

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université Abderrahmane Mira
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Thème

**Etude comparative de certaines méthodes MPPT
appliquées pour les panneaux solaires**

Réalisé par :

DAHMANI Hanane

ABDELHAK Lynda

Dirigé par :

M. BELKAID

Examiné par :

M. HADJI

M. MENDIL

Année universitaire : 2020/2021

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Production de l'électricité photovoltaïque	3
I.1-Introduction.....	3
I.2-L'effet photovoltaïque.....	3
I. 3-La cellule photovoltaïque.....	3
I.4-Structure d'une cellule photovoltaïque	3
I.5-Principe de fonctionnement d'une cellule PV	4
I.6-Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	5
I.7-L'influence des différents paramètres sur les caractéristiques électriques	6
I.7.1-Influence de l'éclairement.....	6
I.7.2-Influence de la température	6
I.8-Le modèle d'une cellule photovoltaïque	7
I.9-Les principaux types de cellules	7
I.9.1-Méthode de fabrication.....	8
I.9.2-Les cellules monocristallines.....	8
I.9.3-Les cellules polycristallines.....	8
I.9.4-Les cellules silicium amorphe en couches minces	9
I.10-Module photovoltaïque	10
I.11-Association des cellules photovoltaïques.....	10
I.11.1-Association en série.....	10
I.11.2-Association en parallèle.....	11
I.11.3-Association hybride	11
I.12-Le champ photovoltaïque.....	12
I.13-Les différents types de systèmes photovoltaïques	13
I.13.1- Les systèmes autonomes	13
I.13.2-Installation électrique PV raccordée au réseau.....	14

I.13.3-Installation électrique PV hybride	15
I.14-Déséquilibre dans un générateur PV	16
I.15-Protection des modules PV	16
I.15.1-Protection par diode anti-retour.....	16
I.15.2-Protection par diode by-pass	16
I.16-Avantages et inconvénients des installations photovoltaïques	17
I.17-Le Prix des panneaux solaires en Algérie	18
I.18- Comment calculer le nombre de panneaux solaire à installer dans une maison ?	19
Première étape : Calculer le besoin en énergie	19
Deuxième étape : Calculer l'exposition de la maison aux rayons solaires.....	19
Troisième étape : Calculer le rendement des panneaux solaires :	19
Conclusion	20
Chapitre II : Convertisseurs électroniques MPPT	22
II.1-Introduction	21
II.2-Le système électrique	21
II.2.1-Connexion directe	21
II.2.2-Connexion à travers un étage d'adaptation.....	22
II.3-Etages d'adaptations	24
II.3.1-Convertisseur Boost	24
II.3.2-Convertisseur Buck	27
II.3.3-Convertisseur Buck-Boost	28
II.4-Onduleur	30
II.5-Le signal de commande	30
II.6-Les commandes MPPT	31
II.6.1-Principe de la commande MPPT.....	31
II.6.2-Techniques MPPT	33
Conclusion	33

Chapitre III : Les méthodes de commande MPPT	36
III.1-Introduction	34
III.2- Méthode perturbation et observation (P&O, Perturbe and Observe)	34
III.2.1-Les avantages et les inconvénients	38
III.3-Méthode incrémentation de la conductance.....	38
III.3.1-Les avantages.....	41
III.4-La commande par logique floue.....	41
III.4.1-Fonctions d'appartenance	42
III.4.2-Opérateur de la logique floue	42
III.4.3-Fuzzification	43
III.4.4-Base de connaissances floues	45
III.4.5-Inférence	45
III.4.6-Défuzzification	47
III.4.7-Avantages et inconvénients	47
Conclusion.....	47
Chapitre IV: Analyse des performances des commandes MPPT.....	51
IV.1-Introduction.....	48
IV.2-Simulation du système photovoltaïque	48
IV.3-simulation du convertisseur Boost sous Matlab/Simulink.....	49
IV.4-Simulation de la méthode P&O	51
IV.5-Simulation du système avec la commande Inc-Cond	60
IV.6-Simulation du système avec la commande de la logique floue.....	64
IV.7-Comparaison des trois méthodes (P&O, Inc-Cond et FLC)	68
Conclusion.....	70
Conclusion générale	71
Références	
Résumé	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Structure d'une cellule photovoltaïque.....	4
Figure I.2 : Schéma de principe de la conversion PV.	5
La figure I.3 illustre les caractéristiques courant-tension, puissance-tension d'une cellule PV.	5
Figure I. 4: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V	6
Figure I. 5: Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V.	6
Figure I. 6: Circuit équivalent d'une cellule PV réelle	7
Figure I. 7: les principaux types de cellules.	8
Figure I. 8: a- Monocristalline. b- Polycristalline. c- Amorphe.	9
Figure I. 9: Association en série des cellules photovoltaïques.....	10
Figure I. 10: Association en parallèle des cellules photovoltaïques.	11
Figure I. 11: Association hybride des cellules photovoltaïques.	12
Figure I. 12: Passage d'une cellule PV à un champ PV.	13
Figure I. 13: système PV autonome.	13
Figure I. 14: Système PV raccordé au réseau.....	15
Figure I. 15: système PV hybride.....	15
Figure I. 16: Protection par diode anti –retour.	16
Figure I. 17: Protection par diode by-pass	17

Chapitre II

Figure II.1: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.	21
Figure II.2: Points de fonctionnement pour différentes charges.	22
Figure II.3: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.	23
Figure II.4: Circuit équivalent du convertisseur Boost.	24
Figure II.5: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [9].	24
Figure II.6: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	25
Figure II.7 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.....	25
Figure II.8: Circuit équivalent du convertisseur Buck	27
Figure II.9: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck	27
Figure II.10: Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost	28
Figure II.11: Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.....	29
Figure II.12: Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).	30

Figure II.13: Signal de commande PWM.....	31
Figure II.14: Chaîne de conversion d'énergie solaire.	32
Figure II.15: Principe de la commande MPPT.....	32

Chapitre III

Figure III.1 : Principe de la méthode P&O.	35
Figure III.2: Changement rapide de l'éclairement dans le cas de la commande P&O.....	36
Figure III.3: Organigramme de la méthode P&O.....	37
Figure III.4: Principe de la MPPT avec la méthode IC.	39
Figure III.5: Organigramme de la méthode IC.....	40
Figure III.6: Structure générale d'un système basé sur la logique floue.	41
Figure III.7: Fonctions d'appartenance.	42
Figure III.8: Structure de base de la commande floue.	44
Figure III.9 : Principe de la commande logique floue.....	46

Chapitre IV

Figure IV.1 : Paramètres du panneau utilisé.	48
Figure IV.2: Modèle du convertisseur DC/DC Boost sous Matlab/Simulink.....	49
Figure IV.3: Tension d'entrée et de sortie pour $\alpha=0.5$	50
Figure IV.4: Schéma Matlab/Simulink d'un système PV avec la méthode P&O.....	51
Figure IV.5: Courant du panneau PV avec P&O pour $\Delta\alpha =0.001$ et $\Delta\alpha =0.01$	51
Figure IV.6: Tension du panneau PV avec P&O pour $\Delta\alpha =0.001$ et $\Delta\alpha =0.01$	52
Figure IV.7: Puissance du panneau PV avec P&O pour $\Delta\alpha =0.001$ et $\Delta\alpha =0.01$	52
Figure IV.8: Profil de variation de l'éclairement.....	54
Figure IV.9: Evolution du courant PV obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.....	54
Figure IV.10: Evolution de la tension de charge obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.....	55
Figure IV.11: Evolution de la tension PV obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.	55
Figure IV.12: Evolution de la puissance PV obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.....	56
Figure IV.13: Profil de variation de la température.	57

Figure IV.14: Evolution du courant PV obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.....	57
Figure IV.15: Evolution de la tension PV obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.	58
Figure IV.16: Evolution de la tension de sortie obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.....	58
Figure IV.17: Evolution de la puissance PV obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.....	59
Figure IV.18: Schéma Matlab/Simulink d'un système PV avec la commande Inc-Cond.	60
Figure IV.19: Courant du panneau PV avec la méthode Inc-Cond pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$	60
Figure IV.20: Tension du panneau PV avec la méthode Inc-Cond pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$	61
Figure IV.21: Puissance du panneau PV avec la méthode Inc-Cond pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$	61
Figure IV.22: Résultats de simulation en utilisant la méthode Inc-Cond avec une irradiance variable.....	62
Figure IV.23: Résultats de simulation en utilisant la méthode Inc-Cond avec une température variable.....	63
Figure IV.24: Schéma MATLAB SIMULINK avec la commande logique floue.	64
Figure IV.25: Courant du panneau PV avec la méthode FLC	64
Figure IV.26: Tension du panneau PV avec la méthode FLC.	65
Figure IV.27: Puissance du panneau PV avec la méthode FLC.....	65
Figure IV.28: Résultats de simulation en utilisant la méthode FLC avec une irradiance variable.....	66
Figure IV.29: Résultats de simulation en utilisant la méthode FLC avec une température variable.....	67
Figure IV.30: Comparaison entre les trois méthodes sous les conditions STC.	68
Figure IV.31: Comparaison entre les trois méthodes pour une irradiance variable.	68
Figure IV.32: Zoom sur le régime transitoire des courbes de puissances.....	69
Figure IV.33: Comparaison entre les trois méthodes pour une température variable.....	69

Liste de tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Prix des panneaux solaires en Algérie 18

Chapitre III

Tableau III. 1: Résumé de l'algorithme P&O 35

Tableau III. 2: Matrice d'inférences..... 45

Chapitre IV

Tableau IV.1: Paramètres du convertisseur DC/DC Boost. 50

Liste d'abréviations

MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale « Maximum Power Point Tracking »
DC/DC	Convertisseur tension continu /continu
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
PO	Perturbation et Observation « Perturb and Observe »
IncCond	Incrémentation de la conductance (IC)
FLC	Contrôleur avec la logique floue « Fuzzy Logic Controller »
PN	Positive-Négative
MPP	Point de Puissance Maximale « Maximum Power Point »
DC/AC	Convertisseur tension continu /alternatif
R	Résistance
f	Fréquence
PWM	Modulation de Largeur d'Impulsions « Pulse Width Modulation » (MLI)
CS	Convertisseur Statique
E/S	Entrée/Sortie
FL	Logique Floue « Fuzzy Logic »
t	Temps
T	Température
C	Capacité

Liste des symboles

ΔD	La variation du rapport cyclique
Δe	La variation de l'erreur dans l'algorithme de FLC
ΔI	Variation du courant
ΔP	Variation de la puissance
ΔV	Variation de la tension
D	Le rapport cyclique (α)
e	L'erreur de l'algorithme de FLC (dérivée de la puissance)
G	Ensoleillement
I	Courant photovoltaïque
I_d	Courant traversant la diode dans le circuit équivalent de la cellule PV
I_{ppm}	Courant au PPM (courant optimal)
I_{ph}	Photo courant de la cellule PV
I_s	Courant de sortie de convertisseur
I_{sc}	Courant du court-circuit « Short circuit current »
k	Constante de Boltzmann ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} J/K$)
L	L'inductance de la bobine
N	Facteur d'idéalité de la diode
ns	Nombre de cellules connectées en série
np	Nombre de cellules connectées en parallèle
P	La puissance photovoltaïque
P_{max}	Puissance maximale
q	Charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$)

R_s	Résistance série de la cellule
t_{off}	Temps d'ouverture de l'interrupteur à semi-conducteur dans un convertisseur
t_{on}	Temps de fermeture de l'interrupteur à semi-conducteur dans un convertisseur
V	Tension photovoltaïque
V_e	Tension d'entrée du convertisseur
V_{ppm}	Tension au PPM (tension optimale)
V_{oc}	Tension du circuit ouvert « Open circuit voltage » (V_{cc})
V_s	Tension de sortie du convertisseur
μ	Le degré (fonction) d'appartenance
R_{sh}	Résistance shunt en parallèle
I_{pv}	Courant fourni par la cellule
I_{sh}	Courant dérivé par la résistance shunt
I_0	Courant de saturation inverse de la diode
V_{pv}	Tension aux bornes du GPV
I_{pv}	Courant fournit par la cellule
I_c	Courant de la lecture
V_c	Tension de la cellule
I_{cc}^T	Courant du court-circuit total
V_{cc}^T	Temps du court-circuit total
P_{max}	Puissance maximale
$F_{ém}$	Force électromagnétique
G	La conductance
dG	L'incrémentation de la conductance

V_L	La tension aux limites de l'inductance
I_L	Courant qui traverse l'inductance
I_{min}	La valeur minimale du courant
I_{max}	La valeur maximale du courant
Δi_L	L'ondulation de courant dans l'inductance
Δv_s	L'ondulation de la tension de sortie

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la fraction extraite, par des cellules photosensibles, de l'énergie lumineuse provenant du soleil sous forme de rayonnement et convertie en énergie électrique. C'est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Ce procédé de conversion est à la fois accessible, rentable et non polluant à l'environnement. On parle alors d'énergie propre.

L'industrie des cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser des panneaux avec le meilleur rapport rendement/prix. Selon les caractéristiques électriques des cellules PV et de leur association, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes dit techniques de poursuite du point de puissance maximale (en anglais maximum power point Tracking MPPT).

La technique MPPT, comme son nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation

L'objectif principal de notre travail est de faire une étude comparative entre quelques méthodes MPPT. L'étude sera faite sur un système constitué d'un panneau photovoltaïque, d'une charge résistive (une lampe par exemple) et un étage d'adaptation (convertisseur DC/DC) [12-13].

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur la conversion PV, à savoir la définition de l'effet PV, les différents types de cellules PV et leurs structures. Nous allons approfondir cette étude par la modélisation des cellules PV ainsi que leurs caractéristiques électriques. Nous allons présenter aussi l'influence des conditions météorologiques (la température et l'éclairement) sur le système PV, à la fin, nous allons exposer les avantages et les inconvénients des installations PV.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les convertisseurs statiques les plus fréquents ainsi que leur principe de fonctionnement, suivi par le principe de la commande MPPT et ses différentes techniques.

Dans le troisième chapitre, Nous allons considérer trois techniques de poursuite du point de puissance maximale à savoir : les techniques Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la Conductance (IncCond) et la Logique Floue (FLC).

Dans le dernier chapitre, nous allons appliquer les trois stratégies de commande MPPT dans un système PV. Les résultats de simulations vont nous permettre de faire une comparaison entre les différentes méthodes étudiées.

Chapitre I : Production de l'électricité photovoltaïque

I.1-Introduction

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.

Dans ce chapitre, nous décrirons brièvement les cellules solaires les plus utilisées et leurs principes de fonctionnement, ainsi que la modélisation d'une cellule PV, l'influence des différents paramètres météorologiques. Vers la fin, nous présenterons le système photovoltaïque et citerons quelques avantages et inconvénients de ce dernier.

I.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.

I. 3-La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs (le silicium par exemple) et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [15].

I.4-Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est constituée de plusieurs couches (figure I.1). On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle -) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle +) en dessous de la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile.

L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [16].

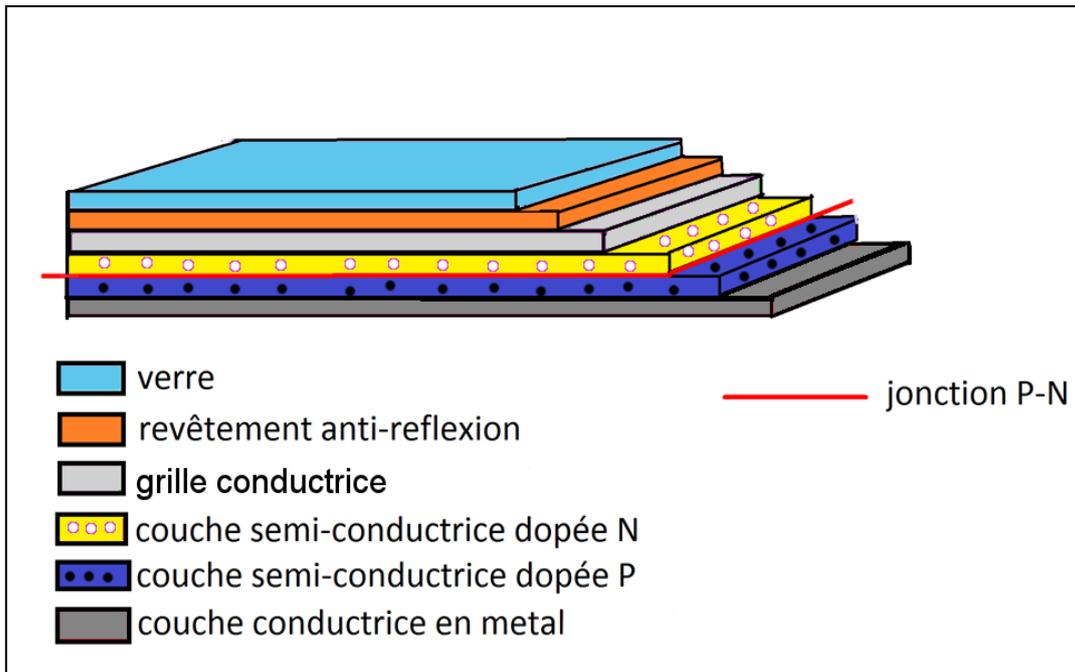


Figure I. 1: Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.5-Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Lorsqu'un photon (particule de lumière) est absorbé par le semi-conducteur, il donne naissance à un électron et à un "trou". En effet, ce photon va transmettre son énergie à un électron (particule négative) qui va alors se libérer de l'attraction de son noyau et donc laisser un " trou " (chargé positivement) derrière lui. Pour obtenir un courant électrique, les charges positives (" trous ") et négatives (électrons) doivent être séparées puis attirées vers l'extérieur.

C'est à ce moment qu'intervient le champ électrique interne créé par la jonction PN, c'est lui qui va repousser les électrons dans la zone N et donc séparer les charges. Les porteurs de charges sont ensuite, collectés par l'intermédiaire d'une grille, qui fait office d'anode, à l'avant et un contact, qui fait office de cathode, à l'arrière. On obtient alors une tension continue d'environ 0,5 V entre ces électrodes [1].

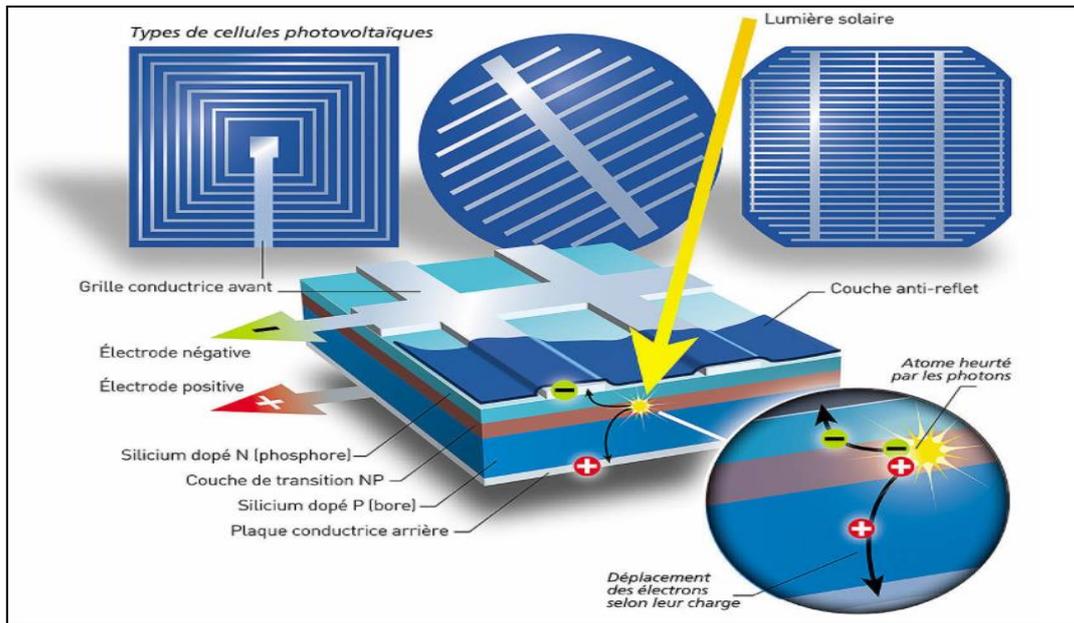


Figure I.2 : Schéma de principe de la conversion PV.

I.6- Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

En présence du soleil, les cellules produisent un courant I et une tension U . Le produit de ces deux grandeurs donne une puissance P , exprimée en Watt (W).

La figure I.3 illustre les caractéristiques courant-tension, puissance-tension d'une cellule PV.

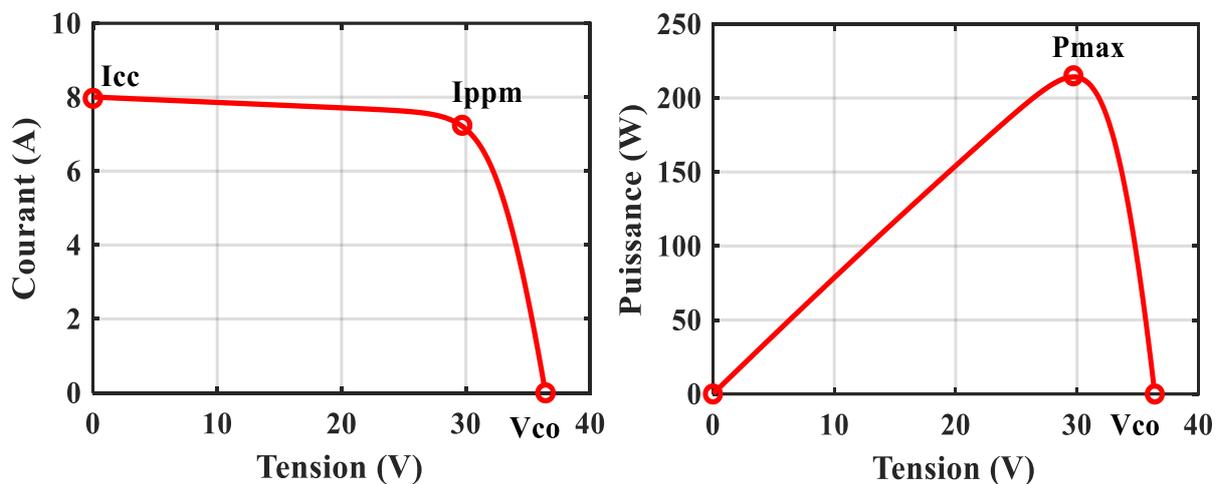


Figure I. 3 : Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV.

I.7-L'influence des différents paramètres sur les caractéristiques électriques

I.7.1-Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit, l'augmentation du flux lumineux fait accroître le courant de court-circuit I_{sc} , ainsi que la puissance maximale, comme le montre la figure I.4

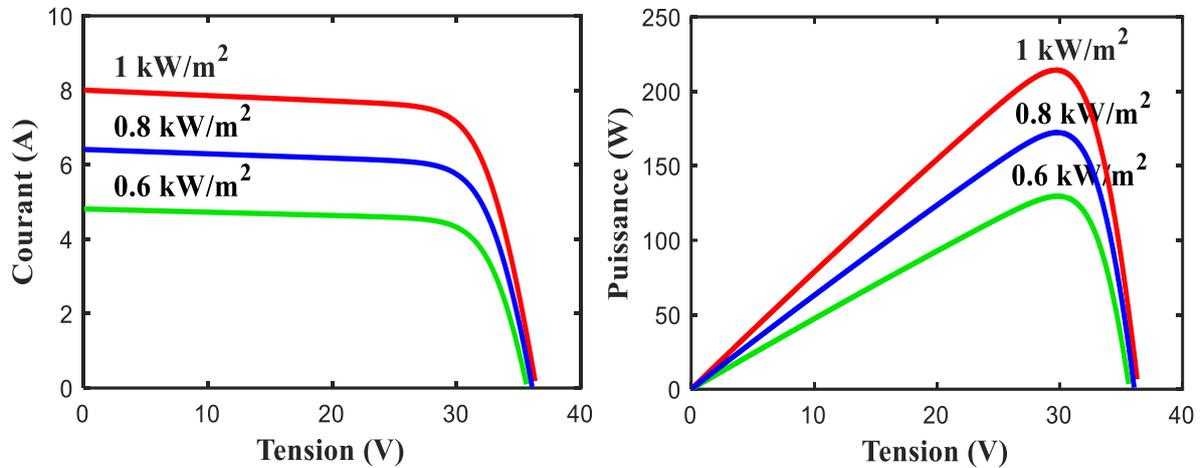


Figure I. 4: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V

I.7.2-Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. La figure I.5 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

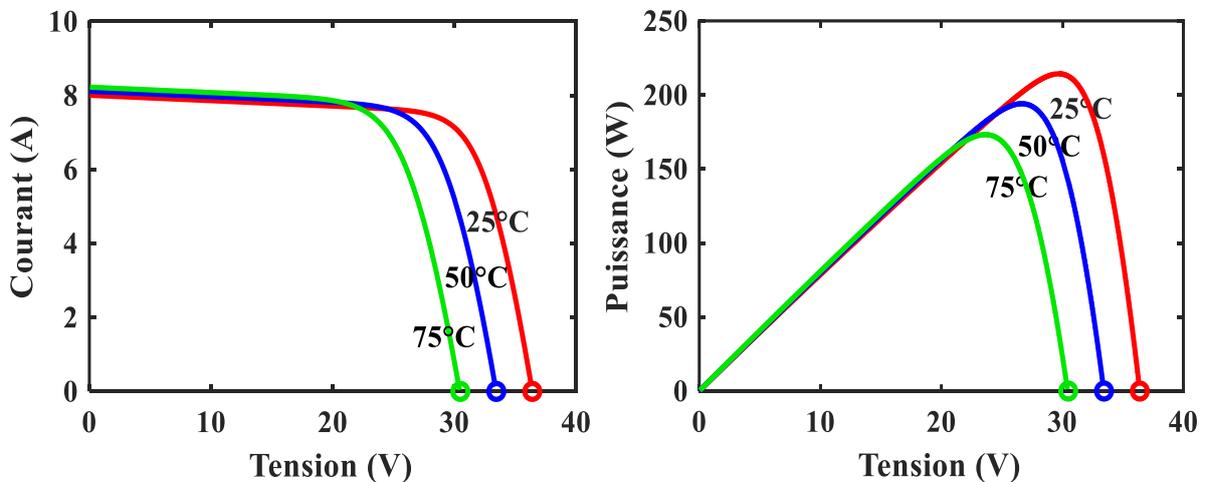


Figure I. 5: Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V.

I.8-Le modèle d'une cellule photovoltaïque

Plusieurs modèles ont été proposés mais le plus couramment utilisé est le modèle à une-diode. Il correspond à un générateur de courant en parallèle avec une diode (Figure I.6), on modélise également les chutes ohmiques et les courants de fuite par deux résistances [2] :

- Une résistance « shunt » en parallèle (R_{sh}) modélise les courants de fuite dus aux effets de bord de la jonction PN en (Ω).
- Une résistance en série (R_s) modélise les pertes aux contacts et connexions, en (Ω).
- La source de courant (I_{ph}) modélise la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, en (A).
- La diode modélise la jonction P-N

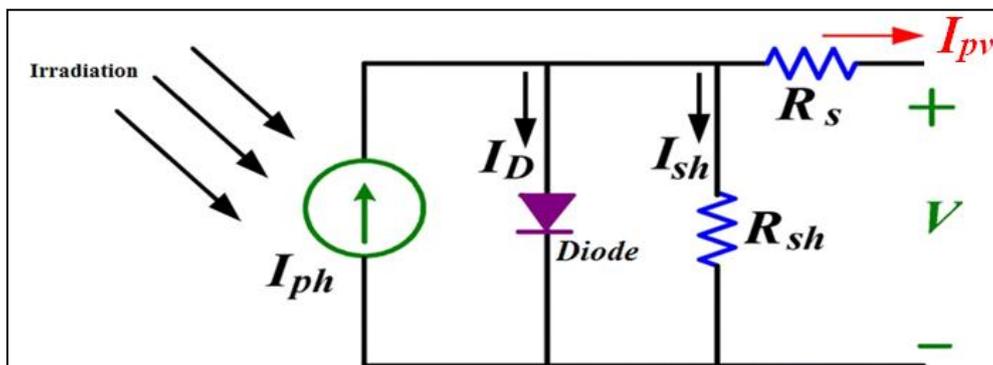


Figure I. 6: Circuit équivalent d'une cellule PV réelle

- Le courant délivré par la cellule PV a pour expression

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

- I_D : est le courant traversant la diode.
- I_{sh} : est le courant dérivé par la résistance shunt.
- I_{ph} : le photo-courant.
- v : la tension aux bornes de la cellule.

