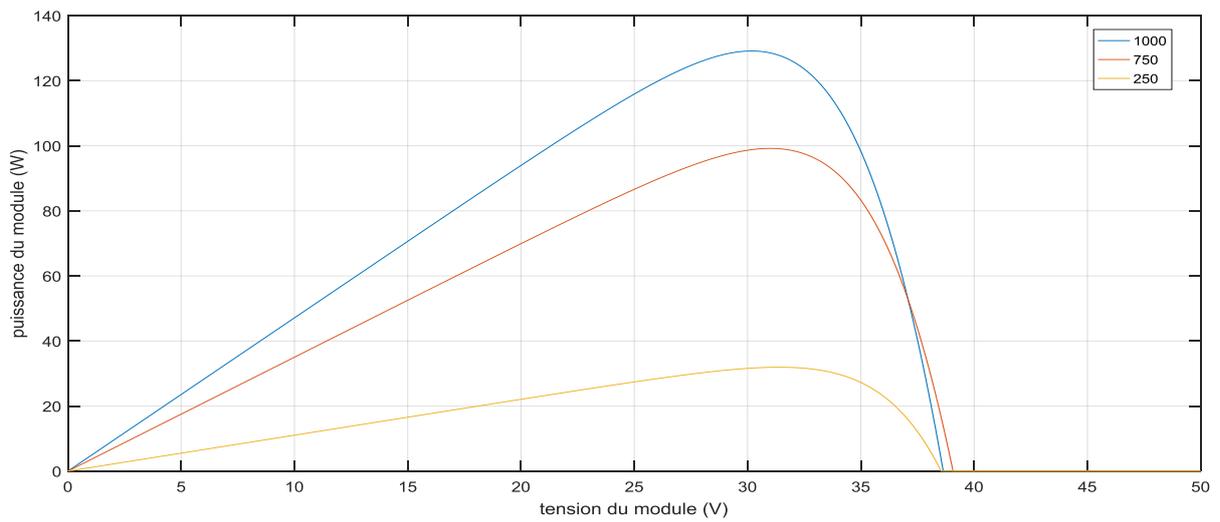
II.4.3.Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et

$P=g(V)$

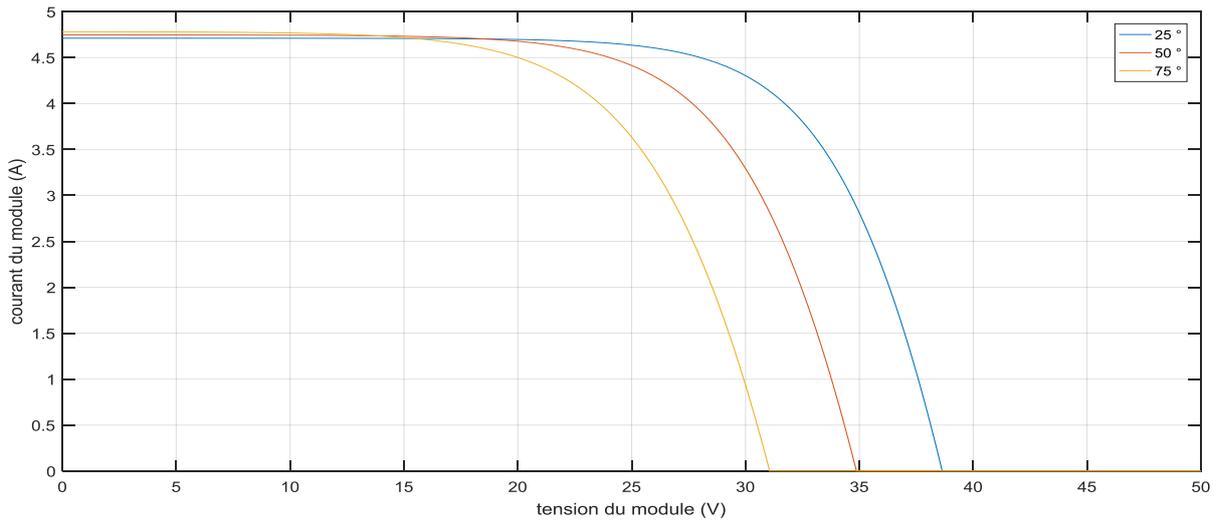
Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentés par les figures (II.6) à (II.9). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents éclairements et différentes températures.



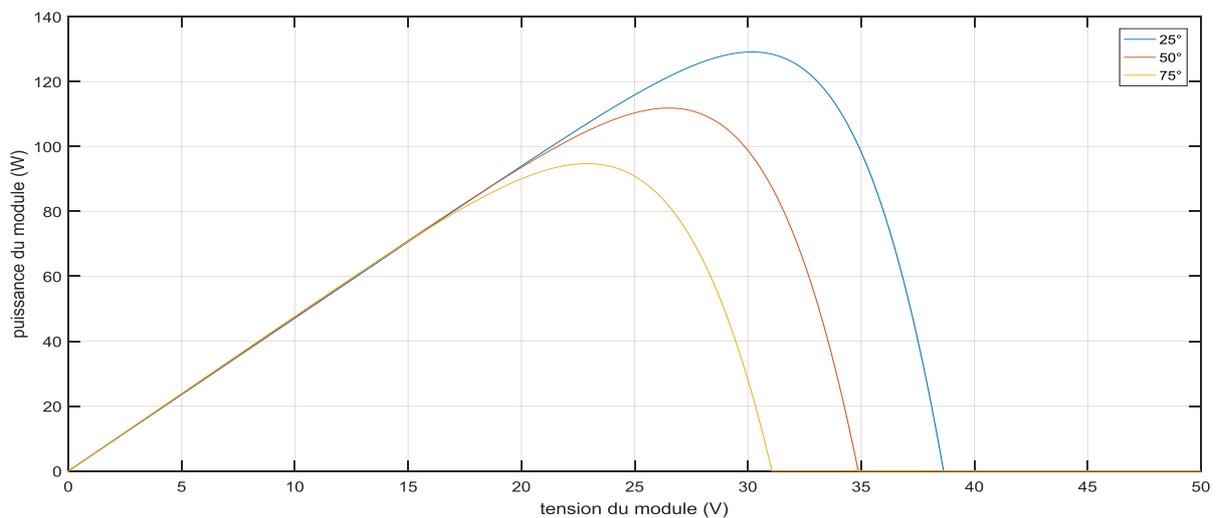
Figure(II.6) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différents éclairement et température $T_c = 25^\circ\text{C}$.



Figure(II.7) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes éclairement et température $T_c = 25^\circ\text{C}$.



Figure(II.8):Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes température et éclairement fixe $G=1000W/m^2$.



Figure(II.9):Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes température et éclairement fixe $G=1000W/m^2$.

Les résultats de simulation nous permettent de relever les remarques suivantes :

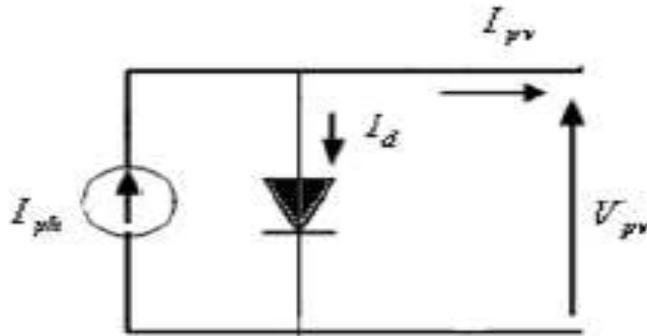
❖ Lorsque l'éclairement augmente la tension et le courant augmente donc la puissance augmente.

❖ on remarque que lorsque la température augmente le courant est relativement constant cependant la tension diminue donc la puissance diminue.

II.4.4. Générateur à trois paramètres (3p)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente en parallèle avec une diode.

Il est connu aussi sous le nom L3P (lumped, 1 mechanism model with 3 parameters), la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.



Figure(II.10):Schéma électrique du modèle à trois paramètres.

Le courant de sortie I_{pv} de la cellule PV est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit équivalent représenté sur la figure précédente :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque

I_{ph} : Courant photonique.

I_D : Le courant circulant dans la diode

$$T_{mod} = G * \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) + T_{ref} \quad [II.9]$$

T_{mod} : Température de fonctionnement de la cellule

T_{ref} : Température de référence

G : Éclairement.

$$I_{ph} = (4.75 + K_i(T_{mod} - T_r)) \frac{G}{G_0} \quad [II.10]$$

K_i : Coefficient de la température de cellule

T_r : Température référence de la cellule

G_0 :Éclairement pour les STC.

$$I_{s1} = I_{cc} \left(\frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.E_g}{A_1.K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad [\text{II.11}]$$

I_{s1} : Courant de Saturation

I_{cc} : Le courant de court-circuit de la cellule

E_g : Énergie de seuil.

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

A_1 : Facteur d'idéalité de la diode

K : la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23}$ J/K).

$$I_D = I_{s1} * \left(e^{\left(\frac{V}{N_s * M_s} \right) * \left(\frac{q}{(A_1 * K * t_{mod})} \right) - 1} \right) \quad [\text{II.12}]$$

N_s : Nombre de cellule en série par module

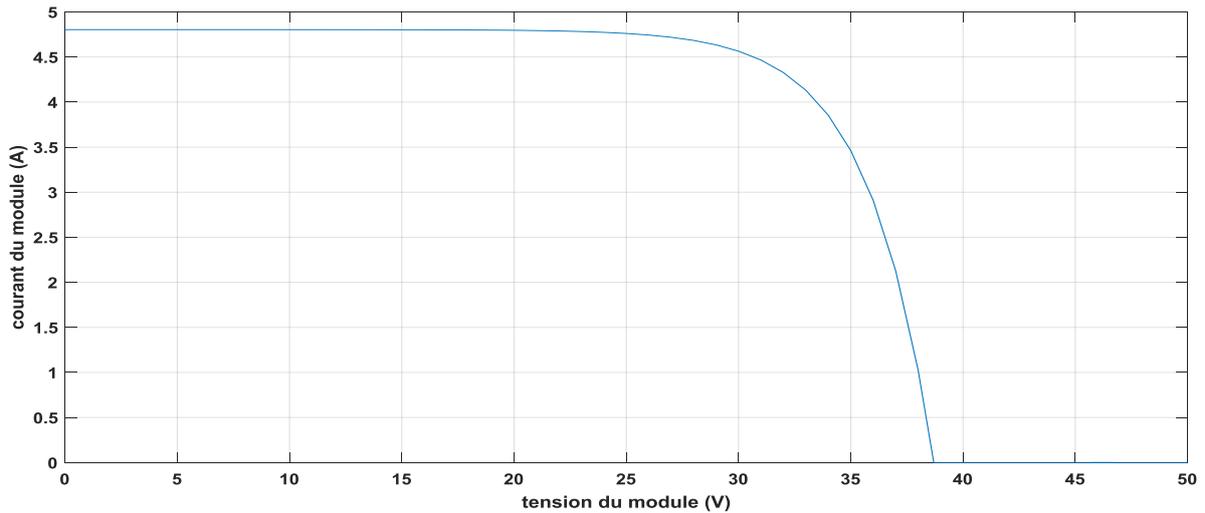
M_s : Nombre de module en série

En remplaçant dans [II.14] les équations [II.10] [II.12], nous obtenons :

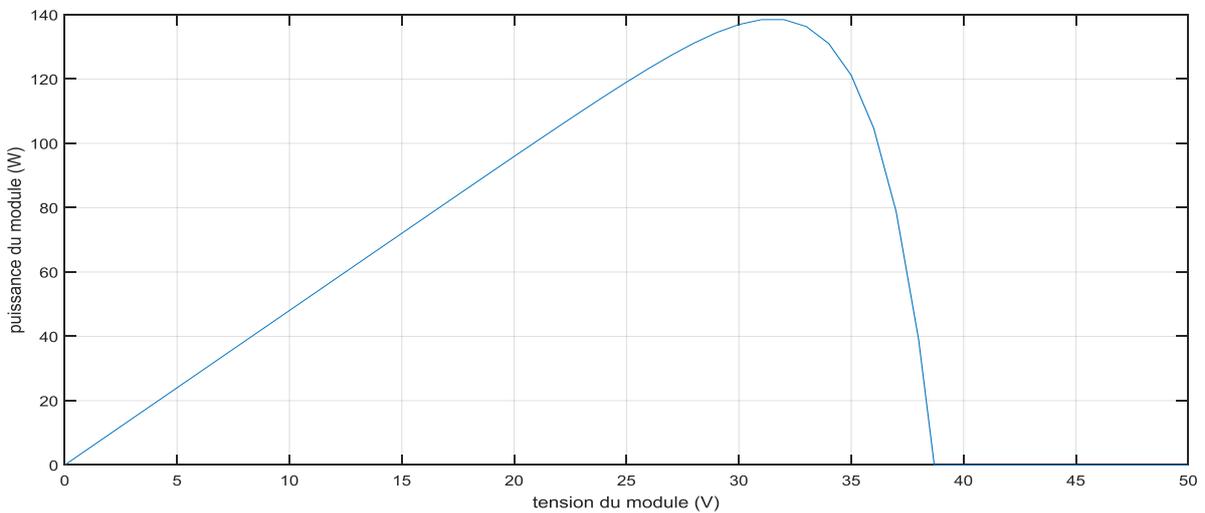
$$I_{pv} = (4.75 + K_i(T_{mod} - T_r)) \frac{G}{G_0} - I_{s1} * e^{\left[\left(\frac{V}{N_s * M_s} \right) * \left(\frac{q}{(A * K * t_{mod})} \right) - 1 \right]} \quad [\text{II.14}]$$

II.4.5.Simulation de générateur à trois paramètres (3p)

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle à trois paramètres nous avons procédé à une série de simulations, ainsi les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :



Figure(II.11):La caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$.



Figure(II.12) : La caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement

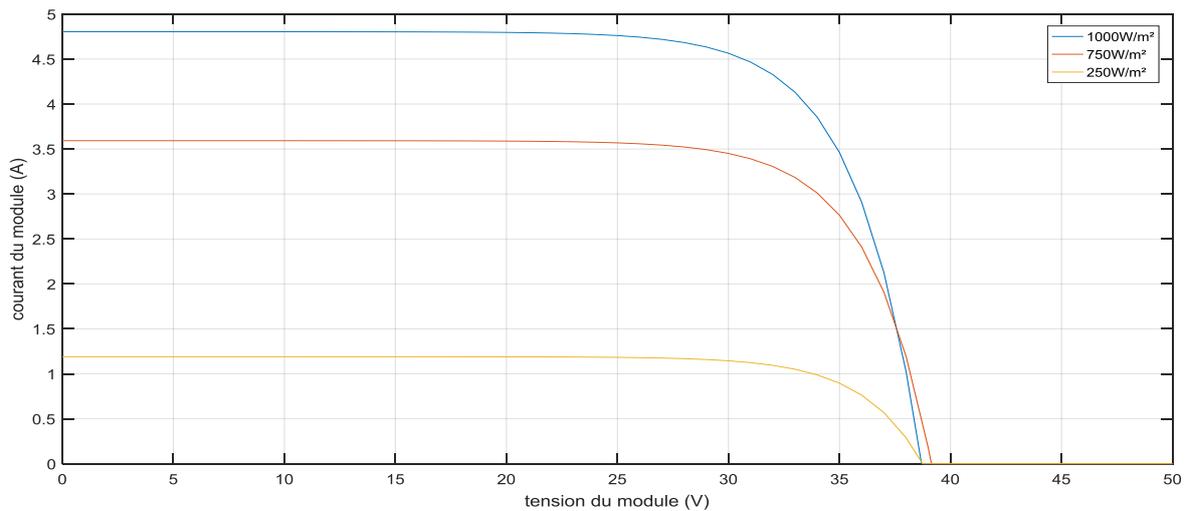
$G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$.

- ❖ On remarque que le courant est constant (4.8A) jusqu'à $V=23\text{V}$ puis il diminue.
- ❖ On remarque que la puissance augmente ($p=138\text{ W}$) à $V=31.6\text{V}$ puis elle diminue.

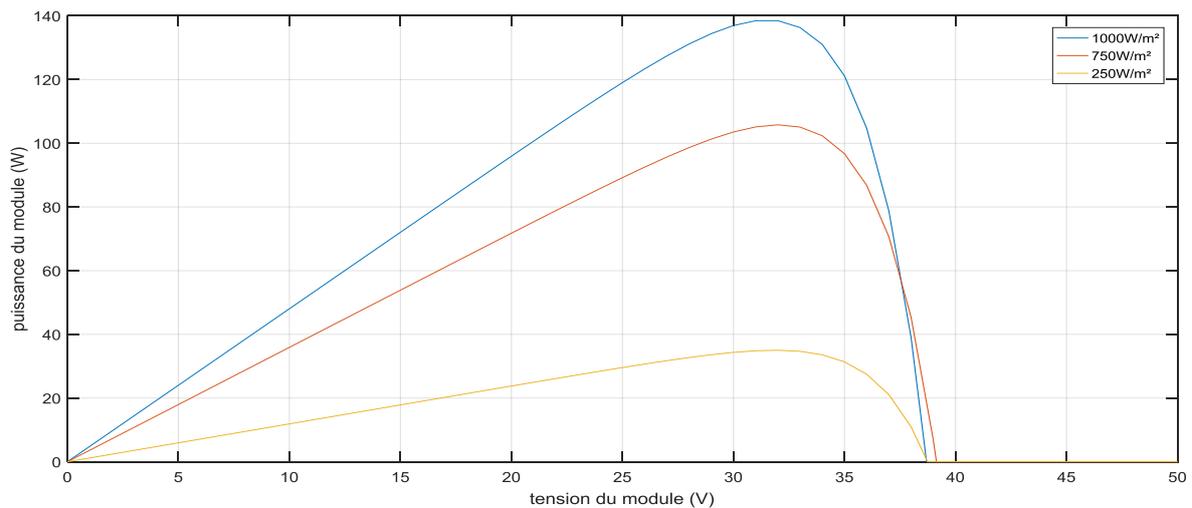
II.4.6. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et

$P=g(V)$

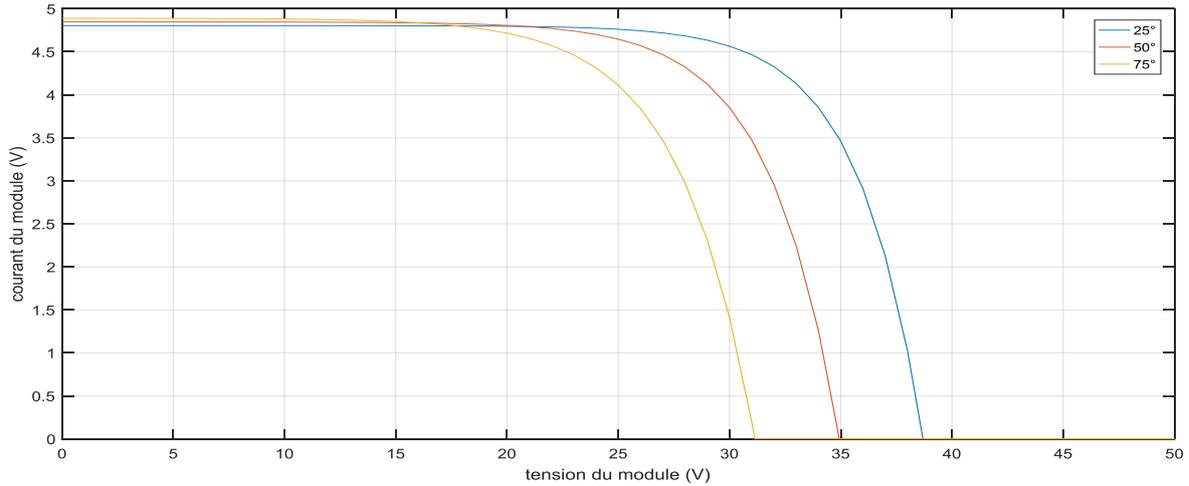
Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque sont représentés par les figures : Figure(II.13) à Figure(II.16). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents éclairements et différents températures.



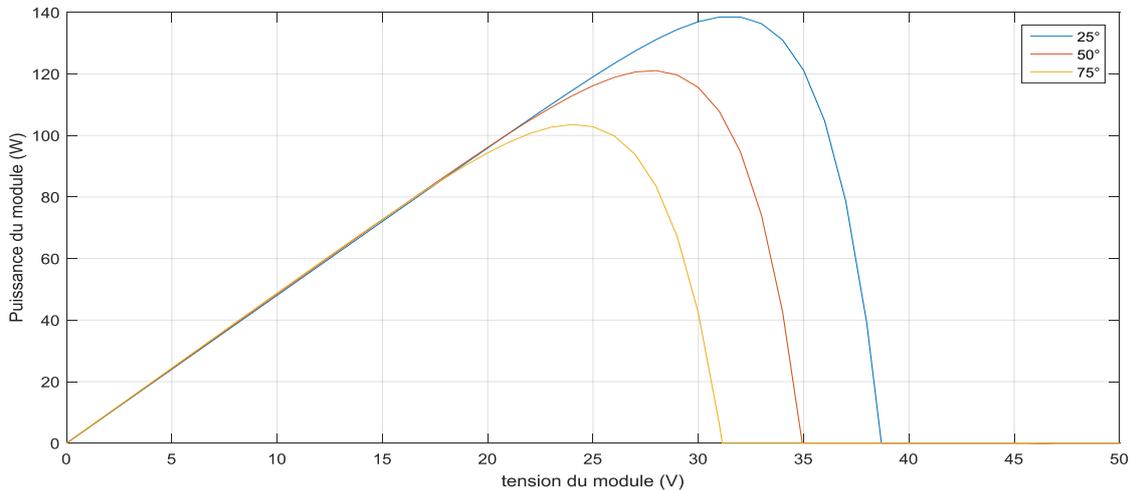
Figure(II.13) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différents éclairements et à température $T_c=25^\circ\text{C}$.



Figure(II.14):Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes éclairements et à température $T_c=25^\circ\text{C}$.



Figure(II.15):Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes température et à éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$



Figure(II.16):Résultats de simulation des caractéristiques $P=g(V)$ pour différentes température et à éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$.

Les résultats de simulation nous permettent de relever les remarques suivantes :

- ❖ Lorsque l'éclairement augmente la tension et le courant augmente donc la puissance augmente.

- ❖ On remarque que lorsque la température augmente le courant est relativement constant cependant la tension diminue donc la puissance diminue.

Ces résultats nous ont permis de comparer les deux modèles du générateur PV à cinq paramètres et à trois paramètres. Nous avons remarqué une augmentation du courant de 4.7A à

4.9Aet de la puissance de 130W à 139W du cas à trois paramètres par rapport au cas à cinq paramètres. Cette différence est due à la consommation des résistances shunt et série.

II.5. Convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs statiques servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

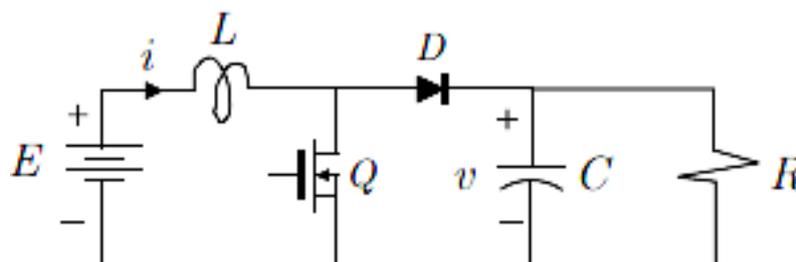
Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [18]

II.5.1.Type hacheurs

II.5.1.1. Hacheur survolteur (Boost)

Le circuit électrique du convertisseur survolteur est illustré à la Figure(II.17) nous supposons que les semi-conducteurs sont idéaux. Cela permet que l'état de conduction et le blocage soit activés instantanément.

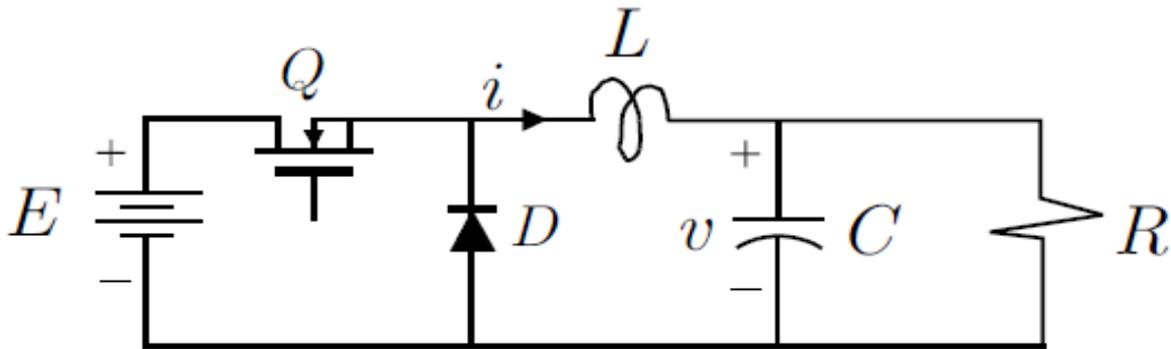
Ainsi, le convertisseur présente le comportement suivant: lorsque le transistor Q est dans l'état ON, La diode D est inversement polarisée. En conséquence, il n'y a pas de connexion entre la source de tension E et la charge système R [19].



