



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electronique
Commande électrique

Référence :...../

Présenté et soutenu par :

BOUDIAF Djihane

BELLIMA Rayene

Le : dimanche 26 juin 2022

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

Jury :

M.	TERKI Amel	Pr	Université de Biskra	Président
M.	DERRADJI Karima	MAA	Université de Biskra	Examineur
M.	BENYAHIA Naima	MAA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021- 2022



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
D

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electronique
Commande électrique

Présenté et soutenu par :

BOUDIAF Djihane

BELLIMA Rayene

Le : dimanche 26 juin 2022

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. BENYAHIA Naima

signature

Avis favorable du Président du Jury :

Dr. TERKI Amel

signature

Cachet et signature

Remerciements

Avant tout nous remercions tout d'abord Allah de nous avoir donné le courage, la force, la santé, et la patience pour pouvoir accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur pour ses précieux conseils, son aide et ses orientations.

Notre remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Tous les mots de merci à toute et à tous les enseignants du Département de Génie

Electrique pour leurs disponibilité et conseils.

Enfin, nous remercions sincèrement tous ceux qui nous ont aidés de

prés ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.



Dédicace

*Avant tous, mes profonds remerciements vont à
ALLAH. Qui m'a aidé et donné le courage et la
patience pour effectuer ce travail.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents qui ont été toujours à mes
côtés pour leur générosité et leurs sacrifices.
Et me donner le courage pour terminer mes études.*

Merci beaucoup et je vous aime beaucoup.

A mon très cher frère « Abderrazek »

*A mes belles sœurs « Sabrina », « Chaïma »,
« Hadjer » et « Narimane »*

A mon marié

*Qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces
années d'études.*

*Enfin, je remercie ma binôme « Rayene », qui a
contribué à la réalisation de ce travail.*

BOUDIAF Djihane

Dédicace

*Avant tous, mes profonds remerciements vont à
ALLAH. Qui m'a aidé et donné le courage et la
patience pour effectuer ce travail.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents qui ont été toujours à mes
côtés pour leur générosité et leurs sacrifices.
Et me donner le courage pour terminer mes études.*

Merci beaucoup et je vous aime beaucoup.

A mes très chers frères « Bachir » et « Mohamed »

A mes belles sœurs « Imene » et « Malek »

*Qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces
années d'études.*

A tous mes amies

*Enfin, je remercie ma binôme « Djihane », qui a
contribué à la réalisation de ce travail.*

BELLIMA Rayene

Liste des figures

----- Chapitre I -----

Figure I.1 : Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe rouge) et à la surface de la terre (jaune). La fraction du rayonnement absorbée dans l'atmosphère est en bleu, celle qui est rétrodiffusée en violet.

Figure I.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.3 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.4 : Les différentes zones de la caractéristique I (V).

Figure I.5 : Composants d'un générateur de module photovoltaïque.

Figure I.6 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

Figure I.7 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en parallèle.

Figure I.8 : Association mixte des modules solaires.

Figure I.9 : Système photovoltaïque autonome.

Figure I.10 : Installation photovoltaïque raccordée au réseau.

Figure I.11 : Système solaire hybride.

----- Chapitre II -----

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

Figure II.2 : Caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairagements E_i .

Figure II.3 : schéma block de photo-courant.

Figure II.4 : schéma block de Courant de saturation.

Figure II.5 : schéma block de Reverse Saturation Current.

Figure II.6: schéma block de Shunt courant.

Figure II.7 : Simulation le bloc PV.

Figure II.8 : Schéma block Module photovoltaïque sous MATLAB.

Figure II.9 : caractéristique $I(V)$, $P(V)$.

Figure II.10 : Convertisseur DC/DC.

Figure II.11 : Schéma d'un convertisseur Buck.

Figure II.12 : Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.

Figure II.13 : Chronogrammes des composants d'un hacheur boost.

Figure II.14 : Allure des variables dynamiques I_L .

Figure II.15 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

Figure II.16: Principe de la commande MPPT.

Figure II.17: Trajectoire par Incrémentation de Conductance.

Figure II.18 : Algorithme d'incrément de la conductance.

Figure II.19 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).

Figure II.20 : L'algorithme de P&O classique.

----- Chapitre III -----

Figure III.1 : Chaîne de conversion photovoltaïque.

Figure III.2 : Schéma de simulation d'un PV et un hacheur Boost commandé par Incrément de conductance.

Figure III.3 : la tension et le courant de sortie du PV.

Figure III.4 : la puissance délivrée par le PV.

Figure III.5 : la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur.

Figure III.6 : variation d'irradiation de rayonnements solaire.

Figure III.7 : la tension et le courant de sortie du PV pour l'irradiation variable.

Figure III.8 : la puissance délivrée par le PV pour l'irradiation variable.

Figure III.9 : la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur pour l'irradiation variable.

Figure III.10 : variation de température.

Figure III.11 : la tension et le courant de sortie du PV pour la température variable.

Figure III.12 : la puissance délivrée par le PV pour la température variable.

Figure III.13 : la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur pour la température variable.

Figure III.14 : Schéma de simulation d'un PV et un hacheur Boost commandé par P&O.

Figure III.15 : la tension et le courant de sortie du PV.

Figure III.16 : la puissance délivrée par le PV.

Figure III.17: la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur.

Figure III.18: la tension et le courant de sortie du PV pour l'irradiation variable.

Figure III.19 : la puissance délivrée par le PV pour l'irradiation variable.

Figure III.20: la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur pour l'irradiation variable.

Figure III.21 : la tension et le courant de sortie du PV pour la température variable.

Figure III.22 : la puissance délivrée par le PV pour la température variable.

Figure III.23: la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur pour la température variable.

----- Chapitre IV -----

Figure IV.1 : Schéma de principe de l'onduleur monophasé.

FigureIV.2 :Schéma d'un système photovoltaïque avec une charge RL (système monophasé).

Figure IV.3 : profile de l'irradiance

Figure IV.4 : le courant et la tension de la charge RL

Figure IV.5 : la tension de hacheur.

Figure IV.6 : la commande de l'onduleur.

Figure IV.7 : le courant, la tension et la puissance de PV.

Figure IV.8 : Schéma d'onduleur de tension triphasé.

Figure IV.9 : Schéma d'un système photovoltaïque avec une charge RL (système triphasé).

Figure IV.10 : le courant et la tension de la charge RL

Figure IV.11 : La tension de l'hacheur

Figure IV.12 : La tension, le courant, la puissance de PV.

Figure IV.13: L'entrée d'IGBT

Les symboles

E_p : l'énergie de photon

h : la constante de Planck

c : la vitesse de la lumière

λ : la longueur d'onde

P_c : puissance de crête

V_{co} : la tension à vide

I_{cc} : courant de court de circuit.

P_m : puissance électrique maximale

V_m : la tension maximale

I_m : le courant maximale

η : Le rendement

S : la surface de la cellule photovoltaïque

E : l'éclairement

$V_{co_{Ns}}$: la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellule en série

N_s : nombre de cellule en série

$I_{cc_{Ns}}$: courant de court circuit de N_s cellule en série

$I_{cc_{Np}}$: courant de court circuit de N_p cellule en parallèle

N_p : nombre de cellule en parallèle

$V_{co_{Np}}$: la somme des tensions en circuit ouvert de N_p cellule en parallèle

I : courant fourni par la cellule.

I_{ph} : photon-courant de cellule proportionnelle à l'éclairement (G).

I_d : le courant circulant dans la diode.

I_0 : courant de saturation.

V_d : Tension aux bornes de la diode.

V_{th} : tension thermique.

n : facteur d'idéalité de la jonction = 1,6.

K : constante de Boltzmann $K = 1.38e-23$ [J/K].

q : la charge de l'électron $1.6e-19$ [eV].

T : la température de la jonction [K].

I_{sh} : le courant circulant dans la résistance R_{sh}

K_i : coefficient de la température de court-circuit.

T_{op} : Température de fonctionnement de la cellule.

T_{ref} : Température référence de la cellule.

G : l'éclairement solaire.

G_0 : Eclairement pour les STC.

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

T_r : Température référence de la cellule.

E_g : Energie de seuil.

R_{sh} : Résistance parallèle (shunte).

R_s : Résistance série.

I_{pv} : le courant de PV.

V_{pv} : la tension de PV.

P_{pv} : la puissance de PV.

Acronymes :

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque.

DC : courant continu.

AC : courant alternatif.

FF : facteur de forme.

MLI : modulation de largeur d'impulsion.

PWM: pulse width modulation.

MPPT: maximum power point tracking.

CS : convertisseur statique.

P&O : perturbation and observation

PPM : point de puissance maximale.

IncCond : Incrément of conductance.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	
Les symboles	
Introduction générale	

Chapitre I: généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.1. Introduction	3
I.2. l'énergie solaire	3
I.3. Rayonnement solaire.....	3
I.3.1. Les types de rayonnement solaire	4
I.3.1.1. Rayonnement direct	5
I.3.1.2. Rayonnement diffus	5
I.3.1.3. Rayonnement solaire réfléchi	5
I.3.1.4. Rayonnement global	5
I.4. Cellule photovoltaïque	5
I.4.1. Historique de l'énergie photovoltaïque	5
I.4.2. Définition d'une cellule photovoltaïque	6
I.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
I.4.4. Technologie d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.4.4.1. Silicium monocristallin	8
I.4.4.2. Silicium poly cristallin	8
I.4.4.3. Silicium amorphes	8
I.5. le module photovoltaïque	8
I.5.1. Caractéristique d'un module	9
I.5. 2 Les critères influant sur le rendement de module PV.....	10
I.5.2.1 Critères atmosphériques	10
I.5.2.2. Critères non atmosphérique	10
I.5.3. Zones de fonctionnement d'un module	11
I.6. Générateur photovoltaïque	12
I.6.1. Mise en série	13
I.6.2. Mise en parallèle	13
I.6.3. Mise en mixte (série-parallèle).....	14
I.7. Différent types de systèmes photovoltaïques	15
I.7.1. Système photovoltaïque autonomes	15
I.7.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau	16
I.7.3. Système photovoltaïque hybride	16

I.8. Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	17
I.8.1. Avantage	17
I.8.2. Inconvénients	18
I.19. Conclusion.....	18

Chapitre II: modélisation du systèmes photovoltaïque

II.1. Introduction	19
II.2. Modélisation d'une cellule PV	19
II.2.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	19
II.2.2. caractéristique I(V) et P(V)	26
II.3. Les hacheurs	27
II.3.1. Les types des hacheurs	28
II.3.1.1. Hacheur série (Buck)	28
II.3.1.2. Hacheur parallèle (Boost)	28
II.3.2. Domaine d'utilisation des hacheurs	28
II.3.3. Choix d'un hacheur Boost	29
II.3.4. Modélisation d'un hacheur Boost	29
II.3.4.1. Fonctionnement d'un hacheur Boost	29
II.3.4.2. Modèle mathématique équivalent.....	30
II.3.4.3. Dimensionnement des composants de convertisseur L et C	32
II.4. Commande MPPT	33
II.4.1. Principe du MPPT	33
II.4.2. Classification des techniques MPPT :.....	34
II.4.2.1. La méthode incrémentation de la conductance :	34
II.4.2.2. La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	37
II.5. Conclusion	39

Chapitre III: simulation des commandes MPPT pour une charge résistive "R"

III.1. Introduction.....	40
III.2. Simulation du système photovoltaïque avec hacheur Boost commandé en MPPT	40
III.3. Commande Incrément de conductance.....	41
III.3.1. Essai 1 : Irradiation, température et la charge constante.....	42
III.3.2. Essai 2 : Irradiation G variable, température et charge constante	43
III.3.3. Essai 3 : Température T variable, l'irradiation et charge constant	45
III .4. Commande perturbe & observe	47
III.4.1. Essai 1: Irradiation, température et la charge constante (G=800, T= 25°, R=10Ω) .	47

III.4.2. Essai 2 : Irradiation G variable, température et charge constant	49
III.4.3. Essai 3 : Température T variable, irradiation et charge constant	51
III .5.Conclusion	52

Chapitre IV: simulation du commandes MPPT pour une charge "RL"

IV.1.Introduction :	53
IV.2. Onduleurs monophasé	53
IV.2.1. Principe de PWM	53
IV.2.2. Modélisation d'un Onduleur monophasée	54
IV.2.3. Simulation de système photovoltaïque raccordé à la charge RL monophasé	54
IV.2.4 Les résultats de la simulation	55
IV.2.5. Interprétation des résultats	57
IV.3. Modélisation d'un onduleur triphasé	58
IV.3.1. Simulation de système photovoltaïque raccordé à la charge RL triphasé	59
IV.3.2. Résultat de simulation.....	60
IV.3.3. Interprétation des résultats	62
IV.4. Conclusion	62
Conclusion générale :.....	63

Introducción general

Introduction générale

Après le changement climatique dû à l'effet de serre, après les prédictions de l'inévitable épuisement des ressources énergétiques fossiles et thermonucléaires dans le monde, les chercheurs ont commencé à s'intéresser aux ressources dites renouvelables.

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de domaines technologiques en fonction de source d'énergie utilisée et de l'énergie utile obtenue, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution potentielle pour réduction de la pollution. Parmi les moyens de production les plus prometteurs.

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 [1].

Aujourd'hui l'énergie photovoltaïque (PV) apparaît comme la plus adaptée et la plus performante pour produire de l'électricité à partir de sources renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui a introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie.

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces courbes représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du panneau [2].

Le principe avantage des panneaux solaires est que la puissance maximum qui ne peut être atteinte qu'à un point de fonctionnement donné avec une tension et un courant donnés est appelée point de puissance maximale.

Le point de puissance maximale se déplace en fonction de l'éclairement et de la température des cellules, ainsi que la charge utilisée. Pour tirer le maximum de puissance des panneaux solaires, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est utilisé pour contrôler les différences de caractéristique courant-tension des cellules.

Dans ce mémoire, on va modéliser et simuler un système photovoltaïque dans l'environnement MATLAB SIMULINK adapté par la commande MPPT : (Perturbation et

observation et incrémental conductance) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

L'objectif principal de notre travail est d'appliquer un algorithme qui permet d'extraire le maximum d'énergie disponible du générateur photovoltaïque.

La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

Le 1^{er} chapitre, traite des généralités sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Dans le 2^{ème} chapitre, on présente les modèles des convertisseurs statiques pouvant partie d'un système PV (Boost, Buck), nous avons mis en évidence l'hacheur pour une utilisation dans la simulation du système photovoltaïques décrit au chapitre suivant et présenter la commande MPPT de deux type : P&O et condition de conductance incrémentale.

Dans le troisième chapitre, une comparaison entre les deux algorithmes de MPPT « P&O et conductance incrémental » par une simulation sous l'environnement MATLAB SIMULINK du système (PV-Boost-charge R).

Dans le quatrième chapitre deux systèmes ; (PV- Hacheur Boost- Onduleur Monophasé-Charge RL) et (PV- Hacheur Boost- Onduleur Triphasé-Charge RL) sont simulés.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus

Chapitre I :
Généralités sur
les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue à partir de la conversion directement du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette énergie est une des principales de sources d'énergie renouvelables qui suscite un grand intérêt depuis quelques années, c'est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers).

I.2. l'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO₂.

Les déserts de notre planète reçoivent en six heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

✚ L'énergie solaire thermique :

Cela génère simplement de la chaleur à travers un panneau sombre. Nous pouvons également utiliser la chaleur du soleil pour générer de la vapeur, qui est ensuite convertie en électricité. L'énergie solaire thermique sert aussi bien pour alimenter :

- Un chauffage solaire
- Un chauffe-eau
- Une cuisinière

✚ L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil.

C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent installés sur les toits, l pour récolter les photons du soleil, et en faire ensuite de l'électricité.

I.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante [3].

$$E_p = h \cdot c / \lambda \quad (\text{I.1})$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ JS}^{-1}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ mS}^{-1}$$

C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ [3].

Sans avoir besoin d'un support physique pour se développer, elle accède au sol après la destruction d'une très grande quantité de son énergie, à travers une zone d'ultraviolets qui est absorbée.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi [4] :

- 9% dans la bande des ultraviolets (0.8 μm).
- 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0.8 \mu\text{m}$).

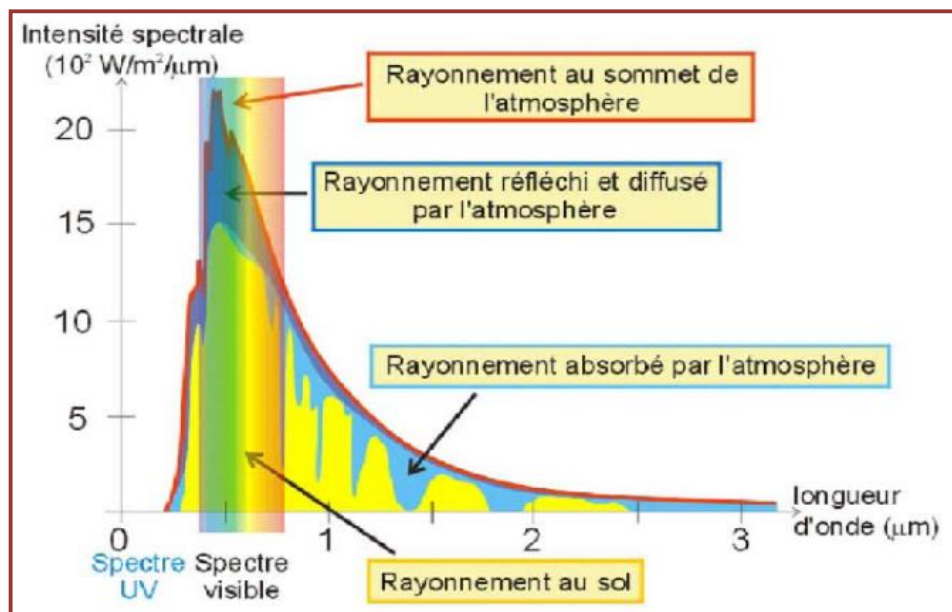


Figure I.1 : Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe rouge) et à la surface de la terre (jaune). La fraction du rayonnement absorbée dans l'atmosphère est en bleu, celle qui est rétrodiffusée en violet [5].

I.3.1. Les types de rayonnement solaire

Il y a quatre types de rayonnements.

I.3.1.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre directement à partir du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Pyrhéliomètre est un appareil qui mesure la densité du rayonnement direct. Le pyrhéliomètre doit être équipé d'un appareil permettant de le diriger en continu vers le soleil.

I.3.1.2. Rayonnement diffus

Elle est constituée de lumière diffusée par l'atmosphère (air, couverture nuageuse, aérosols). La dispersion est le phénomène de division des rayons parallèles en un certain nombre de rayons Allez dans une direction différente.

Il peut être mesuré par un pyranomètre avec un écran qui bloque le soleil

I.3.1.3. Rayonnement solaire réfléchi

Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature du lien appelé Albédo 0.

I.3.1.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [3].

I.4. Cellule photovoltaïque

I.4.1. Historique de l'énergie photovoltaïque

On présente dans cette partie l'histoire des photovoltaïques, son histoire montre que utilisation de cette énergie est très ancien [6].

- **1839** : le physicien français Edmond Becquerel découvre effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant Académie des sciences de Berlin un article sur effet photovoltaïque.
- **1954** : trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule photovoltaïque.
- **1958** : une cellule solaire avec un rendement de 9 % à mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans espace les années 60.

- **1973** : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques était construite à Université de Delaware.
- **1983** : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.
- **2013** : la production mondiale des modules photovoltaïques a dépassé les 5 MWc en 1982 à 18GWc.
- **2013** : le groupe algérien Condor électronique, a lancé la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W.
- **2019** : la production énergie photovoltaïque est à la disposition de l'industrie, entreprises et des particuliers, incluant les applications domestiques.

I.4.2. Définition d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque .Les cellules photovoltaïques sont des éléments semi-conducteurs et qui sont la base de la transformation photovoltaïque, présentement il existe plusieurs types des cellules qui sont par la suit fabriqués à partir des différent matériaux semi-conducteurs comme: le silicium (Si), le sulfure de cadmium (Cds), arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), le germanium (Ge) et le phosphore indium (InP) [6].

Les cellules photovoltaïques sont les pièces qui composent un panneau solaire, il y a entre 60 et 72 cellules photovoltaïques sur chaque panneau solaire.

I.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif optoélectronique qui transforme énergie solaire en énergie électrique.

La structure la plus simple de ce dispositif est similaire à une diode photosensible à base de matériaux semi-conducteurs qui exploite effet photovoltaïque, un phénomène physique spécifique à certains de ces matériaux, pour la transformation d'énergie. La figure (I.2) représente la structure une cellule photovoltaïque.

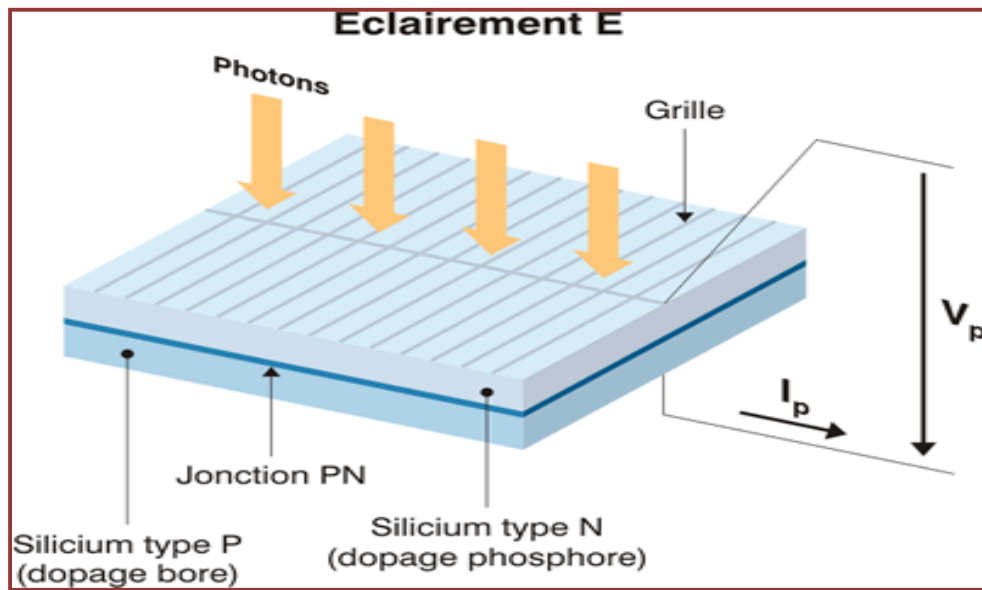


Figure I.2. Structure d'une cellule photovoltaïque [7].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont excités par les photons qui composent la lumière, et sous l'action de cette excitation, des électrons dans la couche électronique supérieure (appelés électrons de couche) ont tendance à être arrachés.

La Figure (I.3) illustre ce principe. Si les électrons reviennent à leur état initial, l'agitation des électrons provoque l'échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est convertie en chaleur, sinon les électrons déchirés produisent une faible tension continue qui varie entre 0,3 V et 0,7 V, selon le matériau et son agencement que la température de la cellule

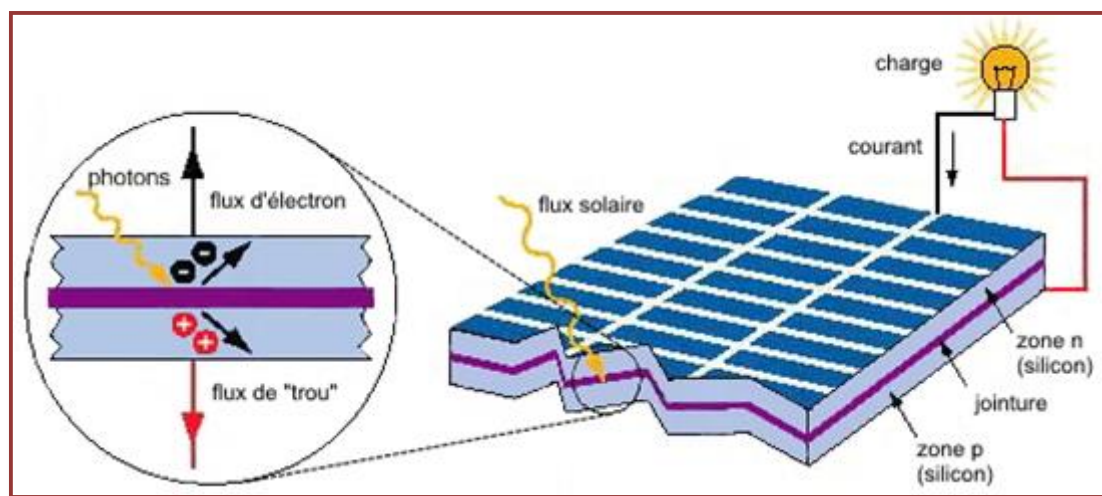


Figure I.3 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8].

I.4.4. Technologie d'une cellule photovoltaïque

On distingue actuellement trois catégories de cellules photovoltaïques en fonction des avancées technologiques. Chaque génération de cellule est caractérisée par un rendement et un coût qui lui est propres.

I.4.4.1. Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est à ce jour le choix le plus populaire pour les cellules commerciales, bien que de nombreux autres matériaux soient disponibles. Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur.

I.4.4.2. Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

I.4.4.3. Silicium amorphes

Ils ont de faibles rendements (allant de 5% à 8% et même jusqu'à 13% en laboratoire), mais nécessitent de très petites épaisseurs de silicium et sont peu coûteux. Ils sont souvent utilisés dans les petits produits de consommation tels que les calculatrices solaires ou les montres

I.5. le module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un générateur de très faible puissance en comparaison des nécessités de la majorité des utilisations domestiques ou industrielles, par conséquent, les cellules photovoltaïque sont connectées pour former un module, et la connexion est soit en série afin d'obtenir une augmentation de tension pour le même courant, soit en parallèle pour augmenter le courant pour la même tension.

La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique [4].