I.9-Les principaux types de cellules

Bien qu'il existe d'autres matériaux dans la fabrication des cellules PV, le silicium est le matériau le plus utilisé. Cette technologie (Figure I.7) présente plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multi-cristallin.

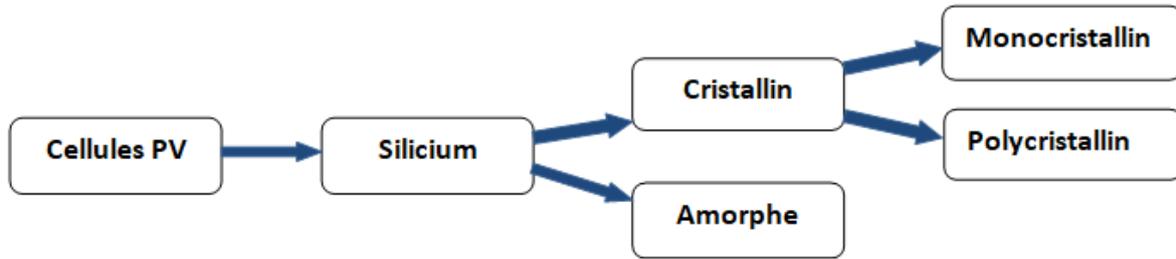


Figure I. 7: les principaux types de cellules.

I.9.1-Méthode de fabrication

Le cristal formé par refroidissement du silicium en fusion dans des creusets parallélépipédiques est ensuite découpé en fines tranches appelées « wafers ». Les cellules sont alors obtenues après « dopage » et traitement de surface.

On distingue deux types de cellules cristallines :

I.9.2-Les cellules monocristallines

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium, elles sont en général d'un bleu uniforme (Figure I.8.a) et sont considérées parmi les cellules ayant le rendement le plus élevé, qui est entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. A cause de son coût élevé, le silicium monocristallin tend à perdre du terrain devant le silicium polycristallin.

I.9.3-Les cellules polycristallines

Pendant le refroidissement du silicium, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux (figure I.8.b).

Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins cependant leur rendement est de l'ordre de 10 à 14% et donc plus faible.

I.9.4-Les cellules silicium amorphe en couches minces

Le silicium amorphe désigne un silicium qui n'est pas cristallin c'est à dire dans lequel les atomes ne sont pas rangés de façon ordonnée. Il sert à la fabrication des cellules couches minces. Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposée une fine couche de silicium. Elles ont une couleur grise ou marron (figure I.8.c).

C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». Elles ont l'avantage de fonctionner avec un faible éclaircissement et sont moins sensibles aux fortes températures que les cellules monocristalline et polycristalline. Donc ces cellules sont une bonne alternative aux cellules cristallines dans une zone soumise à un fort ombrage. Cependant, elles ont un faible rendement qui est compris entre 5 et 10 % [1].

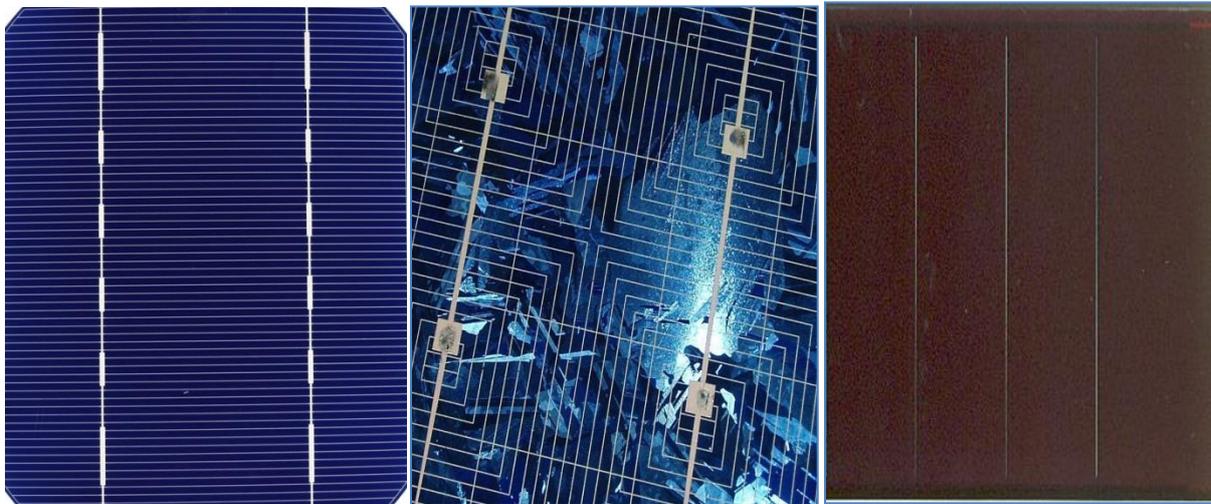


Figure I. 8: a- Monocristalline. b- Polycristalline. c- Amorphe.

I.10-Module photovoltaïque

La cellule PV élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau PV.

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire [3].

I.11-Association des cellules photovoltaïques

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

I.11.1-Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure I.9 montre la caractéristique résultante (I_{CS} , V_{CS}) obtenue en associant en série N_S cellules identiques (I_C , V_C) [4].

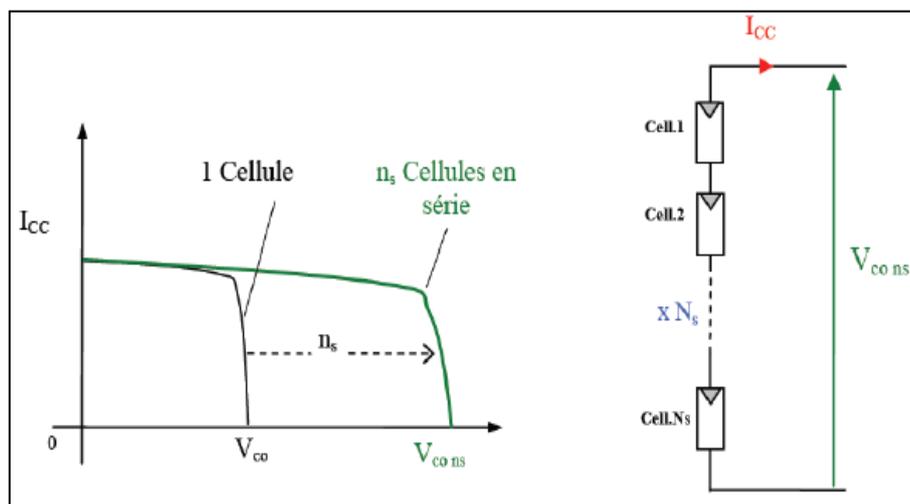


Figure I. 9: Association en série des cellules photovoltaïques.

I.11.2-Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

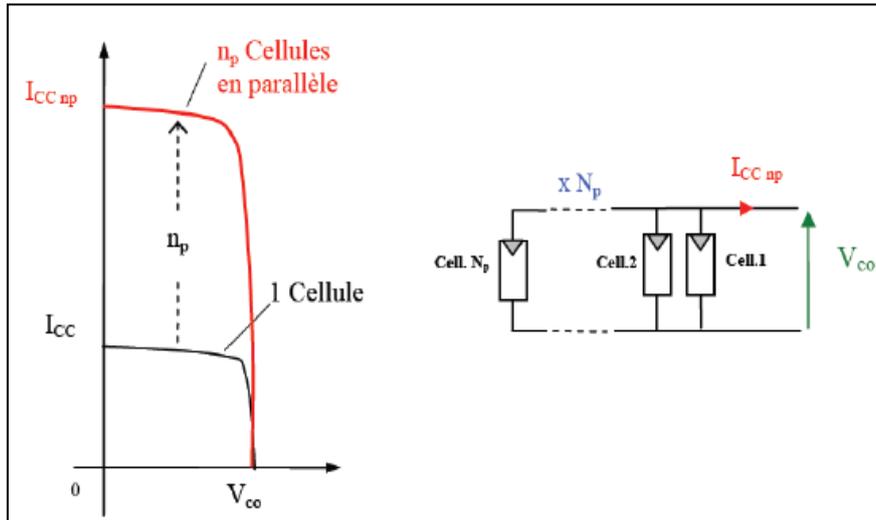


Figure I. 10: Association en parallèle des cellules photovoltaïques.

I.11.3-Association hybride

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

$$I_{CC}^T = n_p \cdot I_{CC} \quad (I.2)$$

$$V_{CO}^T = n_s \cdot V_{CO} \quad (I.3)$$

Avec :

n_p : Nombre des cellules en parallèle.

n_s : Nombre des cellules en série.

I_{CC}^T : Courant de court-circuit total.

V_{CO}^T : Tension de circuit ouvert totale.

La figure I.11 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle, des cellules identiques.

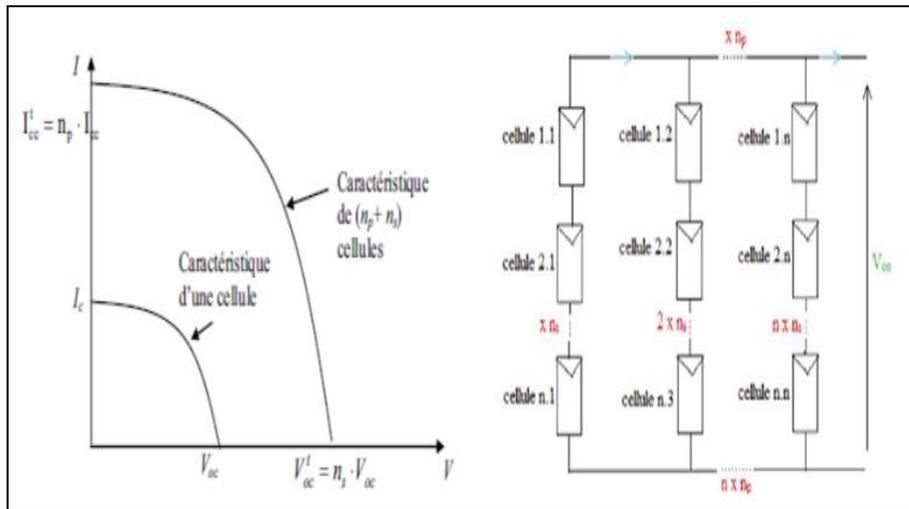


Figure I. 11: Association hybride des cellules photovoltaïques.

I.12-Le champ photovoltaïque

Une association de plusieurs panneaux PV forme le champ PV. L'emplacement du champ PV devra respecter les contraintes suivantes :

- Les modules doivent être installés à une hauteur suffisante pour ne pas être atteints par les animaux, tout en restant accessibles pour un nettoyage régulier.
- Protéger chaque sous station contre la foudre à l'aide de para-surtenseurs.
- Les panneaux doivent être orientés au sud dans l'hémisphère nord et au nord dans l'hémisphère sud, et inclinés pour être le plus souvent possible perpendiculaire aux rayons lumineux.
- Proximité avec la régulation, le stockage et les récepteurs.
- Fixations solides pour résister aux vents : les modules sont généralement fixés soit au sol, soit en toiture, soit en façade [5].

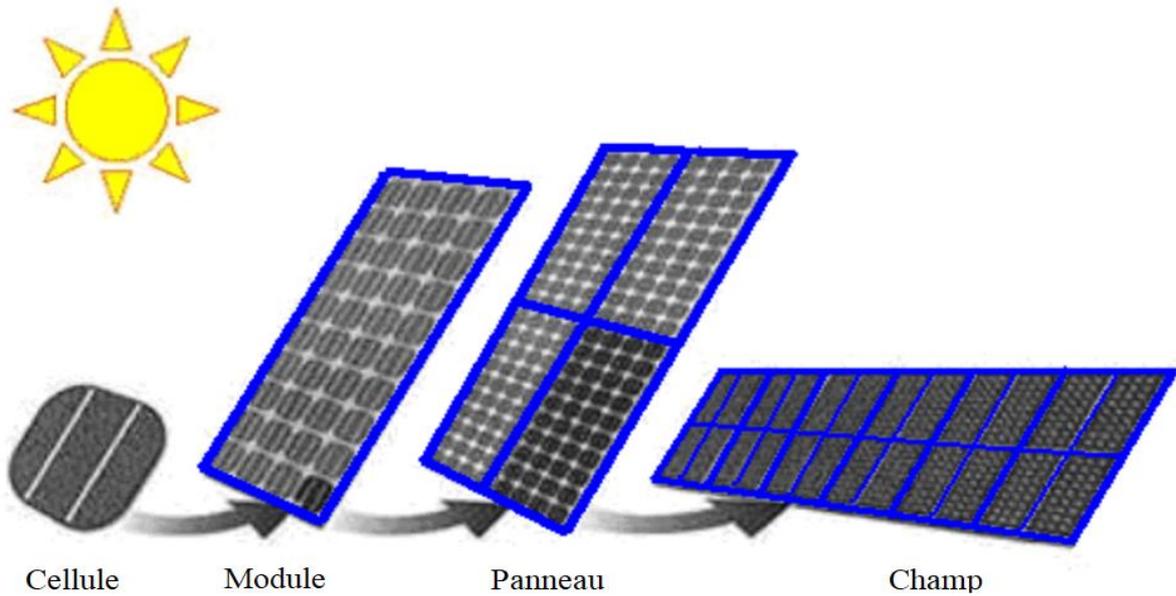


Figure I. 12: Passage d'une cellule PV à un champ PV.

I.13-Les différents types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type qu'on choisit dépend des besoins, de l'emplacement et du budget.

I.13.1- Les systèmes autonomes

L'utilisation d'une installation solaire autonome consiste à utiliser l'électricité produite directement ou en la stockant dans des batteries.

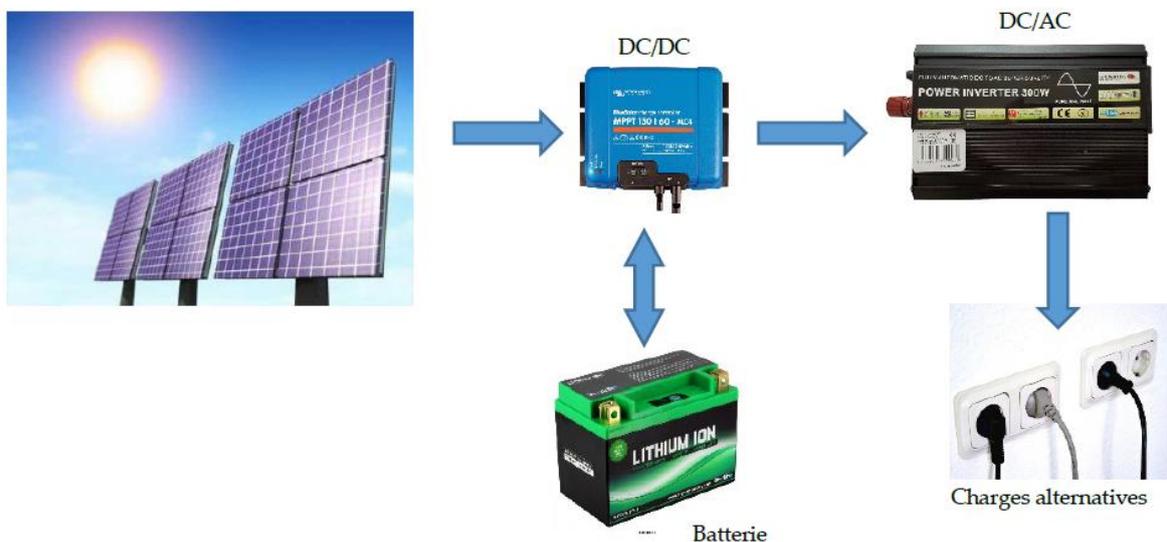


Figure I. 13: système PV autonome.

Cette installation est constituée des éléments suivants:

- Un ou plusieurs panneaux photovoltaïques.
- Un régulateur solaire.
- Une ou plusieurs batteries d'accumulation.
- Un onduleur (seulement pour obtenir du courant alternatif).

I.13.1.1- Avantages

- Le principal avantage de ce système est qu'il est dans certains cas moins onéreux qu'un raccordement électrique, mais l'électricité photovoltaïque permet aussi de disposer d'une source d'énergie fiable sans maintenance.
- Possibilité de la mettre en place soi-même.
- Electricité renouvelable non polluante.
- Il est possible d'agrandir son installation au fur et à mesure que les besoins augmentent contrairement à une installation reliée au réseau électrique.

Plusieurs structures ont profité de ce système:

- Les relais de communications.
- La signalisation routière, ferroviaire, maritime et aérienne.
- La téléphonie de secours.
- Les petites stations météorologiques.
- La sécurité de zones isolées.
- Les stations de pompage (pays en développement, agriculture...).
- Les systèmes de purification d'eau.
- Les équipements urbains (éclairage...etc.) [6].

I.13.2-Installation électrique PV raccordée au réseau

Les installations PV peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en fonctionnement. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V.

Elle est constituée de trois éléments essentiels:

- Les panneaux photovoltaïques
- Un onduleur synchrone qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Un compteur d'énergie (en fait, en général, deux compteurs dans le cas des installations décentralisées) [6].

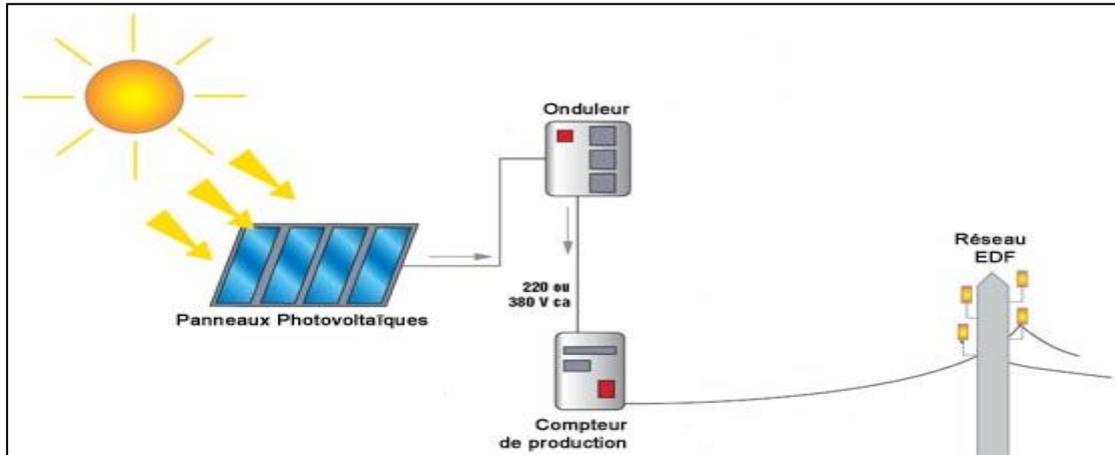


Figure I. 14: Système PV raccordé au réseau.

I.13.3-Installation électrique PV hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes tels qu'une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur PV seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

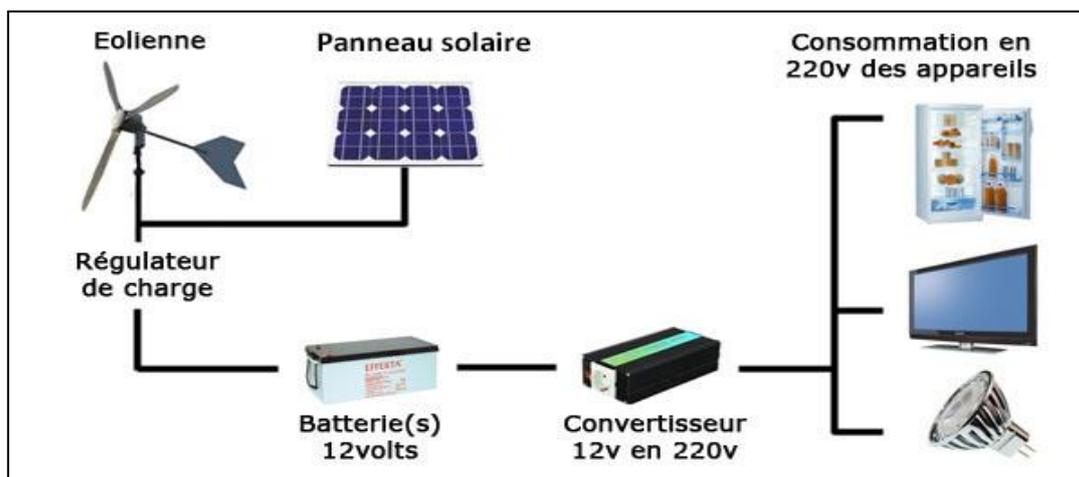


Figure I. 15: système PV hybride.

I.14-Déséquilibre dans un générateur PV

Dans les associations série et parallèle, les modules PV étaient considérés identiques vis-à-vis de l'éclairement et de la température, mais en réalité, ce n'est pas toujours le cas. Les problèmes rencontrés sont liés au fait qu'une cellule peut être amenée à travailler comme récepteur électrique au lieu de générer de l'énergie. Cela se produit notamment si elle est ombragée. Donc, elle est soumise à une tension inverse égale à la somme des tensions de toutes les autres cellules. Pour cela, il faut assurer une protection contre ces phénomènes de retour de courant qui causent des risques destructifs [15].

I.15-Protection des modules PV

I.15.1-Protection par diode anti-retour

Comme son nom l'indique, cette diode sert à empêcher un ensemble de cellules connectées en série dans une branche d'un générateur PV de recevoir l'énergie électrique provenant d'autres branches mises en parallèle. Elle protège aussi le générateur PV contre le retour de l'énergie stockée dans les batteries lors des conditions atmosphériques défavorables ou durant la nuit.

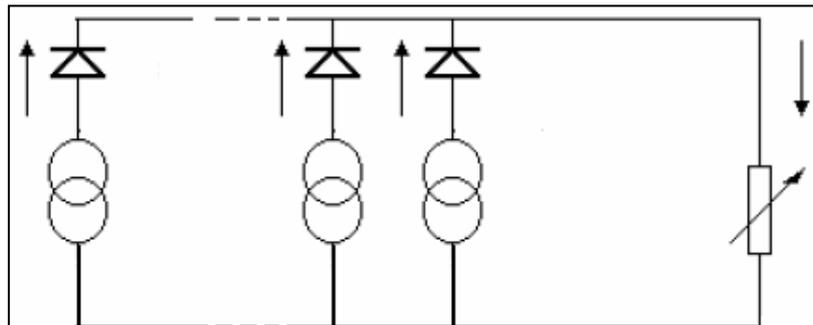


Figure I. 16: Protection par diode anti –retour.

I.15.2-Protection par diode by-pass

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau d'un groupe de cellules, la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension direct puisqu'elle devient passante [15].

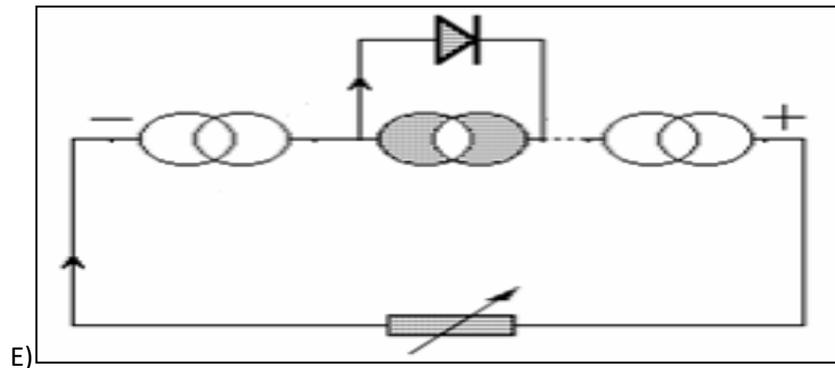


Figure I. 17: Protection par diode by-pass

I.16-Avantages et inconvénients des installations photovoltaïques

Avantages

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

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

Inconvénients

- Le coût d'investissement des panneaux PV est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'existe pas encore.
- Le rendement électrique diminue avec le temps.
- L'installation nécessite beaucoup d'espace [17].

I.17-Le Prix des panneaux solaires en Algérie

Les prix des panneaux solaires pour une installation de taille moyenne en Algérie varient généralement de 25.000 DA à 50.000 DA. Et le prix moyen par watt pour les panneaux solaires varie de 95 DA à 350 DA.

L'installation d'un panneau solaire ne suffit pas pour alimenter votre maison en énergie mais il faut donc installer tout un kit qui se compose de plusieurs appareils. Le coût d'une installation complète change par rapport au coût d'un panneau solaire. Il inclue, en plus du panneau solaire, le coût des différents appareils nécessaires. Le coût de la main d'œuvre pour l'installation est généralement inclus dans le prix total du projet [18].

Le tableau suivant représente le coût des panneaux solaires en Algérie :

Prix panneau solaire en Algérie	Prix minimum	coût moyen	Prix maximum
Prix kit solaire autonome 500W.	200.000 DA	260.000 DA	300.000 DA
Prix kit solaire autonome 1000W	400.000 DA	420.000 DA	450.000 DA
Prix kit solaire autonome 1500W	500.000 DA	550.000 DA	600.000 DA
Prix kit solaire autonome 2000W	700.000 DA	750.000 DA	800.000 DA
Prix kit solaire autonome 3000W	900.000 DA	1.000.000 DA	1.100.000 DA
Prix kit solaire autonome 4000W	1.200.000 DA	1.300.000 DA	1.400.000 DA
Prix kit solaire autonome 5000W	1.600.000 DA	1.700.000 DA	1.800.000 DA

Tableau I.1: Prix des panneaux solaires en Algérie

I.18- Comment calculer le nombre de panneaux solaire à installer dans une maison ?

Pour calculer le nombre de panneaux solaires nécessaire pour alimenter un habitat en énergie solaire, il est important de suivre ces trois étapes :

Première étape : Calculer le besoin en énergie

Afin de savoir combien de panneaux solaires sont nécessaire pour alimenter une maison en énergie solaire, il est important de connaître le besoin en énergie dans une durée précise et pendant toute l'année.

Pour cela, il suffit simplement de connaître la consommation en matière d'électricité en KW. Ce paramètre, se trouve sur la facture Sonelgaz dans la partie consommation électrique. Il faut prendre en considération toutes les consommations électriques pendant les différentes saisons de l'année. Il est possible aussi de comparer le résultat avec la consommation électrique pendant deux ou trois années précédentes. Cette comparaison permettra d'avoir le chiffre le plus exact de la consommation électrique.

Deuxième étape : Calculer l'exposition de la maison aux rayons solaires

Cette étape consiste à calculer l'exposition de la maison aux rayons solaires. Ceci dit, qu'une maison située dans les hauteurs de Tikedjda n'est pas exposée aux rayons solaires de la même manière qu'une maison située dans la ville de Béchar par exemple. La quantité des rayons solaires absorbée ainsi que la durée d'exposition joue un rôle déterminant dans le calcul du nombre des panneaux solaires nécessaire dans une installation.

