

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

THEME :

Etude Et Simulation D'une Commande MPPT
Pour Système PV

Proposé et dirigé par:

Dr. HARRAG Abdelghani

Présenté par :

BENADEL Faiza

Année Universitaire : 2015 – 2016

Numéro d'ordre : CSE_208

DEDICACE

A mes parents BENADEL Ismail et BRAHIMI Hasna

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être, pour tout le soutien et l'amour que vous me portez, merci, merci et merci. Avec toute ma tendresse.

A mes oncles, tantes.

A mes frères et sœurs, cousins et cousines.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Affectueuse reconnaissance

Meilleurs vœux de succès dans vos études et dans votre vie.

A mes amis.

Vous m'avez encouragée et aidée quand j'avais besoin de vous. Je n'aurais jamais pu le faire sans vous. Mes sincères remerciements.

A tous mes enseignants, du primaire à l'université

A tous les amis que j'ai eus dans ma vie.

A mes camarades de la faculté des sciences et technologie de l'Université de M'sila.

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu Le Tout Puissant qui nous adonné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **Dr. HARRAG Abdelghamid** d'abord pour avoir proposé ce thème, ensuite pour avoir assumé la responsabilité de notre encadrement, enfin pour nous avoir orienté et nous avoir conseillé tout au long de la réalisation de ce travail ainsi que pour la confiance qu'il nous a accordée.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être lecteurs et critiques de notre mémoire.

<i>Sommaire</i>	I
<i>Liste des symboles</i>	IV
<i>List des figures</i>	VII
<i>List des tableaux</i>	X
<i>Introduction générale</i>	1

Chapitre I

L'Énergie Solaire Photovoltaïques

I.1.Introduction.....	3
I.2 Rayonnement Solaire.....	3
I.2.1. Mesure du rayonnement solaire.....	4
I.2.2. Les types de rayonnement.....	5
I.3 L'énergie solaire.....	6
I.4 Energie solaire photovoltaïque.....	6
I.4.1 Description d'un système PV.....	6
I.4.2 L'effet photovoltaïque.....	7
I.4.3 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	7
I.4.4 Technologie des cellules solaires [12].....	7
I.5 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque.....	8
I.5.1 Les avantage.....	8
I.5.2. Les inconvénients.....	9
I.6 Le Potentiel Solaire en Algérie.....	9
I.6.1 La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....	10
I.7 Conclusion.....	11

Chapitre II

Modélisation D'un System Photovoltaïques

II .1. Introduction.....	12
II.2 Générateur Photovoltaïque GPV.....	12
II.2.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque.....	13
II.2.2 Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque.....	17
II.2.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques.....	18
II.2.3.1 Association De Cellules Photovoltaïques En Série.....	18

II.2.3.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	18
II.2.4 Protections D'un Générateur.....	19
II.2.5 Modélisation D'un GPV.....	20
II.2.6 Caractéristique D'un Générateur PV.....	21
II.2.7 Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV.....	22
II.2.7.1 Influence De L'ensoleillement	21
II.2.7.2 Influence de la température.....	23
II.3 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV.....	25
II.3.1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge.....	25
II.3.2 Convertisseur DC/DC	25
II.3.3 Étage d'Adaptation de Type BOOST.....	27
II.3.4 Modèle mathématique équivalent.....	27
II.3.5 Modèle approximé du convertisseur Boost.....	28
II.4 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT).....	29
II.7. CONCLUSION.....	29

Chapitre III

Poursuite du point de puissance maximale

III.1 Introduction.....	30
III.2 Principe De La Commande MPPT.....	30
III.3 Classification Des Commandes MPPT.....	31
III.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.....	31
III.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	32
III.4 Les Algorithmes MPPT.....	33
III.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage).....	33
III.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current)	34
III.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe).....	36
III.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).....	40
III.4.5 La Commande Mppt Flou.....	42
III.4.6 Autres Méthodes.....	45
III.5 Conclusion.....	45

Chapitre IV
simulation, résultat et discussions

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 simulation du système photovoltaïque.....	46
IV.2.1 simulation d'GPV.....	47
IV.2.2 simulation du convertisseur Boost.....	47
IV.2.3 simulation de l'Algorithme MPPT connues	48
IV.2.4 Résultats et discussions	48
IV.2.4.1 Algorithme P&O	48
IV.2.4.2 Algorithme InCond	51
IV.2.4.3 la commande mppt flou	53
IV.2.5 Simulation des algorithmes MPPT proposés	55
IV.2.6 Résultats et discussions	55
IV.2.6.1 La commande P&O flou	55
IV.2.6.2 La commande IncCond flou	58
IV.3 Etude comparative entre les commande étudiées	60
IV.4 conclusion	63
Conclusion générale	64

Liste des symboles

φ : latitude

P : puissance[w]

α : Rapport cyclique.

I_{RP} : Courant circulant dans la résistance RP .

R_P : Résistance shunt de la cellule PV.

R_S : Résistance série de la cellule PV.

I_{PV} / I_{cell} : Courant généré par la cellule (générateur) photovoltaïque.

V_{PV} / V_{cell} : tension généré par la cellule (générateur) photovoltaïque.

I_{PH} : Courant de la cellule PV (Photo-Courant).

I_D : Courant circulant dans la diode.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

D : diode

V_{th} : Tension thermique

q : charge d'électron (1.602×10^{-19} C)

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)

n : facteur de non idéalité de la jonction

T : température effective de la cellule en Kelvin

STC : Standard Test Conditions

G : Éclairement absorbé par la cellule.

T_a : Température ambiante

T^C : Température de fonctionnement de la cellule

I_{sc} : le courant de court-circuit

V_{oc} : la tension de circuit ouvert

V_g : Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [eV].

I_{cc} : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].

V_{co} : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

k_0 : coefficient de température de I_{ph}

k_3 : coefficient de température de la résistance série.

I_{CS} : courant de cellules en série.

V_{CS} : tension de cellules en série.

N_S : Nombre de cellules en série.

N_P : Nombre de cellules en parallèle.

I_{CP} : courant de cellules en parallèle.

V_{CP} : tension de cellules en parallèle.

I_C : courant d'une seule cellule

V_C : tension d'une seule cellule

P_{MAX} : Puissance maximale

S : le transistor de convertisseur statique

L : l'inductance de filtre de convertisseur statique

I_L : Courant moyen passant à travers l'inductance

R_L : Résistance de filtre.

V_{PPM} / V_{OPT} : Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

I_{PPM} / I_{OPT} : Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

k_1 : est une constante de proportionnalité

V_{ref} : tension de référence

I_{ref} : courant de référence

k_2 : constante de proportionnalité

E : L'erreur

ΔE : changement d'erreur

Notations

Wc : watt-crête

Labo : Laboratoire

PV :Photovoltaïque.

MPPT :Poursuite du Point de Puissance Maximale, ‘Maximum Power Point Tracking’.

GPV Générateur Photovoltaïque.

NOCT : Nominal Operating Cell Temperature

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

CS :convertisseur statique

PPM : Point de Puissance Maximale.

IncCond : Incremental Conductance(Conductance Incrémentale).

CV :Constant Voltage

P&O :Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

PI : Proportionnel Integral

DSP: digital signal processor

MOSFET : Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

IGBT : insulated-gate bipolar transistor

Liste des figures**Chapitre I**

Figure I.1. Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45).....	4
Figure I.2. Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes.....	4
Figure I.3. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.4. Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie.....	10

Chapitre II

Figure II.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	12
Figure II.2 Composants d'un GPV.....	13
Figure II.3 Modèle électrique équivalant à la cellule solaire.....	13
Figure II.4 Caractéristique P-V d'une cellule	17
Figure II.5 Caractéristique I-V d'une cellule	17
Figure II.6 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.	18
Figure II.7 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.....	19
Figure II.8 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour....	20
Figure II.9 Caractéristique P/V d'un panneau PV.....	22
Figure II.10 Caractéristique I/V d'un panneau PV.....	22
Figure II.11 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.....	23
Figure II.12 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.....	23
Figure II.13 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m ² et une température variable.....	24
Figure II.14 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m ² et une température variable.....	24
Figure II.15 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	25
Figure II.16 convertisseurs DC-DC	26
Figure II.17 Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.....	27
Figure II.18 Allure des variables dynamiques I_L	28

Chapitre III

Figure III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	30
Figure III.2 Principe de la commande MPPT.....	31
Figure III.3 Algorithme de la Tension Constante.....	34
Figure III.4 Algorithme du constant courant.....	35
Figure III.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	36
Figure III.6 l'algorithme de P&O classique	37
Figure III.7 Divergence de la méthode P&O	38
Figure III.8 algorithme du poids d'un troisième point	39
Figure III.9 caractéristique de tension-puissance du panneau.....	40
Figure III.10 l'algorithme IncCond classique	42
Figure III.11 Structure de base de la commande floue	44

Chapitre IV

Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du système global	46
Figure IV.2 Modèle de simulation du GPV.....	47
Figure IV.3 Modèle de simulation du CS BOOST	47
Figure IV.4 schéma de block de la commande MPPT : a) P&O, b) InCond., c) flou.....	48
Figure IV.5 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2.....	49
Figure IV.6 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2	50
Figure IV.7 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2	51
Figure IV.8 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$, $d=0.01$ dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2	52
Figure IV.9 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2	53
Figure IV.10 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2	54
Figure IV.11 Schéma de block de la commande MPPT proposée : a) P&O Flou, b) IncCond Flou	55

Figure IV.12 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2	56
Figure IV.13 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom1, b) Zoom 2	57
Figure IV.14 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2	58
Figure IV.15 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation : a) Zoom 1, b) Zoom 2	59
Figure IV.16 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2	60
Figure IV.17 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2	61

Table des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.....10

Chapitre II

Tableau II.1 Conditions de test.....15

Tableau II.2 Caractéristiques du module KC-60.....17

Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.....26

Chapitre III

Tableau III.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....44

Chapitre IV

Tableau IV.1 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.....48

Tableau IV.2 comparaison numérique entre les commandes MPPT étudiées.....62

Introduction

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Incrémentation (INC) et l'approche Floue (FL). Cette dernière a reçu une attention particulière de la part d'un certain

nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique hybride MPPT Floue.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le soleil, l'énergie solaire, l'énergie photovoltaïque bien sûr et quel que information sur le potentiel algérien et le future d'énergie photovoltaïque dans Algérie ;
- Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le GPV et le convertisseur statistique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT;
- Le troisième chapitre, présentera le principe de la recherche de point maximal, les classifications de la commande MPPT et des études théoriques de quelques-unes de ces méthodes;
- Le quatrième chapitre, quant à lui sera détaillera la simulation du système photovoltaïque tout en donnant les principaux résultats Et à la fin de cet chapitre nous avons fait une étude comparative de quel que type MPPT.
- Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre I
L'Énergie Solaire Photovoltaïques

I.1 Introduction

Le Soleil a toujours fasciné l'Homme. Il est source de vie et sans lui, nous n'existerions pas. Néanmoins, si nous replaçons le Soleil dans le contexte de l'Univers - ce dernier contient des centaines de milliards de milliards d'étoiles - c'est un astre tout à fait ordinaire, une étoile parmi les étoiles - soit une sphère que sa température élevée rend lumineuse.

Cette étoile – notre étoile – située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré. Il faudrait donc 93 000 soleils côte à côte pour occuper l'étendue de la voûte céleste. Son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète. La Lune est 400 fois plus petite que le Soleil, mais 400 fois plus près de la Terre, ce qui explique la taille apparente similaire des deux astres dans le ciel, ce dont on peut se rendre compte en particulier lors des éclipses de Soleil [1].

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein, $E = mc^2$. Cette énergie est transmise sous forme de rayonnement. [2].

I.2 Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire transmis dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque elle a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m^2 [1]. La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon plusieurs facteurs qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [1-2]. En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivant [3]:

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude);
- la saison;
- l'heure;
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...);
- l'altitude du lieu.

Il est possible de représenter l'allure des courbes correspondant aux variations de l'ensoleillement selon différents paramètres (Figures I.1 et I.2).

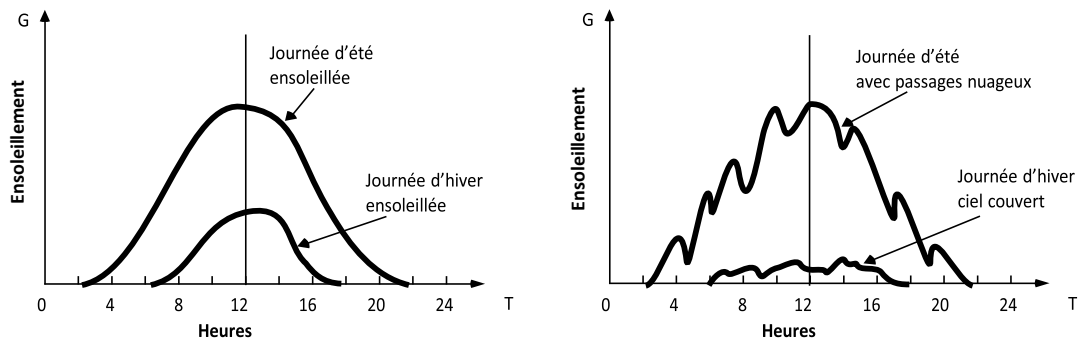


Figure I.1. Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45) [3].

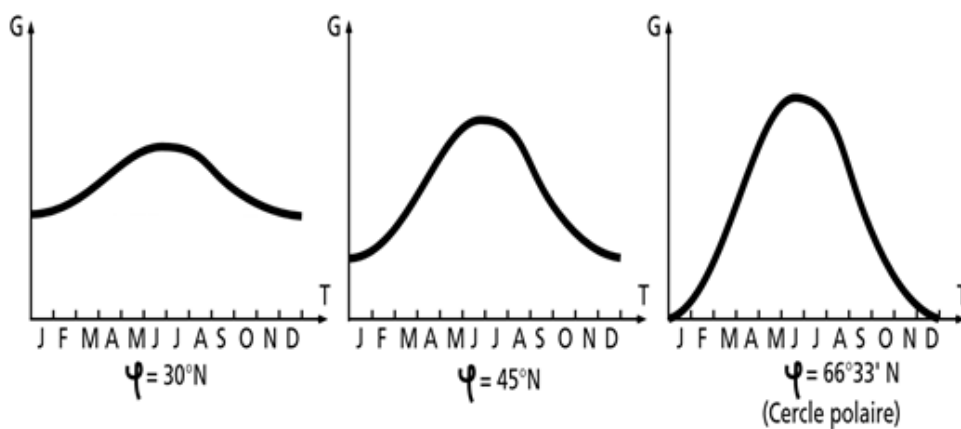


Figure I.2. Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes [3].

I.2.1. Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2). Comme on l'explique à la section La ressource solaire, l'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé. Il s'exprime habituellement en kilowattheure par mètre carré (kWh/m^2), en «heure de soleil maximum», en mégajoule par mètre carré (MJ/m^2) ou en calorie par centimètre carré (cal/cm^2) pour l'intervalle déterminé – une journée ou une heure.

$$\begin{aligned}
 1kWh/m^2 \cdot j &= 1 \text{ heure de soleil maximum } (1000W/m^2)/\text{jour} \\
 &= 3,6 MJ/m^2 \cdot j \\
 &= 86 cal/cm^2 \cdot j
 \end{aligned}$$

Les valeurs quotidiennes d'ensoleillement sont habituellement présentées sous forme de moyennes mensuelles pour différentes latitudes et inclinaisons à des endroits précis (afin de rendre compte de l'effet de conditions météorologiques différentes). Le plus souvent, on exprime l'ensoleillement en «heures de soleil maximum», c'est-à-dire par le nombre équivalent d'heures par jour où l'éclairement est en moyenne de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ainsi, un ensoleillement de six heures de soleil maximum indique que le rayonnement reçu au cours d'une journée est le même que si le Soleil avait brillé pendant six heures à $1000\text{W}/\text{m}^2$. Les heures de soleil maximum sont un indice utile pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, car ces systèmes sont habituellement évalués en watt-crête (Wc), c'est-à-dire sous un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ [3].

I.2.2. Les types de rayonnement

Il y a quatre types de rayonnement[3-4]:

- Le **rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.
- Le **rayonnement diffus** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- Le **rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- 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.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du Soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

I.3 L'énergie solaire

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires [5-6]:

- **l'énergie passive** : Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. Il consiste à laisser entrer le rayonnement solaire naturellement dans une construction par l'intermédiaire de surface vitrées et/ou par la mise en œuvre de façade du type double-peau ou encore mur trombe. Prévu dès la conception architecturale, le solaire passif n'engendre que de faibles surcoûts
- **l'énergie solaire thermique** : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur). Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage ou pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques.
- **l'énergie thermodynamique** : Cette énergie est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée
- **l'énergie photovoltaïque** : Énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

I.4 Energie solaire photovoltaïque

I.4.1 Description d'un système PV

Dès l'année 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre que certains matériaux produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il faut attendre 1905 pour qu'Albert Einstein explique concrètement ce phénomène, Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [3-8]. La transformation de la lumière en énergie électrique porte aussi le nom d'effet photovoltaïque, Le mot « photo-voltaïque » vient de grec « photos » et signifiant lumière et de « volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique [9].

I.4.2 L'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [10].

I.4.3 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

En fait, la photopile est composée de matériaux semi-conducteurs dopés P (manque d'électrons) et N (excès d'électrons) dont la jonction de type P-N permet aux électrons excédentaires de la zone N de traverser la jonction et d'occuper les trous de la zone P. Ainsi, lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons constituant cette lumière communiquent leur énergie aux atomes du matériau en libérant les électrons des atomes qui génèrent ainsi des charges N (les électrons) et des charges P (les trous). Or le déplacement d'électrons (créé par l'énergie des photons) est synonyme de production d'électricité. Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) [11].