I.5.1. Caractéristique d'un module

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire

✚ La puissance de crête, P_c :

Le but recherché par l'utilisateur d'un générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement, qu'il peut fournir, dans les conditions de mesures normalisées suivant :

- La température à la jonction des cellules est de 25°C
- Un éclairement de 1000 W/m²

✚ Tension à vide, V_{CO} :

La tension à vide est tension aux bornes la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge et l'absence de tout courant ($I = 0$), appelée tension en circuit ouvert, pour un éclairement « plein soleil ».

✚ Courant de court-circuit, I_{CC} :

Courant débité par un module en court-circuit ($V = 0$), pour un éclairement « plein soleil »

✚ Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$:

C'est la puissance électrique maximale que l'unité peut fournir, qui est associé à la tension maximale V_m et au courant maximal I_m :

$$P_m = V_m * I_m \quad (I.2)$$

✚ Rendement :

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le taux entre la quantité d'énergie lumineuse convertie en électricité et la quantité d'énergie qui a été capturée par le système.

C'est donc un pourcentage qui permet d'évaluer l'efficacité des cellules photovoltaïques. Plus le pourcentage est élève, plus la cellule produit d'électricité. Ce rendement a pour formule [3] :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.3)$$

✚ Facture de forme :

Utilisé pour qualifier la qualité de la cellule et le facteur de forme est calculé par le rapport entre la puissance maximale et le produit du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.4)$$

I.5. 2 Les critères influant sur le rendement de module PV

Afin de conserver des modules photovoltaïques à haut rendement, Plusieurs paramètres entrent en jeu et nuisent à sa fiabilité, et inversement, peuvent être classés Ces normes sont divisées en deux :

I.5.2.1 Critères atmosphériques

Ces critères sont imposés généralement par les conditions climatiques et dépendent principalement de l'atmosphère et les lieux des installations, on peut citer plusieurs paramètres tel que l'éclairement, la température, la vitesse du vent, la présence de poussières...etc.

✚ L'éclairement

D'après la formule (I.3), on voit que l'efficacité dépend de l'éclairement, qui Le facteur est variable au cours de la journée, aucune action ne peut être entreprise pour l'augmenter, le mieux La solution est de choisir un emplacement avec un fort ensoleillement pour exposer les composants.

✚ La température de fonctionnement

L'augmentation de la température affecte directement le comportement cellules solaires, qui produisent une chute de tension d'environ 2 mV par degré, ce qui Une augmentation entraîne également une diminution de la puissance maximale disponible, Donc sur les performances de la batterie.

I.5.2.2. Critères non atmosphérique

Ce sont des normes atmosphériques indépendantes, et selon ces L'efficacité du module peut être améliorée, notamment :

✚ Le matériau de fabrication :

Ce facteur est très important et affecte directement la conversion Le photovoltaïque, en général, le silicium reste le matériau le plus fiable La fabrication de ce module et son rendement est le plus élevé.

✚ L'inclinaison et l'orientation du module :

Habituellement, les modules sont statiques. Le soleil étant en mouvement constant, il faut leur donner une direction et une inclinaison pour optimiser l'apport annuel d'énergie. L'orientation plein sud des modules permet une captation maximale de la lumière en journée et se traduit par des pics de production vers midi

L'angle d'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le flux solaire maximal, et des expériences ont montré qu'une inclinaison du module à un angle de 30 degrés est suffisante pour de meilleures performances.

✚ L'utilisation des régulateurs de charge

Afin d'améliorer les performances des modules photovoltaïques et d'assurer une durée de vie plus longue, il est nécessaire d'installer des régulateurs de charge, tels que série, parallèle, PWM, MPPT.

I.5.3. Zones de fonctionnement d'un module

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque sont variables en fonction de la température, de l'éclairement et, en général, des conditions de fonctionnement quand il est raccordé à une charge donnée. Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(v)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones, La figure (I.4) représenté trois zones essentielles :

- **La zone (1) :** le courant étant constant quelle que soit la tension, pour cette zone le générateur photovoltaïque agit comme un générateur de courant et proportionnelle à l'irradiation, présentant une admittance interne qui peut être modélée par $1/R_{sh}$.
- **La zone (2) :** qui est caractérisée par une modification du courant correspondant à une tension approximativement constant, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension, d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s .
- **La zone (3) :** qui correspond au virage de la courbe caractéristique, la zone intermédiaire entre les deux zones précédentes, elle représente la zone préférable pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal peut être déterminé, caractérisé par le couple (I_{max} / V_{max}) .

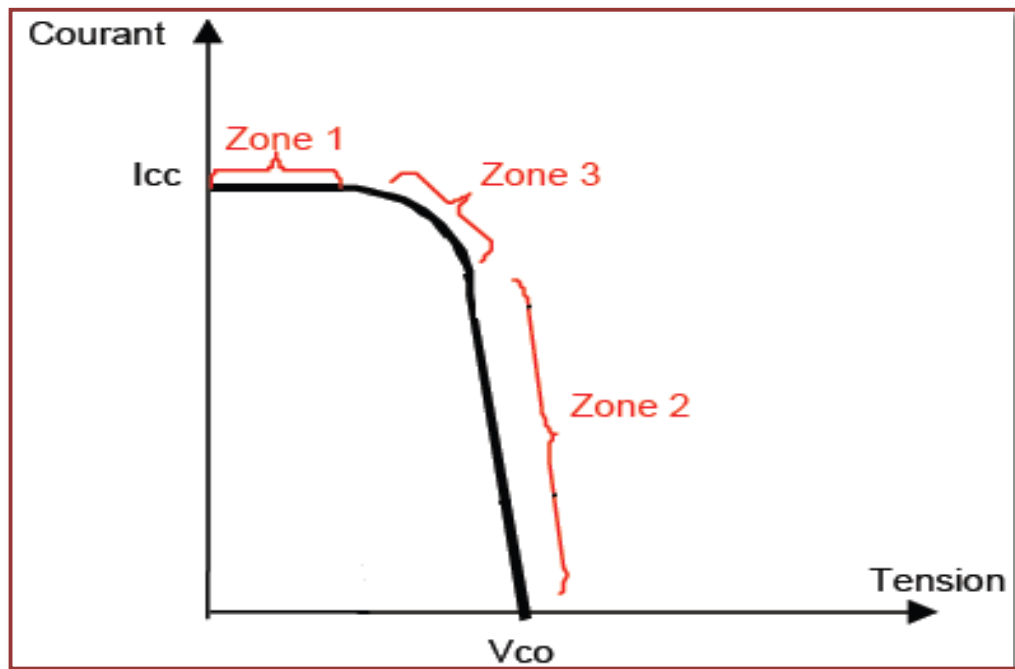


Figure I.4 : Les différentes zones de la caractéristique I (V) [3].

I.6. Générateur photovoltaïque

Selon l'application choisie, le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner soit un module PV, soit un panneau PV.

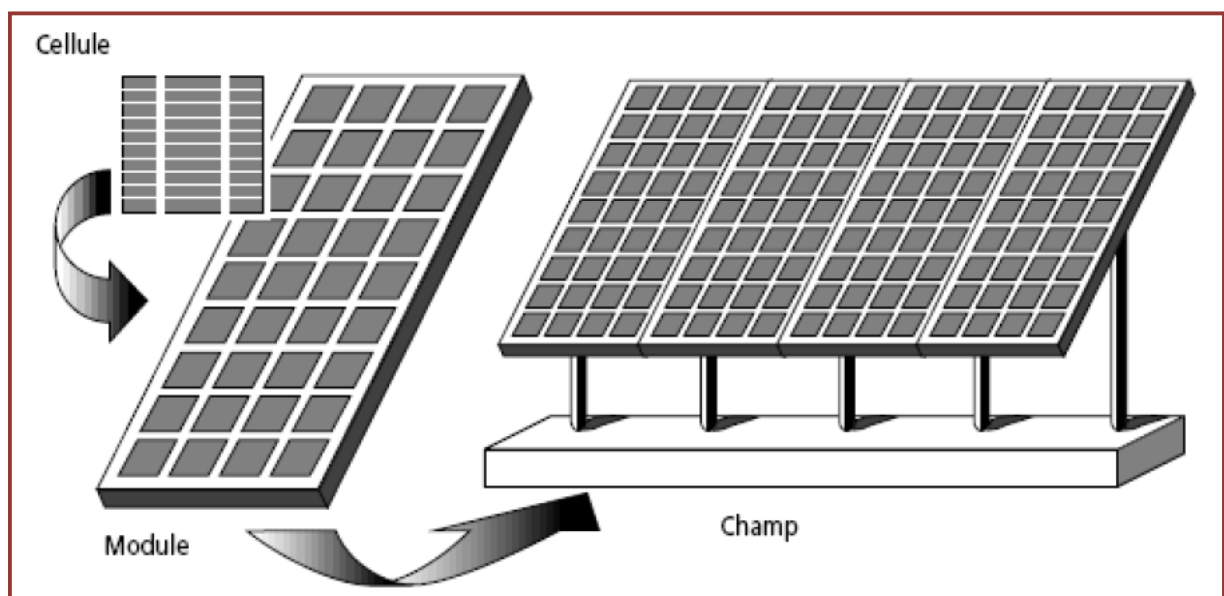


Figure I.5 : Composants d'un générateur de module photovoltaïque [2].

Si les cellules sont branchées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, ce qui

augmente la tension générale du générateur. Par contre, si les cellules sont branchées en parallèle, le courant augmente.

I.6.1. Mise en série

Une combinaison de (N_s) cellules en série figure (I.6) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors croisées par un même courant et la caractéristique résultante de la mise en série est donnée par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une combinaison en série de (N_s) cellules.

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (\text{I.5})$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \quad (\text{I.6})$$

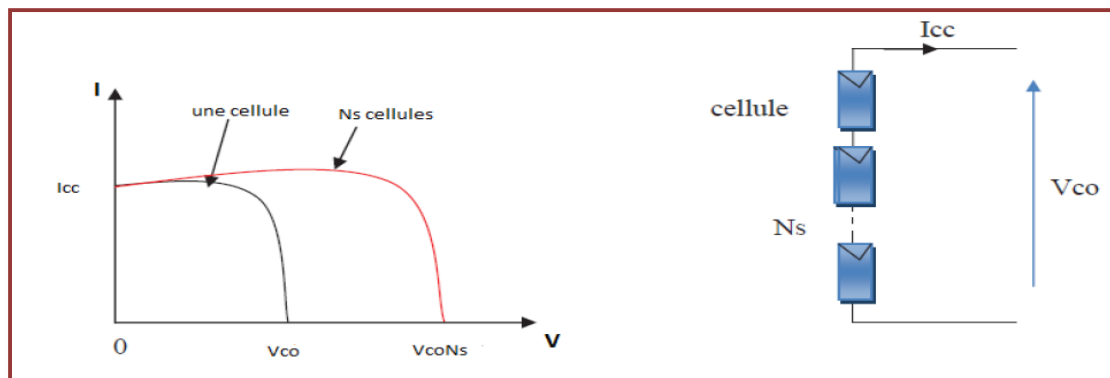


Figure I.6 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série [9].

I.6.2. Mise en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (I.7) est possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [10].

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \quad (\text{I.7})$$

$$V_{coNp} = V_{co} \quad (\text{I.8})$$

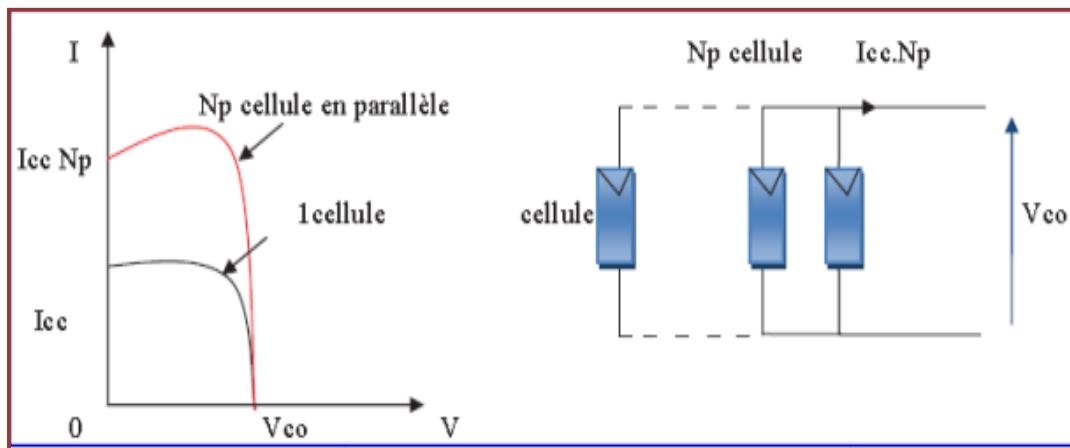


Figure I.7 : Caractéristique courant tension de N_p cellule en parallèle [9].

I.6.3. Mise en mixte (série-parallèle)

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de plusieurs modules photovoltaïques regroupés par des panneaux photovoltaïques, Figure (I.8). Afin d'obtenir satisfaction au présent et au temps, il est nécessaire d'utiliser des groupements mixtes, c'est-à-dire série et parallèle.

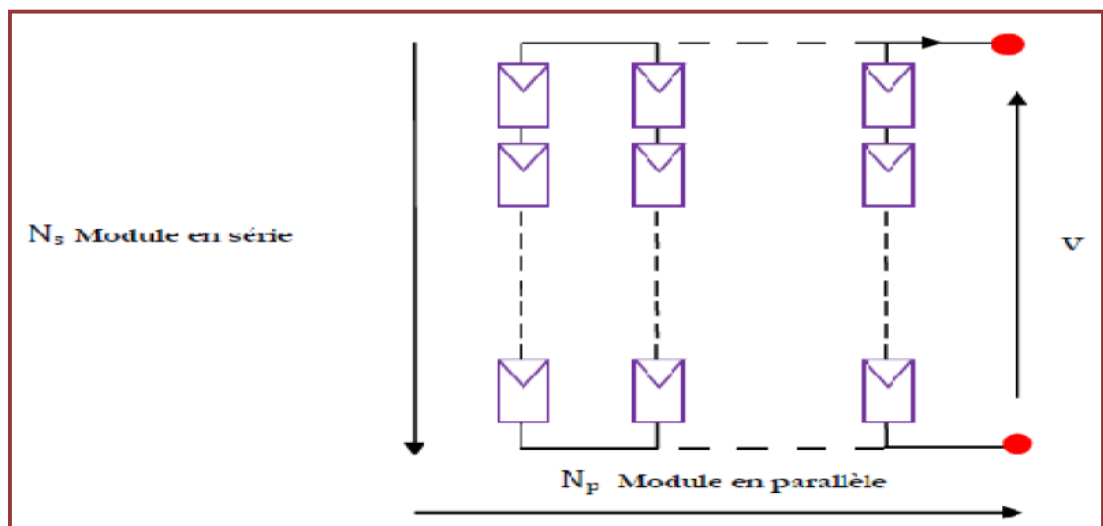


Figure I.8 : association mixte des modules solaires [10].

I.7. Différent types de systèmes photovoltaïques

Il existe généralement trois de systèmes PV, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers types sont indépendants du système de distribution d'électricité et se trouvent souvent dans des zones reculées.

I.7.1. Système photovoltaïque autonomes

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, la puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système PV est assurée par un système de stockage d'énergie et ce dernier est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc...), et le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 volts alternatif.

Ce système photovoltaïque comprend généralement différents composants de base :

- Un ou plusieurs modules PV
- Le système de régulation
- Une ou plusieurs batteries
- L'onduleur.

En généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

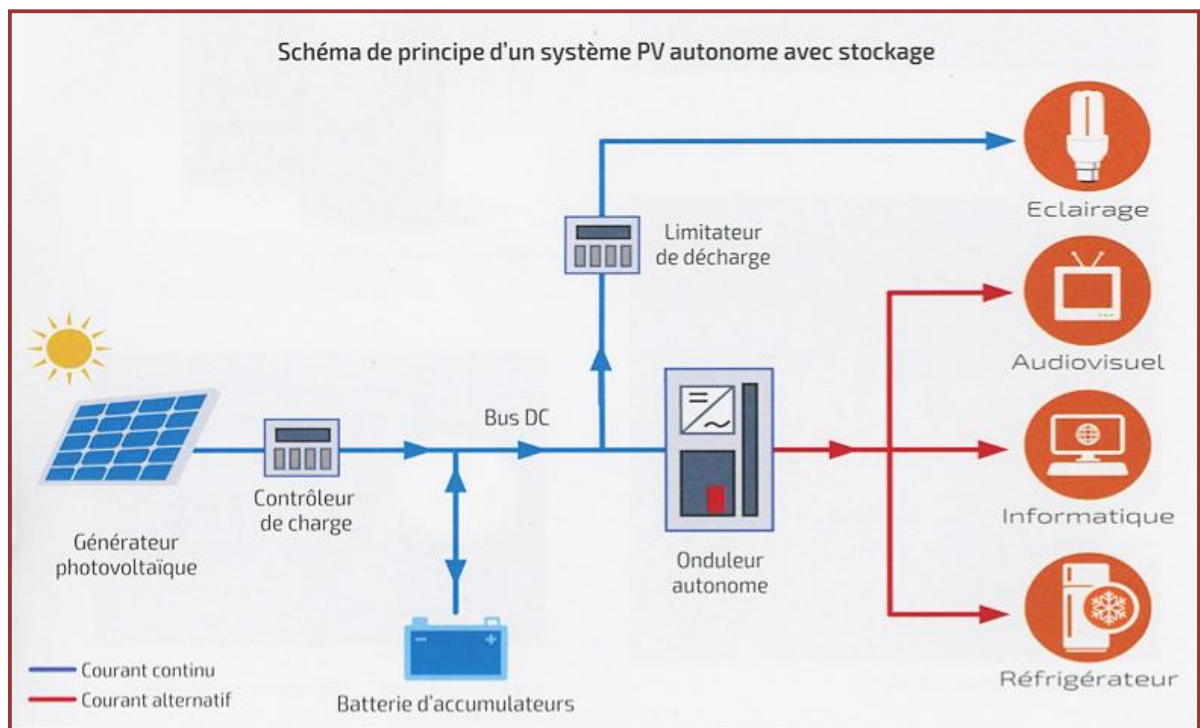


Figure I.9 : Système photovoltaïque autonome [11].

I.7.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau

Non autonome ou « grid connected », le système peut également être connecté au réseau, montre une configuration de ce système. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité.

Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

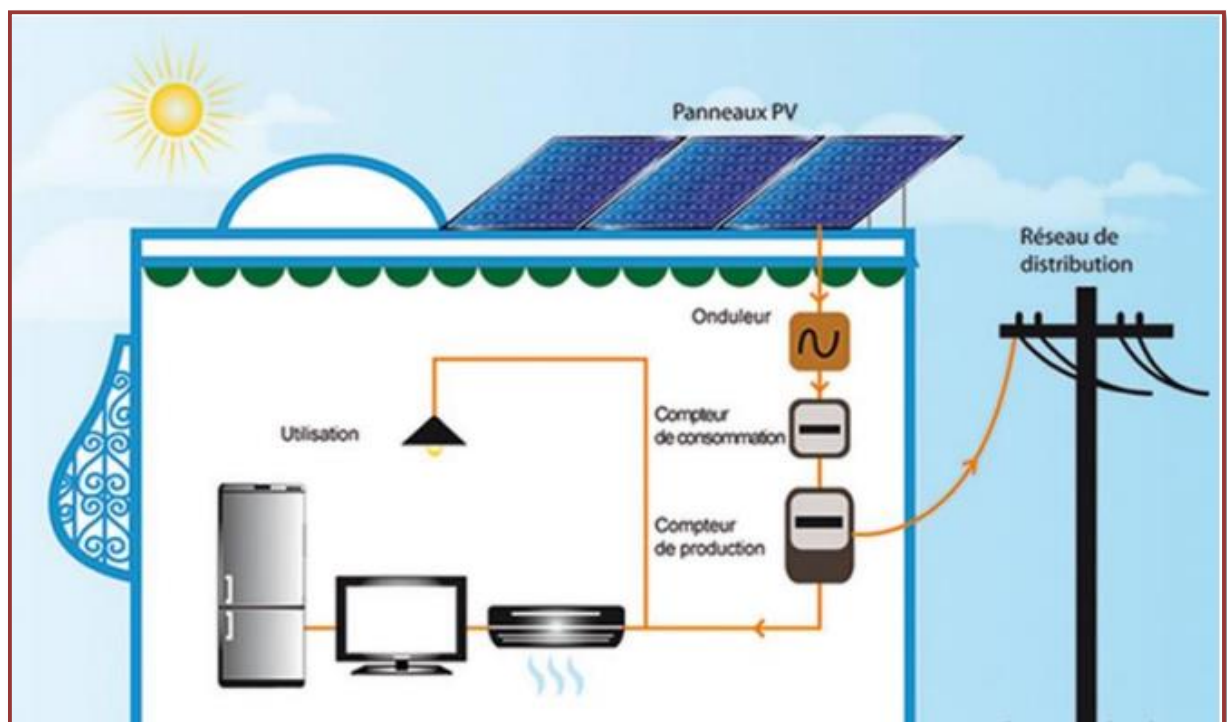


Figure I.10 : installation photovoltaïque raccordée au réseau [12].

I.7.3. Système photovoltaïque hybride

Les installations PV hybrides intègrent un générateur PV avec un autre : éoliennes, générateurs, systèmes hydroélectriques... et parfois même le réseau public.

En règle générale, les systèmes de batterie stockent l'énergie afin que l'énergie provenant de sources aléatoires telles que l'énergie solaire ou éolienne ne soit pas perdue.

La complexité d'un tel système réside dans l'équilibrage des différentes sources d'énergie pour les optimiser, les sources de chaleur (diesel, gaz, etc.) et les réseaux publics étant connus pour toujours être un dernier recours.

Les systèmes énergétiques hybrides sont souvent indépendants des grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des zones isolées.

Différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées dans deux configurations, architecture de bus continu et architecture de bus alternatif.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise [13].



Figure I.11 : Système solaire hybride [14].

I.8. Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.8.1. Avantage

Les panneaux solaires photovoltaïques présentent un certain nombre d'avantage :

- Cette énergie renouvelable est gratuite et énergie indépendante.
- Elle n'est pas taxée et ne crée pas d'émissions dans l'environnement tout au long de son utilisation.
- L'énergie photovoltaïque est évolutive et peut répondre à tous les besoins.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie spécifique et non polluante qui ne génère pas de gaz à effet de serre ni de gaspillage.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les placements et même de générer des bénéfices.

- Entretien minimal
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés aussi bien en ville qu'à la campagne.
- Les panneaux résistent aux intempéries et au froid.
- Les panneaux ont une durée de vie de 20 à 35 ans.

I.8.2. Inconvénients

Bien que les panneaux solaires photovoltaïques présentent de nombreux avantages, ils ont aussi leurs inconvénients :

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15% avec une limite théorique pour une cellule de 28 % les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées [6].
- La production de panneaux photovoltaïques est une filière de haute technologie qui nécessite beaucoup de recherche et de développement et donc des placements élevés.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- En hiver, l'installation est moins efficace. Il faut donc le coupler avec un chauffage d'appoint qui fera le job.

I.19. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le l'énergie solaire, la construction des différents types de cellules photovoltaïque et leur effet ainsi que leur principe de fonctionnement, enfin les avantages et les inconvénients de système photovoltaïque.

Chapitre II:

Modélisation du système

Photovoltaïque

II.1. Introduction

La modélisation est une étape essentielle pour présenter et évaluer un certain nombre de modèles. Nous utilisons plusieurs modèles mathématiques qui ont été développés et dont le but est d'obtenir la caractéristique courant-tension.

Ces modèles diffèrent les uns des autres par des procédures mathématiques et le nombre de paramètres impliqués. Dans le calcul de la tension et du courant, pour simuler le fonctionnement du générateur photoélectrique. Nous cherchons toujours à travailler près du point de puissance maximale MPP.

Ce chapitre, a pour objet l'étude, la modélisation et la simulation du Module photovoltaïque sous MATLAB.

II.2. Modélisation d'une cellule PV

II.2.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent d'une cellule PV peut être décrit par le modèle à une exponentielle, les caractéristiques du courant $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque schématisées comme suit :

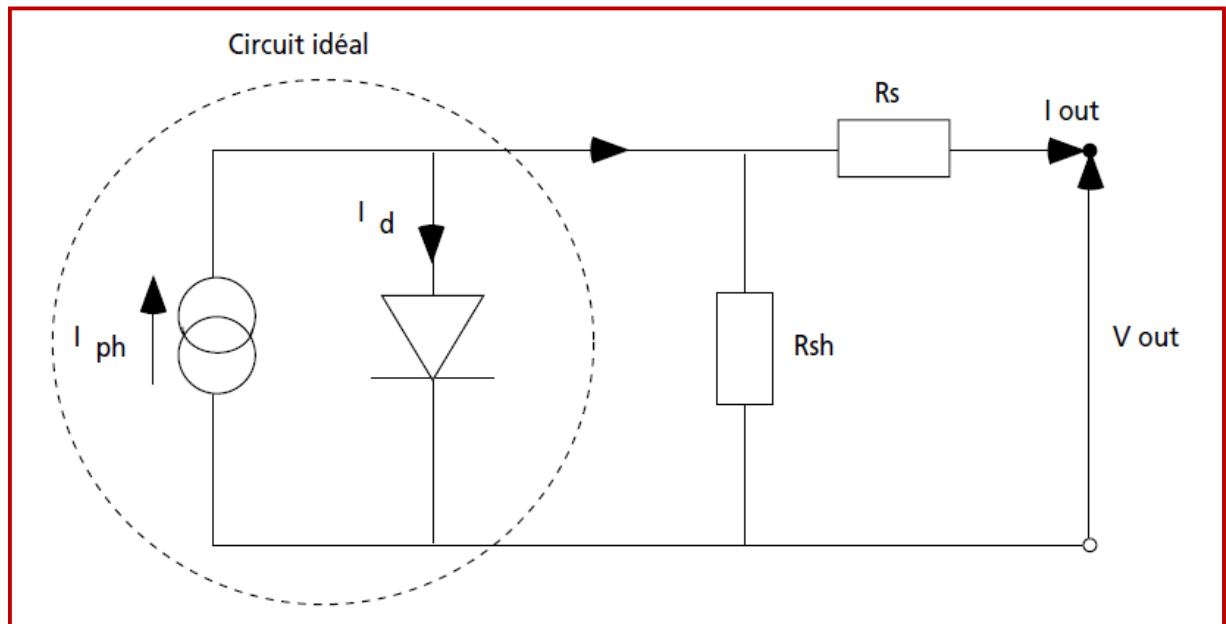


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [4].

a. Cas idéal

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode, délivrant un courant selon [2]. Figure (II.1).