Troisième étape : Calculer le rendement des panneaux solaires :

Après avoir déterminé le besoins en matière de consommation d'énergie ainsi que l'exposition de l'habitat au soleil. L'étape suivante est de calculer le rendement des panneaux solaires. Noter que chaque panneau solaire a une taille précise et donc une capacité à produire l'électricité. On prend à titre d'exemple un panneau solaire de 6 KW. Les panneaux solaires ont également un rendement qui est en fonction de la qualité de la matière dont il est fait.

L'installation de plusieurs panneaux solaires de manière adjacente permet alors de couvrir la maison de la quantité d'énergie nécessaire.

Notez aussi qu'un kit complet d'une nouvelle installation de panneaux solaire contient plusieurs autres appareils pour son fonctionnement et des batteries qui ont le rôle de stocker l'énergie électrique produite excédante pour une utilisation ultérieure. Notamment quand l'exposition au soleil est nulle pendant la nuit par exemple.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau, champ PV) afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV.

Les performances d'un module PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

Dans le chapitre suivant nous allons nous intéresser à l'étude des convertisseurs électroniques MPPT et de la commande PWM.

Chapitre II : Convertisseurs électroniques MPPT

II.1-Introduction

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée. Elle est de ce fait très imprévisible. Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques du GPV présentent un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement de coordonnées VMPP pour la tension et IMPP pour le courant. Vu que la position du MPP dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, elle n'est jamais constante dans le temps. Un convertisseur MPPT doit donc être utilisé afin de suivre ces changements. Un convertisseur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

Dans ce chapitre, nous présenterons les convertisseurs statiques les plus fréquents ainsi que leur principe de fonctionnement, et nous finirons par définir le principe de la commande MPPT et ses différentes techniques.

II.2-Le système électrique

Plusieurs solutions existent pour connecter le GPV à sa charge. De la manière la plus simple en connexion directe avec une simple diode, au plus sophistiqué grâce à des convertisseurs statiques pouvant intégrer des lois de commande très complexes. Le choix dépendra de l'utilisation, du coût ou des performances recherchées.

II.2.1-Connexion directe

Pour ce type de connexion, une diode est insérée entre le GPV et la charge (Figure II-1). Cette diode permet d'éviter que le GPV devienne récepteur lorsqu'il n'est plus éclairé et soit détruit s'il atteint ses limites de fonctionnement en récepteur.

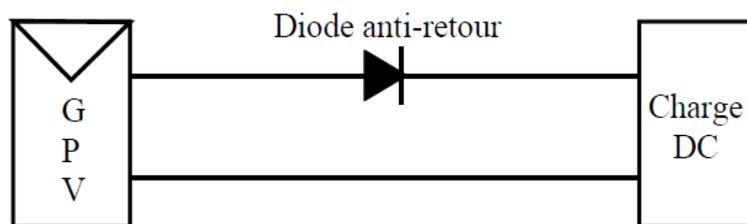


Figure II.1: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

Cependant cette connexion n'est pas idéale pour autant. Il n'est pas possible de régler ou limiter la tension ou le courant de charge. De plus, dans le cas où la charge est une batterie, c'est la tension de celle-ci qui fixe le point de fonctionnement du système, et qui risque donc de ne pas se situer sur le PPM du GPV et donc de ne pas utiliser toute sa puissance disponible. Si par chance, la charge se retrouvait sur le PPM du module, cela ne durerait que quelques instants, la moindre variation d'ensoleillement, de température de la cellule ou du niveau de charge de la batterie fait varier le PPM.

Différents types de charges peuvent être utilisées. Elles peuvent être résistives ou s'apparenter à une source de courant continue ou bien encore une source de tension continue.

La figure II.2 montre les points de fonctionnement sur la courbe de puissance (points A, B, C) pour chacune d'entre elles. Ces points peuvent se retrouver éloignés du PPM, le GPV est alors mal exploité et une partie de la puissance maximale potentielle n'est pas transférée à la charge [7].

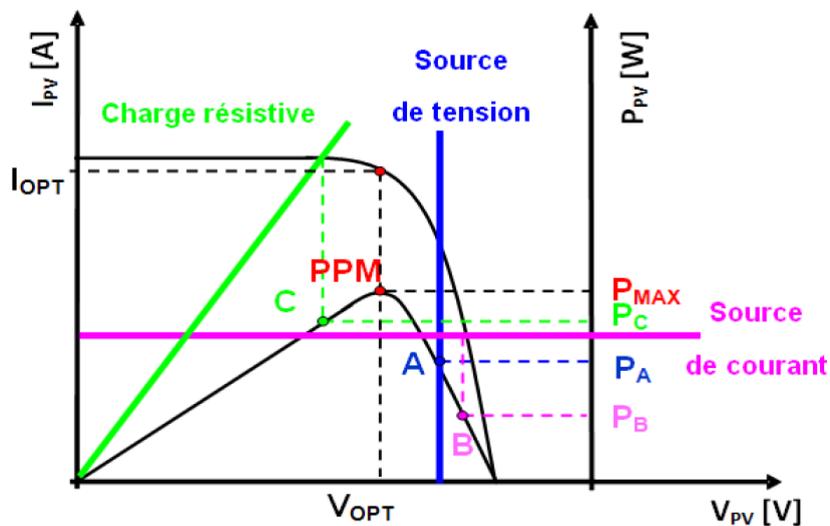


Figure II.2: Points de fonctionnement pour différentes charges.

II.2.2-Connexion à travers un étage d'adaptation

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent du 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.3 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 [8].

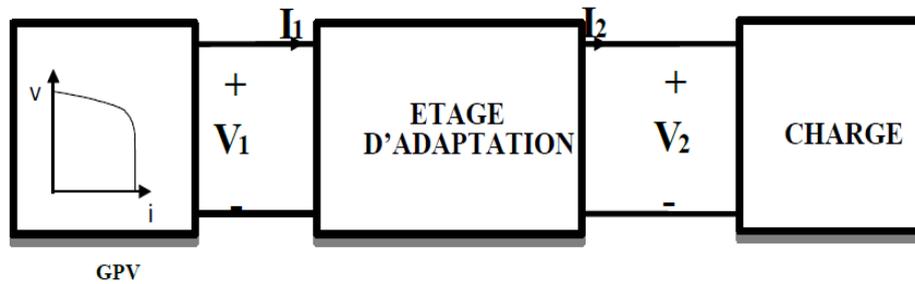


Figure II.3: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur MPPT, ce dernier consiste en

- un convertisseur DC/DC si la charge est de type continu avec les différentes topologies possibles, on s'intéresse juste aux hacheurs sans isolation galvanique qui sont dépourvus de transformateur tels que :
 - Hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck).
 - Hacheur survolteur ou élévateur de tension (Boost).
 - Hacheur abaisseur-élévateur de tension (Buck-Boost).
- Ou d'un convertisseur à deux étages DC/DC suivi par un autre DC/AC (onduleur) si la charge est de type alternatif.

II.3-Etages d'adaptations

II.3.1-Convertisseur Boost

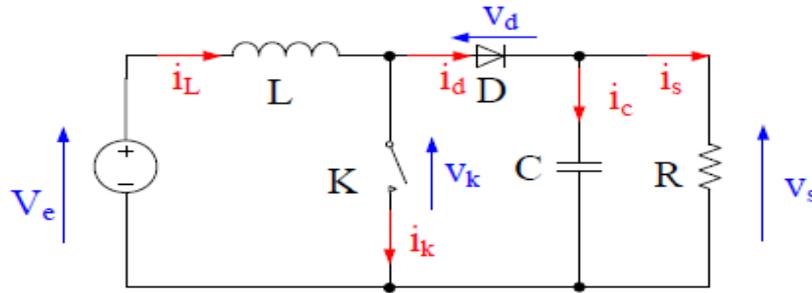


Figure II.4: Circuit équivalent du convertisseur Boost.

Un convertisseur Boost est une alimentation à découpage qui permet d'élever la tension de sortie.

II.3.1.1-Principe de fonctionnement

Il peut être divisé en deux phases, suivant l'état de l'interrupteur (Figure II.4) :

- Une phase d'accumulation d'énergie : l'interrupteur est fermé (état passant), le courant dans l'inductance augmente, une quantité d'énergie est alors stockée sous forme d'énergie magnétique.
- Une phase où l'interrupteur est ouvert: l'inductance se trouve en série avec le générateur. La fém de l'inductance s'ajoute à celle du générateur, ce qui donne un effet survolteur. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. L'énergie accumulée dans l'inductance est transférée vers la charge [7].

II.3.1.2-Les formes d'ondes du courant et de la tension

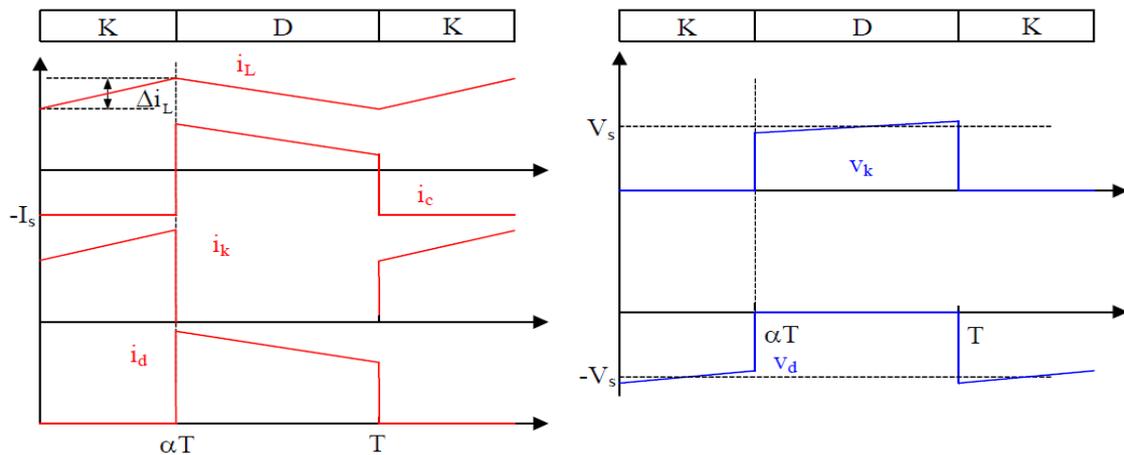


Figure II.5: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [9].

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T$), le circuit du convertisseur devient

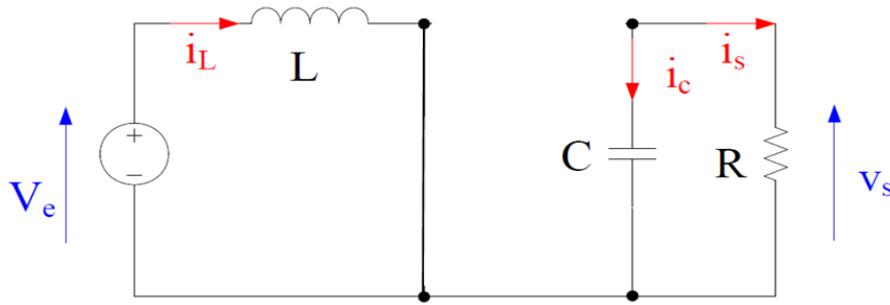


Figure II.6: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II-1})$$

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

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad (\text{II-3})$$

Avec I_{min} : la valeur minimale du courant dans l'inductance.

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

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II-4})$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T < t < T$), le circuit du convertisseur devient

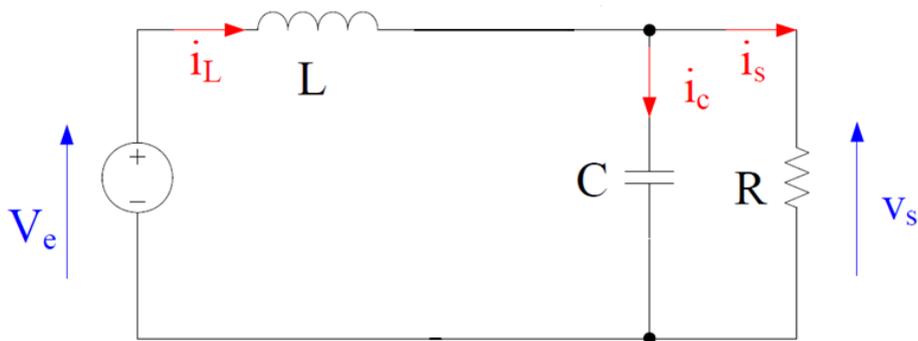


Figure II.7 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II-5})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad (\text{II-6})$$

A l'instant ($t=T$) le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha)T \quad (\text{II-7})$$

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (4 et 7), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

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

Si l'on admet que la puissance de sortie est égale à celle de l'entrée (convertisseur sans pertes), le courant de sortie I_s et le courant à l'entrée I_L sont liés par l'équation :

$$I_s = (1 - \alpha)I_L \quad (\text{II-9})$$

L'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{Lf} \quad (\text{II-10})$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C} T = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha)RCf} \quad (\text{II-11})$$

Avec f : la fréquence de découpage.

II.3.2-Convertisseur Buck

Un convertisseur buck est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

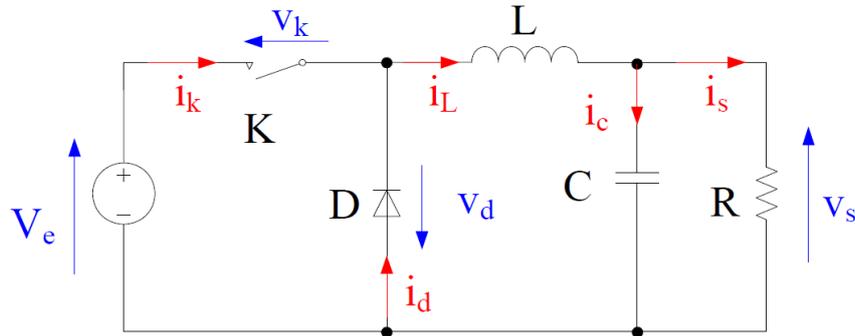


Figure II.8: Circuit équivalent du convertisseur Buck

II.3.2.1-Principe de fonctionnement

- Dans l'état passant, l'interrupteur K (voir figure II.8) est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_e - V_s$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = -V_s$. Le courant traversant l'inductance décroît.

II.3.2.2-Les formes d'ondes du courant et de la tension

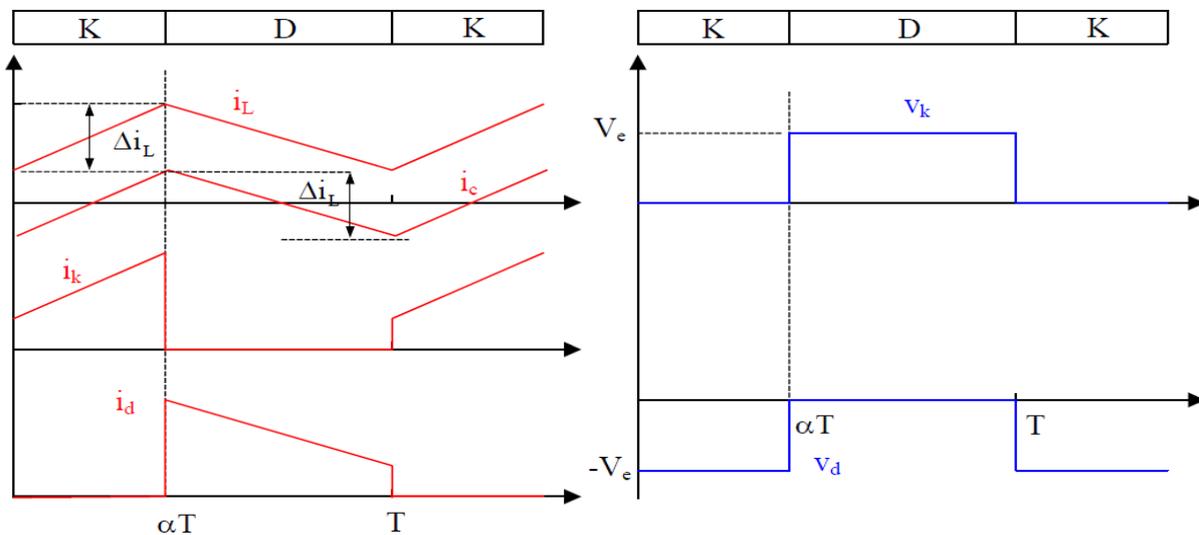


Figure II.9: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par:

$$V_S = \alpha V_e \quad (\text{II-12})$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{L f} \quad (\text{II-13})$$

$$\Delta V_S = \frac{\Delta i_L}{8 C f} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8 C L f^2} \quad (\text{II-14})$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$i_L = i_S \quad (\text{II-15})$$

II.3.3-Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

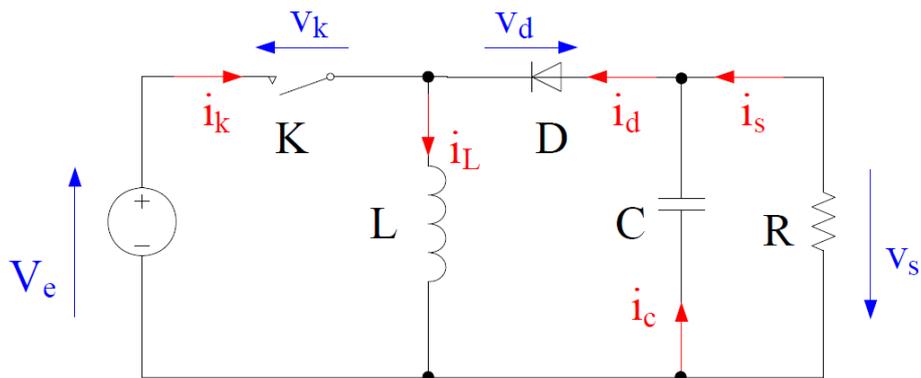


Figure II.10: Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost

II.3.3.1-Principe de fonctionnement

- Dans l'état passant, l'interrupteur \$k\$ est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur \$k\$ est ouvert. L'inductance est reliée à la charge ainsi qu'à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

II.3.3.2-Les formes d'ondes du courant et de la tension

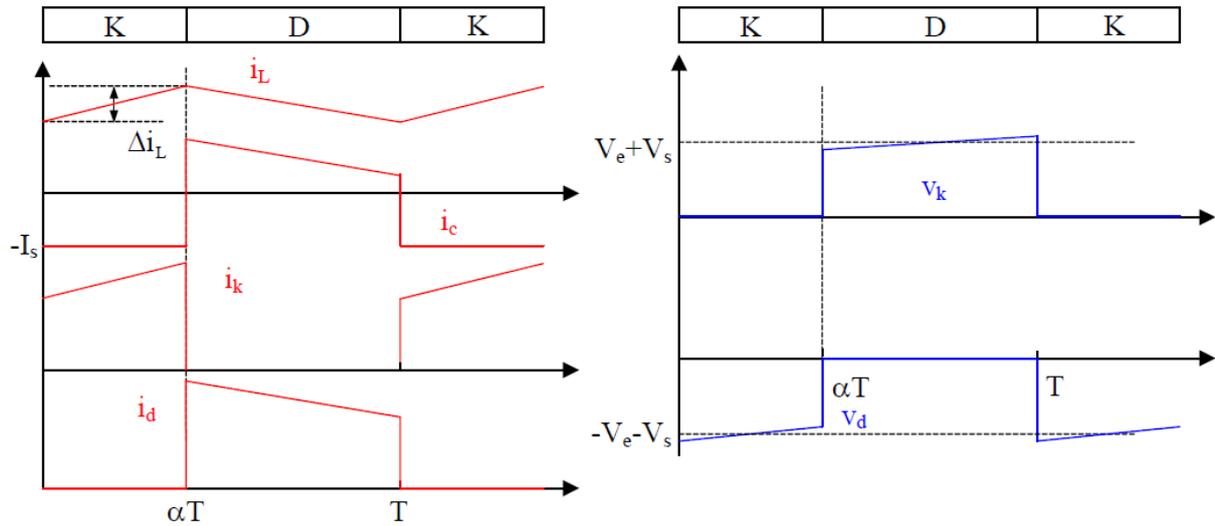


Figure II.11: Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II-16})$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II-17})$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (\text{II-18})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{II-19})$$

II.4-Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande, il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion

- Onduleur monophasé.
- Onduleur triphasé.

La Figure II.12 représente schéma de principe de l'onduleur.

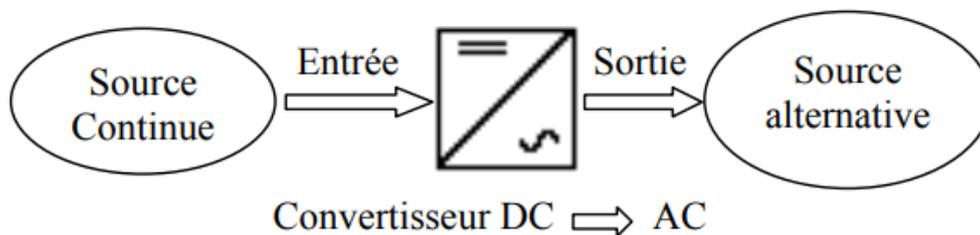


Figure II.12: Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

II.5-Le signal de commande

L'interrupteur est commandé par un signal carré modulé en largeur d'impulsion variable PWM (Modulation de Largeur d'Impulsions « Pulse Width Modulation »), C'est un signal d'un niveau suffisant pour fermer l'interrupteur pendant la phase t_{on} et nul durant la phase t_{off} .

Le signal PWM peut être obtenu par comparaison d'un signal triangulaire et de la valeur du rapport cyclique D (Figure II.13).

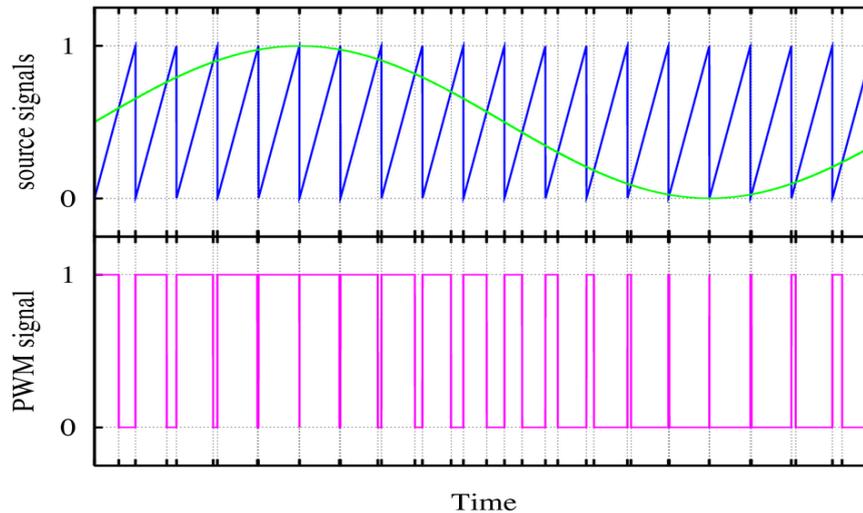


Figure II.13: Signal de commande PWM.

II.6-Les commandes MPPT

La commande MPPT permet de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [10].

II.6.1-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 [8].

Il peut être représenté par le schéma de la figure II.14

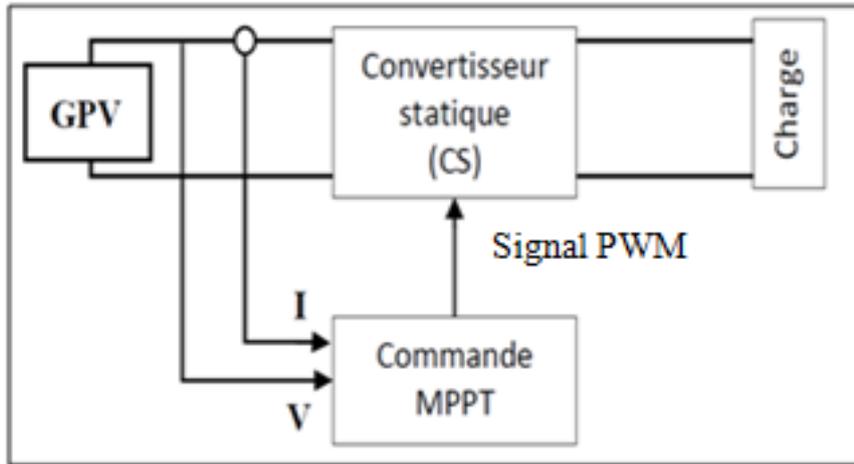


Figure II.14: Chaîne de conversion d'énergie solaire.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, 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 PPM. 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 PPM.

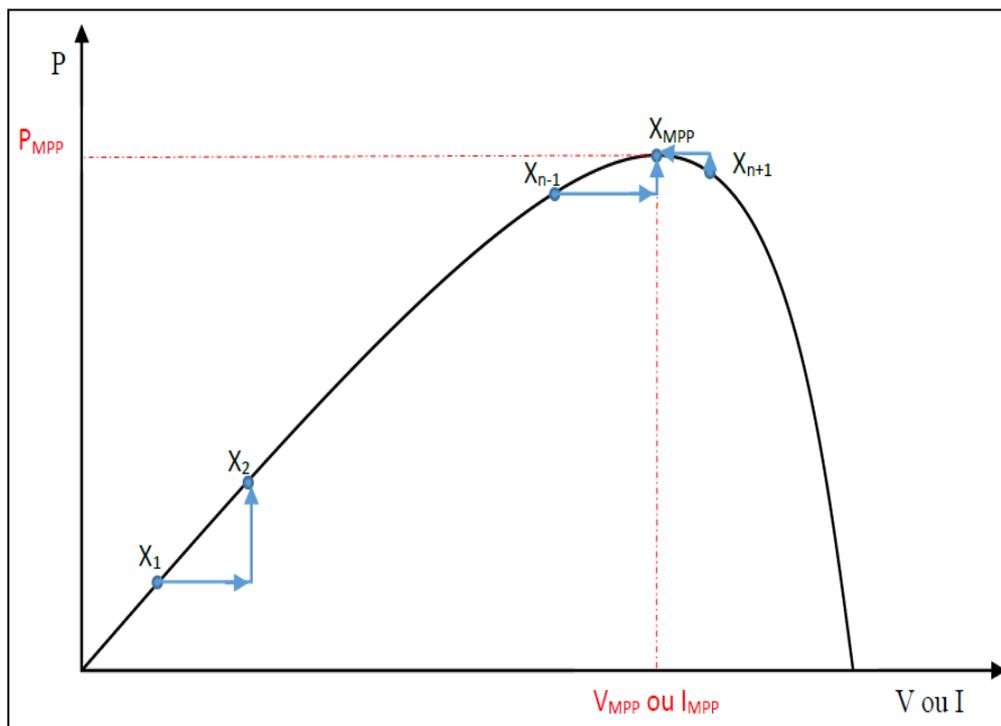


Figure II.15: Principe de la commande MPPT.

II.6.2-Techniques MPPT

Les techniques MPPT sont apparues depuis 1968 en commençant par les applications spatiales, on peut trouver actuellement dans la littérature scientifique plus d'une vingtaine de méthodes MPPT. Ces techniques varient dans la complexité, la rapidité, la robustesse, et la stabilité, les méthodes les plus utilisées sont [11] :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage).
- Algorithme du Courant constant (Constant Current).
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe).
- Incrémentation de la conductance (Inc-Cond, Incremental Conductance).
- Contrôleur Flou (FLC).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié quelques types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur dévolteur, hacheur survolteur, et le hacheur survolteur-dévolteur, la commande MPPT ainsi que le convertisseur DC-AC et la commande PWM.

Dans le chapitre suivant nous allons nous intéresser à l'étude des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale les plus utilisés dans les systèmes de conversion photovoltaïques.