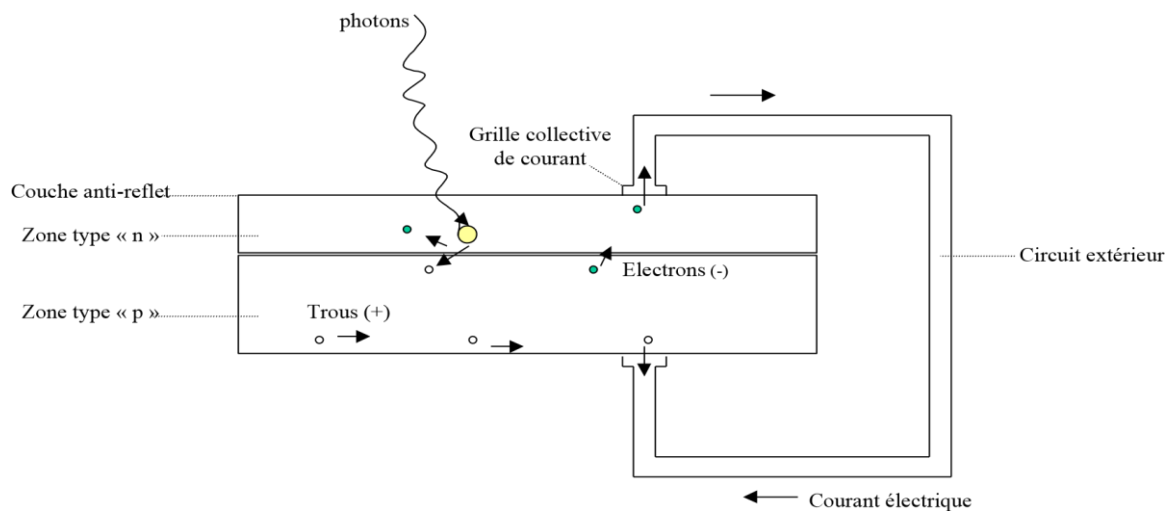


Figure I.3. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

I.4.4 Technologie des cellules solaires

Elles peuvent être classées comme suit [12]:

- **Les cellules mono-cristallines:** caractérisées par:
La première génération de photopiles ;

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

• **Les cellules poly-cristallines** : caractérisées par:

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

• **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)** : caractérisées par:

Coût de production bien plus bas ;
Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) ;
Durée de vie plus faible ;
C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc. Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse. De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

• **Les cellules nanocristallines** : caractérisées par:

Une des dernières générations de photopiles ;
Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;
Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire ;
Procédé et coût de production encore plus bas.

I.5 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques offrent de nombreux avantages tout en ayant quelques inconvénients [13-14] :

I.5.1 Les avantages :

- La haute fiabilité ;
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière ;
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers ;

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu ;
- L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.

I.5.2. Les inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

I.6 Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au nord et $2263\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [15-16].

Tableau I.1 Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

La Figure I.4 quant à elle donne la moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie [16].

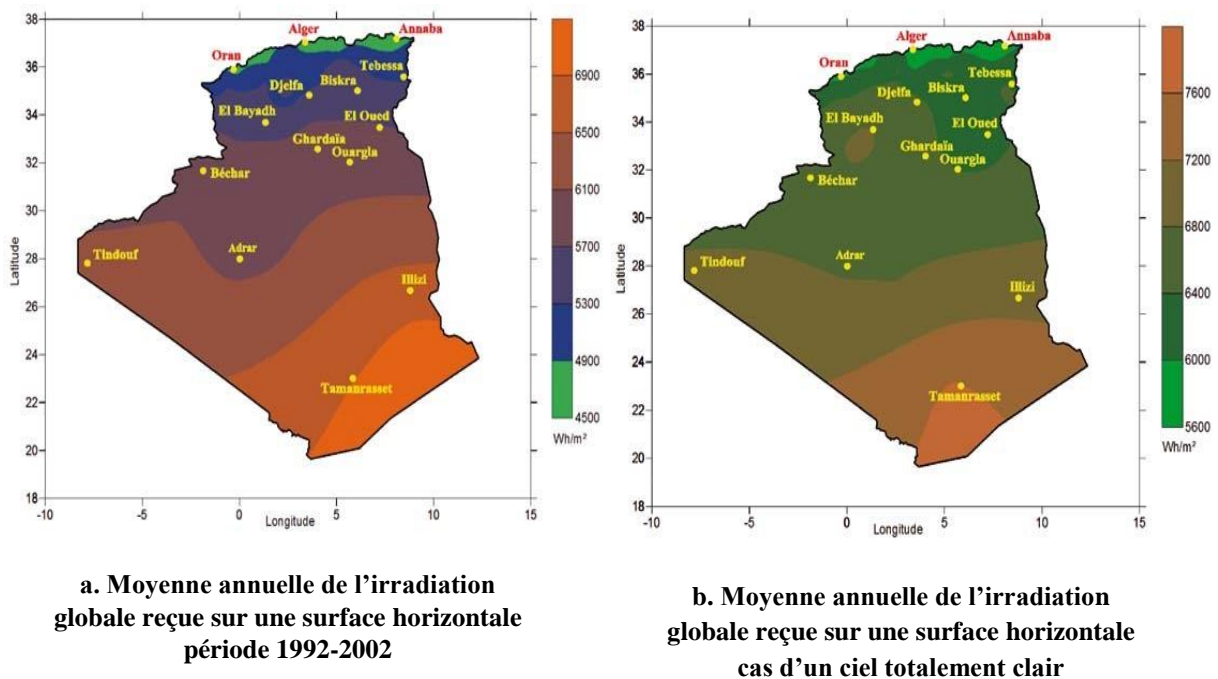


Figure I.4. Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie [15].

I.6.1 La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [17].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

Chapitre II
Modélisation D'un System
Photovoltaïques

II.1 Introduction

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs éléments interconnectés destinés à réaliser une tâche bien déterminée, qui peut être fournir de l'électricité au réseau public de distribution, pomper de l'eau d'un puits, alimenter une petite calculatrice ou l'une des nombreuses utilisations possibles de l'électricité solaire. Il est généralement constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur, d'une batterie, d'un récepteur « courant continu » et d'un onduleur si il existe un récepteur « courant alternatif ». La figure suivante décrit le système qui nous sera utilisé dans notre travail

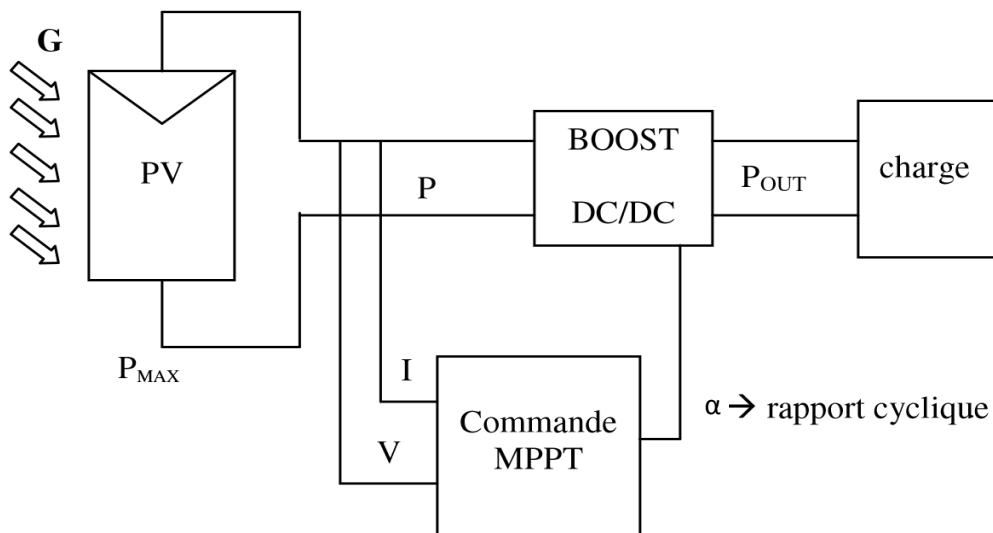


Figure II.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

II.2 Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure II.2). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [18].

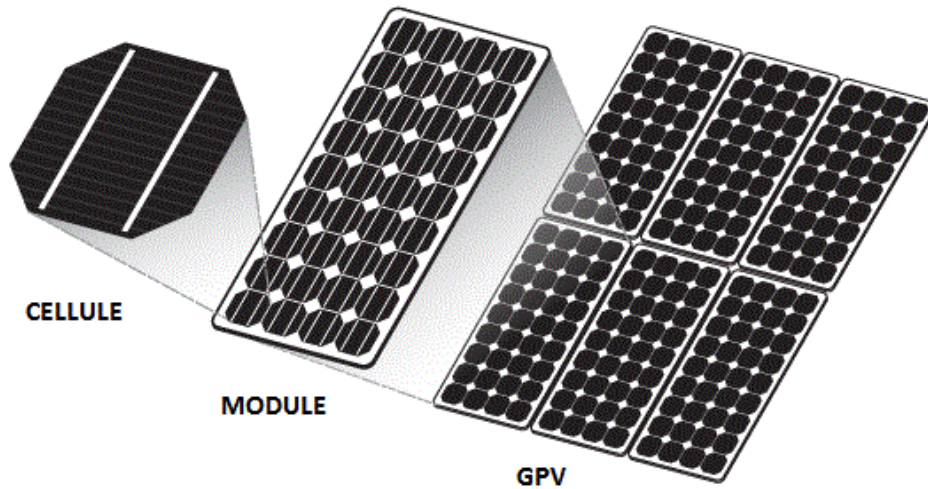


Figure II.2 Composants d'un GPV

II.2.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque

La caractéristique $I-V$ du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par Figure II.3. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [19].

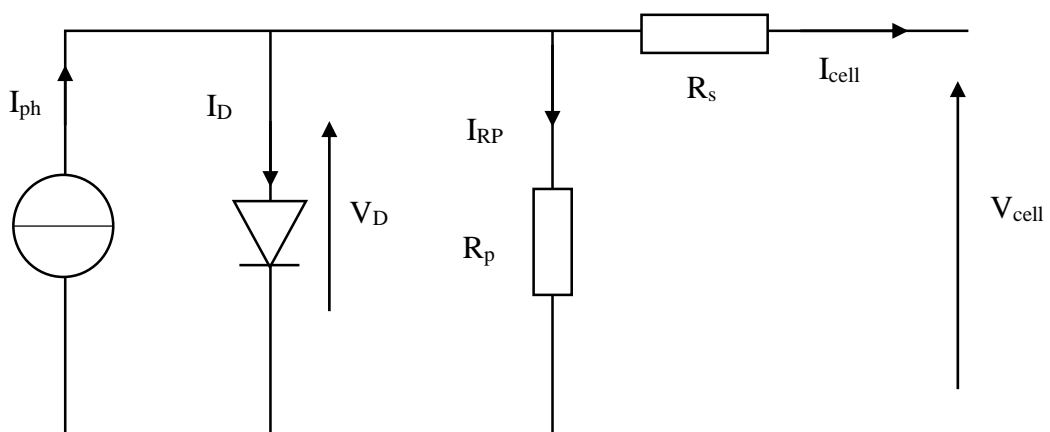


Figure II.3 Modèle électrique équivalent à la cellule solaire

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la résistance de

contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_p représente le courant de fuite. Une diode D en parallèle qui modélise la jonction PN .Ce circuit peut être utilisée aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [18].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (II-1)$$

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} \quad (II-2)$$

$$I_D = I_s \left(e^{V_D/V_{th}} - 1 \right) \quad (II-3)$$

$$V_D = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad (II-4)$$

Alors :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (II-5)$$

Avec

- I_s : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{KT}} \quad (II-6)$$

- V_{th} tension thermique à la température T :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (II-7)$$

q : charge d'électron (1.602×10^{-19} C)

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)

K_1 : constante ($1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$)

T : température effective de la cellule en Kelvin

V_g : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV)

Généralement la résistance (R_p) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant I_{Rp} [2-20], Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1 \right) \quad (II-8)$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell} = -R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_{cell} + I_s}{I_s} \right) \quad (II-9)$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte. En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

Tableau II.1 Conditions de test.

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement $G_0=1000W/m^2$	Eclairement $G_{nom}=800W/m^2$
Température de la cellule $T_0=25^\circ C$	Température ambiante $T_{a,nom}=20^\circ C$

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- le courant de court-circuit $I_{sc,0}$.
- la tension de circuit ouvert $V_{oc,0}$.
- la puissance maximale $P_{max,0}$.

Sous les conditions nominales, la température de la cellule T_{NOCT} (NOCT : Nominal Operating Cell Temperature) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

Le photo-courant I_{ph} est directement proportionnel à l'éclairement. Si $I_{sc,0}$ est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quel autre valeur de G , est donné par :

$$I_{ph}|_{T_0} = \frac{I_{sc,0}}{G_0} \cdot G = C_1 G \quad (II-10)$$

Le photo-courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph}|_{T_0} \cdot (1 + k_0 (T - T_0)) \quad (II-11)$$

D'où

$$k_0 = \frac{I_{sc}|_{T_2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad (\text{II-12})$$

Avec k_0 est le coefficient de température de I_{ph} (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius), et $T_2 = 75^\circ\text{C}$

La température de fonctionnement de la cellule T^C dépend de l'éclairement G et de la température ambiante T_a , selon l'équation empirique suivante :

$$T^C = T_a + C_2 G \quad (\text{II-13})$$

Avec

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad (\text{II-14})$$

Si la température T_{NOCT} n'est pas connue, la constante C_2 est approximée par $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$. (en pratique C_2 varie entre 0.01 et $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$)

La tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{oc} = V_{oc,0} + C_3 (T^C - T_0) \quad (\text{II-15})$$

Où $C_3 = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$

Le courant de saturation I_s de la diode pour la température T_0 , est donné par :

$$I_{s,0} = \frac{I_{sc,0}}{\left(e^{V_{oc,0}/V_{th,0}} - 1\right)} \quad (\text{II-16})$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{s,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-\frac{qV_s}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (\text{II-17})$$

La résistance série R_s a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert V_{oc} . La valeur de R_s est alors donnée en évaluant la pente dV/dI de la courbe I/V pour $V = V_{oc}$. L'expression de R_s est donnée en dérivant I et en réarrangeant en fonction de R_s :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{(V+R_s I)/V_{th}} - 1\right) \quad (\text{II-18})$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}} (dV + R_s dI) \cdot e^{(V+R_s I)/V_{th}} \tag{II-19}$$

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc,0}} - \frac{1}{X_V} \tag{II-20}$$

$$X_V = \frac{I_{s,0}}{V_{th,0}} \cdot e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{th,0}}} \tag{II-21}$$

La résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_s|_{T_0} (1 + k_3 (T - T_0)) \tag{II-22}$$

Avec k_3 coefficient de température de la résistance série.

II.2.2 Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque

En prend par exemple une cellule de module KC-60 Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m²) et 25°C.

Tableau II.2 Caractéristiques du module KC-60[22].

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension a circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
60 w	3.73 A	20 V	3.55 A	16.9 V

Les figures suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température de 25°C.

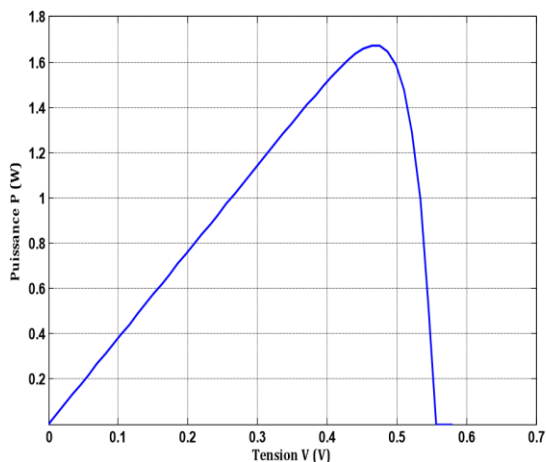


Figure.II.4 Caractéristique P-V d'une cellule

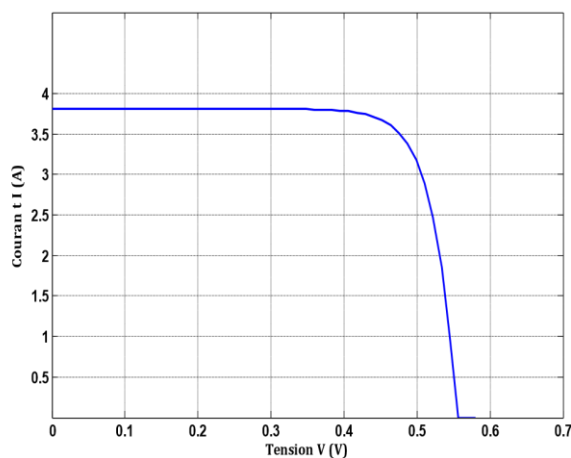


Figure.II.5 Caractéristique I-V d'une cellule

II.2.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique.

II.2.3.1 Association De Cellules Photovoltaïques En Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure.II.6 montre la caractéristique résultante (I_{CS} , V_{CS}) obtenue en associant en série N_S cellules identiques (I_C , V_C) [23].

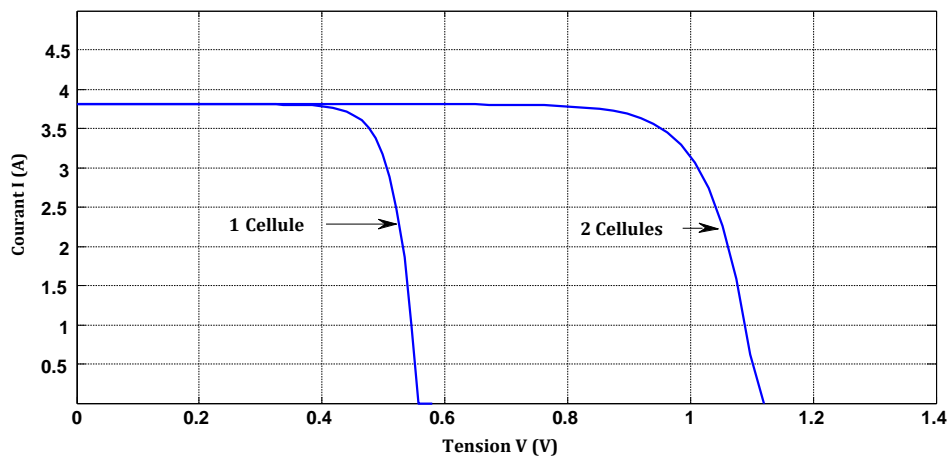


Figure.II.6 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

$$I_{CS} = I_C \quad (\text{II-23})$$

Et

$$V_{CS} = N_S V_C \quad (\text{II-24})$$

II.2.3.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. (Figure II.7) montre la caractéristique résultante (I_{CP} , V_{CP}) obtenue en associant en parallèle N_P cellules identiques (I_C , V_C) [23] :

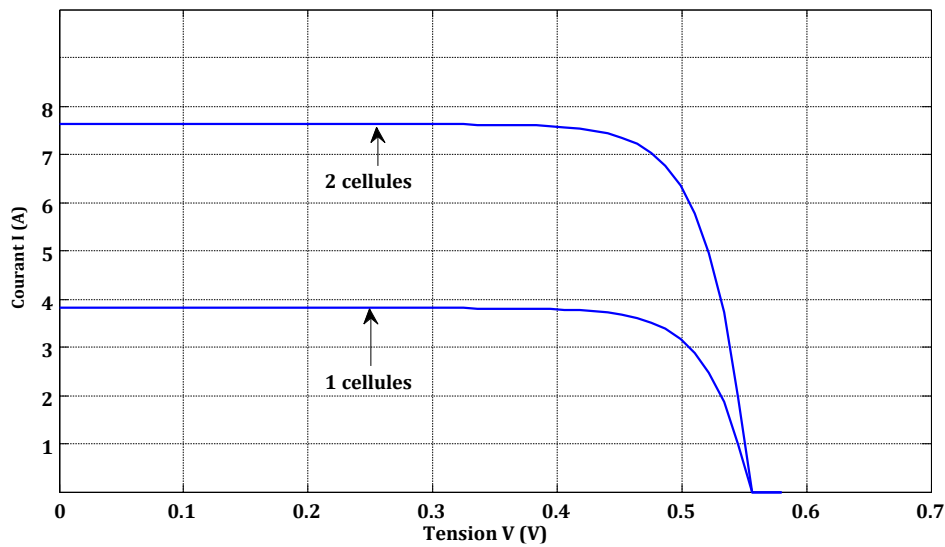


Figure.II.7 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

$$I_{CP} = N_P I_C \quad (\text{II-25})$$

Et

$$V_{CP} = V_C \quad (\text{II-26})$$

II.2.4 Protections D'un Générateur

Le groupement des cellules photovoltaïques présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles [24-25].

Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (FigureII.8)

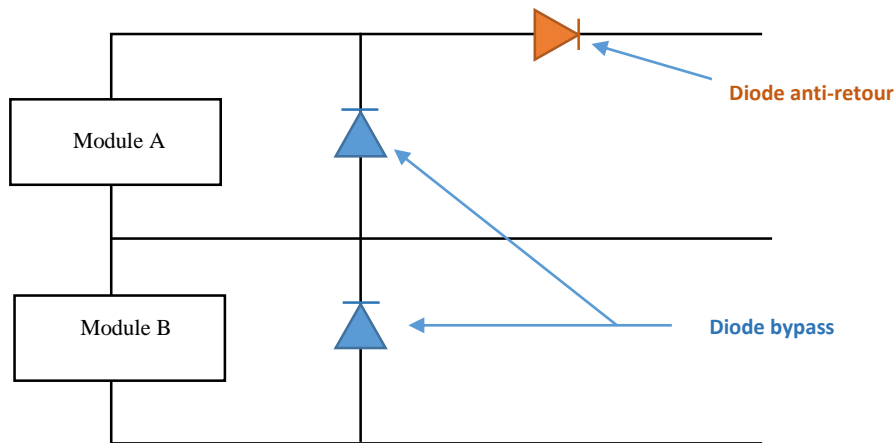


Figure.II.8 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

II.2.5 Modélisation D'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{(V_{cell} + R_s I_{cell}) / V_{th}} - 1 \right) \tag{II-8}$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres, I_{ph} et I_s en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de I_{SC} , V_{OC} et P_{max} qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [18] :

- le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{(V + IR_s / V_{th})} \gg 1$ pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (3) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} \quad (II-27)$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) \quad (II-28)$$

D'où :

$$I_s = I_{sc} \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad (II-29)$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{(V - V_{oc} + IR_s)/V_{th}} \right) \quad (II-30)$$

Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent N_p branches en parallèle, chacune avec N_s cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant I^P , généré par le module PV sera exprimé par:

$$I^P = N_p I_{sc} \left(1 - e^{\left(\frac{V^P - N_s V_{oc} + \frac{N_s}{N_p} R_s I^P}{V_{th}} \right)} \right) \quad (II-31)$$

II.2.6 Caractéristique D'un Générateur PV

Les figures suivant présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de 1000W/m2 et une température de 25°C.

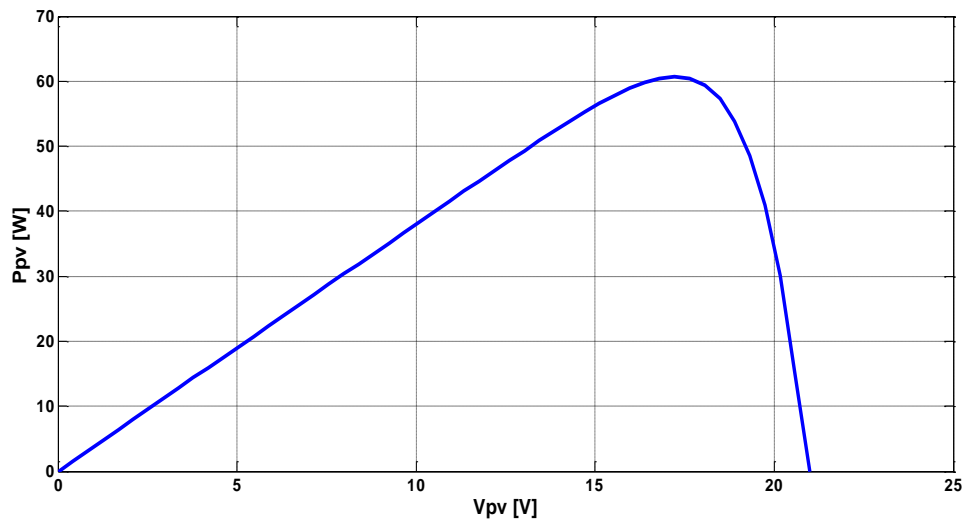


Figure.II.9 Caractéristique P/V d'un panneau PV

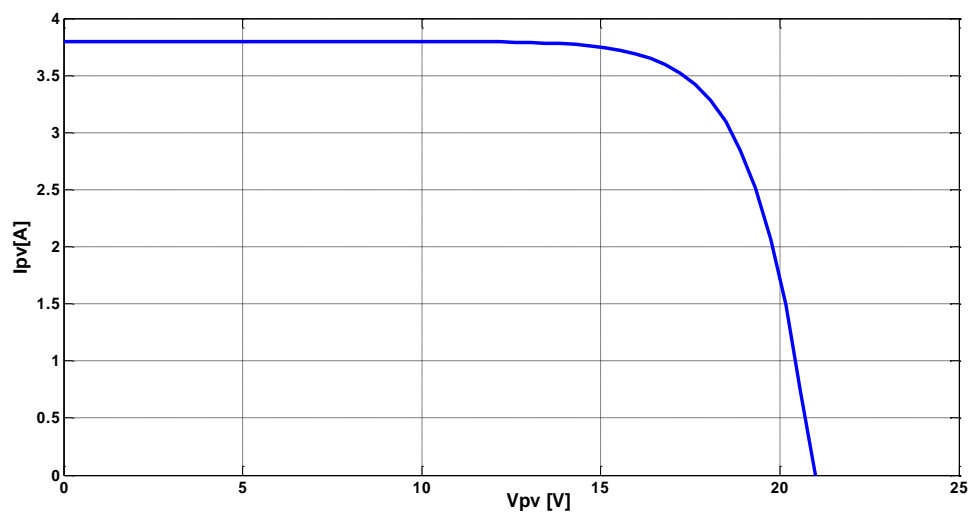


Figure.II.10 Caractéristique I/V d'un panneau PV

II.2.7 Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV

II.2.7.1 Influence De L'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{CCM} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{COM} et donc un décalage du point Pmax du panneau solaire vers les puissances inférieures

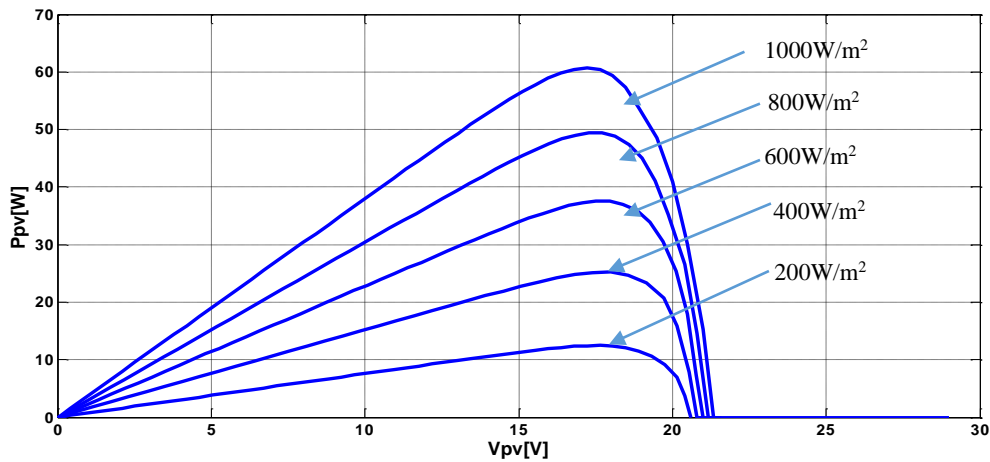


Figure.II.11 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

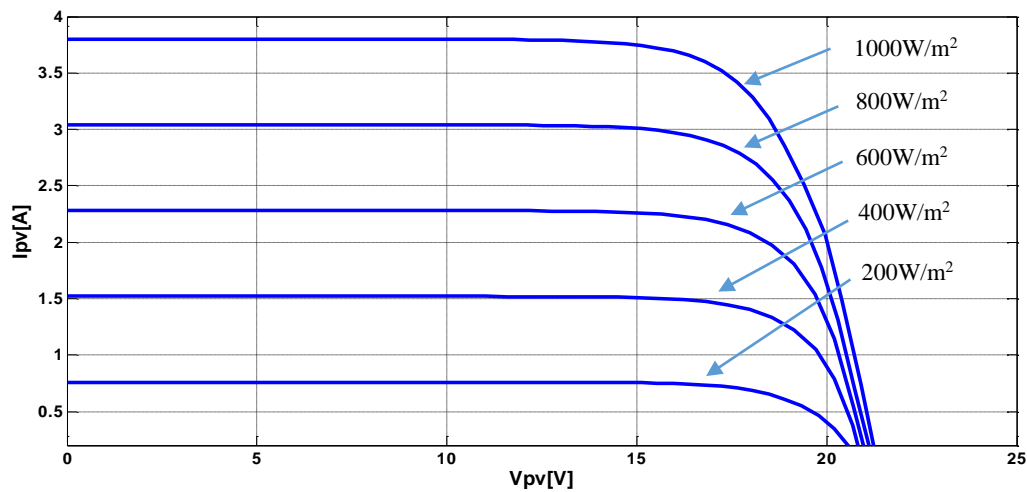


Figure.II.12 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

II.2.7.2 Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C

à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer que l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV. Les figures suivantes représentent les caractéristiques Courant -Tension et Puissance-Tension pour un rayonnement constant et différents températures.

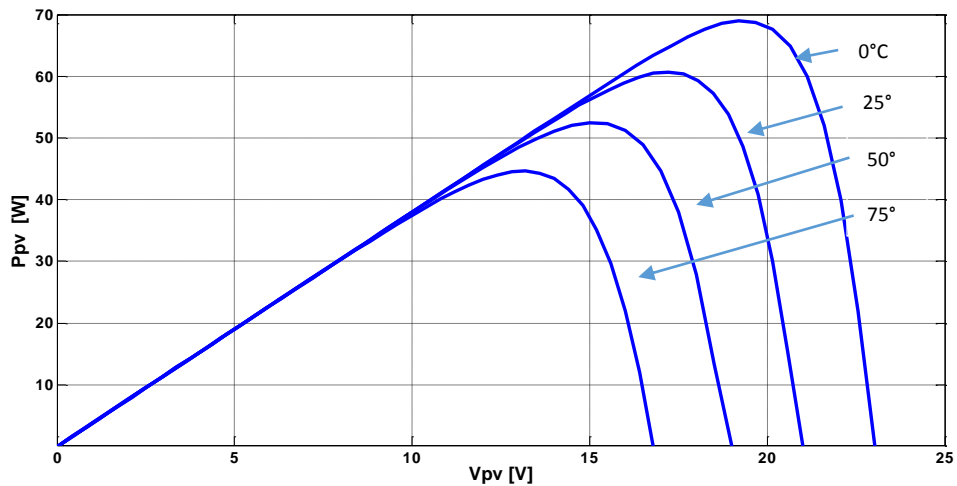


Figure.II.13 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température variable.

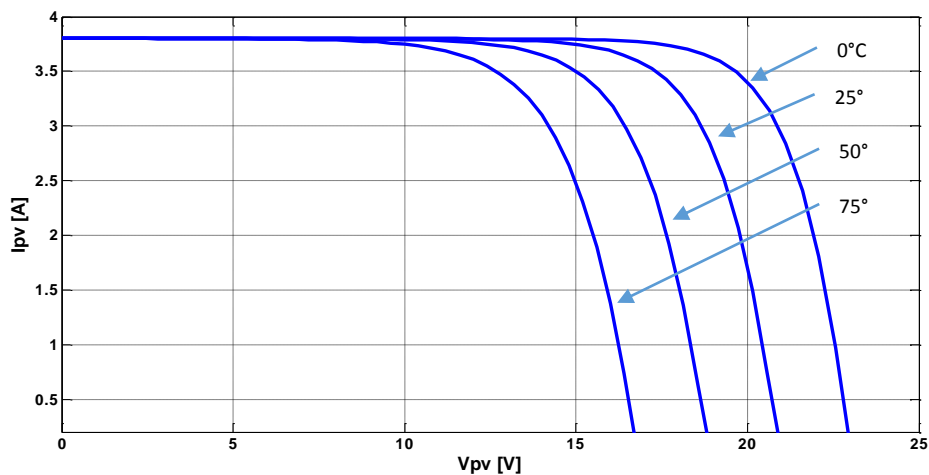


Figure.II.14 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température variable.

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

II.3 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

II.3 .1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure II.15 Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible [23].

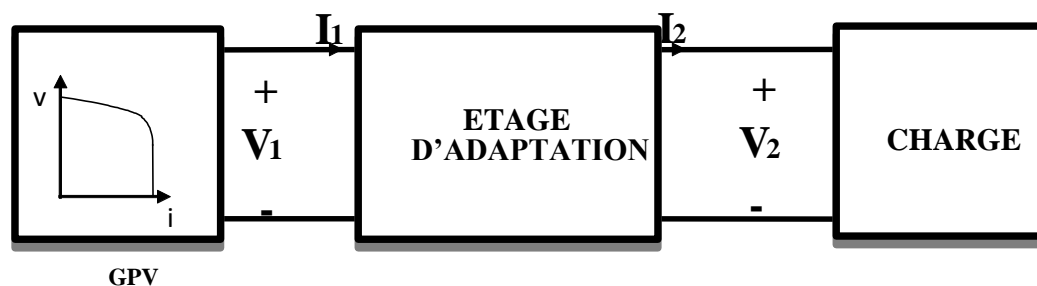


Figure.II.15 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

II.3 .2 Convertisseur DC/DC

La figure.II.16 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

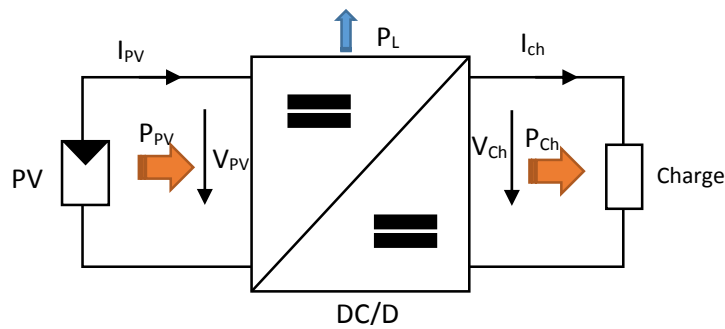


Figure.II.16 convertisseurs DC-DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [21].

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur

Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [26].

II.3.3 Étage d'Adaptation de Type BOOST

Considérons l'exemple de la figure II.7 correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [21]:

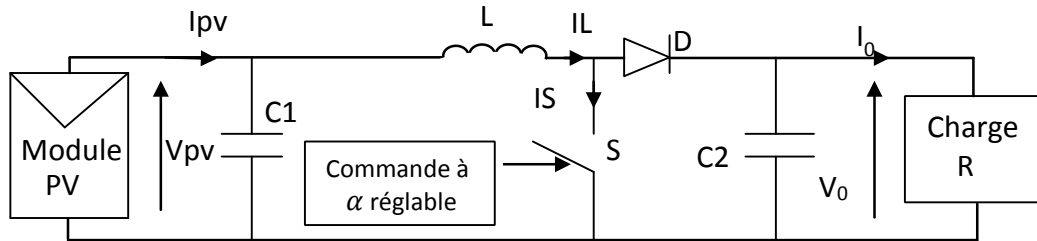


Figure.II.17 Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

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) [27].

II.3.4 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 :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \tag{II-32}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \tag{II-33}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \tag{II-34}$$

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \tag{II-35}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \tag{II-36}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_0 - R_L I_L \tag{II-37}$$

II.3.5 Modèle approximé du convertisseur Boost

Les systèmes d'équations de base (II-39 à II-41) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_1, V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($e^\xi \approx 1 + \xi$ si $\xi \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux intervalles du temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} (1-\alpha) T_s \tag{II-38}$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle T_s . Cette relation est valide si:

$\frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}}$ et $\frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}}$ sont constants sur les intervalles αT_s et $(1-\alpha) T_s$ respectivement

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.18.

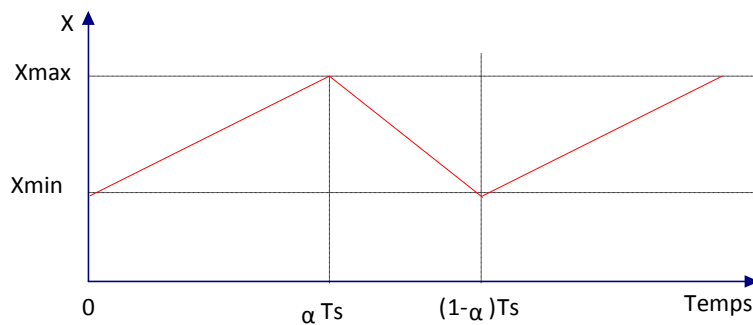


Figure II.18 Allure des variables dynamiques I_L .

En appliquant la relation (II-38) sur les systèmes d'équations (II-32 a II-37)) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \alpha T_s = (I_{PV} - I_L) \alpha T_s + (1-\alpha) T_s (I_{PV} - I_L) \tag{II-39}$$

$$I_{C_2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad (\text{II-40})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad (\text{II-41})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_L = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (\text{II-42})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II-43})$$

$$V_{PV} = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II-44})$$

II.4 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT. Cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente l'étape d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Pour la partie commande MPPT, nous présentons ce type de commande de manière beaucoup plus approfondie dans le chapitre suivant.