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit (l'équation est déduire à partir de la loi de Kirchhoff) :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_d} \quad \text{(II.1)}$$

Avec :

I : courant fourni par la cellule.

I_{ph} : photon-courant de cellule proportionnelle à l'éclairement (G).

I_d : le courant circulant dans la diode.

La caractéristique I-V d'une diode est une caractéristique non linéaire donnée par la relation :

$$\mathbf{I_d = I_o [\exp (\frac{V_d}{nV_{th}}) - 1]} \text{ avec : } \mathbf{V_{th} = \frac{K.T}{q}} \quad \text{(II.2)}$$

Donc l'équation du courant dérivé par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_o [\exp (\frac{V_d}{nV_{th}}) - 1]} \quad \text{(II.3)}$$

Avec:

I_o : courant de saturation inverse de la diode [A].

V_d : Tension de sortie [V].

$$\mathbf{V_d = R_s * I} \quad \text{(II.4)}$$

$V_{th} = KT/q$: potentiel thermique.

$$\text{Donc:} \quad \mathbf{I = I_{ph} - I_o [\exp (\frac{q*(v+R_s*I)}{nKT}) - 1]} \quad \text{(II.5)}$$

n : facteur d'idéalité de la jonction.

K : constante de Boltzmann $K = 1.38e-23$ [J/K].

q : la charge de l'électron $1.6e^{-19}$ [eV].

T : la température de la jonction [K].

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Si (Silicium), on obtient les caractéristiques électriques d'une diode, (Figure II.2) la particularité du (Si) est que : lorsque la jonction PN est éclairée, un courant proportionnel à l'éclairement apparaît. C'est cette particularité qui est employée dans les générateurs solaires photovoltaïque [15].

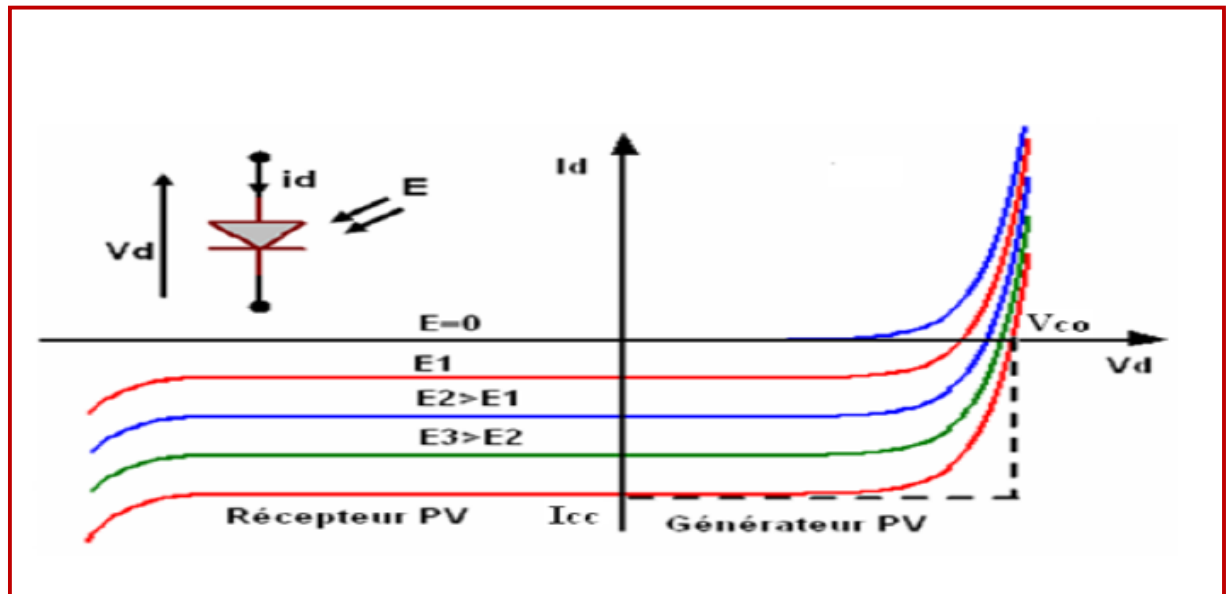


Figure II.2 : Caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairagements E_i [15].

Ce modèle est encore théorique et ne montre pas le comportement de la cellule photovoltaïque en conditions réelles. Il est possible d'utiliser d'autres modèles, théoriques bien sur, mais ils donnent un calcul plus précis du comportement de la cellule photovoltaïque

a. Cas réel avec une seule diode (modèle général)

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [16].

Les deux modèles mathématiques les plus utilisés sont le modèle à une diode et le modèle à deux diodes, parmi lesquels nous avons choisis celui d'une seule diode.

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.6})$$

I : courant fourni par la cellule.

I_{ph} : photon-courant de cellule proportionnelle à l'éclairement (G).

I_d : le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : le courant circulant dans la résistance R_{sh}.

- **Le photo-courant I_{ph}**

Le photon-courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température. Son expression est la suivante

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T_{op} - T_{ref})] * \frac{G}{G_0} \quad (\text{II.7})$$

I_{cc} : courant de court de circuit.

K_i : coefficient de la température de court-circuit.

G : l'éclairement solaire

G₀ : Eclairement pour les STC

T_{op} : Température de fonctionnement de la cellule.

T_{ref} : Température référence de la cellule.

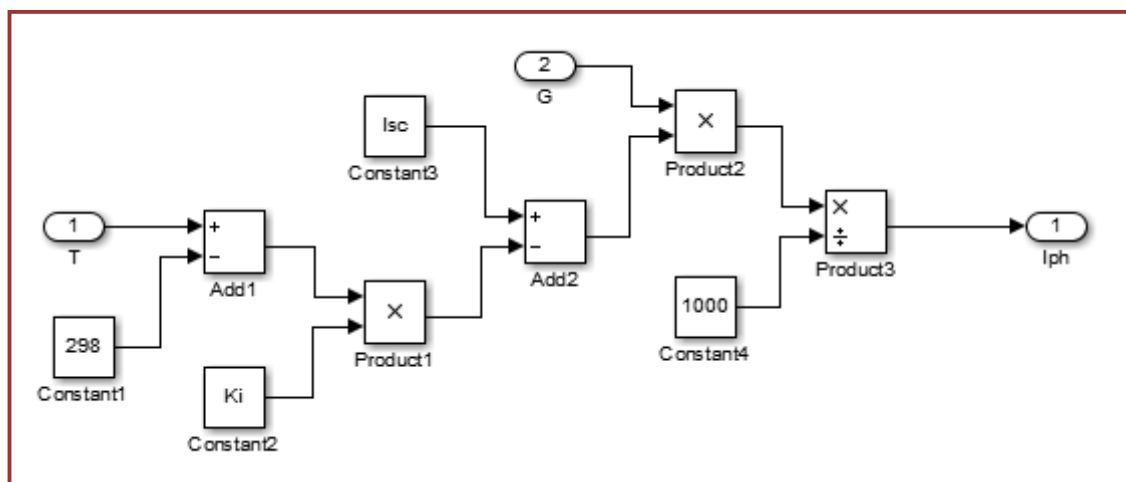


Figure II.3 : schéma block de photo-courant

- **Courant de saturation I_0**

Le courant de saturation dépend de la température, son expression est sous la forme :

$$I_0 = I_{sc} \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{op}} \right)} \quad (\text{II.8})$$

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

T_r : Température référence de la cellule.

E_g : Energie de seuil.

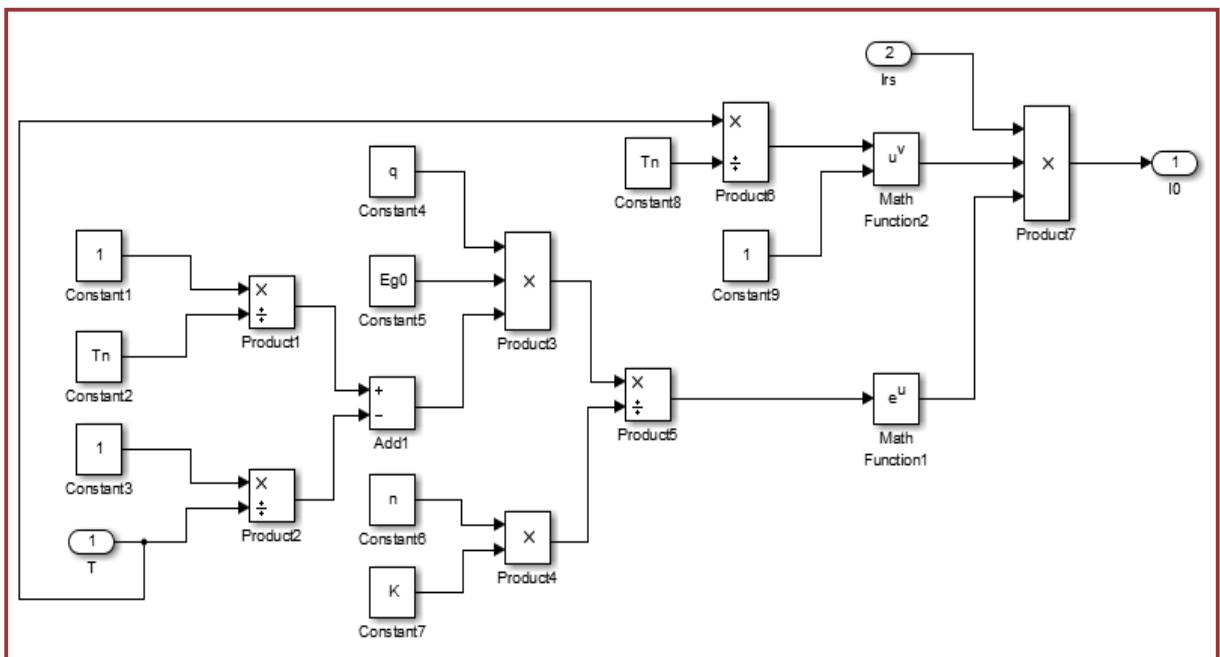


Figure II.4 : schéma block de Courant de saturation.

- **Le courant de la jonction I_d est donné par I_d**

$$I_d = I_0 (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1) \quad (\text{II.9})$$

$$V_{th} = \frac{n \cdot K \cdot T_{op}}{q} \quad (\text{II.10})$$

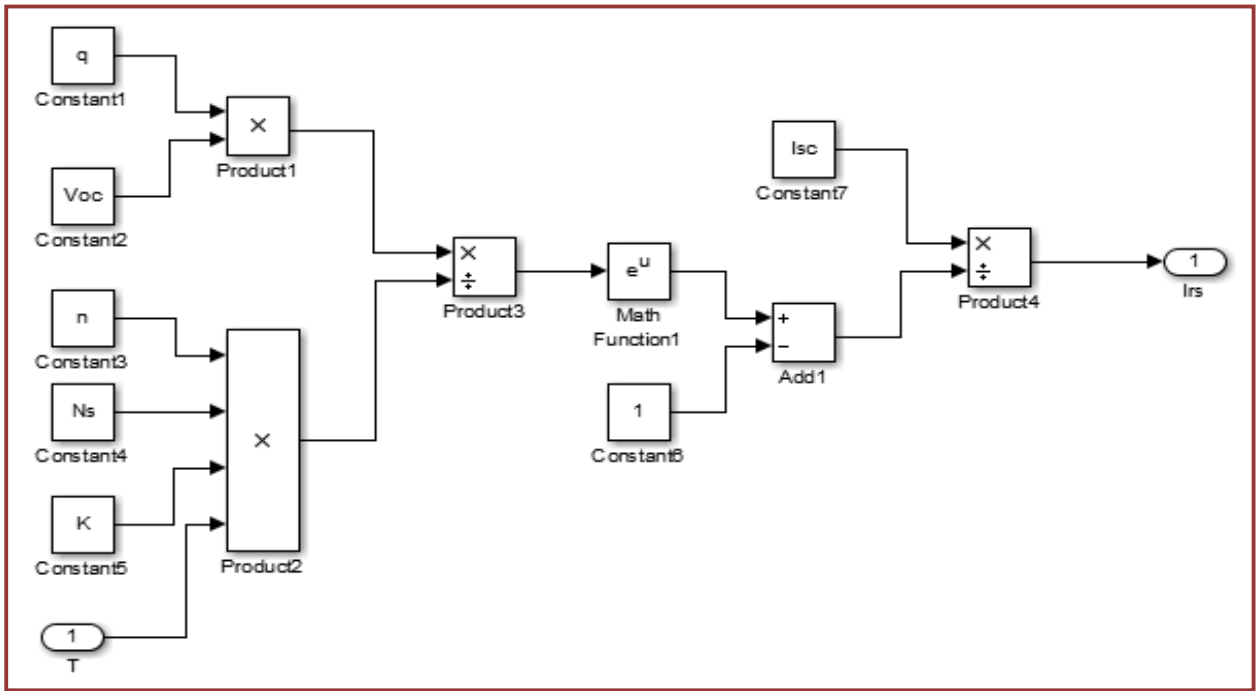


Figure II.5 : schéma block de Reverse Saturation Curent.

• Shunt courant I_{sh}

$$I_{sh} = \frac{V_d + R_s \cdot 1}{R_{sh}} \tag{II.11}$$

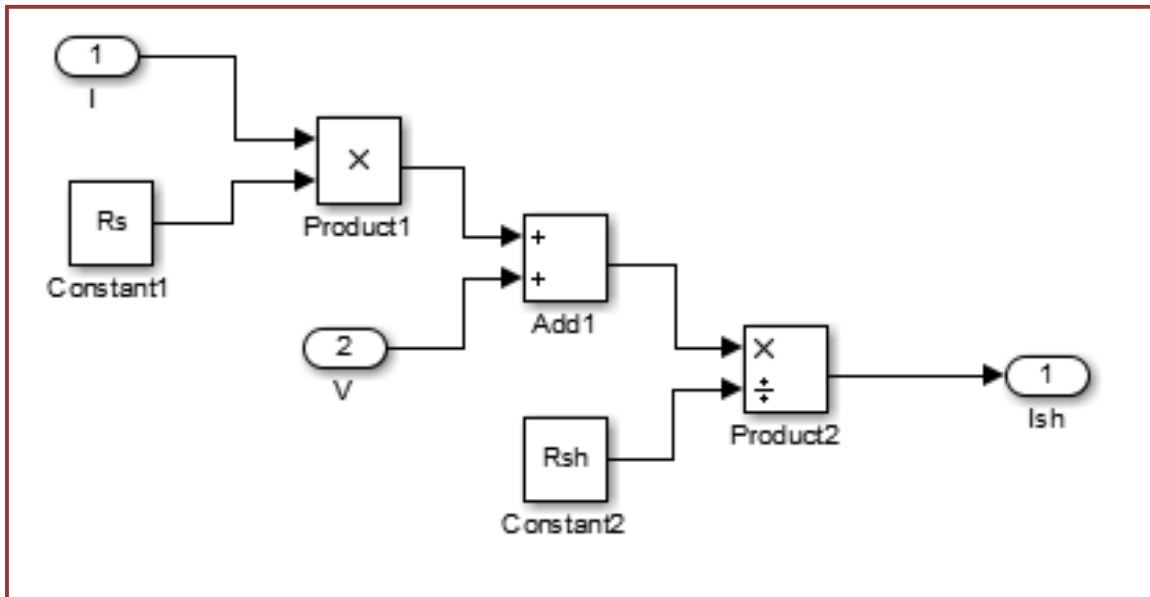


Figure II.6: schéma block de Shunt courant.

Si on remplacé I_{ph} et I_d et I_{sh} par ses expression l'équation totale (II.6) devient :

$$I = [I_{cc} + k_i(T_{op} - T_{ref})] * \frac{G}{G_0} - I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_d + R_s I}{R_{sh}} \tag{II.12}$$

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé, On obtient le bloc schématique de SIMULINK est montré sur la figure (II.7).

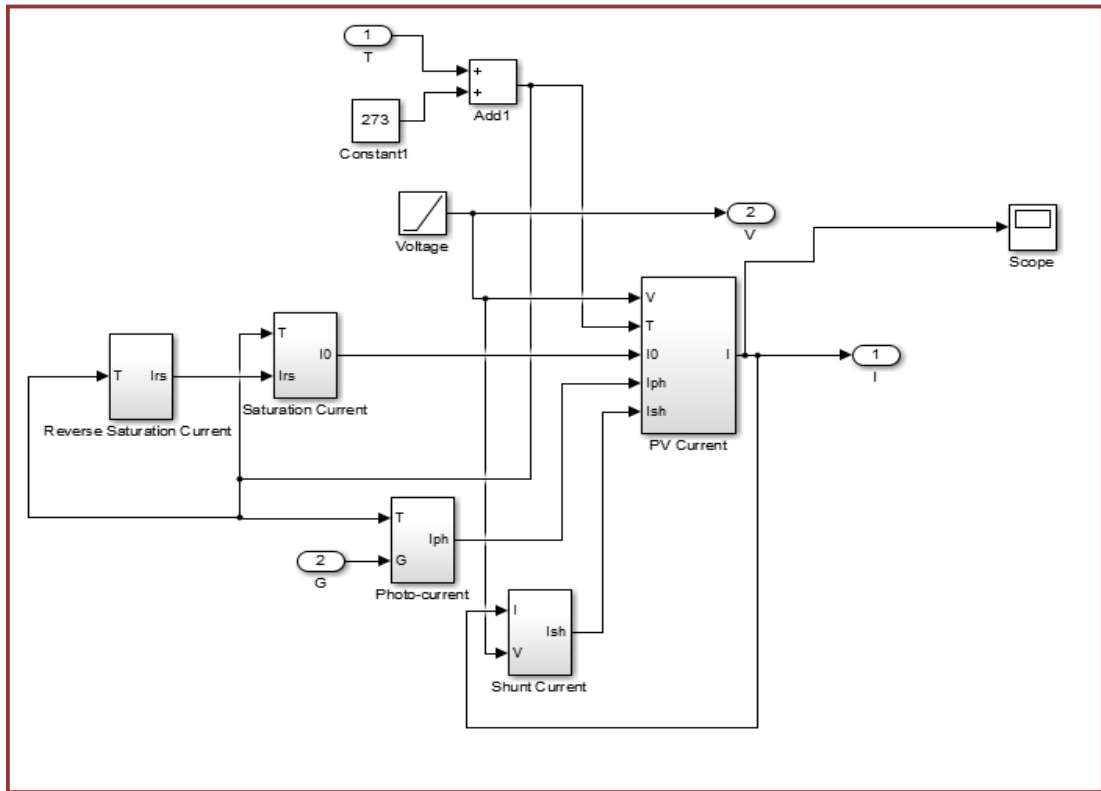
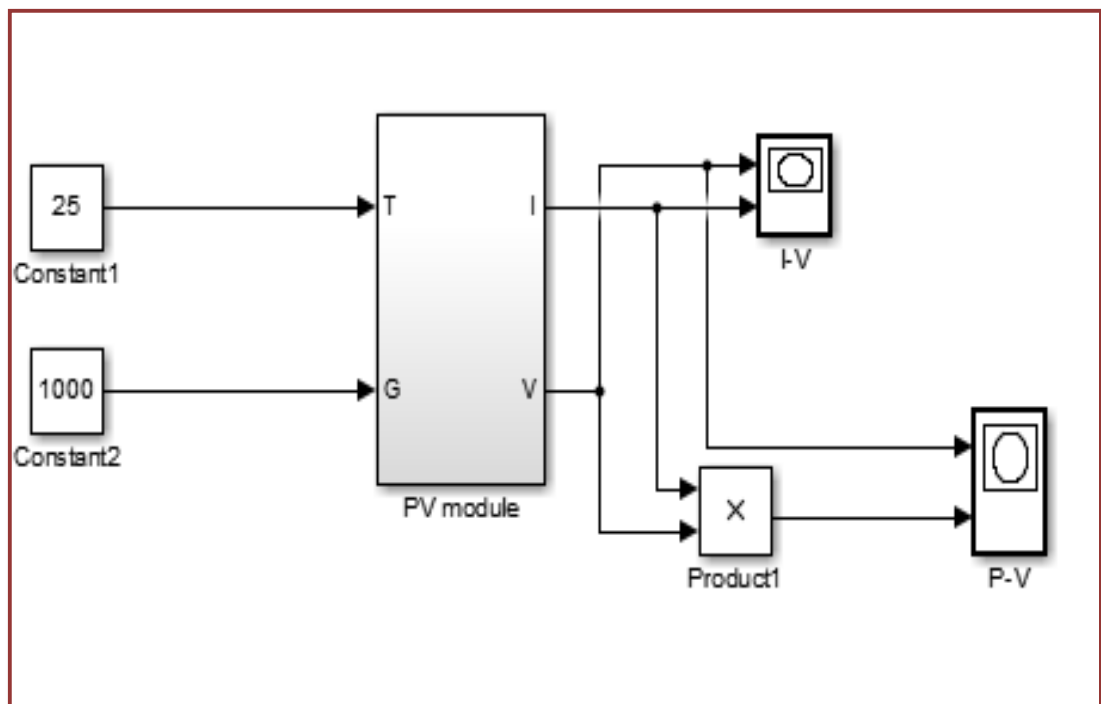


Figure II.7 : Simulation le bloc PV.



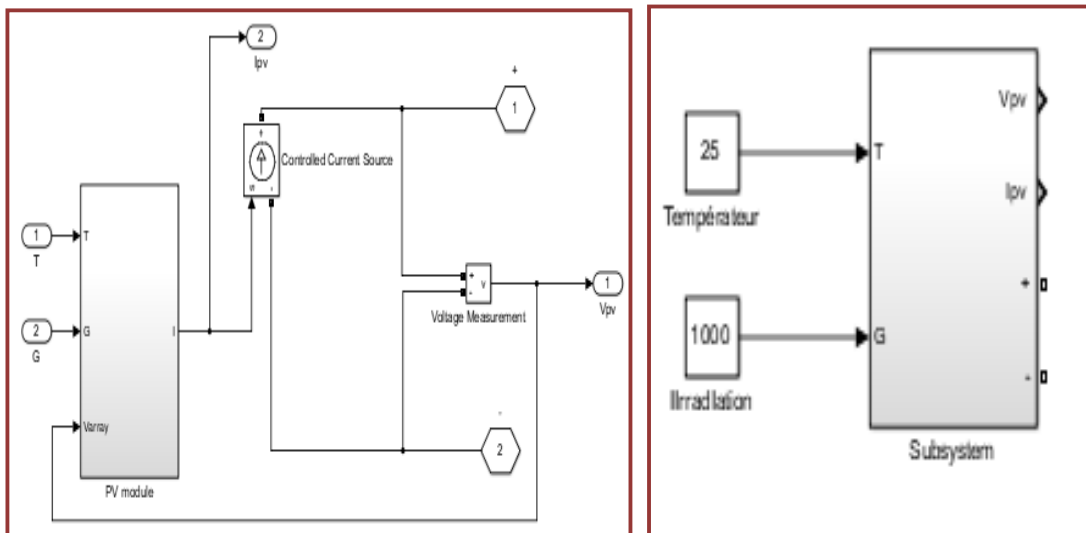


Figure II.8 : Schéma block Module photovoltaïque sous MATLAB.

II.2.2. caractéristique I(V) et P(V)

La courbe caractéristique d'une cellule PV est la variation du courant qu'elle génère en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV, allant du court-circuit (tension zéro pour un courant maximal produit) au circuit ouvert (courant zéro pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Pour tracer les caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$, nous devons disposer de trois points de mesure, fournis par le fabricant.

- Le point de court-circuit ($I_{CC}, 0$) ;
- Le point de circuit ouvert ($0, V_{CO}$) ;
- Le point d'optimal (I_m, V_m) ou le module délivre sa puissance maximale.

Il s'agit d'une propriété fondamentale du module solaire, qui définit cet élément en tant que générateur. Il est identique à celui d'une jonction P-N à direction bloquée, mais décalé dans l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

Les figures (II.9) Présentent les résultats obtenus par la simulation (programmation à l'aide du logiciel MATLAB) des caractéristiques courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) de la cellule photovoltaïque dans des conditions ordinaires ($T = 25^\circ\text{C}$, $E = 1000\text{W/m}^2$).