Chapitre III : Les méthodes de commande MPPT

III.1-Introduction

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

Dans ce chapitre, nous présenterons l'aspect théorique de trois méthodes pour le suivie du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont la méthode « perturbation et observation », « incrémentation de la conductance » et « contrôleur à base de logique floue » ainsi que leur avantages et inconvénients.

III.2- Méthode perturbation et observation (P&O, Perturbe 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 fonctionne en perturbant la tension du panneau et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure III.1, on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le PPM. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé dans le tableau III.1 et dans l'organigramme de la figure III.3.

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité [12].

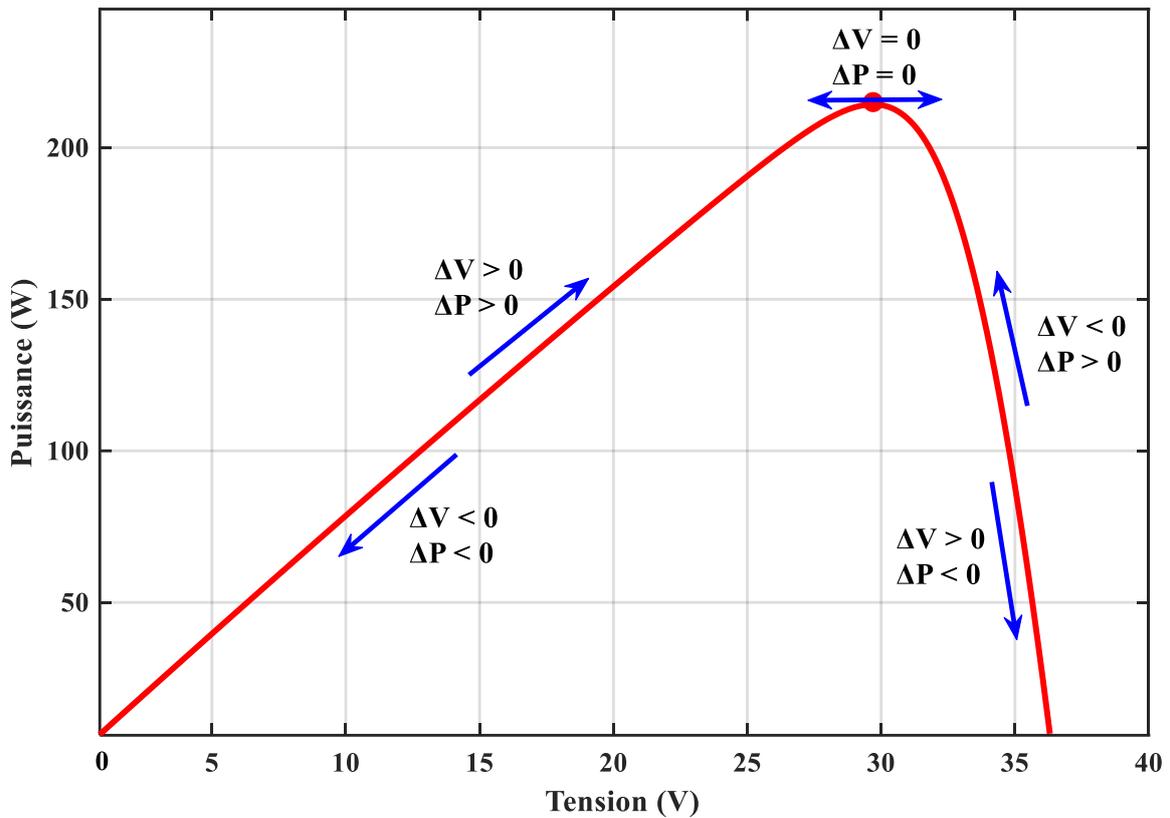


Figure III.1 : Principe de la méthode P&O.

Perturbation de la tension	Changement de la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Tableau III.1: Résumé de l'algorithme P&O.

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le PPM est celle qui varie peu lors d'un changement climatique.

Cette méthode présente un inconvénient lors d'un changement rapide de lumière, dans ce cas la puissance du point de recherche sera perturbée par l'ensoleillement et non pas par la perturbation de l'algorithme. Cela peut amener l'algorithme à diverger, par conséquent prendre du temps pour revenir dans le bon sens et plus de temps pour atteindre le PPM.

La figure III.2 illustre ce problème. Supposons qu'on est au point A en allant vers la droite dans le bon sens de recherche ($\Delta V > 0$), si l'on suppose que l'ensoleillement ne change pas (ou change lentement) la prochaine puissance mesurée au point B et supérieure ($\Delta P > 0$) donc on augmente V ce qui nous rapproche du PPM. Mais si un changement brusque de lumière (diminution dans notre exemple) se produit on passe au point C et la puissance dans ce cas est plus faible ($\Delta V > 0$ et $\Delta P < 0$) donc la tension sera diminuée et par conséquent on s'éloigne du PPM [11].

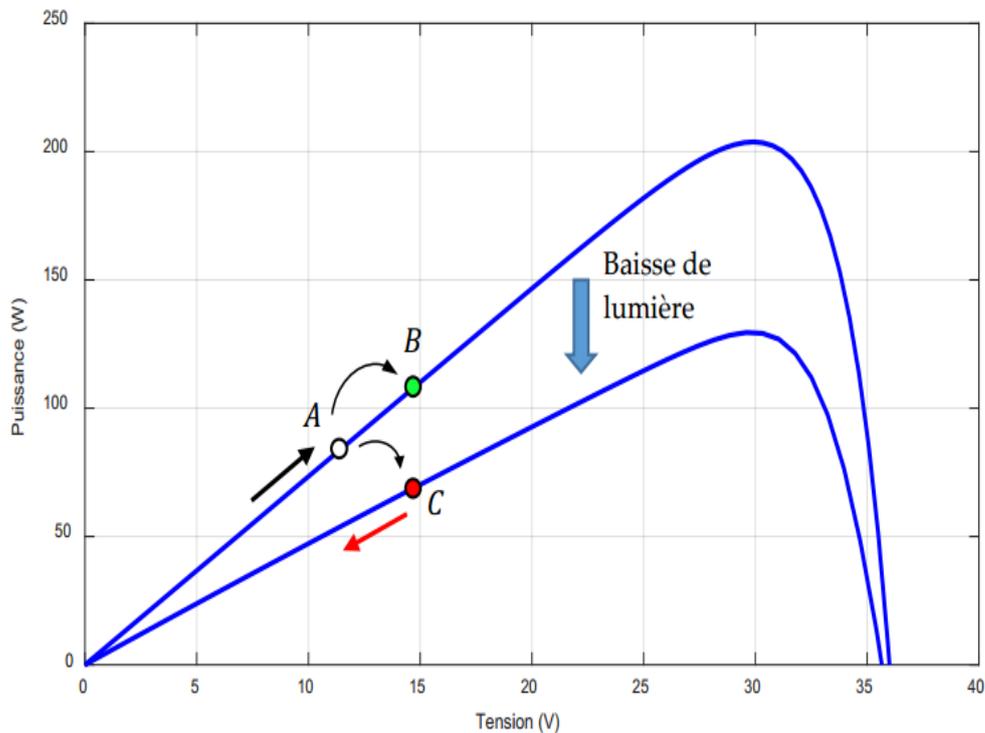


Figure III.2: Changement rapide de l'éclairement dans le cas de la commande P&O.

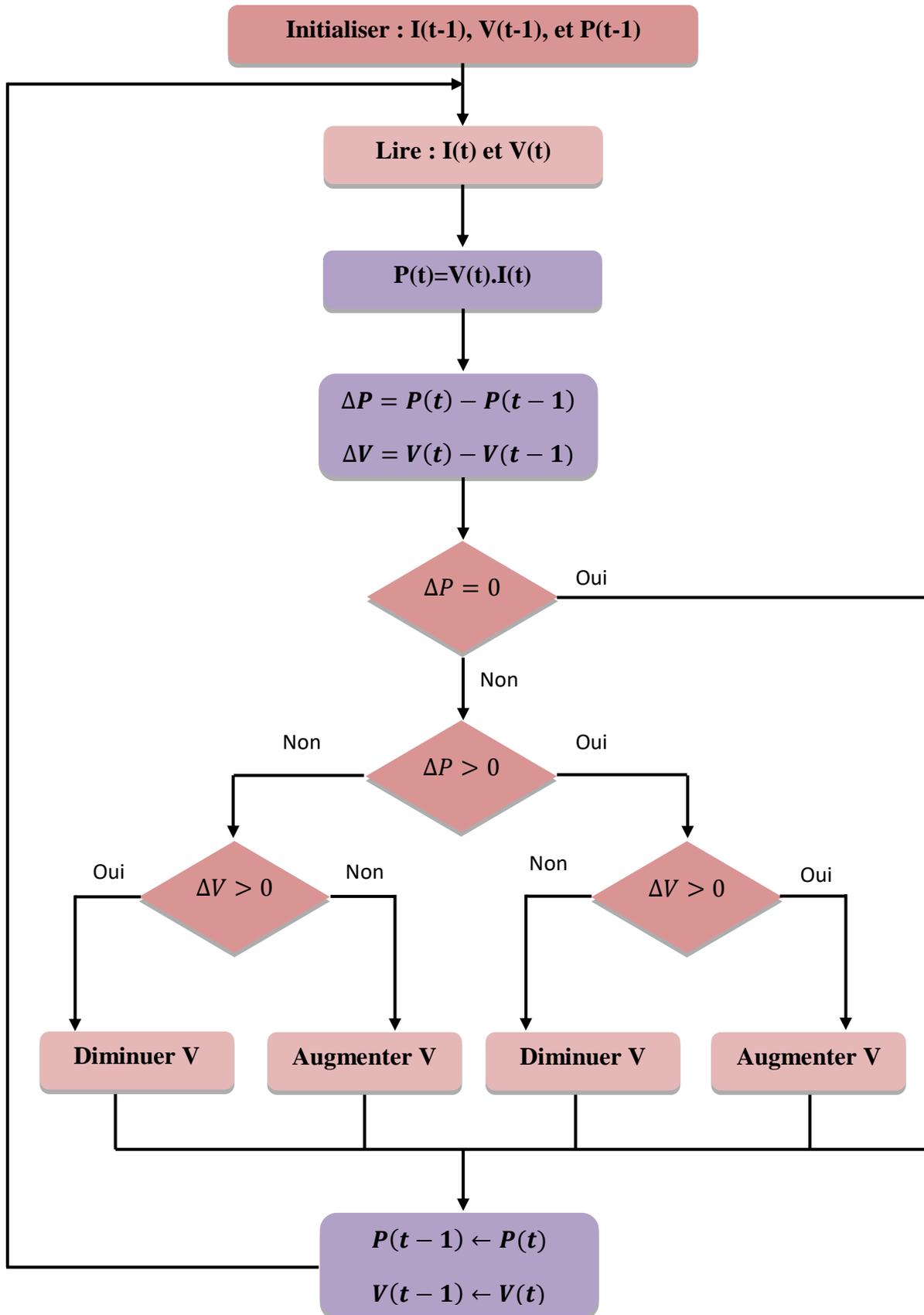


Figure III.3: Organigramme de la méthode P&O.

III.2.1-Les avantages et les inconvénients

Avantages

- La structure de régulation simple.
- Le nombre des paramètres à mesurer réduit.

Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [14].

III.3-Méthode incrémentation de la conductance

Inc-cond est aussi une méthode facile à implémenter et largement utilisée, elle vient remédier au problème de la divergence de la méthode P&O dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement [11].

Elle est basée sur l'évaluation de la conductance et la variation de la conductance du générateur photovoltaïque [14]. La conductance est une grandeur physique relativement connue: il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ($G = I/V$) La variation de la conductance est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ($dG = dI/dV$) En comparant la conductance G à l'incrément de la conductance dG , on va chercher le maximum de la puissance délivrée par le GPV. Précisément, la puissance en sortie de la source peut s'écrire:

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \cdot I \quad (\text{III-1})$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I = V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (\text{III-2})$$

Donc, l'équation (III-3) peut être écrite comme suit :

$$\text{Si } \frac{\Delta P}{\Delta V} > 0 \text{ et } \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ à gauche du PPM} \rightarrow \text{Augmenter } V \quad (\text{III-3})$$

$$\text{Si } \frac{\Delta P}{\Delta V} < 0 \text{ et } \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ à droite du PPM} \rightarrow \text{Diminuer } V \quad (\text{III-4})$$

$$\text{Si } \frac{\Delta P}{\Delta V} \approx 0 \text{ et } \frac{\Delta I}{\Delta V} \approx -\frac{I}{V}, \text{ au voisinage du PPM} \quad (\text{III-5})$$

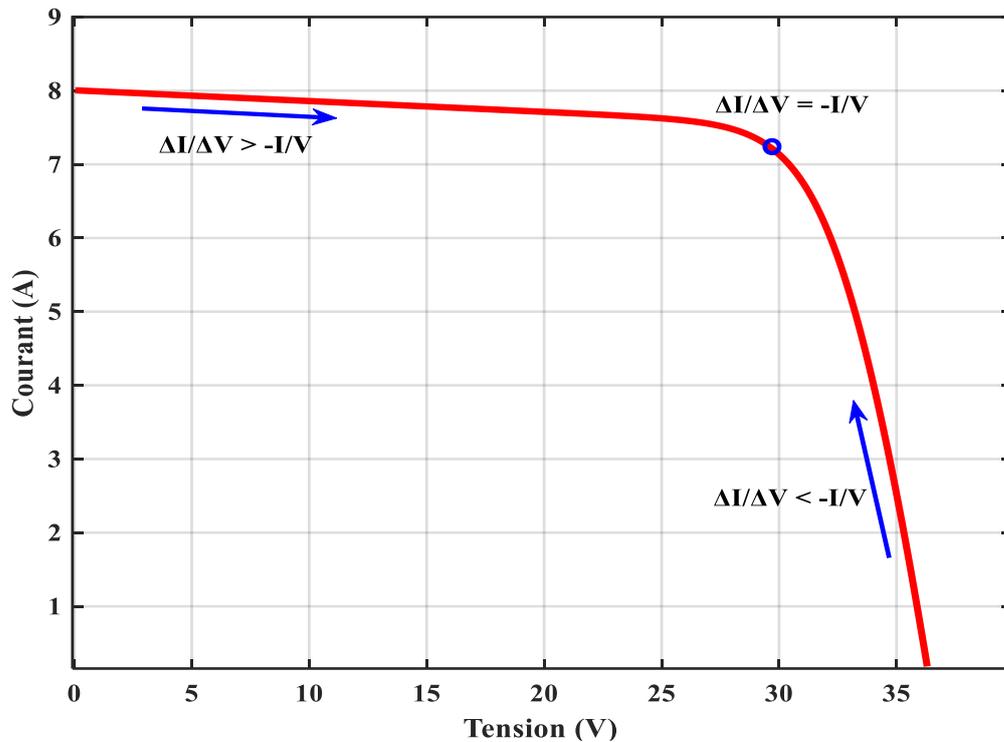


Figure III.4: Principe de la MPPT avec la méthode IC.

La figure III.5 donne l'organigramme de la méthode de l'incrément de la conductance. La valeur actuelle et la valeur précédente de la tension et du courant du GPV sont utilisées pour calculer les valeurs de dI et de dV . Si $dV = 0$ et $dI = 0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le système fonctionne toujours au point de puissance maximale. Si $dI > 0$ et $dV = 0$, alors la quantité de l'irradiation solaire a augmenté, soulevant la tension du point de puissance maximale. Ceci exige au système d'augmenter la tension de fonctionnement du GPV pour repérer le nouveau PPM. Réciproquement, si $dI < 0$, la quantité de l'irradiation solaire a diminué, abaissant ainsi la tension du PPM et exigeant au système de diminuer la tension de fonctionnement du GPV. Si les changements de la tension et du courant ne sont pas nuls, les rapports des équations (III.3) et (III.4) sont employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le PPM.

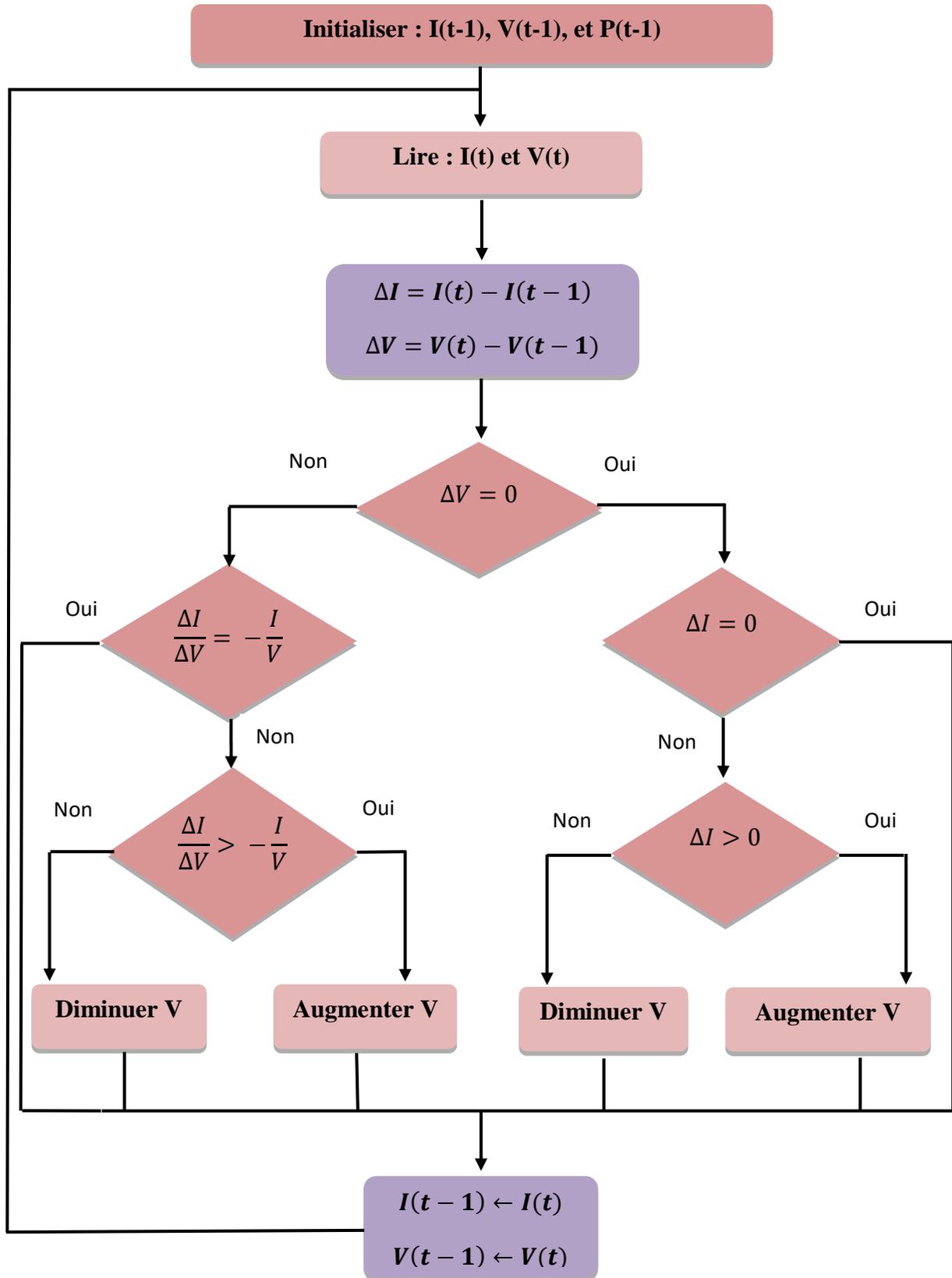


Figure III.5: Organigramme de la méthode IC

III.3.1-Les avantages

Avantage

- Offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques.

III.4-La commande par logique floue

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du PPM, l'avantage de cette commande 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. La commande floue exploite des connaissances et des expériences acquises par l'opérateur à l'aide des règles basées sur un vocabulaire symbolique. 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 ΔD (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.

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

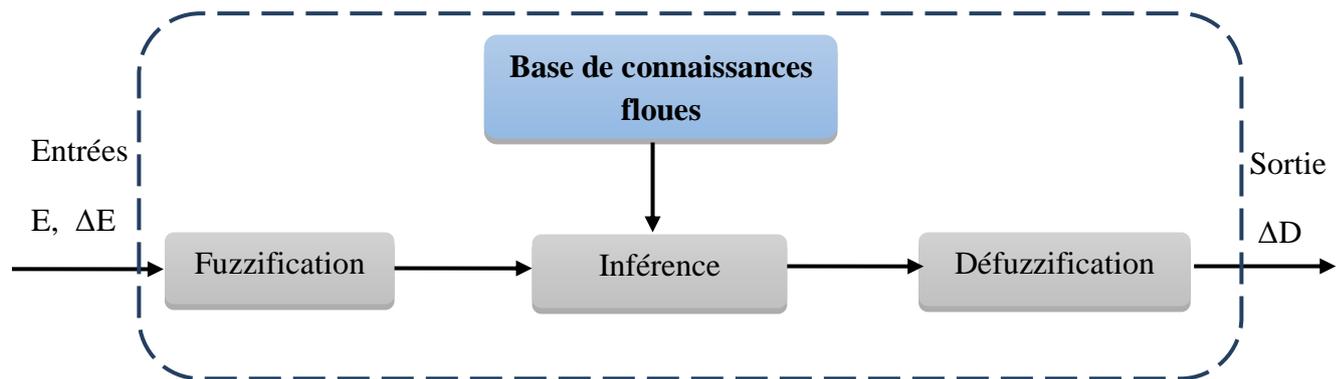


Figure III.6: Structure générale d'un système basé sur la logique floue.

III.4.1-Fonctions d'appartenance

Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelée « facteur d'appartenance » [13].

Les fonctions d'appartenances les plus utilisées sont :

- La fonction triangulaire.
- La fonction trapézoïdale.
- La fonction en cloche.

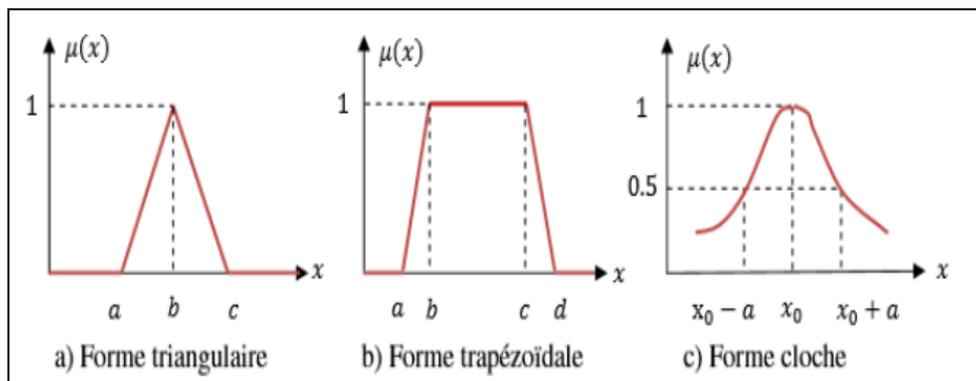


Figure III.7: Fonctions d'appartenance.

III.4.2-Opérateur de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classique, l'ensemble flou est traduit par les opérateurs d'union, d'intersection aussi de négation, et des opérations habituelles telles que addition, soustraction et multiplication.

- **Opérateur NON**

$$c = \bar{a} = \text{NON}(a) \quad (\text{III-6})$$

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_a(x) \quad (\text{III-7})$$

- **Opérateur ET**

C'est l'intersection de deux ensembles « $a \cap b$ », mais dans la logique floue l'opérateur «ET» est représenté par une fonction de minimum appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c = \min\{\mu_a(x), \mu_b(x)\} \quad (\text{III-8})$$

Où :

μ_a, μ_b, μ_c signifient respectivement les degrés d'appartenance aux ensembles a, b et c.

On parle alors d'opérateur minimum.

- **Opérateur OU**

C'est l'union de deux ensembles « $a \cup b$ », mais dans la logique floue l'opérateur « OU » est représenté par une formation maximale appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c = \max\{\mu_a(x), \mu_b(x)\} \quad (\text{III-9})$$

On constate que la logique classique est un cas particulier de la logique floue. Autrement dit la logique floue est une extension de la logique classique [13].

III.4.3-Fuzzification

L'objectif de la fuzzification est de définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables qui permettent de rendre flou les variables d'entrées. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrées en variables linguistiques ou variables floues [19].

Elle se déroule généralement en trois étapes :

1. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées (univers de discours)
2. Partitionner en classes floues l'univers de discours
3. définir les fonctions d'appartenances des classes floues précédentes [11].

L'erreur et le changement d'erreur sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et de la tension comme suit :

$$E(t) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(t)-P(t-1)}{V(t)-V(t-1)} \quad (\text{III-10})$$

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t - 1) \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$P(t)$: Puissance actuelle [W].

$P(t-1)$: Puissance précédente [W].

ΔP : Variation de la puissance [W].

$V(t)$: Tension actuelle [V].

$V(t-1)$: Tension précédente [V].

ΔV : Variation de la tension [V].

$E(t)$: L'erreur à l'instant t actuel (dérivée de la puissance).

$E(t-1)$: L'erreur à l'instant précédent (dérivée de la puissance).

$\Delta E(t)$: La variation de l'erreur.

Les variables d'entrées linguistiques E et ΔE peuvent prendre respectivement les valeurs suivantes N(Négatif), Z(Zéro), P(Positif) et D(Décroit), S(Stable), C(Croit).

Et la variable de sortie ΔV prend comme valeurs linguistiques Dim(Diminuer), Inch(Inchangé) et Aug (Augmenter). (Figure III.8)

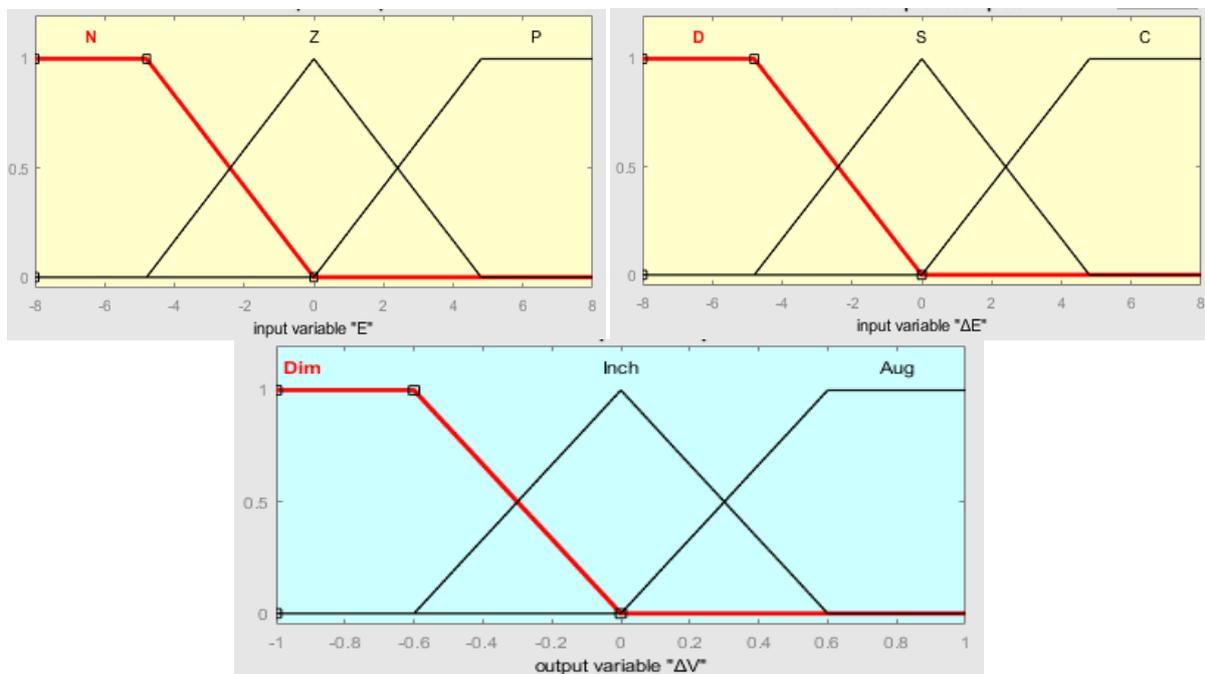


Figure III.8: Structure de base de la commande floue.