Chapitre III
Poursuite du point de puissance
maximale

III.1 Introduction

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

III.2 Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [28]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1

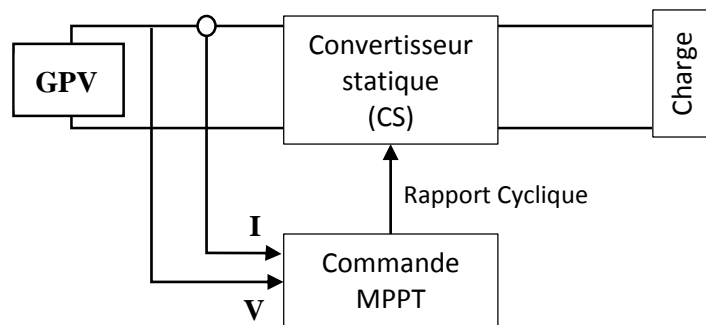


Figure III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [21].

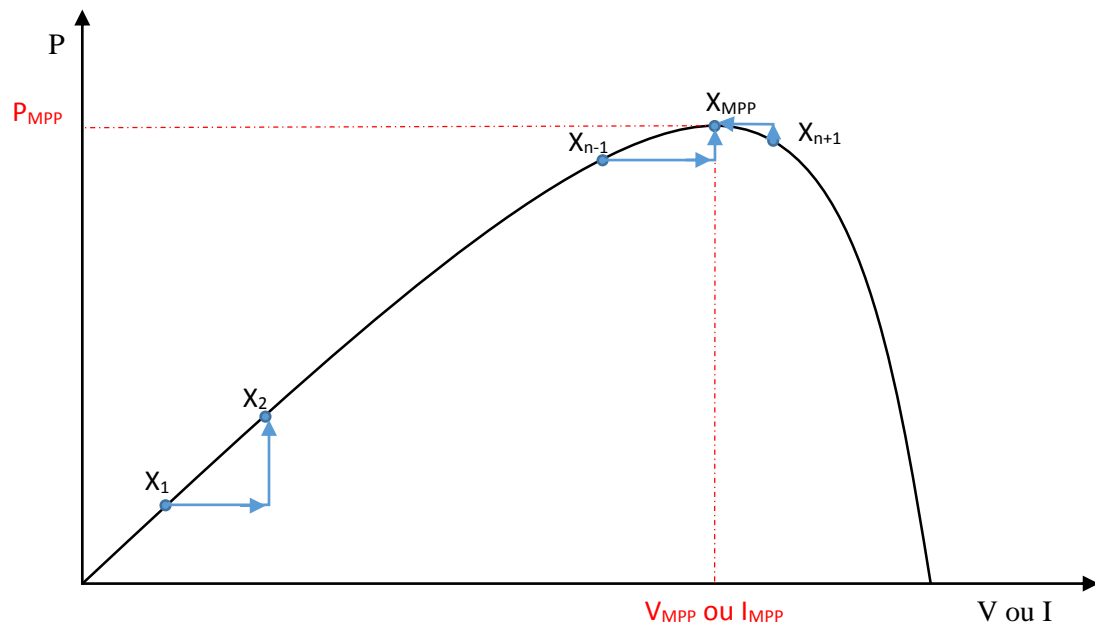


Figure III.2 Principe de la commande MPPT

III.3 Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [29].

III.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [29].

B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{\max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [29].

III.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche**a. MPPT Indirect**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [2-29].

b. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du

convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [2-29]

III.4 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

III.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert V_{OC} et la relation linéaire approximative (III-1) liant cette tension avec la tension de point maximal V_{MPP} du GPV [30-31] :

$$V_{MPP} = K_1 * V_{OC} \quad (III-1)$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k_1 est déterminé, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (III-1) avec V_{OC} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension V_{MPP} est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle V_{PV} et la tension de référence V_{ref} (V_{MPP}). Le signal d'erreur est traité pour rendre $V = V_{ref}$. (Figure III.3)

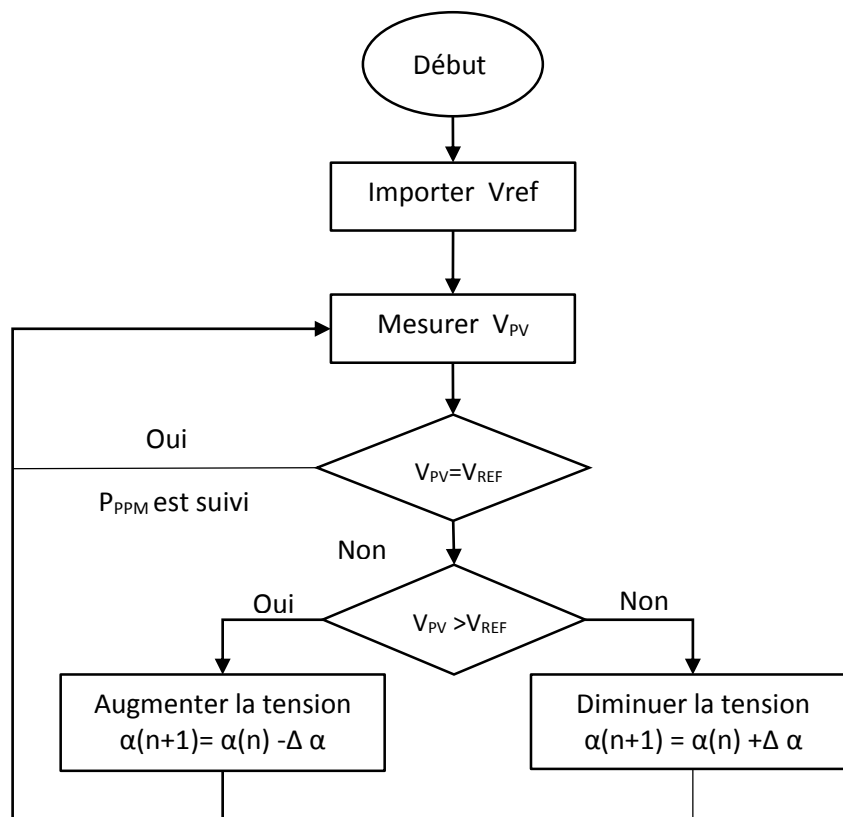


Figure III.3 Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [30]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc. et ne oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV [32].

III.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current) :

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (III-2) liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV [31] :

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc} \quad (III-2)$$

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [33].

La mesure du courant I_{SC} durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant I_{SC} à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrémenté en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (I_{MPP}) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [30]. Figure III.4

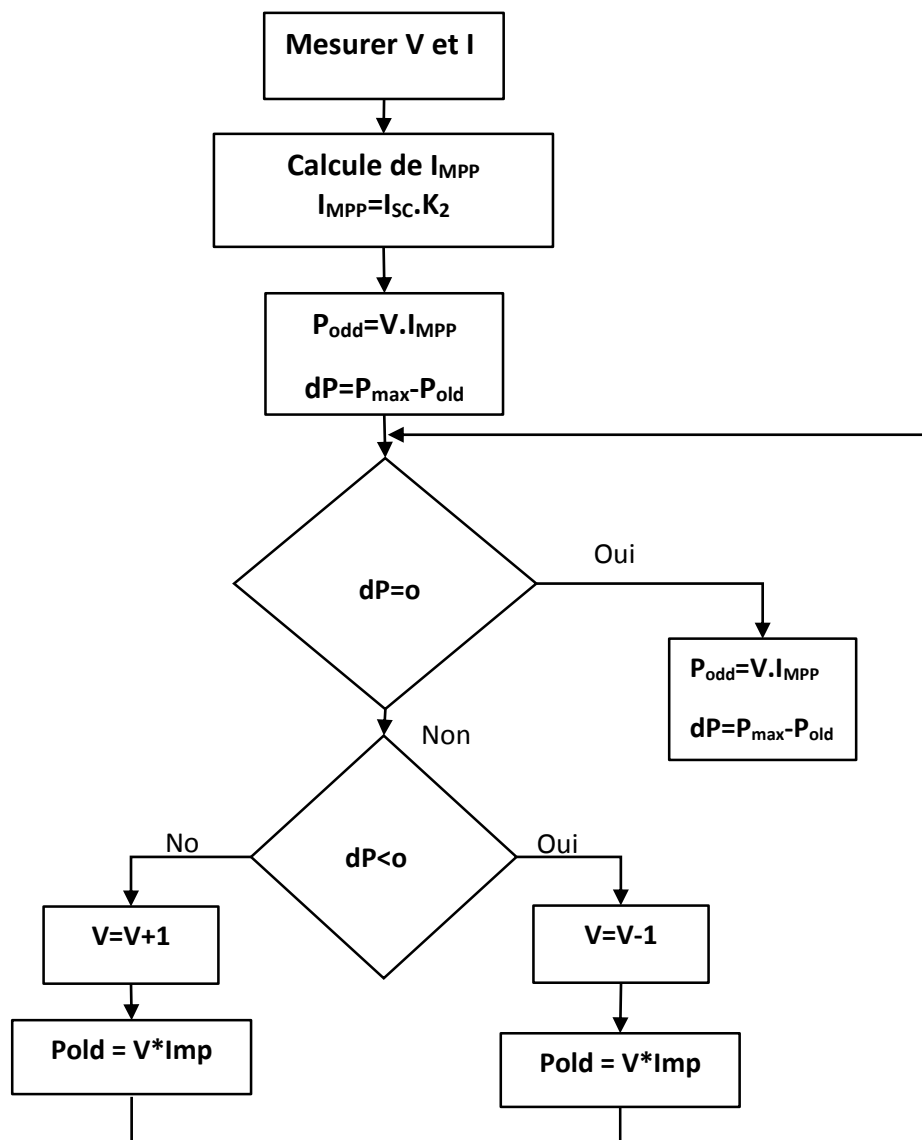


Figure III.4 Algorithme du constant courant

III.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [34]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [35].

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 [36]. Figure III.5 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

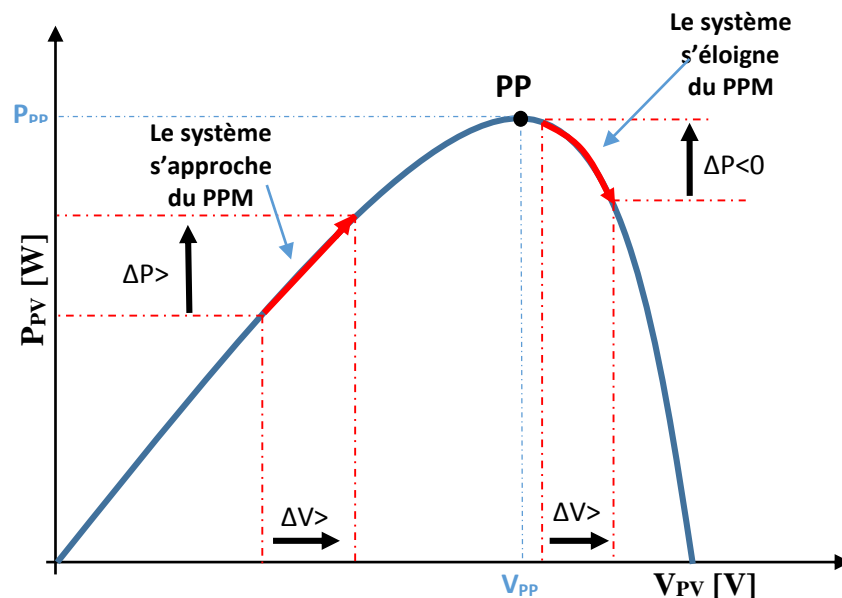


Figure III.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

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 [33].

La Figure III.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

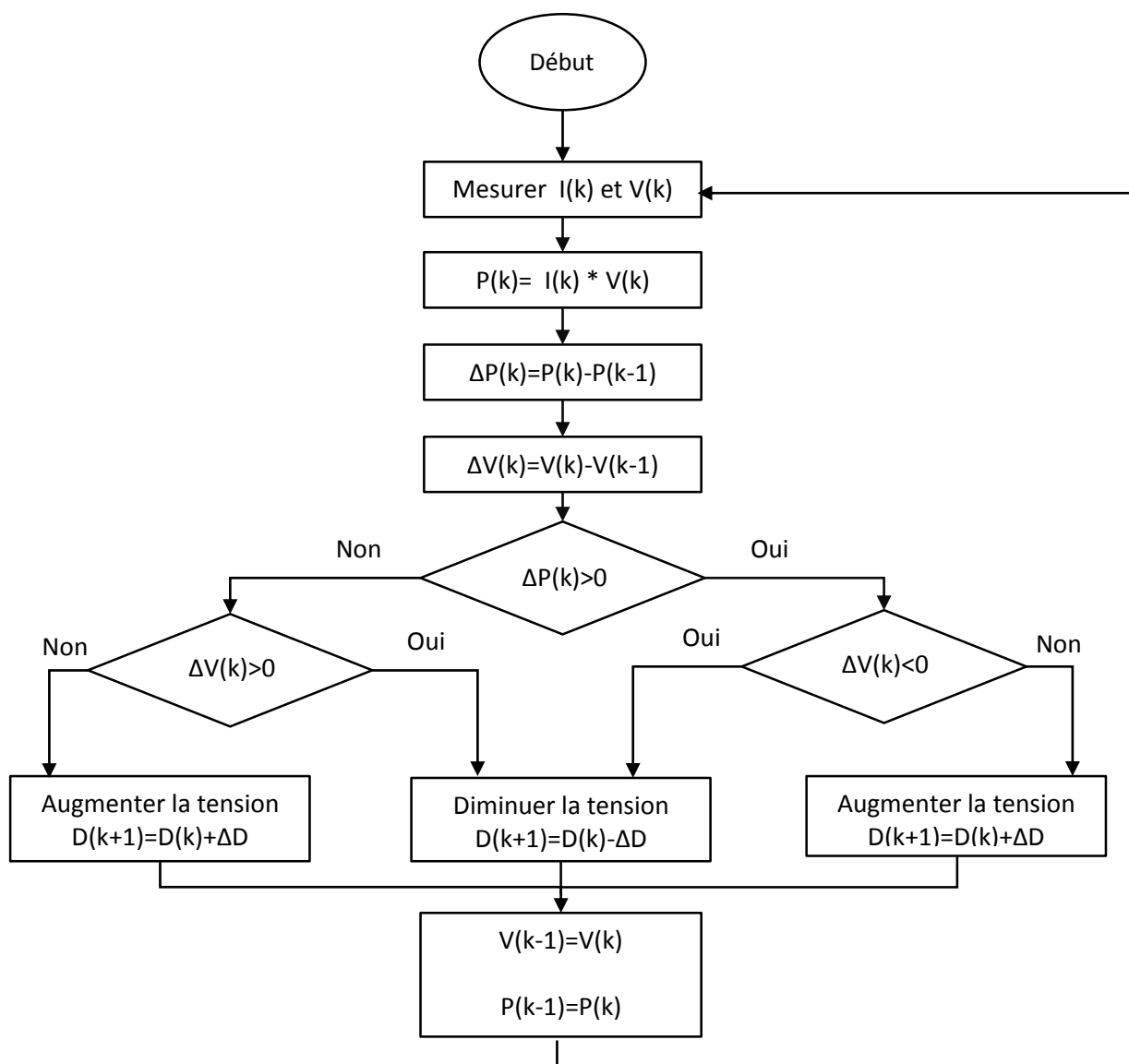


Figure III.6 l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint[28]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [37] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure III.7 Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P_1 à P_2 , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [33] .

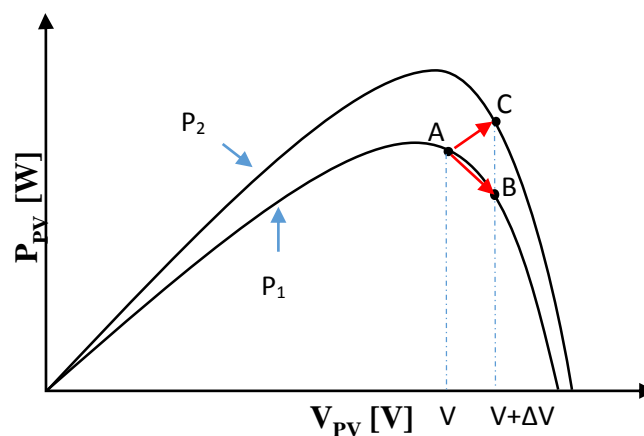


Figure III.7 Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la Figure III.8 avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [29].