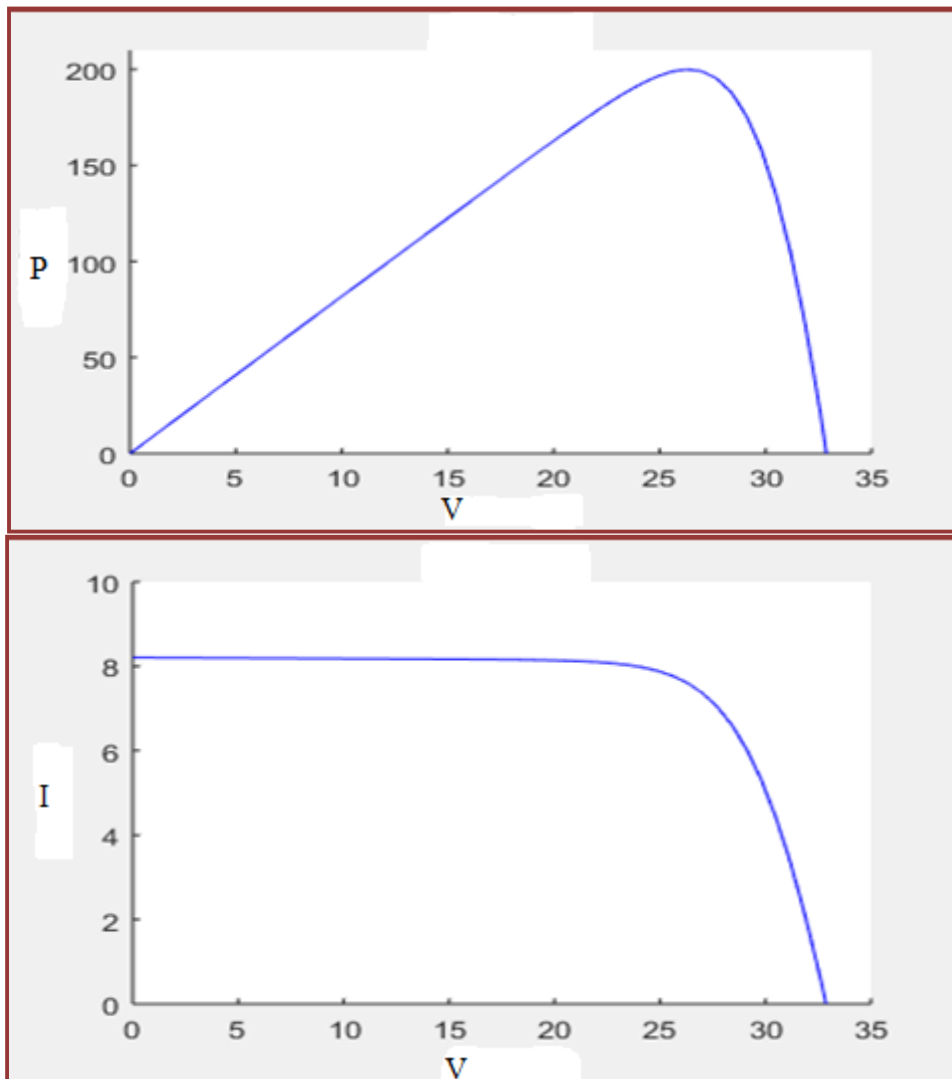


Figure II.9 : caractéristique $I(V)$, $P(V)$.

II.3. Les hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continu/continu 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).

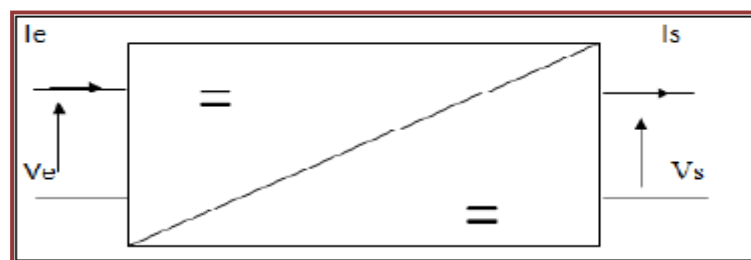


Figure II.10 : Convertisseur DC/DC [16].

II.3.1. Les types des hacheurs

II.3.1.1. Hacheur série (Buck)

C'est un convertisseur direct DC-DC. Un convertisseur abaisseur ou hacheur série est un dispositif qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure.

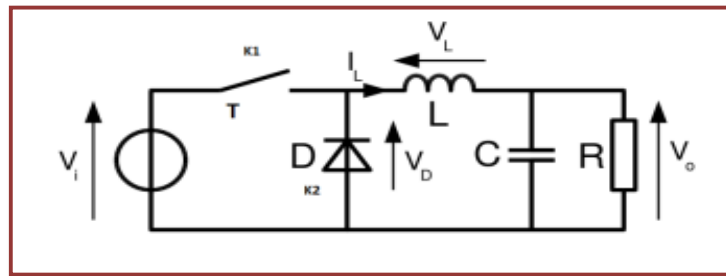


Figure II.11 : schéma d'un convertisseur Buck [16].

II.3.1.2. Hacheur parallèle (Boost)

Considérons l'exemple de la Figure (II.12) correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur de source de charge lorsque la charge nécessite une tension plus élevée que le générateur PV.

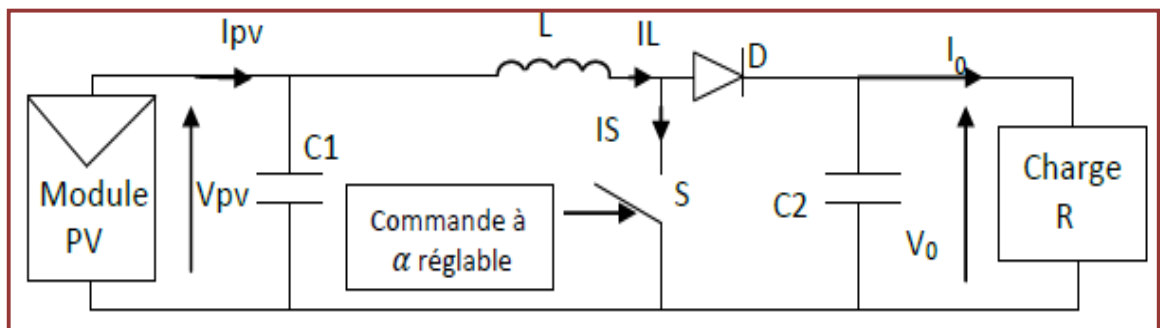


Figure II.12: Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge [17].

II.3.2. Domaine d'utilisation des hacheurs

L'un des principaux domaines d'utilisation des hacheurs est :

- le changement de vitesse du moteur courant continu.
- Ils conviennent à la plupart des véhicules à traction moyenne comme ceux utilisés pour les métros.

- L'ensemble d'équipements TGV de première génération Hacheur de moteur à courant continu.
- Utilisation dans les systèmes PV :
 - ✓ Le hacheur Buk est utilisé pour les basses tensions. Dans les applications photovoltaïques, le convertisseur Buk (abaisseur) est généralement utilisé comme chargeur de batterie et dans les systèmes de pompage d'eau.
 - ✓ Le hacheur Boost est utilisé pour augmenter la tension. Système la production d'énergie utilisé un hacheur Boost pour augmenter la tension de sortie le niveau de service avant l'étape de l'onduleur.

II.3.3. Choix d'un hacheur Boost

Un convertisseur élévateur est utilisé lorsque vous souhaitez augmenter la tension disponible d'une alimentation continue. Les appareils alimentés par batterie utilisent souvent plusieurs batteries connectées en série pour atteindre des niveaux de tension suffisamment élevés. L'espace disponible est souvent limité et il n'y a pas forcément un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur élévateur peut augmenter la tension fournie par la batterie, réduisant ainsi le nombre de composants nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. Les véhicules hybrides et les équipements d'éclairage sont deux exemples typiques d'utilisation de convertisseurs élévateurs.

II.3.4. Modélisation d'un hacheur Boost

II.3.4.1. Fonctionnement d'un hacheur Boost

Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [18].

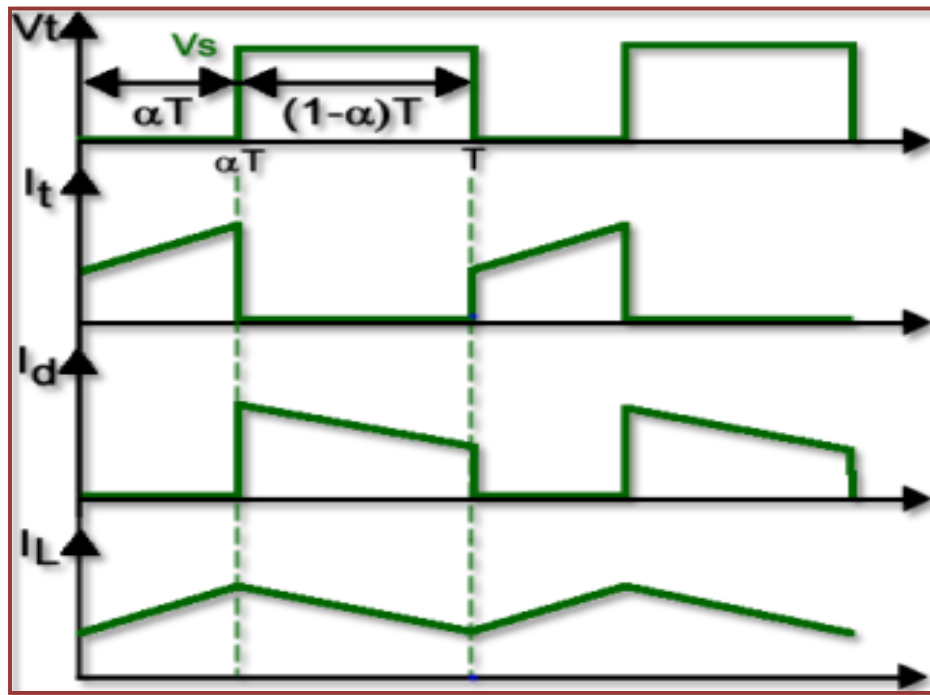


Figure II.13 : Chronogrammes des composants d'un hacheur boost [19].

- Lorsque le transistor conduit de 0 à αT , V_t vaut 0, la diode est bloquée, l'inductance accumule de l'énergie
- Lorsqu'il est bloqué, de αT à T , la diode est passante, l'inductance restitue le courant dans la charge et donc $V_t = V_s$

II.3.4.2. Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle αT s :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II.13})$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II.14})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \quad (\text{II.15})$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - \alpha)T$ s:

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II.16})$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II.17})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_0 - R_L I_L \quad (\text{II.18})$$

Sur la base des équations précédentes montrant le convertisseur amélioration pour deux αT_s et $(1 - \alpha)T_s$ respectivement.

Le convertisseur oscillant ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous ne considérons que la variation des variables dynamique C_L V_L soit de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$ si $\varepsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante [18].

Cette méthode nous permet d'analyser l'expression de la valeur moyenne de la dérivée pour la variable dynamique X sur deux cycles de temps αT_s et $(1 - \alpha)T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dt((1-\alpha)T_s)} (1 - \alpha)T_s \quad (\text{II.19})$$

$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de X sur une période T_s .

Dans ce cas, la forme exponentielle du courant traverse la manette des gaz et la tension traverse les bornes l'amplitude est linéaire comme le montre la figure (II.15) suivante :

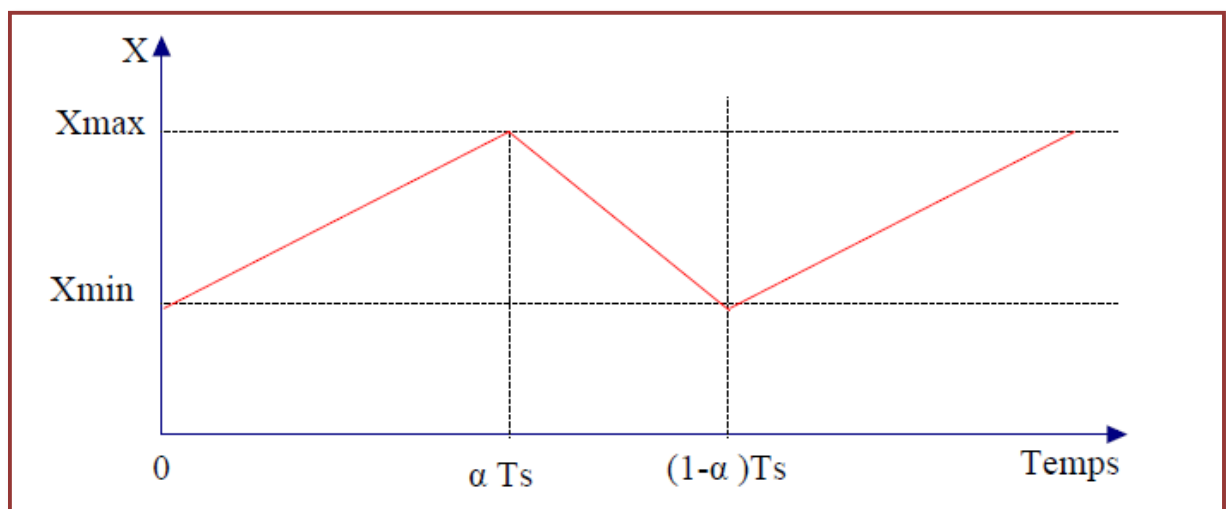


Figure II.14 : Allure des variables dynamiques I_L [18].

En appliquant la relation (II.19) aux systèmes d'équations (II (13, 14,15) et (II (16, 17,18) on obtient équations qui gouvernent le système sur une période entière :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} \alpha T_s = (I_g - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_g - I_L) \quad (\text{II.20})$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad (\text{II.21})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_g - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_g - V_0 - R_L I_L) \quad (\text{II.22})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour que nous puissions relier renforcement avec d'autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur boost.

$$I_L = I_g - C_1 \frac{dV_g}{dt} \quad (\text{II.23})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II.24})$$

$$V_g = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II.25})$$

II.3.4.3. Dimensionnement des composants de convertisseur L et C

Pour le calcul du dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur afin de limiter les perturbations des courants et tension.

Calcul de ces composants en fonction des perturbations est nécessaire. Cette remarque est très majeure pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter la capacité C de transport de courant du commutateur ou dans le cas pratique cas, les perturbations du courant I_L sont plus majeures que les autres perturbations.

- En appliquant la relation $V_L = L \frac{dI_L}{dt}$ est on obtient :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_g}{L} \quad (\text{II.26})$$

- A partir de la relation (II.27), la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$I_{Lcc} = 2\Delta I_L \approx \frac{V_g}{L} \alpha T_s \quad (\text{II.27})$$

- La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine perturbation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{V_g}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (\text{II.28})$$

- Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{I_c}{C} \approx \frac{I_o}{C} \quad (\text{II.29})$$

- La valeur de perturbation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{cc} = 2\Delta V_c \approx \frac{I_o}{C} \alpha T_s \quad (\text{II.30})$$

- La valeur de la capacité C est donnée par :

$$C = \frac{I_o}{2\Delta c} \alpha T_s \quad (\text{II.31})$$

II.4. Commande MPPT

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner sur une large gamme de tensions et de courants de sortie, mais il ne peut fournir une puissance maximale qu'à des valeurs de courant et de tension spécifiques. En effet, la caractéristique I(V) du générateur dépend de l'ensoleillement et de la température. Ces changements climatiques font fluctuer le point de puissance maximale. En raison de cette fluctuation, un ou plusieurs convertisseurs contrôlés statiquement sont généralement insérés entre le générateur et le récepteur afin de suivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT lié au hacheur "Maximum Power Point Tracking", qui assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer une puissance maximale.

II.4.1. Principe du MPPT

Par définition, la commande MPPT associée à la phase d'adaptation intermédiaire peut faire fonctionner le GPV pour produire en permanence sa puissance maximale. Par conséquent, le contrôle du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximal (VPPM et IPPM) quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiante). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée par un convertisseur statique (CS) piloté par le MPPT.

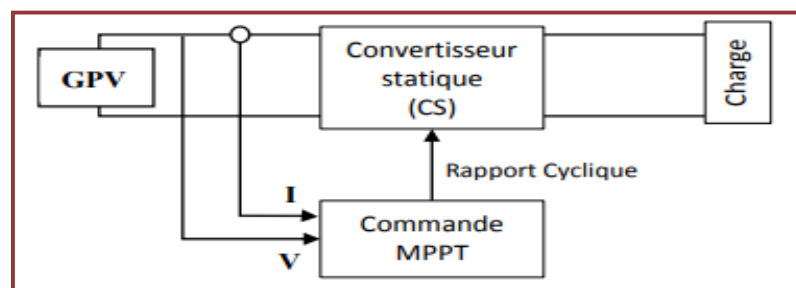


Figure II.15: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge [20].

Le contrôle MPPT modifie le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) en utilisant un signal électrique approprié pour extraire la puissance maximale que le GPV peut fournir.

Les algorithmes MPPT peuvent être plus ou moins complexes pour trouver des MPP. En général, il est basé sur le changement du rapport cyclique de CS, en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et donc la puissance du GPV) jusqu'à ce qu'il soit placé sur le MPPT.

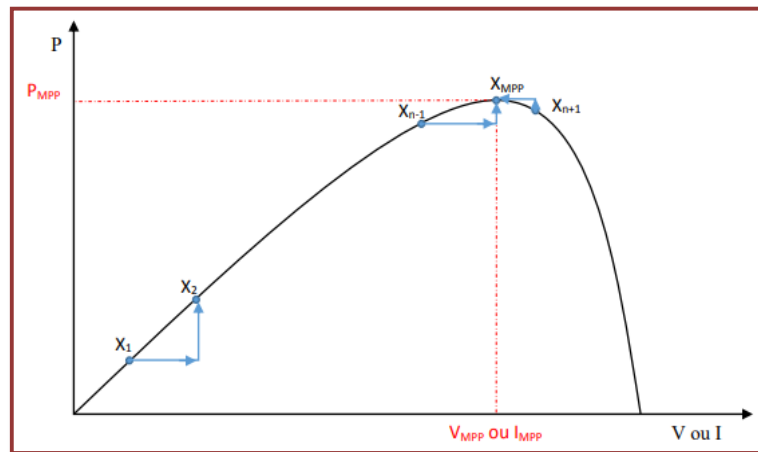


Figure II.16: Principe de la commande MPPT [20].

II.4.2. Classification des techniques MPPT :

La classification des algorithmes de suivi peut être basée sur la fonctionnalité de la technologie ou la stratégie de contrôle utilisée. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas de connaissance préalable des caractéristiques du panneau photovoltaïque. Ces méthodes incluent les méthodes différentielles, les méthodes Perturbe & Observe (P&O), les méthodes de conductance incrémentielle, etc.

II.4.2.1. La méthode incrémentation de la conductance :

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [21]

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par:

$$P_{pv} = I_{pv} * V_p \quad (I.9)$$

La conductance et l'incrémentation de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension Ppv:

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (I.10)$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance:

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.32})$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.33})$$

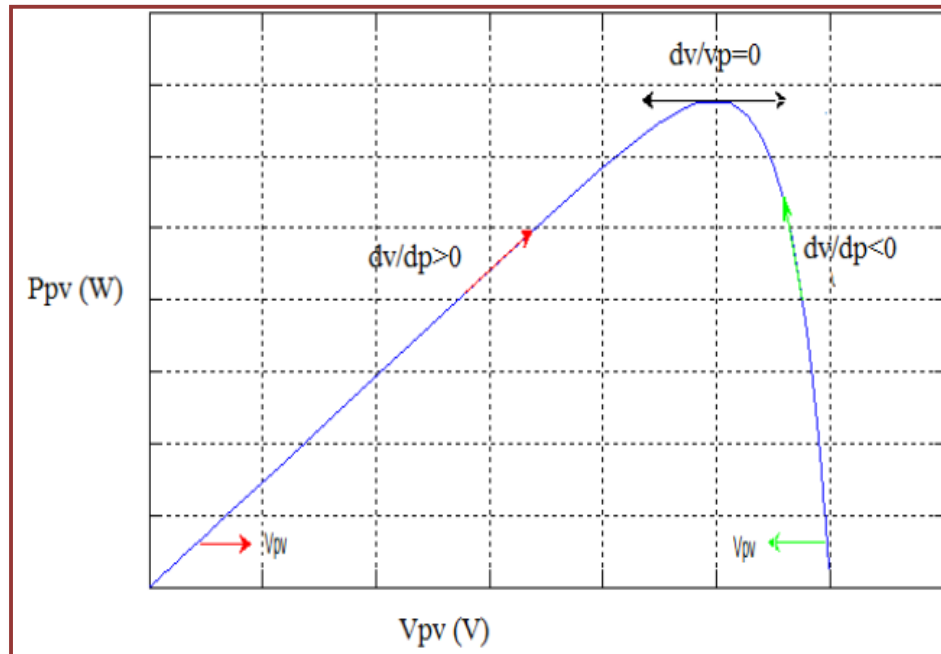


Figure II.17: Trajectoire par Incrémentation de Conductance [21].

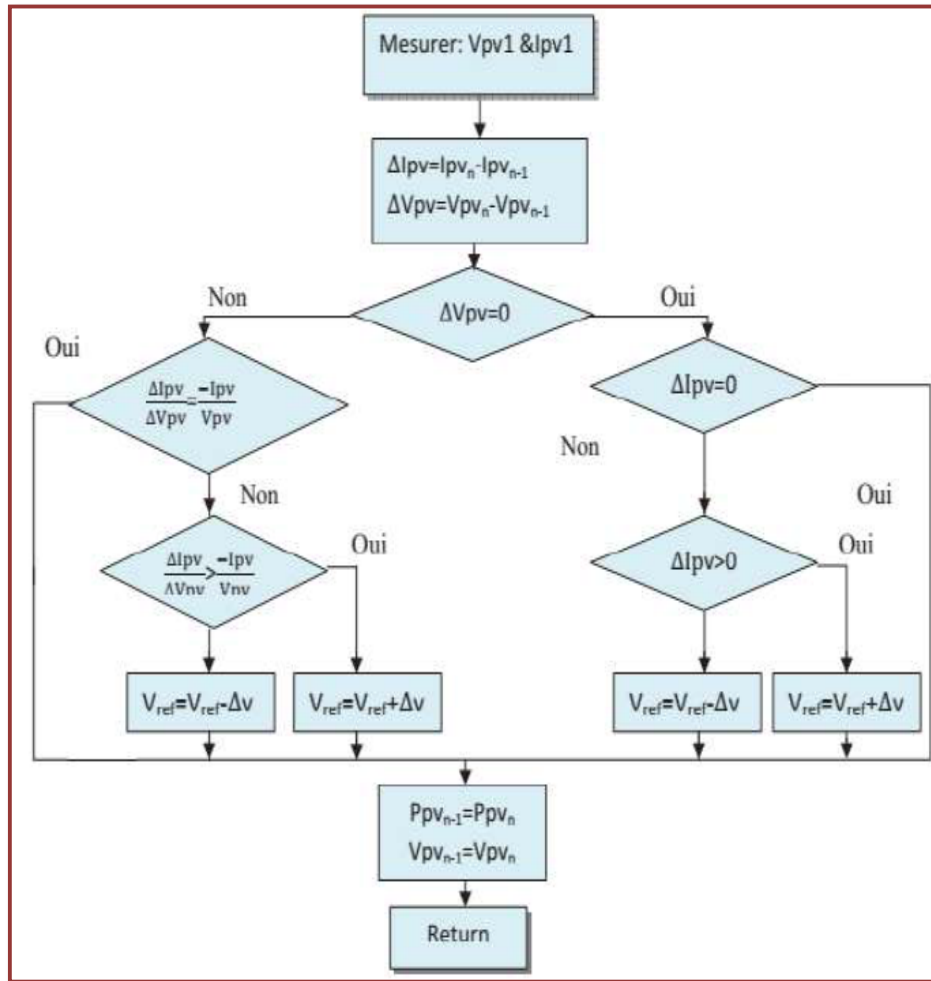


Figure II.18 : Algorithme d'incrémentation de la conductance [21].

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0$: Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0$: Le point de fonctionnement sur le PPM.

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0$: Le point de fonctionnement est droit de PPM.

II.4.2.1.1 Les avantages de Incrémental Conductance (INC)

- ✚ Fonctionne mieux dans des conditions météorologiques qui changent rapidement.
- ✚ Sa vitesse transitoire est rapide et minimise l'Oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale.
- ✚ Le principal avantage de cet algorithme par rapport à la méthode P&O est sa Processus de suivi de puissance rapide.

II.4.2.1.2 Les inconvénients de Incrémental Conductance (INC)

- ✚ Il s'agit d'un algorithme un peu compliqué à mettre en œuvre.

- ✚ Peut entraîner des performances instables en raison de l'utilisation d'algorithmes dérivés.

II.4.2.2. La méthode Perturbe & Observe (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus couramment utilisée car elle est simple et facile à mettre en œuvre. Comme son nom l'indique, cette méthode est basée sur une perturbation (augmentation ou diminution) de la tension V_{ref} ou du courant I_{ref} , et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$). Cependant, les variables idéales pour caractériser le MPP sont celles qui changent peu au cours du changement climatique. Les changements de rayonnement ont un effet plus important sur le courant que sur la tension photovoltaïque. D'autre part, les changements de température modifieront davantage la tension du GPV. Cependant, la dynamique de la température change lentement et dans une petite plage. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance. Figure II.19 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [17].

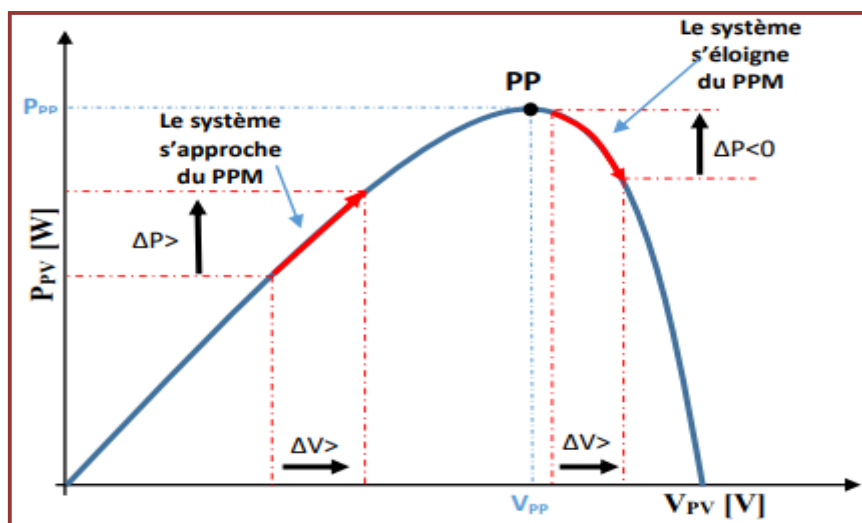


Figure II.19 : Recherche du PPM par la méthode (P&O) [17].