III.4.4-Base de connaissances floues

Ce Bloc comprend les définitions des fonctions d'appartenance des variables d'E/S ainsi que les règles d'inférence. Celles-ci constituent le noyau du contrôleur, elles caractérisent souvent une connaissance vague et qualitative du système à contrôler. Elles sont exprimées comme un ensemble de propositions conditionnelles linguistiques de la forme « *SI - ALORS* » formulant les associations « condition – action » facilement interprétées par les implications floues [12].

III.4.5-Inférence

L'inférence (le raisonnement flou) est une étape qui consiste à définir un rapport logique liant les entrées à la sortie. Les systèmes utilisant la logique floue utilisent des règles de type : *SI...ET...ALORS...*

En fonction de l'évolution des variables d'entrées et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau III-2, une valeur est attribuée au paramètre de sortie ΔV .

ΔV		ΔE		
		D	S	C
E	N	Dim	Dim	Dim
	Z	Dim	Inch	Aug
	P	Aug	Aug	Aug

Tableau III.2: Matrice d'inférences.

- Si $E = N$ (négatif), donc le point se situe à droite ; **ET** $\Delta E = D$ (décroit), ce qui veut dire qu'on se déplace vers la droite ; **ALORS** $\Delta V = \text{Dim}$ (Diminuer), il faut donc changer de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).
- Si $E = N$ (négatif), le point se situe à droite; **ET** $\Delta E = S$ (Stable), ce qui veut dire qu'il n'y a pas de déplacement; **ALORS** $\Delta V = \text{Dim}$ (Diminuer), il faut se déplacer vers la gauche (diminuer V).
- Si $E = N$ (négatif), le point se situe à droite ; **ET** $\Delta E = C$ (Croît), ce qui veut dire qu'on se déplace vers la gauche ; **ALORS** $\Delta V = \text{Dim}$ (Diminuer), il faut rester dans cette direction (continuer à diminuer V).

- Si $E=Z$ (zéro), on est au PPM ; **ET** $\Delta E = D$ (décroit), ce qui veut dire qu'on se déplace vers la droite ; **ALORS** $\Delta V = \text{Dim}$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (diminuer V).
- Si $E=Z$ (zéro), on est au PPM ; **ET** $\Delta E = S$ (Stable), pas de déplacement ; **ALORS** $\Delta V = \text{Inch}$, pas besoin de se déplacer.
- Si $E=Z$ (zéro), on est au PPM ; **ET** $\Delta E = C$ (Croît), on se déplace vers la gauche ; **ALORS** $\Delta V = \text{Aug}$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter V).
- Si $E=P$ (positif), le point se situe à gauche ; **ET** $\Delta E = D$ (décroit), on se déplace vers la droite ; **ALORS** $\Delta V = \text{Aug}$, il faut rester dans cette direction (continuer à augmenter V).
- Si $E=P$ (positif), le point se situe à gauche ; **ET** $\Delta E = S$ (Stable), pas de déplacement ; **ALORS** $\Delta V = \text{Aug}$, il faut augmenter V.
- Si $E=P$ (positif), le point se situe à gauche ; **ET** $\Delta E = C$ (Croît), on se déplace vers la gauche ; **ALORS** $\Delta V = \text{Aug}$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter V).

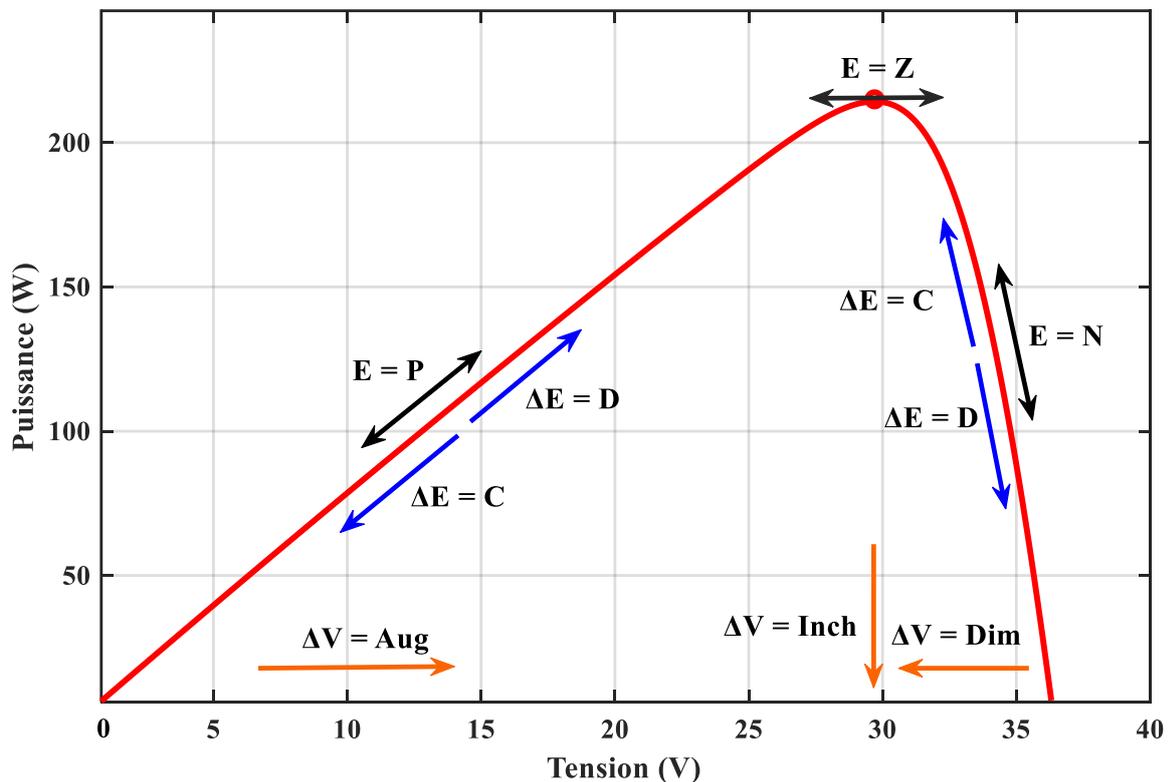


Figure III.9 : Principe de la commande logique floue.

III.4.6-Défuzzification

La défuzzification est la dernière étape de la logique floue. Avant que les sorties d'inférence soient appliquées sur le processus à contrôler, ces dernières qui sont représentées comme des degrés d'appartenance aux fonctions de la sortie, doivent être converties.

Alors l'étape de la défuzzification consiste à convertir ces valeurs floues en variables réelles (numériques) qui peuvent être utilisées. Dépendamment de la forme de la sortie voulue, du type de contrôle, du type des fonctions d'appartenance de la sortie, il existe trois méthodes fondamentales de défuzzification, la plus utilisée est l'opérateur « centre de gravité » qui est donné par l'équation suivante :

$$\Delta V = \frac{\sum \mu(\Delta V) \cdot \Delta V}{\sum \mu(\Delta V)} \quad (\text{III-12})$$

III.4.7-Avantages et inconvénients

Avantages

- Résultats plus précis.
- La non nécessité d'une modélisation mathématique du système à régler.
- L'incorporation directe des informations floues et linguistiques provenant d'un expert humain.

Inconvénient

- Manque de directives précises pour la conception d'un régulateur.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons fait l'étude des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale les plus utilisés dans les systèmes de conversion photovoltaïques et leurs principes de fonctionnement avec les organigrammes de chaque méthode.

Dans le dernier chapitre, nous allons simuler le système PV et discuter les résultats de chaque commande MPPT.

Chapitre IV: Analyse des performances des commandes MPPT

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.

Le logiciel MATLAB de MathWorks, et son extension graphique associée Simulink, présentent la possibilité de simuler des systèmes mixtes continus et discrets. Il est donc bien adapté pour mettre en œuvre, tester et évaluer les systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré à l'étude comparative entre les trois méthodes MPPT (P&O, Inc-Cond et logique floue), détaillées dans les chapitres précédents.

IV.2-Simulation du système photovoltaïque

La figure suivante représente les paramètres du panneau photovoltaïque utilisé :

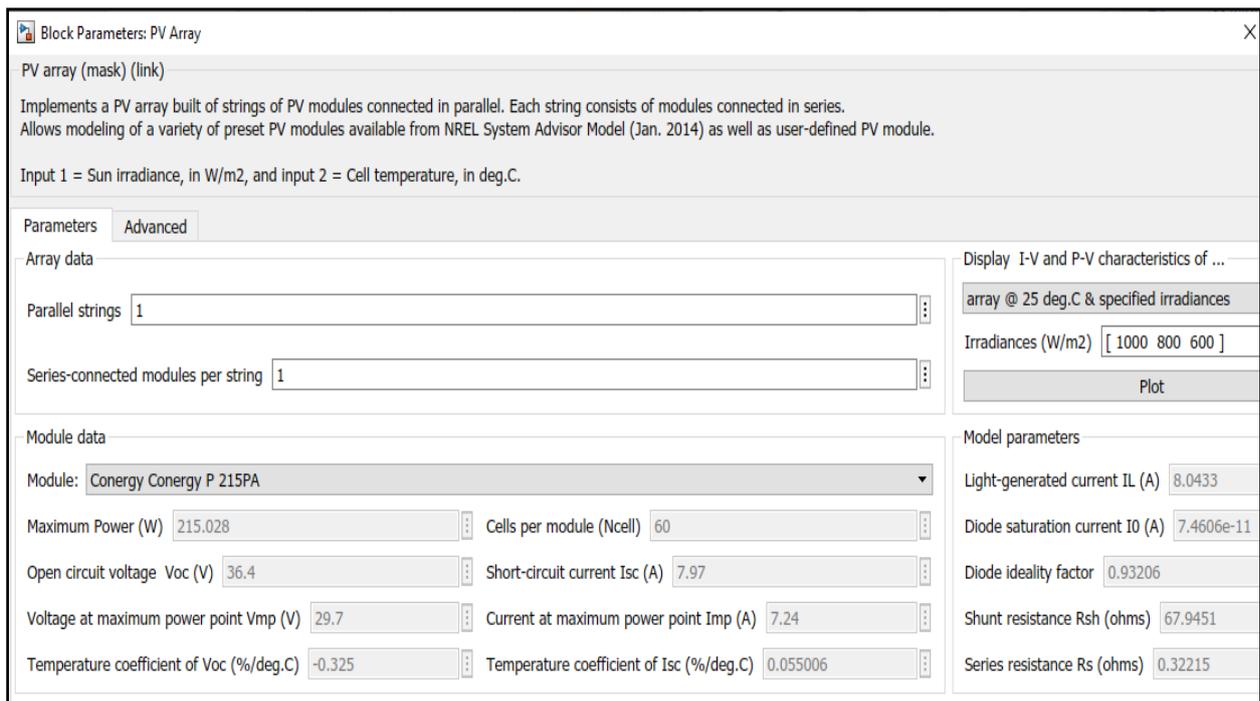


Figure IV.1 : Paramètres du panneau utilisé.

IV.3-simulation du convertisseur Boost sous Matlab/Simulink

La figure IV.2 montre la structure du convertisseur Boost reliée à une charge résistive, alimentée par une tension d'entrée $V_e = 30V$ et commandée par un signal MLI (PWM en anglais).

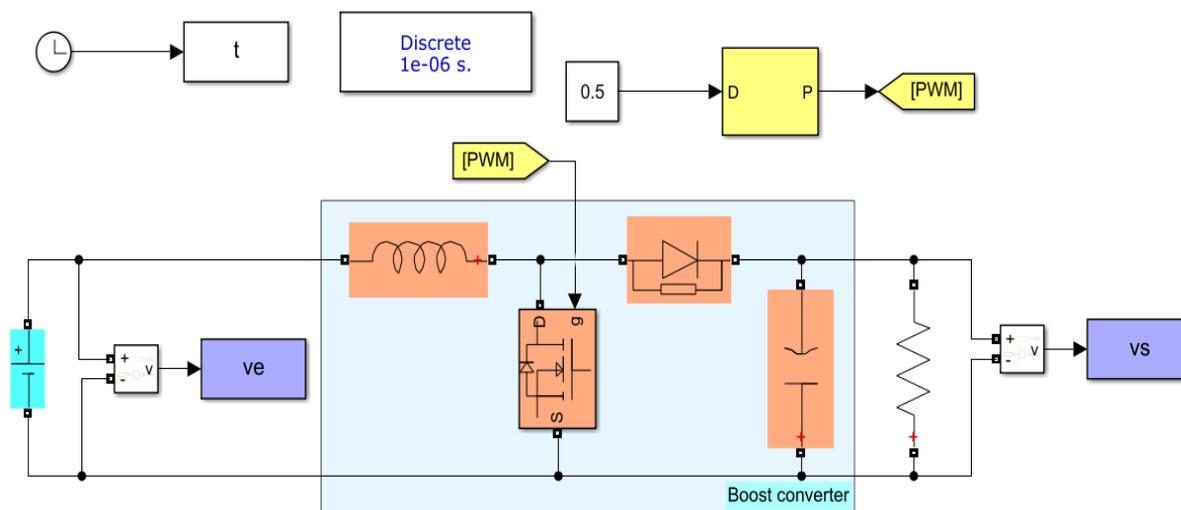


Figure IV.2: Modèle du convertisseur DC/DC Boost sous Matlab/Simulink

Selon l'équation (II-8) on peut extraire la valeur du rapport cyclique au point de puissance maximale:

$$\alpha = 1 - \frac{V_e}{V_s} = 1 - \frac{29.7}{64} = 0.54 \quad (\text{IV-1})$$

Le convertisseur Boost fonctionne en mode conduction continu pour $L > L_B$ d'où

$$L_B = \frac{(1-\alpha)R}{2.f} \quad (\text{IV-2})$$

Avec : $\alpha = 0.54$, $R = 20 \Omega$ et $f = 10^4 \text{ Hz}$

$$\text{Donc } L_B = \frac{(1-0.54)^2 \cdot 0.54 \cdot 20}{2 \cdot 10^4} = 1.4 \times 10^{-4} \text{ H}$$

On prend $L = 1 \times 10^{-3} \text{ H}$

La valeur minimale de la capacité (filtre), qui entraîne l'ondulation de la tension (Voltage ripple), V_r donnée par

$$C_{min} = \frac{\alpha.V_s}{V_R.R.f} \quad (IV-3)$$

Avec $\alpha = 0.54$, $\frac{V_r}{V_s} = 1\% \Rightarrow V_r = 1\% V_s$, $R = 20 \Omega$ et $f = 10^4 \text{ Hz}$

$$C_{min} = \frac{0.54.64}{0.64.20.10^4} = 2.7 * 10^{-4} \text{ F}$$

On prend $C = 3.3 \times 10^{-4} \text{ H}$ (une capacité à valeur normalisé)

Le tableau IV.1 donne les paramètres du convertisseur Boost, et la figure IV.3 montre l'influence du rapport cyclique α sur la tension de sortie, le test a été fait pour $\alpha = 0.5$.

Composants	Valeurs
Inductance L (H)	1×10^{-3}
Capacité C(F)	3.3×10^{-4}
La charge résistive R(Ω)	20
Fréquence du générateur PWM F(HZ)	10^4

Tableau IV.1: Paramètres du convertisseur DC/DC Boost.

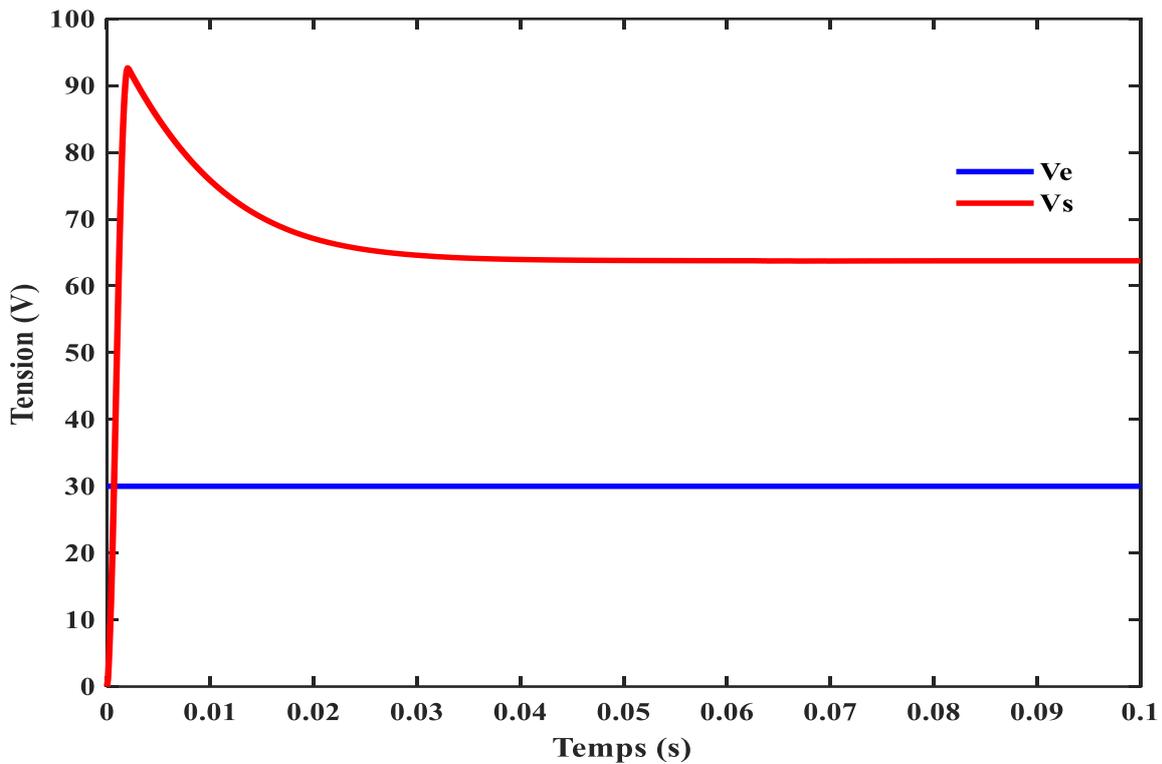


Figure IV.3: Tension d'entrée et de sortie pour $\alpha = 0.5$

IV.4-Simulation de la méthode P&O

La figure IV.4 illustre le modèle du système PV commandé par la technique P&O sous Matlab/Simulink.

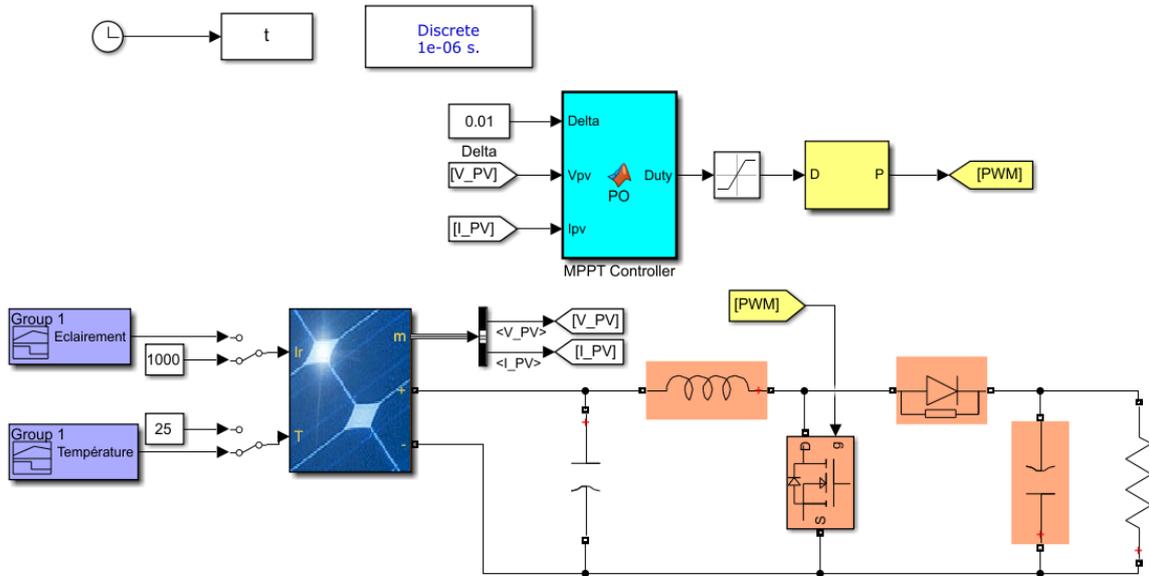


Figure IV.4: Schéma Matlab/Simulink d'un système PV avec la méthode P&O.

Pour une première simulation, nous allons garder le système sous les conditions climatiques standards ($T=25^{\circ}$ et $G=1000\text{W/m}^2$) et un pas de perturbation variable ($\Delta\alpha=0.01$ et $\Delta\alpha=0.001$).

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures IV.5, IV.6 et IV.7:

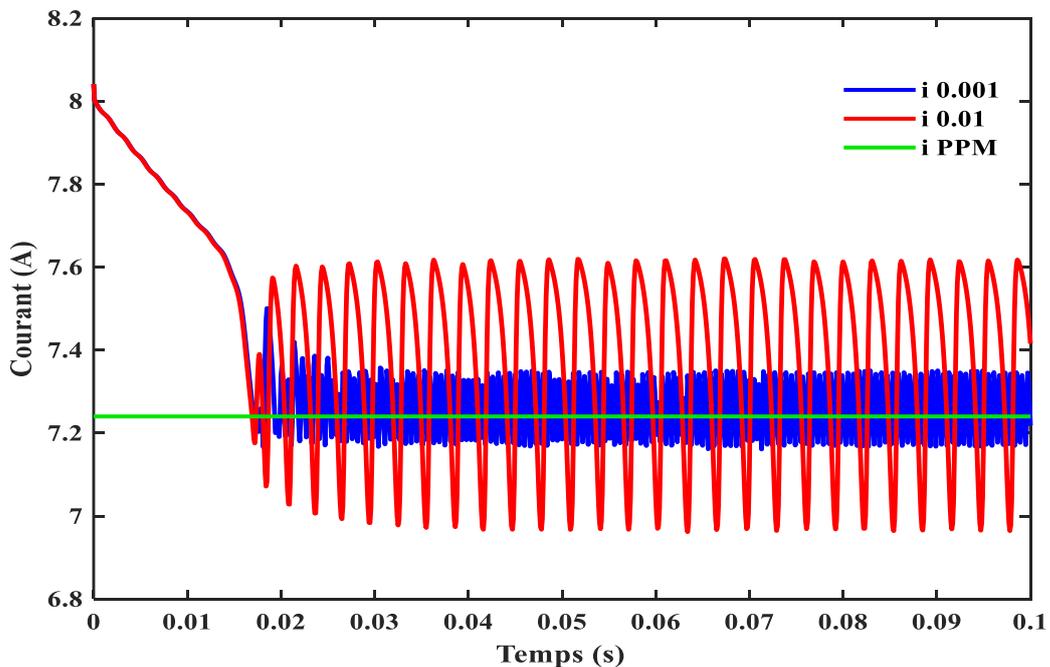


Figure IV.5: Courant du panneau PV avec P&O pour $\Delta\alpha=0.001$ et $\Delta\alpha=0.01$.

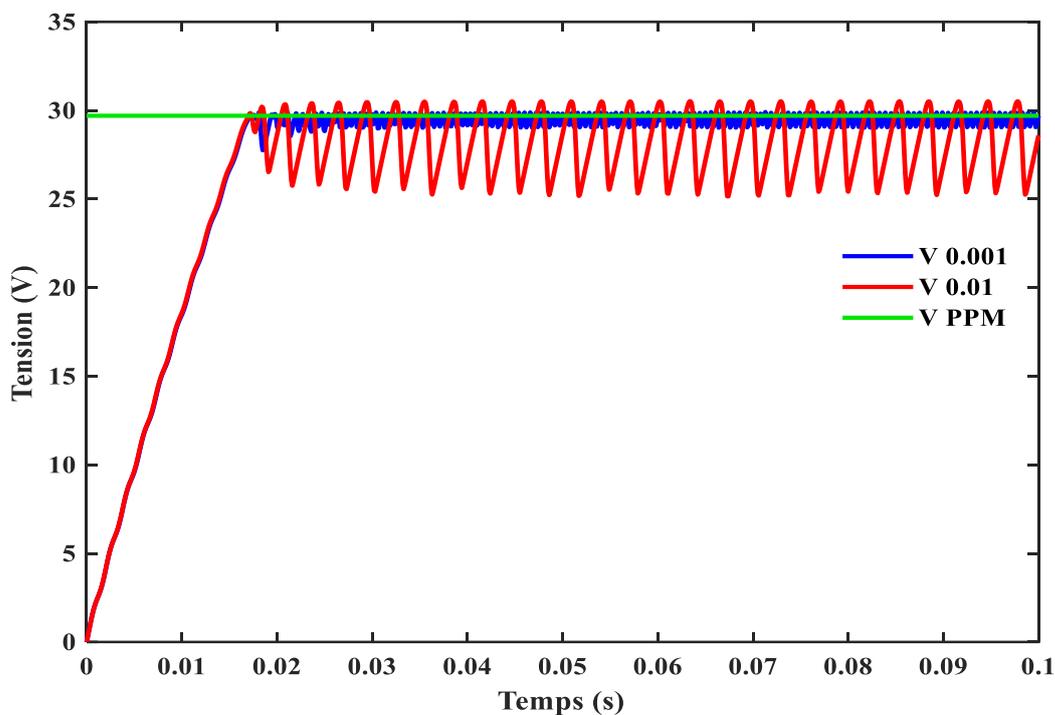


Figure IV.6: Tension du panneau PV avec P&O pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$.

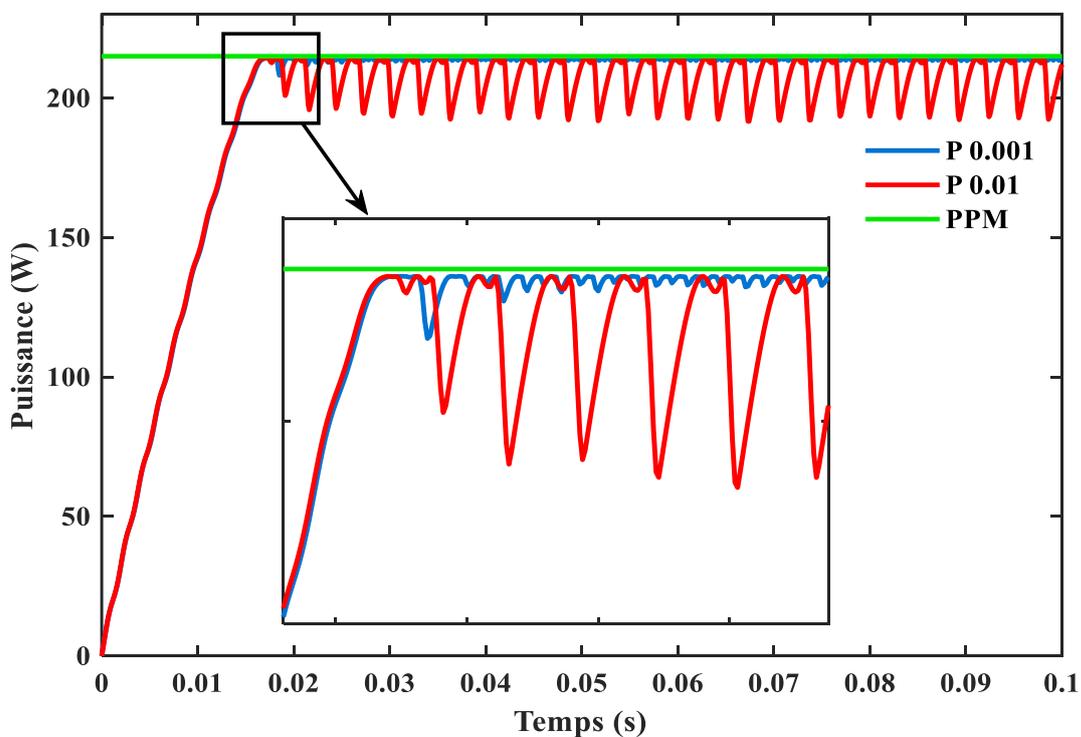


Figure IV.7: Puissance du panneau PV avec P&O pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$

Les figures précédentes montrent que le pas de perturbation a une influence sur le temps de réponse, et les oscillations autour du PPM.