Figure(II.17): Schéma électrique de convertisseur survolteur.

II.5.1.2. Hacheur dévolteur (Buck)

Le schéma de circuit du convertisseur dévolteur est illustré à la figure(II.18)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 [19].



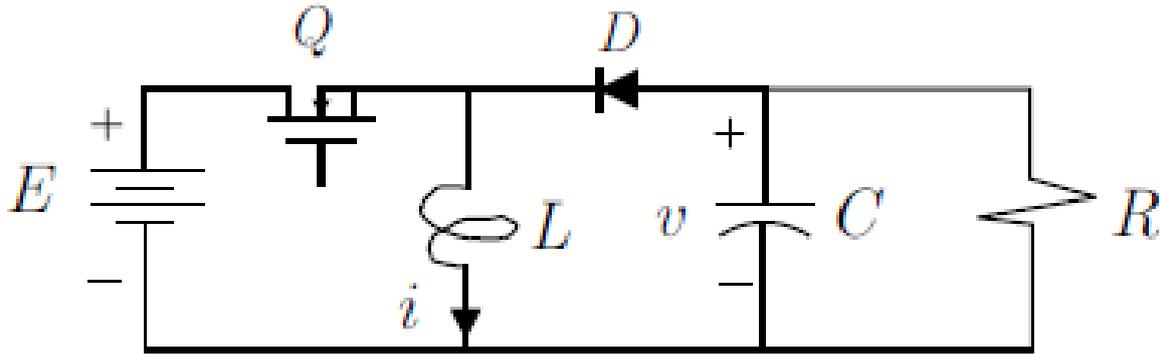
Figure(II.18) : Schéma électrique du convertisseur dévolteur.

II.5.1.3. Hacheurdévolteur-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.19).

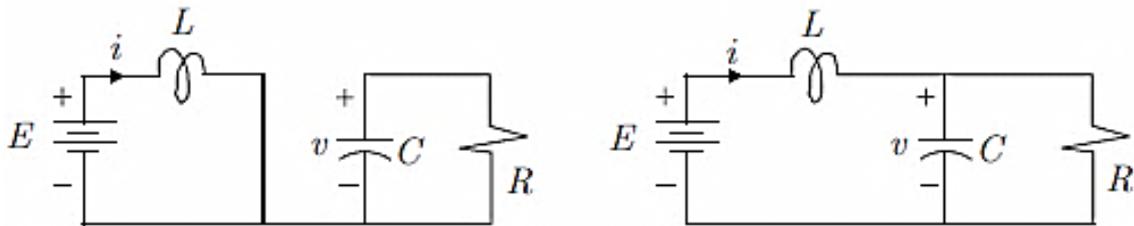
Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieur ou inférieur à un par rapport au changement de polarité. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs dévolteur et survolteur est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E [19].



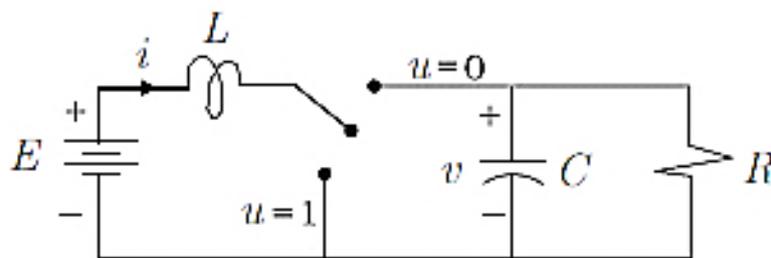
Figure(II.19): Schéma du convertisseur dévolteur-survolteur.

II.5.1.4. Modèle de l'hacheur survolteur :

La figure(II.20) présente le schéma topologique équivalent en remplaçant le transistor et la diode par un commutateur idéal dans la figure (II.21) et on définit l'état $u=1$ et l'état $u=0$ [19].



Figure(II.20): Schéma topologique du convertisseur survolteur.



Figure(II.21): Schéma topologique équivalent en utilisant un commutateur idéal du convertisseur survolteur.

En appliquant les lois de Kirchhoff :

- Lorsque la position du commutateur est réglée sur $u = 1$, nous obtenons les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = E \quad [\text{II.23}]$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \quad [\text{II.24}]$$

• Lorsque la fonction de position du commutateur est réglée sur $u = 0$, nous obtenons les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = -v + E \quad [\text{II.25}]$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad [\text{II.26}]$$

La dynamique du convertisseur survolteur est ensuite décrite par système d'équations suivantes

$$L \frac{di}{dt} = -(1-u)v + E \quad [\text{II.27}]$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1-u)i - \frac{v}{R} \quad [\text{II.28}]$$

II.5.1.5. Dimensionnement du filtre LC

Nous allons dimensionner les paramètres passifs liés à l'hacheur survolteur (L et C). Pour un rapport cyclique (α) la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée est donnée par :

$$V_{pv} = V_c \frac{1}{1-\alpha} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_c} \quad [\text{II.29}]$$

- Résistance (R):

Choix de la valeur de la charge résistive par rapport à la puissance délivrée par le panneau

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad [\text{II.30}]$$

- L'inductance (L) :

Nous aurons ainsi :

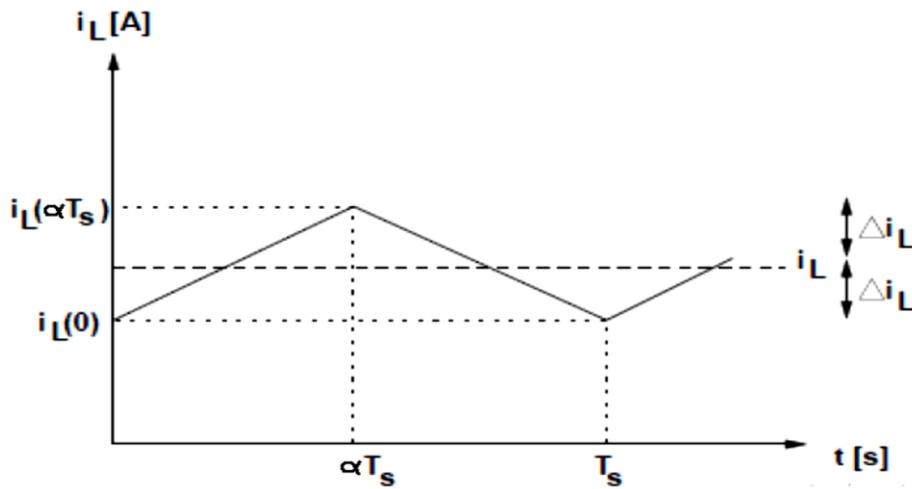
$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha T_s) - i_L(0)) \quad [\text{II.31}]$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad [\text{II.32}]$$

En utilisant $V_L(t) = V_{pv}$ dans le premier sous-intervalle. Le courant i_L à la fin de la première période est donné par :

$$i_L(\alpha T_s) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad [\text{II.33}]$$



Figure(II.22): Ondulation du courant de l'inductance

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad [\text{II.34}]$$

$$L = \frac{V_{pv}}{2\Delta i_L F_s} (\alpha) \quad [\text{II.35}]$$

Avec : $F_s = \frac{1}{T_s}$

Capacité (C) :

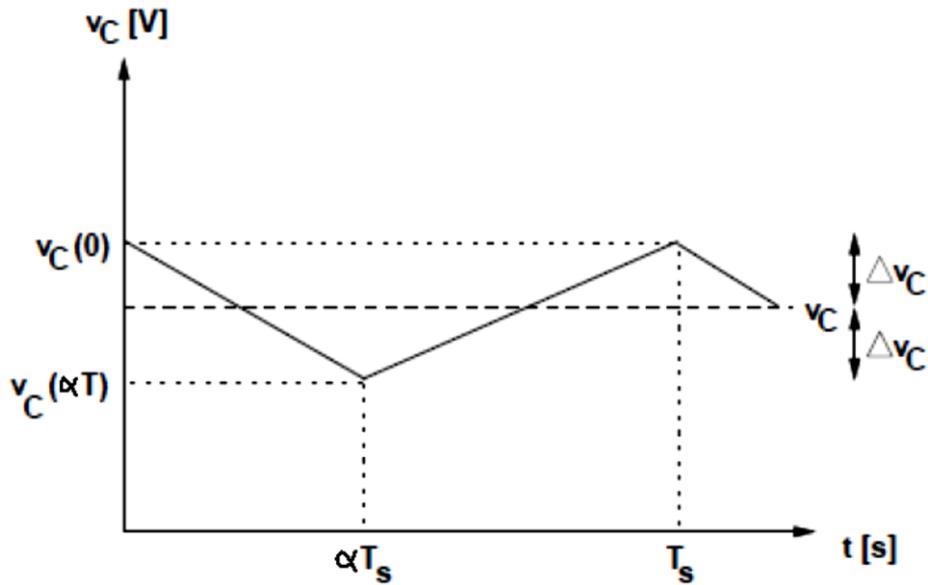
Nous aurons ainsi :

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad [\text{II.36}]$$

$$\int_{-\Delta v_c}^{\Delta v_c} V_c = \frac{1}{c} \int_0^{\alpha T_s} i_c dt \quad [\text{II.37}]$$

$$-2\Delta V_c = -\frac{1}{c R} V_s \alpha T_s \quad [\text{II.38}]$$

$$C = \frac{V_c}{2\Delta V_c R F_s} \alpha v \quad [\text{II.39}]$$



Figure(II.23): Ondulation sur la tension de condensateur.

Application numérique

Pour une tension d'entrée ($V_e = V_{pv} = 34$ V) et une tension de sortie ($V_s = V_c = 400$ V), et à partir des équations précédentes on obtient :

$$\alpha = 1 - \frac{34}{400} = 0.915$$

$$R = \frac{400^2}{100} = 1600 \Omega$$

$$i_L = \frac{400}{1600} * \frac{1}{1 - 0.915} = 2.94 A$$

$$\Delta i_L = 0.1 * i_L = 0.294 A$$

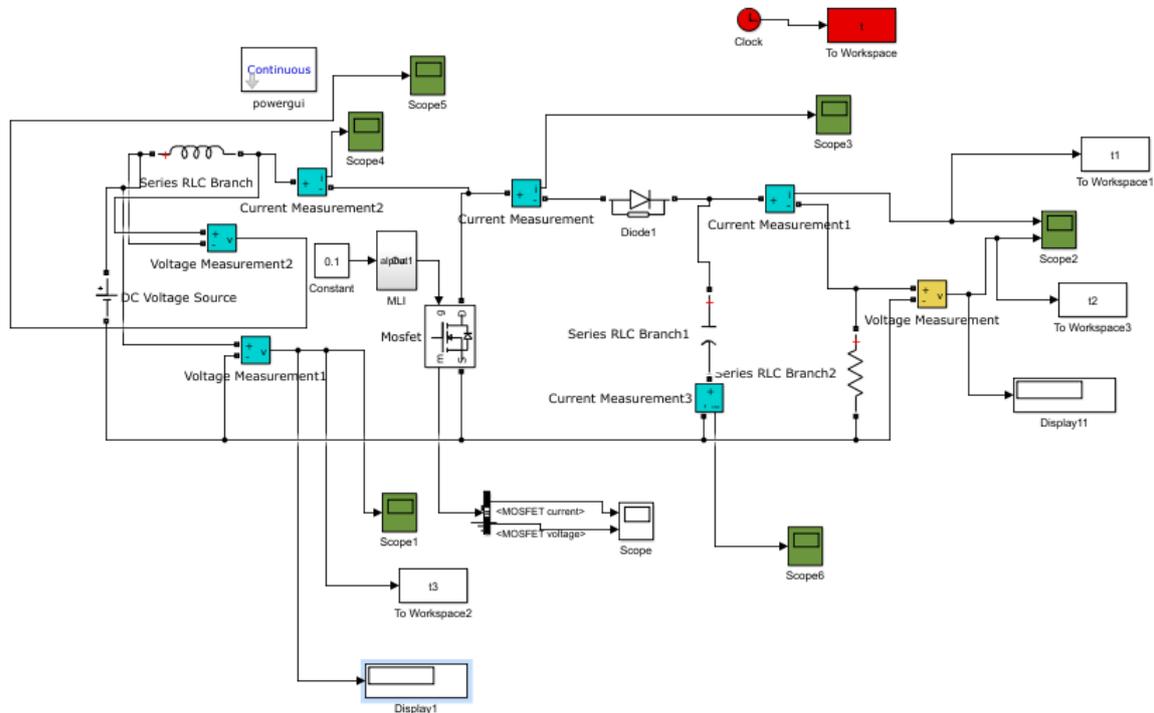
$$L = \frac{34}{2 * 0.294 * 16 * 10^3} * 0.915 = 3.31 mH$$

$$\Delta V_c = 1\% * 400 = 4V$$

$$C = \frac{400}{2 * 4 * 1600 * 16 * 10^3} * 0.915 = 1.79 \mu F$$

II.5.1.6. Simulation du hacheur survolteur

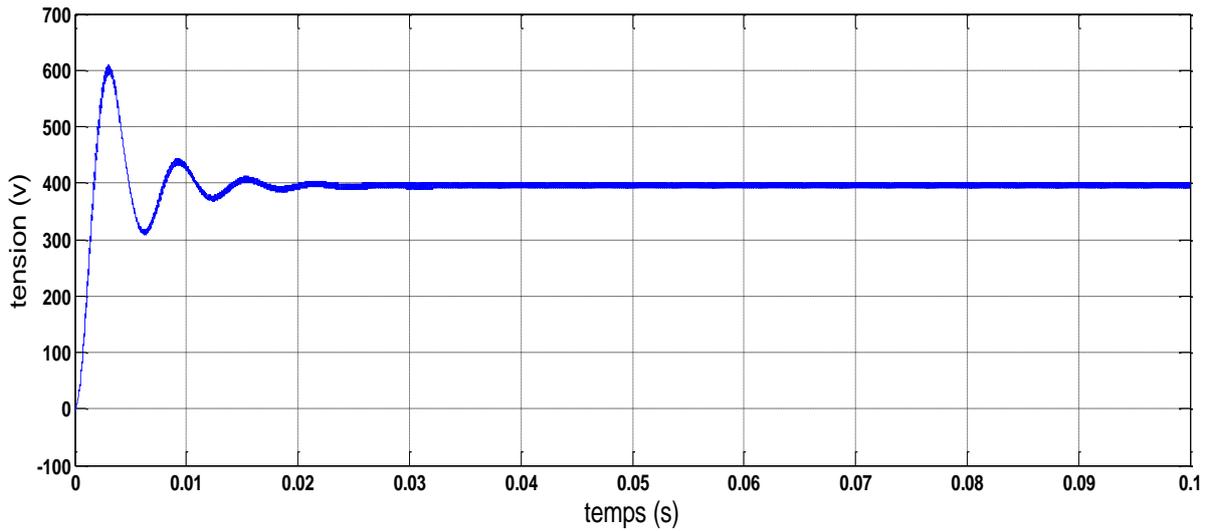
Pour simuler le fonctionnement de l'hacheur élévateur, nous avons utilisé Matlab/SIMPOWER SYSTEM pour nous rapprocher du fonctionnement réel, ce qui est présenté par la figure (II.24).



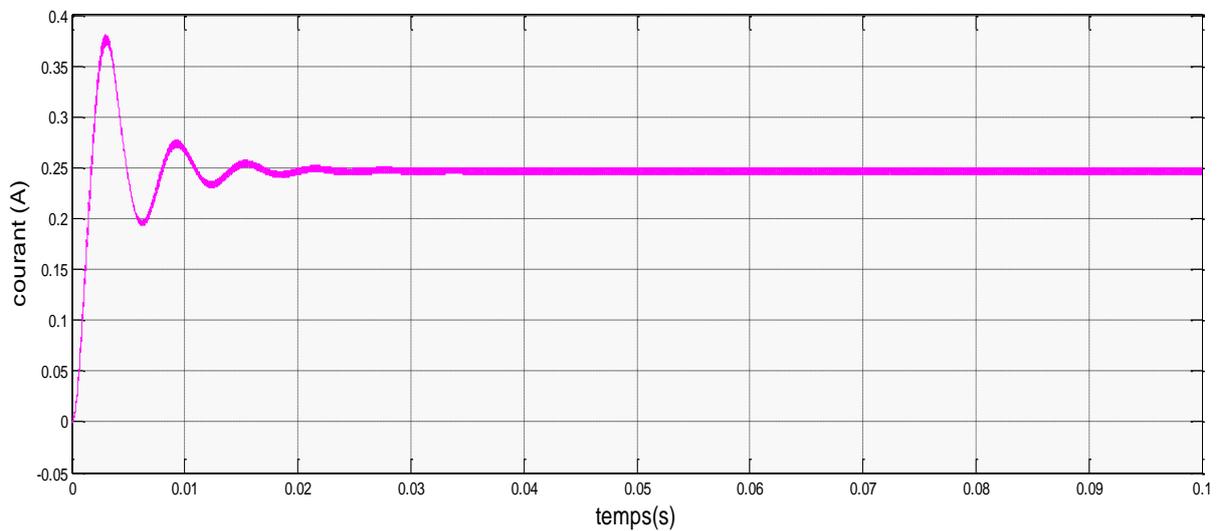
Figure(II.24): Schéma de simulation du hacheur survolteur « **BOOST** ».

Les résultats de simulation de l'hacheur survolteur sont présentés sur figure(II.25) figure(II.26). Ces figures représentent la tension et le courant de sortie de l'hacheur.

Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Le courant et la tension de sortie subissent un régime transitoire oscillant puis se stabilisent en régime permanent. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.



Figure(II.25): Tension de sortie du hacheur survolteur.

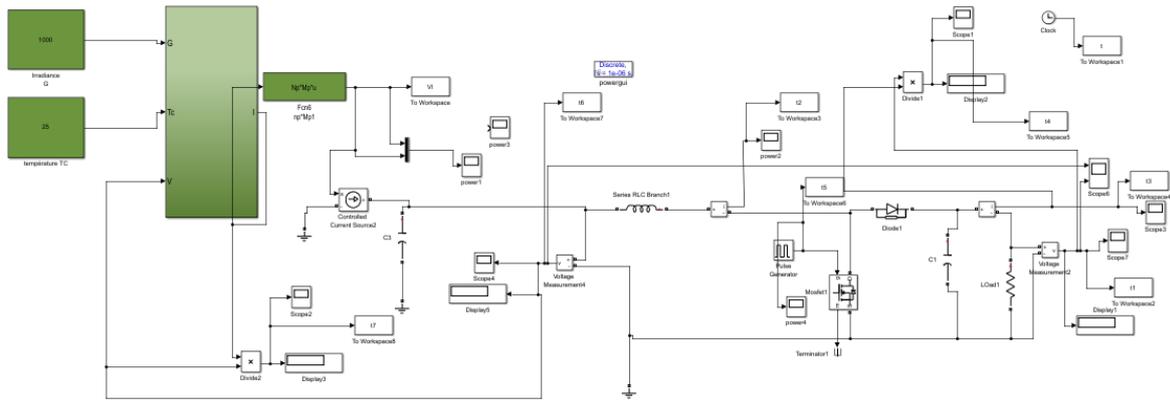


Figure(II.26): Courant de sortie du hacheur survolteur.

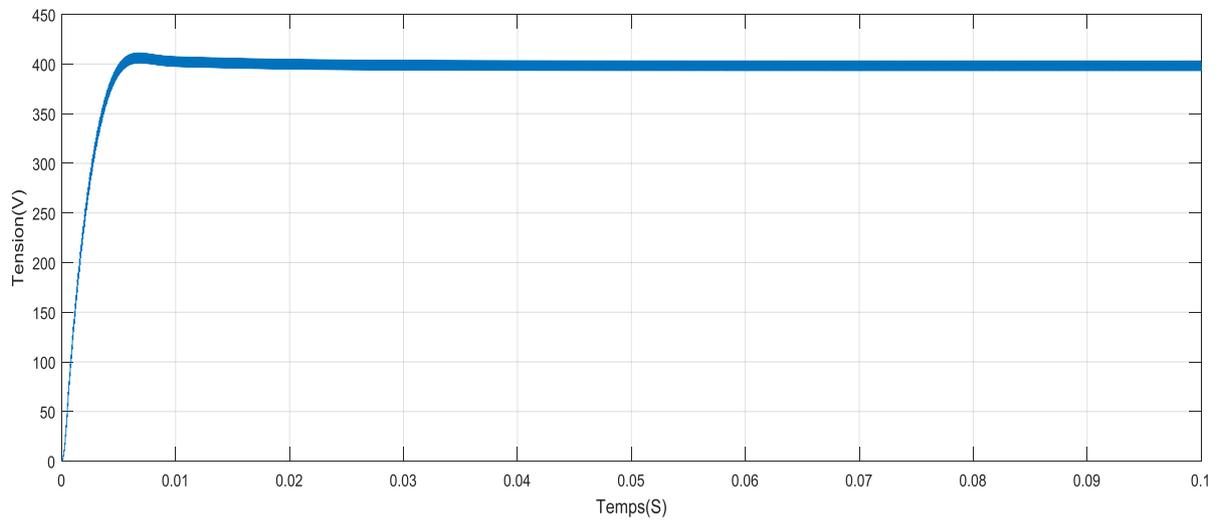
II.5.1.7. Simulation d'un générateur PV alimentant une charge résistive

Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque constitué d'un panneau PV relié à un hacheur alimentant une charge résistive.

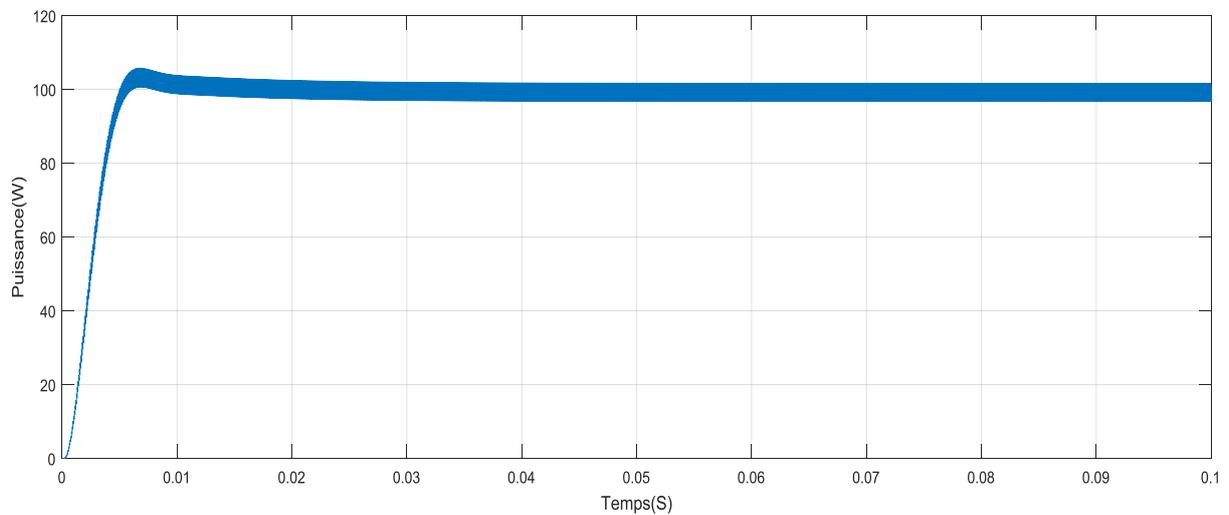
❖ Cas PV à cinq paramètres



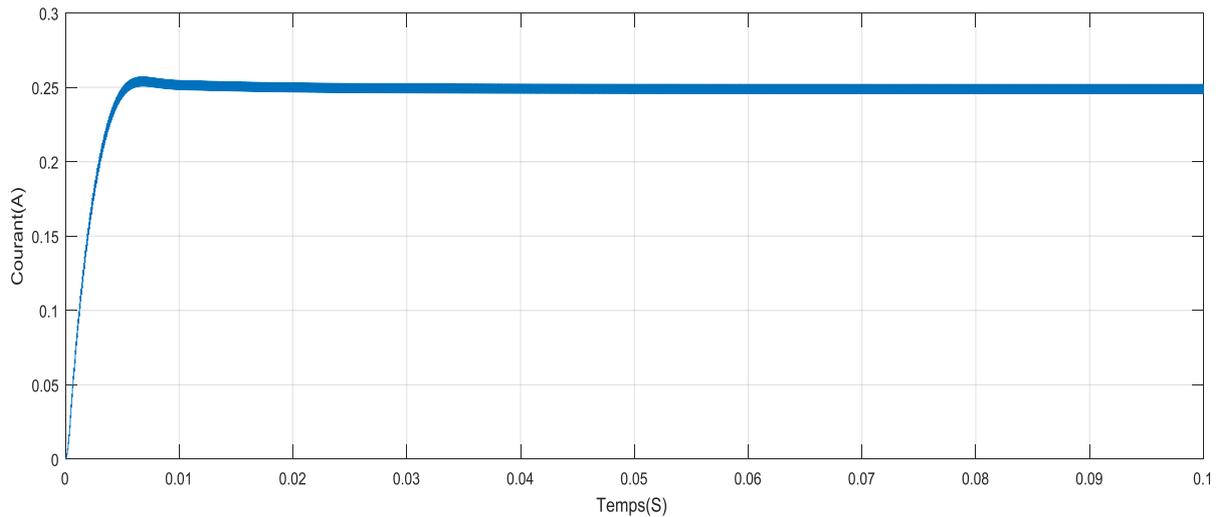
Figure(II.27): Schéma Simulink de simulation.