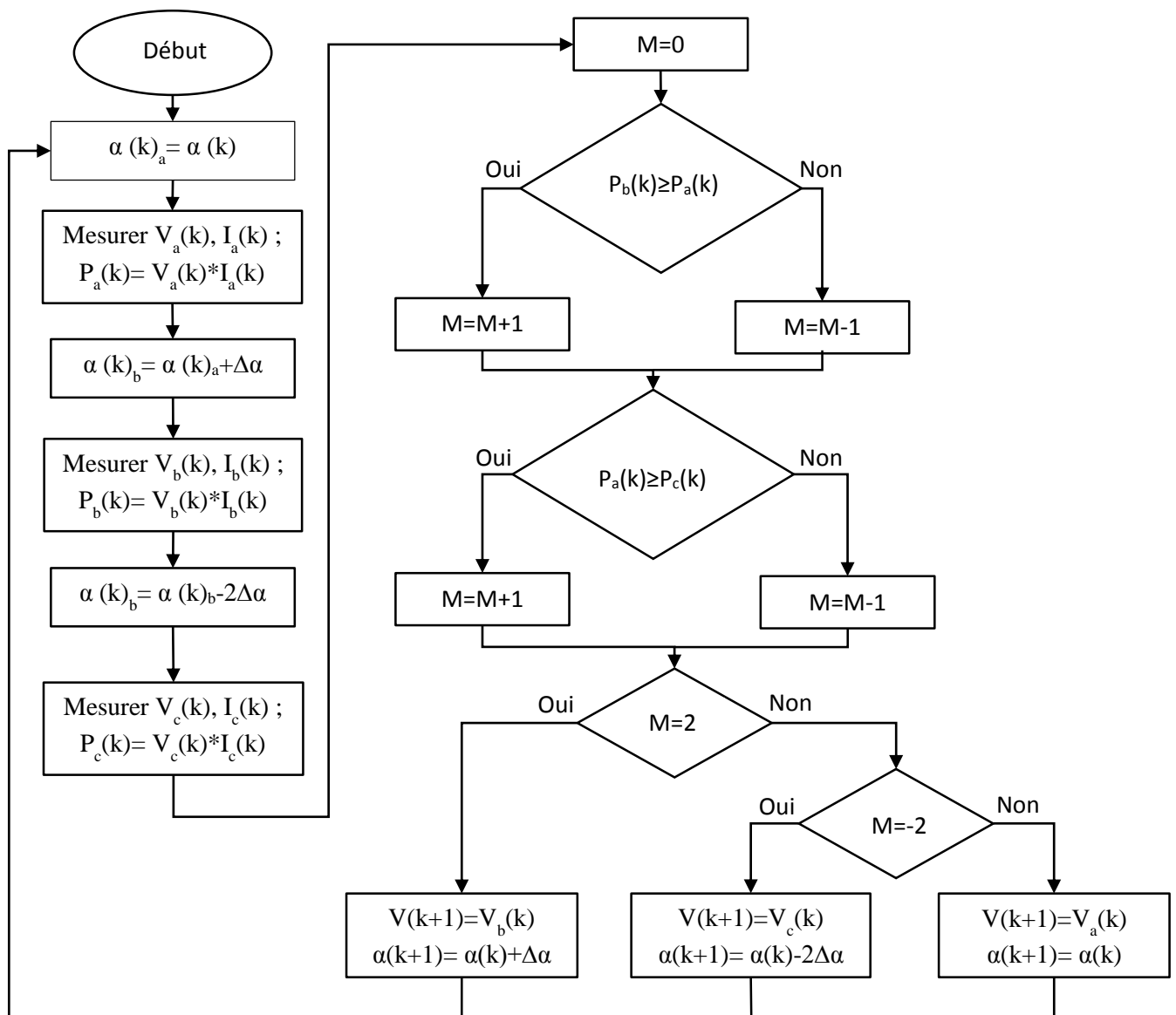


Figure III.8 algorithme du poids d'un troisième point

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode p&o classique sauf que le pas de perturbation est variable .où plusieurs échantillons de puissance P_{pv} est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certain études [29] propose que le pas soit:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(K-1)}{V(k) - V(K-1)} \right| \quad (\text{III-3})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

III.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. Figure III.9

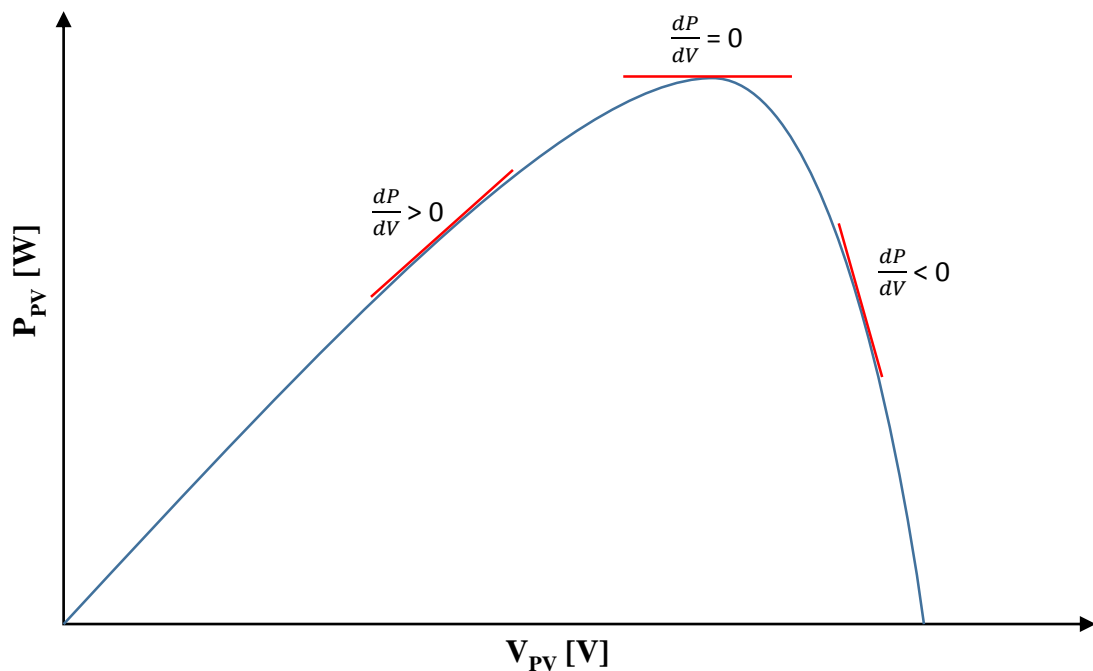


Figure III.9 caractéristique de tension-puissance du panneau

On observe que :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 & \text{au PMM} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{à gauche du PMM} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{à droite du PMM} \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (\text{III-5})$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III-6})$$

Donc, l'équation (III-4) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur le } PMM \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à gauche du PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur la droite du PPM} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance ($dIPV/dVPV$). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM. La Figure III.10 montre l'algorithme de cette méthode.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition $dP/dv = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert V_{oc} sur le courant de court-circuit I_{sc} . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur [33]

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{III-8})$$

Une autre solution est possible encore comme la méthode de p&o .c'est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est [38] :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(K-1)}{V(k) - V(K-1)} \right| \quad (\text{III-9})$$

III.4.5 La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [39-40]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- *la fuzzification,*
- *la lecture de la table de vérité,*
- *la defuzzification.*

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB : Negative Big,
- NS : Negative Small,
- ZE : Zero,
- PS : Positive Small,
- PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure III.11

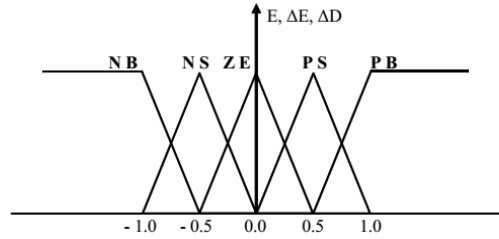


Figure III.11 structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liés aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \tag{III-10}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \tag{III-11}$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta \alpha$.

Tableau III.1 Exemple d' une table de vérité pour une commande logique floue.

E \ ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

La variable linguistique assignée à $\Delta \alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta \alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta \alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta \alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [41-42].

III.4.6 Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [43-44]:

- les algorithmes à base de réseau de neurones
- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuelle évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. Ce chapitre nous servira de support de comparaison avec l'approche de MPPT qu'on va développer dans ce qui suit.

Chapitre IV
Simulation, résultat
et discussion

IV.1 Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale.

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

IV.2 Simulation du système photovoltaïque

La Figure IV.4 donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés: GPV, DC-DC et MPPT.

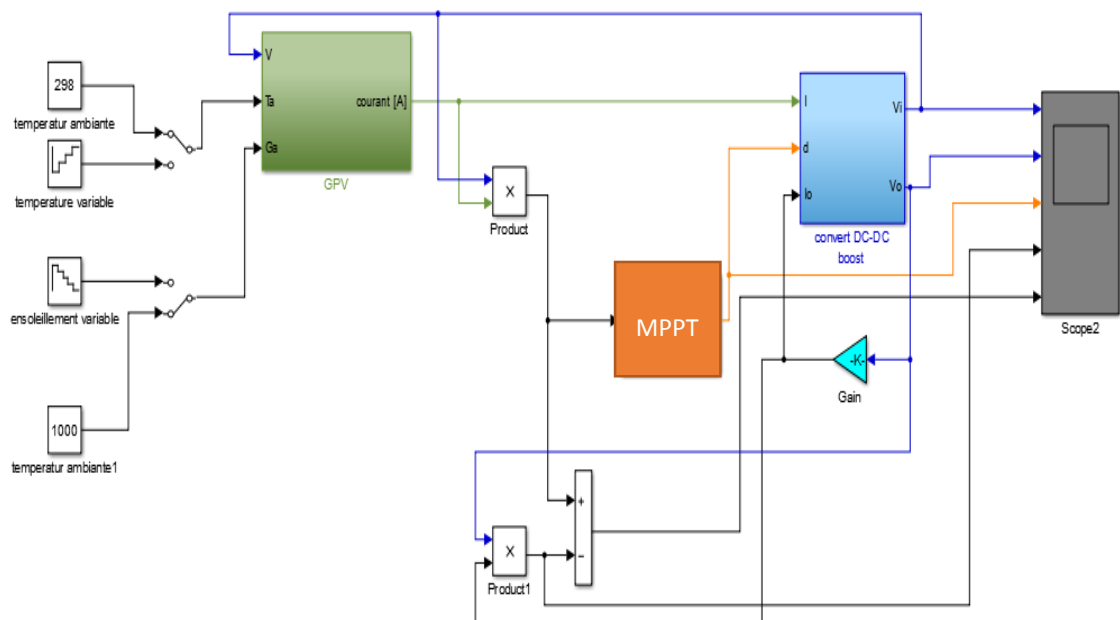


Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du système global

IV.2.1 Simulation d'un GPV

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre II. L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la Figure IV.1.

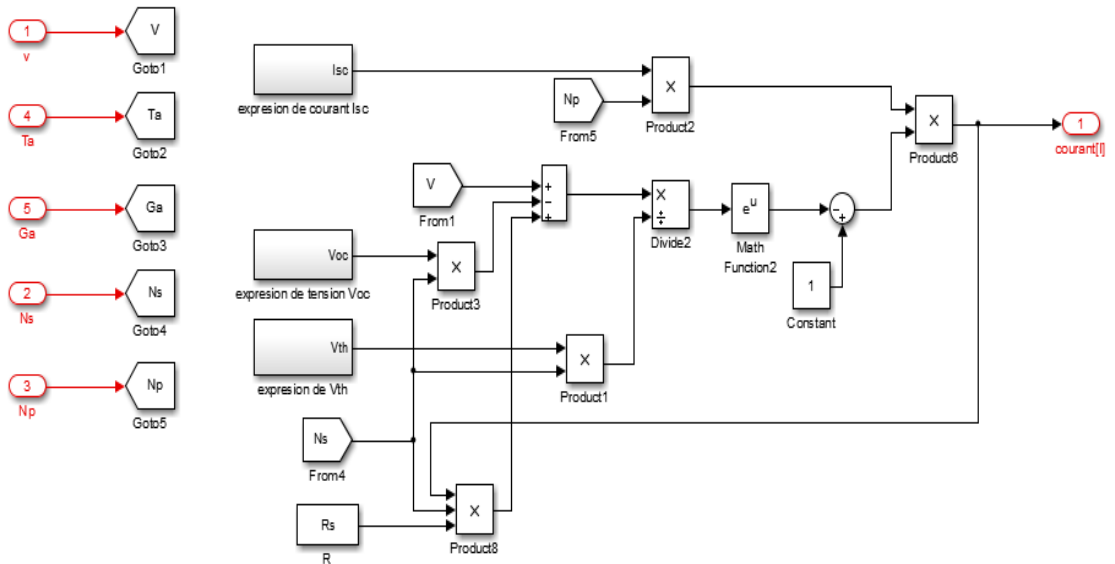


Figure.IV.2 Modèle de simulation du GPV

IV.2.2 Simulation du convertisseur Boost

De la même manière et utilisant le modèle mathématique décrit dans le chapitre II, nous avons modélisé le convertisseur DC-DC boost sous l'environnement Matlab/Simulink.

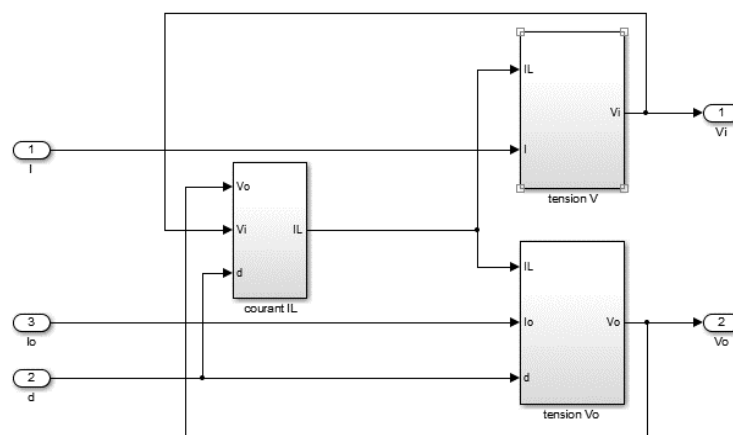


Figure.IV.3 Modèle de simulation du CS BOOST

Tableau IV.1 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.

C1	C2	L
560e-6 F	560e-6 F	350e-6 H

IV.2.3 Simulation des algorithmes MPPT connues

Nous avons réalisé les modèles de simulation des algorithmes P&O, InCond et MPPT flou, en nous basant sur les études illustrées dans le chapitre III. La Figure IV.3 donne le bloc Simulink.

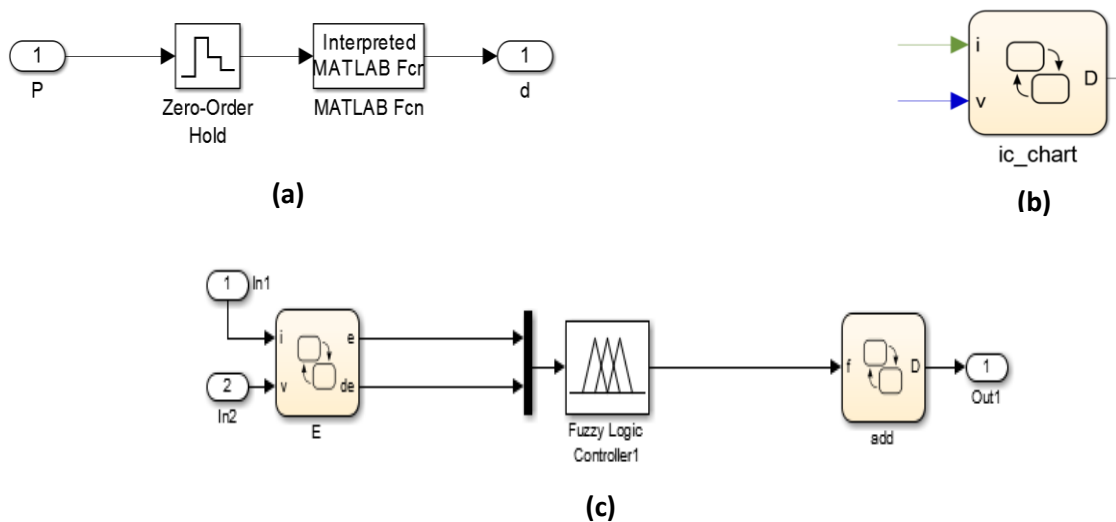


Figure IV.4 Schéma de block de la commande MPPT: a) P&O, b) InCond.

c) flou

IV.2.4 Résultats et discussions

IV.2.4.1 Algorithme P&O

Pour valider l’algorithme P&O, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l’irradiation et de la température en fonction du pas de perturbation. La Figure IV.7 donne une comparaison des courbes de la puissance de sortie en fonction du pas de perturbation pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 800 600 400 200]W/m².

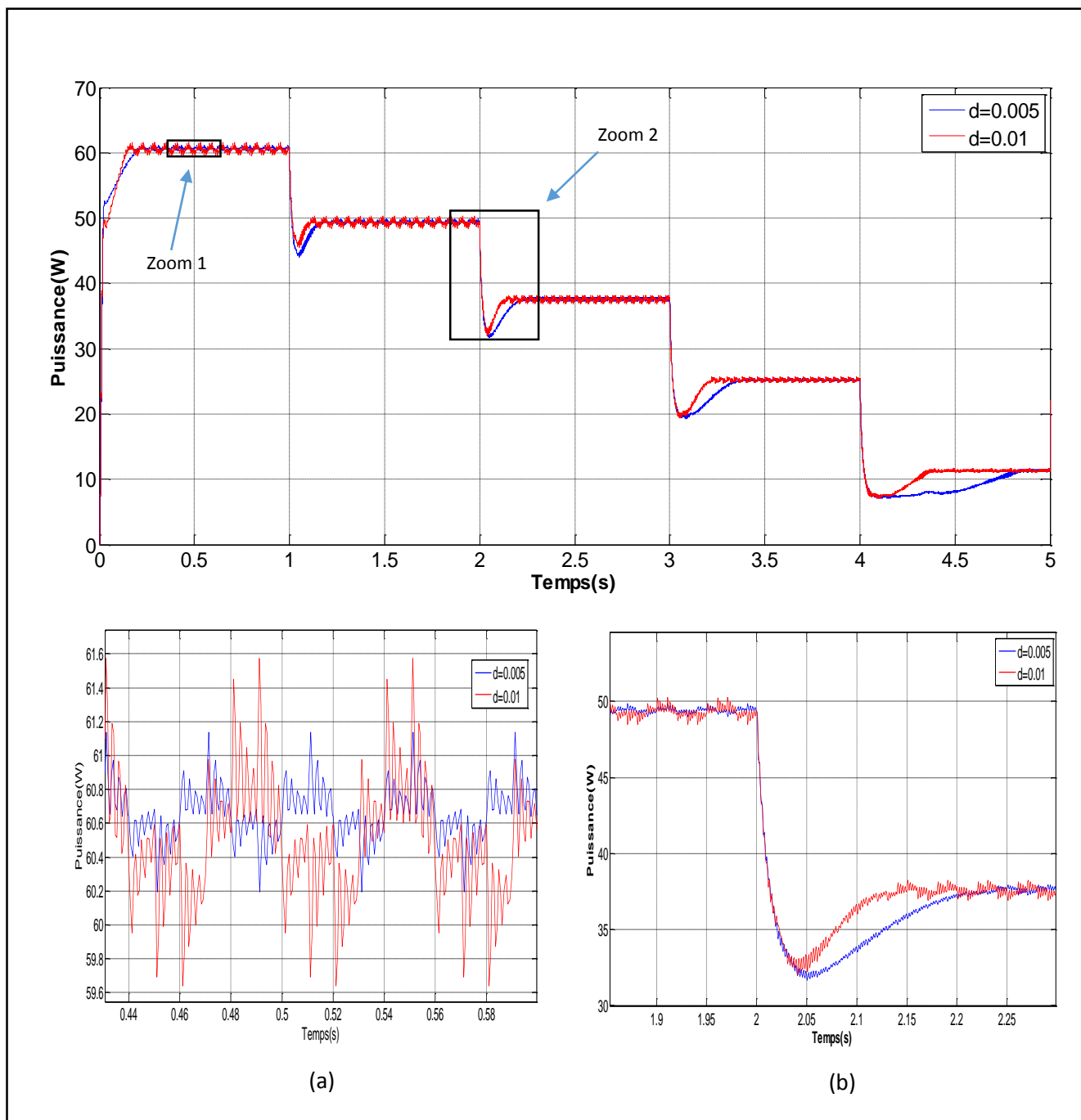


Figure IV.5 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

La Figure IV.8 donne une comparaison des courbes de la puissance de sortie en fonction du pas de perturbation pour une irradiation constante égale à 1000W/m^2 et une température variable $[0\ 25\ 50\ 75]^\circ\text{C}$.