Lorsqu'on perturbe le rapport cyclique α par un grand Pas ($\Delta\alpha = 0.01$) la méthode sera plus rapide mais cela engendre de grandes oscillations de la puissance surtout autour du PPM. Par ailleurs une perturbation de α par un petit Pas ($\Delta\alpha = 0.001$) augmente le temps de réponse et diminue les oscillations au régime permanent.

La figure IV.5 montre que le courant diminue à partir d'une valeur initiale qui correspond au courant de court-circuit $I_{cc} = 7.97A$ pour osciller autour d'une valeur correspondant au courant de point de puissance maximale $I_{ppm} = 7.24A$.

La figure IV.6 montre que l'évolution de la tension a le même comportement que la puissance au régime permanent, elle oscille autour d'une valeur correspondant à la tension du point de puissance maximale $V_{ppm} = 29.7V$.

Pour une deuxième simulation nous allons garder la température constante à $T=25C^{\circ}$ et on fait varier l'éclairement selon le profil de la figure IV.8.

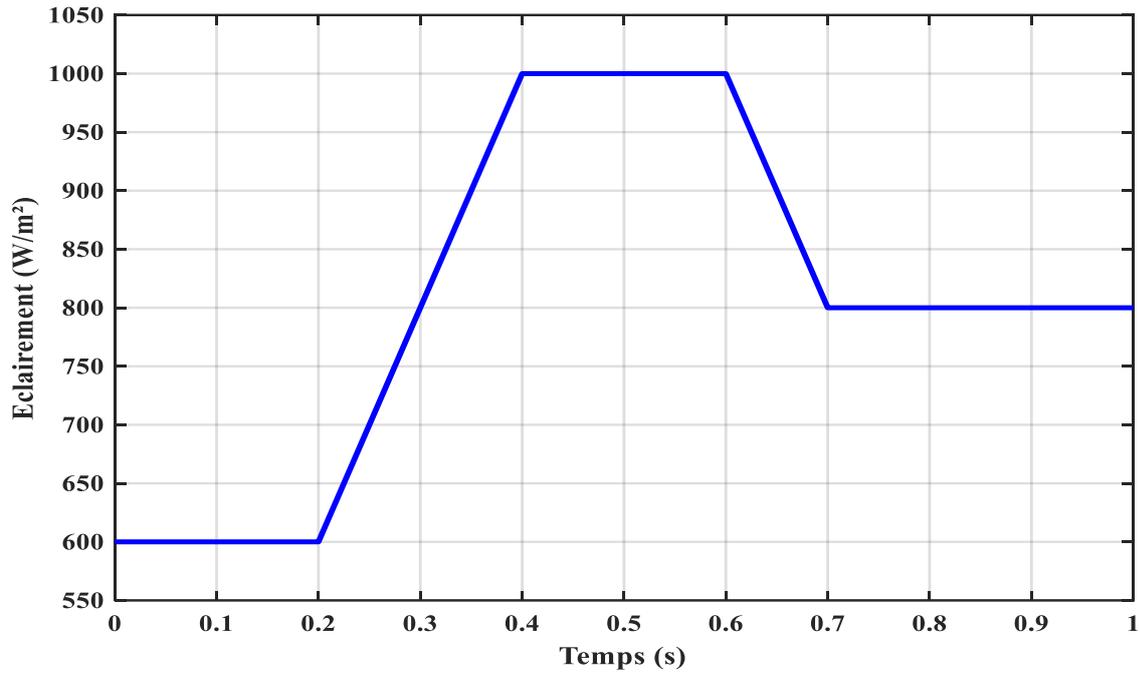


Figure IV.8: Profil de variation de l'éclairement

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes :

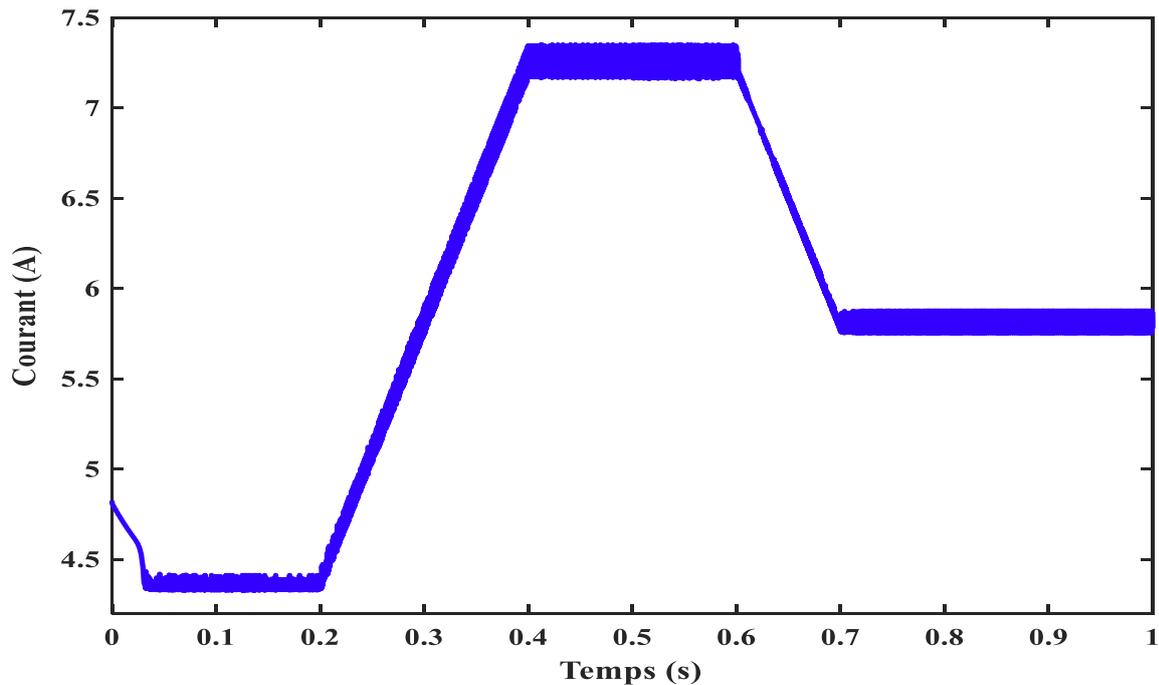


Figure IV.9: Evolution du courant PV obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.

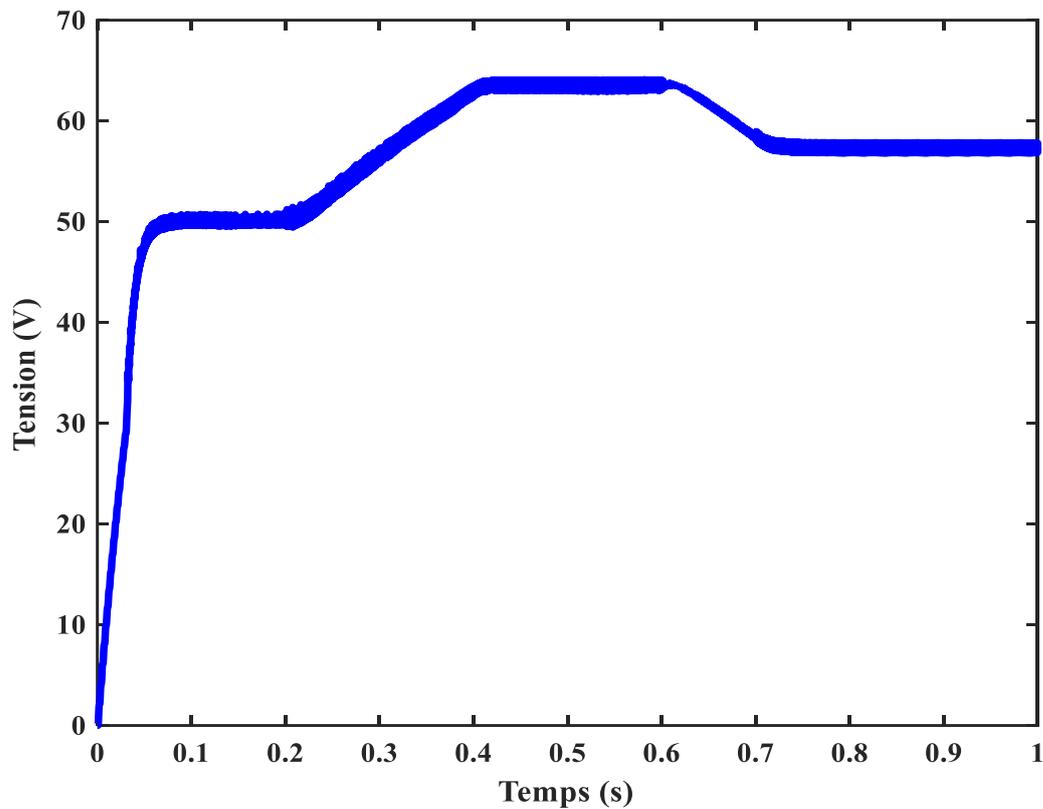


Figure IV.10: Evolution de la tension de charge obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.

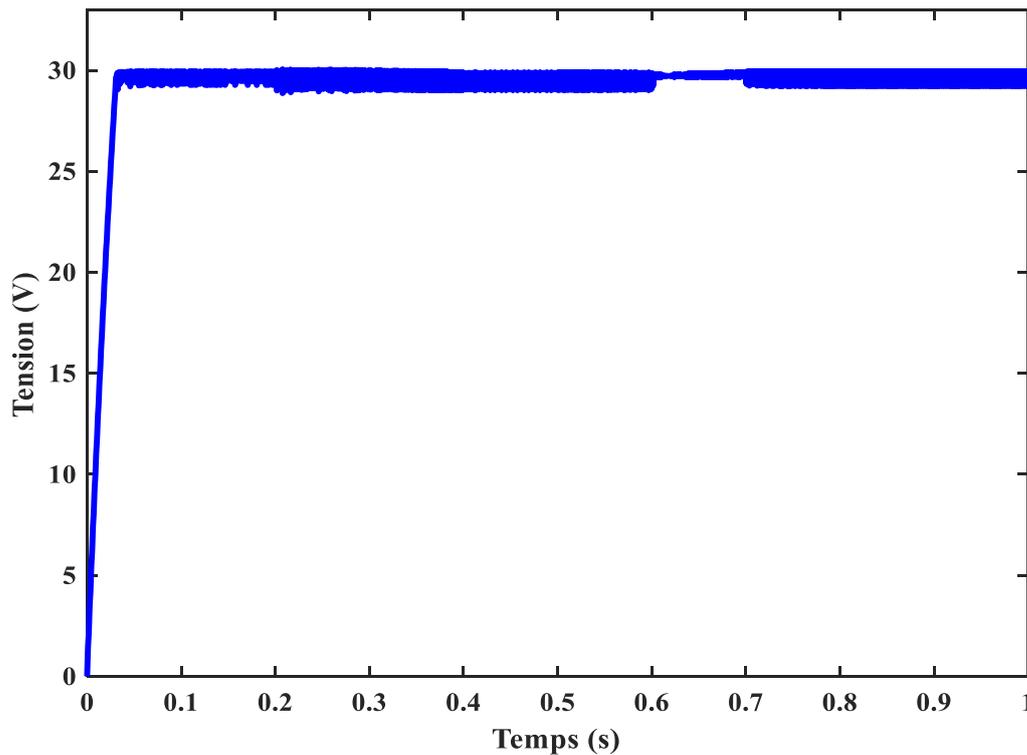


Figure IV.11: Evolution de la tension PV obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.

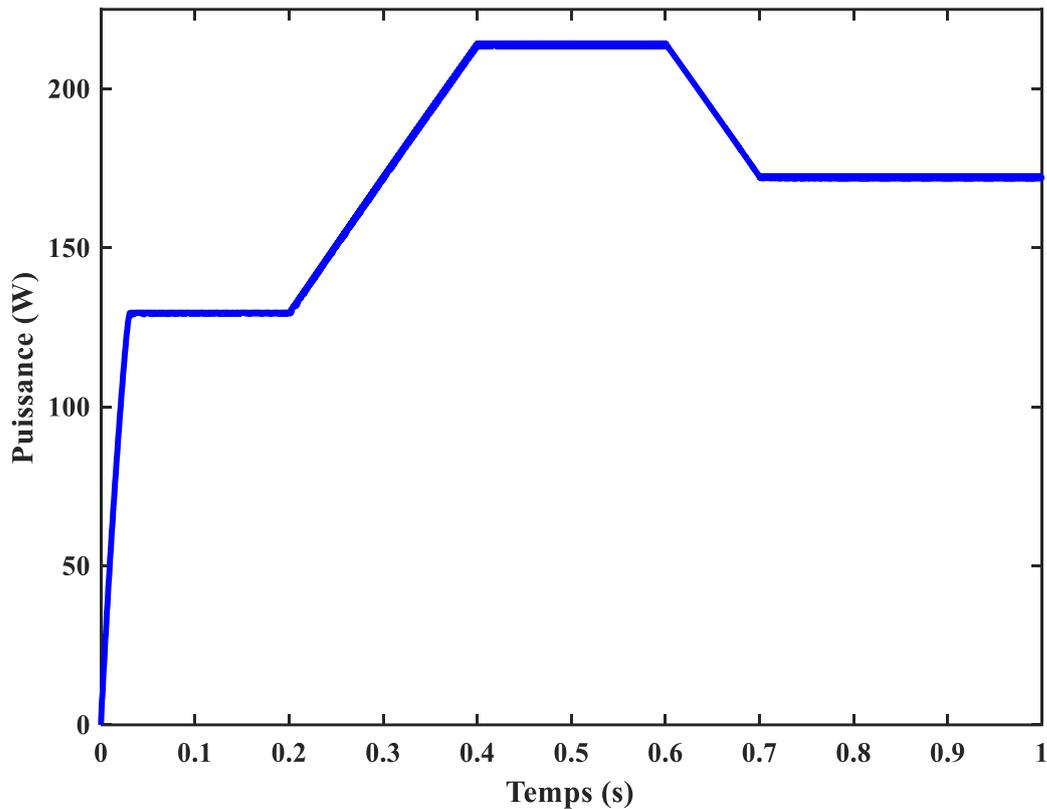


Figure IV.12: Evolution de la puissance PV obtenu par la commande P&O lors du changement de l'éclairement.

Le but de cette simulation est d'observer la réaction du système face aux changements climatiques (Eclairement). Nous remarquons que le courant, la puissance et la tension de charge suivent parfaitement le changement instantané de l'éclairement. Par contre, la tension PV reste inchangée aux variations de l'éclairement.

Pour une dernière simulation nous allons garder l'éclairement constant à 1000W/m^2 et on fait varier la température suivant le profil de la figure IV.13. Les résultats correspondants sont ceux illustrés dans les figures IV.14-17:

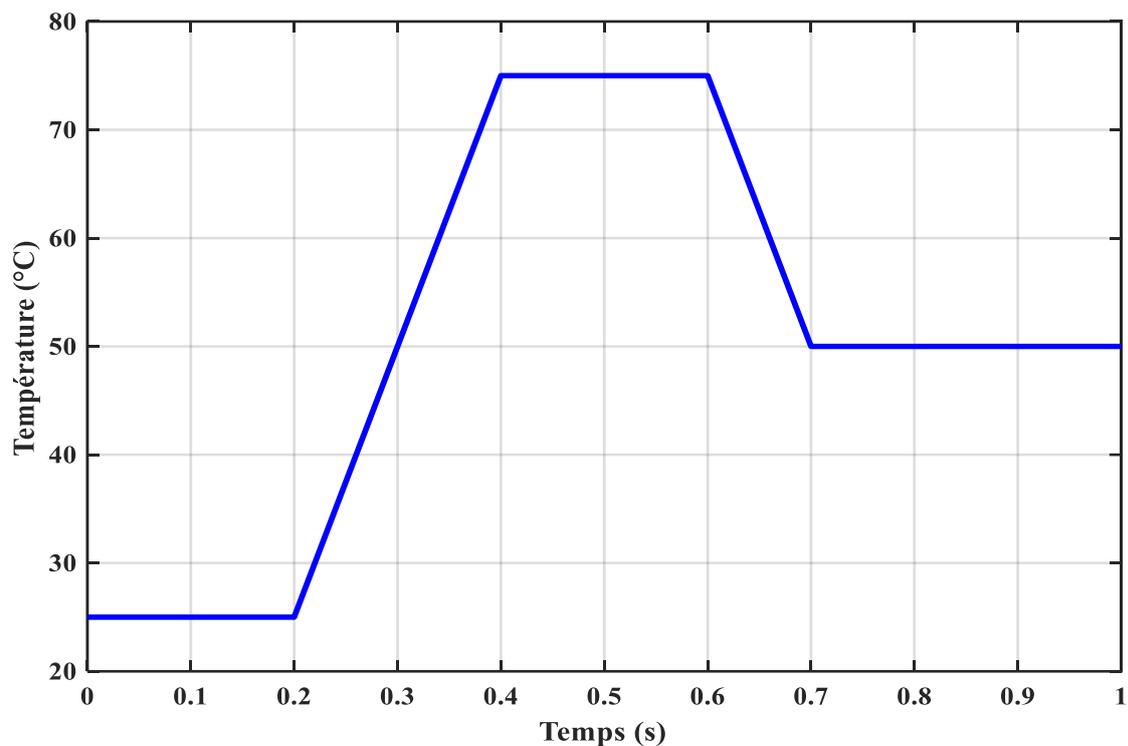


Figure IV.13: Profil de variation de la température.

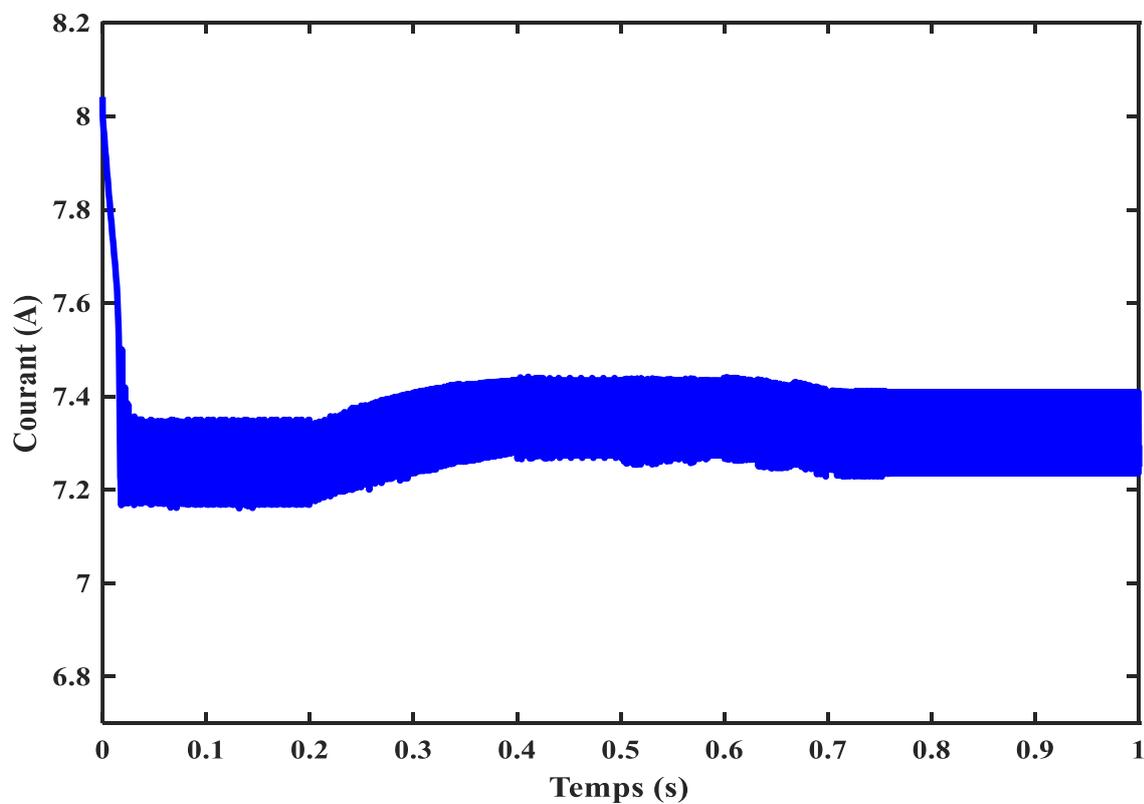


Figure IV.14: Evolution du courant PV obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.

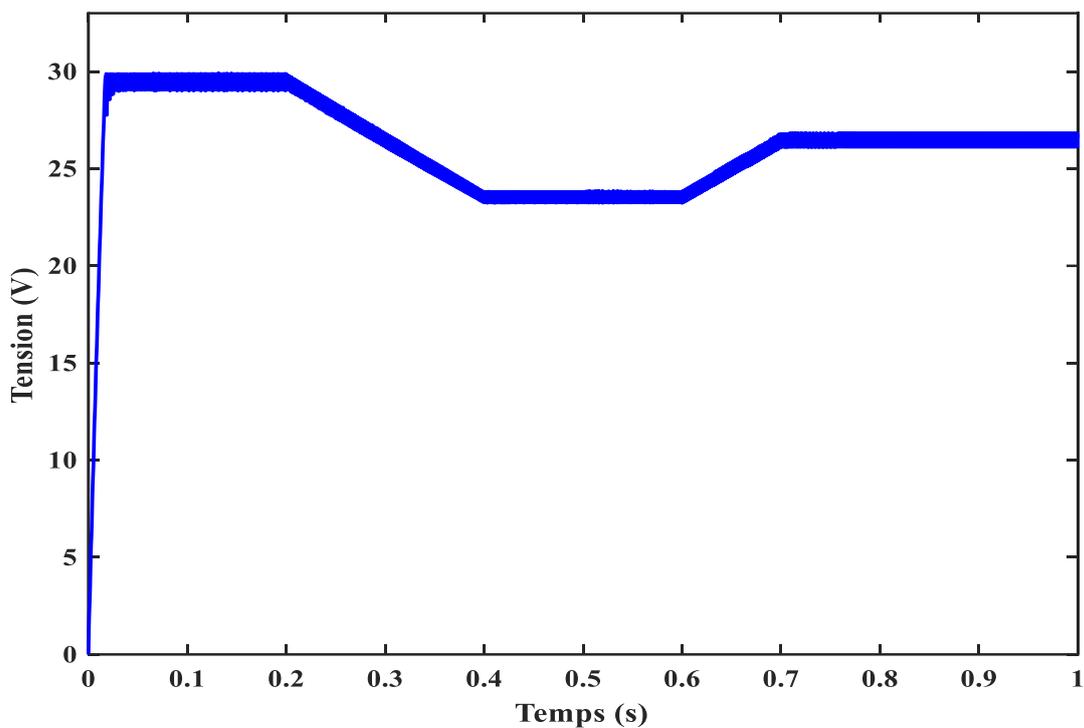


Figure IV.15: Evolution de la tension PV obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.

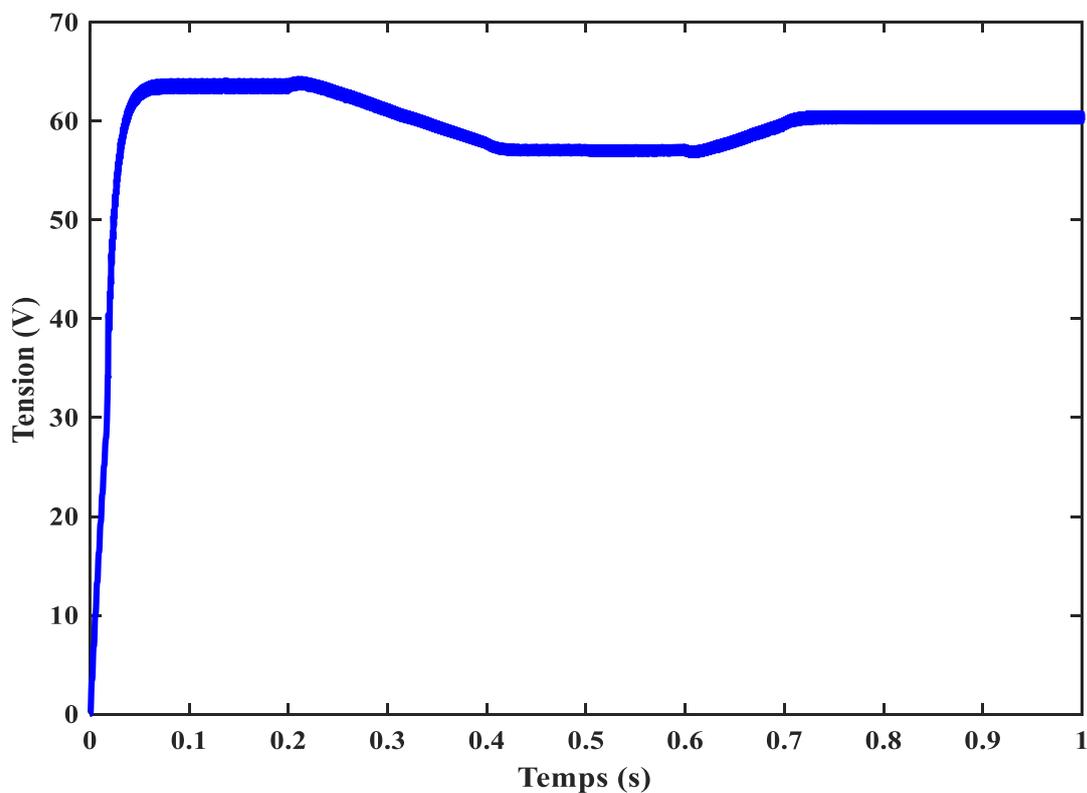


Figure IV.16: Evolution de la tension de sortie obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.