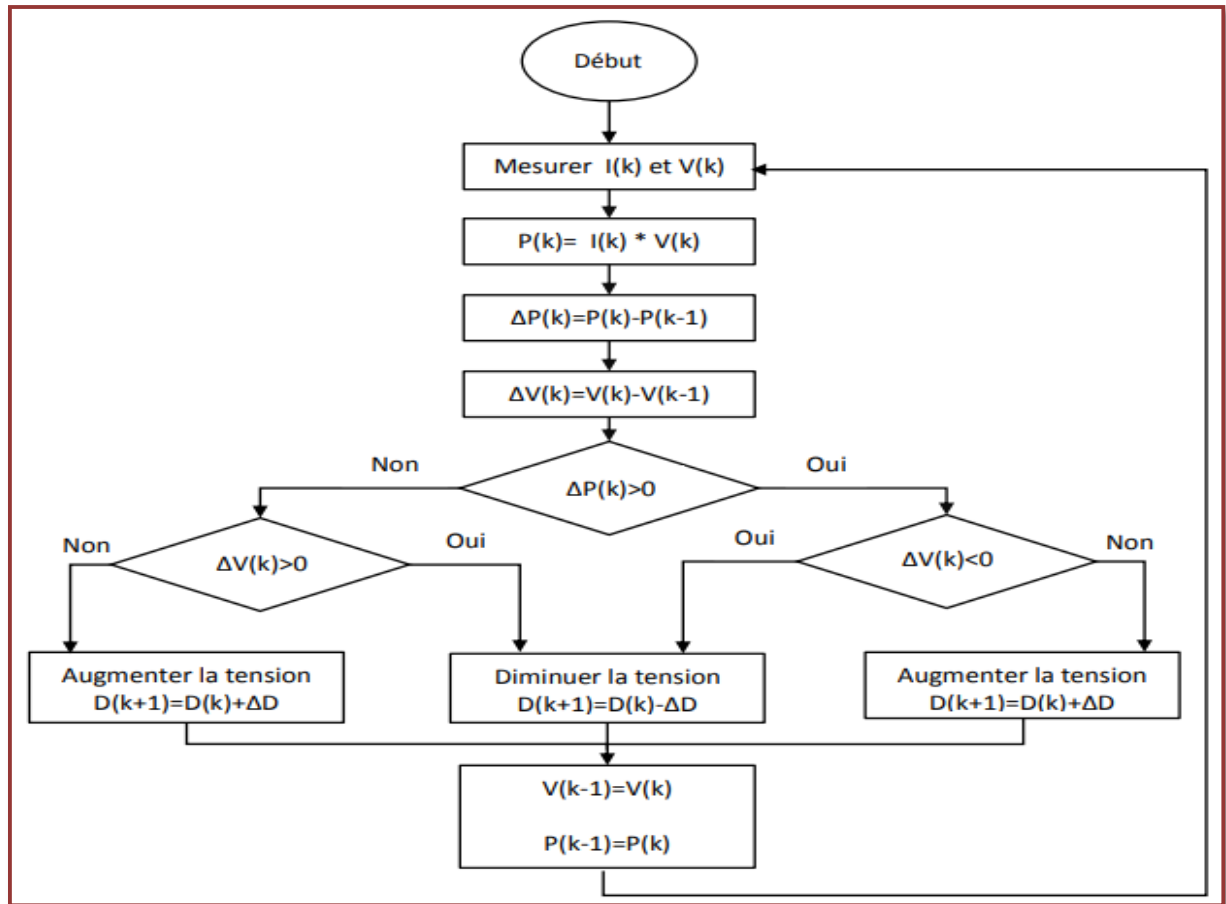


Figure II.20 : l’algorithme de P&O classique [22].

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d’une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L’utilisation d’un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [22].

II.4.2.2.1. Les avantages de (P&O)

- ✚ Simple et facile à appliquer.

II.4.2.2.2. Les inconvénients de (P&O)

- ✚ En raison de la lenteur du processus d’essais et d’erreurs, le système PV ne peut pas toujours fonctionner au point de puissance maximale.
- ✚ Tout dépend des conditions initiales, il oscillera autour de l’optimum, entraînant une perte de puissance.

- ✚ Le principal inconvénient de cet algorithme est qu'il ne fonctionne pas bien après des changements soudains des conditions météorologiques

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et simulé le module photovoltaïque sous l'environnement MATLAB à partir des équations mathématiques pour voir ses caractéristiques. Nous sommes appuyés sur la modélisation du hacheur type boost ainsi que leurs commandes (P&O et INC) pour l'utiliser dans les prochains chapitres.

Chapitre III:

Simulation des commandes

MPPT pour une charge

résistive « R »

III.1. Introduction

L'optimisation d'un système photovoltaïque est par nature difficile, en effet côté générateur photovoltaïque, le point de puissance maximale varie en fonction des paramètres météorologiques (température ambiante, ensoleillement, angle d'incidence des rayonnements solaires, pression atmosphérique et humidité), mais aussi du vieillissement du système. Côté charge, quelle soit de nature continue ou alternative, elle possède un comportement aléatoire [23].

De ce fait, la puissance délivrée à la charge correspond rarement à la puissance maximale disponible en sortie du générateur.

Plusieurs solutions ont été proposées pour les algorithmes de recherche du point de puissance maximale (PPM) qui contrôlent les convertisseurs statiques ; Ce chapitre est consacré à une étude comparative permettant d'évaluer le comportement de la puissance d'un système photovoltaïque composée d'un panneau solaire, un étage d'adaptation, et une commande MPPT. Cette comparaison sera effectuée entre deux algorithmes de cette commande qui sert à la recherche du point de puissance maximale dans un système photovoltaïque, ces deux algorithmes sont :

- ✚ Méthode de contrôle de PPM perturbation & observation (P & O).
- ✚ Méthode conductance incrémentale.

III.2. Simulation du système photovoltaïque avec hacheur Boost commandé en MPPT

Pour qu'un module photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle qui est un convertisseur d'énergie DC-DC, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV.

Le schéma synoptique d'un système photovoltaïque présenté dans la figure (II.1). Il est constitué :

- d'un module PV : le module PV choisis pour la simulation est le « 1Soltech 1STH-215-P » .
- Un hacheur Boost contrôlé par MPPT qui a comme entrées la tension et le courant de sortie du module. On va utiliser deux types de MPPT : P&O, conductance incrémentale.

- Une charge résistive R_s : 10Ω (nous n'avons pris qu'une petite valeur pour les tests).

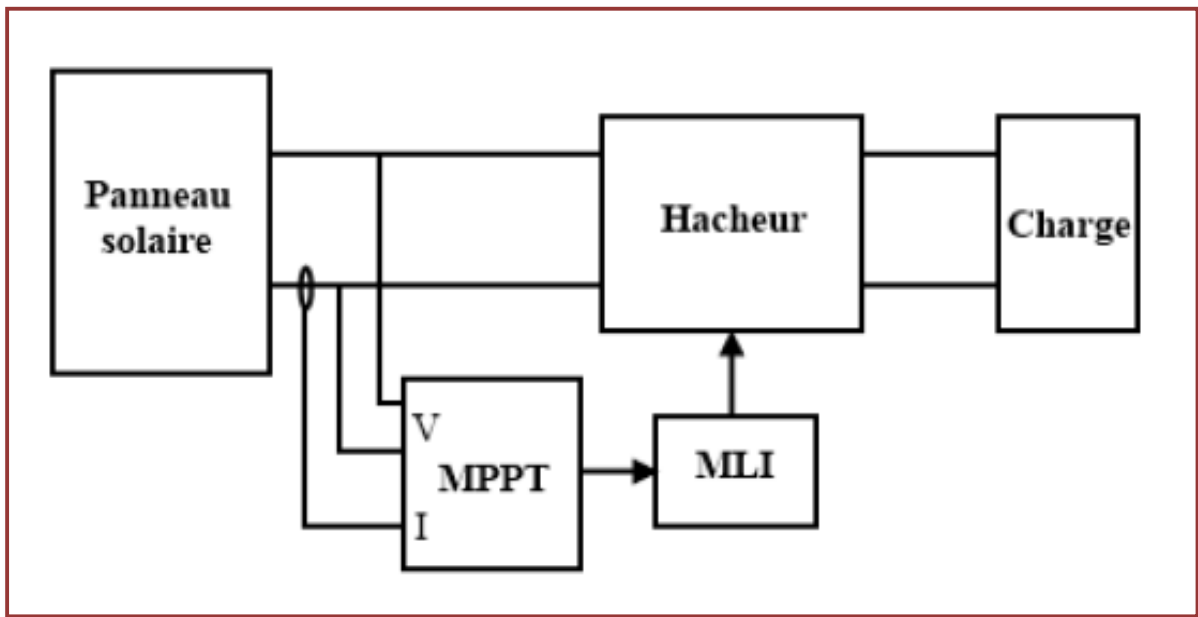


Figure III.1. : Chaîne de conversion photovoltaïque [5].

III.3. Commande Incrément de conductance

Le module photovoltaïque est raccordé à une charge résistive à travers un hacheur type boost contrôlé par un algorithme MPPT de type conductance incrémentale.

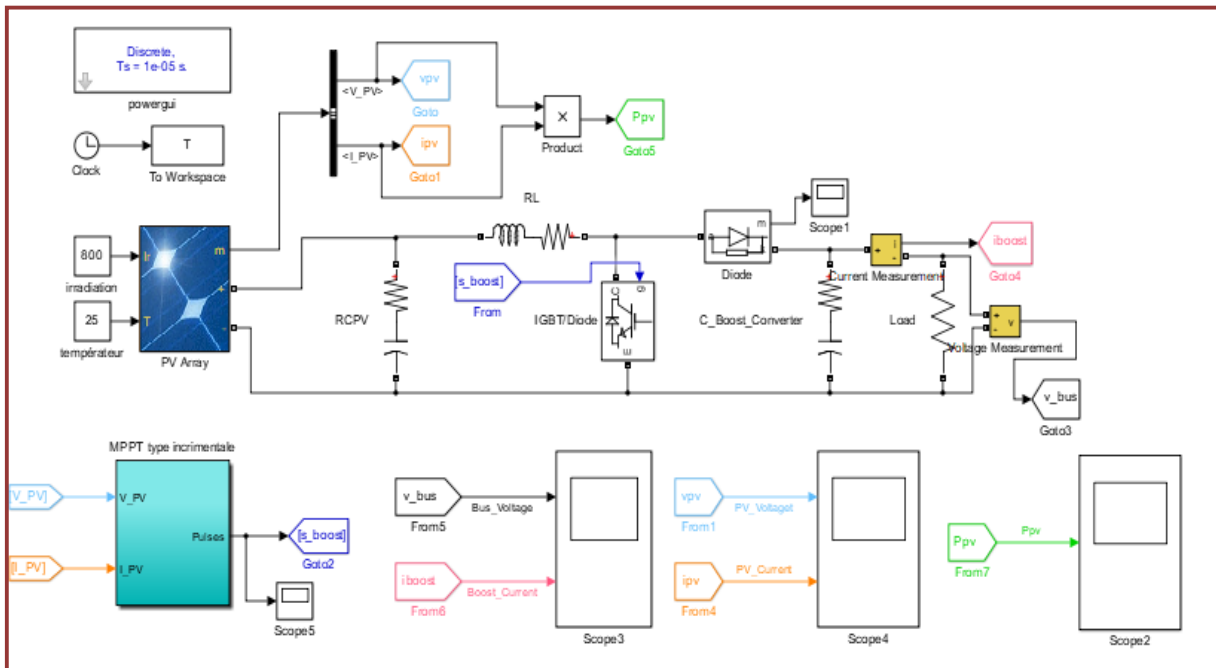


Figure III.2: Schéma de simulation du système photovoltaïque

III.3.1. Essai 1 : Irradiation, température et la charge constante.

Pour cette série de simulation, les paramètres de température T et l'irradiation G . ils sont maintenus à tout moment égaux aux valeurs de test standard qui sont respectivement : $G=800\text{W}/\text{m}^2$, $T= 25^\circ$ avec charge, $R=10$. L'attention principale sera portée sur les ondulations au niveau puissance et tension.

a. Résultats de la simulation à la sortie du PV

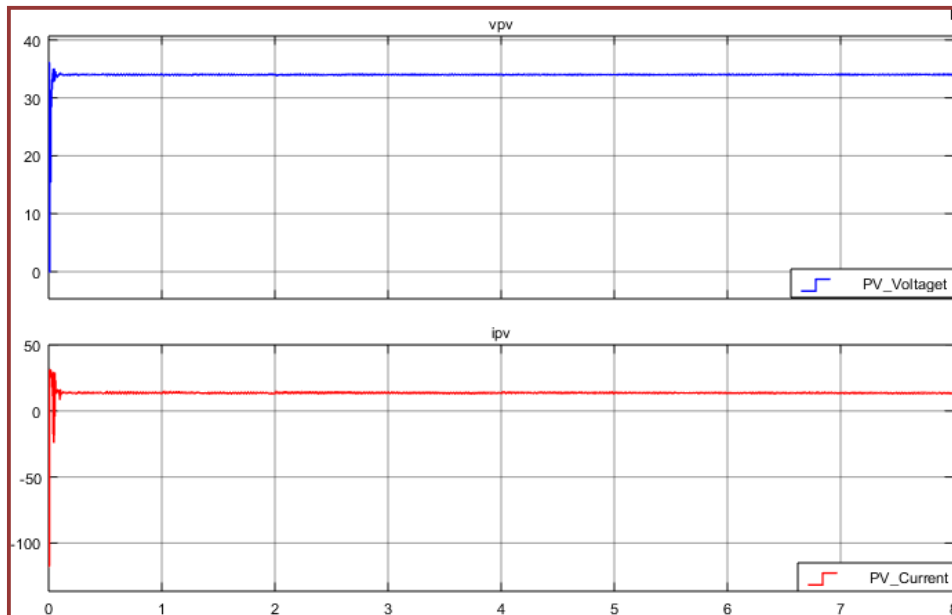


Figure III.3 : La tension et le courant de sortie du PV.

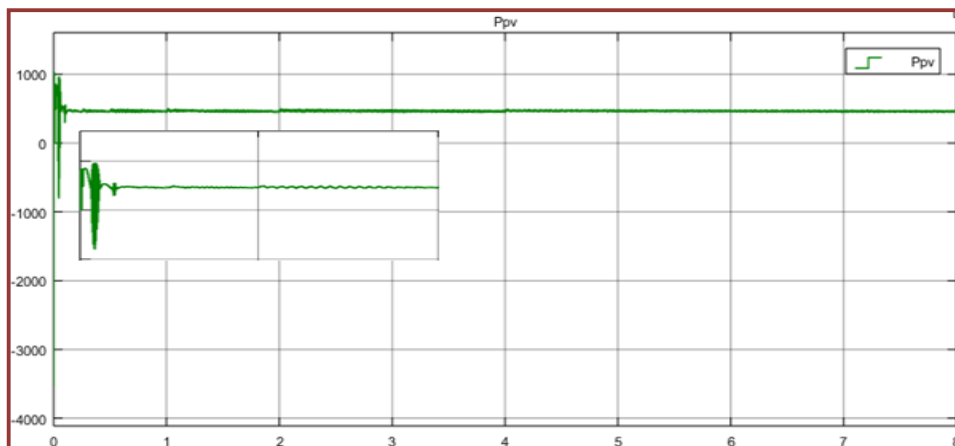


Figure III.4 : La puissance délivrée par le PV

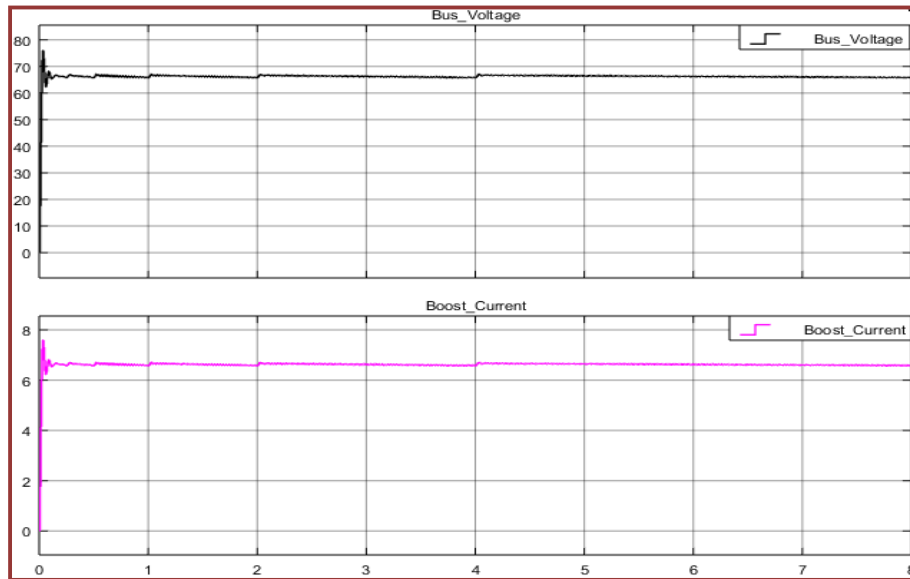
b. Résultats de la simulation à la sortie du hacheur boost

Figure III.5 : la tension et le courant de sortie à la sortie du hacheur.

c. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation des grandeurs électriques à la sortie du PV et à la sortie du hacheur boost contrôlé par la commande incrémental conductance il semble que :

Les grandeurs électrique tension, courant et la puissance se situent autour des valeurs voulues.

Selon la figure (III.5), on remarque que les valeurs de tension et de courant de sortie de hacheur sont supérieures à celles de PV car la commande impose un rapport cyclique selon la propriété de hacheur boost qui est une augmentation de tension.

III.3.2. Essai 2 : Irradiation G variable, température et charge constante

Pour une température interne fixée à 25°C. La variation de l'irradiation se fait selon le profil suivant :

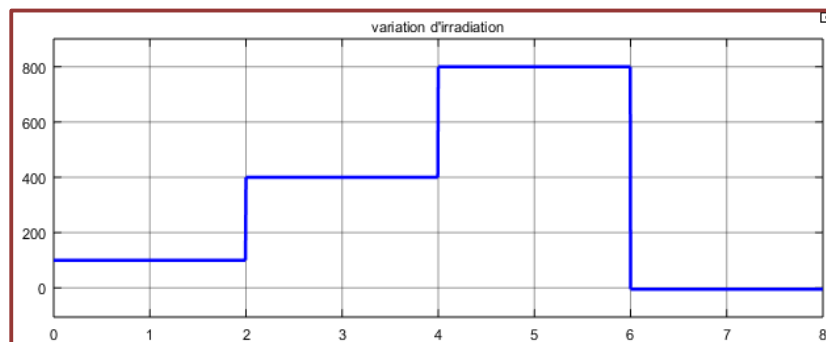


Figure III.6 : variation d'irradiation de rayonnements solaire

a. Résultats de la simulation à la sortie du PV

En faisant varier l'irradiation G comme représenté sur la figure (III.6), nous avons obtenu les résultats suivants :

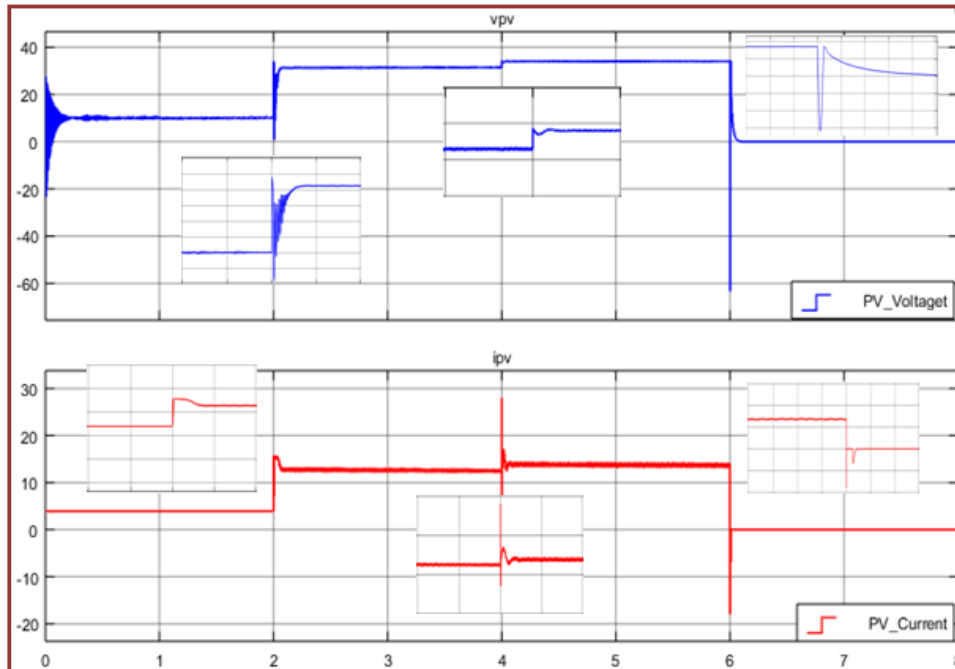


Figure III.7 : La tension et le courant de sortie du PV pour l'irradiation variable.

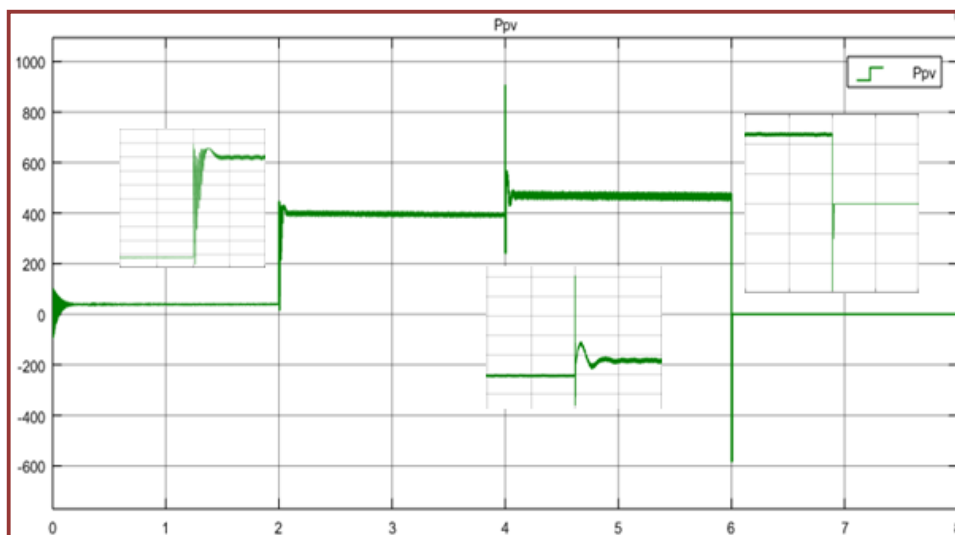


Figure III.8 : Puissance délivrée par le PV pour l'irradiation variable

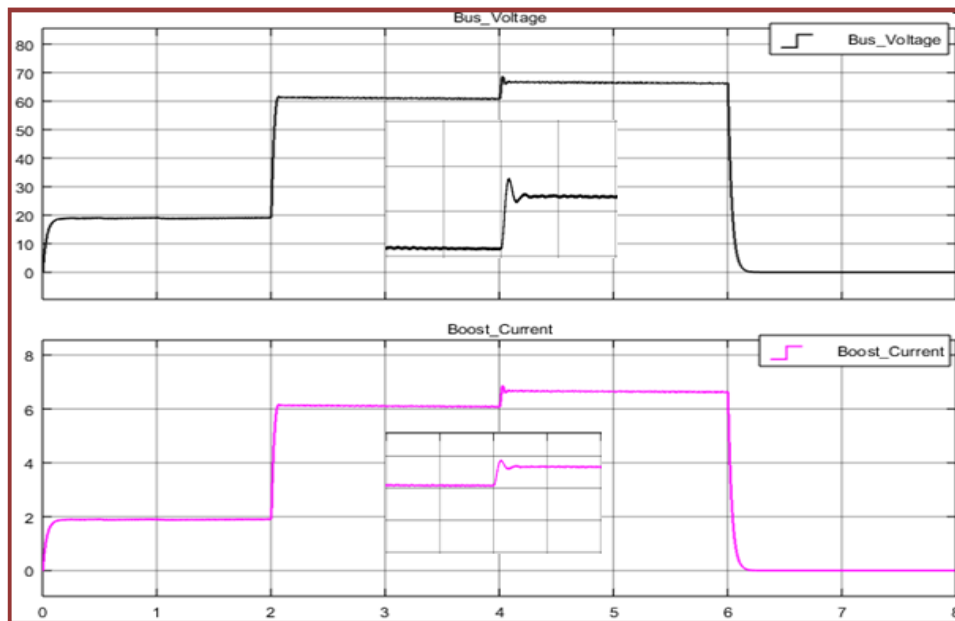
b. Résultats de la simulation à la sortie du hacheur boost

Figure III.9 : la tension et le courant de sortie du hacheur pour l'irradiation variable.

c. Interprétation des résultats

Les commandes utilisées réagissent correctement aux changements d'éclairement et le panneau fonctionne toujours à sa valeur de puissance maximale.

Nous avons remarqué que lorsque l'irradiation varie, les grandeurs de module PV (puissance, courant et tension) ainsi que les grandeurs de l'hacheur varient également autrement dit, la puissance est proportionnelle au l'irradiation.

III.3.3. Essai 3 : Température T variable, l'irradiation et charge constant

Pour un dernier essai nous allons garder l'éclairement constant à 800 W/m^2 et charge $R = 10\Omega$, on fait varier la température suivant le profil de la figure (III.10).