Figure(II.28): Tension de sortie du système (panneau+hacheur).



Figure(II.29): Puissance de sortie (panneau+hacheur).



Figure(II.30): Courant de sortie du système (panneau+hacheur).

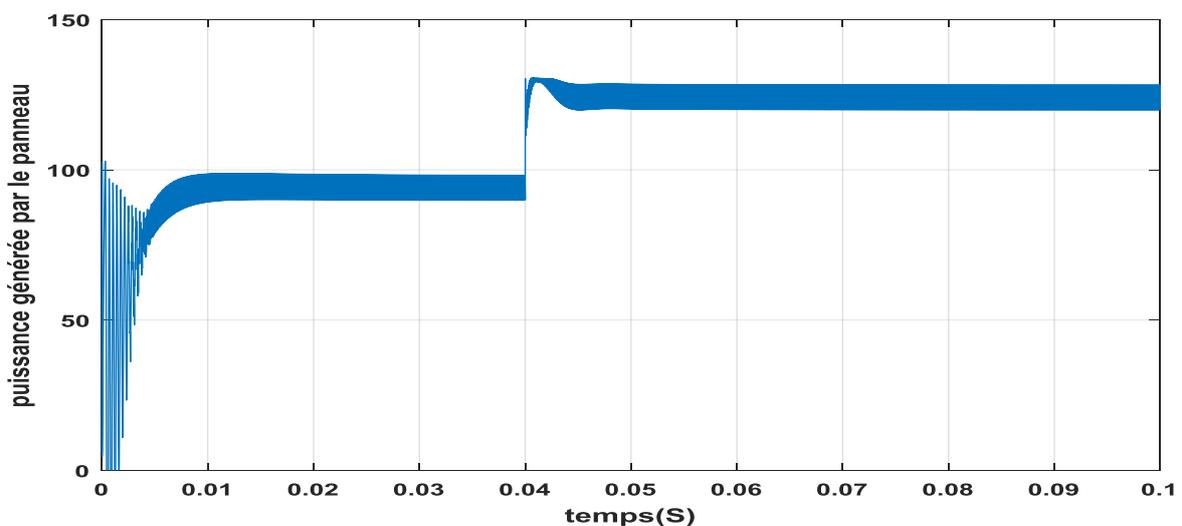
La figure(II:28) montre un établissement de la tension faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

La figure(II.29) montre l'évolution de la puissance consommée par la charge, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent.

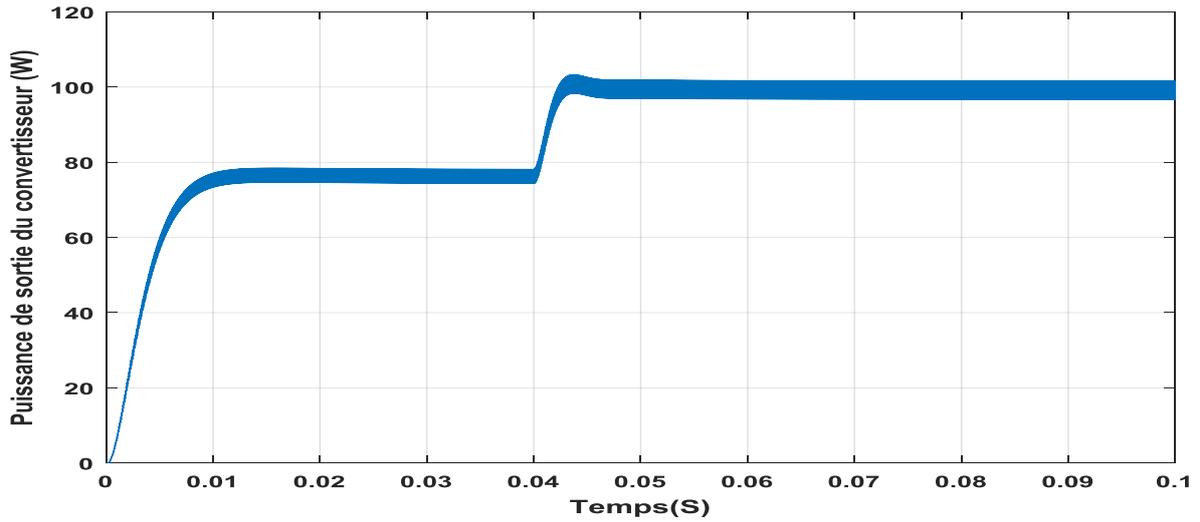
La figure(II.30) montre l'établissement du courant faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

Cas de variation de l'éclairement :

Nous allons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque(panneau–hacheur–charge) pour une température fixe (25°C) et un éclairement variable (750-1000w/m²).

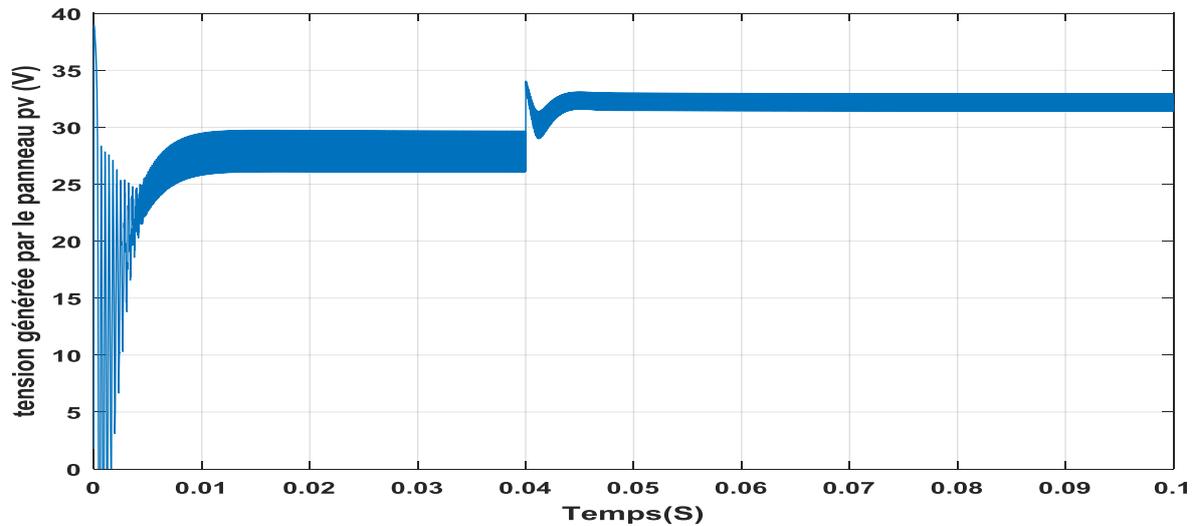


Figure(II.31): Puissance générée par le panneau PV avec un éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m².

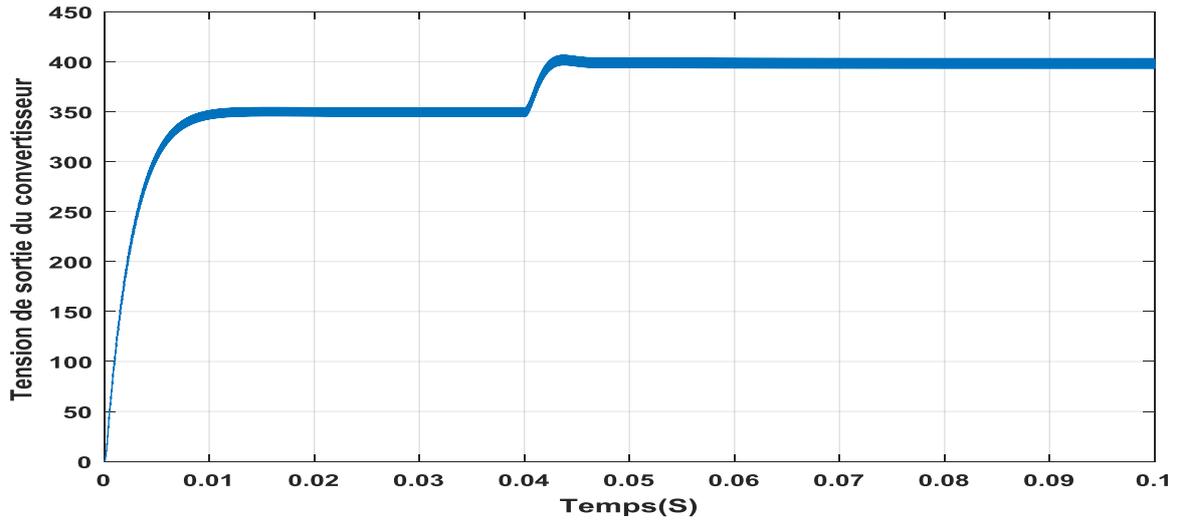


Figure(II.32): Puissance consommée par la charge avec un éclairement variable: 750W/m^2 à 1000W/m^2 .

Les figures (II .31) et(II.32) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement ($750- 1000\text{W/m}^2$).



Figure(II.33): Tension générée par le panneau avec un éclairement variable: 750W/m^2 à 1000W/m^2 .

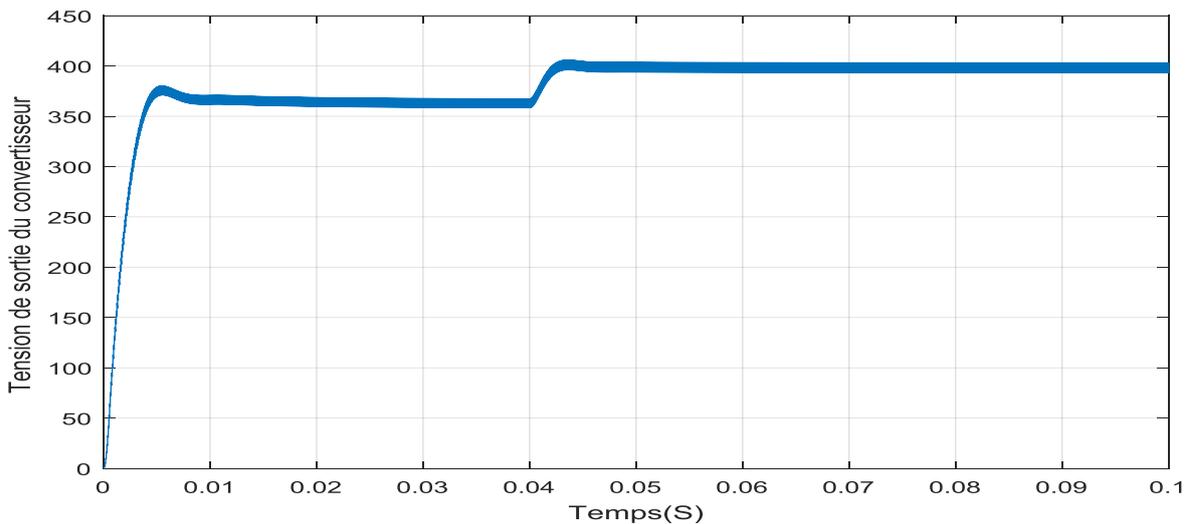


Figure(II.34): Tension aux bornes de la charge avec un éclairage variable 750W/m^2 à 1000W/m^2 .

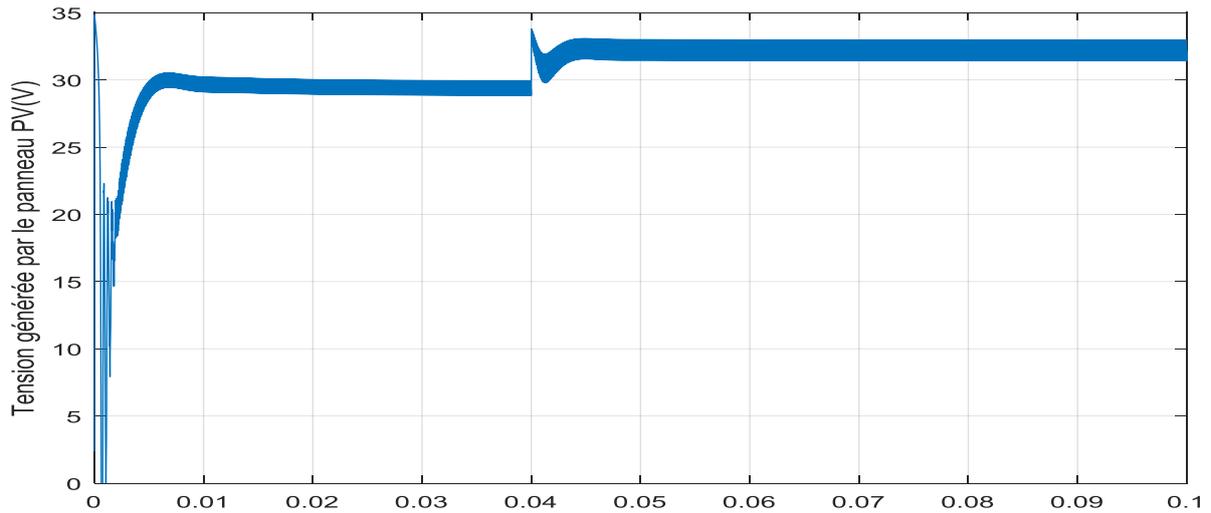
Les figures (II .33) et(II.34) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec l'augmentation l'éclairément ($750- 1000\text{W/m}^2$).

Cas de variation de température

Nous allaons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque(panneau–hacheur-charge) pour un éclairément fixe(1000 W/m^2)et une variation de température ($50^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$) à l'instant 0.04 S

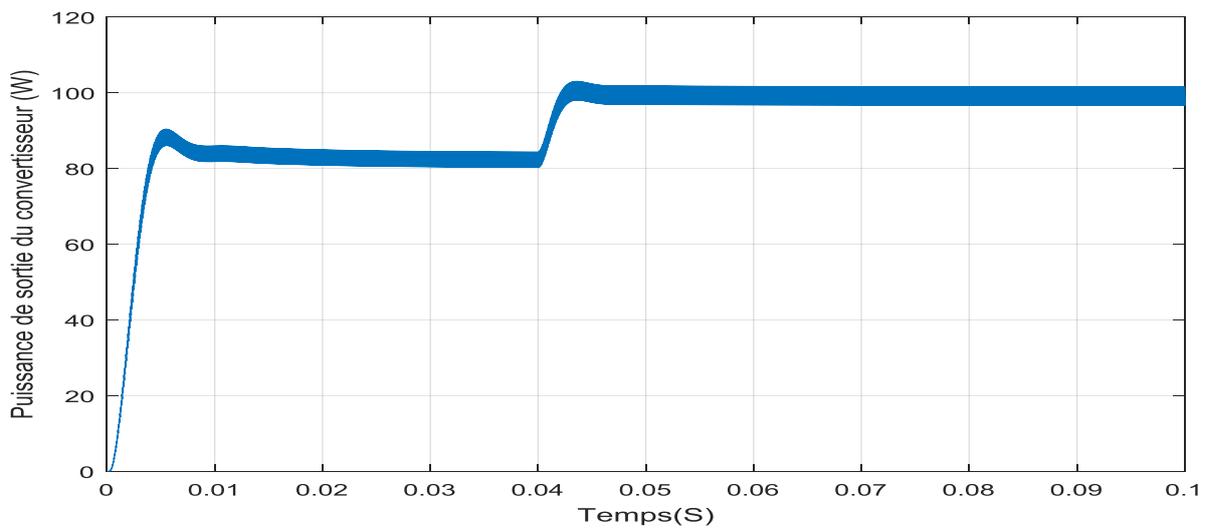


Figure(II.35): Tension aux bornes de la charge avec une variation de température de 50°C à 25°C .

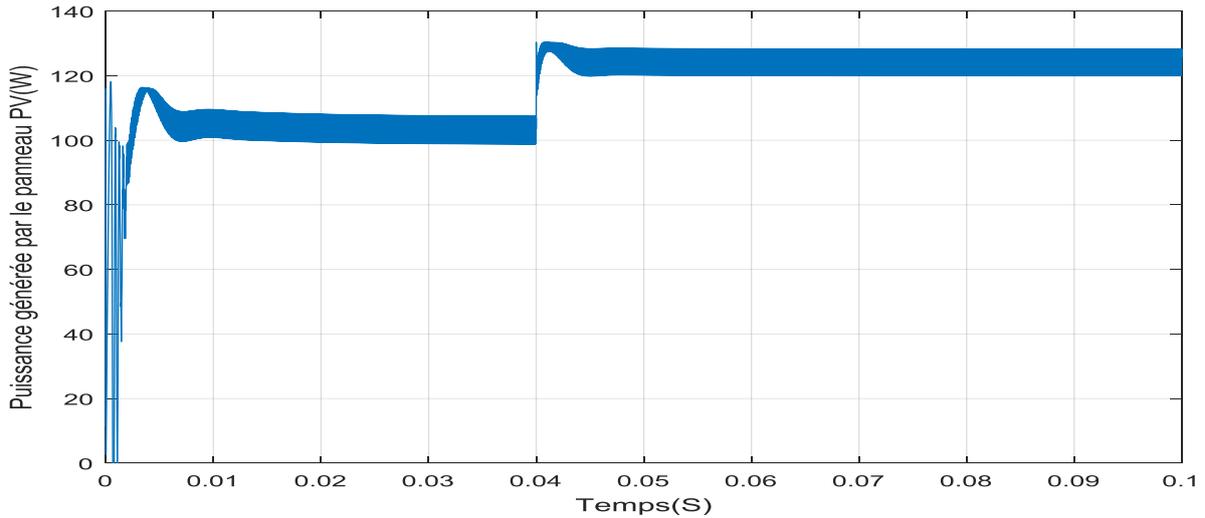


Figure(II.36): Tension générée par le panneau PV avec une variation de température de 50°C à 25°C.

Les figures (II.35) et(II.36) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).



Figure(II.37): Puissance consommée par la charge avec une variation de température : 50°C à 25°C

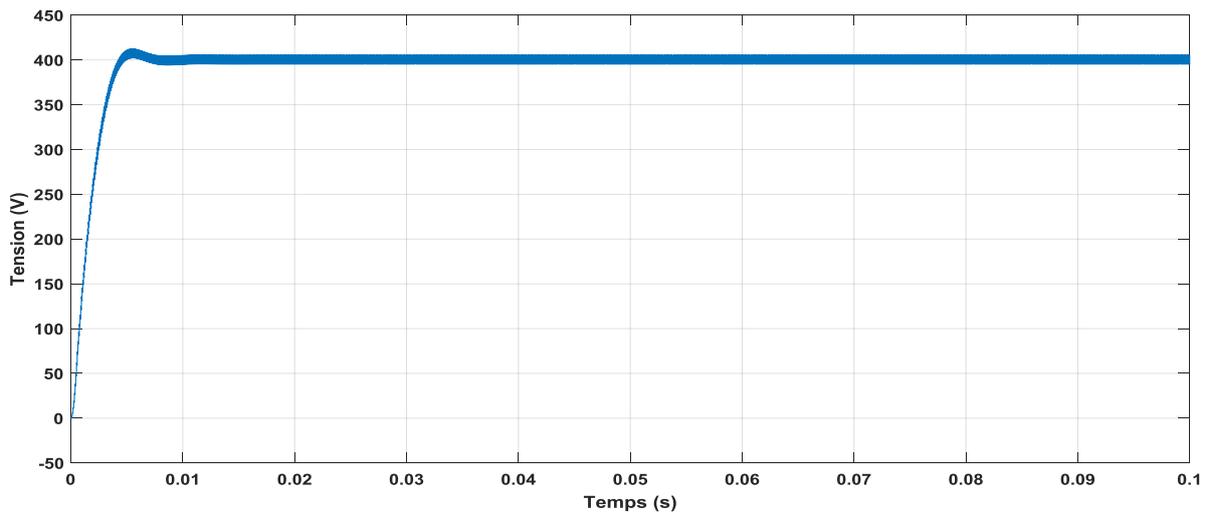


Figure(II.38) : Puissance générée par le panneau PV avec une variation de température de 50°C à 25°C.

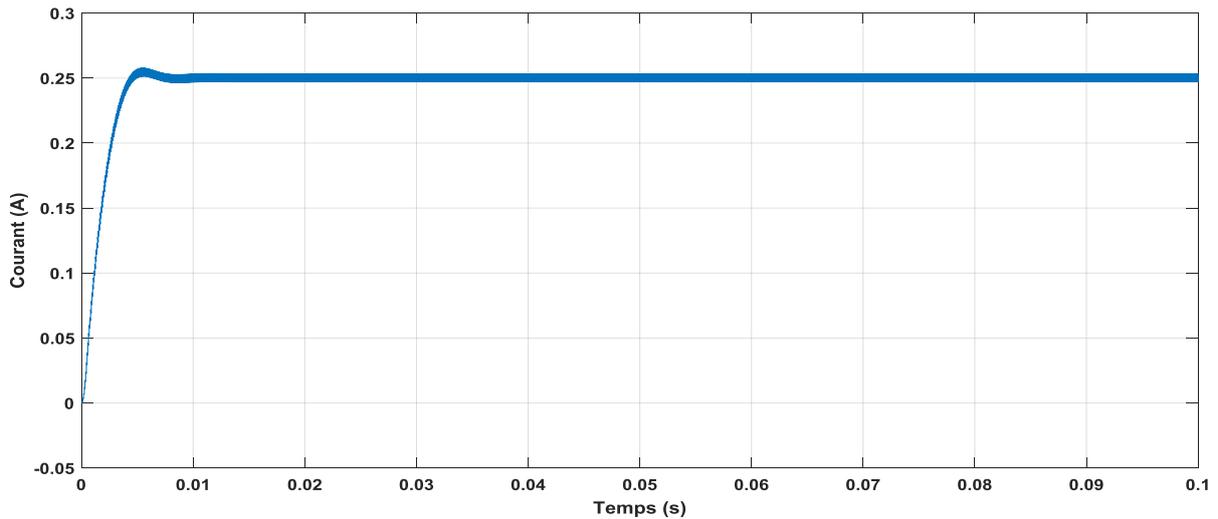
Les figures (II.37) et (II.38) présentent l'évolution de la puissance par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

Cas du modèle à trois paramètres

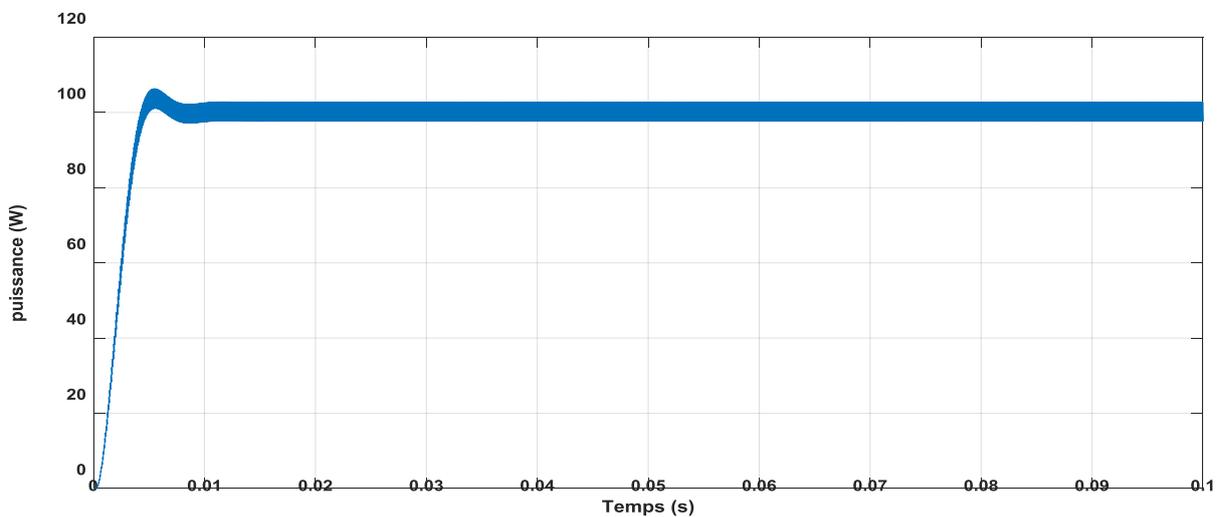
Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque constitué d'un panneau PV dont le modèle est à trois paramètres reliés à un hacheur alimentant une charge résistive.