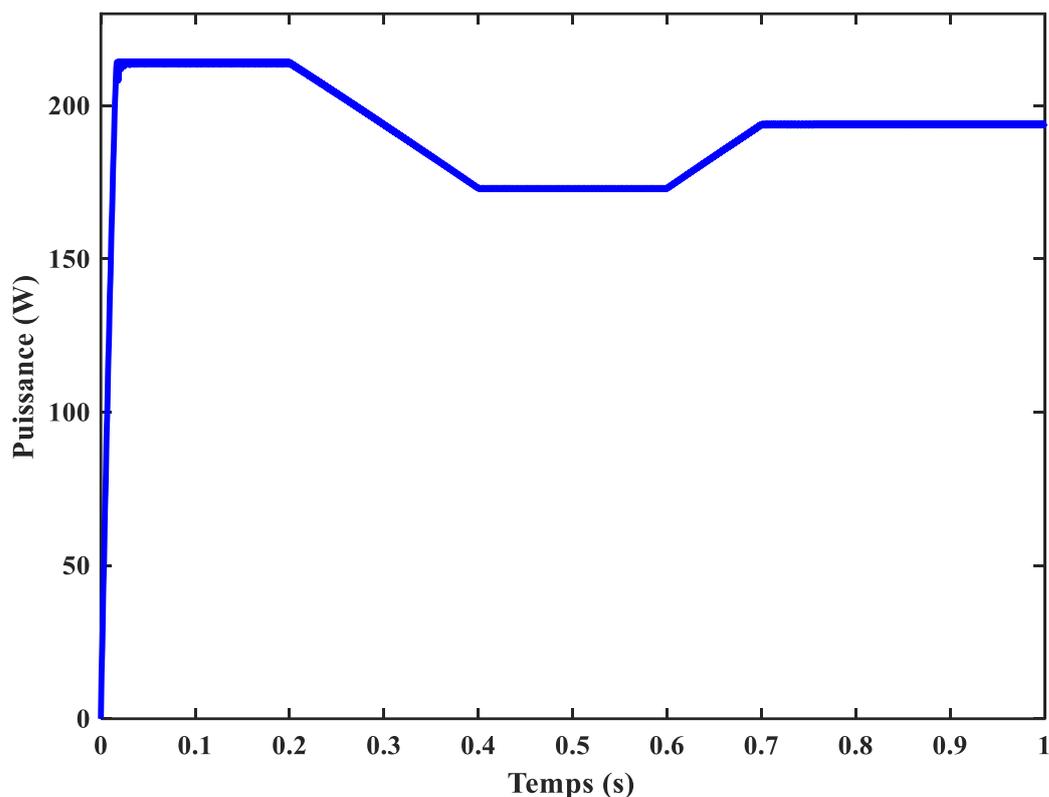


Figure IV.17: Evolution de la puissance PV obtenu par la commande P&O lors du changement de la température.

Nous constatons que la variation de la puissance maximale et la tension optimale en fonction du temps sont inversement proportionnelles avec l'évolution instantanée de la température. Le courant optimal reste quasiment constant (légères variations). Ceci confirme les résultats obtenus dans le chapitre I sur l'étude de l'influence de la température sur la caractéristique « puissance-tension » et la caractéristique « courant-tension ».

IV.5-Simulation du système avec la commande Inc-Cond

On remplace la commande P&O par la commande Inc-Cond (voir la figure IV.18).

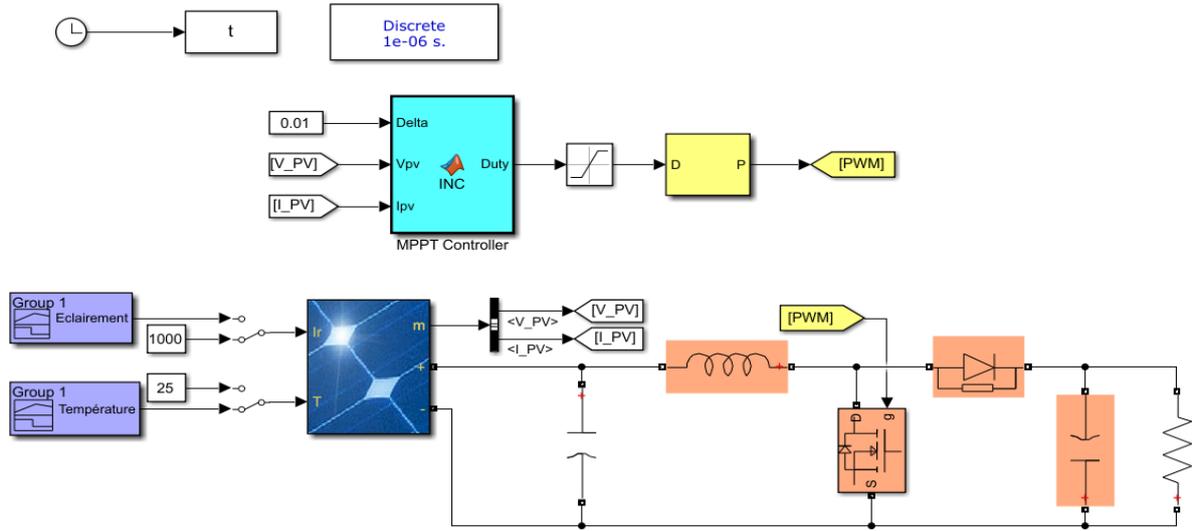


Figure IV.18: Schéma Matlab/Simulink d'un système PV avec la commande Inc-Cond.

Les résultats de simulation du fonctionnement sous les conditions climatiques standards ($T=25^{\circ}$ et $G=1000\text{w/m}^2$) sont représentés par les figures suivantes pour un pas de perturbation de 0.01 et 0.001 :

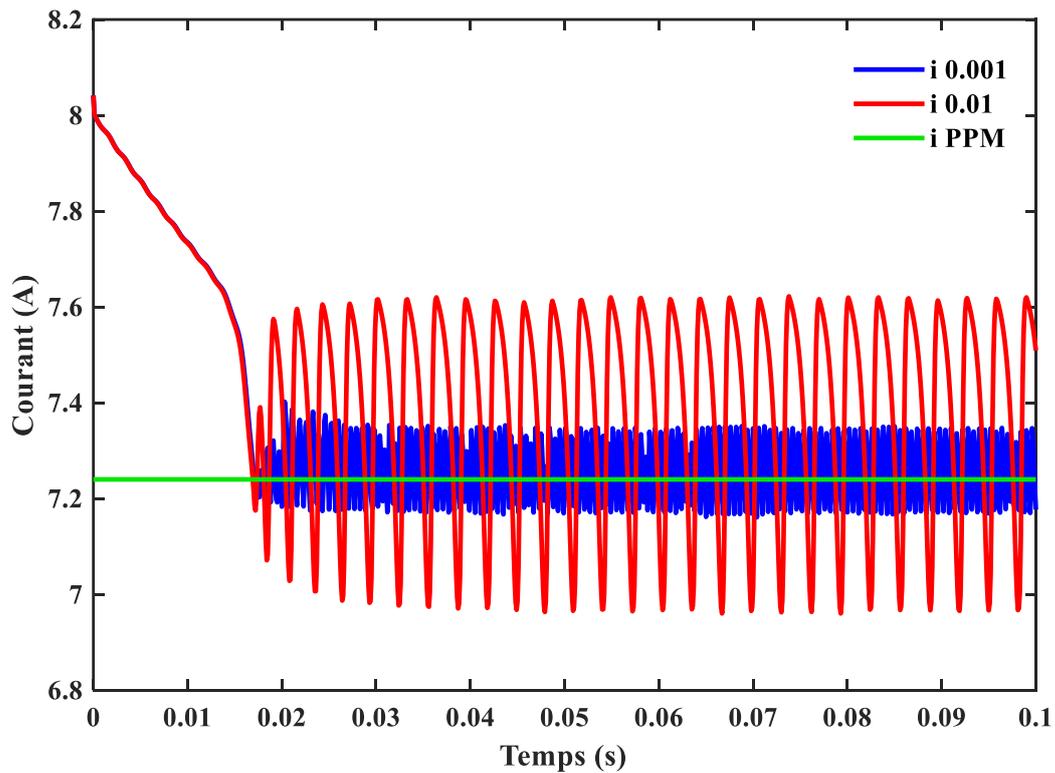


Figure IV.19: Courant du panneau PV avec la méthode Inc-Cond pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$.

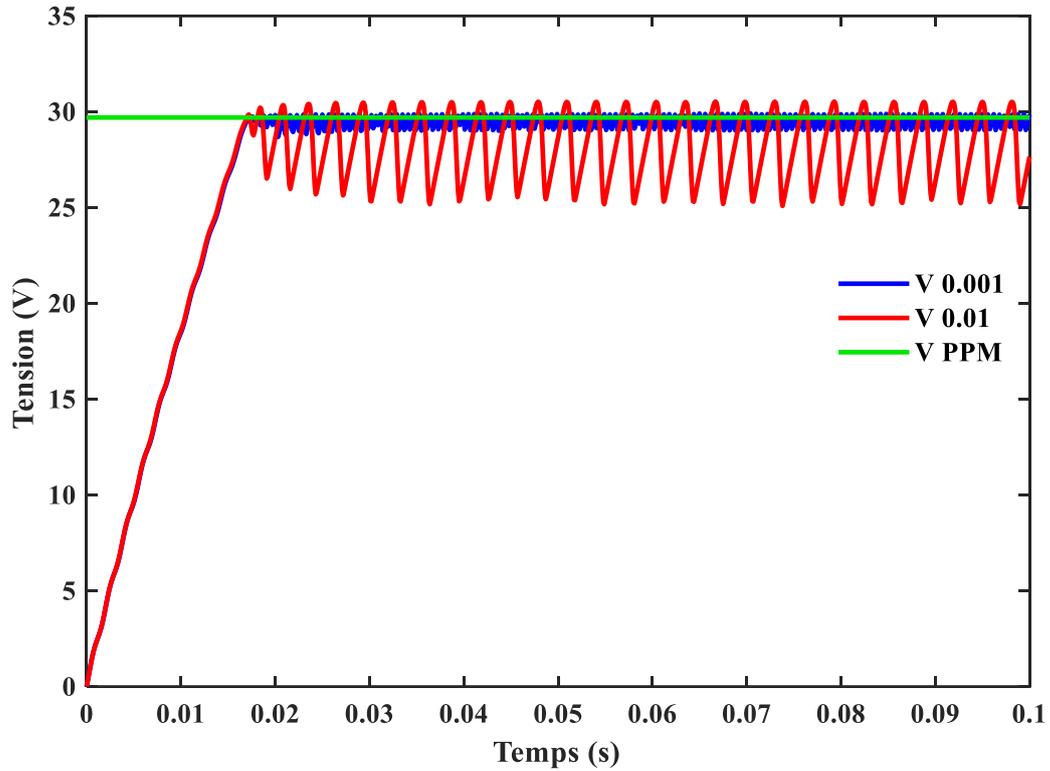


Figure IV.20: Tension du panneau PV avec la méthode Inc-Cond pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$.

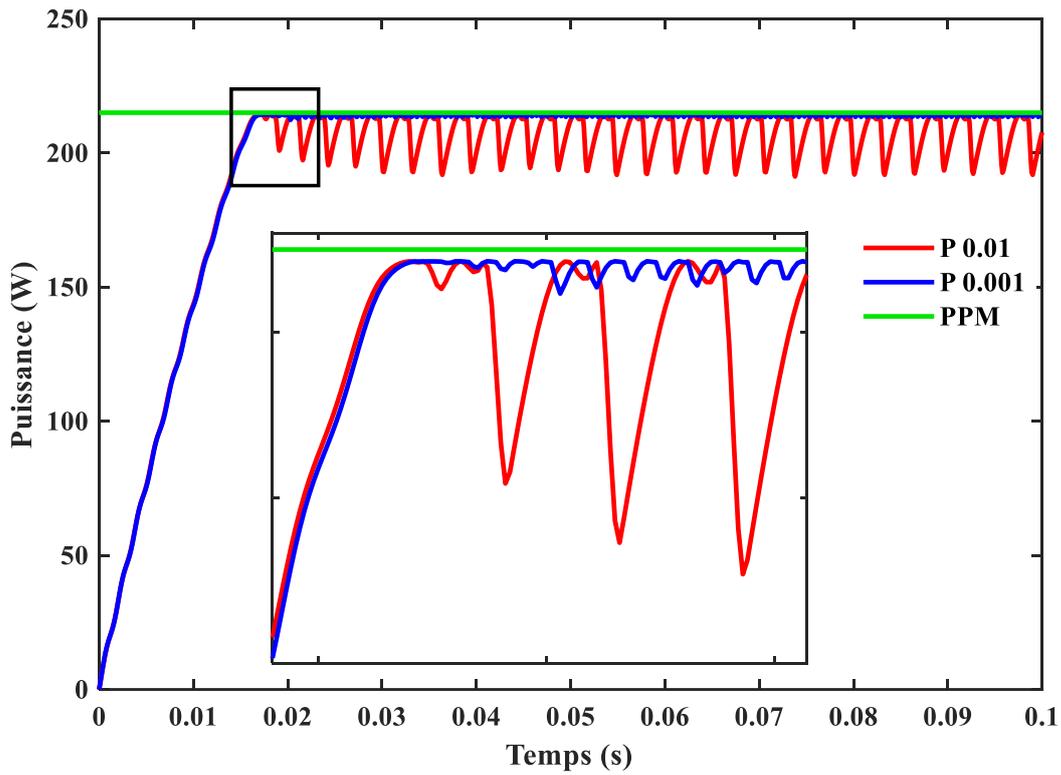


Figure IV.21: Puissance du panneau PV avec la méthode Inc-Cond pour $\Delta\alpha = 0.001$ et $\Delta\alpha = 0.01$.

Le Pas de perturbation a une influence sur les oscillations et le temps de réponse pour atteindre la tension et le courant au point de puissance maximale tel qu'il est précisé précédemment dans la technique P&O.

Les résultats obtenus pour une température constante à $T=25C^{\circ}$ et un éclairement variable [$600W/m^2$, $1000W/m^2$, $800W/m^2$] sont illustrés dans la figure IV.22 :

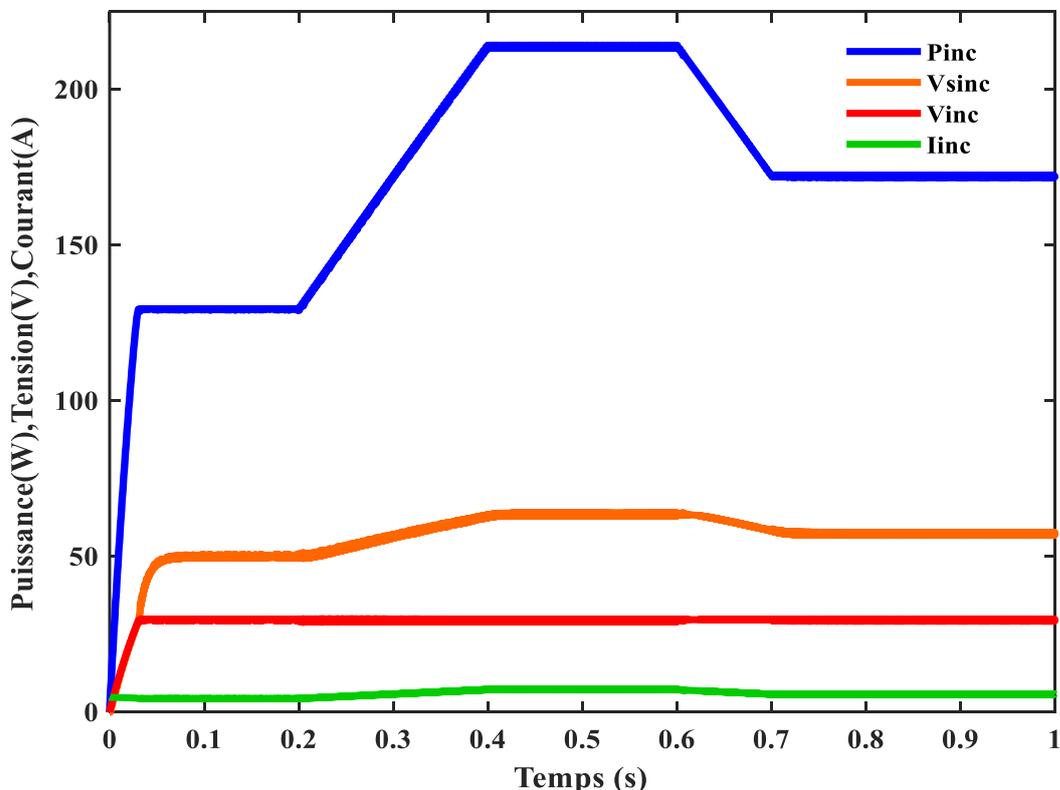


Figure IV.22: Résultats de simulation en utilisant la méthode Inc-Cond avec une irradiance variable.

La commande utilisée répond correctement aux variations de l'irradiance et le panneau fonctionne à chaque instant à sa valeur maximale de puissance.

Nous remarquons que quand l'éclairement varie, la puissance et le courant PV varient aussi dans le même sens, mais la tension PV reste presque sans changement.

La puissance du GPV va augmenter jusqu'au niveau de 215 W où elle se stabilise.

Après, on passe à l'étude de l'influence de la température sur le comportement du système PV, l'irradiance est gardé constante à $1000W/m^2$ et le même profil de variation de température a été choisi pour faciliter la comparaison. Les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure IV.23 :

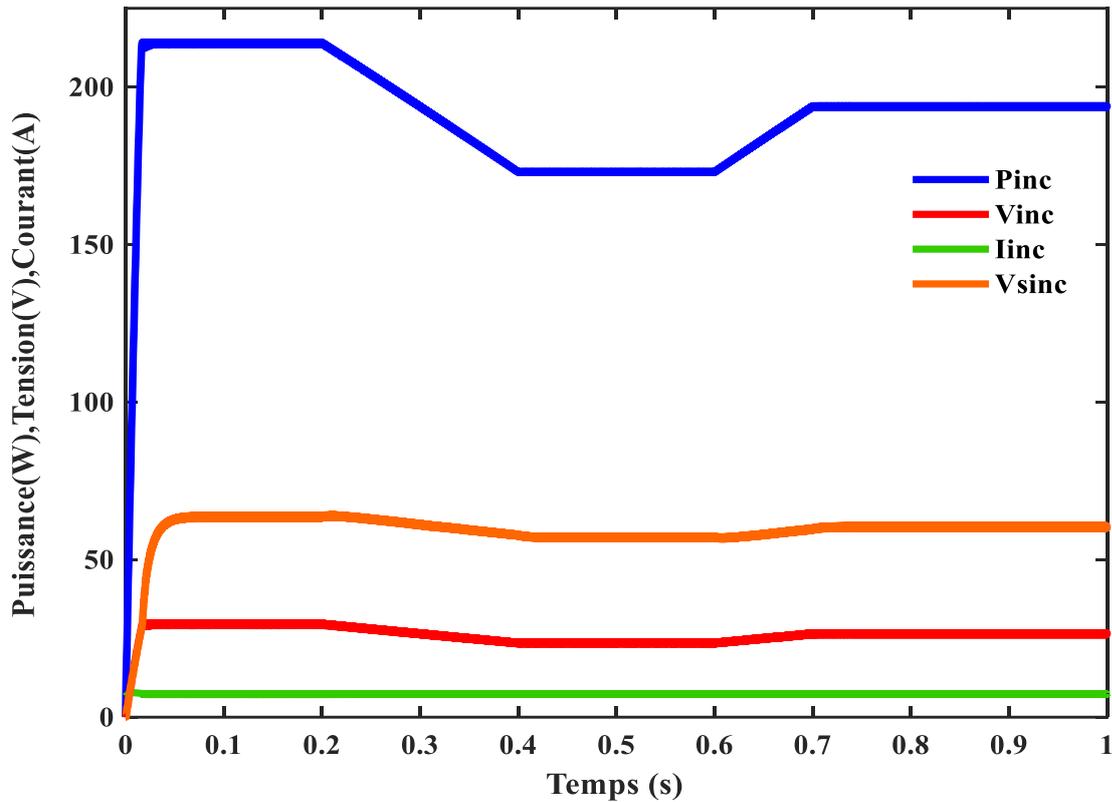


Figure IV.23: Résultats de simulation en utilisant la méthode Inc-Cond avec une température variable.

Nous remarquons que le système répond aux changements instantanés de la température, l'augmentation de cette dernière est suivie par la diminution de la puissance et de la tension ainsi que sa diminution entraîne une augmentation de la puissance et de la tension. Concernant le courant, il ne varie pas avec le changement de la température.

IV.6-Simulation du système avec la commande de la logique floue

La troisième technique MPPT utilisée est la commande par la logique floue (voir figure IV.24).

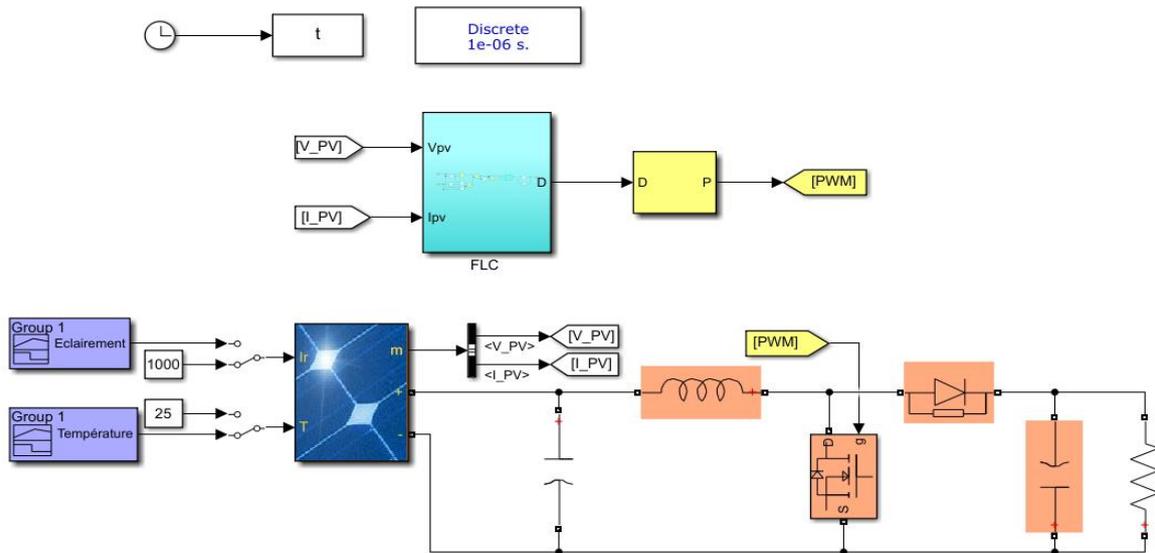


Figure IV.24: Schéma MATLAB SIMULINK avec la commande logique floue.

Comme pour les deux techniques précédentes, on commence la simulation du système PV doté de la commande par la logique floue sous des conditions climatiques standards. Et les résultats correspondants sont illustrés dans les figures suivantes :

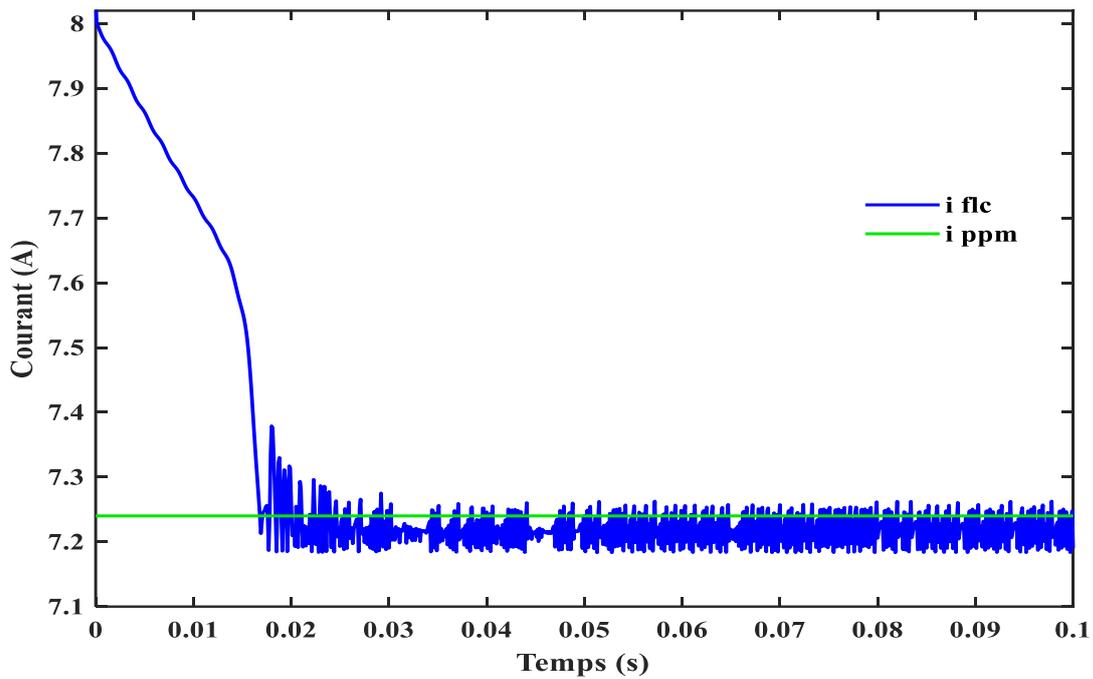


Figure IV.25: Courant du panneau PV avec la méthode FLC

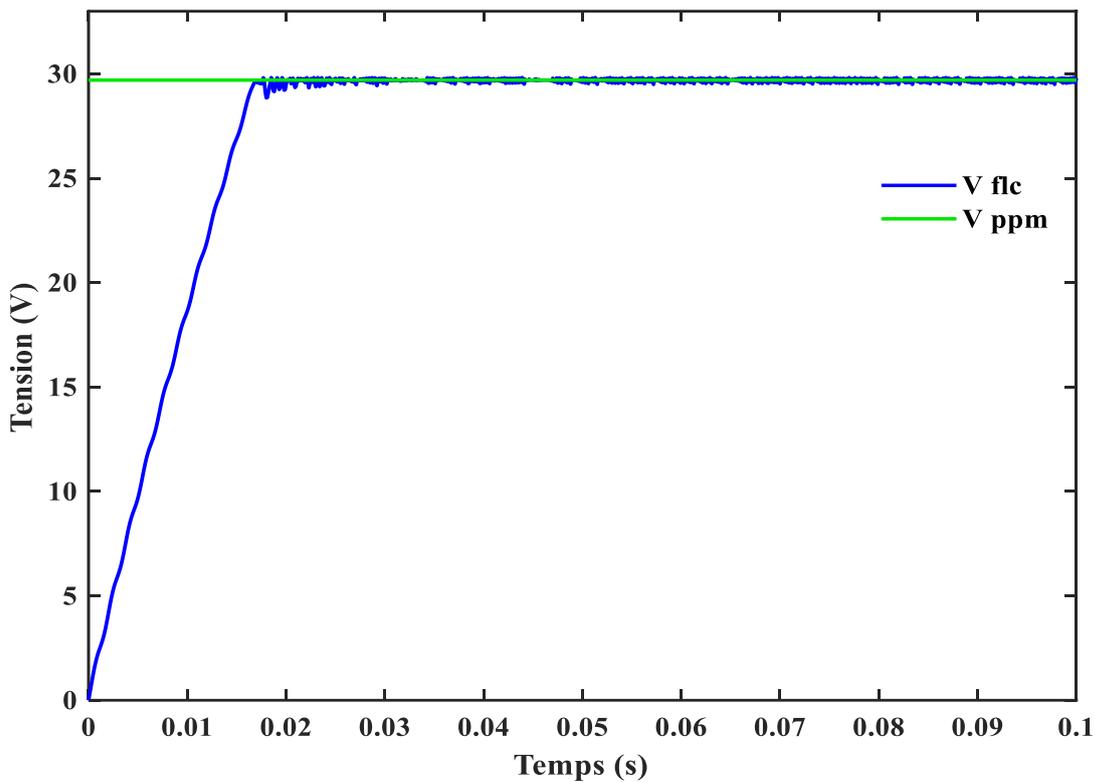


Figure IV.26: Tension du panneau PV avec la méthode FLC.