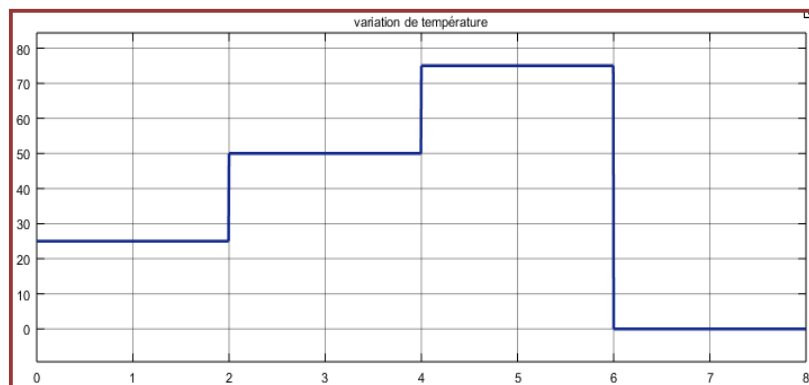


Figure III.10 : Variation de température

a. Résultats de la simulation à la sortie du PV

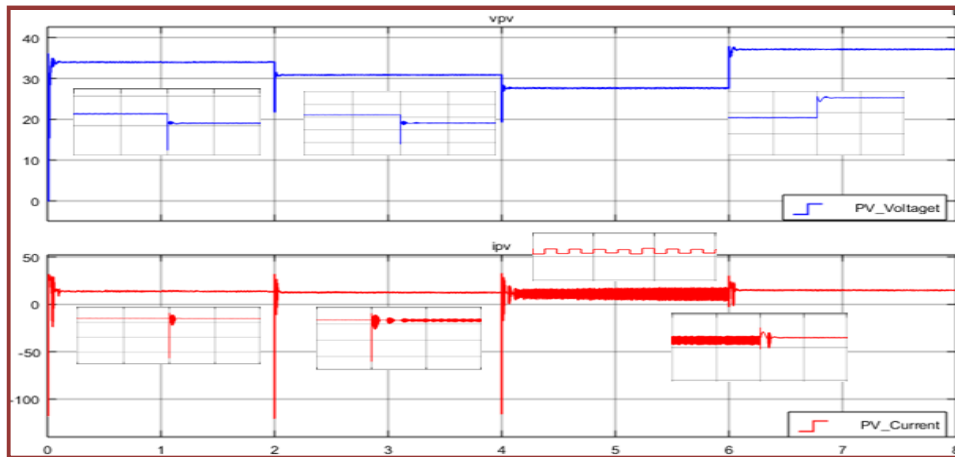


Figure III.11 : la tension et le courant de sortie du PV pour la température variable.

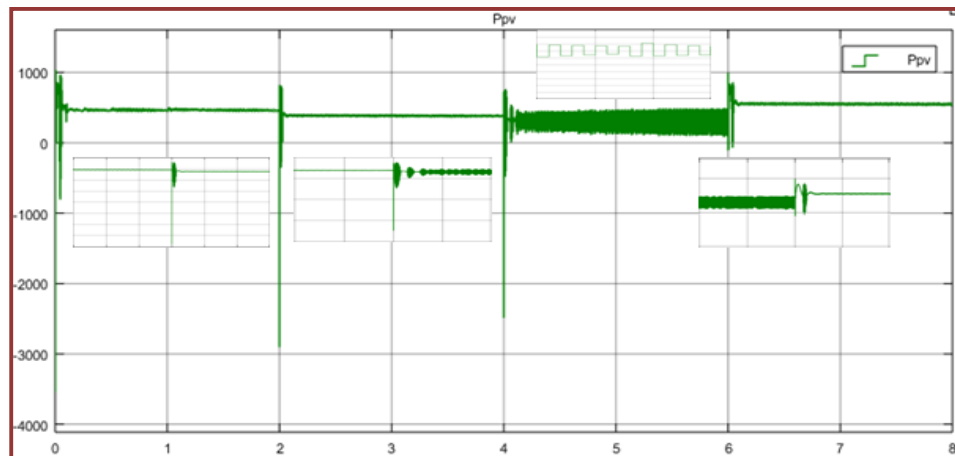


Figure III.12 : La puissance délivrée par le PV pour la température variable

b. Résultats de la simulation à la sortie du hacheur boost

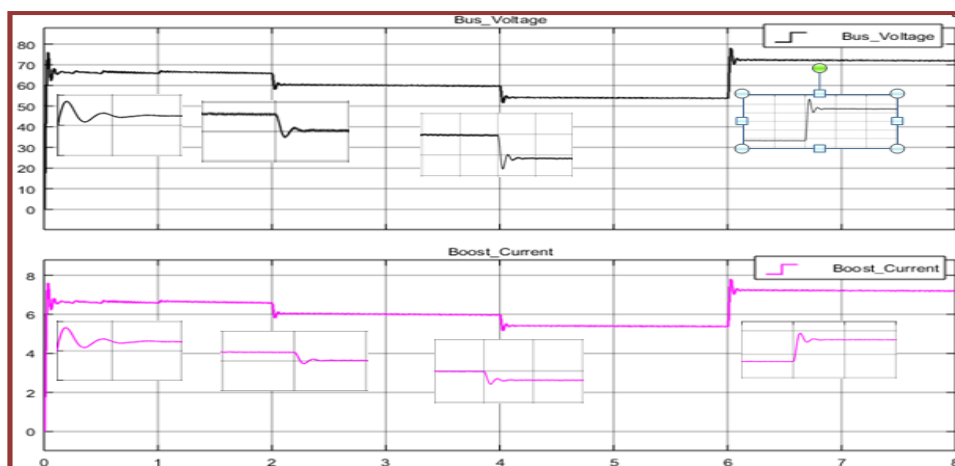


Figure III.13: Tension et courant de sortie du hacheur pour une température variable

c. Interprétation des résultats

On remarque que le système répond aux changements transitoires de température. L'augmentation de celle-ci provoque une diminution dans la puissance donc dans la tension mais une légère diminution concernant le courant.

III .4. Commande perturbé & observe

Un système photovoltaïque raccordé à une charge résistive à travers un hacheur boost contrôlé par un algorithme MPPT de type P&O.

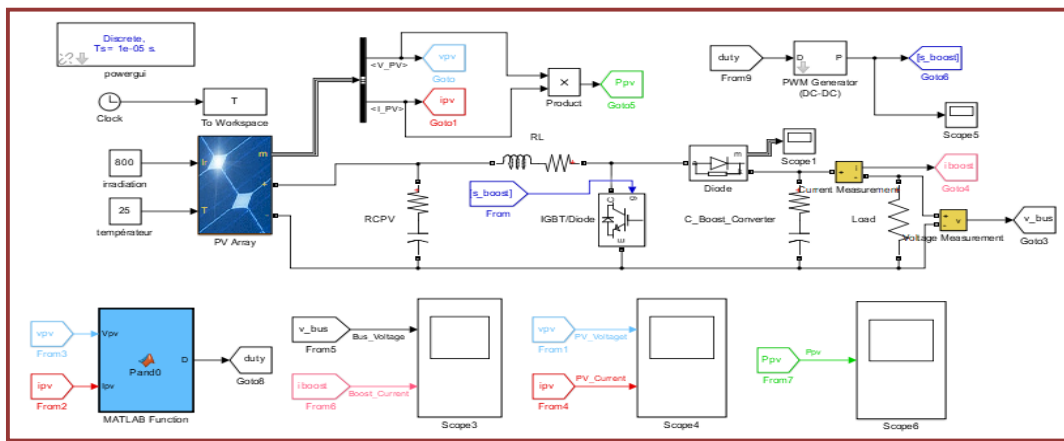


Figure II.14 : Schéma de simulation d'un PV et un hacheur Boost commandé par P&O

III.4.1. Essai 1: Irradiation, température et la charge constante (G=800, T= 25°, R=10Ω)

a. Résultats de la simulation à la sortie du PV

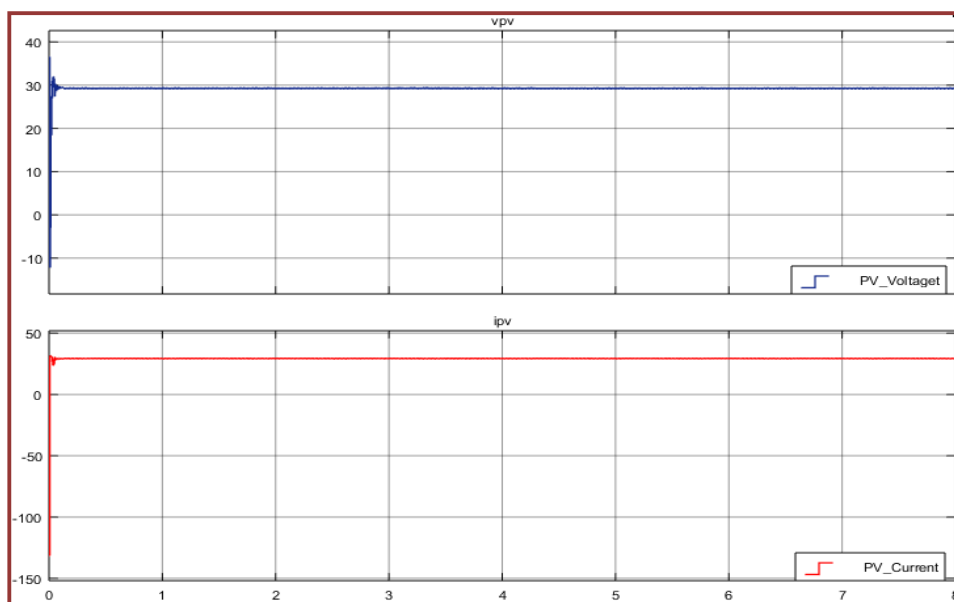


Figure III.15 : La tension et le courant de sortie du PV.

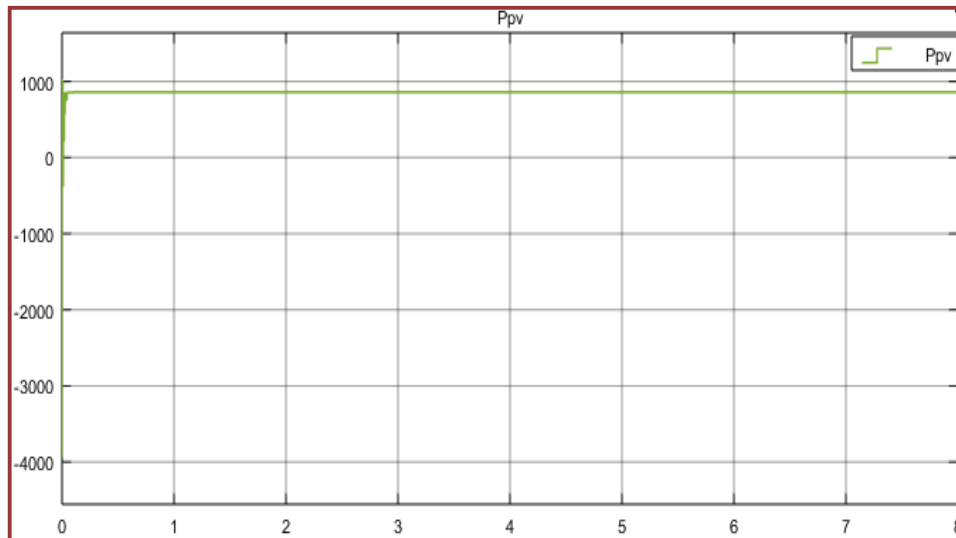


Figure III.16 : La puissance délivrée par le PV

b. Résultats de la simulation à la sortie du hacheur boost

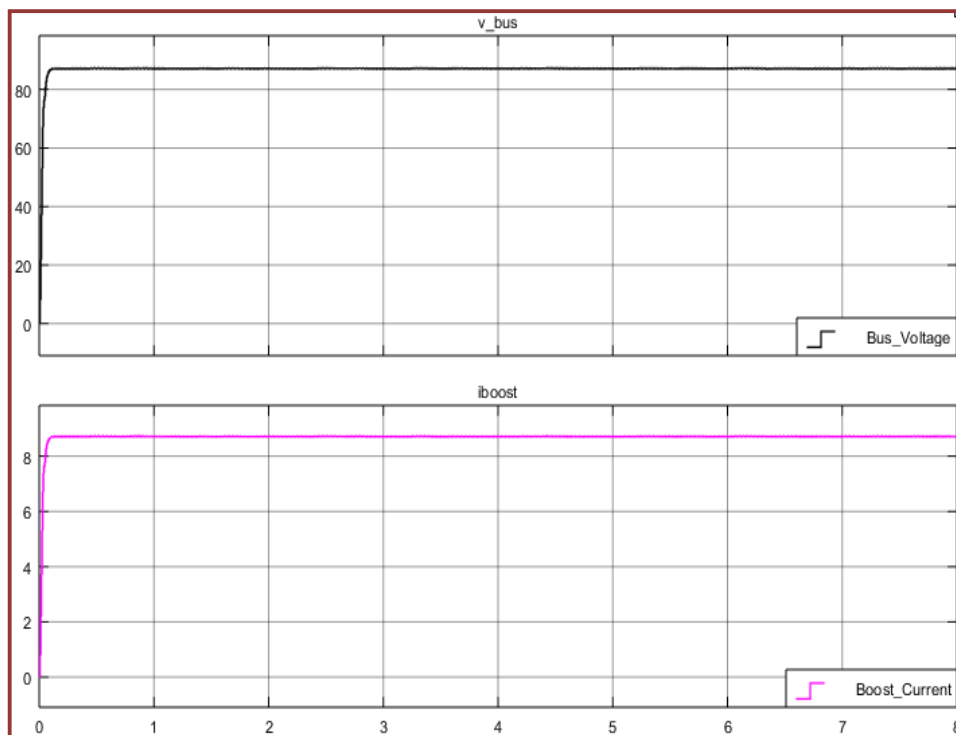


Figure III.17 : Tension et courant de sortie du hacheur

c. Interprétation des résultats

On retrouve les mêmes résultats que la méthode précédente, mais nous concluons que P&O donne des résultats meilleurs.

III.4.2. Essai 2 : Irradiation G variable, température et charge constant

Nous gardons le même profil d'irradiation défini dans la commande précédente.

a. Résultats de la simulation à la sortie du PV

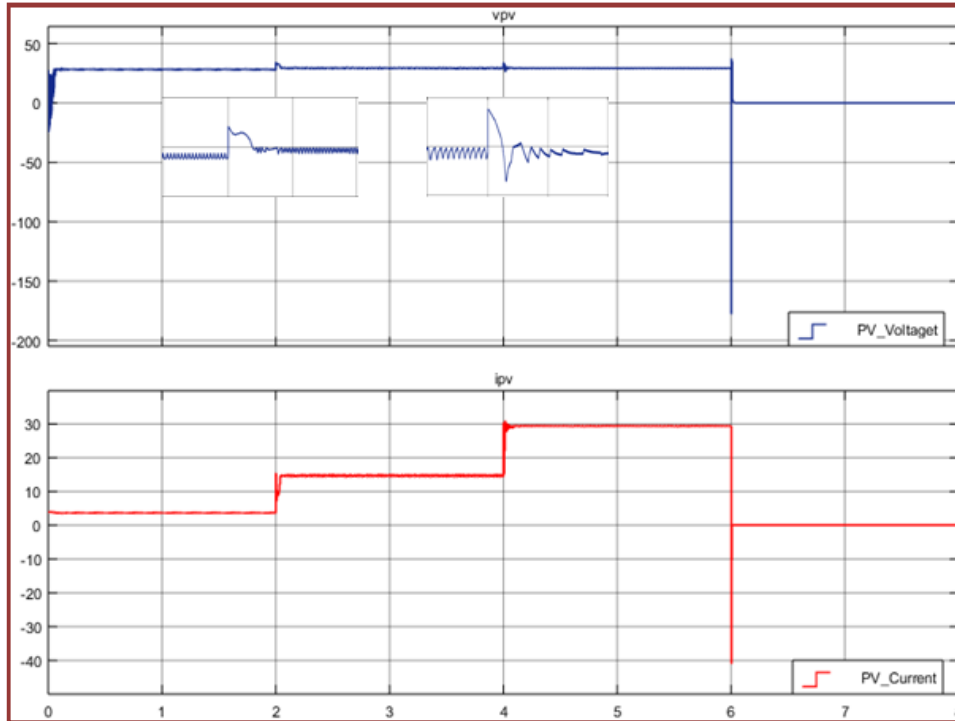


Figure III.18 : La tension et le courant de sortie du PV pour l'irradiation variable

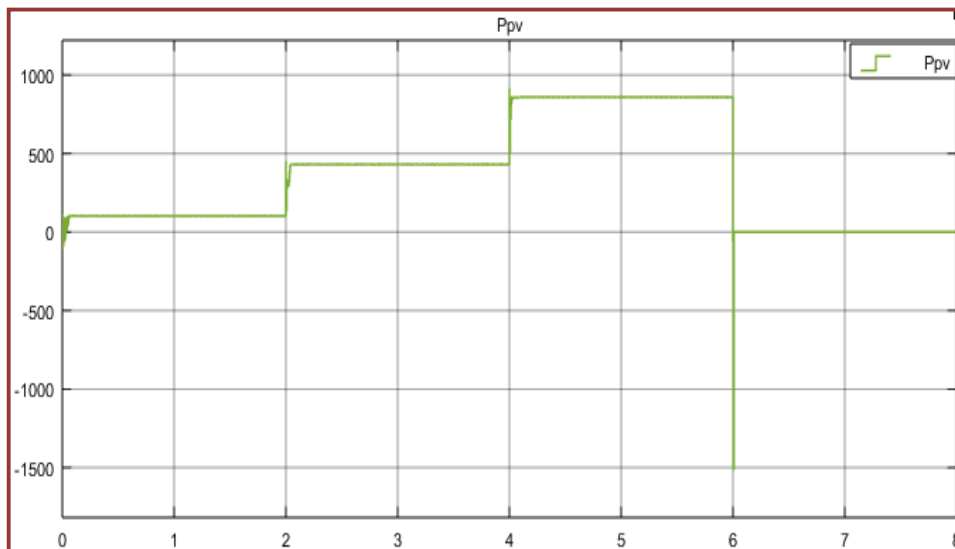


Figure III.19 : La puissance délivrée par le PV pour l'irradiation variable

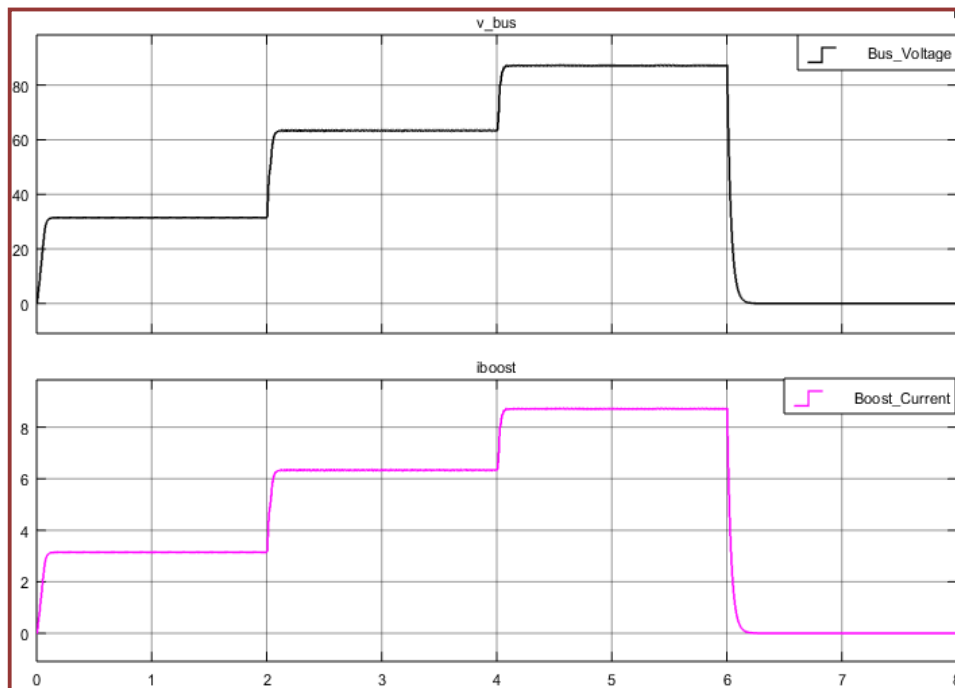
b. Résultats de la simulation la sortie du hacheur boost

Figure III.20 : Tension et courant de sortie du hacheur pour l'irradiation variable

c. Interprétation des résultats

On retrouve les mêmes résultats que la méthode précédente, mais nous concluons que P&O donne des résultats meilleurs.

III.4.3. Essai 3 : Température T variable, irradiation et charge constant

Même profil précédent, $G=800 \text{ W/m}^2$, $R=10\Omega$ on obtient les résultats suivant :

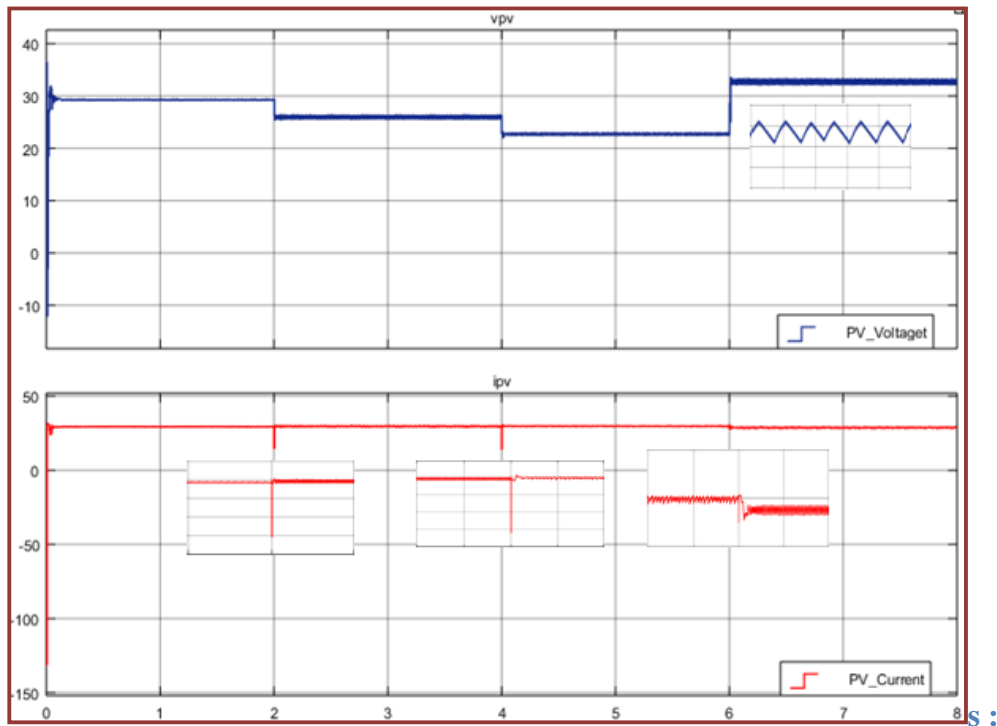


Figure III.21 : la tension et le courant de sortie du PV pour la température variable.

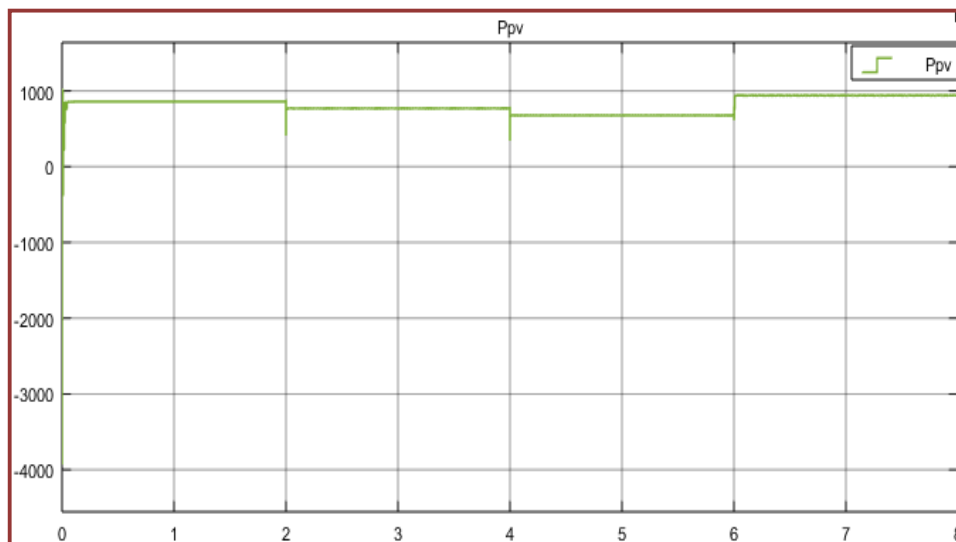


Figure III.22 : La puissance délivrée par le PV pour la température variable

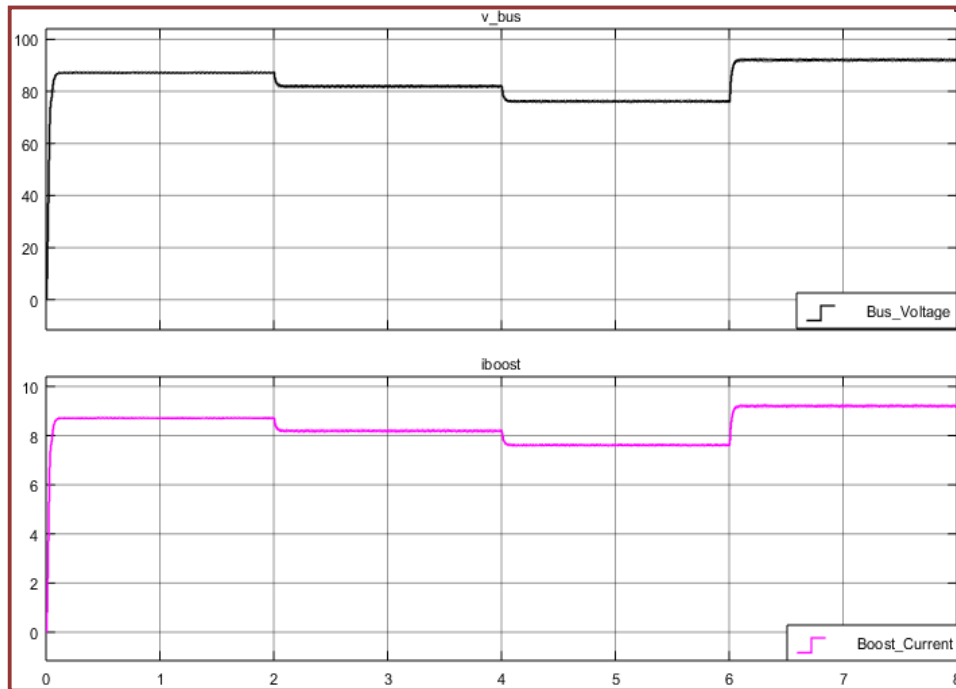
a. Résultats de la simulation à la sortie du hacheur boost

Figure III.23: la tension et le courant de sortie du hacheur pour la température variable

b. Interprétation des résultats

Nous constatons que la puissance et la tension en fonction du temps sont inversement proportionnelles avec l'évolution instantanée de la température. Le courant présente une légère variation.