Figure(II.39): Tension de sortie du système (panneau+hacheur).



Figure(II.40): Courant de sortie du système (panneau+hacheur).



Figure(II.41): Puissance de sortie du système (panneau+hacheur).

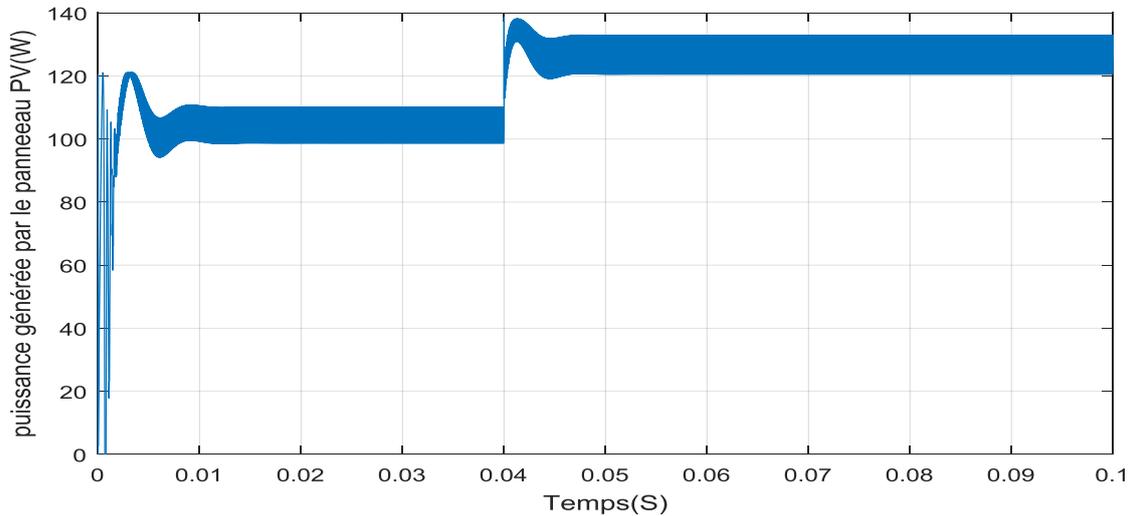
La figure (II:39) montre un établissement de la tension faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

La figure (II: 40) montre l'établissement du courant faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

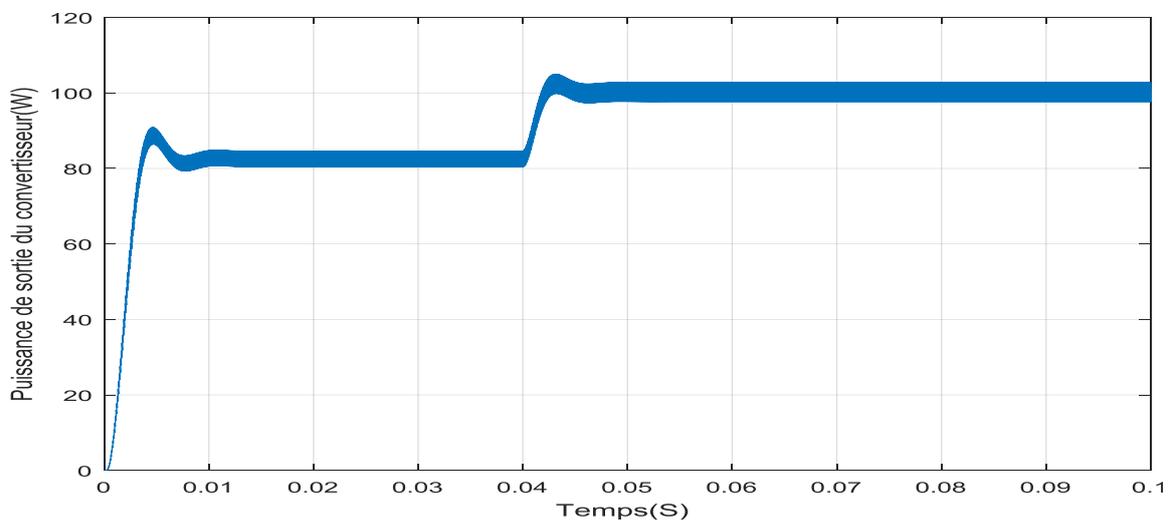
La figure(II:41) montre l'évolution de la puissance consommée par la charge. On note qu'elle est légèrement inférieure à celle générée par le panneau PV, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent.

Cas de la variation de température :

Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque(panneau–hacheur-charge) de modèle à trois paramètres pour un éclairement fixe(1000W/m²)et une variation de température de 50°C à 25°C à l’instant 0.04 S.

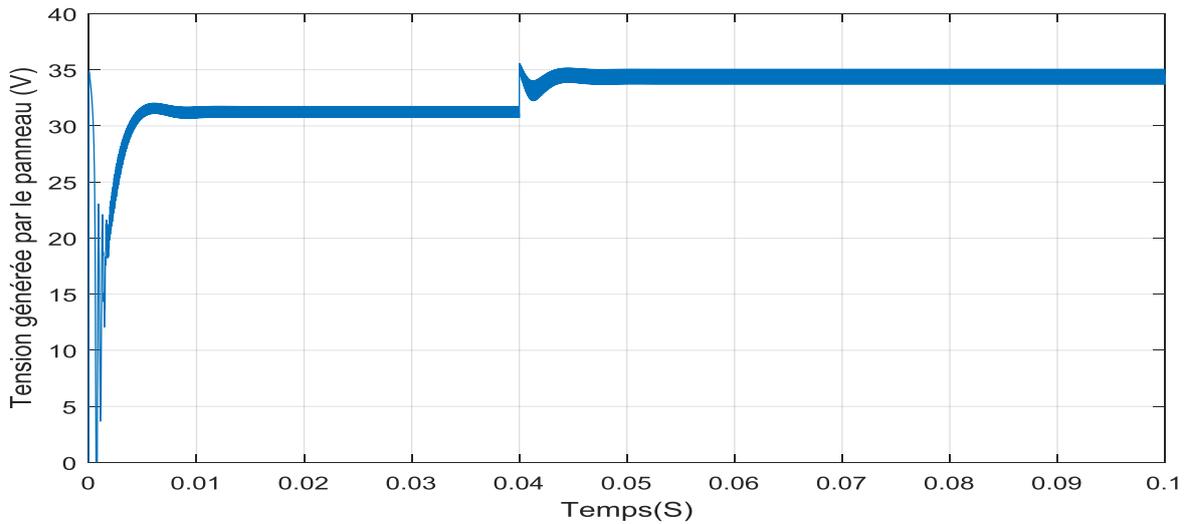


Figure(II.42) : Puissance générée par le panneau PV avec une variation de température de 50°C à 25°C.

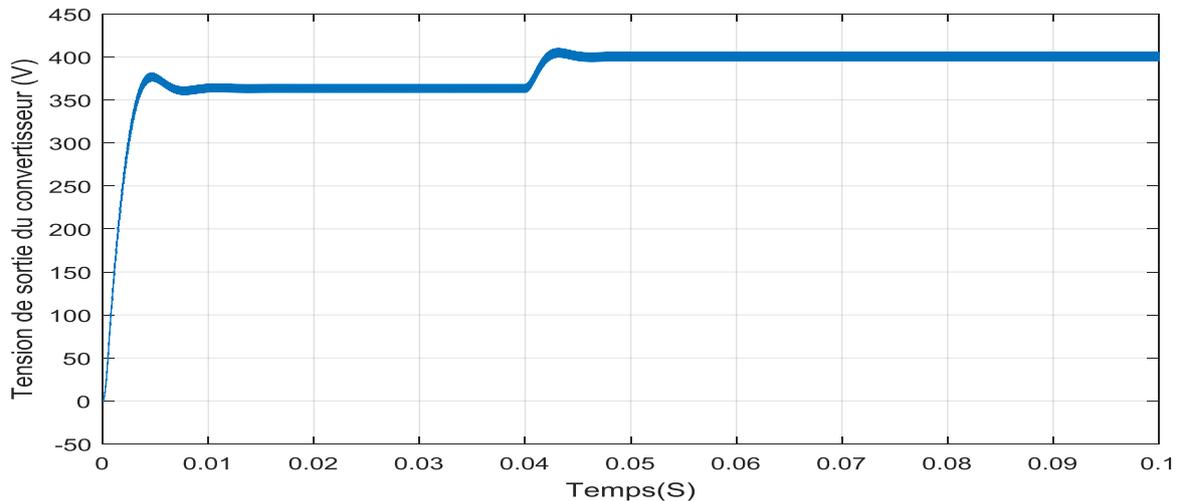


Figure(II.43): Puissance consommée par la charge avec une variation de température de 50°C à 25°C

Les figures (II.42) et (II.43) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température de 50°C à 25°C.



Figure(II.44): Tension générée par le panneau pour une variation de température de 50°C à 25°C

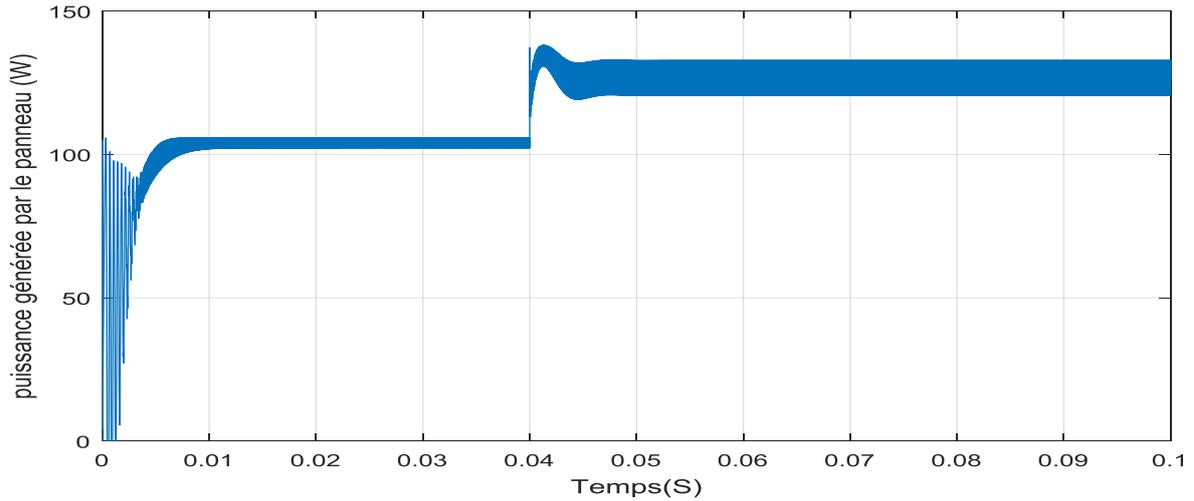


Figure(II.45): Tension aux bornes de la charge pour une variation de température de 50°C à 25°C

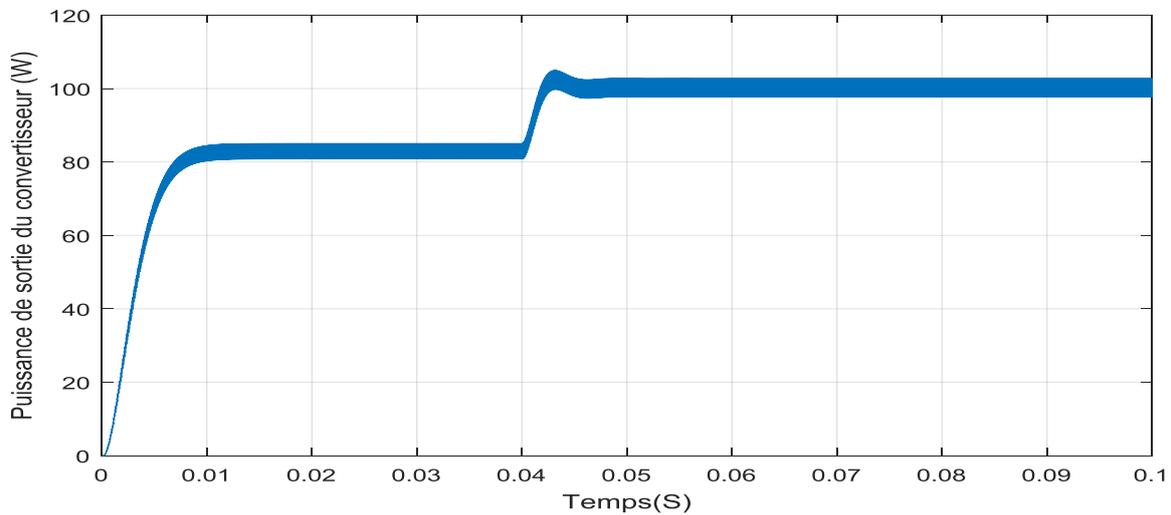
Les figures (II.44) et(II.45) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température de 50°C à 25°C.

Cas de la variation de l'éclairement:

Nous allons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque(panneau–hacheur–charge)cas du modèle à trois paramètrespour une température fixe (25°C) et un éclairement variable de 750 à 1000W/m².

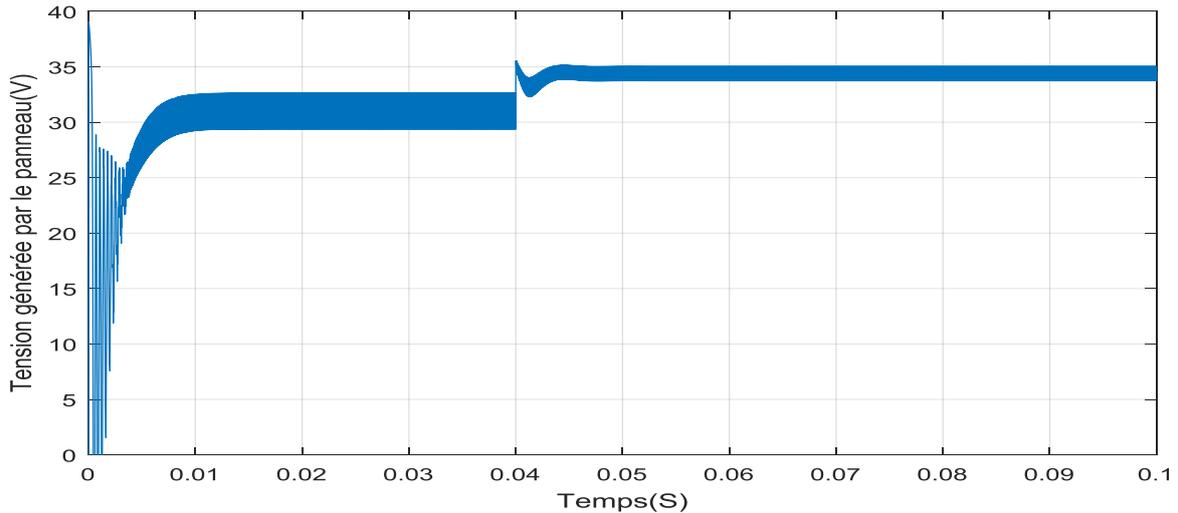


Figure(II.46): Puissance générée par le panneau pour un éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m²

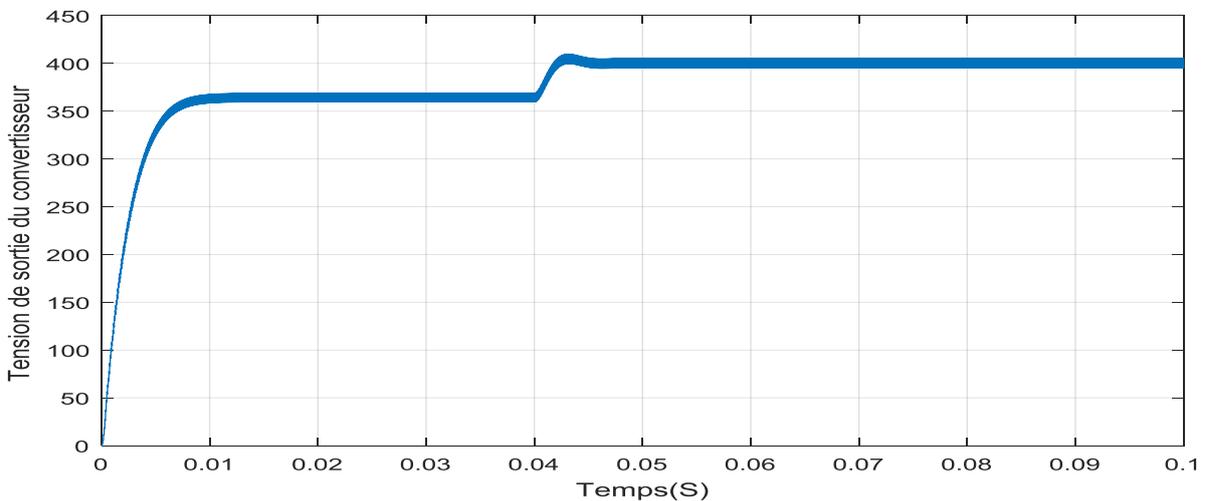


Figure(II.47): Puissance consommé par la charge pour un éclairement variable de 750W/m² à 1000W/m².

Les figures (II .46) et(II.47) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement de 750 à 1000W/m².



Figure(II.48): Tension générée par le panneau PV pour un éclairage variable de 750W/m² à 1000W/m².



Figure(II.49): Tension aux bornes de la charge avec un éclairage variable 750 W/m² à 1000W/m²

Les figures (II.48) et(II.49) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec l'augmentation l'éclairage de 750 à 1000W/m².

Remarque:

Dans cette partie nous avons utilisé deux modèles du GPV(trois paramètres et cinq paramètres) dans la simulation du systèmeGPV-charge. On a remarqué dans le cas à trois paramètres que le GPV produit plus de puissance à tension plus élevée par rapport à celui à cinq paramètres. Cela est aussi visible dans les caractéristiques du système GPV-charge lors de la variation de la température ou de l'éclairage. Cela est dû à la présence dans le modèle à 5 paramètres des résistances qui conduiront à une augmentation de la puissance dissipée.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté deux modèles du générateur PV, constitué de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle. C'est le cas du modèle à trois paramètres et cinq paramètres. Ensuite on a présenté les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour une température et un éclairement fixe ($T_c=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$). Ainsi que l'évolution des grandeurs tension, courant et puissance en fonction de temps. Ensuite nous avons étudié l'effet de la variation d'éclairement à température fixe, ce qui nous a permis de conclure que la puissance et le courant augmente avec l'accroissement de l'éclairement et inversement l'augmentation de la température à un effet inverse.

En démarrant la simulation avec des conditions initiales nulles, les grandeurs courant tension et puissance converge vers leur valeurs nominales avec de faible oscillations.

Après la présentation du modèle de l'hacheur élévateur et sa stratégie de commande MLI nous avons présenté les résultats de simulations du système générateur PV–hacheur-charge. Nous remarquons que l'insertion de l'hacheur ne modifie pas les caractéristiques du générateur PV.

Chapitre III

Commandes MPPT

III.1. Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) c-à-d poursuite du point à puissance maximale, associées à la commande du hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre ; En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

Dans ce chapitre, on présentera l'aspect théorique de deux méthodes pour le suivie du point de fonctionnement à puissance maximale dusystème photovoltaïque et qui sont la méthode « perturbation et observation »et la méthode « conductance incrémentale ».

III.2. Commandes MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de l'hacheur[20].

La technique de suivi du point à puissance maximal (Maximum Power Point Tracking :MPPT) a été développé depuis 1968,cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite deux algorithmes de

commande celui de la méthode « perturbation et observation » et la méthode « conductance incrémentale » [21].

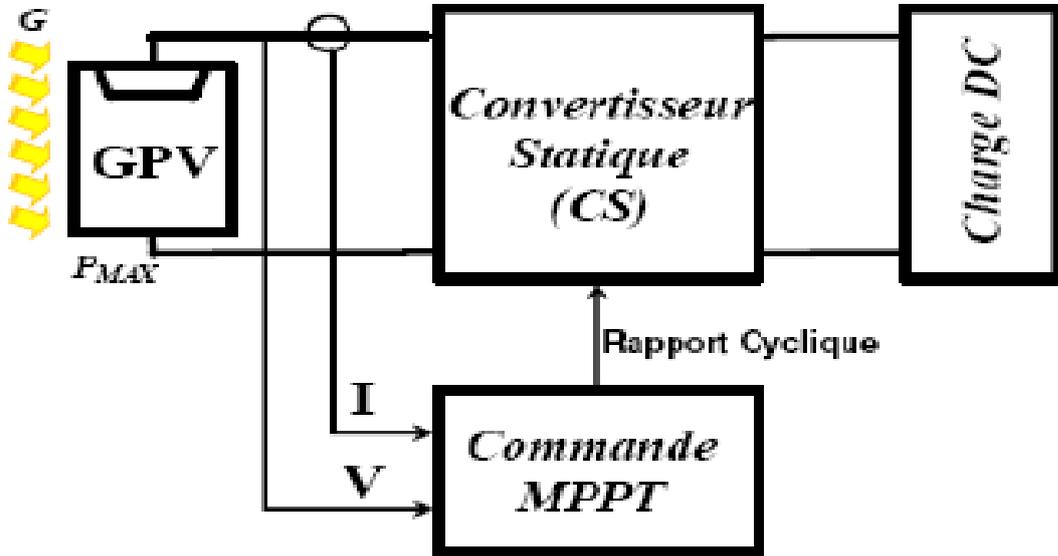


Figure (III.1) : Schéma de principe du convertisseur MPPT. [26]

III.3.Principe de la Recherche du MPP

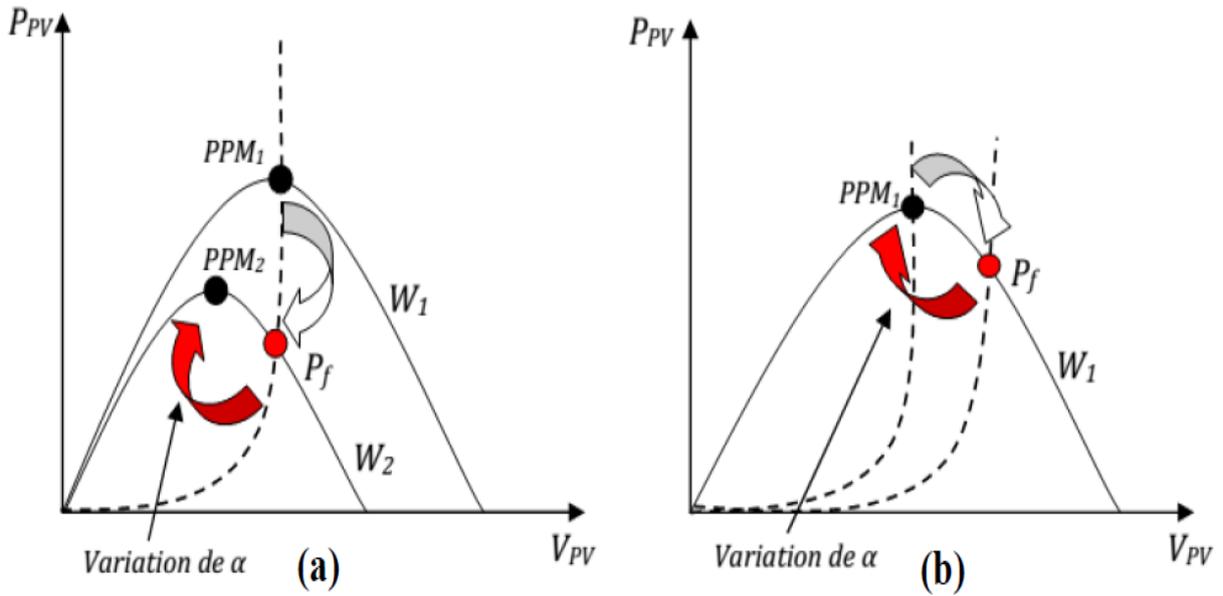
Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la Figure(III.2).