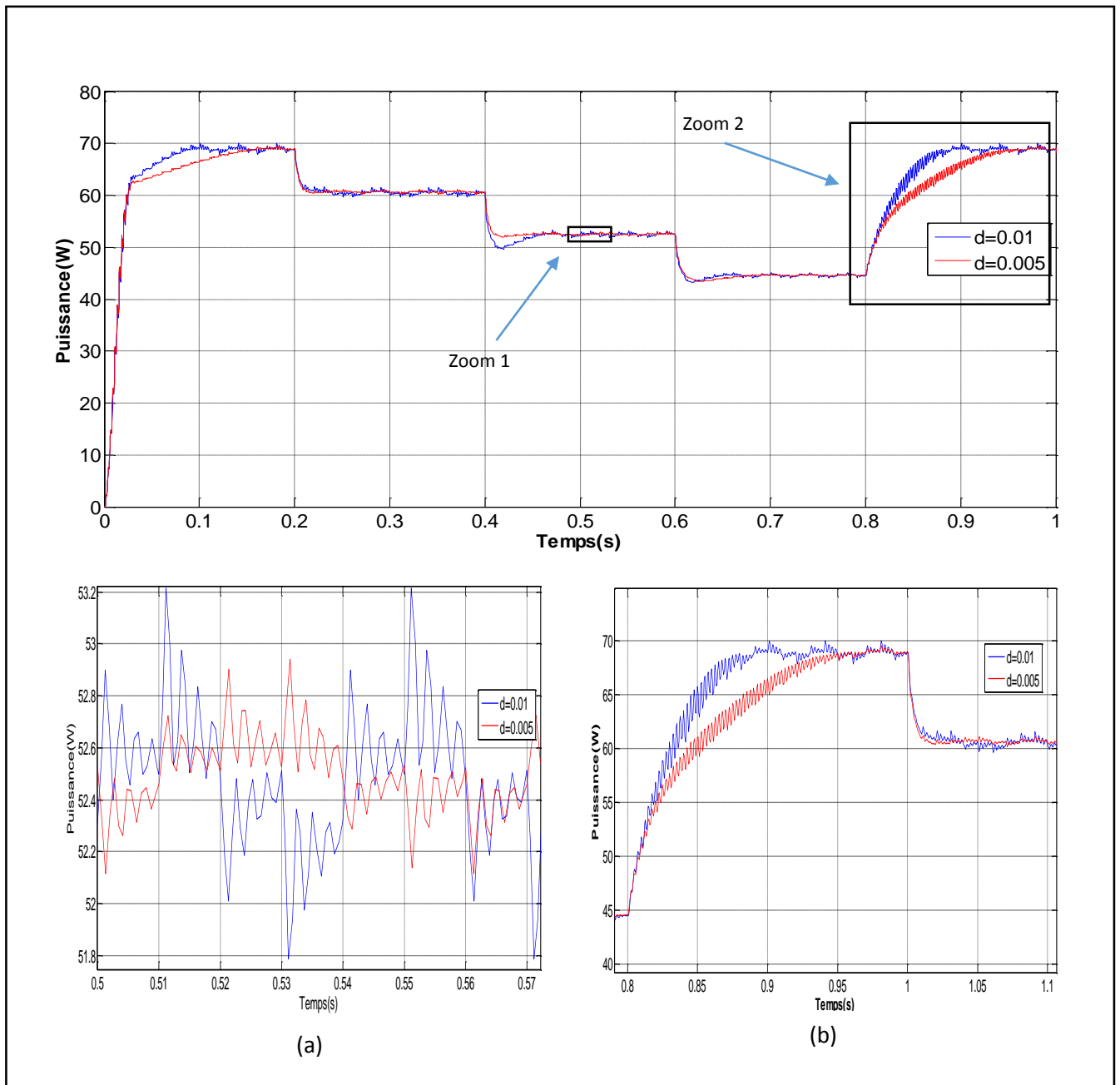


Figure IV.6 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

Les résultats des Figures IV.5 et IV.6 montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale, nous remarquons que si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Par contre, si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

IV.2.4.2 Algorithme IncCond

Pour valider l'algorithme IncCond, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l'irradiation et de la température en fonction du pas de perturbation. La Figure IV.12 donne une comparaison des courbes de la puissance de sortie en fonction du pas de perturbation pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 800 600 400 200]W/m².

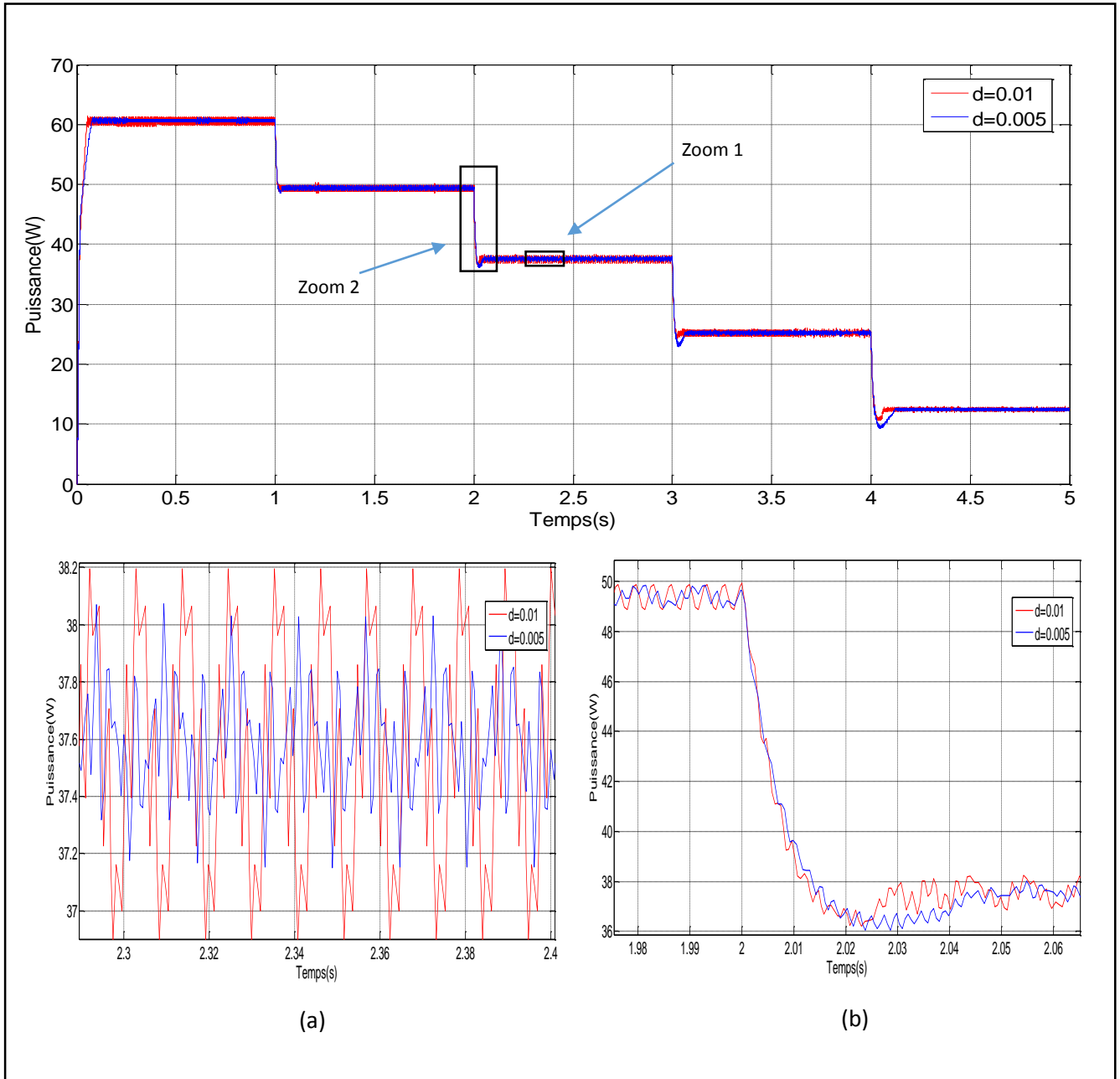


Figure IV.7 Variation de la puissance de sortie pour d=0.005 et d=0.01 dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

La Figure IV.13 donne une comparaison des courbes de la puissance de sortie en fonction du pas de perturbation pour une irradiation constante égale à 1000W/m^2 et une température variable $[0\ 25\ 50\ 75]^\circ\text{C}$.

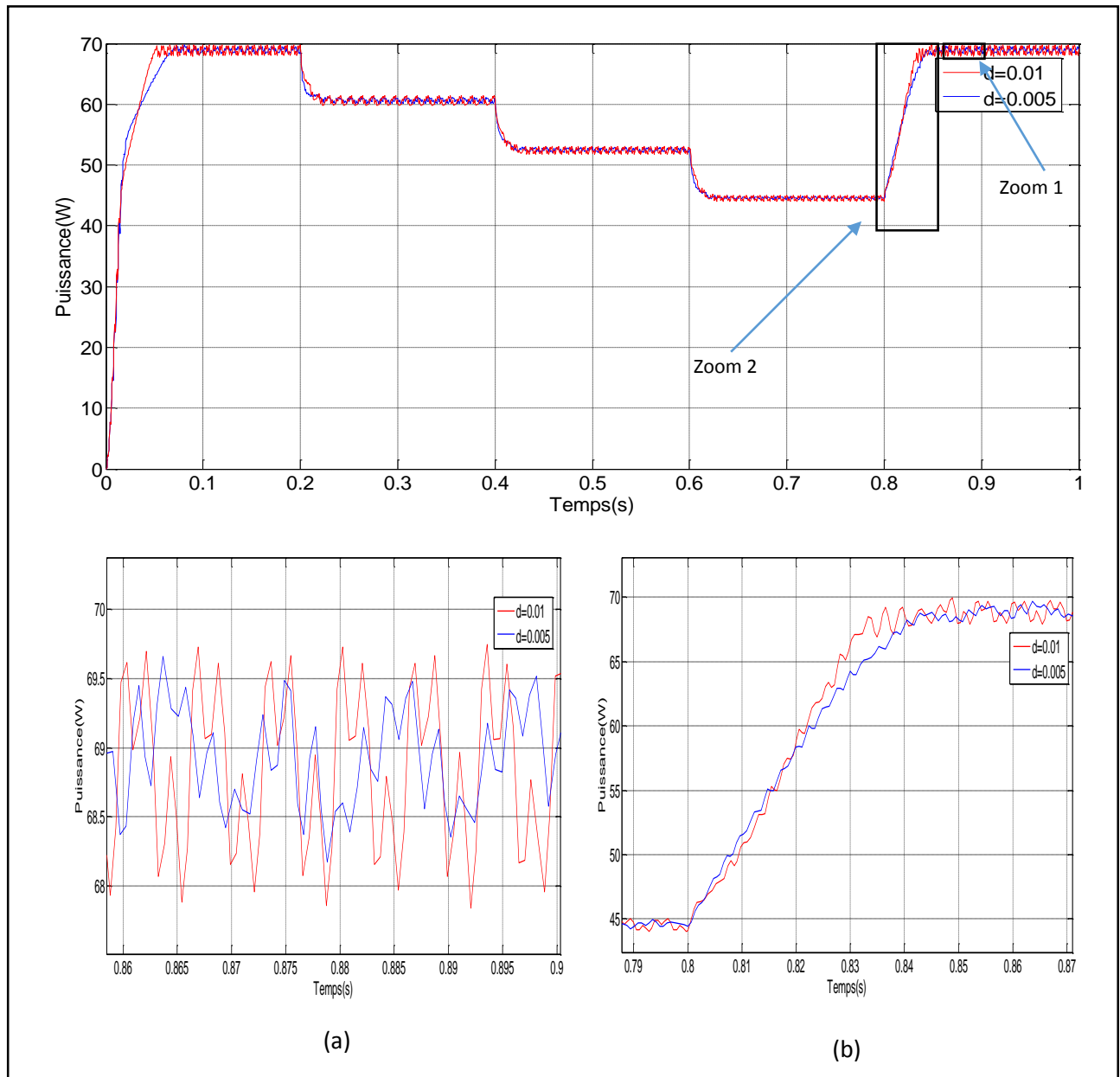


Figure IV.8 Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

D'après les résultats obtenus, on remarque bien que l'algorithme InCond est plus complexe que celui du P&O. Cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition $dP/dv=0$.

IV.2.4.3 la commande mppt flou

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande est relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification comme nous avons mentionné dans le chapitre III. La Figure IV.9 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une irradiation constante égale à 1000W/m^2 et une température variable $[0\ 25\ 50\ 75]^\circ\text{C}$.

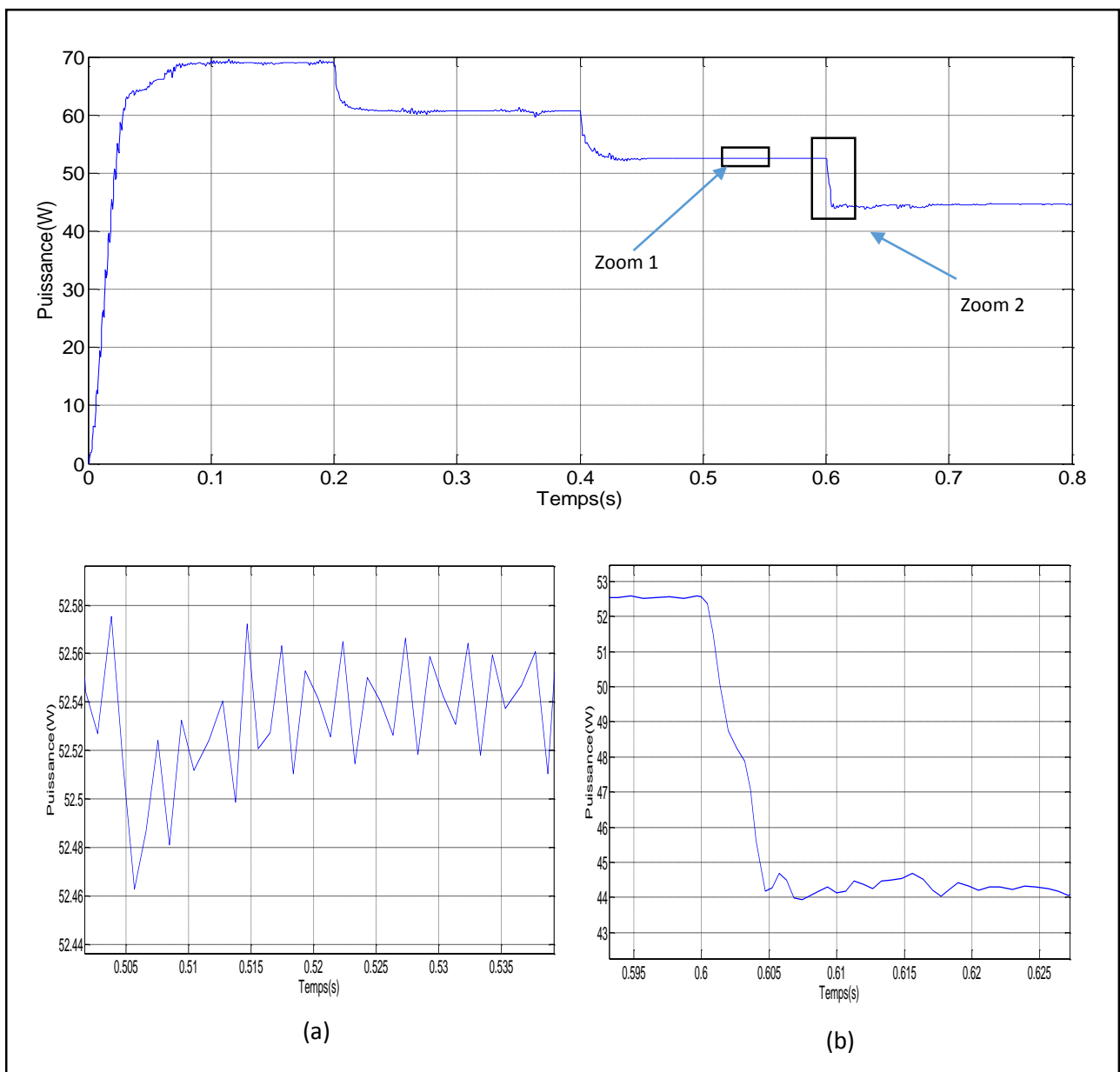


Figure IV.9 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

La Figure IV.10 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 800 600 400 200]W/m².