III .5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation des deux commande MPPT avec plusieurs essais possible le premier essai c'est l'éclairement, température et la charge constant, le deuxième étant la variation de l'éclairement et le dernier essai c'est la variation de température .Nous observons l'influence de chaque essai sur les deux commandes P&O et incrémentale conductance et finalement on peut conclure que la commande P&O donne des résultats meilleurs par rapport à l'autre méthode.

Chapitre IV:

Simulation du commandes

MPPT pour une charge « RL »

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons en premier cas la simulation d'un générateur photovoltaïque connecté à une charge RL à travers un convertisseur DC/DC commandé par MPPT de type P&O, et un onduleur monophasé commandé par MLI.

Dans le deuxième cas, on garde le même le système photovoltaïque mais nous avons utilisés un onduleur triphasé commandé par MLI pour alimenter une charge triphasé.

Dans les deux cas on varie seulement l'irradiation et la température reste constante.

IV.2. Onduleurs monophasé

Un onduleur monophasé est un convertisseur statique qui assure une conversion DC-AC, il modifie périodiquement la liaison entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir du courant alternatif en sortie. Les onduleurs sont principalement utilisés pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation des charges critiques (micro-ordinateurs, stations de télécommunication) ou pour alimenter en permanence des systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, machines aérospatiales).

IV.2.1. Principe de PWM

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie $V_0(t)$ afin d'obtenir une tension moyenne $V_{0\text{moy}}$ fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$ sans modifier T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique α et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit [24] :

- Lorsque $\alpha > V_{DS}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque $\alpha < V_{DS}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé à l'ouverture (état OFF).

IV.2.2. Modélisation d'un Onduleur monophasée

Il se compose d'une source de tension continue et des interrupteurs de commande. La tension de sortie peut prendre pour valeur +Ve, -Ve, 0V.

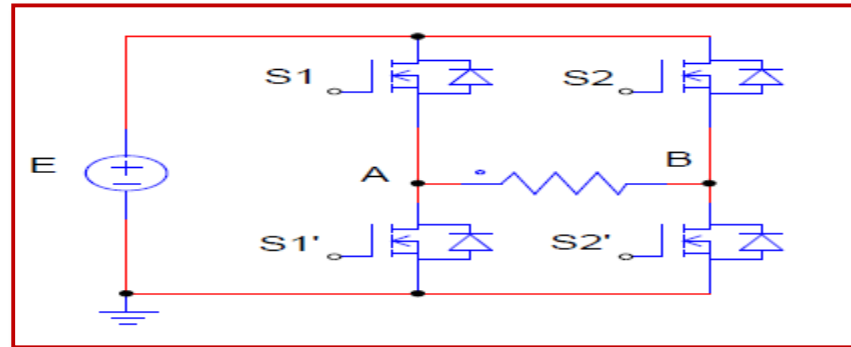


Figure IV.1 : Schéma de principe de l'onduleur monophasé [18].

- $0 < t < T/2$: S1 et S2' sont fermés : $U_s = +V_e (> 0 \text{ V})$
- $T/2 < t < T$: S1' et S2 sont fermés : $U_s = -V_e (< 0 \text{ V})$

On a choisi la commande MLI dite aussi PWM (Pulse With Modulation) pour commander cet onduleur. Car elle permet de réduire les harmoniques de courant lorsque la charge est inductive.

IV.2.3. Simulation de système photovoltaïque raccordé à la charge RL monophasé

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK (figure IV.2).

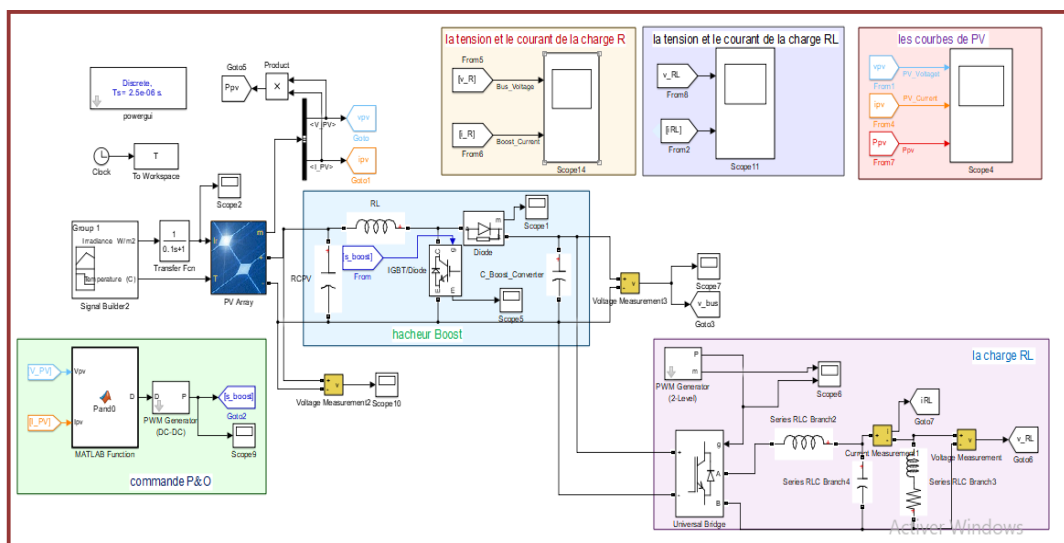


Figure IV.2 : Schéma d'un système photovoltaïque avec une charge RL (système monophasé).

Dans cette simulation on a utilisé :

- **Générateur photovoltaïque** : nous choisissons pour la simulation le « 1Soltech 1STH-215-P »
- **Convertisseur DC/DC (hacheur boost)** : est l'étage d'adaptation (DC/DC) entre le (GPV) et la charge de sortie, cette architecteur est conforme à un système plus connu sous le nom de système autonome. L'étage d'adaptation possède un contrôle (MPPT) qui lui permet de recherche le (MPPT) qui peut fournir à un panneau solaire photovoltaïque.
- **Le bus continu** : Découplage de l'alimentation et réduction de l'ondulation de la tension d'entrée de l'onduleur est mis en œuvre en insérant un condensateur électrolytique. Ce condensateur est généralement connecté au côté CC de l'onduleur et doit être aussi petit que possible afin que nuire à la fiabilité du système.

La tension aux bornes de ce condensateur est :

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = I_{pv} - I_{dc} \quad (\text{IV.1})$$

La capacité d'entrée de l'onduleur joue un rôle très important dans l'onduleur le photovoltaïque maintient un point de fonctionnement stable. Il a une fonction accumulateur et fonction de filtrage des fluctuations de tension changer.

- **Un onduleur monophasé**, on va choisir dans ce travail l'onduleur à onde sinusoïdale commandé par MLI
- **Filtre LC** : le filtre LC élimine les harmoniques de découpage.
- **La charge** : La charge sur le côté (AC) est une choisi une charge inductive (RL).

IV.2.4 Les résultats de la simulation

On garde le même profile de l'irradiante dans le chapitre précédent comme le montre la figure suivante :

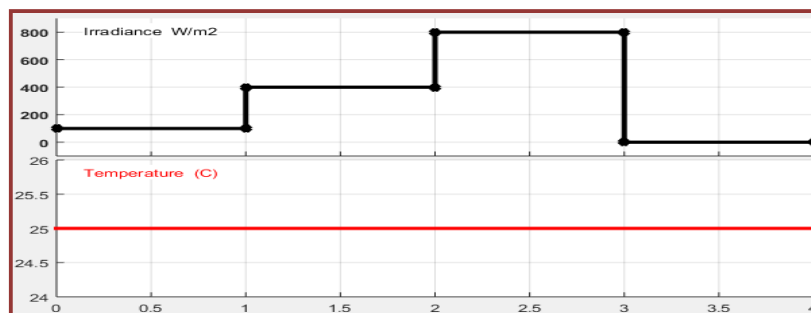


Figure IV.3 : profile de l'irradiante .

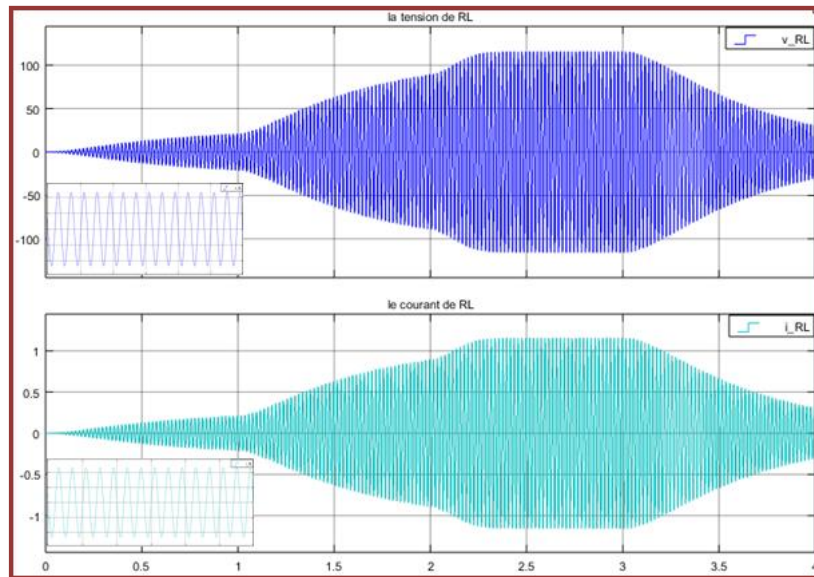


Figure IV.4 : le courant et la tension de la charge RL.

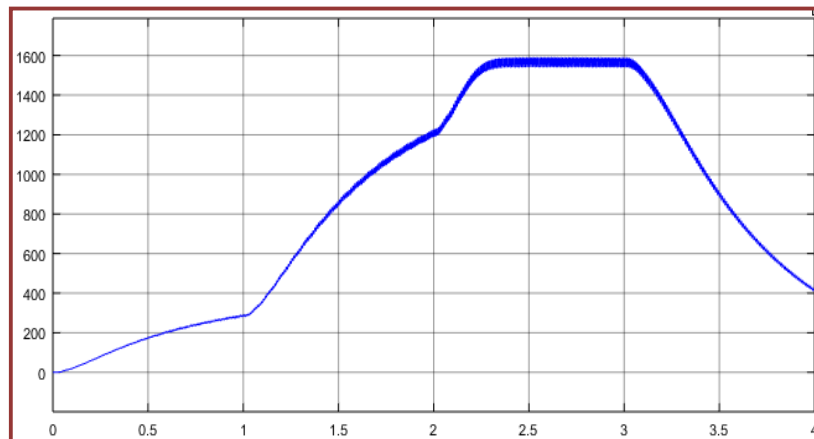


Figure IV.5 : la tension de hacheur..

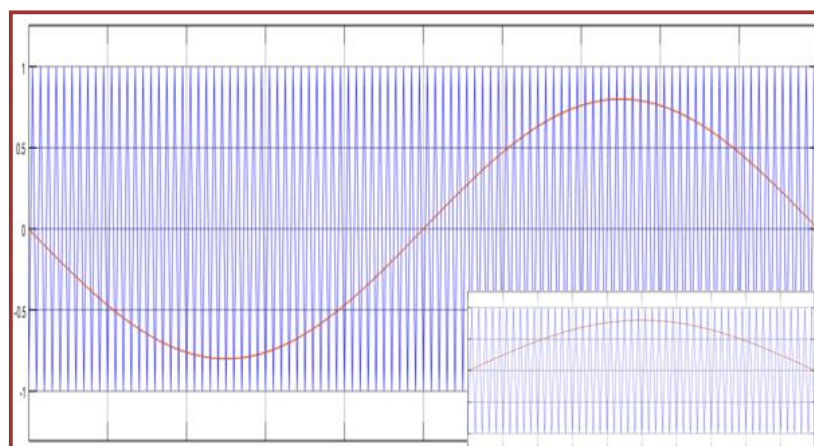


Figure IV.6 : la commande de l'onduleu.r.

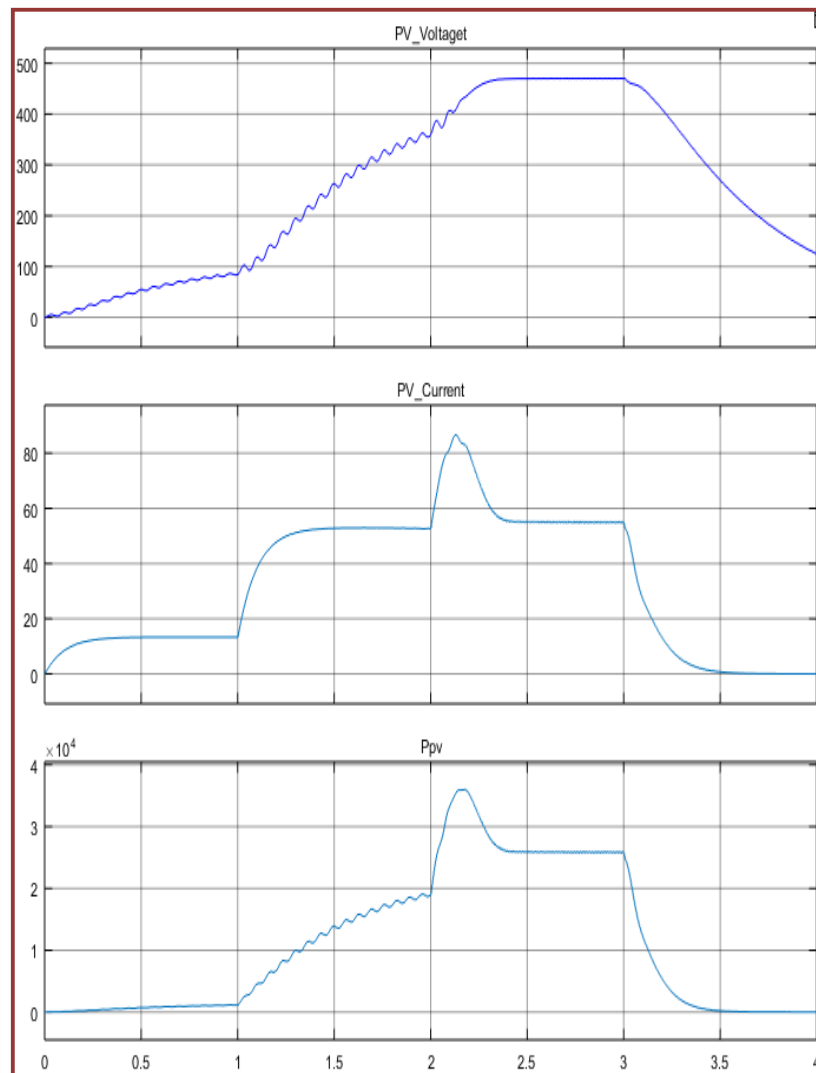


Figure IV.7 : le courant, la tension et la puissance de PV..

IV.2.5. Interprétation des résultats

La tension et le courant de charge de forme sinusoïdale qui suit la variation de l'irradiance (figure IV.4). La tension, le courant et la puissance du module PV suit de même le profile de l'irradiance (figure IV.7), ainsi que La tension de l'hacheur.

IV.3. Modélisation d'un onduleur triphasé

Les interrupteurs S1 et S1', S2 et S2', S3 et S3', sont complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à utiliser, il est toutefois possible de définir des relations générales que nous utilisons pour la commande PWM ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (imaginaire) 'O' de la source de tension.

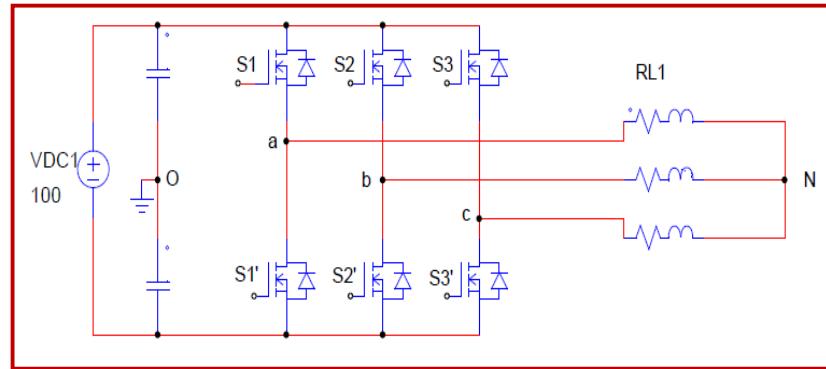


Figure IV.8 : Schéma d'onduleur de tension triphasé [18].

Dans notre cas on choisit l'onduleur triphasé, les tensions composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} sont obtenu à partir de ces relations :

$$V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo}$$

$$V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \quad (\text{IV.2})$$

$$V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao}$$

Avec : V_{ao}, V_{bo} et V_{co} sont des tensions à l'entrée de l'onduleur (tension continues). Ces tensions sont données par :

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no}$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \quad (\text{IV.3})$$

$$V_{co} = V_{cn} + V_{no}$$

Avec : V_{an}, V_{bn} et V_{cn} sont les tensions de phase de la charge (Sortie de l'onduleur) et V_{no} est la neutre tension de la charge par rapport au point « O ». On a supposé que la charge est équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{IV.4})$$

Donc :

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ab} - \mathbf{U}_{ca} = (\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b) - (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_a) = 2\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c \\ \mathbf{U}_{bc} - \mathbf{U}_{ab} = (\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c) - (\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b) = -\mathbf{V}_a + 2\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c \\ \mathbf{U}_{ca} - \mathbf{U}_{bc} = (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_a) - (\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c) = 2\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_a \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{et on a : } \begin{cases} \mathbf{V}_a = -\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c \\ \mathbf{V}_b = -\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_c \\ \mathbf{V}_c = -\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} \mathbf{V}_a = \frac{1}{3}(\mathbf{U}_{ab} - \mathbf{U}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b) - (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_a)] \\ \mathbf{V}_b = \frac{1}{3}(\mathbf{U}_{bc} - \mathbf{U}_{ab}) = \frac{1}{3}[(\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c) - (\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b)] \\ \mathbf{V}_c = \frac{1}{3}(\mathbf{U}_{ca} - \mathbf{U}_{bc}) = \frac{1}{3}[(\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_a) - (\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c)] \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

On obtient finalement :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_a = \frac{1}{3}[2(\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_0) - (\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_0) - (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_0)] \\ \mathbf{V}_b = \frac{1}{3}[-(\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_0) - 2(\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_0) - (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_0)] \\ \mathbf{V}_c = \frac{1}{3}[-(\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_0) - (\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_0) - 2(\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_0)] \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif (DC-AC).

$$[\mathbf{T}] = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

IV.3.1. Simulation de système photovoltaïque raccordé à la charge RL triphasé

La figure (IV.9) est le schéma global de simulation du système photovoltaïque, nous avons utilisé l'assemblage des schémas blocs pour le contrôle. Ce schéma contient les différents blocs :

- Schéma block de générateur PV
- Schéma block de l'hacheur Boost.
- Schéma block de la commande MPPT.
- Schéma block de l'onduleur.
- Schéma block de la charge RL triphasé équilibré.

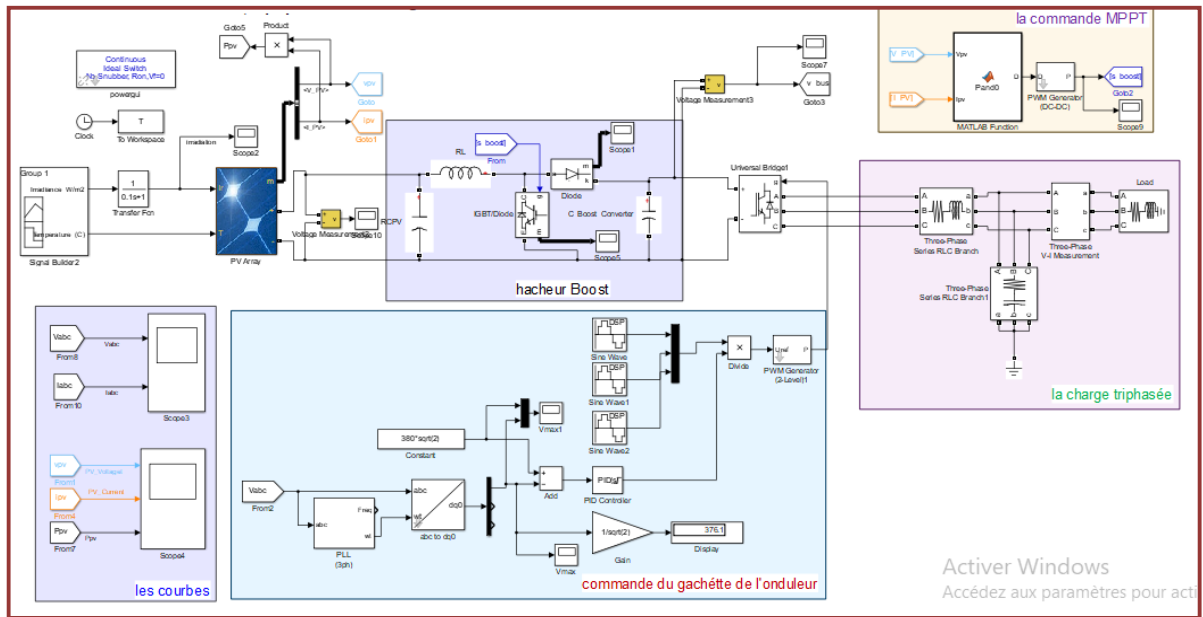


Figure IV.9 : Schéma d'un système photovoltaïque avec une charge RL (système triphasé)..

IV.3.2. Résultat de simulation

On garde le même profile de l'irradiante de la figure IV.3

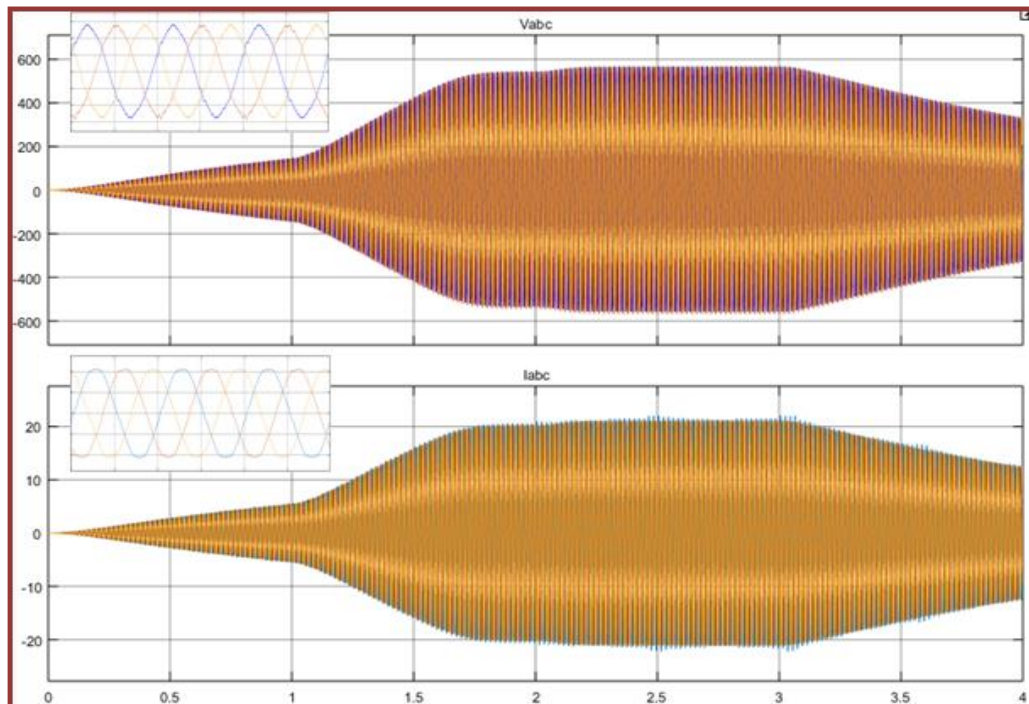


Figure IV.10 : le courant et la tension de la charge RL.

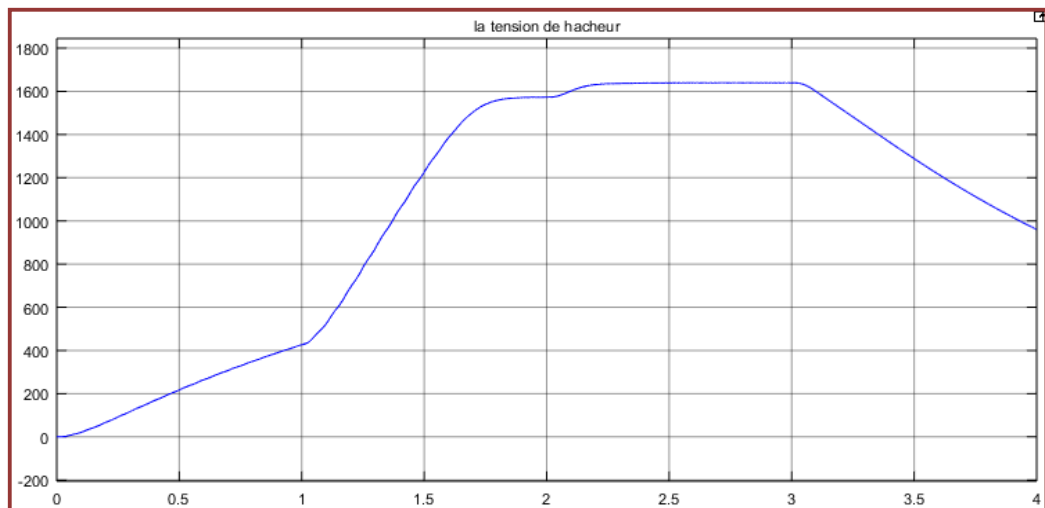


Figure IV.11 : La tension de l'hacheur.