La puissance incidente W_1 n'est maximale que pour un rapport cyclique optimal (α_{1opt} : point PPM1 sur la figure(III.2_a)).

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

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

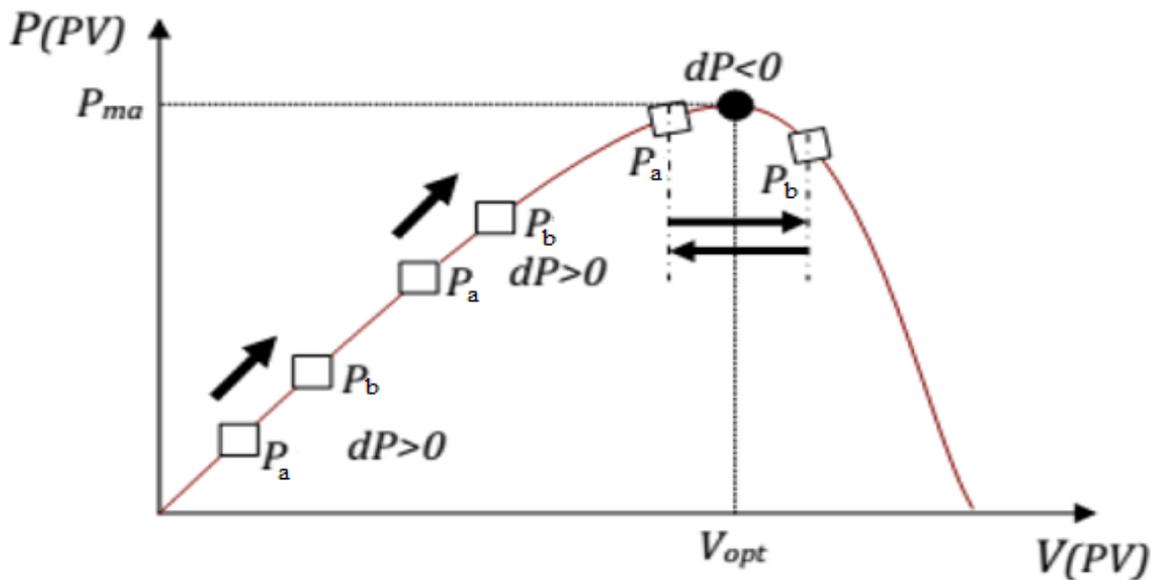
De même, une variation de la charge RFigure(III.2_b): le point de puissance maximale dévie d'abord de sa position optimale (PPM1) et donc pour revenir vers ce même PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique « α ». De cette manière, le système sera toujours amené à son optimum de puissance.



Figure(III.2): Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclaircement (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.3) 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, P_a prend la valeur P_b et on effectue une nouvelle mesure de I_{pv}, V_{pv} pour calculer la nouvelle puissance P_b .



Figure(III.3) : Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM.

III.4. Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation et / ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres [22].

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

III.4.1. Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc....[23]

III.4.2. Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction

de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc....[23]

III.5.Méthode de perturbation et observation (P&O)

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{PV} avec un ΔV et on observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

-Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

- Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Sur la figure (III.2) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe $P(V)$ du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce qui nous amène à $\Delta P > 0$ avec $[\Delta P = P(K) - P(K-1)]$ le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c-à-d vers le point B2.

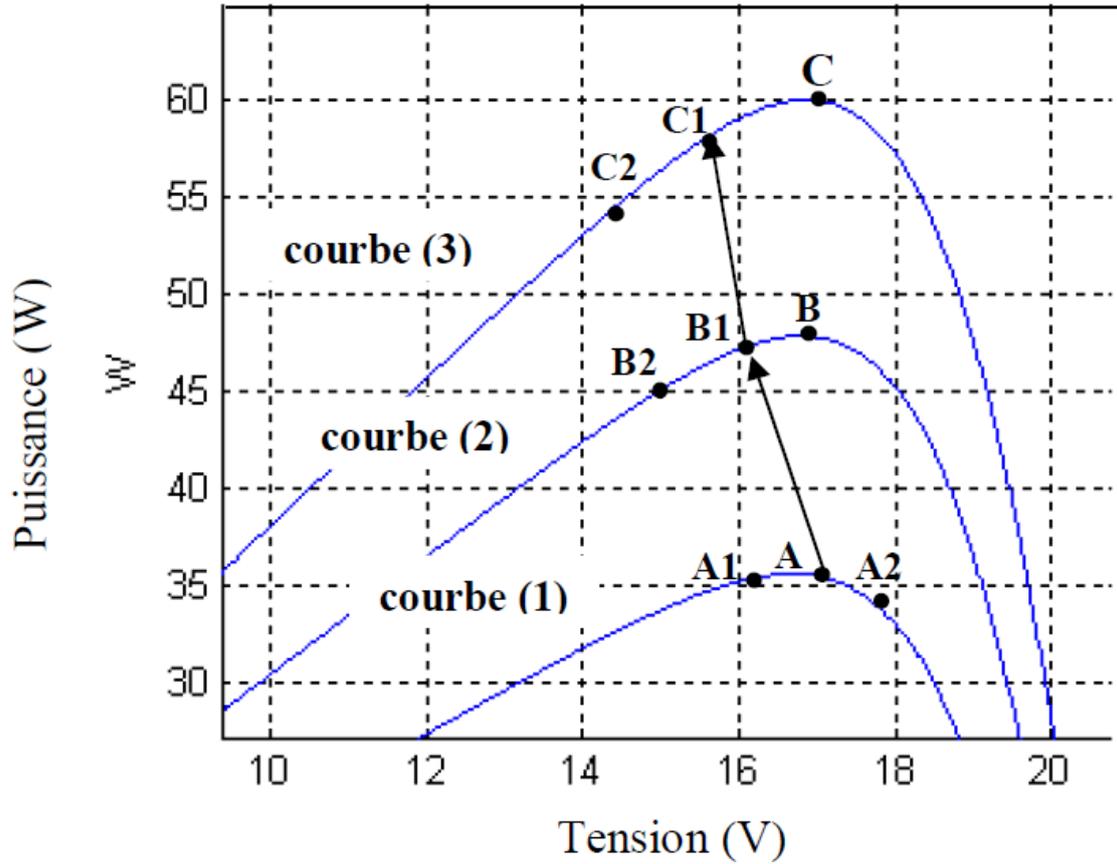


Figure (III.4) : Comportement de l’algorithme P&O sous un changement de l’éclairement.

Si l’éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point C1 de la courbe (3) au lieu du point B2 sur la courbe (2) alors le MPPT atoujours $\Delta P > 0$ et il déplace le point de fonctionnement vers le point C2.

A partir des points $A \rightarrow B1 \rightarrow C1 \rightarrow C2$ l’algorithme P&O continu à s’éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminue [20].

III.5.1. Organigramme Perturber et Observer (P&O)

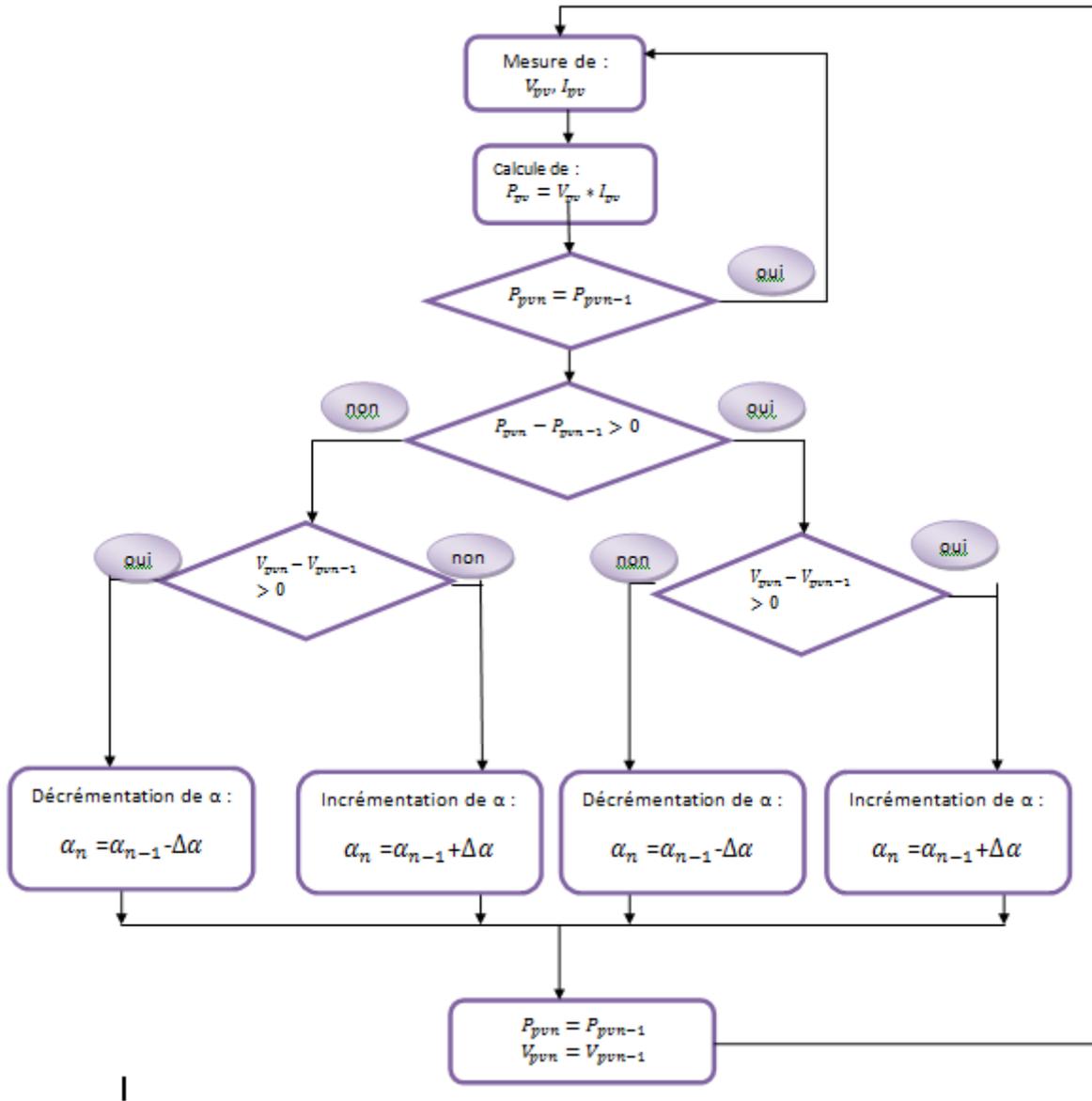


Figure (III.5): Organigramme de la méthode P&O.

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k, puis on la compare à la précédente de l'instant (k-1). Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au

contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [24].

III.5.2. Avantages et inconvénients de P&O

➤ Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

➤ Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [25].

III.6. Méthode de conductance incrémental

Une autre alternative à la commande P&O, est la commande à incrémentation de conductance qui se base sur la dérivée de la conductance du générateur PV ($dG = dI/dV$) pour connaître la position relative du MPP, ce qui permet d'appliquer une action de contrôle adéquate poursuivant le MPP.

La puissance en sortie de la source peut s'écrire :

$$P = I * V$$

D'où en dérivant :

$$\frac{dP}{dV} = I * \frac{dV}{dV} + V * \frac{dI}{dV} \quad \text{[III.1]}$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \quad \text{[III.2]}$$

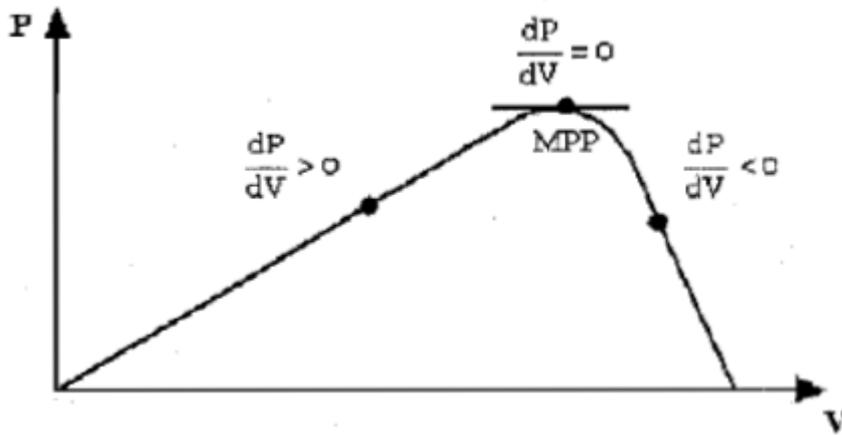
Donc

$$\left(\frac{I}{V}\right) \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad \text{[III.3]}$$

$$\left(\frac{I}{V}\right) \frac{dP}{dV} = G + dG \quad \text{[III.4]}$$

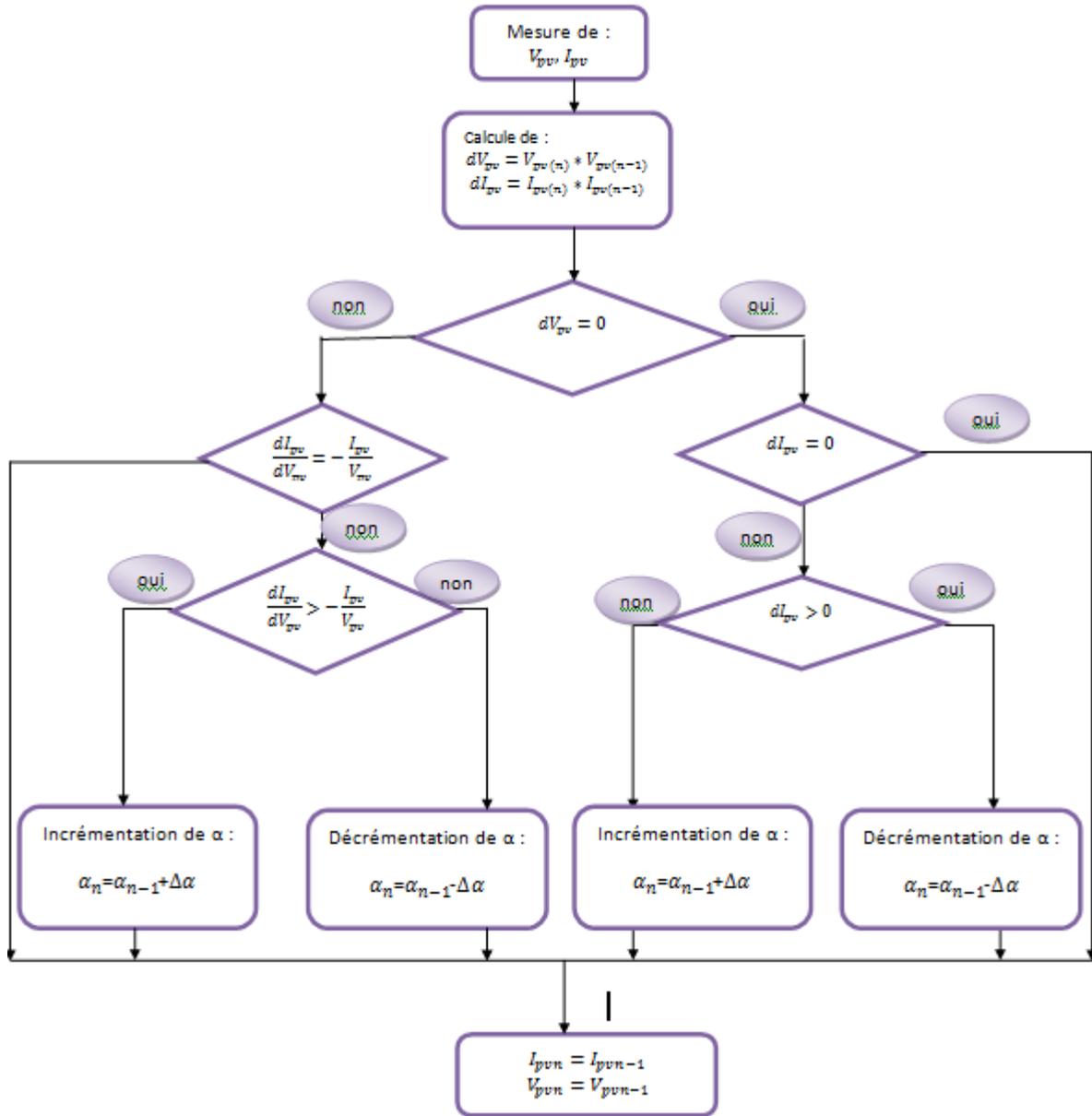
En général, la tension issue de la source est positive, c'est pourquoi, nous pouvons déduire les résultats clés de la méthode de la conductance incrémental.

- $\frac{dP}{dV} > 0$ donc, $G > -dG$ Le point max se trouve à gauche donc il faut incrémenter
- $\frac{dP}{dV} = 0$ donc, $G = -dG$ On est sur le point maximal
- $\frac{dP}{dV} < 0$ donc, $G < -dG$ Le point maximal se trouve à droite donc il faut décrementé



Figure(III.6): Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque.[7]

III.6.1. Organigramme Incrément de la Conductance (INC)



Figure(III.7) :Organigramme de la méthode INC.

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport auMPP.

Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'atteindre le MPP [24].

III.6.2. Les avantages et les inconvénients

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En outre, il réalise l'oscillation inférieure autour du MPP que la technique de P&O, quoique, quand la technique de P&O est optimisée, les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme P&O de MPPT soient, essentiellement, identiques.

Néanmoins, l'inconvénient est que le circuit de commande est complexe et très coûteux.[25].

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux techniques pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par la méthode la plus utilisée perturbe et observe qui a un organigramme simple à implémenté et qui converge rapidement. La deuxième méthode présentée conductance incrémentale, s'appuie sur la variation de la conductance du circuit elle a un organigramme plus complexe est qui ne converge pas rapidement et qui influencé par le pas de simulation et celui de variation de rapport cyclique.

Chapitre IV

Application des deux commendes MPPT

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera l'application des deux méthodes numérique pour le suivie du point de fonctionnement à puissance maximale de notre système photovoltaïque. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur (boost), une commande MPPT ainsi qu'une charge. Les résultats de simulation à éclairement variable et température fixe et vice versa à un éclairement fixe et température variable vont nous permettre de visualiser l'apport de la commande MPPT conduisant à un choix automatique du rapport cyclique de l'hacheur permettant d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque

IV.2. Simulation du système PV menu de la commande MPPT Perturbation et observation

Cette figure présente le schéma Matlab/Simulink de la commande MPPT du type P&O appliquée à notre système PV.

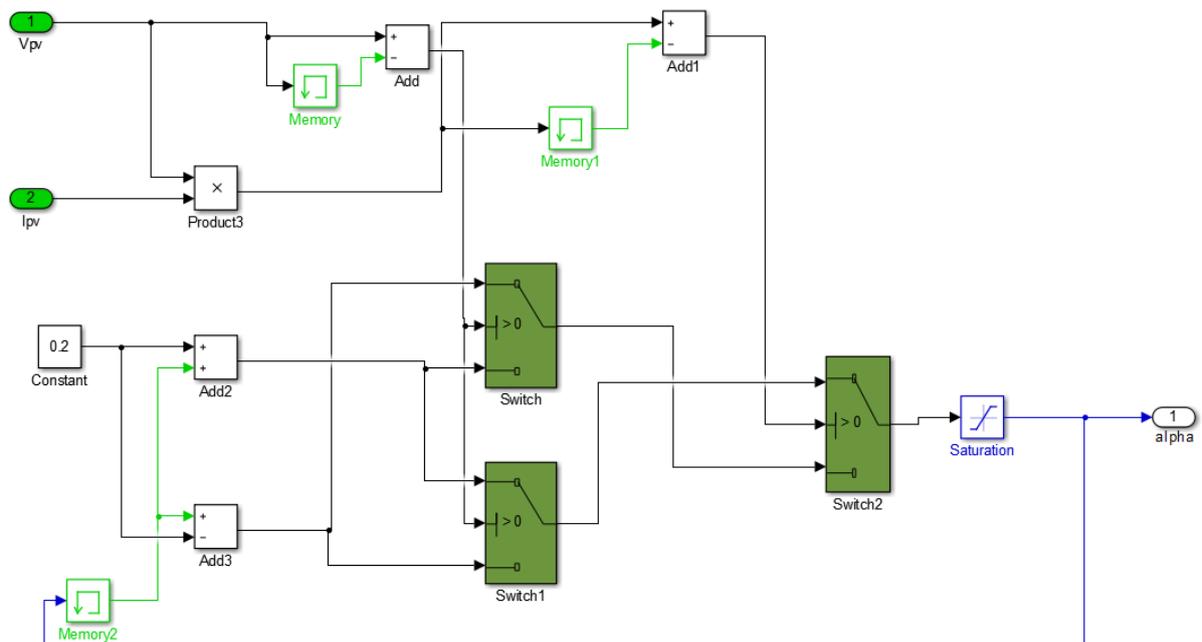


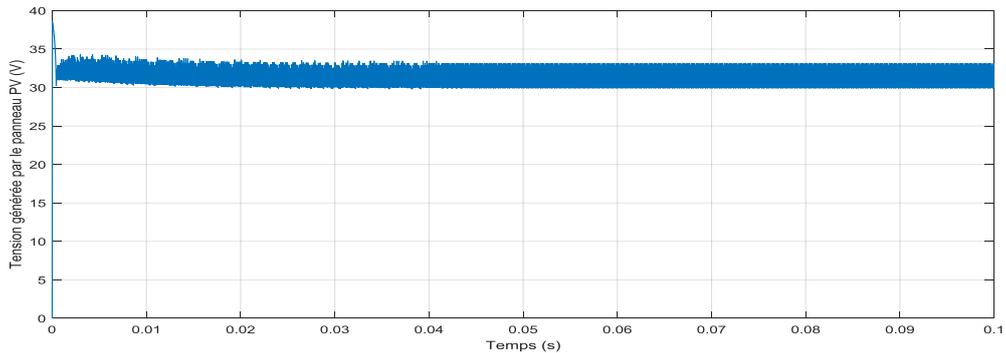
Figure (IV.1): Schéma block de la commande MPPT (P&O)

IV.3. Les résultats de simulation avec la technique perturbe et observe, cas du modèle à cinq paramètres

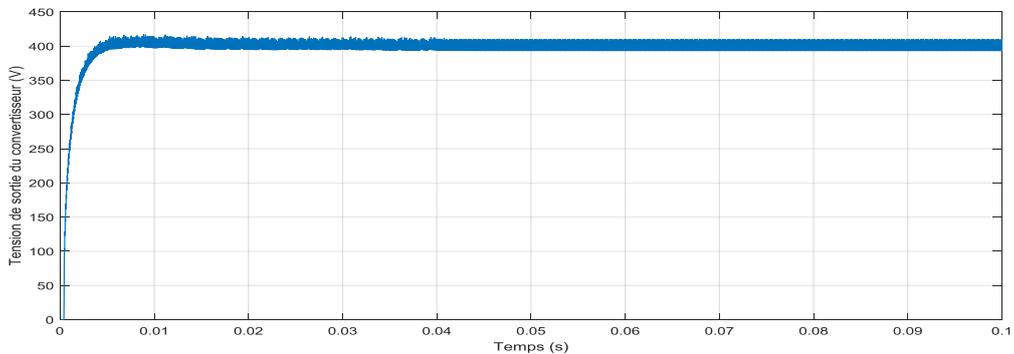
Les figures(IV.2) à (IV.3) présentent l'évolution de la tension générées par le panneau PV et celle de la charge pour un éclairement $E=1000W/m^2$ et une température $T=25^{\circ}C$. On note la présence de faibles oscillations au niveau de la tension source et la tension de charge.

Les figures(IV.4) à (IV.5) présentent l'évolution de la puissance générées par le panneau PV et celle de la charge pour un éclairement de 1000W/m^2 et une température $T=25^\circ\text{C}$. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance générée au niveau de la source et la de charge.

Comme remarque générale pour la tension et la puissance, malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande MPPT perturbe et observe a permis de retrouver le point de fonctionnement nominal de notre charge correspondant au point à puissance maximal du panneau.