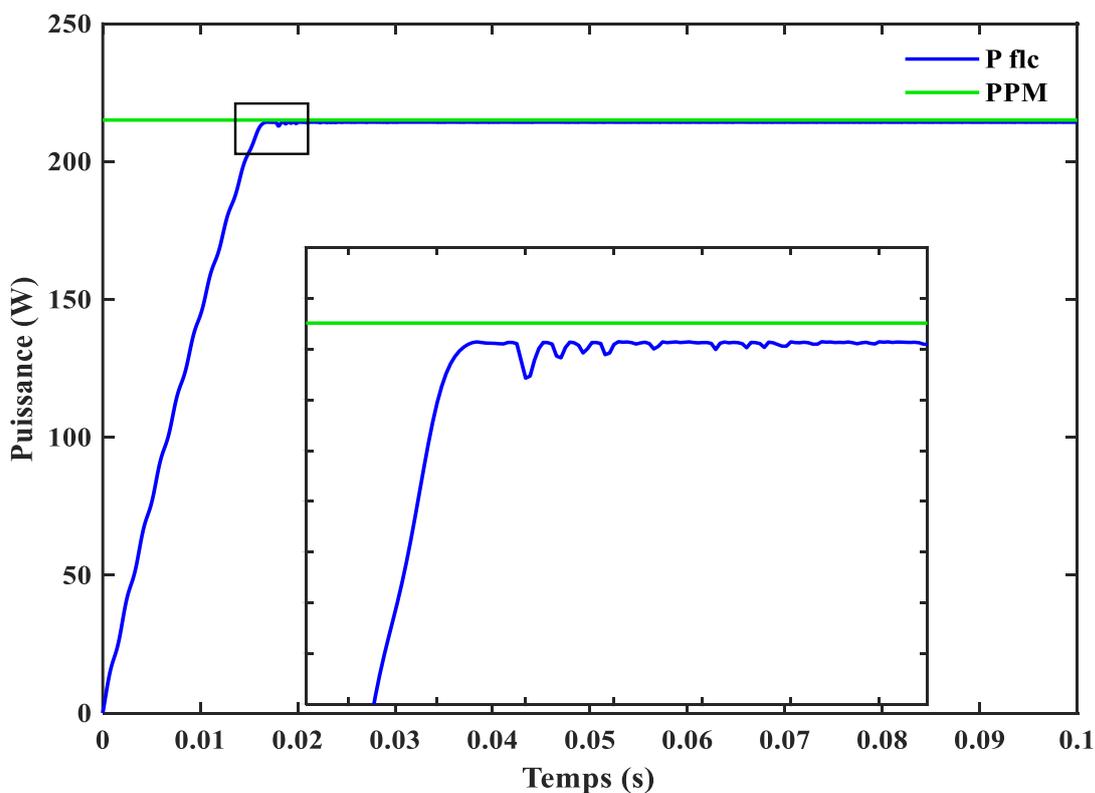


Figure IV.27: Puissance du panneau PV avec la méthode FLC.

Contrairement aux techniques simulées auparavant (P&O, Inc-Cond) celle-ci est indépendante du choix de Pas de perturbation mais nous remarquons une légère présence d'oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse rapide, cela est dû au principe complexe sur lequel la méthode est basée.

Les résultats obtenus pour une température constante à $T=25^{\circ}$ et un éclairement variable [$600\text{W}/\text{m}^2$, $1000\text{W}/\text{m}^2$, $800\text{W}/\text{m}^2$] sont illustrés dans la Figure IV.28

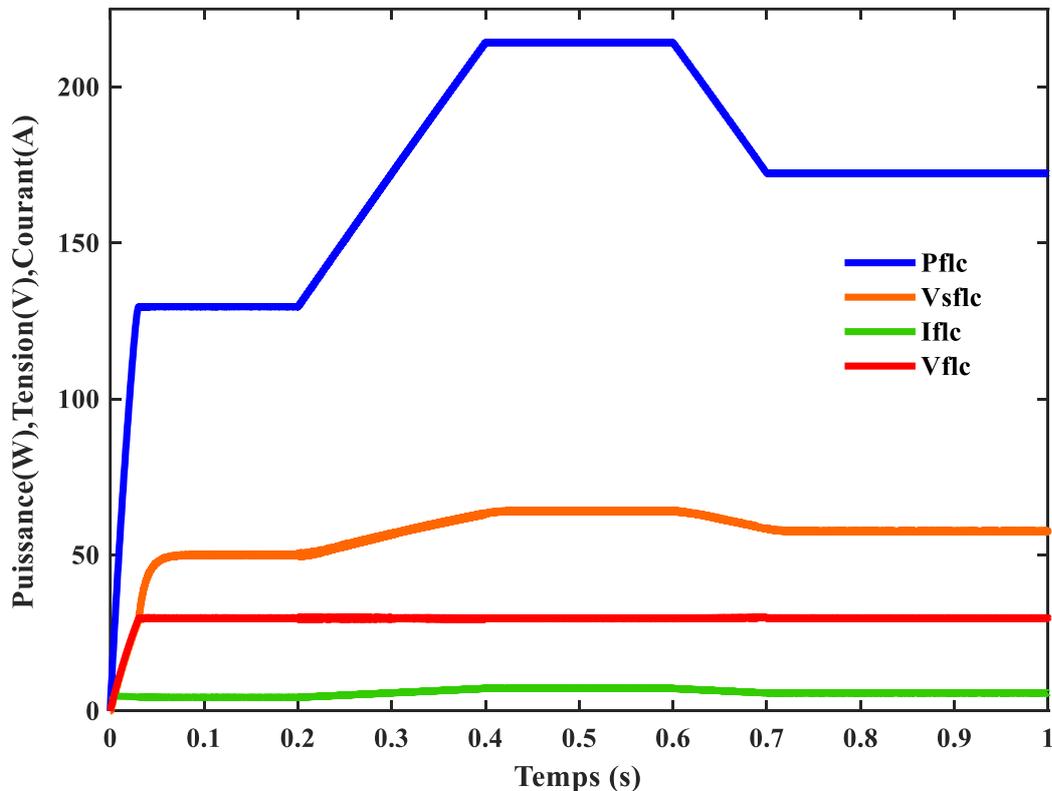


Figure IV.28: Résultats de simulation en utilisant la méthode FLC avec une irradiancé variable.

Les résultats obtenus sont pratiquement les mêmes que ceux des deux méthodes précédentes mais avec plus de précision

Et pour la dernière simulation nous gardons l'irradiancé constante à $1000\text{W}/\text{m}^2$ et nous faisons varier la température. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure IV.29 :

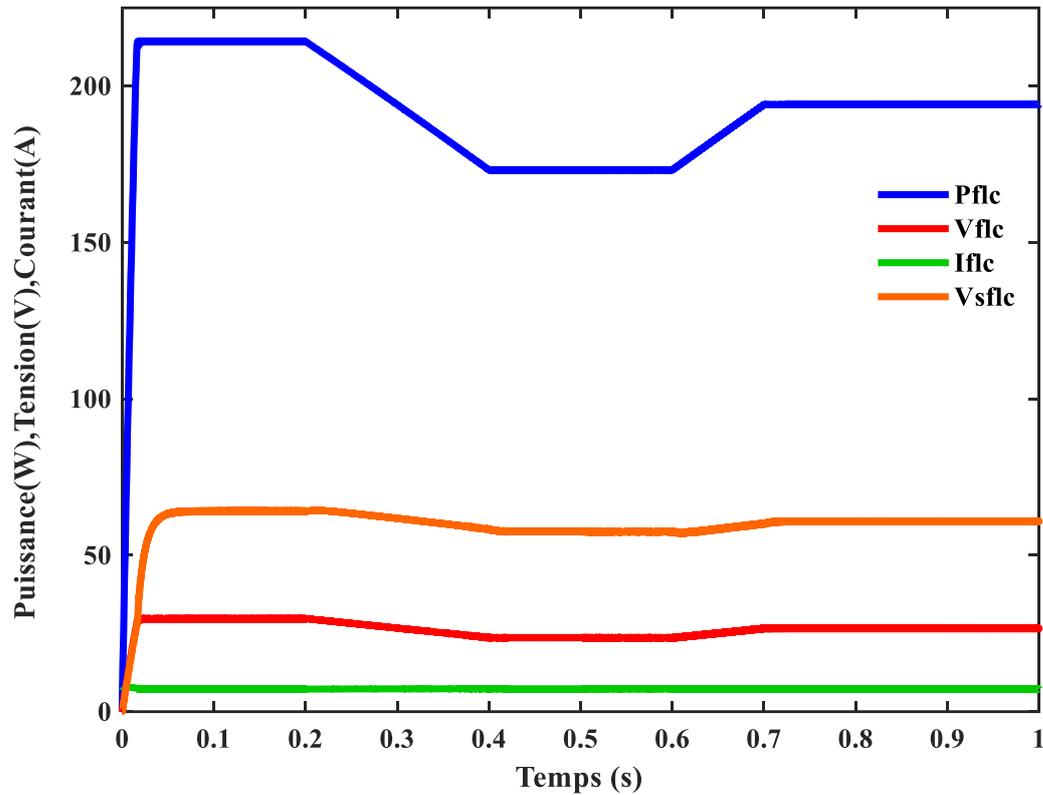


Figure IV.29: Résultats de simulation en utilisant la méthode FLC avec une température variable.

Les résultats obtenus sont pratiquement les mêmes que ceux des deux méthodes précédentes mais avec plus de précision, c'est-à-dire qu'une variation de la température (augmentation ou diminution) provoque une variation considérable de la tension (V_{pv}) et de la puissance (P_{pv}), par contre le courant (I_{pv}) varie légèrement.

IV.7-Comparaison des trois méthodes (P&O, Inc-Cond et FLC)

L'évolution de la puissance est illustrée dans les figures IV.30, IV.31 et IV.32, des zooms sont aussi prélevés et représentés dans les mêmes figures :

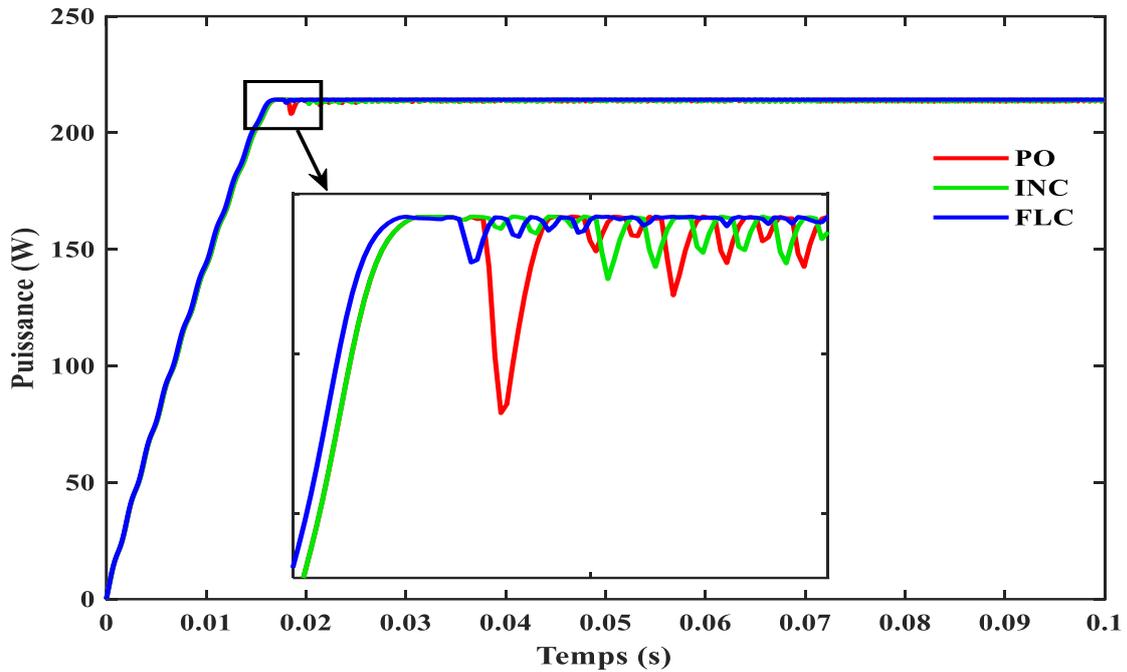


Figure IV.30: Comparaison entre les trois méthodes sous les conditions STC.

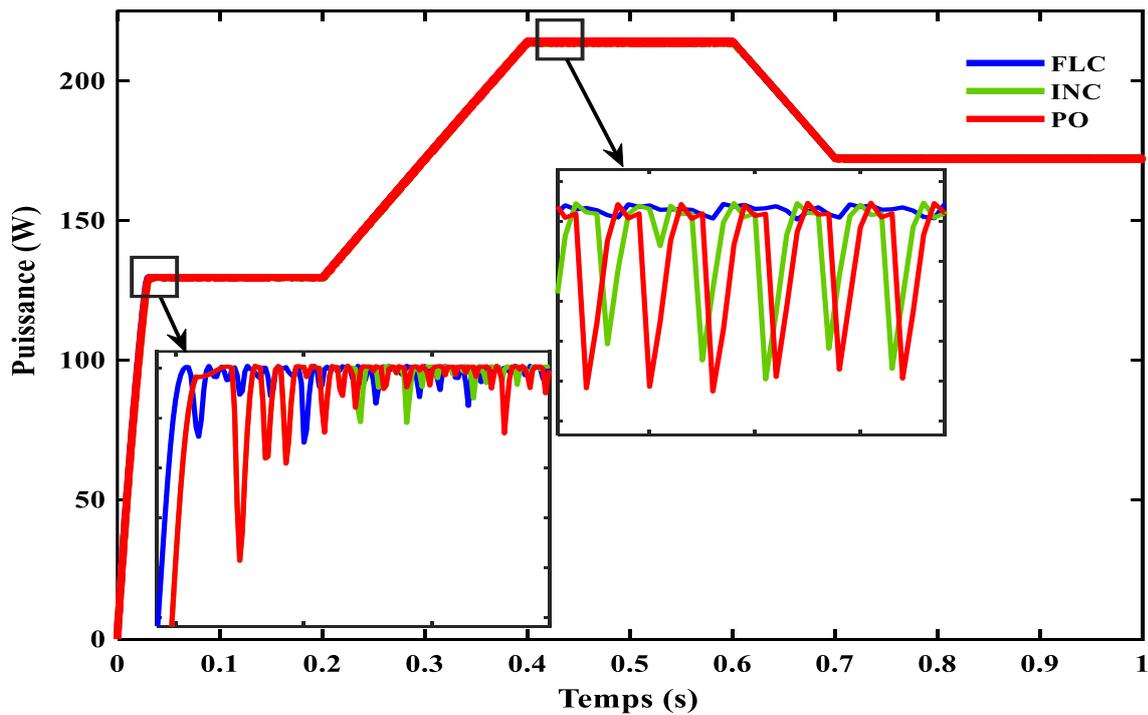


Figure IV.31: Comparaison entre les trois méthodes pour une irradiance variable.

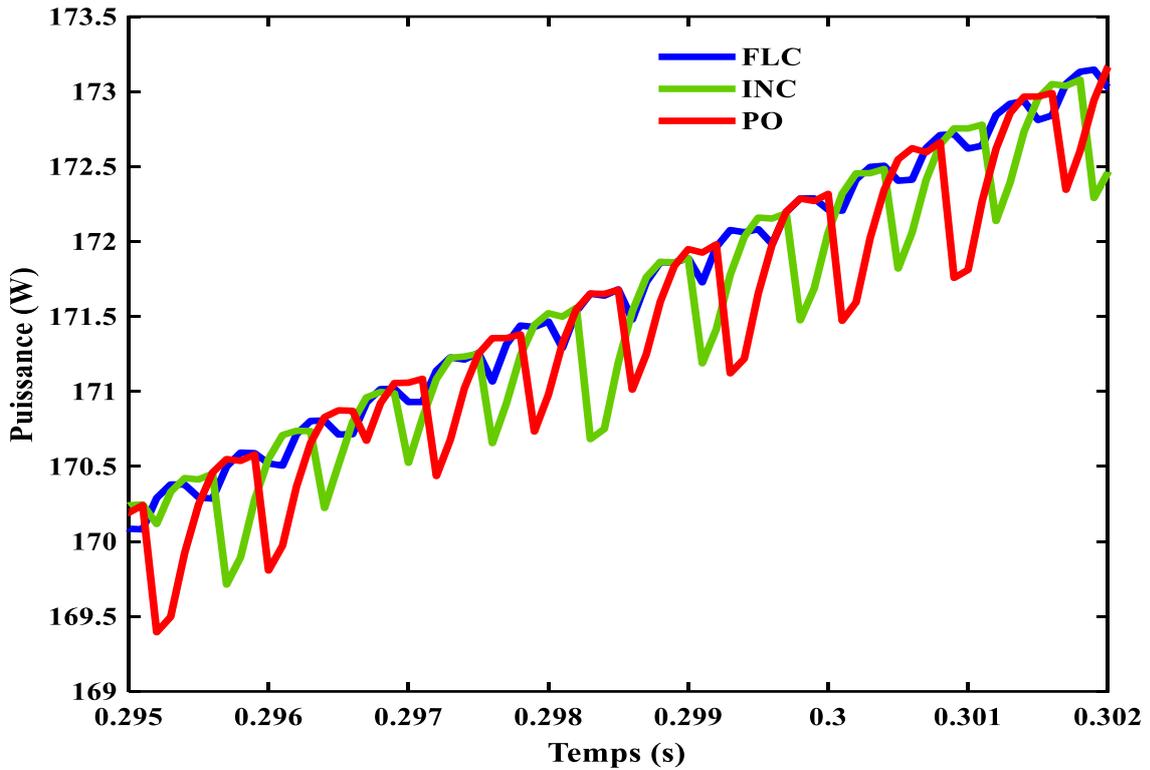


Figure IV.32: Zoom sur le régime transitoire des courbes de puissances.

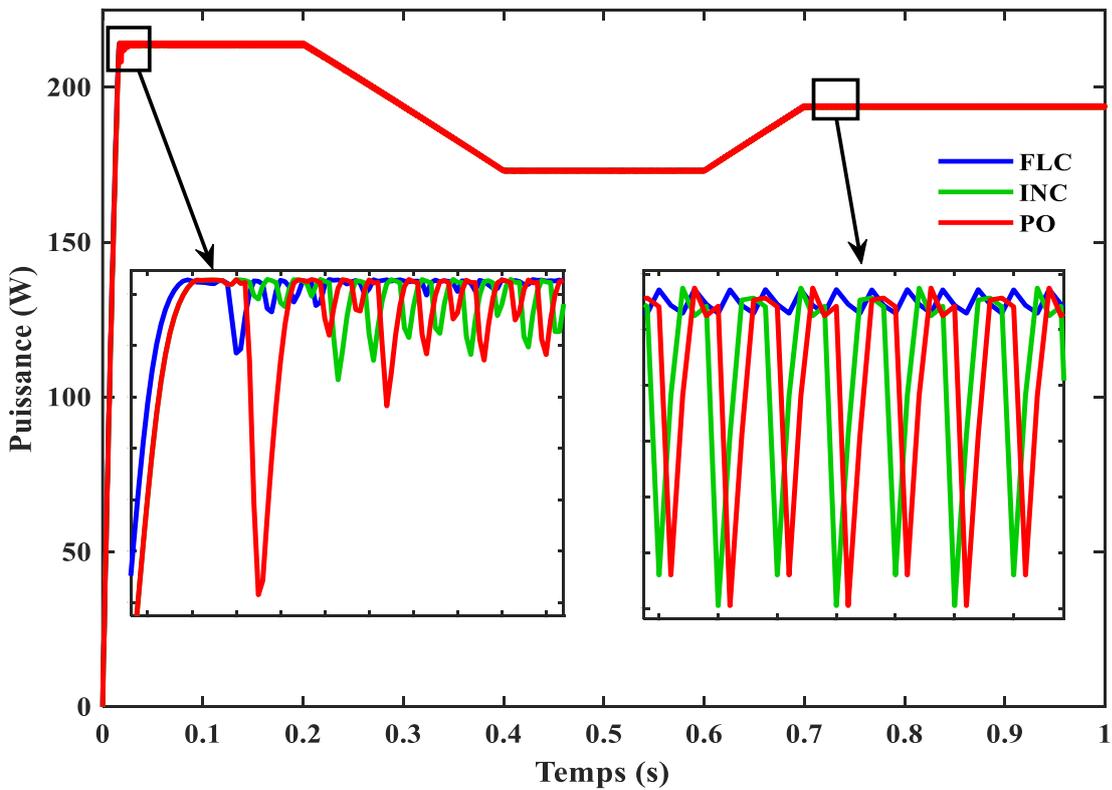


Figure IV.33: Comparaison entre les trois méthodes pour une température variable.

D'après les résultats de simulation obtenus, nous remarquons que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec de légères oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide que celui de P&O et Inc-Cond.

D'après les figures IV.31 et IV.33 nous remarquons que pour un changement d'éclairement ou de température, la technique logique floue en comparaison avec les techniques conventionnelles (P&O et Inc-Cond), atteint la puissance maximale avec un temps de réponse plus petit et des oscillations très réduites. En fait, les oscillations d'amplitude élevée de P&O et Inc-Cond pendant le changement des conditions météorologiques ne sont rien d'autres qu'un écart répété du point de fonctionnement dans les deux directions du PPM et par conséquent la MPPT doit toujours retrouver assez rapidement le PPM.

Conclusion

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, Inc-Cond et logique floue sous différentes conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur flou sont meilleurs que ceux trouvés par les contrôleurs P&O et Inc-Cond du point de vue robustesse et rapidité.

La méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en terme de poursuite du PPM, elle présente des pertes de puissance considérables dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long.

La méthode Inc-Cond est une amélioration de la méthode P&O, elle présente des pertes de puissance autour du PPM moins importantes que la méthode P&O et son régime transitoire est moins long.

La poursuite du point maximum avec le contrôleur flou a une vitesse de suivie plus rapide et un taux d'ondulation autour du PPM très petit face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire; ce qui implique une amélioration du rendement du système.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Le modèle à une diode est choisi pour modéliser le panneau étudié. Ce dernier peut délivrer une puissance maximale de 215.028 Watts. Il est simulé sous MATLAB/SIMULINK sous les conditions atmosphériques standards de test c-à-d, température de 25° c et un éclairement de 1000W/m² puis en variant ces deux paramètres.

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux techniques MPPT. Le résumé de l'aspect théorique de ces techniques pour le suivi du PPM, nous a permis de comprendre le principe de maximisation de la puissance du GPV. Nous avons commencé par la méthode la plus utilisée P&O qui a un organigramme simple à implémenter, la deuxième méthode présentée est Inc-Cond qui s'appuie sur la variation de la conductance du circuit, elle a un organigramme plus complexe, ces deux méthodes sont influencées par le pas de simulation. La troisième méthode présentée est la commande basée sur la logique floue qui donne un meilleur résultat par rapport aux oscillations et le temps de convergence.

Nous avons ensuite simulé le système PV pour les trois méthodes MPPT. Des résultats sont visualisés en premier lieu sous des conditions STC, en second lieu en variant l'éclairement, et après en dernier lieu en variant la température. Ces techniques montrent un fonctionnement satisfaisant, soit en statique ou en dynamique. La logique floue présente des améliorations par rapport aux deux autres techniques.

Nous pouvons aussi, conclure que :

- Les performances du panneau PV se dégradent en augmentant la température et en diminuant l'éclairement.
- La technique MPPT permet d'améliorer le rendement des panneaux PV

En perspectives, cette comparaison peuvent être élargie à d'autres techniques MPPT ou le travail fait peut être implémenté pratiquement.

Références bibliographiques

Références

[1] : SOYED Bilel, `étude, conception et simulation d'un système photovoltaïque,' mastère de recherche, université de carthage, esti, Tunisie, 2014.

[2] : AOUN Nouar, `étude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales,' mémoire de magister en physique, université mentouri constantine, Algerie, 2010.

[3] :M.N.MCHALIKH et CH.HMADA, ‘Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau’, Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[4] : ALAIN BILBAO LEARRETA «réalisation de commandes MPPT numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006.

[5] : Alain RICAUD , « systèmes photovoltaïques », école d’ingénieur polytech savoie, octobre 2011.

[6] : <https://www.les-energiesrenouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solairephotovoltaique/fonctionnement-cellule-photovoltaique/>, vu en mai 2021

[7] : Cyril LAHORE, “optimisation de commandes mppt ”, memoire d’ingenieur cnam, conservatoire national des arts et metiers centre regional de midi-pyrenees, le 27 novembre 2012

[8] : B. Faiza, « etude et simulation d’une commande mppt pour système pv » , memoire de fin d’études de l’universite mohamed boudiaf - m’sila, 2015-2016

[9] : Huang Bin, « convertisseur continu-continu a rapport de transformation eleve pour application pile a combustible », these de doctorat a l’institut national polytechnique de lorraine, le 14 mai 2009

[10] : F.slama « modelisation d’un systeme multi generateurs photovoltaïques interconnectes au reseau electrique », memoire de magister universite ferhat abbas – setif, le 01/04/2011

[11] : HADJI Slimane, « optimisation de la conversion energetique pour les systemes a energie photovoltaïque », these de doctorat en sciences, universite ferhat abbas setif 1, le 10 octobre 2018

[12] : M.BEDRANE farid, « etude comparative entre quelques methodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systemes photovoltaïque », memoire de master en electronique, universite abderrahmane mira de bejaia, 2013

[13] : Cylia TIGRINE et Ouerdia AIT OUALI, « étude et simulation des techniques mppt d’un systeme photovoltaïque », memoire de master a l’universite de bejaia,2018-2019

[14] : Yamina AZZOUG, « commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque », mémoire en génie électrique, à l'université du québec trois-rivières, fevrier 2008.

[15] : KRIM MED Lamine et DEBBAH Housseem Eddine, « etude et simulation d'un générateur photovoltaïque », mémoire de master à l'université de BADJI MOKHTAR-ANNABA, en juin 2018

[16] : Sarah BELAIDI, « Etude et optimisation d'une installation photovoltaïque autonome », mémoire de master à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015-2016

[17] : DJELLAL Leila Imene et Dib Yasmina, « etude comparative de deux commandes mppt appliquees a un systeme photovoltaïque », memoire de master a l'universite abou-bekr belkaid de tlemcen, le 22 juin 2017

[18] : <https://youchoz.com/installation-panneau-solaire-algerie/>, vu le 04/07/2021

[19] : ZAIEM Kamar, « Commande d'un système photovoltaïque par controleur neuro-flou réduit », mémoire de master à l'université BADJI MOKHTAR-Annaba, en 2019

Résumé

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Ce mémoire est centré sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. L'objectif principal a été de faire une étude comparative entre quelques méthodes MPPT et de trouver la plus efficace et optimale permettant ainsi d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque. Les points essentiels traités dans cette étude sont : la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le MPPT (à base de la méthode Perturbation et Observation, Incrémentation de la conductance et logique floue), l'interface de puissance (DC/DC) et la charge est réalisée. De même que leurs modèles sont développés sous Matlab/Simulink. Nous avons donc étudié puis simulé les trois méthodes. À travers les résultats de simulation, nous avons pu constater que les deux premières méthodes (P&O et IncCond) présentent des oscillations plus importantes autour du MPP et leur algorithme interprètent mal tout changement brusque du niveau de rayonnement. La commande contrôleur avec la logique floue donne de meilleures réponses en terme de rapidité et de précision.

Abstract

In the era of sustainable development, photovoltaic technology has demonstrated its significant potential as a renewable energy source. This thesis focuses on improving the performance and efficiency of a photovoltaic system. The main objective was to make a comparative study between some MPPT methods and find the most efficient and optimal as possible to extract the maximum power available from the PV array. The key issues addressed in this study are: modeling of a photovoltaic system integrated MPPT (based on the Perturb and Observe, method Incremental Conductance and Fuzzy Logic Controller), the power interface (DC / DC) and load is carried. As well as their models are developed in Matlab / Simulink. We have studied and simulated the three methods. Through the simulation results, we found that the first two methods (P & O and IncCond) have oscillations around the MPP algorithm and misinterpret any sudden change in the level of radiation. The controller command with fuzzy logic gives better results in terms of speed and precision.