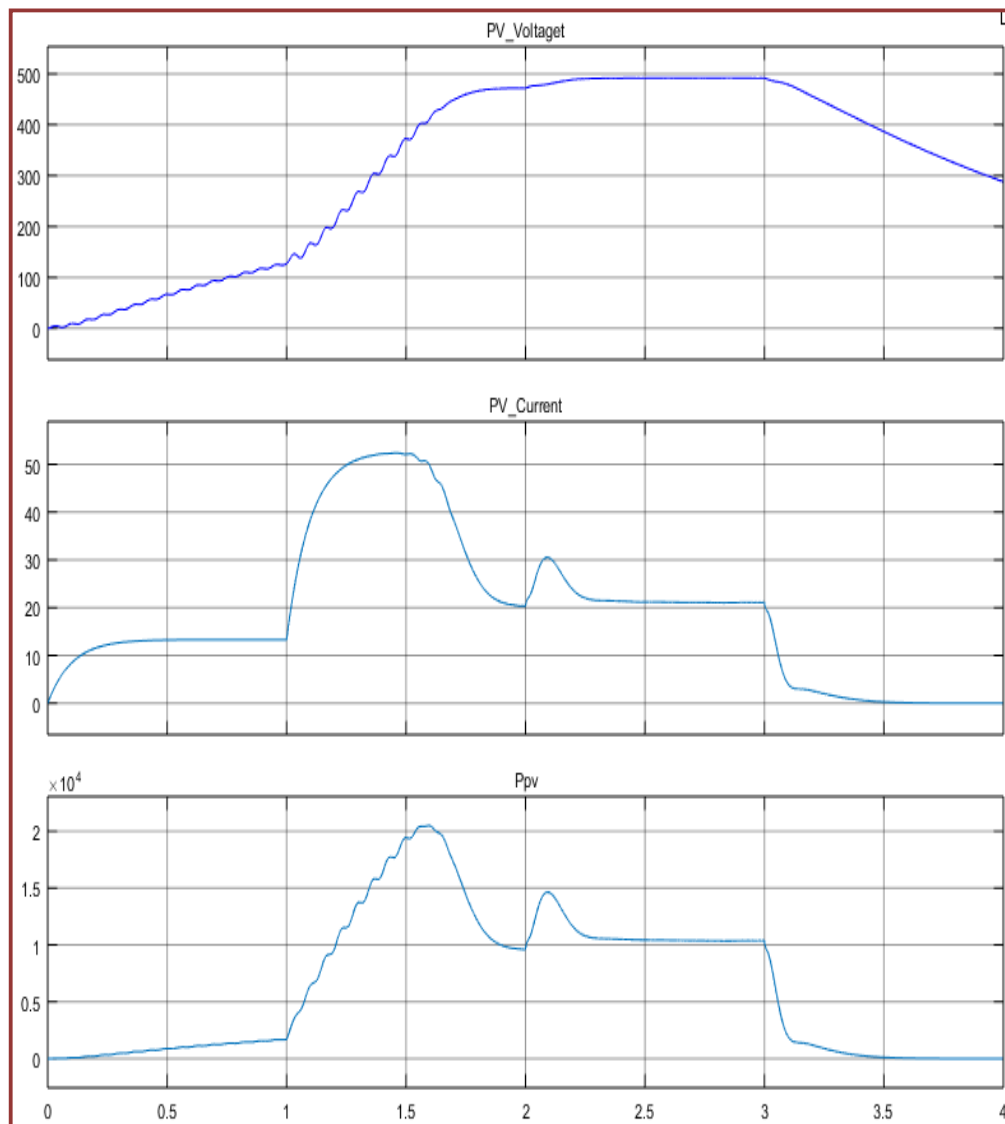


Figure IV.12 : La tension, le courant, la puissance de PV..

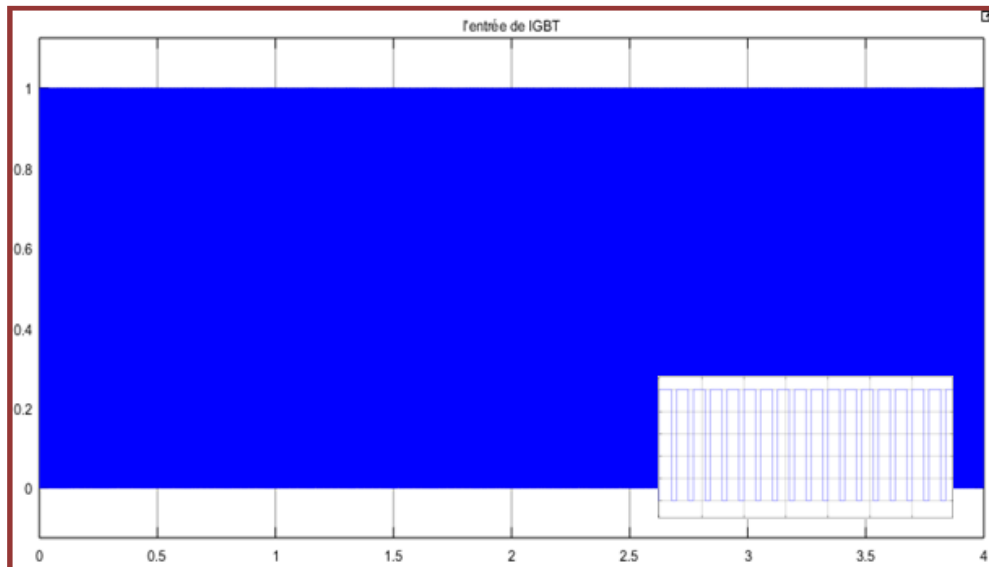


Figure IV.13: L'entrée d'IGBT.

IV.3.3. Interprétation des résultats

La tension et le courant de la charge est de forme sinusoïdale qui suit la variation de l'irradiante (figure IV.10). La tension, le courant et la puissance du module PV suit de même le profile de l'éclairement (figure IV.12), ainsi que La tension de l'hacheur.

On a remarqué aussi que l'hacheur fonction en mode survolteur car la tension d'entrée de l'onduleur et supérieur à celle de PV.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation d'un générateur photovoltaïque connecté à une charge RL monophasé (triphase) à travers un convertisseur DC/DC et un convertisseur DC/AC monophasé (triphase) commandé par MLI.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La demande énergétique mondiale évolue rapidement, les ressources naturelles d'énergie telles que l'uranium, le gaz naturel et le pétrole diminuent en raison de la diffusion et de la prolifération. Pour répondre aux besoins énergétiques, la recherche a conduit aux énergies renouvelables. Une de ces énergies renouvelables qui répond à la demande, c'est l'énergie solaire photovoltaïque, qui est une source d'énergie propre, silencieuse et gratuite. Cela explique aussi pourquoi il sert à savoir forte croissance mondiale.

Le travail qu'on a présenté porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Initialement, nous avons présenté d'une façon générale la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique et des généralités sur les systèmes PV, principe de la conversion PV et la cellule PV ainsi que le générateur photovoltaïque et ces performances, PV, et nous avons vu l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V), (P-V). Dans le même temps on a étudié quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et nous avons vu la simulation d'un convertisseur survolteur (Boost) et remarqué que la tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

Après on a étudié deux méthodes de poursuite du point maximal de puissance (MPPT) puis on a simulé les algorithmes de MPPT (« P&O », « INC ») pour un système photovoltaïque (GPV, convertisseur Boost, charge résistive). Une comparaison entre les deux MPPT pour les différents tests (la variation de profil de l'irradiance et la variation de la température) est faite. Les résultats de simulation montrent que la méthode « P&O » est plus simple à appliquer par rapport la méthode « INC » qui présente des oscillations.

Finalement, on a terminer notre travail par la simulation d'un système photovoltaïque (GPV, convertisseur Boost, onduleur) avec l'algorithme «P&O » pour une charge alternative (RL) monophasée et triphasée équilibrée et obtenues des résultats satisfaisantes illustré dans le dernier chapitre.

Référence Bibliographie

Les Références :

[1] HANNOUN ABDELKARIM, DJELLAILI BOUDALI, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque alimentant d'une charge triphasé » MEMOIRE MESTRE(LMD), université Dr.Tahor Moulay de SAIDA, 2015/2016.

[2] SOUHILA AKHMOUM, AGHILAS YAHMI « Réalisation d'une carte de Recherche de point de puissance maximale » MEMOIRE MASTER Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 06/10/2015.

[3] ZAHAR SORIA, MAKHLOF CHEYMA « Etude et simulation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique » THEME MASTER ACADEMIQUE, université Mohamed Boudiaf-M'sila-2016/2017.

[4] J.ROYER ET T.DJIAKO ET E.SCHILER. « Le pompage photovoltaïque ».université d'Ottawa, 1998.

[5] https://web.lmd.jussieu.fr/~fcodron/COURS/notes_radiatif.pdf

[6] AHMED SERRAR, « Etude et Conception des systèmes de recharge solaire pour voiture électrique en Algérie » université du Québec à Trois-Rivières Novembre/2019.

[7] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>

[8] https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/energie-electrique-generation-photovoltaique

[9] EL FATMI AHMED, WENE MOHAMED, « Les convertisseurs DC-DC l'exploitation de l'énergie des panneaux photovoltaïques » Mémoire de master, universitaire Belhadj Bouchai b d'Ain-Temouchent, 08/06/2015.

[10] HELAIL.K, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire Magister, Université Mouloud de Tizi-Ouzou, 25/06/2012.

[11] <https://www.ssf-asso.org/systemes-pv-autonomes/>

[12] GHADA BEL HADJ ALI « les installations photovoltaïque Raccordées au Réseau », Tunis, le 27 octobre 2014.

[13] <https://www.dsnsolar.com/info/introduction-to-hybrid-solar-system-36644389.html>

[14] ALI SLIMANE MOHAMED, TIGRIVE BACHIR « Etude Théorique et Simulation de la centrale photovoltaïque de GHARDAIA » MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU. 11/07/2017.

[15] CHEBANA ABDELKRIM, « Système photovoltaïque connecté au réseau », THEME MASTER, université Mohamed khider BISKRA, 2014.

[16] M.BESSEM ABDELGHANI « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque »Mémoire Master, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2018.

[17] HAKOUMI AHMED, BENAMAR ABDELDJALIL, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue » mémoire de Master, Université Ahmed Draia ADRAR, 2018/2019.

[18] OKBA SALAH, BEDDIAR WALID, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI » MEMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Boudiaf M'SILA, 2018/2019.

[19] <https://www.numlor.fr/elearning/etep/co/TD5HacheurBoost.html>

[20] BENADEL FAIZA, « Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV », Univ M'sila ,2016.

[21] TOUIL NACER EDDINE, GHENBAZI SLIMANE, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 09/2015.

[22] d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy, « an improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications, IEEE applied power electronics conf. And exposition, Vol. 1, pp. 540-545, 2003

[23] Y. PANKOW, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Ecole nationale supérieure d'Art et Métiers, Lille, 2004.

[24] DJERIOUS.S, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », MAGISTER, Université FERHAT ABBAS DE SETIF Soutenu le 03/07/2011.

Annexes

Annexes

✚ Les caractéristiques de GPV :

Dans notre étude on a utilisé un générateur photovoltaïque de type « **1Soltech 1STH-215-P** » dans les caractéristiques sont données par le tableau suivant :

Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m², and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings
17

Series-connected modules per string
14

Module data

Module: 1Soltech 1STH-215-P

Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
213.15	60
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
36.3	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
29	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.36099	0.102

Model parameters

Light-generated current IL (A)
7.8649

Diode saturation current I0 (A)
2.9259e-10

Diode ideality factor
0.98117

Shunt resistance Rsh (ohms)
313.3991

Series resistance Rs (ohms)
0.39383

Display I-V and P-V characteristics of ...
array @ 1000 W/m² & specified temperatures

T_cell (deg. C) [45 25]

Plot

OK Cancel Help Apply

Figure 02 : Caractéristique de 1Soltech 1STH-215-P

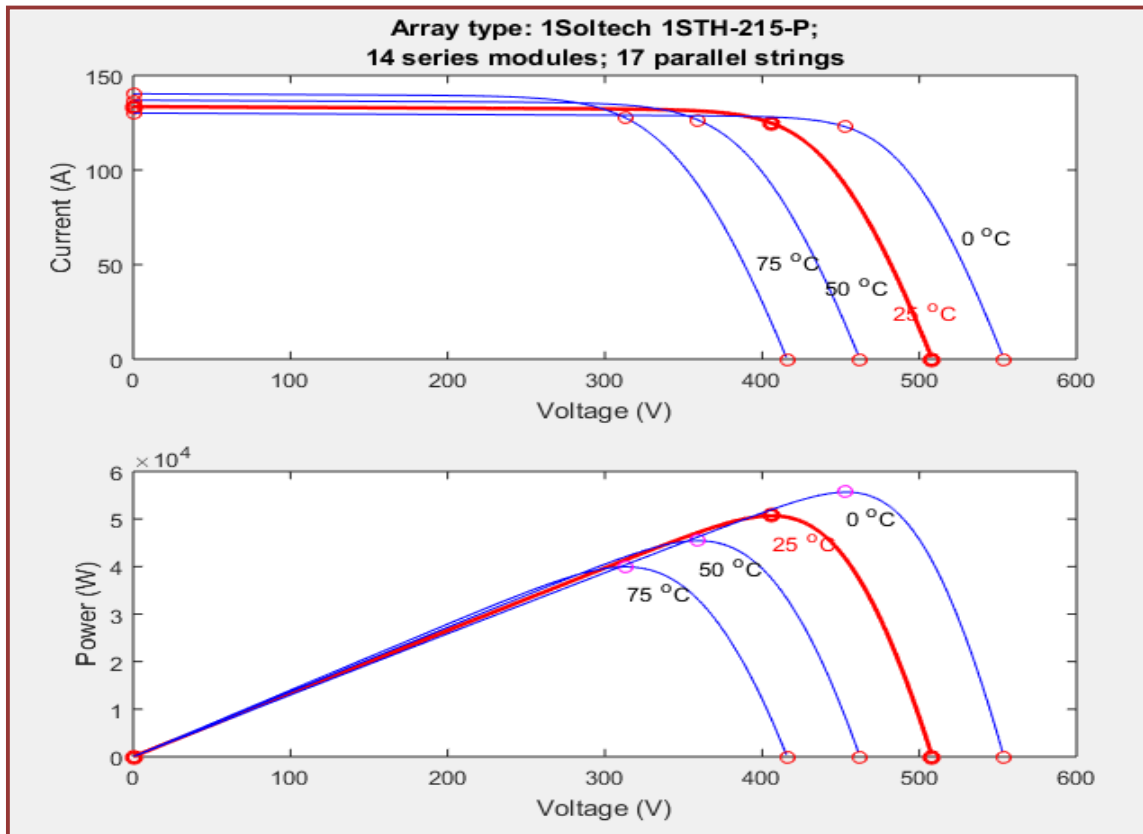


Figure 02: Variation de température

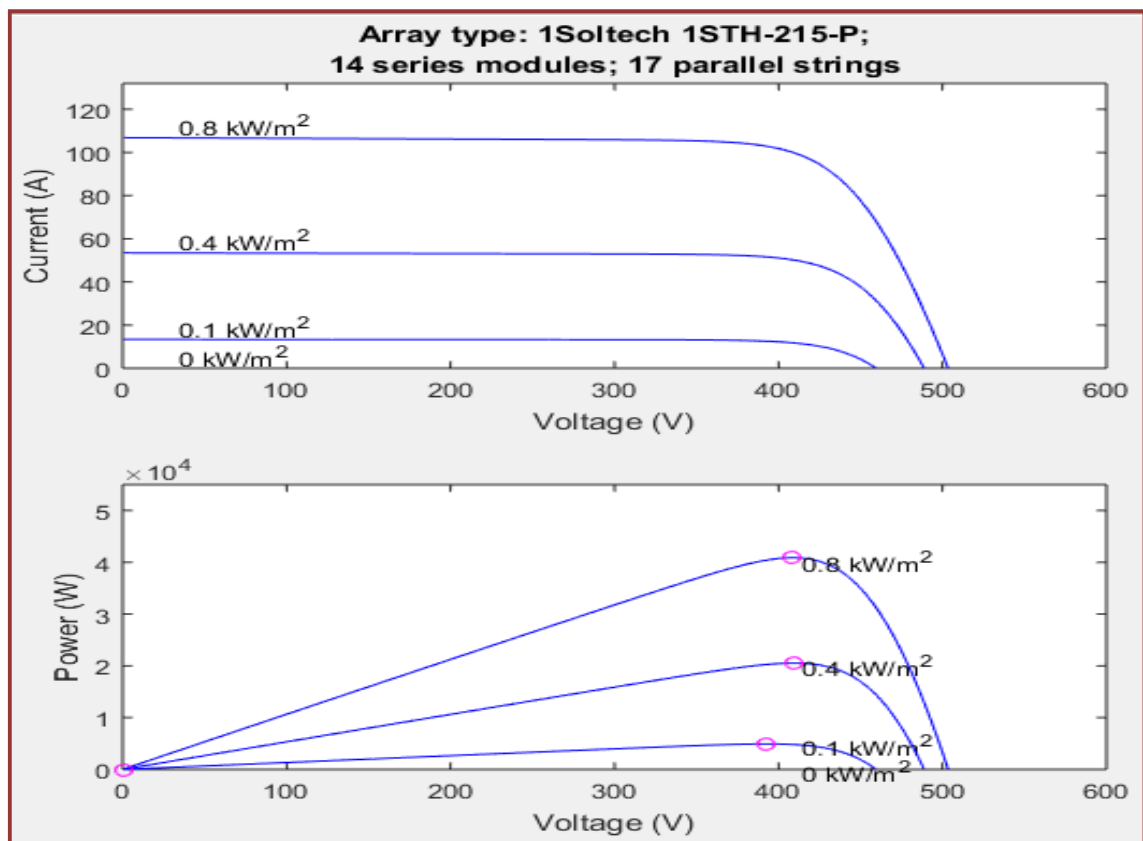
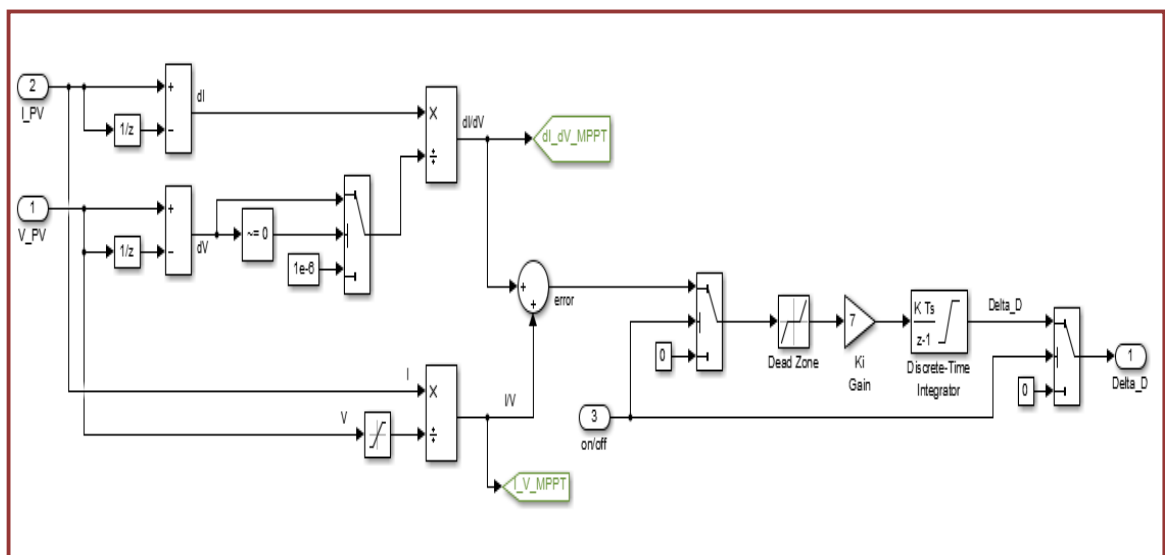
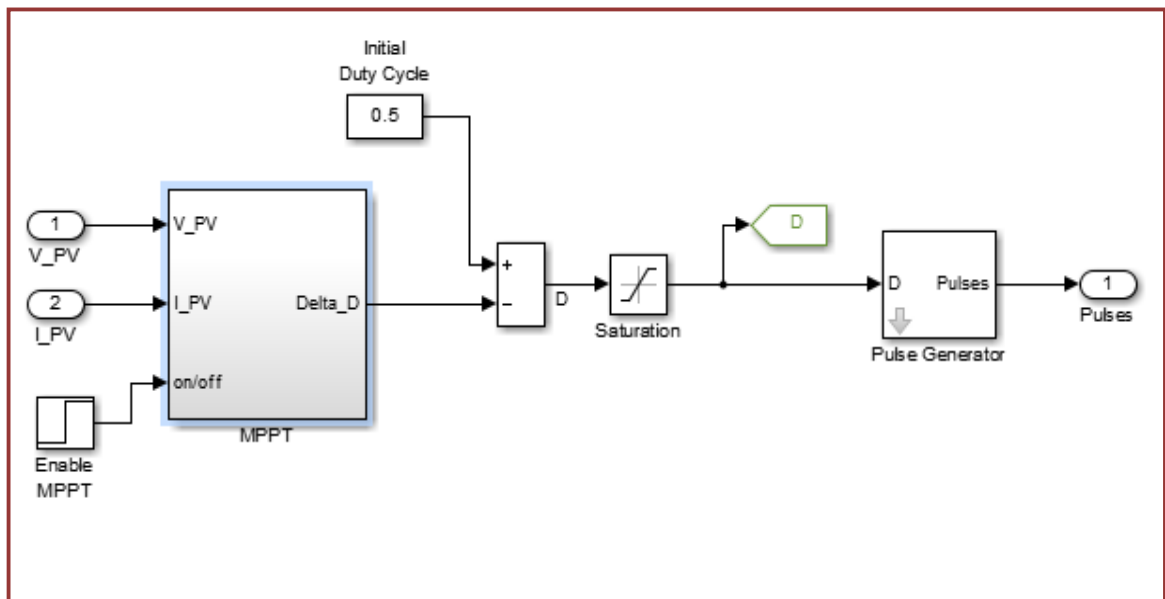


Figure 03: Variation de l'irradiance

Algorithm INC



Algorithm P&O

```
Function D = Pand0 (Vpv,Ipv)

Persistent Dprev Pprev Vprev

if isempty(Dprev)
    Dprev = 0.7;
    Vprev = 190;
    Pprev = 2000;
end

deltaD = 125e-6;

%calculate measured array power
Ppv = Vpv*Ipv;

%Increase or decrease duty cycle based on conditions
if (Ppv-Pprev) ~= 0
    if (Ppv-Pprev) > 0
        if (Vpv-Vprev) > 0
            D = Dprev - deltaD;
        else
            D = Dprev + deltaD;
        end
    else
        if (Vpv-Vprev) > 0
            D = Dprev + deltaD;
        else
            D = Dprev - deltaD;
        end
    end
else
    D = Dprev;
end

%Update internal values
Dprev = D;
Vprev = Vpv;
Pprev = Ppv;
```

الملخص :

في هذه الرسالة ، قمنا بدراسة و نمذجة ومحاكاة للنظام الكهروضوئي. درسنا بطريقة عامة المولد الكهروضوئي وتشغيله بأقصى طاقته باستخدام مفرمة دفع يتم التحكم فيها بواسطة خوارزمية MPPT من نوع O&P ونوع التوصيل الإضافي. الغرض من هذه الدراسة هو مقارنة نوعين من MPPT وتحسين كفاءة الطاقة للنظام الكهروضوئي. حاولنا ربط هذا النظام بحمل R. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام MATLAB / Simulink أداء التحكم في السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية:

- نظام الطاقة الكهروضوئية ، المولدات الكهروضوئية.
- المحول الرفع.
- تحكم MPPT
- النمذجة الكهروضوئية
- محاكاة PV

Résumé

Dans cette mémoire, nous avons réalisé une étude et modéliser et simulé su système photovoltaïque. On a étudié de manière générale le générateur photovoltaïque et son fonctionnement à sa puissance maximale en employant un hacheur boost contrôlé par un algorithme MPPT de type P&O et de type conductance incrémentale.

Le but de cette étude est comparée en deux type du MPPT et d'améliorer le rendement en puissance du système PV. Nous avons essayé de connecter ce système avec une charge R. les résultats de simulation obtenus avec MATLAB/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés:

- Système PV, Générateur photovoltaïque.
- Convertisseur survolteur « hacheur boost »
- Commande MPPT
- Modélisation PV
- Simulation PV

Abstract

In this thesis, we carried out a study and modeled and simulated the photovoltaic system. We studied in a general way the photovoltaic generator and its operation at its maximum power by using a boost chopper controlled by an MPPT algorithm of the P&O type and of the incremental conductance type.

The purpose of this study is to compare two types of MPPT and to improve the power efficiency of the PV system. We tried to connect this system with an R load. The simulation results obtained with MATLAB/Simulink show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems.

Key words:

- PV system, photovoltaic generator.
- “boost chopper” booster converter
- Control MPPT
- PV modeling
- PV simulation