Figure(IV.2):Tension générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$



Figure(IV.3):Tension de sortie aux bornes de la charge pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

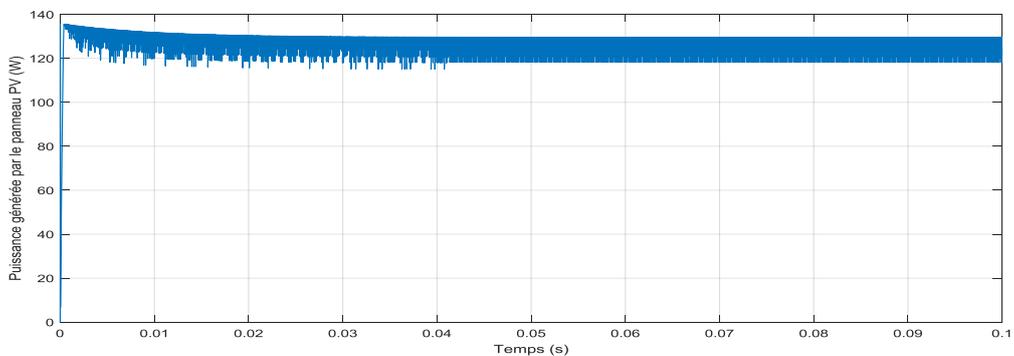


Figure (IV.4):Puissance générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

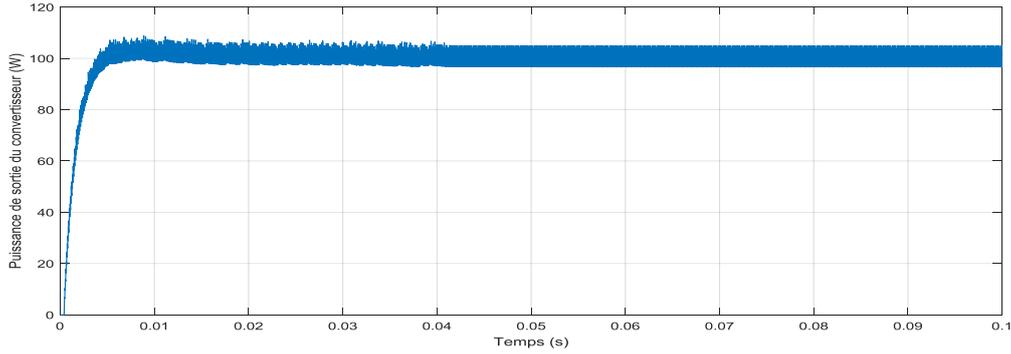


Figure (IV.5): Puissance consommée par la charge pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

IV.3.1. Influence de l'éclairement et la température sur l'évolution instantanée de V et P, cas du modèle à cinq paramètres

Les résultats de la simulation avec le modèle à cinq paramètres subissant des variations de l'éclairement et la température sont présentés par les figures (IV.6) à (IV.9), nous avons visualisé la puissance et tension d'entrée du convertisseur ainsi la puissance et tension de sortie du convertisseur (aux bornes de la charge).

IV.3.1.1. Cas de la variation d'éclairement

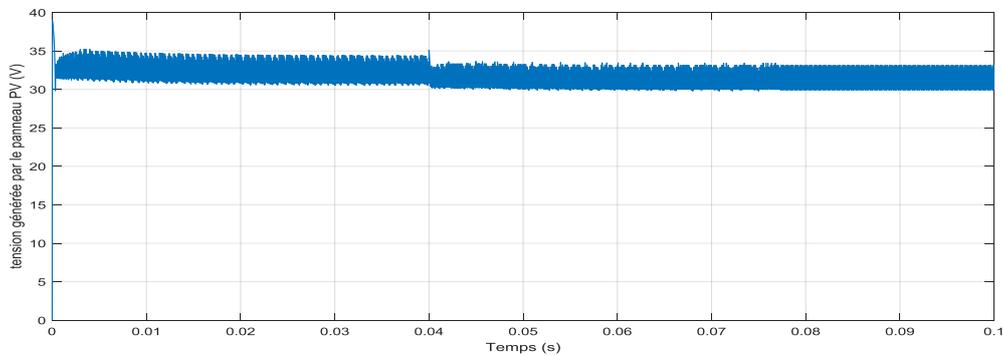


Figure (IV.6) : Tension générée par le panneau PV pour $T=25^\circ\text{C}$ et éclairement variable de 750W/m^2 à 1000W/m^2 .

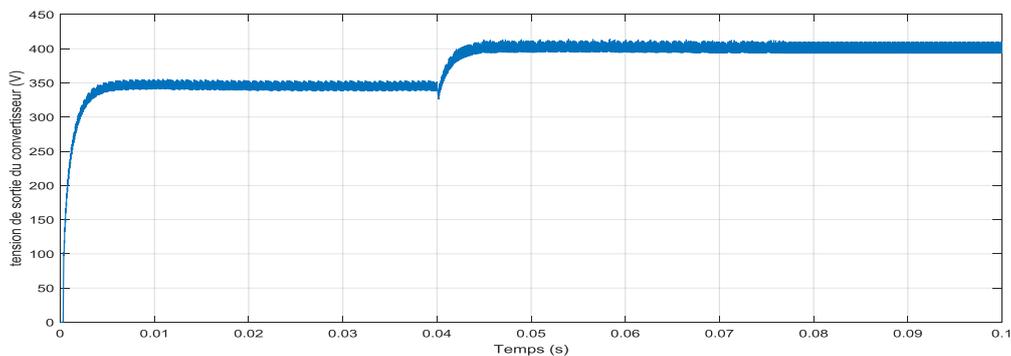


Figure (IV.7): Tension aux bornes de la charge pour $T=25^\circ\text{C}$ et éclairement variable de 750W/m^2 à 1000W/m^2 .

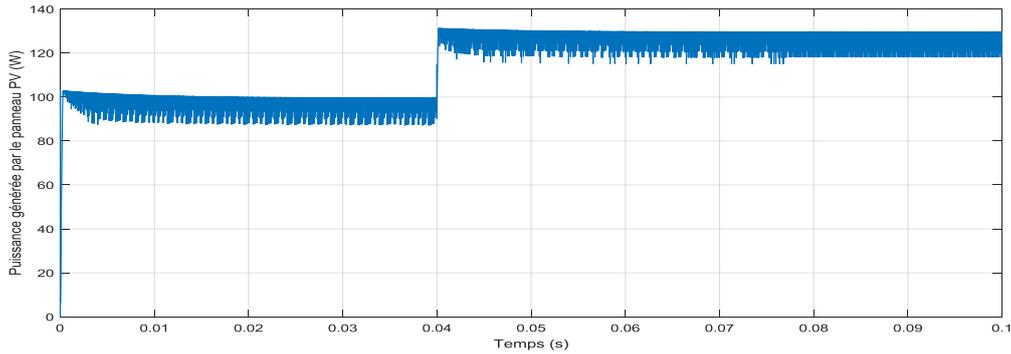


Figure (IV.8): Puissance générée par le panneau PV pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

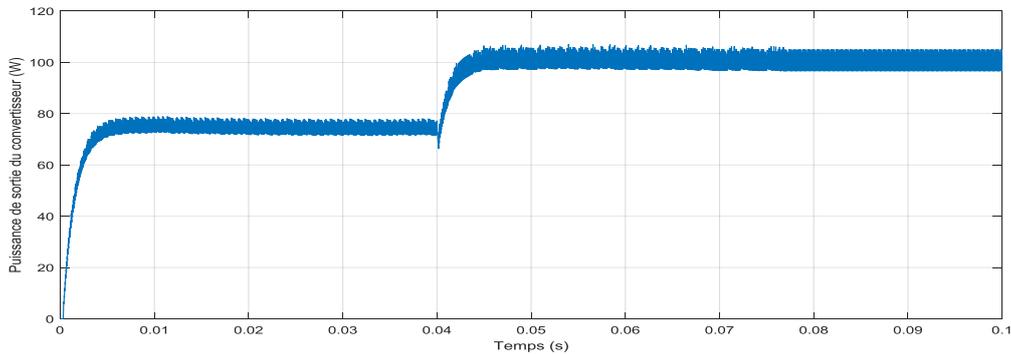


Figure (IV.9): Puissance consommé par la charge pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement variable de $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

La figure (IV.6) et La figure (IV.7) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement de $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

La figure (IV.8) et La figure (IV.9) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec l'augmentation de l'éclairement de $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

IV.3.1.2. Cas de la variation de la température

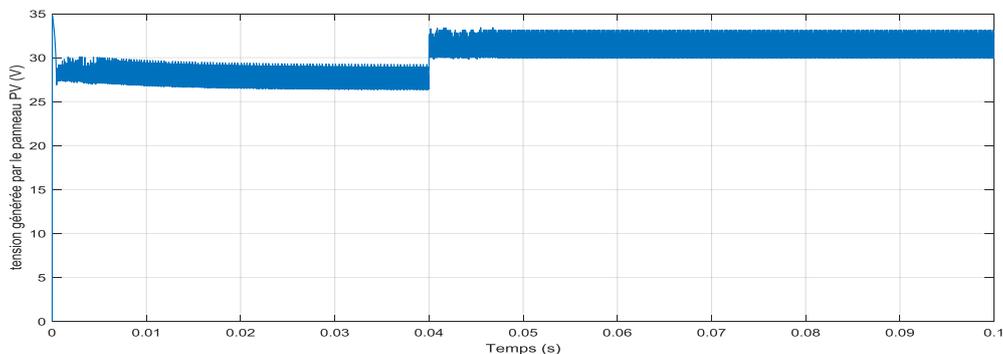


Figure (IV.10): Tension générée par le panneau PV pour $1000\text{W}/\text{m}^2$ et température variable de 50°C à 25°C .

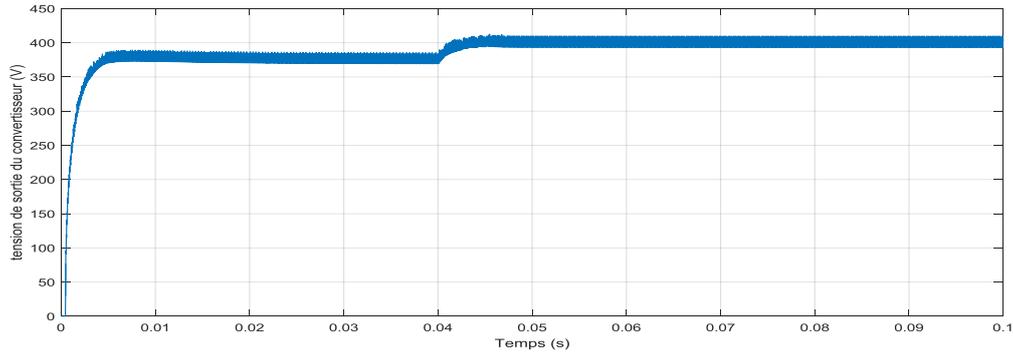


Figure (IV.11): Tension aux bornes de la charge pour $1000\text{W}/\text{m}^2$ et température variable de 50°C à 25°C .

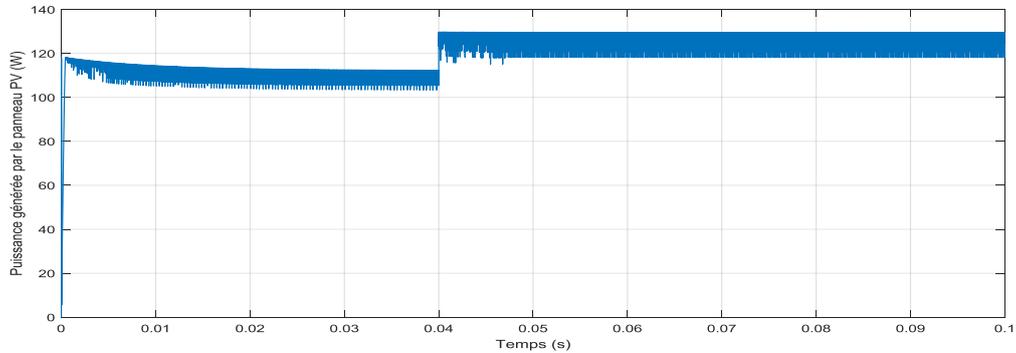


Figure (IV.12): Puissance générée par le panneau PV pour $1000\text{W}/\text{m}^2$ et température variable de 50°C à 25°C .

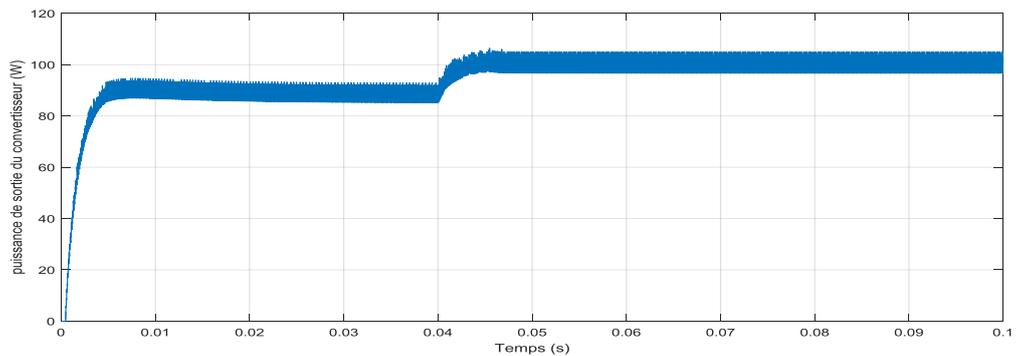


Figure (IV.13): Puissance de sortie consommée par la charge $1000\text{W}/\text{m}^2$ et température variable de 50°C à 25°C .

La figure (IV.10) et La figure (IV.11) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C)

La figure (IV.12) et La figure (IV.13) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec diminution de température (50°C jusqu'à 25°C)

IV.4. Les résultats de simulation avec la technique perturbe et observe, cas du modèle à trois paramètres

Les figures(IV.14) à (IV.15) présentent l'évolution de la tension générées par le panneau PV et celle de la charge pour un éclairement $G=1000W/m^2$ et une température $T=25^{\circ}C$. On note la présence de faibles oscillations au niveau de la tension source et la tension de charge.

Les figures(IV.16) à (IV.17) présentent l'évolution de la puissance générées par le panneau PV et celle consommée par la charge pour un éclairement $G=1000W/m^2$ et une température $T=25^{\circ}C$. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance générée au niveau de la source et la de charge.

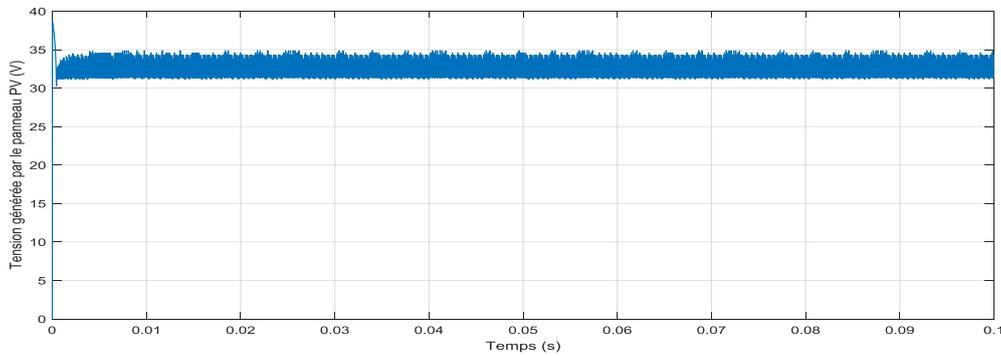


Figure (IV.14):Tension générée par le panneau PV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$

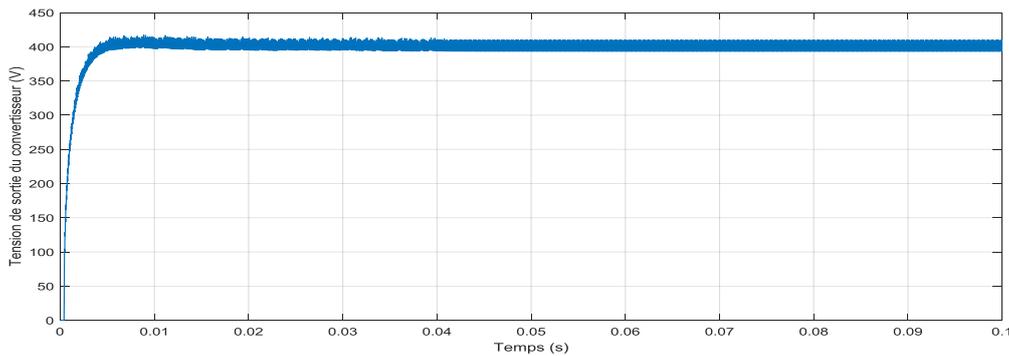


Figure (IV.15): Tension aux bornes de la charge pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$

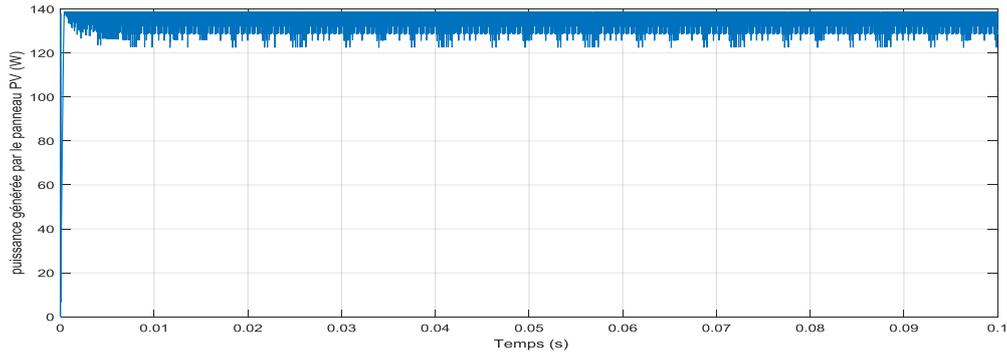


Figure (IV.16): Puissance générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

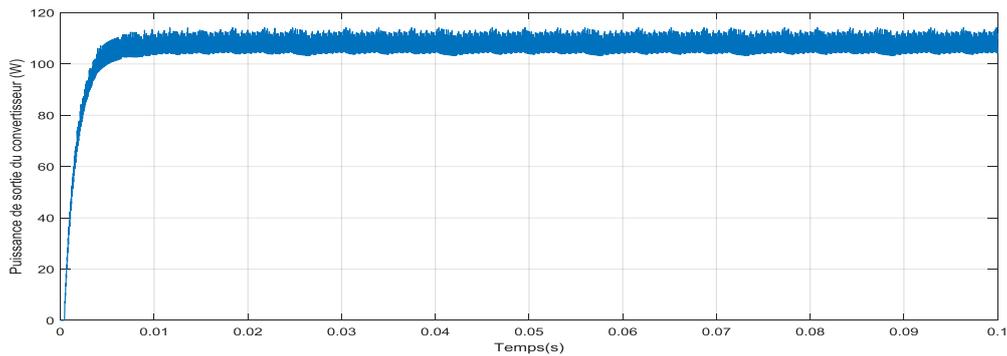


Figure (IV.17): Puissance consommé aux bornes de la charge pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

IV.4.1. Influence de l'éclairement et la température sur l'évolution instantanée de V et P, cas du modèle à trois paramètres

Les résultats de la simulation d'un modèle à trois paramètres subissant des variations de l'éclairement et la température sont représentés par les figures (IV.18) à (IV.25), nous avons visualisé la puissance et tension d'entrée du convertisseur ainsi que la puissance et tension aux bornes de la charge.

IV.4.1.1. Cas de la variation de l'éclairement

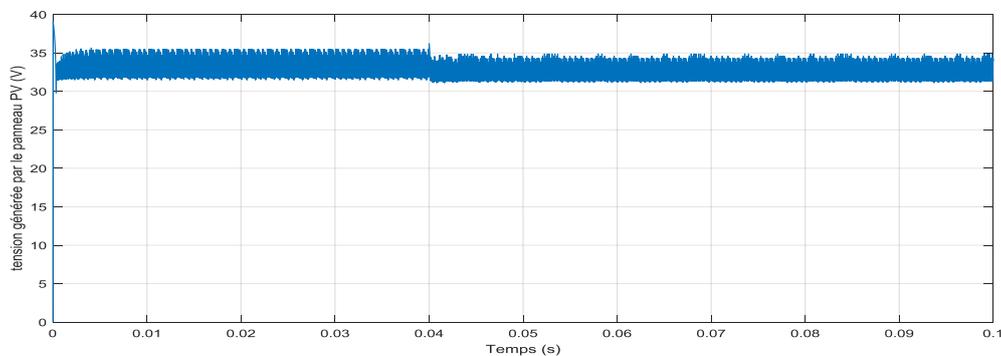


Figure (IV.18): Tension générée par le panneau PV pour $T=25^\circ\text{C}$ et éclairement variable de 750W/m^2 à 1000W/m^2

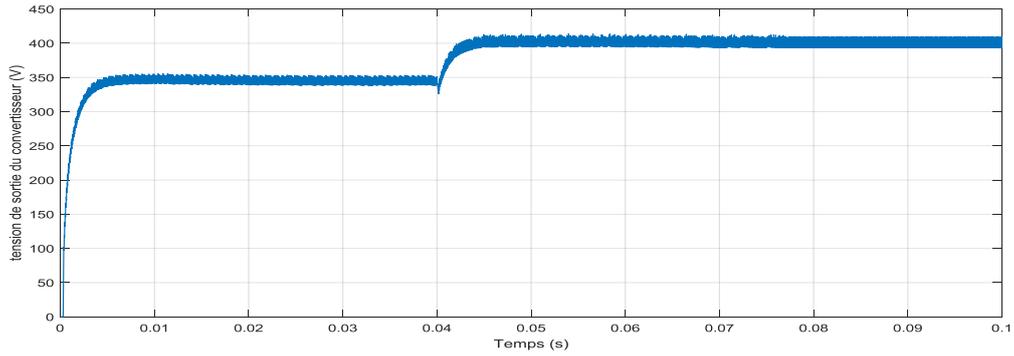


Figure (IV.19):Tension aux bornes de la charge pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement variable de $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

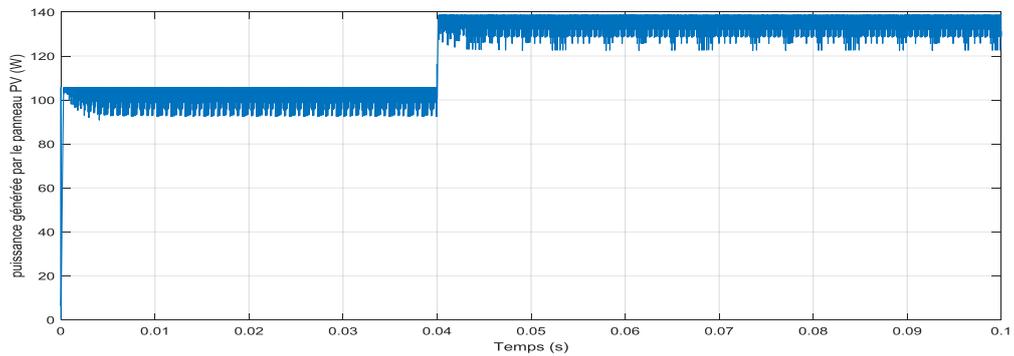


Figure (IV.20): Puissance générée par le panneau PV pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement variable de $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

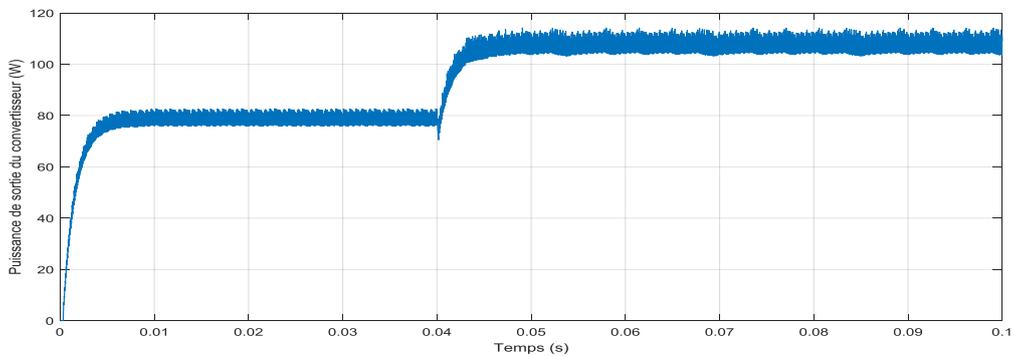


Figure (IV.21):Puissance consommé aux bornes de la charge pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement variable $750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$

La figure (IV.18) et La figure (IV.19) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec l'augmentation de l'éclairage ($750\text{W}/\text{m}^2$ jusqu'à $1000\text{W}/\text{m}^2$).

La figure (IV.20) et La figure (IV.21) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairage ($750\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$).