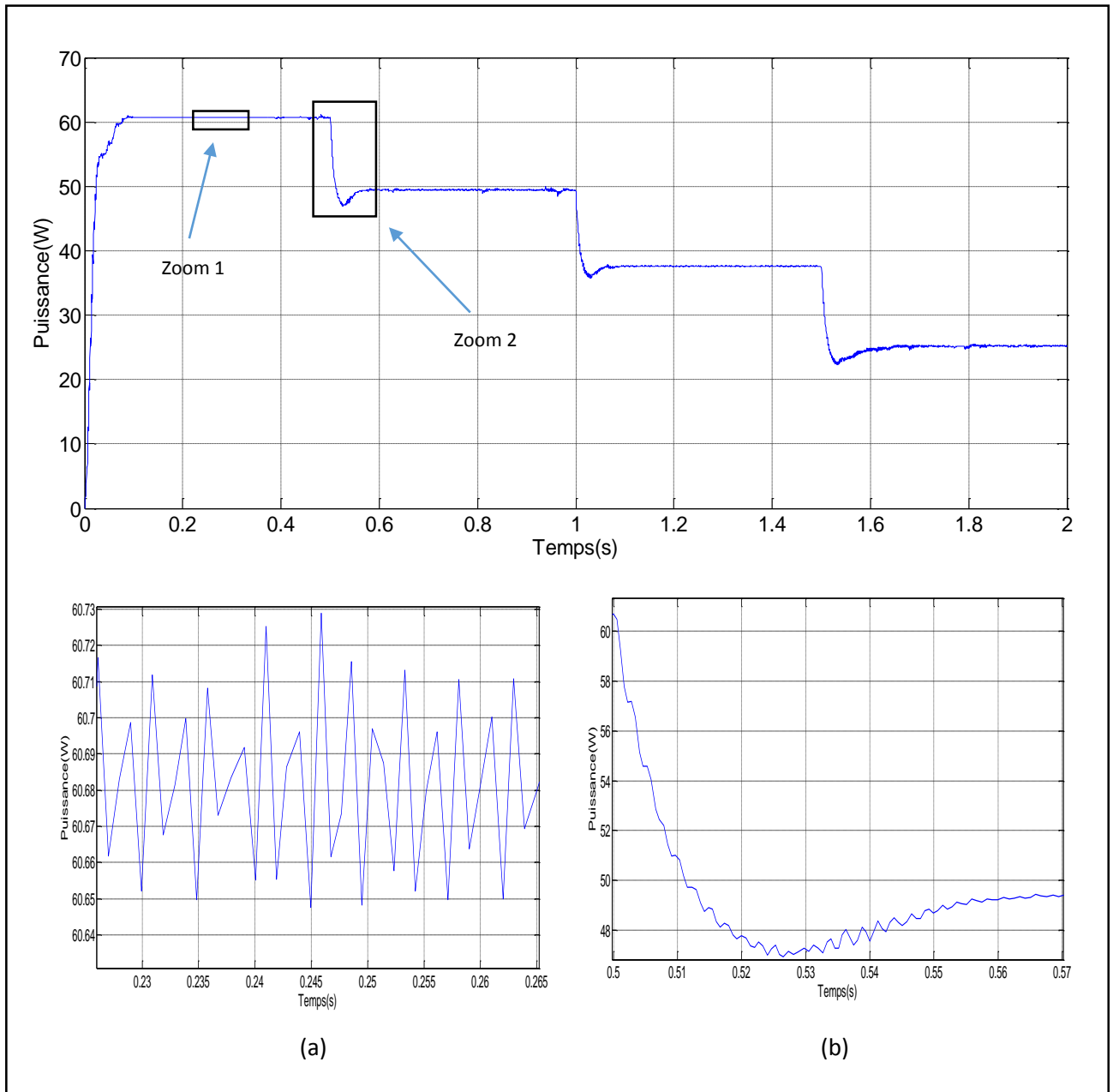


Figure IV.10 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

IV.2.5 Simulation des algorithmes MPPT proposés

La commande MPPT flou, nous permet a varié le pas du rapport cyclique qui a résolu l’inconvenant majeure des autres méthodes MPPT. Donc pourquoi non, utilisé cet avantage pour améliorer ces derniers. La Figure IV.11 donne le bloc Simulink.

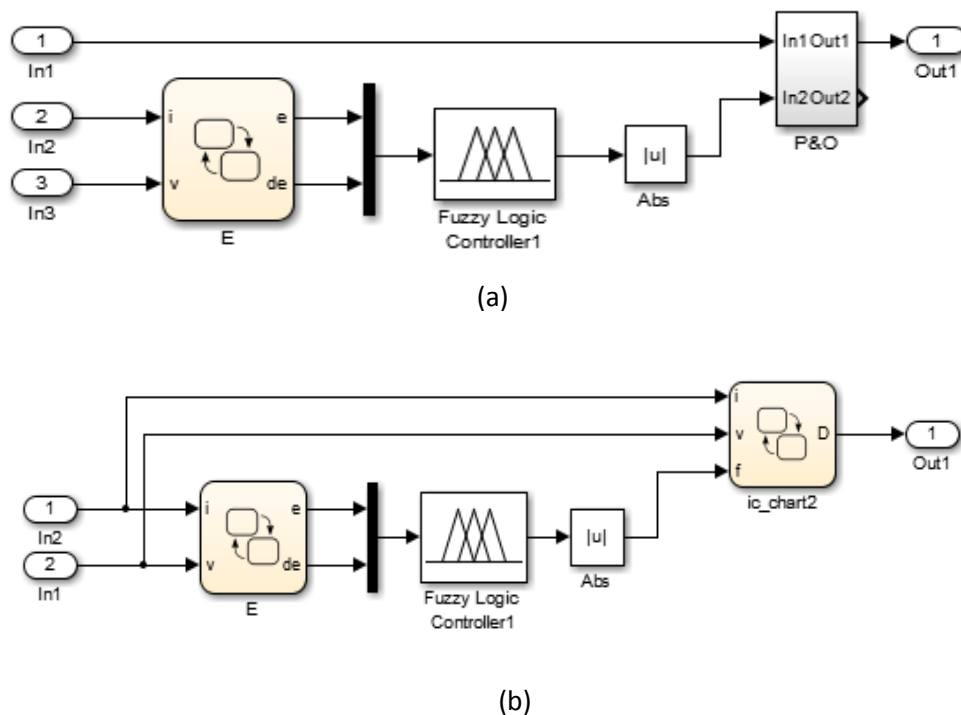


Figure IV.11 Schéma de block de la commande MPPT proposée : a) P&O Flou,
b) IncCond Flou

IV.2.6 Résultats et discussions

IV.2.6.1 La commande P&O flou

La Figure IV.12 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une irradiation constante égale à 1000W/m² et une température variable [0 25 50 75]°C.

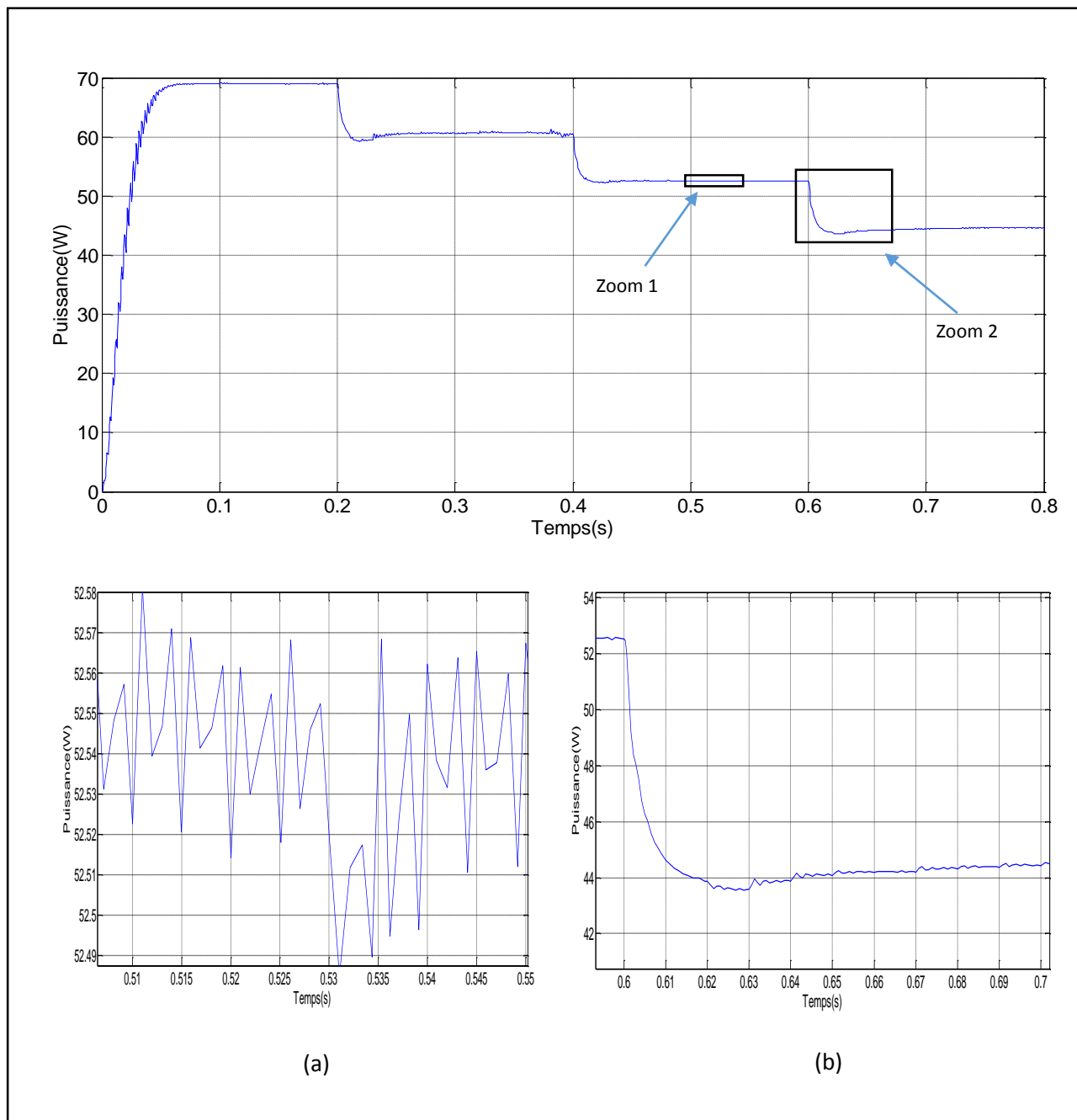


Figure IV.12 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

La Figure IV.13 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 800 600 400 200]W/m².

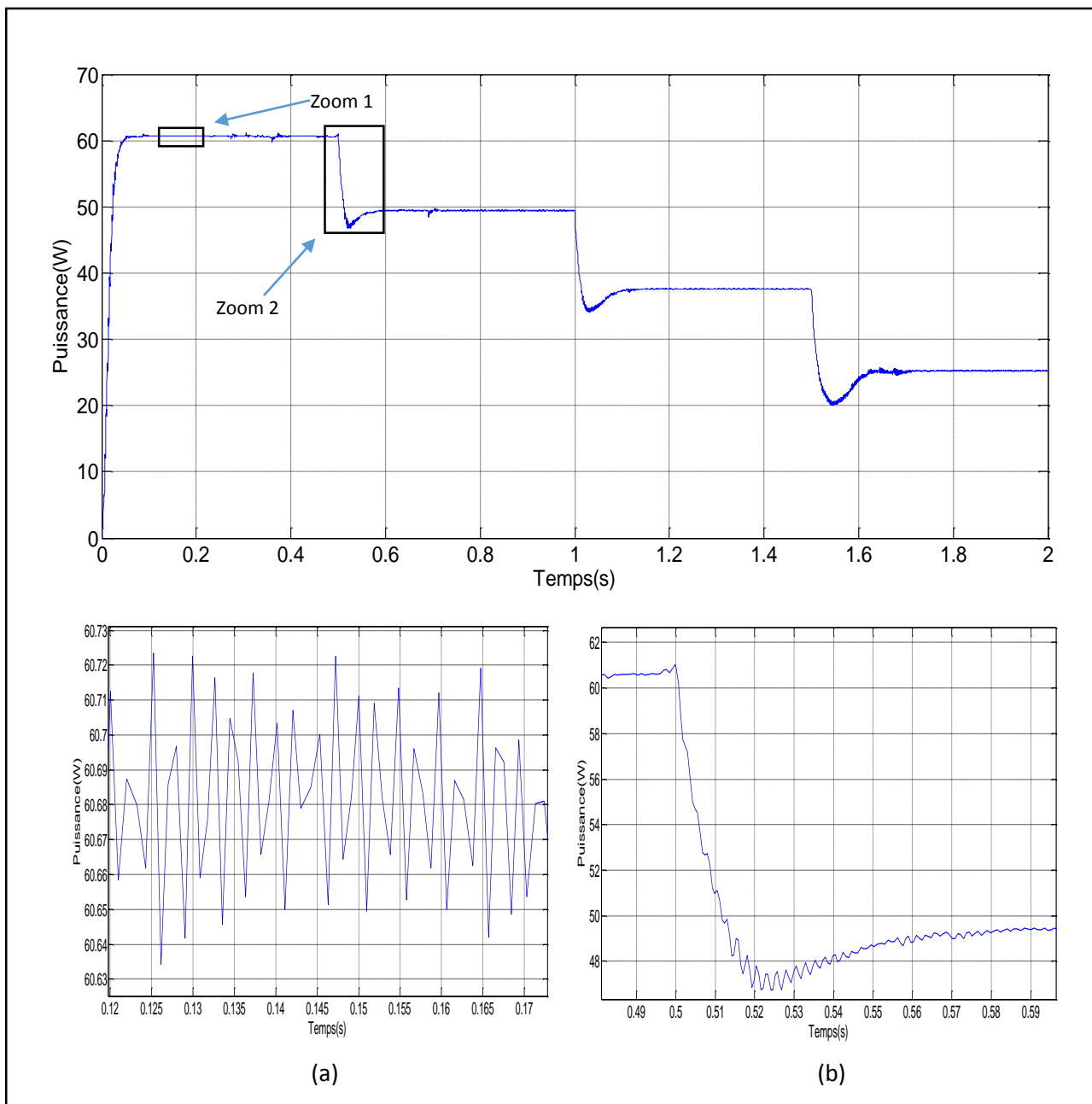


Figure IV.13 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

Nous remarquons que les résultats obtenu sont quasi similaire à celle du la commande MPPT flou classique, qui est pas bizarre sachant que les mêmes paramètres décident si le système s'approche ou bien s'éloigne de PPM, la puissance et la tension.

IV.2.6.2 La commande IncCond flou

La Figure IV.14 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une irradiation constante égale à $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température variable $[0\ 25\ 50\ 75]^\circ\text{C}$.

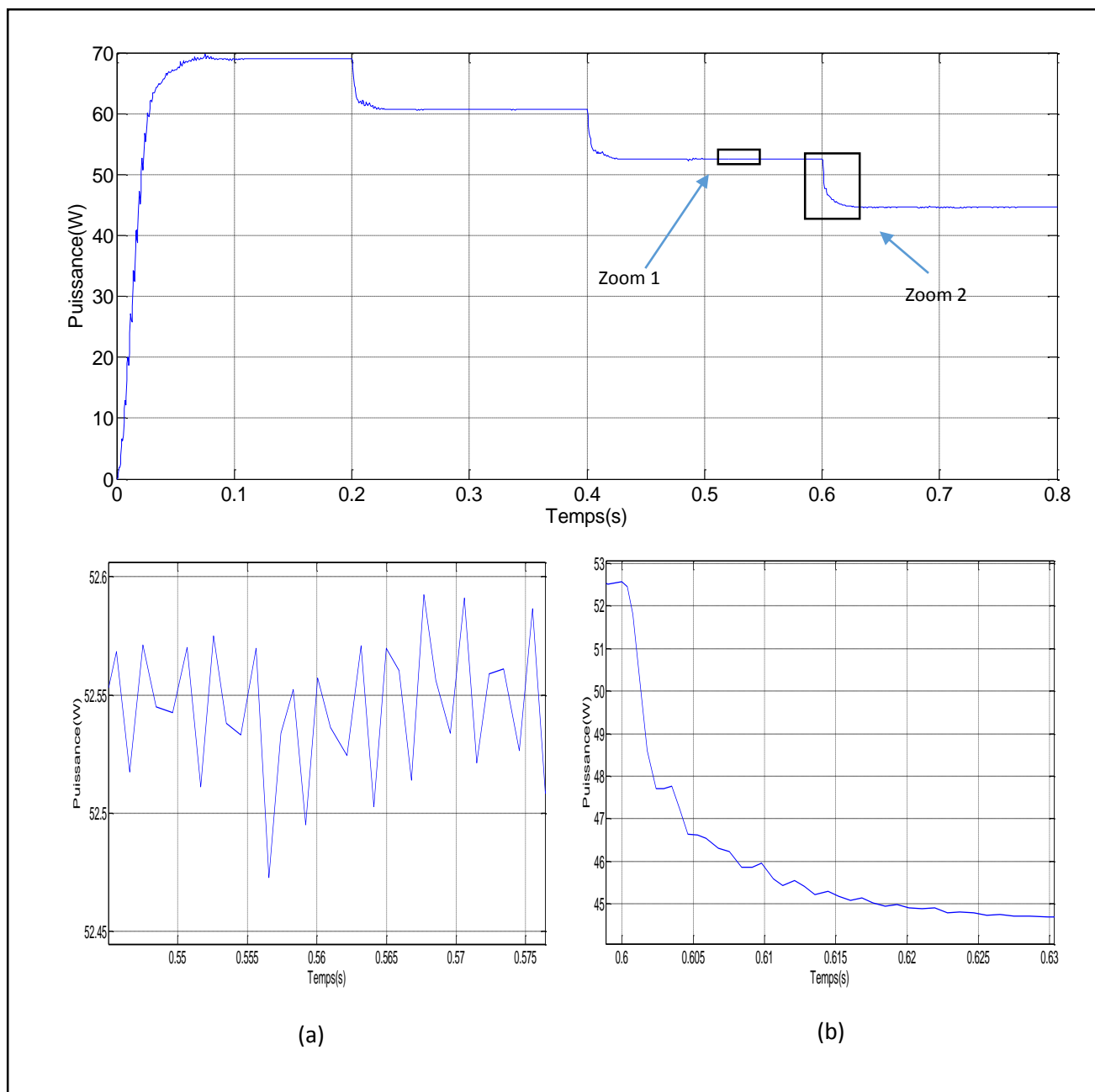


Figure IV.14 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

La Figure IV.15 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 800 600 400 200]W/m².