IV.4.1.2. Cas de variation de température

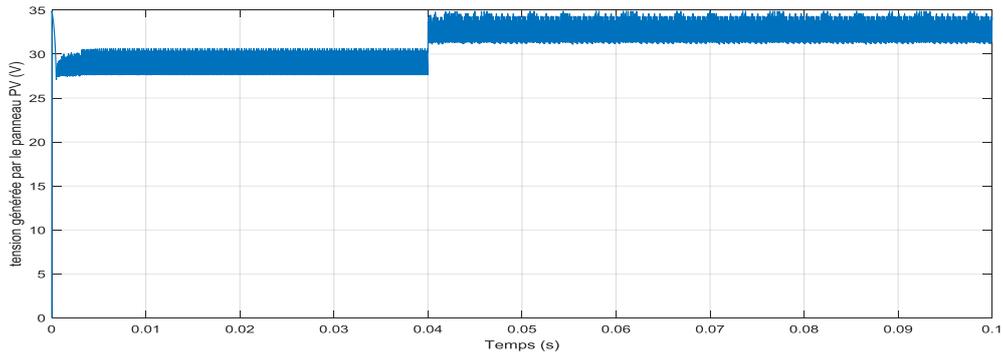


Figure (IV.22): Tension générée par le panneau PV pour 1000W/m² et température variable 50°C à 25°C

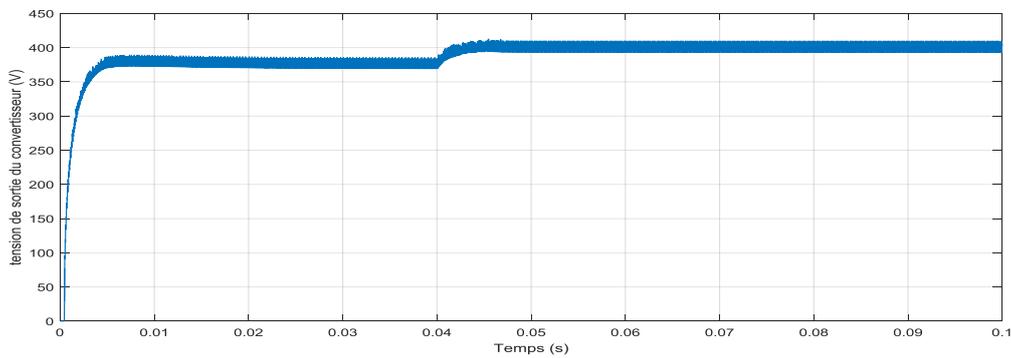


Figure (IV.23): tension de sortie aux bornes de la charge pour 1000W/m² fixe et température variable 50°C à 25°C

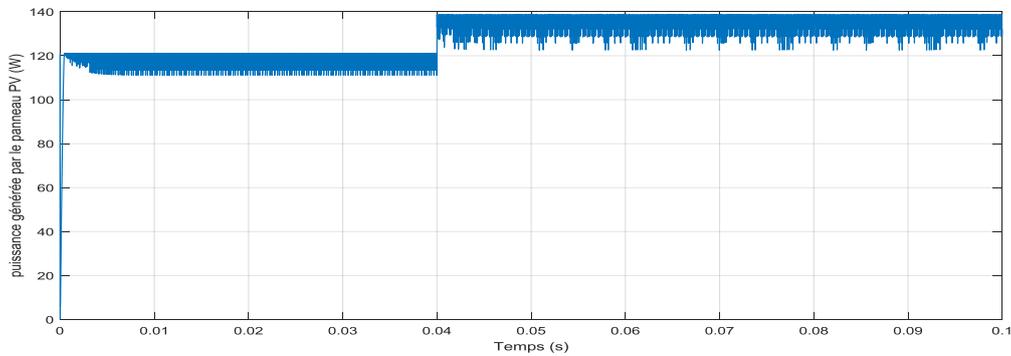


Figure (IV.24): Puissance générée par le panneau PV pour 1000W/m² et température variable de 50°C à 25°C.

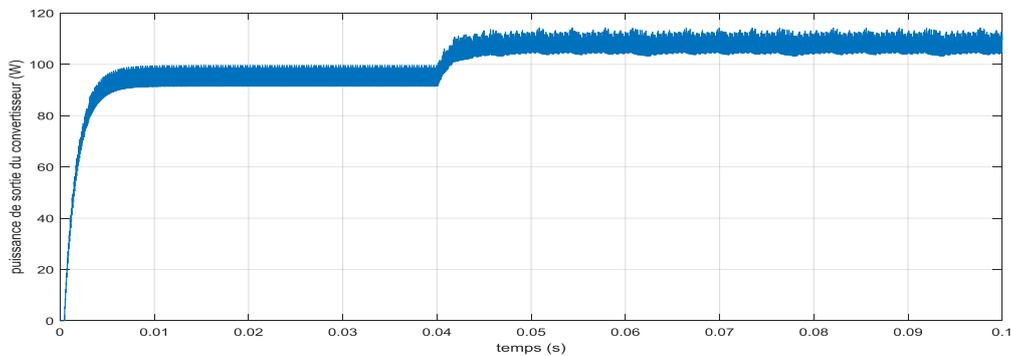


Figure (IV.25) : Puissance consommée aux bornes de la charge pour 1000W/m² et température variable de 50°C à 25°C.

La figure (IV.22) et La figure (IV.23) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

La figure (IV.24) et La figure (IV.25) présentent l'évolution de la puissance par le panneau PV et celle consommée par charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

Comparaison :

La comparaison est faite entre le modèle d'un GPV à trois paramètres et celui à cinq paramètres avec la commande MPPT « *perturbeobserve* » on remarque que le modèle d'un GPV à trois paramètres produit plus de puissance, il converge plus rapidement et il présente un peu plus d'oscillation dans les caractéristiques électriques par rapport à ceux du modèle d'un GPV à cinq paramètres. Le suivi du point de fonctionnement maximal se fait d'une manière satisfaisante pour les deux modèles.

IV.5. Simulation du système PV menu de la commande MPPT deconductance incrémentale

Cette figure présente le schéma Matlab/Simulink de la commande MPPT du type INC appliquée au système PV.

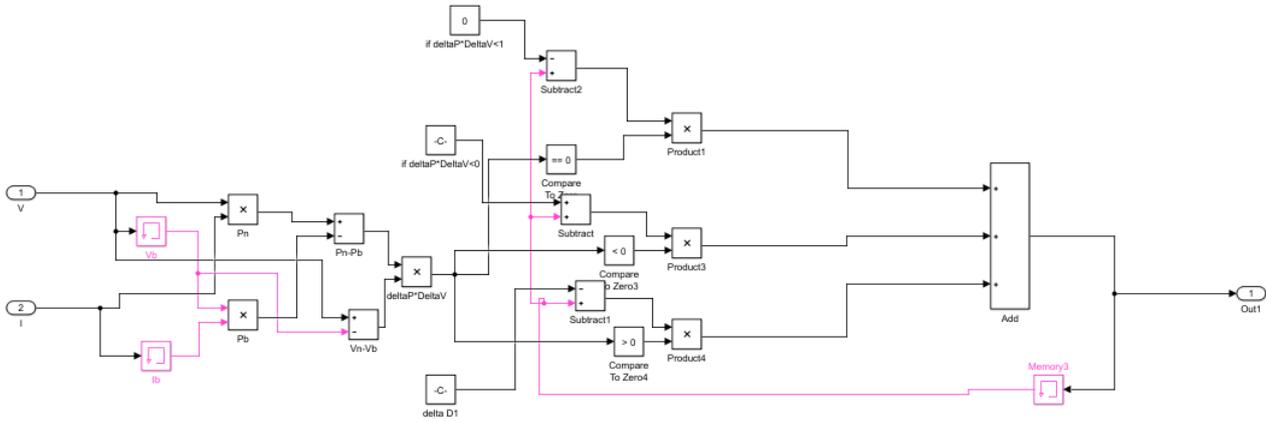
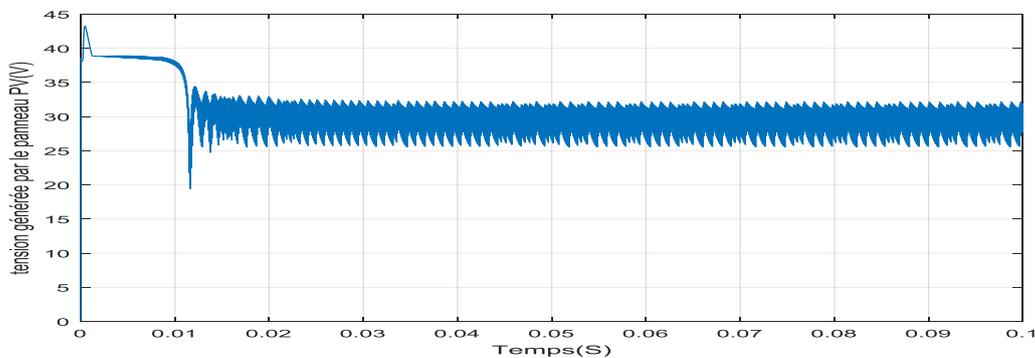


Figure (IV.26): Schéma de simulation de la commande MPPT (INC)

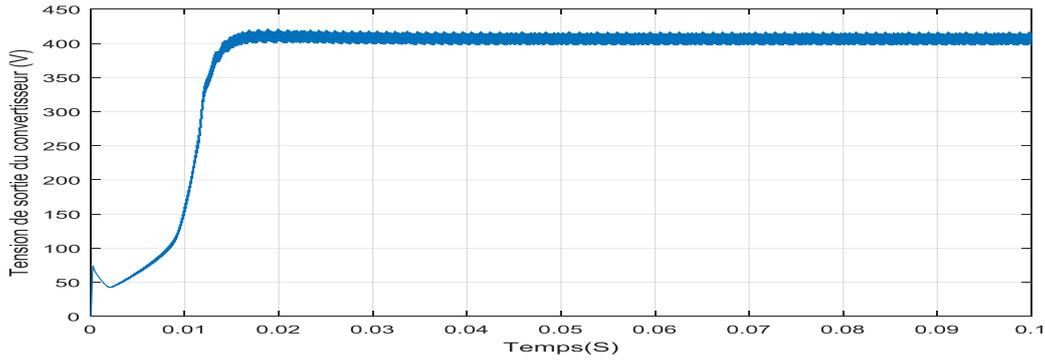
IV.6. Les résultats de simulation avec la commande de conductance incrémental, cas du modèle cinq paramètres

Les figures(IV.27) à (IV.28) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge pour un éclairement $G=1000W/m^2$ et une température $T=25^{\circ}C$. On note la présence de faibles oscillations au niveau de la tension source et la tension de charge.

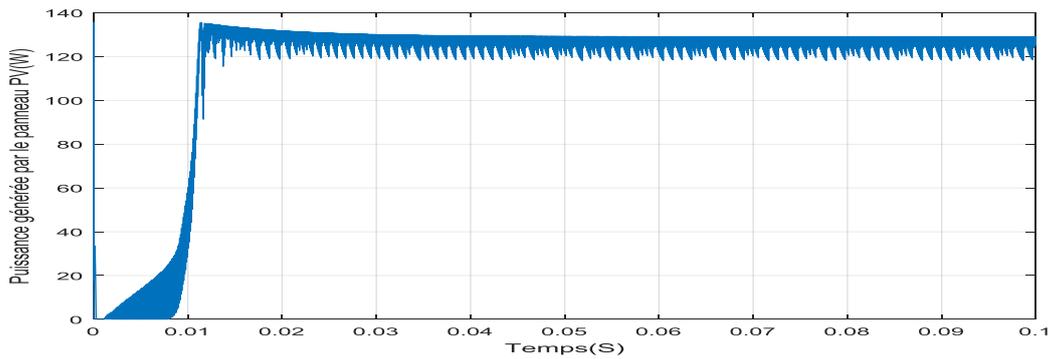
Les figures(IV.29) à (IV.30) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge pour un éclairement $G=1000W/m^2$ et une température $T=25^{\circ}C$. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance générée au niveau de la source et la de charge.



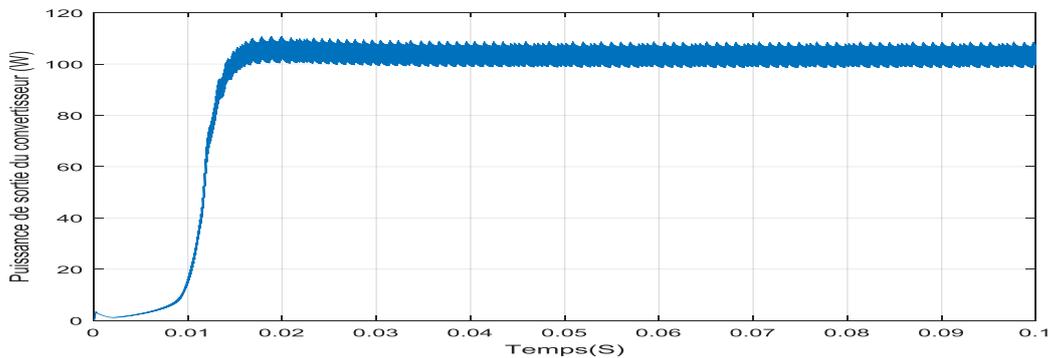
Figure(IV.27) : Tension générée par le panneau PV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$



Figure(IV.28) : Tension aux bornes de la charge pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$



Figure(IV.29): Puissance générée par le panneau PV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$



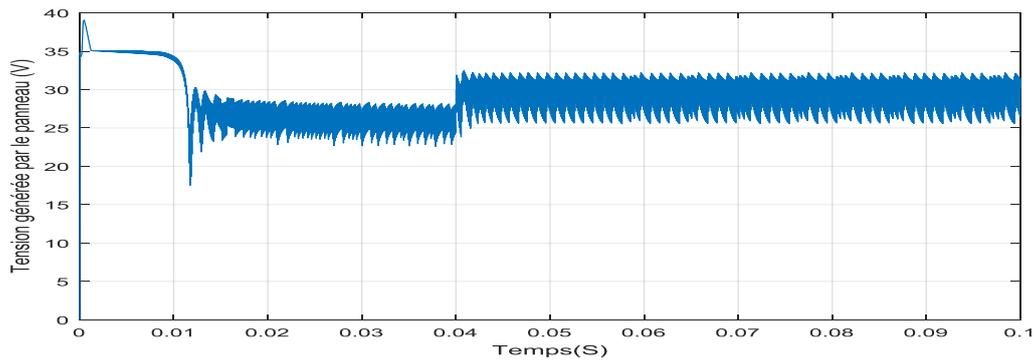
Figure(IV.30): Puissance consommé par la charge $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$

Comme remarque générale par rapport à l'évolution de la tension et la puissance, malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande MPPT incrémental de conductance a permis de retrouver le point de fonctionnement nominal de notre charge pour l'éclairement et température standard.

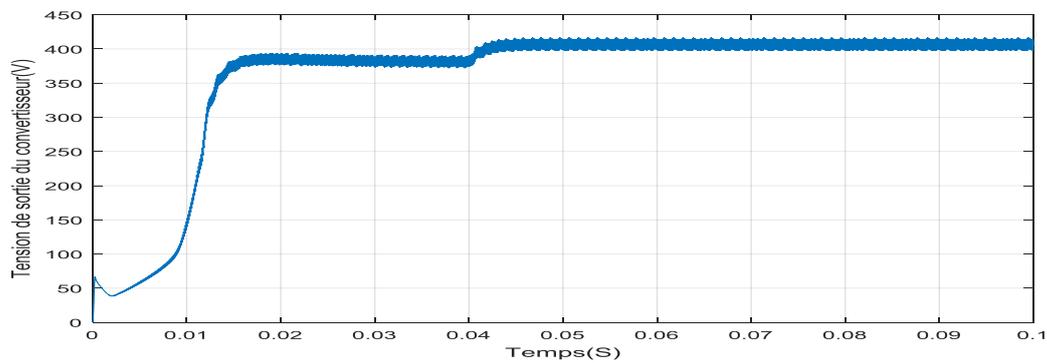
IV.6.1. Influence de l'éclairement et la température sur l'évolution instantanées de P et V

Les résultats de la simulation d'un modèle de cinq paramètres subissant des variations de l'éclairement et température qui sont représentées par les figures (IV.31) à (IV.38), nous avons visualisé la puissance et tension d'entrée du convertisseur ainsi la puissance et tension de sortie du convertisseur.

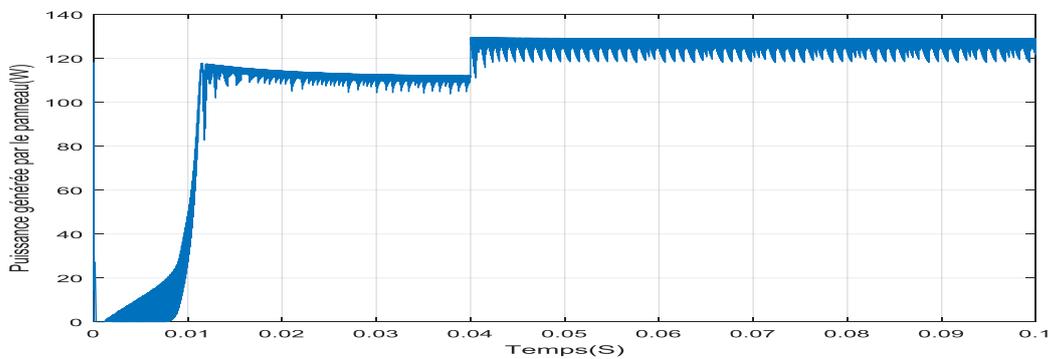
IV.6.1.1. Cas de variation de température :



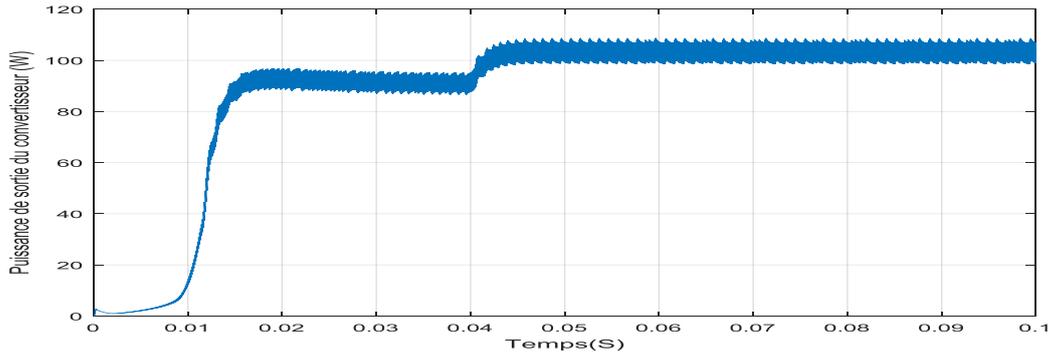
Figure(IV.31) : Tension générée par le panneau PV avec une variation de température 50°C à 25°C



Figure(IV.32): Tension aux bornes de la charge avec une variation de température 50°C à 25°C



Figure(IV.33): Puissance générée de panneau PV avec une variation de température 50°C à 25°C

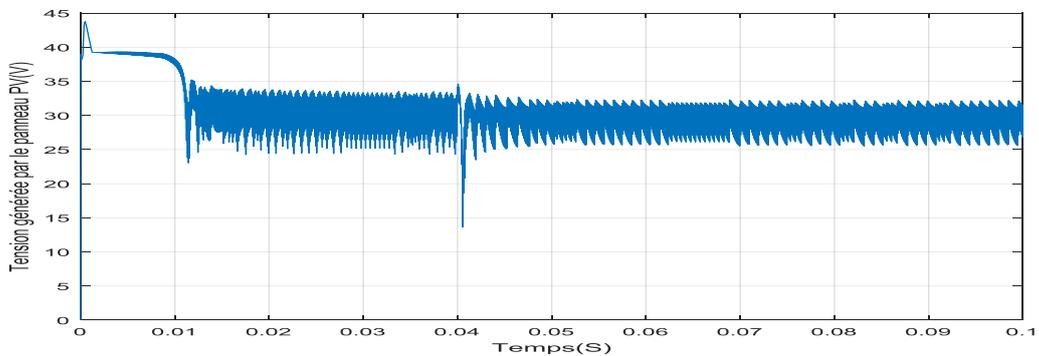


Figure(IV.34): Puissance consommé par la charge pour une variation de température 50°C à 25°C

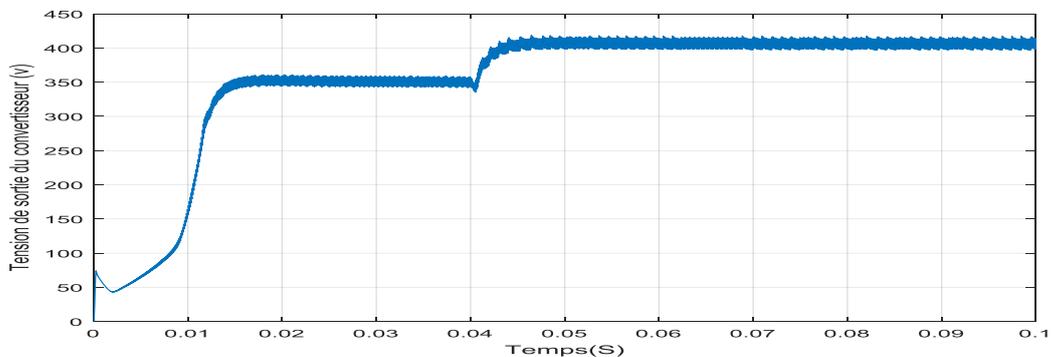
La figure (IV.31) et La figure (IV.32) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

La figure (IV.33) et La figure (IV.34) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

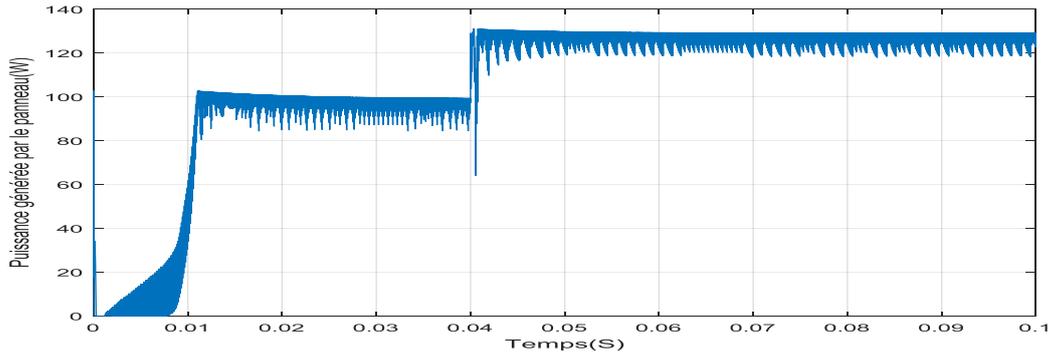
IV.6.1.2. Cas de variation de l'éclairement :



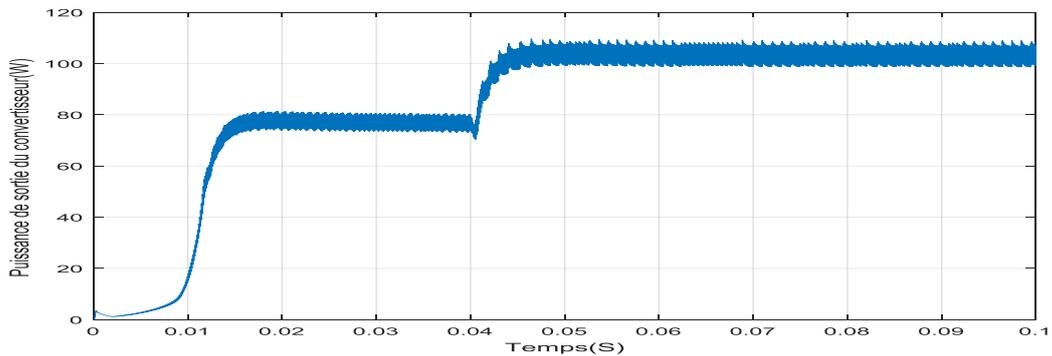
Figure(IV.35) : Tension générée par le panneau PV pour un éclairement variable 750 W/m² à 1000w/m²



Figure(IV.36): Tension aux bornes de la charge un éclairement variable 750W/m² à 1000w/m²



Figure(IV.37): Puissance générée par le panneau PV pour un éclairement variable 750W/m^2 à 1000W/m^2



Figure(IV.38): Puissance consommée par la charge pour un éclairement variable 750W/m^2 à 1000W/m^2

La figure (IV.35) et La figure (IV.36) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec l'augmentation de l'éclairement (750W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2).

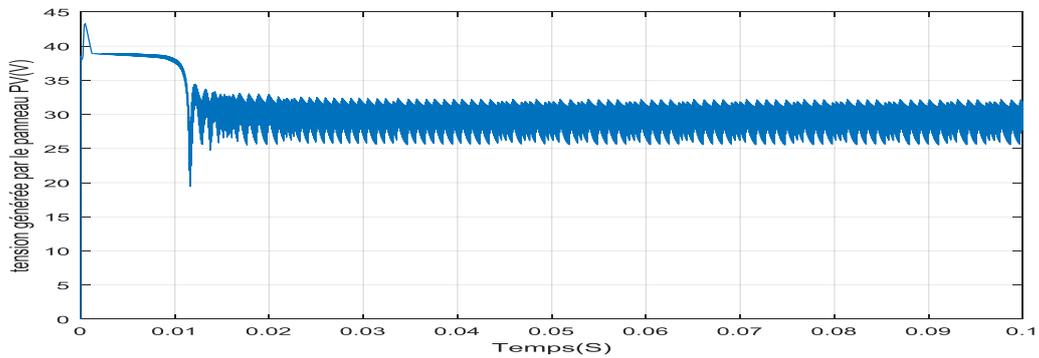
La figure (IV.37) et La figure (IV.38) présentent l'évolution de la puissance par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement (750W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2).

IV.7. Les résultats de simulation avec la commande incrémental conductance, cas du modèle à trois paramètres

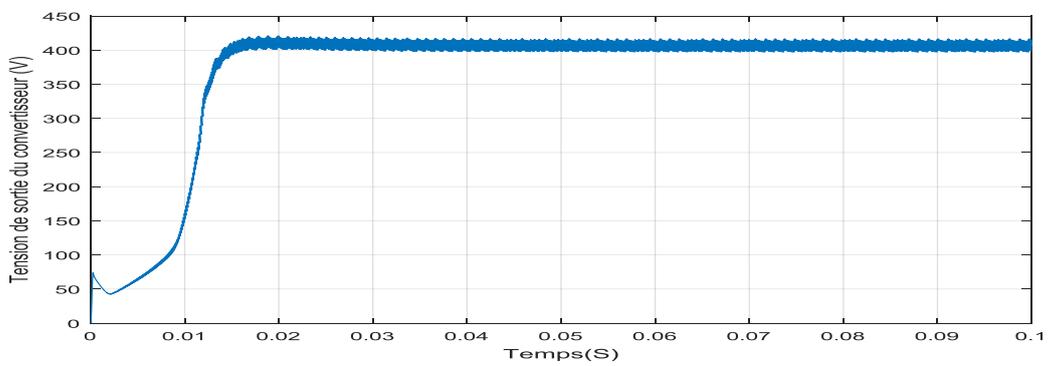
Les figures (IV.39) à (IV.40) présentent l'évolution de la tension générées par le panneau PV et celle aux bornes de la charge pour un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$. On note la présence de faibles oscillations au niveau de la tension source et la tension aux bornes de la charge.

Les figures (IV.41) à (IV.42) présentent l'évolution de la puissance générées par le panneau PV et celle consommée par la charge pour un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$ et une

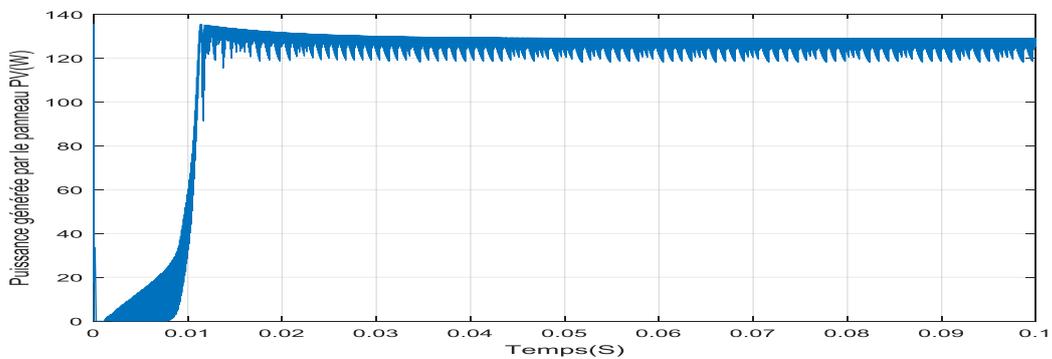
température $T=25^{\circ}\text{C}$. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance générée au niveau de la source et la de charge.



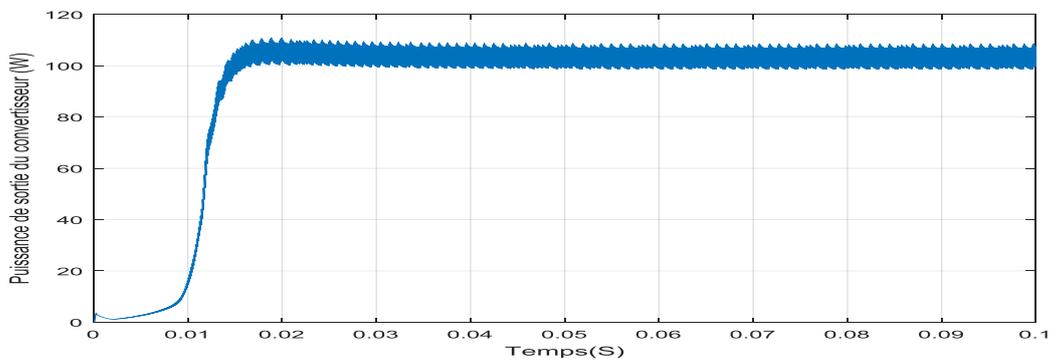
Figure(IV.39) : Tension générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$



Figure(IV.40) : Tension aux bornes de la charge pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$



Figure(IV.41): Puissance générée par le panneau PV pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$

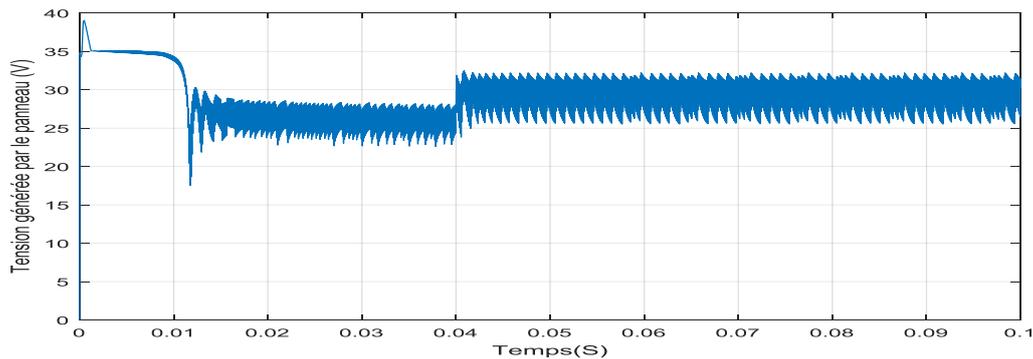


Figure(IV.42): Puissance consommé par la charge pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$

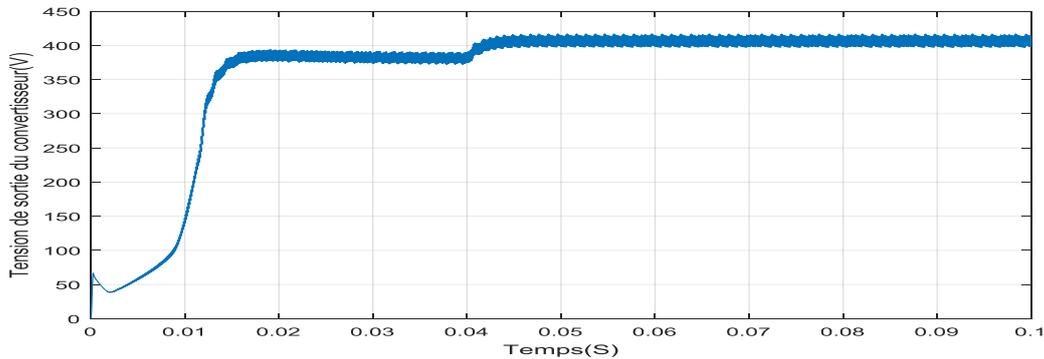
IV.7.1. Influence de l'éclairement et la température sur l'évolution instantanées de P et V

Les résultats de la simulation d'un modèle de trois paramètres subit des variations de l'éclairement et de la température qui sont représentées sur les figures (IV.43) à (IV.50), nous avons visualisé la puissance et tension d'entrée du convertisseur ainsi la puissance et tension de sortie du convertisseur.

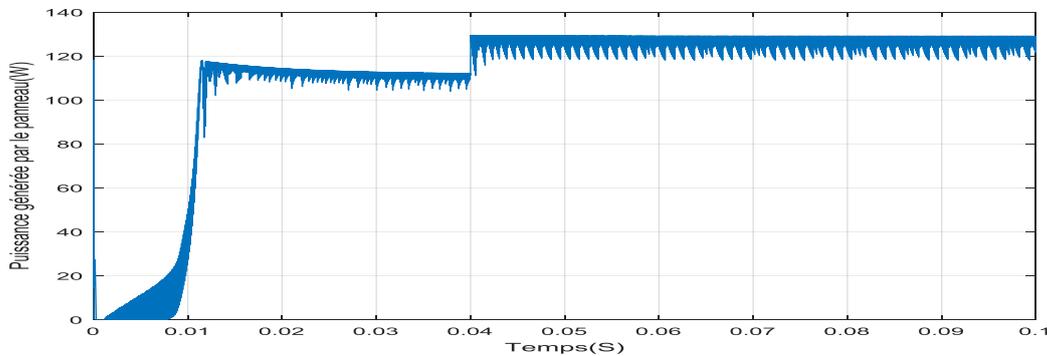
IV.7.1.1. Cas de variation de la température :



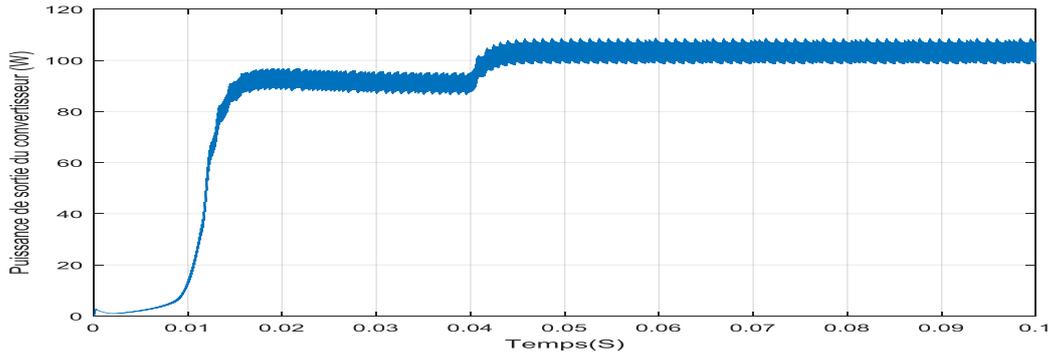
Figure(IV.43) : Tension générée par le panneau PV pour une variation de température 50°C à 25°C



Figure(IV.44): Tension aux bornes de la charge pour une variation de température 50°C à 25°C



Figure(IV.45): Puissance générée par le panneau PV pour une variation de température 50°C à 25°C

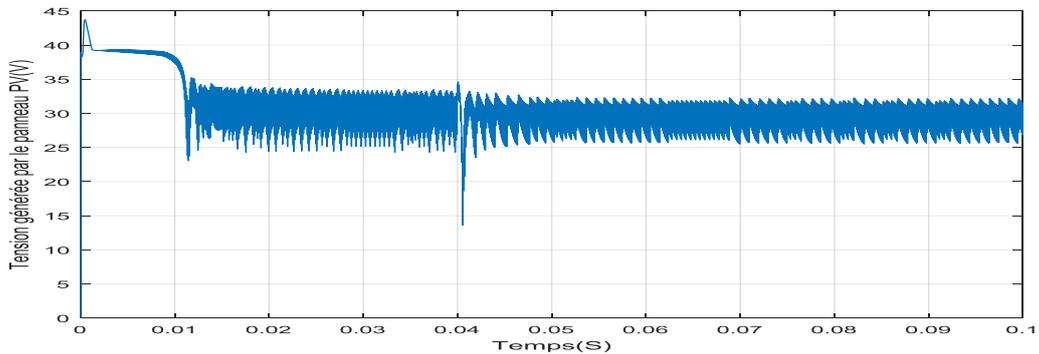


Figure(IV.46): Puissance consommé par la charge pour une variation de température 50°C à 25°C

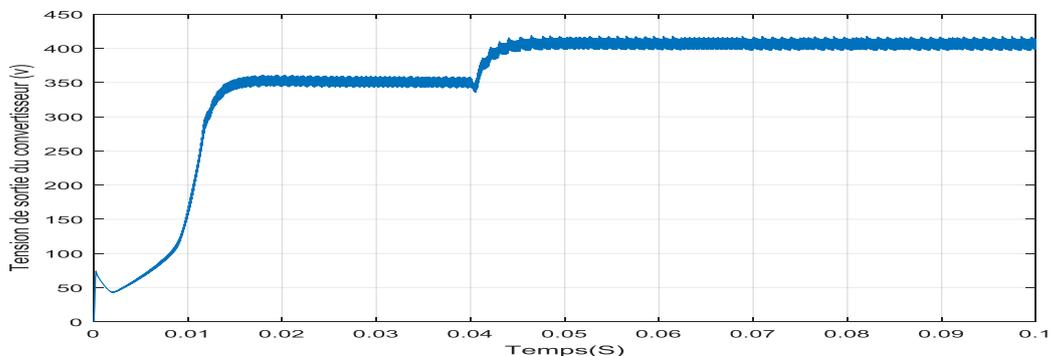
La figure (IV.43) et La figure (IV.44) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

La figure (IV.45) et La figure (IV.46) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommé par la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

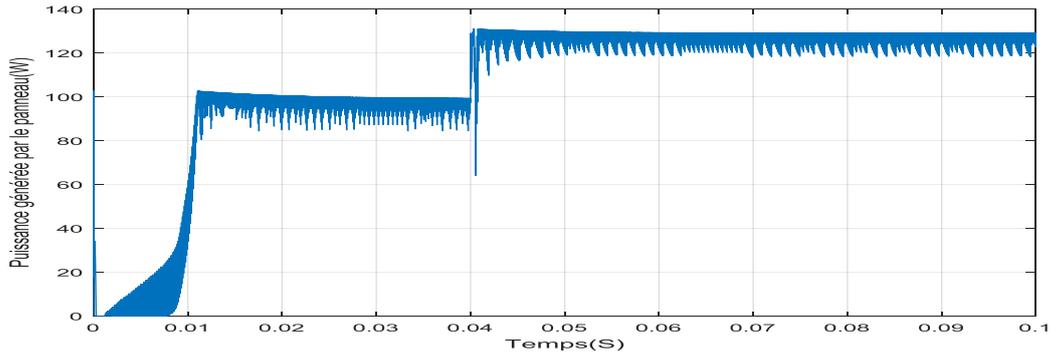
IV.7.1.2. Cas de variation de l'éclairement :



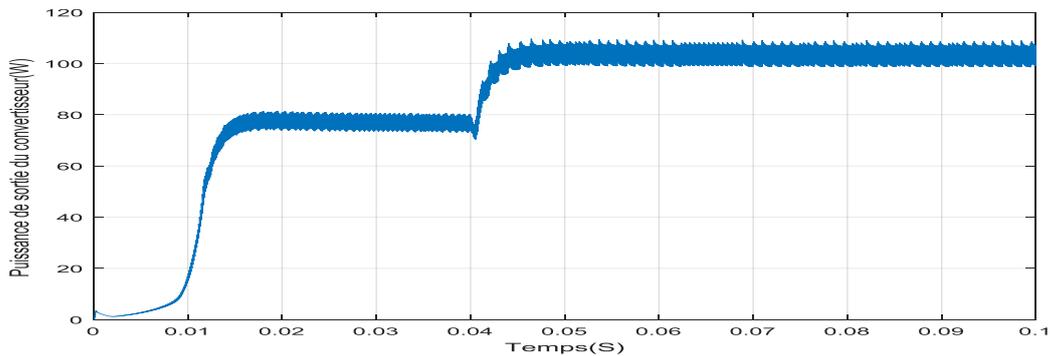
Figure(IV.47) : Tension générée par le panneau PV avec un éclairement variable 750W/m² à 1000W/m²



Figure(IV.48): Tension aux bornes de la charge pour un éclairement variable 750W/m² à 1000W/m²



Figure(IV.49): Puissance générée par le panneau PV avec un éclaircment variable 750 W/m^2 à 1000W/m^2



Figure(IV.50): Puissance consommé par la charge pour un éclaircment variable 750W/m^2 à 1000W/m^2

La figure (IV.46) et La figure (IV.47) présentent l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la tension augmente avec l'augmentation de l'éclaircment (750W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2) on remarque un pique de tension du panneau à l'instant 0.04.

La figure (IV.48) et La figure (IV.49) présentent l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommé par la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclaircment (750W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2).

Comparaison :

La comparaison est faite entre le modèle d'un GPV à trois paramètres et le modèle d'un GPV à cinq paramètres pour la même la commande MPPT «conductance incrémental».

On remarque que les résultats de ces deux modèles présentent un peu plus d'oscillation dans la puissance et la tension générée par le panneau PV .Le modèle d'un GPV à trois paramètres converge plus rapidement.

La comparaison des résultats obtenus avec les deux commandes MPPT «*perturbe etobserve*» et «*conductance incrémental*» nous permettent de de conclure que le GPV avec la commande «*perturbe etobserve*» converge plus rapidement et présente moins d'oscillations par rapport à la commande «*conductance incrémental*».

	Sans MPPT	Avec MPPT
Puissance générée par le panneau PV	95W	98W
Puissance consommé par la charge	75W	75W
Tension générée par le panneau PV	28V	33V
Tension aux bornes de la charge	350V	349V
Temps d'établissement	0.01	0.005

Tableau (IV.1) : Comparaison des résultats avec et sans MPPT (P&O)

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une application des deux commandes MPPT choisi sur le système PV associant le panneau PV – hacheur – charge.

Nous avons ensuite présenté les résultats pour une variation de la température et de l'éclairement.

Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est sur la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commandé par une technique MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Après la présentation du principe de fonctionnement de la cellule et ses différents modèles électriques. Les résultats de la simulation du fonctionnement de notre système PV, nous ont permis de visualiser l'effet de la température dont l'augmentation conduit à une baisse de la puissance générée et de même la diminution de l'éclairement la réduit aussi.

La présentation des deux modèles du générateur PV, constitué de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle, c-à-d cas du modèle à trois paramètres et le cas à cinq paramètres, nous a permis l'élaboration de programmes de simulation de notre système PV. Ce qui nous a permis de visualiser les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour une température et un éclairement fixe ($T_c=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$). Ensuite nous avons étudié l'effet de la variation d'éclairement à température fixe, ce qui nous a permis de conclure que la puissance et le courant augmente avec l'accroissement de l'éclairement et inversement l'augmentation de la température à un effet inverse. Suite à la présentation du modèle de l'hacheur élévateur et sa stratégie de commande MLI nous avons présenté les résultats de simulations du système générateur PV-hacheur-charge. Nous avons noté que l'insertion de l'hacheur ne modifie pas les caractéristiques du générateur PV.

Le résumé de l'aspect théorique des deux techniques pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale, nous a permis de comprendre le principe de maximisation de la puissance du générateur photovoltaïque. Nous avons commencé par la méthode la plus utilisée perturbé et observe qui a un organigramme simple à implémenter et qui converge rapidement. La deuxième méthode présentée conductance incrémentale, s'appuie sur la variation de la conductance du circuit, elle a un organigramme plus complexe, qui ne converge pas rapidement et qui est influencé par le pas de simulation.

En dernier, nous avons fait une application des deux commandes MPPT choisies sur le système PV associant le panneau PV – hacheur – charge. Nous avons ensuite visualisé les résultats pour une variation de la température et de l'éclairement. Ces derniers montrent un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et ceux au niveau de la charge.

Nous pouvons aussi, conclure que :

Conclusion générale

- 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 perspectives nous recommandons la réalisation pratique et l'utilisation d'autres techniques de maximisation de puissances MPPT.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]:<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [2]:R.MERAHI, Modélisation d'un dispositif mppt pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques, mémoire, Annaba 2010.
- [3]:Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables2016 ,policy network for the 21st century(www.ren21.net/gsr).
- [4]:Sarah A. Benali Cherif ,Le Forum d'affaires Algérie – UE sur les énergies renouvelables en juin à Alger, Journal Elmoudjahid, juin 2017
- [5]:Sarah A. Benali Cherif,Énergies renouvelables, Projet Atlas 1 : l'appel d'offres national et international lancé, Journal Elmoudjahid, juin 2017.
- [6]: CREG : programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité 2008 – 2017.
- [7]:Y. AZZOUG, Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque, mémoire, QUEBEC, février 2008.
- [8]:<https://fr.solar-energia.net/energie-solaire-photovoltaique/cellule-photovoltaique>.
- [9]:MORNAY ThomasVernay Alexis, Volle Marion, Les Cellules photovoltaïque, Classe préparatoire CPE Institution des chartreux, 2004-2005.
- [10]:K.HELALI, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, magistère, Université de TIZI-OUZOU, 2012.
- [11]: A.FEROUANI, Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu(In,Ga)Se₂(CIGS),Doctorat En Physique, TLEMCEM 2016.
- [12]:Z. Bendjellouli, Contribution à la modélisation d'une cellule solaire, magistère, Université De Béchar 2009.
- [13] :M. Belhadj, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, Université de Béchar, 2008.
- [14]:L.Alain Bilbao, Réalisation de commande MPPT Numérique, rapport de stage, Toulouse (France) ,septembre 2006.
- [15]:R. Maouedj, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister, Université de Batna, 2005.
- [16]:Installations photovoltaïques, "Systèmes autonomes", document du constructeur BELPOWER.
- [17]:M.HADJAB, Développement des performances d'un système photovoltaïque, Magister, Université De Sidi Bel Abbes, 2011.

- [18]:F. DJALOUUD et O. BENSEDDIK, Etude et optimisation de fonctionnement d'un système photovoltaïque, Master, Université de OUARGLA, 2012.
- [19]:S.Ramirez, H.silva, Control Design Techniques in power Electronics devices, Springer, 2006.
- [20]:D. Boukhers, Optimisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage, Magister En Electrotechnique, université de Constantine, 2007
- [21]: H.Abbes, H.Abid, K. Loukil, A.Toumi, M.Abid , Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445*, Tunisia
- [22]: S.Sumathi, L.ashokkumaransP.Surekha, solar PV and Wind Energy conversion Systems, Springer, Switzerland 2015.
- [23] :M.BELKACEM, Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT), mémoire de master, UNIVERSITE DE TLEMCEM, 2015
- [24]:H.ABBES, Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13), Sousse, Tunisie – 2013.
- [25]: H. BOUZERIA, Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque, DOCTORAT 3ème cycle LMD en Électrotechnique, Université de Batna, 2016.
- [26]: M.Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques", Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

Annexes

Module PV utilisé

Nous avons choisi Le BP Solar 2150S. Qui est un panneau photovoltaïque composé de 72 cellules monocristallines en série et une cellule monocristalline en parallèle, ayant une puissance maximale de 150 W et considéré dans les conditions standards (STC: Standard Test Conditions) $G = 1000 \text{ W/m}^2$; $T_c = 25^\circ\text{C}$.

Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale	150 W
Tension au MPP (V_{pm})	34.0 V
Courant au MPP (I_{pm})	4.45 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	4.75 A
Tension du circuit ouvert (V_{co})	42.8 V
Coefficient de température de ()	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de ()	$-(160 \pm 20) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de puissance	$-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^\circ\text{C}$

Tableau II: 01: Caractéristiques électriques du PB 2150S.

Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses, les systèmes photovoltaïques commencent à trouver des grandes applications.

Dans ce travail, on a choisi deux modèles du générateur photovoltaïque, le premier consiste au modèle à trois paramètres qui correspond à une seule diode et le deuxième modèle est un modèle à cinq paramètres correspondant à une diode, résistance série et résistance shunt. Ces modèles sont utilisés pour étudier la variation de la puissance maximale et la caractéristique courant-tension avec la température et l'éclairement. Une comparaison entre les deux modèles est faite. Puis on a fait la modélisation et la simulation du fonctionnement du système photovoltaïque (PV) adapté par deux commandes numériques MPPT « perturbation et observation » et « incrémental de la conductance » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Mots clés : GPV, photovoltaïque, hacheur BOOST, MPPT, MPP, Perturber et Observer, Incrément de la Conductance.