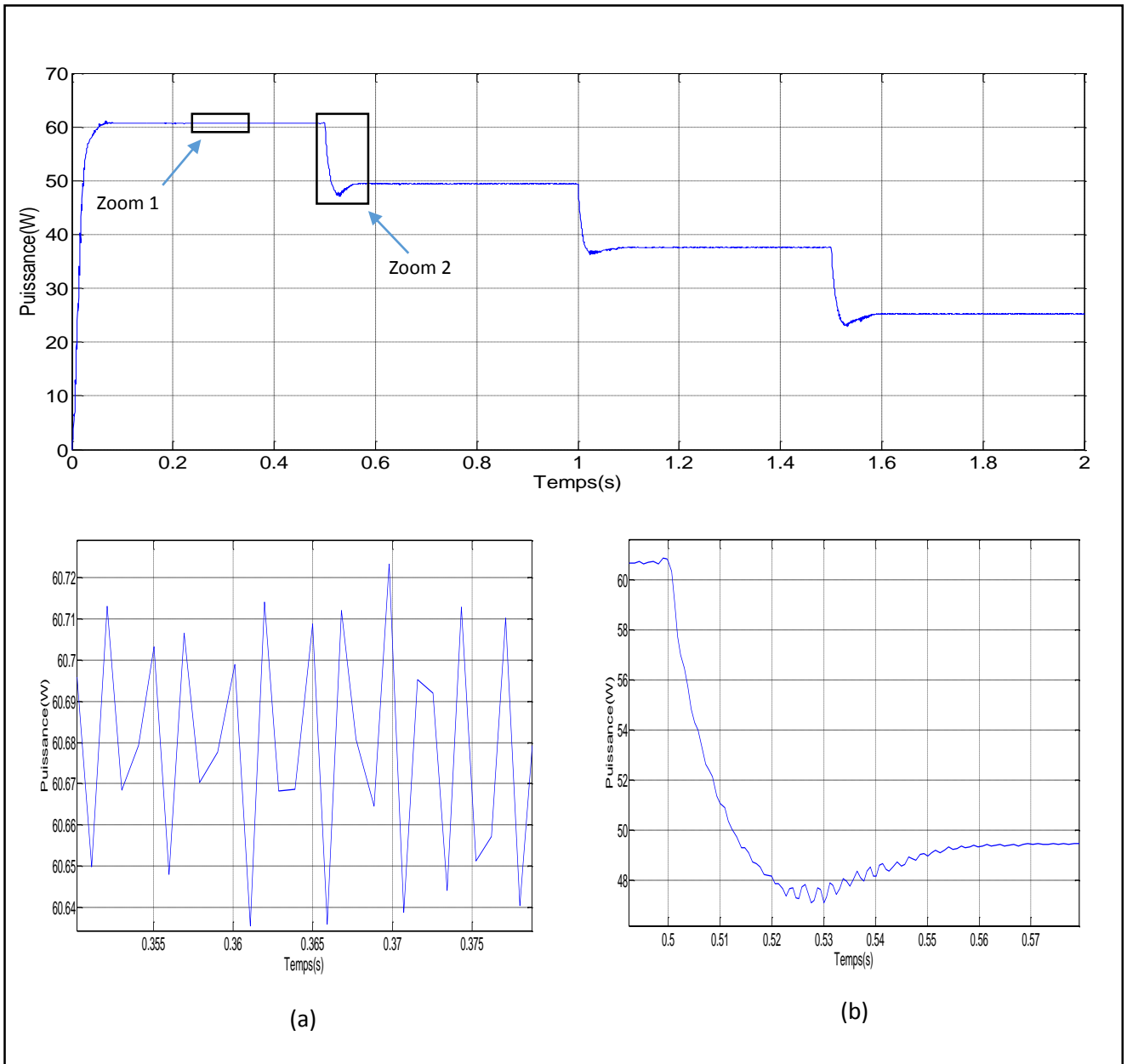


Figure IV.15 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation : a) Zoom 1, b) Zoom 2

Les résultats obtenus par cette commande sont mieux que toutes les autres commandes concernant le temps de rependre, l'oscillation et le dépassement qui est zéro dans le cas de changement de température.

IV.3 Etude comparative entre les commande étudiées

Pour un meilleur jugement de ce qui est la meilleure commande entre la commande étudiée nous avons fait une étude comparative et nous avons obtenu les résultats de simulation suivants. La Figure IV.16 représente les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction de la tension pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 80] W/m².

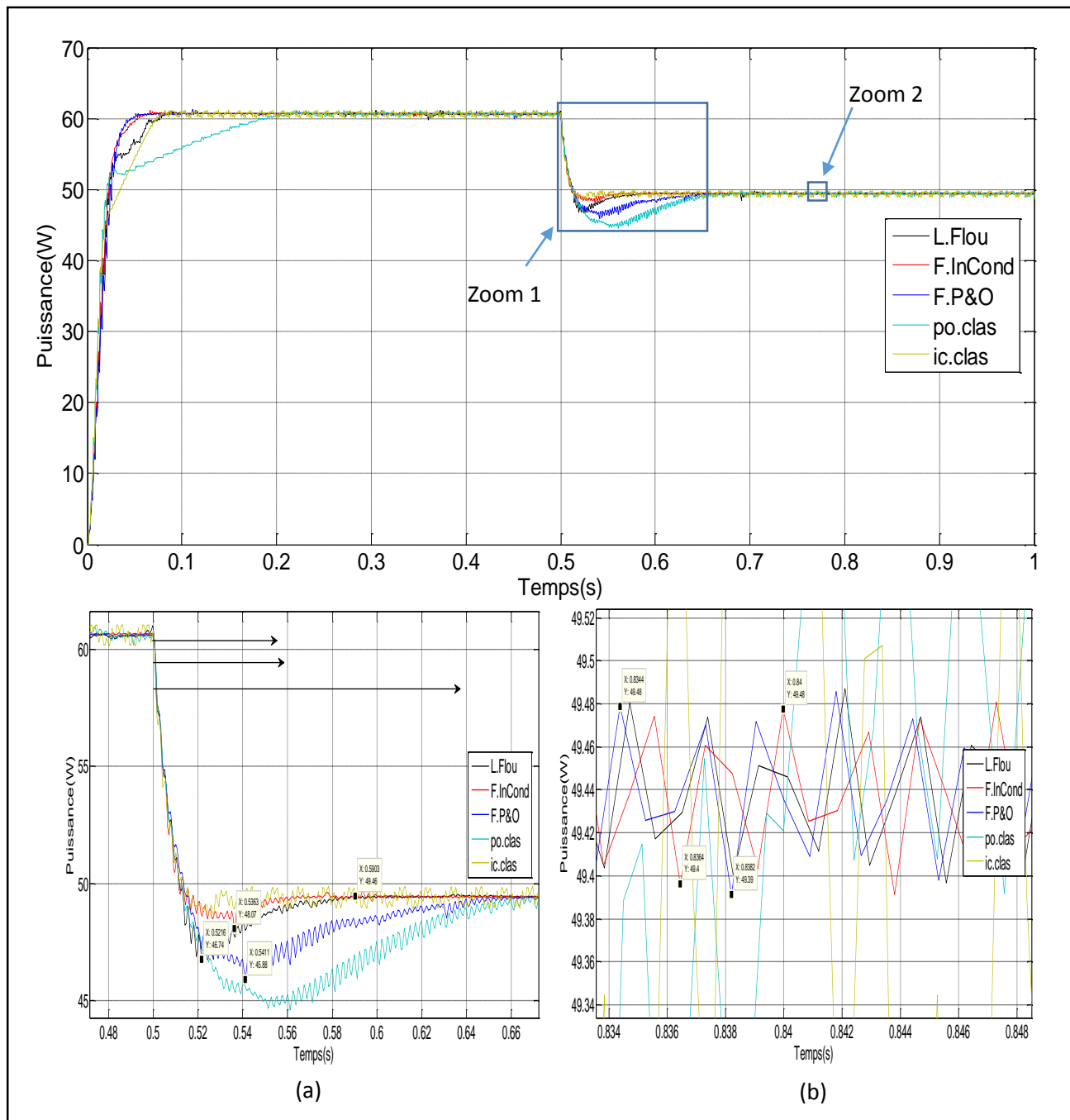


Figure IV.16 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

La Figure IV.17 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction du tension pour une irradiation constante égale à 1000W/m^2 et une température variable $[0\ 25]^\circ\text{C}$.

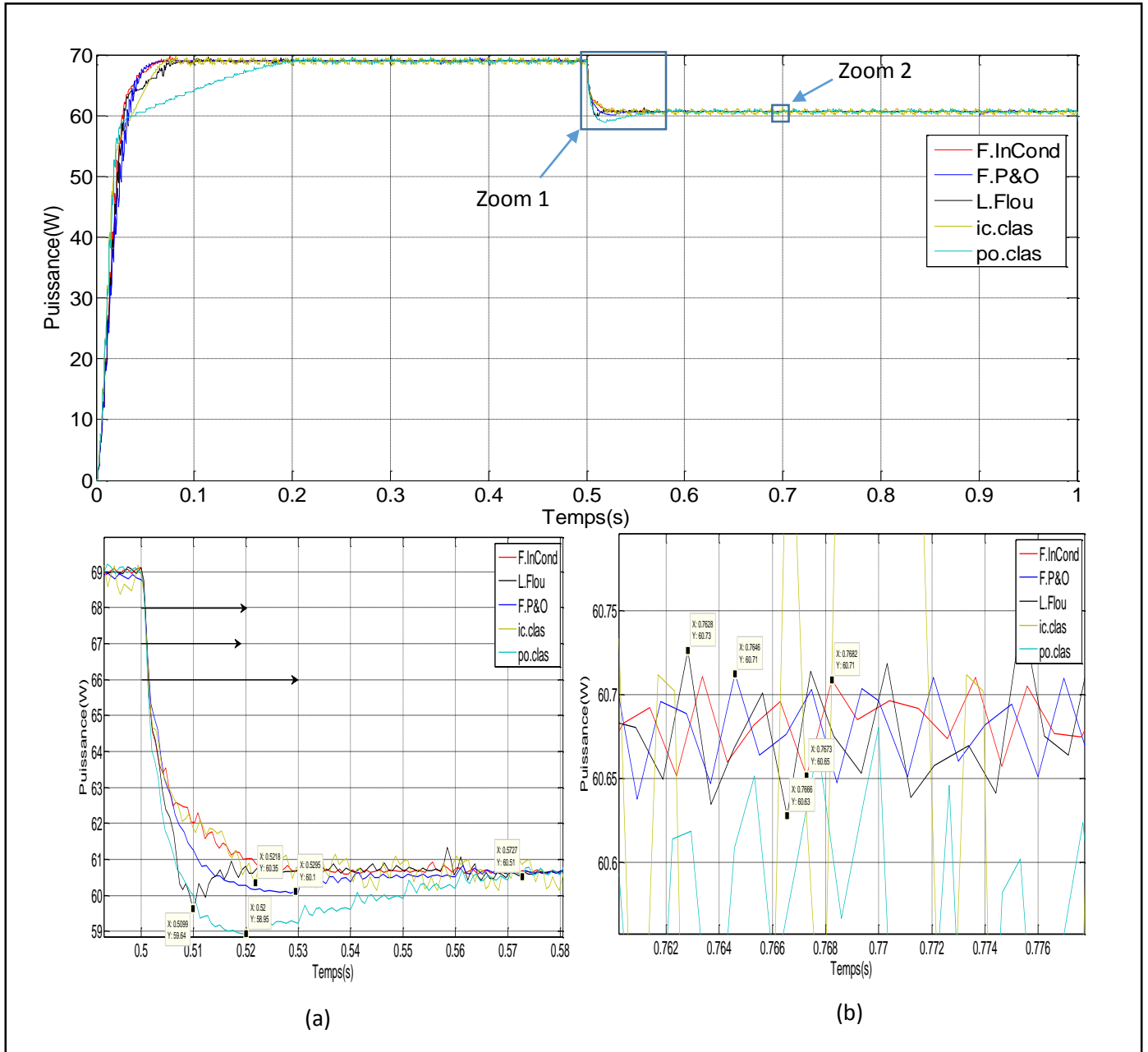


Figure IV.17 Variation de la puissance de sortie dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

Il est clair que les commandes basées sur la logique floue sont mieux que les autres commandes. Mais pour une étude plus précise, nous avons calculé le temps de réponse, la longueur d'oscillation et le dépassement, ces calculs sont organisés dans le tableau suivant

Tableau IV.2 comparaison numérique entre les commandes MPPT étudiées

		Dépassement (W)	T, répondre (s)	Oscillation (W)
P&O	Variation-Ens	4,50	0,159	0,95
	Variation-Tem	1,55	0,060	1,16
InCond	Variation-Ens	0,61	0,040	0,95
	Variation-Tem	0,32	0,026	1,16
L,logique	Variation-Ens	3,58	0,060	0,08
	Variation-Tem	0,41	0,017	0,1
F.InCond	Variation-Ens	1,39	0,047	0,08
	Variation-Tem	0,00	0,017	0,06
F.P&O	Variation-Ens	3,58	0,120	0,09
	Variation-Tem	0,41	0,030	0,06

Les résultats obtenus avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnels (P&O et IncCond classique). Ainsi le contrôle par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (IncCond) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce que démontrent les résultats obtenus après combiner ces deux méthodes dans une seule méthode IncCond Flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide, erreur à l'état permanent très faible et presque zéro dépassement.

Une étude comparative des différentes commandes proposées (classiques et modernes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par logique floue optimise mieux la puissance de fonctionnement du système

IV.4 Conclusion

Ce chapitre englobe l'ensemble des simulations développées sous l'environnement Matlab/Simulink dans un premier pour la mise en place du système photovoltaïque et dans un deuxième pour tester à valider les commandes MPPT faisant l'objet de cette étude. Nous avons commencé par la présentation de la conception et de la simulation d'un contrôleur basé sur des techniques populaires tel que la perturbation et l'observation et puis la commande à incrémentation de la conductance, qui offre un meilleur comportement que la P&O et bien sur la commande MPPT floue qui a amélioré le régime transitoire et a réduit les fluctuations à l'état statique. Puis nous avons proposé des méthodes qui sont des combinaisons entre ces derniers, P&OFlou (combinaison entre MPPT floue et la commande de Perturbation Et Observation classiqu), IncCond Flou (combinaison entre MPPT floue et la commande de Conductance Incrémentale) qui nous donne des super résultats. À la fin nous avons fait une étude comparative Pour montrer l'intérêt des commandes basées flou par rapport à les commandes classiques (P&O et IncCond).

La poursuite du point maximum est bien accomplie avec un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minime. Face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres ; ce qui implique une amélioration du rendement du système par conséquence.

Conclusion générale

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes MPPT ont été étudiées pour la poursuite du point maximum de puissance. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place d'une commande MPPT permettant de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Pour ce faire, nous avons commencé par introduire le lecteur pas à pas au domaine des systèmes photovoltaïque en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

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

Quant à la partie de commande MPPT, faisant objet de cette étude, elle a été bien détaillée dans les chapitre III en présentant le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

La mise en place des simulations, la présentation des résultats obtenus, les discussions et la comparaison ont fait l'objet du dernier chapitre. Ce dernier englobe l'ensemble des simulations développées sous l'environnement Matlab/Simulink dans un premier pour la mise en place du système photovoltaïque et dans un deuxième pour tester à valider et comparer les commandes MPPT faisant l'objet de cette étude. Nous avons développé les algorithmes les plus utilisés à savoir la méthode P&O, la méthode IncCond et la commande MPPT Flou qui ont été soumises à différents tests avec variation des paramètres atmosphériques (température et irradiation). Nous avons proposée quel que commande basée sur la logique flou montrons l'évolution et la ramification de ce domaine. A la fin de ce chapitre et pour une étude plus profonde nous avons fait une étude comparative entre les méthodes délibérés.

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

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et les commandes MPPT classiques et floue. Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

Références bibliographiques :

- [1] Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la météorologie 8^e série - n° 31 - septembre 2000
- [2] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [3] Eric Schiller - publ. En collab. Avec : iepf, université d'ottawa, eier, crepa. « le pompage photovoltaïque: manuel de cours a l' intention des ingénieurs et des techniciens » 1998.
- [4] Joukoff, Alexandre « climatologie du rayonnement solaire » institut royal météorologique, 1991
- [5] Yves Roulet-Ingénieur Environnement « différentes utilisations de l'énergie solaire et intégration des capteurs solaires » département des infrastructures service des bâtiments, monuments et archéologie, mai 2005
- [6] Olivier Delbard « dictionnaire de l'environnement et du développement durable » univers poche, 2011
- [7] wikipedia.org
- [8] Saint Priest « électricité solaire avenir solaire » sma solar technology ag – 2012
- [9] Brahim Lakehal « étude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure schottky » magister en microelectronique, université de batna, 2009.
- [10] Salaheddine Bensalem « effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » magister en énergétique et mécanique des fluides universite ferhat abbas, setif, 2011
- [11] Dossier Thematique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » energies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000
- [12] Mornay Thomas, Vernay Alexis, Volle Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005
- [13] Agence d'études et de promotion de l'isère, rapport sur « la filière photovoltaïque - enjeux et perspectives » septembre 2010
- [14] M. Kara Abdelfattah « dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en algérie » l'université de sétif1, 2014

Bibliographie

- [15] Mohamed Redha Yaiche et Abdellah Bouhanik « Atlas Solaire Algérien » Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique direction générale de la recherche scientifique et du développement technologique centre de développement des énergies renouvelables, dépôt légal 2062-2002
- [16] Ministère de L'énergie et des Mines-Guide Des Energies Renouvelables , potentiels national des énergies renouvelables
- [17] Le Ministère de L'énergie et des mines conception et réalisation satinfo société du groupe sonelgaz « programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » mars 2011
- [18] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [19] S. Liu And R.A. Dougal, "dynamic multiphysics model for solar array", IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, n°2, pp. 285 – 294, june 2002.
- [20] Rais Younes « modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque », mémoire de magister en génie électrique, école nationale polytechnique département d'électronique laboratoire des dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque, 2012
- [21] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [22] A.Benayad, « modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing. » mémoire de magister, département de génie électrique, université de béjaia 2011.
- [23] Alain Bilbao « learreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006
- [24] N.Femia, G. Lisi, G. Petrone,And M.Vitelli "distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: novel approach and system analysis". IEEE transaction on industrial electronics,vol. 55, no. 7. 2008.
- [25] C.Andr`Es, G.Spagnuolo, G. Petrone, M.Vitelli And J.David bastidas "a multivariable mppt algorithm for granular control of photovoltaic systems" IEEE 2010
- [26] F.Slama, « modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister d'électrotechnique, sétif 2012.
- [27] M.Obeidi, « commande des hacheurs mppt par logique floue », mémoire de magister, école nationale polytechnique 2006.
- [28] Amarouyache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014

- [29] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006
- [30] Anantapuram, “investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output” ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university , 2012
- [31] Ahmad Zbeeb, “a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications” for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.
- [32] 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
- [33] Akihiro Oi, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of california polytechnic state university, 2005
- [34] Hajar Bagheri “advances in electric power engineering” publisher: lulu (usa), 2015
- [35] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi “active power control for a single-phase grid connected pv system ” , international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [36] Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, el-harrach, algérie, 2012
- [37] Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « etude d' une chaine de conversion photovoltaïque »,diplôme d'ingénieur d'état en genie electrotechnique, universite de m'sila, 2010
- [38] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva “energy comparison of seven mppt techniques for pv systems”, scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;
- [39]. M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque".jcge'08 lyon, 2008.
- [40] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk, “risc-microcontroller builtin fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered lightflasher applications”, industrial electronics society, 2004.
- [41] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, “a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller”, IEEE power electronics specialists conference, pesc'94, pp. 396-403, jun. 1994.
- [42] M. Veerachary, T.Senjuand K. Uezato, “feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller”, IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, july 2002.

[43] Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim, “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.

[44] Trishan Efram And Patrick “comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : Dr. HARRAG Abdelghani

Présenté par :Mme. BENADEL Faiza

Thème :

**Etude Et Simulation D'une Commande MPPT pour
system PV**

Résumé :

La puissance de sortie d'un GPV dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (IncCond) et les méthodes dites avancées, telle que la MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink.

Mots clés :

PV, convertisseur DC-DC, BOOST, MPPT. P&O, IncCond, logique floue.